地信网
http://www.as001.com

普通高等教育“十五”国家级规划教材

环境地质学

（修订版）

潘　懋　李铁锋　编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

第一章 绪 论

第一节 环境地质学的研究对象、内容与分科

一、环境地质学的研究对象与任务

随着地球环境的日益恶化和自然灾害的频繁发生，人们已经意识到所有的环境问题都与地质环境密切相关。一方面，大地构造循环、岩石循环、地球化学循环、水循环对大陆与海洋的分布和全球性气候变化起着决定性作用，控制着地貌、岩石、矿物、土壤、水体的空间分布；另一方面，人类的生存离不开地质环境，人类活动又在改变着地质环境。人类与地质环境之间存在着相互作用、相互制约的密切关系。

环境地质学是地质科学中一门新兴的分支学科，也是环境科学的重要组成部分。它是应用地质科学、环境科学以及其他相关学科的理论与方法，研究地质环境的基本特性、功能和演变规律及其与人类活动之间相互作用、相互制约的关系的一门学科。其研究对象是人类社会与地质环境组成的复杂系统。

环境地质学的任务是在分析地质环境组成要素的特征和变化规律的基础上，研究人类活动与地质环境的相互关系，揭示环境地质问题的发生、发展和演化趋势，全面评价地质环境质量，提出地质环境合理开发、利用和保护的对策与方法，为实现人类社会、经济的可持续发展提供科学依据。

二、环境地质学的研究内容

环境地质学属应用地质学，研究内容十分广泛，一切与人类有关的地质环境问题都属于环境地质学的研究范畴。但迄今对其所应研究的内容尚无统一认识。概括起来，其主要内容应包括下列几个方面。

1．全球变化的研究

全球变化研究是环境地质学研究的基础性研究工作，海洋—大气—陆地相互作用与水循环研究、元素迁移的环境地球化学研究、过去事件和作用过程的高分辨率研究、陆地生态系统对全球变化的响应、地表过程及其环境效应、晚更新世以来地质环境演化与未来生存环境变化趋势预测、人类活动对全球变化的影

地信网
http://www.3s001.com

响等问题的研究已受到国际地学界的普遍重视。

2．区域环境地质问题的研究

区域地质环境调查、评价和预测，是环境地质学研究最基本的内容之一，也是环境地质工作服务于国土整治和环境保护的基本手段，主要包括区域地质环境背景值调查、地质环境质量现状综合评价、不同比例尺的环境地质填图、各种环境地质问题的调查与研究。在此基础上，对区域地质环境的演化趋势进行预测，为国民经济规划服务。

3．资源开发环境地质问题的研究

主要研究人类与资源、地质环境之间的相互作用和相互制约的关系，研究各种资源（矿产资源、水土资源、生物资源、风景资源等）的分布格局及其与地质环境的关系，研究资源的可开采性和可利用性以及资源开发利用对生态系统物质循环和能量循环的影响，研究资源开发的综合调控机制和优化技术，保证地质环境向良性循环方向发展。

4．地质灾害研究与防治

研究在内、外动力地质作用下所产生的各种地质灾害，研究其发生机制、时空分布规律与生成关系，开展地质灾害风险评估，建立区域或重点地区地质灾害监测预警系统，制定科学、经济、合理的地质灾害防治规划与措施，制定减灾、防灾、灾后恢复与重建方案等。

5．城市环境地质研究

由于城市建设速度快、人口增长迅速，人类活动集中，对城市环境的影响作用较强，常形成特殊的环境地质问题，如‘三废’污染、水资源枯竭、地基沉陷、水资源开发引起的地面沉降和海水入侵等。因此，必须研究城市环境污染与破坏的原因、机制和防治措施，建立城市地质环境监测系统，开展城市地质环境质量综合评价和变化趋势预测，编制城市环境地质图系，提出城市环境地质问题的防治对策，为城市规划和建设提供依据。

6．重大工程建设的环境地质研究

目前，人类大规模工程建设活动对地质环境的影响越来越显著。对人口聚集、经济建设活跃地区的环境影响更为严重。因此，必须研究人类各种工程活动（建筑工程、采矿工程、水利工程等）与地质环境的相互关系，重点研究人类工程活动对地质环境的反作用，以及由此而诱发的各种地质灾害，开展地质环境容量评价、地质灾害风险评价和移民工程地质环境质量损益评价等。

7．医学环境地质研究

探索地质环境对人体健康的影响，特别要研究可能使人类某些疾病的发病率和死亡率增高的地质因素。同时，要研究各种污染物质直接或间接影响人体健康或危及人类生命的机制及防治措施。

目前环境地球化学研究已不限于地方性疾病，开始涉及人体必需元素或有害元素对生命作用的多方面研究。因此，环境地球化学、环境水文地球化学将在与生命科学的结合中不断丰富和发展。

8．生态环境地质研究

生态环境地质研究是国土资源规划与管理的基础，研究的内容具有综合性，包括地质环境的状态性质、生态地质环境对人类生存的制约作用、地质环境变化对生态系统平衡的影响和作用、人类活动对生态系统的影响、地质环境与生态系统之间的关联性规律等。

9．现代科学技术在环境地质学中的应用研究

环境地质学是一门高度综合性的交叉性新兴学科，涉及内容广、研究领域多，地质环境监测数据量大。

计算机及网络通信、卫星遥感（RS）、全球定位系统（GPS）、地理信息系统（GIS）、虚拟现实（VR）、海量数据存储等高新技术的发展，为地质灾害监测数据的自动化传输、管理、分析和可视化提供了极大的方便。利用这些先进科学技术，国际上已建立了全球环境观测系统、地震灾害监测网、全球陆地观测系统等监测网络。基于地理信息系统，建立环境地质信息数据库、研究各类环境地质信息处理技术、模拟分析各种环境地质灾害的演化过程也是环境地质学研究的关键课题之一。

非线性科学理论与方法在研究地震、滑坡、崩塌等环境地质问题的渐变性与突变性以及人类工程活动与灾害过程“自组织临界”特性的关系等方面的应用也越来越受到重视。

研究开发或引入先进的工艺技术处理城市垃圾、治理地下水和土壤污染、开展矿山环境综合整治等更体现了环境地质学的应用学科性质。

三、环境地质学的分支学科

目前，环境地质学还没有形成系统的学科体系，但作为一门综合性的科学，正向许多新的分支学科发展。

根据研究对象、内容的差异，以及学科的特点，可将环境地质学分为理论环境地质学、综合环境地质学、部门环境地质学、灾害地质学、社会环境地质学、环境地质技术方法等。如果把环境地质学作为一门应用地质学，则按地质学基础性学科的分支，环境地质学可分为：环境水文地质学、环境工程地质学、环境地球化学、环境地貌学和环境矿产资源学等。

目前，比较成熟的分支学科主要有：①环境水文地质学；②环境工程地质学；③环境地球化学；④灾害地质学；⑤城市环境地质学；⑥矿山环境地质学；⑦农业环境地质学等。其中环境水文地质学的迅速发展，又进一步分化，向更低一级的

地信网 http://www.3s001.com

分支学科发展，如区域环境水文地质学、污染水文地质学、医学水文地质学等。

随着地质学各个分支学科向环境科学的交叉渗透，环境地质学的学科体系正在不断充实和完善。许多重大环境地质问题，如区域稳定性评价、滑坡、泥石流、诱发地震、地面沉降、海水入侵、岩溶塌陷、固体废物处理等，都已形成新的专门学科。1997 年 1 月，中国科学院与国家环境保护总局联合成立了地质环境系统研究中心，将其理论研究定位于“环境动力学”，重点开展现代地质环境的形成机制和系统各要素相互制约、相互作用的规律研究。从环境污染治理、保护环境和可持续发展的角度来研究矿物资源的开发利用则形成了“环境矿物学”。

第二节　环境地质学的研究方法及与其他学科的关系

一、环境地质学的研究方法

环境地质学是在地质科学、社会科学、环境科学和现代科学技术基础上发展起来的一门新兴的交叉学科，研究内容既包括由水圈、大气圈、生物圈、岩石圈相互交汇的自然地球系统，又包括人类活动与自然系统的相互作用及其发展、演变过程。环境地质学研究所遵循的原则与上述学科密切相关，概括起来体现在研究对象的区域性、研究思路的系统性、研究方法的综合性与多样性、研究成果的实用性等方面。环境地质学的研究方法必须与上述特点和环境地质学的研究内容相适应。

1. 自然历史分析法

自然历史分析法是传统地质学的基本研究方法，它也适用于环境地质研究。环境地质学所研究的对象，即人类—地质环境体系是在自然地质历史过程中形成的，而且随着所处条件的变化，还在不断地发展演化着。通过已有环境地质问题的形成条件、机制和环境地质作用的研究，类比预测未来可能产生的变化和问题，是人类能动调控人类—地质环境体系和保护改善地质环境的前提条件。因此，“由已知推未知”的自然历史分析法是环境地质研究必须遵循的基本研究思路。

2. 地球化学法

通过对化学物质在环境中的迁移转化规律的研究以及对矿物组成和结构特征的研究，探索地质环境的变化。如水土流失现象与风化过程相关，而风化速率又同组成岩石的矿物性质和外部水热条件有关，通过对矿物成分和物理化学性质的测定和研究，可以评价风化作用的进程。又如克山病、氟中毒等疾病的地区分布与某些环境地质因素相关，研究这种特定区域地质环境中化学元素的丰度及其在各个生态环境中的运动规律，有利于揭示人体健康与地质环境间的内在

联系。

3. 系统分析方法

环境地质学的研究对象是具有复杂圈层结构、层次分明的人一地环境系统，涉及自然地球系统和人类社会经济活动等诸多方面因素。在确定各种环境要素之间的关系，综合分析影响地质环境质量的地球动力和人类活动之间的相互作用的基础上，必须应用现代数学原理和计算方法，包括灰色系统分析方法、线性或非线性系统分析方法、耗散结构论、非线性动力学等理论，系统揭示环境污染、土地荒漠化、地震与火山活动、崩塌与滑坡等环境地质问题的发生过程、机制和规律；重点剖析大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的相互作用以及人类活动对全球环境和生态系统的影响，建立表达人一地环境系统相互作用的动态模型，为生态破坏、环境污染和地质灾害等环境地质问题的预防和治理提供有效的优化方案。

4. 环境地质制图方法

环境地质问题具有空间性、动态性和综合性。分析、研究环境地质问题，全面、系统地调查收集资料并绘制专题图件是最基本的方法，包括对自然的、社会的环境要素的调查、描述、取样和监测，掌握地质环境的特征，分析环境地质问题的发生机制、分布规律，进行环境地质图件的编制等。

环境地质图不仅能表示某一时刻的环境状态，还能揭示随时间流逝而发生的环境演化趋势。因此在环境地质图中，除了应用各种颜色和线条等制图语言外，还要有数字和数字符号。这些数字和数字符号同一定的环境数学模式相关联，借助计算机技术和虚拟现实技术，建立地质环境要素数据库和图形库，可根据更新的数据随时编制动态的环境地质图，可实现环境地质问题的虚拟现实表示。

5. 模型模拟与预测方法

模型模拟是在环境地质调查、资料收集和分析测试基础上进行的研究方法。模型方法是对环境系统的结构、功能和演化特征进行模拟和仿真，主要有结构模型、评价模型、仿真模型和预测模型等。

环境地质研究还需从时间、空间和强度上对环境地质问题的演化作出预测，减轻或避免因环境地质问题而引发的灾难和损失。预测方法主要立足于以下三个方面：① 以监测为主要手段的预测预报研究；② 基于成因机理的预测预报研究；③ 数学模型模拟预测研究。预测模型大体上可分为统计预测模型、数值模拟预测模型和系统预测模型。目前，基于非线性动力学理论的突变论、混沌、分形和耗散结构论等建立起来的灾害预报模型已得到广泛的应用。

6. 环境地质评价方法

环境地质评价的目的是通过揭示环境地质问题的发生和发展规律，评价其危险性及其对人类造成的破坏损失，分析人类社会在现有经济技术条件下防灾

减灾的能力，运用经济学原理评价灾害防治和污染治理的经济投入及其环境效益、经济效益和社会效益。评价方法主要有模糊聚类法、模糊综合判别及系统分析法等。评价内容包括强度评价、危险性评价、破坏损失评价、社会经济易损性评价和防治工程评价等。

开展环境地质评价，必须建立一套符合区域环境特征的综合评价指标体系，构建科学、合理的评价模型，在环境地质评价的基础上，开展环境地质区划研究。

7. 现代科学技术方法

现代及未来环境地质学研究，更普遍采用的方法和技术手段是观测和探测技术、测试与分析技术、模型与实验技术和资料信息的计算与处理技术。卫星遥感(RS)、全球数字地震台网、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、甚长基线干涉测量技术(VLBI)、环境同位素技术以及物理、化学、生物的分析测试方法等高新技术和手段为环境地质学从宏观到微观、从定性到定量、从浅部到深部、从地球到宇宙空间的全方位多层次的研究提供了广阔的前景。

目前，人文、社会和经济科学的有关理论与方法也被应用于环境地质研究中，使环境地质研究的思想方法、理论方法和技术手段在实践中不断得以提高和丰富。

总之，环境地质学研究应以系统分析法为主线，以信息方法贯穿始终，通过重点区域实地考察、综合观测、模拟实验、剖析典型地质事件和生态环境事件等途径，直接获取环境变化的大量信息，并利用计算机进行信息加工处理，揭示地球表层系统与人类社会系统的演化规律和控制因素，阐明地表各圈层相互作用的机制，预测地球表层未来变化的趋势。

二、环境地质学与其他学科的关系

地质科学以研究岩石圈作为主要对象，环境地质科学不仅研究岩石圈，而且还要研究岩石圈与大气圈、水圈、生物圈和“智慧圈”的相互关系。地质环境既受自然环境（主要包括大气环境、水环境与生态环境）的制约与影响，又与人类活动密切相关。所以，环境地质学既要研究地质环境与自然环境的相互关系，还要研究地质环境与人类或人类社会，即与社会经济系统之间的相互影响与相互作用。由此可见，环境地质学包括自然科学与社会科学的许多领域，涉及的范围非常广泛，而且错综复杂，因此，必须应用现代科学的新理论、新方法，如系统论、信息论、控制论，以及相应产生的系统科学、信息科学和现代应用数学等，建立新的理论体系。

环境地质学作为地质科学中的一门新兴学科，是地质科学与环境科学两者互相渗透重新组合而形成的一门边缘学科。地质科学中的地层学、岩石学、地质构造学、第四纪地质学、水文地质学及工程地质学等的基本理论，仍然是环境地

质学的基本理论。但要解决环境问题，地质科学的基本理论还必须与环境科学的基本理论，特别是环境质量的基本理论和有关监测系统的基本理论，相互融合起来，形成新的理论基础。这就涉及环境科学中有关环境管理学、环境控制学、环境监测学、环境工程学以及环境经济学等学科的基本理论，这也是目前建立环境地质学新理论体系中的一个薄弱环节。

由于环境地质学研究内容的高度复杂性，特别是许多有关因素的可变性与非确定性，所以既要应用复杂巨系统的理论进行系统分析，纳入系统工程的轨道，还要应用和引进国外正在发展中的非线性动力学以及耗散结构学等现代复杂理论，来创建新的理论体系，同时还需要配合诸如数值模拟、物理模拟等新方法和遥感、同位素等技术，建立遥控监测系统、数据库系统、专家决策系统等，开展环境发展趋势的预测预报。总之，环境地质学是正在迅速发展中的一门新学科，需要在认真总结实际经验与吸取最新理论的基础上，创立环境地质学的理论体系，逐渐形成一门完整的、系统的、独立的新学科。

第三节　环境地质学的发展简史

环境地质学成为一门独立的科学，虽然还只有 20 多年的历史，但是它的孕育过程却是源远流长，由来已久。人类在漫长的发展过程中，主要是通过生产和消费活动而逐渐扩大和加深自己对环境的认识，明确自己与环境的关系，并以日益丰富的知识充实环境地质学的内容，使它日趋完善地成长起来。

一、环境地质学的孕育阶段

人类是自然环境的产物，同时又是自然环境的改造者。随着时代的进步，人类开发、索取、改造自然的活动不断增长，产生的环境地质问题也就越来越多，对人类的生命财产和生存环境带来了灾害，甚至破坏了自身的生存环境。

在开发地质环境和与地质环境恶化的现象作斗争的过程中，人们不断积累知识、总结经验，逐渐提高了对地质环境的认识，萌生了合理开发环境和保护环境的思想。中国古代大禹治水，开凿南北大运河，引浊放淤、排沟筑岸、建造台田等，都是合理开发利用地质资源和保护地质环境的典型范例。公元前 3 世纪荀子在《天论》一文中提出“从天而颂之，与制天命而用之”，即人可以征服、利用自然界，阐述了“制天命”的观点。

欧美部分国家在产业革命后，社会经济得到了很大发展，环境问题也随之大量涌现，引起了科学家的重视与警惕，开始了对环境和环境地质问题的研究与探索。

19 世纪末，法国人文地理学家布拉什在其所著《人地学原理》中指出，人是

一个积极的因素，自然环境提供了可能性的范围，而人类在创造自身的居住地时，又反过来按照他们的需要、愿望和能力来利用这种可能性。美国学者马什在1864年出版的《人和自然》一书中，论述了人类活动对森林、水体、土壤的影响，并呼吁开展自然保护运动。英国利物浦大学著名人文地理学家罗士培（P. M. Roxby 教授(1939）则引用了“协调”一词，“协调”既意味着自然环境对人类活动的限制，也意味着人类社会对环境的合理利用与保护。恩格斯在《自然辩证法》中也阐述了合理开发和保护自然环境的基本思想及两者的辩证关系，告诫人们必须节制开发活动，协调好人与自然环境的关系。

二、环境地质学的创立与发展阶段

随着环境问题日渐增多和突出，进一步引起了国际社会的重视。1972年联合国召开了第一次人类环境会议，发表了《斯德哥尔摩人类环境宣言》，大大促进了环境调查研究工作的进程和环境科学的形成与发展。20世纪70年代以来，中国的环境问题日益突出，中国的学者们也非常重视环境问题，先后编著出版了《环境科学》、《环境科学基础知识》、《环境学概论》等一系列著作。

地质环境是自然环境的主要组成部分之一，环境地质学是环境科学的组成部分，随着环境科学的发展，环境地质学亦得到了同步的发展。Hackett T E (1962) 最早提出“环境地质学”一词，并很快被广泛接受，出现了专门性文献。Moser P H 在1969年指出：“环境地质是应用地质学、水文地质学、工程地质学、地球物理学和其他相关科学的原理，来研究一个地区资源如何为人类最大利益而得到发展”。1972年英国沃德和美国杜博斯发表的《只有一个地球》一书，从地球的未来前途出发结合人类社会、经济、政治等方面讨论了环境问题，呼吁人们明智地管理地球。进入20世纪80年代，环境地质学在西方国家已初步形成为一门比较系统的学科，如美国 Keller E A、Coates D R、Lundgren L W、Taak R W、Montgomery C W 等人都曾著过《环境地质学》,其中 Keller E A 和 Montgomery C W 的《环境地质学》已分别出版了第5版和第7版。国外这些版本的《环境地质学》，内容广泛，既有属于普通地质学的内容，又有飓风、洪水等自然灾害学范畴的内容。

随着国内大量环境地质问题的出现，地质环境开发和保护方面要求的提高，以及国际环境保护交流工作的加强，中国环境地质学也开始创立并得到发展。20世纪80～90年代，环境地质学的理论与方法在中国进入了深入研究、讨论阶段。刘培桐、关伯仁于1980年提出：“环境地学是环境科学的一个分支，以人一地系统为对象，研究其发展、组成和结构、调节和控制、改造和利用的学科”。刘东生、万国江等于1980年提出：“环境地质学是研究人类活动和地质环境相互作用的学科，是地质学的一个分支，也是环境地学的组成部分”，“研究内容包括自

然和人为引起的环境地质问题”。张宗祜于 1988 年提出：“环境地质学应当是研究人类技术经济活动与地质环境相互影响的学科”。“环境地质工作中，要考虑自然一技术系统的空间范围的界限，考虑决定工程与地质环境相互作用的可能范围”。陈梦熊于 1995 年提出：“环境地质科学是地质科学与环境科学两者互相渗透重新组合形成的一门新的边缘学科”。

李鄂荣等(1991)，徐增亮等(1992)分别以 Keller EA 的《环境地质学》(第三版)(1976)为蓝本编译出版了《环境地质学》;李铁锋等(1996)编著出版了《环境地学概论》，潘懋等(1997)编著出版了《环境地质学》。近几年，戴塔根等(1999)、朱大奎等(2000)、吴志亮等(2001)相继编著出版了环境地质学教材。这些教材从不同侧面广泛探讨了环境地质学的基本概念、学科特点、理论体系、研究内容和对象等内容，使环境地质学逐渐发展成为一门比较完整的独立学科。但上述教材各有特色，并具有行业特点，如戴塔根等的环境地质学教材主要适用于地矿工程专业的学生，朱大奎等的教材更适合地理专业的学生，潘懋等编著的教材侧重于地质类专业的学生。

目前，中国在环境地质研究方面已开展了大量工作，取得了许多重要的成果。中国地质学会于 1987 年 3 月正式成立了环境地质专业委员会，并召开了全国第一届环境地质学术交流会议，着重对区域环境地质、城市环境地质、地震地质灾害、环境水文地质、环境地质制图以及新技术、新方法在环境地质调查研究中的运用等进行了交流、讨论。自 20 世纪 80 年代中期开始，中国专门性或与环境地质有关的调查研究工作得到了广泛的开展，取得了大量成果，如晚更新世以来地质环境演化趋势的基础性研究、区域性环境地质图系编制和论证、沿海经济发达地区及城市环境地质调查研究、水资源开发引起的环境地质问题研究、农业环境地质调查研究、重大或专项工程地质调查研究和地方病调查研究等。

在人才培养方面，许多高等院校的相关专业纷纷调整专业方向，注重培养环境地质理论研究和工程实践的人才，传统的水文地质、工程地质工作多数已被环境地质工作所代替，具有中国特色的环境地质学理论体系已基本形成。环境地质学在中国地球科学人才培养中占有重要的地位。

第二章　环境地质学的基本理论问题

第一节　地质环境的内涵与基本特征

一、地质环境的内涵

所谓地质环境，系指岩石圈及其表层风化产物，包括地球岩石圈和表层风化层两部分地质体的组成、结构和各类地质作用与现象。地质环境是具有一定空间概念的客观实体，它包含物质组成、地质结构和动力作用三种基本要素。地质环境的上限，是地表或岩石圈的表层；对地质环境下限位置的确定，目前有多种意见，大致可分为两类：一类是从人类活动对环境影响的角度衡量，把下限定为人类的科学技术水平和生产活动的能力所能达到的地壳深部；另一类则是从环境对人类和其他生物的适宜性来衡量，其下限达到与区域地壳稳定程度有关的地壳深部甚至地幔。

地质环境是人类生存发展的基本场所，它构成了人类生活和生产条件的客观实体。它对人类的作用可分为地质资源开发与地质体的利用两大方面。地质资源开发包括人类开采地下固体矿产、石油和地下水以及土地资源的开发利用；地质体的利用主要是指人类对地质体的空间利用以及地质体的物理、化学特征及其对人类的适宜性等，人类在地球表面修建楼房、筑路架桥、地下开挖隧道、地质景观欣赏等。人类依赖地质环境生存和发展，同时人类活动又不断地改变着地质环境的化学成分和结构特征。

地质环境与大气、水、生物，甚至宇宙空间也有密切的关系，它与大气圈、水圈和生物圈及宇宙环境进行着密切的物质交换和能量流动。这种物质循环与能量交换的关系常称为“地质作用”，它们之间是一个相互开放的系统。广义而言，地质环境的空间范围包括岩石圈、水圈、生物圈和大气圈的下部，这些圈层相互影响、相互作用，彼此之间进行着频繁而剧烈的能量迁移和物质交换。

随着人类对资源需求的剧增以及科学技术日新月异的进步，人类活动对地质环境的影响和作用越来越大，而地质环境对人类活动的干扰则表现出两种不同的反应趋势——良性反应（正环境效应）和恶性反应（负环境效应）。人类活动的方式以及地质环境的反馈作用共同构成了环境地质学的重要理论与实践

基础。

二、地质环境的基本特征

（一）地质环境的容量

地质环境的容量，即某个特定地质空间可能承受人类社会经济发展的最大潜能。人类所有生产和生活的消费物资，都直接或间接地取自地质环境；人类在生产和生活过程中产生的一切废弃物，又都直接或间接地排放到地质环境之中。所以，地质环境的容量，可以用特定地质空间可能提供人类利用的地质资源量和对人类排放的有害废物的容纳能力来评价。

地质资源，指地质环境系统内可供人类利用的一切物质。随着科学技术的进步，这种资源的概念在不断地发展。在现阶段，至少有下列几个方面：①矿物资源；②能源资源；③建筑材料资源；④土地资源；⑤地下水资源；⑥地质景观资源；⑦地质空间资源等。这些地质资源，绝大多数是不可更新资源，使用后不能再生。水资源虽能得到更新，但其年可用量也是有限度的。所以，滥采、滥用地质资源，必将带来严重的后果。

地质环境对人类排放的有害废弃物的容纳能力，取决于地下水、土壤和岩石对污染物的净化能力。水体、土壤、岩石对污染物质具有自净功能，通过这种自净功能，地质环境对外来的污染物质进行内部消化，起到自动调节的作用。

(二)地质环境的质量

地质环境的质量，在一定程度上由地球物理因素和地球化学因素决定，其好坏对人类的生活和社会经济的发展都会有很大的影响。地质环境质量的好坏，可以由以下几个方面的条件来评定。

1．自然地质条件的稳定性

自然地质条件是决定地质环境质量的主要因素，其中最重要的有：地质构造的稳定性、地形稳定性、地基稳定性、岩层性质以及地质灾害发育情况。

2．原生地球化学背景

人类生存于地球化学场的作用下，钙、镁、钾、钠、碳、氮、氧、磷等元素及某些微量元素是人体和其他生物体发育所必需的。环境中某些元素含量过高、过低或存在对人体有害的其他元素，均会给人的健康带来危害。所以，环境的地球化学背景值是地质环境质量的一个重要标志。

3．地质资源的丰富程度

矿物资源、能源资源、土地资源、地下水资源、建筑材料资源和地质空间资源等是人类赖以生存和发展的重要物质基础，人们的生活水平与地质资源的丰富程度及其可用价值的大小密切相关。矿产资源、能源资源和地下水资源等资源的储量和开采价值也是社会财富的一种衡量指标。没有可供人类利用的各种地

质资源，现代人类文明是不可能出现的。

4. 抗人类活动干扰的能力

环境一方面为人类活动提供空间及物质能量，另一方面容纳并消化其废弃物。人类活动超出环境系统维持其动态平衡的抗干扰能力时，就产生种种环境问题。抗干扰能力差的地区，地质环境质量差，人类经济活动稍有不慎，就可以使地质环境状况更加恶化。例如，中国西北地区，气候干旱、植被稀少，人类活动的轻微干扰即会出现荒漠化等环境恶化的现象；处于半干旱气候条件下的华北平原，如农田水利活动不当，很容易加剧土壤盐渍化，地质环境质量较差。

5. 受污染或受破坏的程度

人类对自然界的干扰日益扩大，地球上几乎已不存在未受人类活动影响的区域。天然的地质环境越来越少，人为因素对环境的影响越来越大，评定地质环境质量的好坏，必须考虑人为因素的干扰程度。废弃物导致的环境污染、大型工程活动对生态环境的破坏均不同程度地改变了地质环境质量。

地质环境的整体质量取决于各组成要素的质量。但在评价地质环境质量的优劣时，除考虑各要素的平均状况外，还应找出质量最差的要素，并做出评价。因为，人类活动常常使环境质量最差的因素首先受到影响，从而引起地质环境的变异。

(三)地质环境的相容性

地质环境的相容性是指地质环境对人类施加的某种干扰的适应性。地球上各种不同的地质环境，其发生、发展受地质构造、岩性、水文、地质作用和地形条件的控制。每一类地质环境都是一种具有自身特征和功能的地质空间，它们对各类工程活动的相容性是不一致的。因此，对人类活动的干扰，表现出不同形式的反应。

地质环境对人类活动的干扰有两种不同的反应趋势：良性反应和恶性反应。良性反应即人类活动的正环境效应，主要表现为在人类活动作用下，地质环境向着稳定有利的方面发展。如在潜水位高的沼泽地和盐碱地上进行人工排水，降低地下水位，加上施用有机肥料等措施，盐碱地可以逐渐改变成好地。而在有些地区，人类活动不当，地质环境将出现恶性反应，即人类活动的负环境效应。如在中国的黄土高原地区，脆弱的地质环境受到盲目采伐、开垦坡地、破坏植被等人类活动的作用，会加剧水土流失，使环境向着不毛之地的方向发展。应当指出，在同一类地质环境系统内，不同的工程活动，可能产生两种截然不同的反应趋势，这取决于人类活动与该地区各种环境要素之间的作用性质。

(四)地质环境的反馈作用

地质环境的反馈作用，即地质环境受人类活动干扰后对这种干扰做出某种反应的作用。地质环境的反馈作用是环境地质学的重要理论基础。

地质环境较容易受到人类活动的影响。当人类活动的规模和强度超过了地质环境的承受极限后，必然导致地质环境发生变化，对人类活动做出反应。其实质就是地质环境在人类作用力影响下，对物质和能量的输入与输出的动态平衡关系进行调整。当人类作用力不大时，通过地质环境内部的调节能力，对外界的冲击进行补偿和缓冲，就可以完成这种调整过程，维持地质环境系统的稳定性，表现为不易觉察的“隐蔽的”形式；当人类作用力增大，超过其自身的调节能力时，地质环境只有通过剧烈的变动，才能建立起新的平衡关系，反馈就以“显露的”形式表现出来。

研究地质环境的反馈作用，是准确预测环境变化的基础，是环境地质学的核心问题。但是，人们至今对地质环境系统各要素之间的相互作用与相互依赖的复杂关系、能量的转换、平衡关系等反馈作用机制，尚未完全认识，有待进一步探讨和研究。

第二节　环境地质作用

一般而言，环境地质作用主要指人类与地质环境间的相互作用，具体包含：①各种自然地质因素、自然地质现象对人类的作用，即自然地质作用；②人类活动对地质环境的作用与反作用，即人为地质作用及上述地质环境的反馈作用。本节重点讲述人为地质作用以及人地关系问题。

一、自然地质作用

传统地质学认为，自然地质作用是地质动力引起的，两种基本类型的作用——内动力地质作用和外动力地质作用，推动着地壳的运动和发展。内动力地质作用有构造运动、岩浆活动、地震以及变质作用；外动力地质作用包括风化、剥蚀、搬运、沉积和成岩作用等。这两种基本地质作用控制和改变着地球表面的结构和形态。

二、人为地质作用

在人口剧增、社会生产力和科学技术飞速发展的情况下，地球表面受到了人类活动的强大冲击，人类活动已成为使地球表面发生变化的又一动力，产生了其规模与速率都可以同天然地质作用相比拟的人为地质作用。

人为地质作用是环境地质学的重要研究内容。人类活动的地质作用意义，随着社会经济的发展和科学技术的进步也不断扩大。当前条件下，人为地质作用的表现形式主要有以下几个方面：

1. 人为剥蚀地质作用

矿山剥离盖层、工程挖掘土石、农业平整土地等，都在很大程度上破坏地壳组成物质，改变地表形态，其地质效应同天然外动力引起的剥蚀作用完全一样。在这些区域内，人为剥蚀作用的强度与速率甚至要比天然剥蚀作用强大得多。

2．人为搬运地质作用

人类在工程活动中，每年要移动许多地壳物质，有的是为了某种需要利用运输工具加以搬运，如填筑地基、采矿、场地开挖等；有的是由于人类对资源的不合理开发活动，造成地表物质的迁移，如盲目砍伐森林、过度放牧等引发的水土流失。据估计，人类活动每年搬运的物质总量已超过了全球水流的搬运强度。天然水流的搬运作用，一般将风化产物从上游搬向下游，所搬运物质的大小，随水流携带能力的消耗而变化。人为搬运作用可以把物质从低处运到高处，其物质大小和流向一般随需要和人的意志而变化。

3．人为堆积地质作用

人类活动在地球上形成了许多人工堆积土，特别是在城市地区、滨海地区，这种人工堆积土的分布面积和厚度，可以达到相当大的规模。如日本东京港地区的大片土地即由人工填积而成，填地范围近 $40km^2$，扩大了陆地面积。

4．人为塑造地形作用

经济建设和工程活动使地表形态发生了很大的变化，形成了许多人为地貌景观,如农业上平整的土地、梯田,水利建设中兴建的水库、运河、灌溉渠系 采矿堆积的尾矿废石堆,采矿场陡壁斜坡、矿坑、陷落漏斗 城市区的人工湖、假山 道路路堤、路堑 海岸地带的防潮大堤、人工岛 围海、围湖造地,等等。其规模和速率，常常比天然外动力作用对地形的塑造还要巨大。

5．人类活动的其他地质作用

人类活动还可以使地壳表层内的地球化学场、应力场、水动力场、热力场等发生改变，产生其他新的地质作用和地质现象。例如，在长期大规模强烈开采地下水的地区，由于开采区含水层压力的降低，导致含水层发生新的压密作用，引起地面沉降，在岩溶发育区发生地面塌陷。水动力条件的变化，引起岩石化学性质与物理性质的变化和水化学性质的改变。大型水库、深井注水等人类活动，足以促使某些断层活化，引起地震。矿业活动，可以改变某些矿物在地壳内的分布状况，发生矿物的人为迁移和富集作用。

上述人为地质作用，必然破坏地质环境在天然地质作用下的平衡条件，形成新的平衡关系。随着人口的增长，社会生产力的发展和科技的进步，人为地质作用力将愈加强大，它们对地质环境的冲击亦将更加强烈。深入研究人为地质作用现象的发生、发展，有助于评价地质环境的变化趋势。

三、人地关系与可持续发展

人类一经出现，就与地球环境发生了关系，也就是说，在地球上开始出现了人类与环境的关系问题，即“人地关系”。人类是环境的产物，环境为人类的生存和发展提供了必要的条件；同时人类又是环境的塑造者。随着生产和科学技术的发展，人类越来越大地对自然环境发生影响，两者间密切而对立的关系日渐加剧。

(一)人地关系“危机”

人类通过对自然的依赖与开发，人地关系得以萌生，人地矛盾也同步形成。但人类诞生以后的很长岁月中，生产力水平极为低下，人类只不过为了生存而适应和利用环境，很少有意识地改造环境，对环境影响不大。随着生产的发展和科学技术的进步，特别是农业革命和产业革命，使人类利用和改造环境的能力大大加强。与此同时，也出现了严重的环境问题。“人类主宰自然”的狂热思想和不惜代价地向自然开战的行为，使人与环境的矛盾日益升级，人地关系产生“危机”，把地表环境人文时期固有的、早已存在的“环境与发展”问题激化和突出起来，并成为人类社会可持续发展的主要阻滞力量，威胁到了人类自身的安危和盛衰。

1. 人地关系“危机”的实质

人口、资源、环境和社会经济发展之间的多重关系是人地关系的客观表现。四者运动方式的失当和比例关系的失调，加剧着人地关系的矛盾和危机。

人类活动与地球环境是构成人地复合系统的对立因子，它们的相互依存性和制约性决定着系统的运行过程和演进方向，然而，人类和自然各有其独特的、自我支配的客观规律，它们的存在方式与运动形式无时无地不在影响着对方。任何一方的不正常“扰动”和非弹性“越轨”都会影响人地复合结构的进化与功能的良性发挥，最终影响系统组织和自身发展，甚至导致衰退。这是人地关系“危机”的根本原因。长期以来，人类活动的方向、方式、速率、强度和规模与自然系统的运行规律和演化趋势严重悖离，超越了地球环境的“生态阈值”，使人与自然间相互作用的依存关系转变成了对抗性的矛盾关系。由此可见，人地关系“危机”的实质在于人类与地球环境之间的矛盾对立，即人类的社会意识、文化价值观念、发展战略和经济活动与生存环境的潜在利用方向、可承载能力之间的巨大差异和全面失衡。

2. 人地关系“危机”的表现形式

人类对环境的影响基本上表现在两个方面：一是对环境施加积极的建设性影响，提高环境质量，创造新的更适合于人类生活的人工生态系统；二是消极的破坏性影响，造成环境的污染和资源的破坏。人地关系危机的表现形式包含以

下几个方面：

（1）地球表层环境变迁对人类的影响：主要表现为地质灾害直接或间接恶化地表环境，降低环境质量，对人类生命财产造成危害或潜在威胁，使社会经济蒙受巨大损失，阻碍人类社会向前发展。

（2）地质资源短缺对人类社会经济可持续发展的制约作用：随着地质资源的短缺，如水资源、矿物能源的短缺 导致工业和城市发展减缓或停滞；土地资源的不足使地球的人口承载量受到限制等。

（3）人类经济活动诱发或加剧地质灾害：这些灾害，可造成地表环境退化，反过来制约、影响人类社会的发展。如过度放牧、森林砍伐和不适当的农业利用导致土地退化，使生态环境恶化，农业生产力下降。

（4）人类活动的副产品对地球环境的污染：所谓人类活动的副产品，即人工废弃物。由于各种废弃物品对环境的污染，地球表层已很难找到一块洁净的地方。水体污染、土壤污染和空气污染是人类健康的大敌。

（二）人地关系的协调

人与自然的危机日益深刻化和全球化，摆脱困境的根本出路在于人与自然相互协调。在协调人地关系时必须把握以下几条规律：

（1）人地系统主从律：即人首先是地球环境演化的产物，人地之间存在着客观的主从关系。人类对自然的改造必须顺应自然环境的演化规律，因势利导，使自然环境演化向着有利于人类的方向发展。

（2）人地系统反馈律：即人对地的能动作用，总会伴随地对人的反作用的规律。

（3）人地关系递进律：即人类社会越是发展，对地球环境的控制能力越强、客观依赖性越高的规律。

（4）人地适应律：即人类社会发展的条件必须合乎地球体系；功能释放物质转换与能量传递的自然规律，必须合乎地球资源和自然环境的合理更新与维持条件。人类经济活动适应环境容量是维护人类与地球环境之间良好关系的基本前提，也是维持人地生态系统内部平衡的基本条件。只有这样，才能形成人地系统协调发展的规律。

人地关系的协调应当从多方位入手，采取各种手段：一方面，要寻找适宜某项人类活动的最佳区位，即资源环境、生态、文化、技术和经济等各种人地关系因子良好组合和理想匹配的空间区位；另一方面，要进行系统环境组分和结构的调控，改变人地关系因子的特征和趋向，使其尽可能满足人类活动不断增长的多样化需求。

要达到人地关系的和谐，还必须以科学的人地观为指导，树立全球共享、人类共享的思想观念。培养全球性、长远性和差异性的环境意识，珍视和充分利用

环境质量与自净能力，减少环境损失，防止环境污染和生态破坏；培养广义性、有限性和稀缺性的资源意识，坚持节约利用、综合利用和持续利用原则，充分发挥资源的多重功能，提高资源利用效益和水平；培养遵从循环原则、平衡原则和共生原则的生态意识，遵循相生相克、最佳功能和最小风险原理，保证生态的平衡与进化。此外，还必须培养科学的人口意识、合理的生产意识、适宜的消费意识和正确的文化意识。

（三）可持续发展的人地观

人与地的关系是伴随着人类的产生而出现的，人地关系思想经历了曲折漫长的发展过程。从古代天命论的人地观，到文艺复兴时期的决定论和社会达尔文主义，再到机械唯物主义影响下的或然论，“人定胜天”的征服论，乃至目前的协调论，无不反映了各个历史阶段的人类社会状况和科学技术水平。

可持续发展的提出是人类“环境哲学”的重大进步。20 世纪 50 年代以前，人们总是自觉或不自觉地认为，地球向人类社会提供自然资源和环境空间的能力是无限的。然而，随着人类对自然干预的广度和深度的不断发展，环境危害日益严重。60 年代以来，人们开始意识到地球自然资源和环境空间是一种稀缺资源，如何支配、使用它关系到人类的幸福，当代人肩负着按照人类利益合理管理地球环境的责任。经过 70～80 年代的探索，以 1987 年联合国世界环境与发展委员会发表《我们共同的未来》为标志，可持续发展的人地观便应运而生。可持续发展的定义是：“既满足当代人的需要，又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展”。其基本含义是指在不损害后代满足其需要的前提下，追求一种最大限度地满足当代人们生产、生活需要的发展模式。

国际学术界和决策界曾对发展的持续性定义展开了一场大讨论，认为持续性包含生态、经济、社会三个方面。生态持续性指维持健康的自然过程，保护生态系统的生产力和功能，维护自然资源基础和环境；经济持续性指保证稳定的增长，尤其是迅速提高发展中国家的人均收入，同时用经济手段管理资源与环境，使经济发展与资源保护协调起来；社会持续性指长期满足社会的基本需要，保证资源与收入的公平（包括代间与代内）分配。

可持续发展除反映在时间维度上，还具有空间维度的含义。即在水平方向上从全球到区域的变化，在垂直方向上从自然圈层到人类活动各部门的变换。这些空间既相对独立又相互作用。区域可持续发展是指区域的经济、社会、环境和资源的相互协调，即在经济发展过程中要兼顾局部利益和全局利益、眼前利益和长远利益；要充分考虑到自然资源的长期供给能力和生态环境的长期承受能力，既要满足当代人的现实需要，又要足以支撑或有利于后代人的潜在需要。全球可持续发展则是满足全球需要的世界发展。

可持续发展在本质上就是优化人地关系和人与人的关系，可持续发展的概

念也为人地关系研究提出了一条新的思路。

第三节　环境地质学理论研究的几个前沿问题

一、全球变化问题

全球变化观点是 20 世纪 80 年代中期产生的地球科学研究的新思维。全球变化问题的提出标志着地学、生物学及相关学科的研究进入了一个新的深度和广度，是当前和今后几十年内自然科学，特别是地球科学领域中一个最重要的前沿课题。

地球的表生环境是一个多因素的复杂的动态平衡系统，任何一种因素的变化都会打破系统的平衡，驱使整个系统发生有规律的调整，直至达成新的平衡。20 世纪中期以来，由于世界人口的剧增和经济的迅速发展，人类对自然环境的作用越来越大，导致全球性气候变化，地球物质和能量循环严重失调，地球系统结构发生畸变，产生了一系列的全球性环境问题，如沙漠化、水土流失、土地退化、森林破坏、资源衰竭、生物物种锐减、空气和水严重污染、酸沉降、有毒有害物品扩散、臭氧层破坏、温室效应加剧等。当代全球变化的主要原因是人类活动强度和广度在地球系统中的迅速扩大及其对地球各圈层正常秩序的严重干扰。

为了研究和有效地解决全球环境变化问题，国际科联（ICSU）于 1986 年正式组织国际地圈生物圈计划（IGBP），即全球变化研究。该计划的目的在于对未来几十年至百年的自然和人为的全球环境变化进行预测。它主要是研究和了解地球系统中生物的、物理的和化学的过程，以及地球系统各圈层间的相互作用过程，强调地球系统的整体行为对环境的影响，强调人与环境的相互作用。

全球变化研究是当今人类为迎接日益严重的全球环境问题挑战而提出的一项战略性计划，也是环境地质学理论研究的一个重要的前沿课题。

二、地球各圈层的相互作用问题

地球系统是由多个圈层有机结合而成的具有特定结构和功能的有机整体，大气圈、水圈、岩石圈和生物圈既相互联系，又相互作用。

从科学角度看，人类目前面临的全球性变化问题，就涉及地球系统各圈层之间的相互作用。如青藏高原抬升对大气环境的影响；海陆边界变化的影响；火山爆发对大气圈的影响；大气质量对人类活动、生物生存的影响；地球内部气体向大气圈释放，以及地壳表层风化作用对大气某些成分的吸收机制等。这些都需要从地球系统的整体来认识和研究，否则就难以对发生在地球上的重大变化（以及突发性灾害）做出客观的解释，并具备一定的预测能力。所以说，以研究

地球系统的整体行为为对象，注重地球各圈层界面特征的研究，从总体上了解人类赖以生存的地球系统的变化规律和原因（自然的和人为的），并预测其变化趋势是当今科学的前沿领域，是地球科学、环境科学和宏观生物学向深度和广度发展的必然结果，也是环境地质学研究的主要目标。

三、陆地水圈演化与地下水渗流理论

地球水圈由大气水、地表水、地下水三部分组成，大陆范围内的大气水一地表水一地下水既是宏观上全球水圈和水循环的一个有机组成部分，又在一定程度上具有独立意义，即大陆水圈的大陆水循环。在地球表层系统，水圈是与岩石圈、大气圈、生物圈相互作用的一个特定的物质系统，水是联系各个圈层的媒介。水广泛渗透和作用于大气、岩石和生物要素中；水作为载体在水圈与岩石圈之间、水圈与大气圈之间、水圈与生物圈之间传输物质和能量，是连接各个圈层的纽带。地下水在土壤和岩石空隙间不断运移，可溶解和富集各种离子、胶体及气体物质，并与土壤和岩石发生物质交换，其机理是研究地下水和土壤环境污染的基础，在固体废物处置、核废物地质处置中将发挥应有的作用。

环境地质学需要开展陆地水圈的形成条件、演化规律及其在人类活动影响下的变化趋势研究；开展地下水渗流理论、弥散理论以及在各种地质过程中水岩相互作用的研究；开展海平面上升预测及其对沿海地区地质环境的影响、全球性气候变化对水资源的影响、大流域地下水资源可再生性与跨流域调水、水资源短缺与供需矛盾及其出路的研究。

四、生态环境地质问题

生态环境地质是研究以人类为主体的生物与地质环境之间关系的科学。“生态地质”的概念更好地体现了地球岩石圈、水圈、生物圈和大气圈之间的相互作用。在国外，很难区分生态环境地质与地质生态学、地生态学（地学生态学）、景观生态学的区别，它们的研究内容均体现了地学与生态学的结合。如荒漠化、水土流失、水土资源开发利用引起的环境恶化等既是环境地质问题，也是生态环境问题。

五、医学环境地质问题

生命元素在岩石一土壤一地下水一作物一人体系统中的赋存状态和不同介质的地球化学行为及其环境地质效应；地下水环境背景值的区域规律及其对农作物与人体健康的关系；陆地表层的地球化学环境与人类健康和地方病的关系；农业优质高产与土壤环境以及生态系统中生命部分和非生命部分（地质环境）之间相互作用的研究等，已成为环境水文地质学研究的重要内容，日益受到环境

地质研究人员的广泛关注。

六、地质灾害防治

地质灾害是地球表层系统演化过程中发生的渐进性或突发性的灾变，地震、火山喷发、崩塌、滑坡、泥石流、地面沉降、土地荒漠化、矿山瓦斯爆炸等地质灾害给人类带来了无尽的伤痛。准确预报地质灾害发生的时间和空间位置还存在很大困难，治理地质灾害的技术方法还有待突破。因此，运用先进的理论方法与科学技术，开展地质灾害发生机制、分布规律、趋势预测以及综合防治研究是环境地质学的重要课题之一。

七、地质环境工程

地质环境工程以环境地质学知识为基础，利用综合的工程技术手段，治理和预防环境恶化，达到人与自然的持续协调发展。治理各种环境地质问题的工程，同其他工程技术一样，具有复杂性和综合性的特点。地质环境工程研究具有广泛的内容，如荒漠化的防治工程，地质灾害的防灾减灾工程、复杂地基的处理技术、地表水与地下水联合调度工程、污水净化处理工程、海水入侵防治工程等。

环境污染治理工程是一个全球性的课题，许多研究人员正在积极探索生物工程在治理环境污染中的作用，研究有机物的生物降解过程及机理，污染物在含水层中迁移转化的生物过程，污染源防治的环境微生物学等问题。

八、地球表层系统非线性演化问题

地球表层系统是地球大系统中一个最复杂的系统，它由五个圈层组成，包括三个无机圈层及生物圈与智慧圈（人类活动圈）。它们之间存在着相互作用、相互影响的非线性关系。地球表层系统处于不断变化之中，是具有耗散结构特征的开放系统。地球表层系统的演化有着明显的阶段性，特别是环境中的随机事件，在系统演化的相对不稳定阶段起着重要的作用。除自然因素外，地球表层系统的演化还涉及人类社会的多个层面，使其非确定性影响因素更加复杂。

因此，以动态观点，应用复杂巨系统理论和非线性动力学理论与方法来探索地球表层系统演化的特点、预报环境演化趋势是环境地质学理论研究的前沿课题之一。借助数值模拟、物理模拟等方法和遥感（RS）、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)等技术，利用耗散结构论、灾变理论、混沌理论和分形理论等非线性科学研究地球表层系统非线性演化将提高环境地质学的理论研究水平，进一步完善环境地质学的学科体系。

九、环境地质质量评价与区划

开展地质环境质量综合评价的基本理论与评价方法研究，建立地质环境质量评价综合指标体系，对特定流域或大型工程活动影响区的地质环境质量进行区划研究并编制相关的图件，为土地利用、灾害防治和污染防治提供科学依据。

十、环境地质信息系统建设

环境地质研究的基本思路是通过调查、观测和监测采集数据，在成因机制、分布规律分析判断的基础上，建立地质概念模型和数值模型，然后利用各种数据进行验证、完善模型并预报未来的趋势。数据信息采集、流动、处理、加工、分析的每一环节都与信息系统密不可分。建立全国性或特定范围内的环境地质信息系统已成为环境地质研究的热点和发展趋势。

环境地质信息系统建设的目标是，以地理信息系统（GIS）为平台，结合全球卫星定位系统（GPS）、遥感（RS）、网络技术（Web）和专家决策支持系统（EDSS），建立集信息采集、存储、管理、检索、分析评价、预测和制图于一体的决策支持系统，实现基于网络 GIS 的多源信息的综合利用、环境地质问题动态分析与评价、数值模拟计算的三维空间分析、环境地质专题图件的数字化编图和绘制。

第三章　土地资源与地质环境

土地是重要的自然资源，是人类衣食住行之本，也是地球表层系统中物质与能量交换的枢纽。随着社会发展和人口的增长，人类对土地资源开发利用的需求与日俱增。但由于人类对土地资源的过度开发利用，天然植被减少以及某些自然因素的作用，土壤污染和土地荒漠化现象不断加剧。人类在开发利用土地资源的同时，必须保护土地，才能保障土地资源的持续利用。土地利用和农业生态地质已成为目前环境地质研究的热点和前沿问题之一。

第一节　土地资源与土地（壤）环境问题

一、土地资源的概念及其特征

（一）土壤与土地的基本概念

1. 土壤及其组成与功能特性

土壤是位于陆地表面具有肥力的疏松土层。它具有独特的组成、结构和功能。土壤的组成包括矿物质、有机质、水分和空气；在土壤中，这些成分以固态、液态和气态三相共存。土壤具有两个独特的功能：① 土壤具有肥力，可供植物生长；② 土壤具有同化和代谢外界输入物质的能力，输入的物质在土壤中经过复杂的迁移转化，再向外界输出。从环境科学的角度看，土壤在环境中有着以下三个作用：

（1）土壤是以固相物质为主的多相复杂体系：土壤物质成分中有粘土矿物和腐殖质胶体，它们有着巨大的表面积，因此能吸附各种离子和某些分子，对进入土壤的物质具有蓄积作用。

（2）土壤起着净化环境的作用：土壤中存在着数以万计的土壤微生物、原生动物和其他土壤动物，它们能对有机污染物质进行降解和转化，起着土壤环境的净化作用。

（3）土壤起着物质的输移作用：土壤是各种植物和一些动物赖以生存栖息的地方，是植物营养物质的主要供应地。因此，进入土壤的外界物质，通过植物和动物的吸收或吞食又输出到环境中，土壤起着物质的输移作用。

2. 土地及土地资源

土地是具有一定面积的确定边界的地理单位。包括地质地貌、土壤、植被、微生物、湿热状况等自然要素，是由上述各要素共同作用而形成的自然综合体。

土地有两个基本属性：一是面积，二是质量。后者包括地理分布、土层厚薄、肥力高低、水源远近、潜水埋深、地势高低等。在土地资源评价中，土地的地理分布常常起着很大的作用。

土地一旦被人类利用后，它就成为人类最基本的生产资料，也就变成了土地资源。因此在土地概念中，应该将人类活动的影响和作用包括在内，这就是说，在土地的属性中除了自然属性外，又增加了社会经济属性。从这个意义上讲，土地资源实质上是一个自然经济综合体，是由各种自然要素和一定的社会经济因素有机地组合而构成的总体。

土地和土壤既有联系又有区别，土壤是土地表层的重要组成部分，两者是整体与部分的关系。除了个别土地类型外，绝大多数土地表层发育有厚薄不一、组成各异、肥沃程度不同的土壤层。

(二)土地的基本特性

土地是植物生长、发育和动物栖息、繁衍所不可离开的场所。人类的生活、生产和建设也都离不开土地。土地具有下列特征：

1. 位置的固定性

固定的空间位置是土地的基本特征之一。即每一块土地都具有固定的三维空间(长、宽、高)位置和一定的外表形态,如山地、丘陵、高原、平原等。

2. 土地面积的有限性

从自然科学的角度看，土地的面积是固定的、有限的。人类在开发利用土地资源时，一种土地类型的利用面积增加了，另一种土地类型面积必然减少。随着人口的不断增加，人类与土地的矛盾愈来愈尖锐。因此，必须充分认识土地面积有限性这个特点，合理制定土地利用规划，最大限度地节约每一寸土地资源，防止土地破坏和土壤污染。

3. 土地的不可代替性

土地的不可替代性主要是指土地的功能不能为其他物质所代替。土地是植物生长的母体和动物的栖息场所，也是人类的生存环境和一切经济活动的场所。这是任何其他物质不能替代的。

4. 土地资源的可更新性

在自然因素的作用下，土壤中的化学元素发生物理、化学变化，不断地经历着淋浴、迁移、转化等循环过程；土地上的植物、动物和土壤中的微生物等，在较长的时间尺度内也处于周而复始的自然动态平衡中。所以，一般来讲，土地具有可更新性的特征。

但是，当人类活动破坏了土地的自然动态平衡，土地的可更新性特征将随之

丧失。人类对土地的不合理开发利用，已引起沙漠化、水土流失、盐渍化等土地退化现象。

5 土地随时间的变化性

随着季节的交替变化，土地的性质和形态也发生同步变化。季节不同，太阳辐射能量有异，地表接受的热量不同，降水的丰寡变化也很大。因此土地表面的侵蚀与堆积、土壤营养元素的淋洗与聚集、土壤水分的多少以及土地上的生物生长，均随着季节的变化而变化。

6. 土地用途的广泛性

随着人类社会的不断发展，土地被广泛用于农业、牧业、林业、交通、城乡居民点以及军事活动等。可以说，人类一切经济活动都是在土地上进行的。由于人类与土地矛盾的日趋紧张，我们必须合理利用各种土地资源，这是实现人类社会持续发展的基本条件之一。

土地资源的上述特征，是其固有的自然属性，人类必须严格遵循，否则必将导致土地资源的破坏。

二、土地资源状况

（一）世界土地资源状况

据统计,在全球 $5.10\times10^{8}\ km^{2}$ 的总面积中，包括南极大陆与高山冰川覆盖的土地在内的全球土地面积为 $1.48\times10^{8}\ km^{2}$，无冰陆地面积为 $1.34\times10^{8}\ km^{2}$。对于地球的全体居民来说，这似乎是一个颇为巨大的数字。按 60 亿世界人口计，平均每人占地约 $2.5\ hm^{2}$。但是，考虑到土地质量这个属性，则陆地总面积中有 20 % 处于极地和高寒地区，20 % 处于干旱区，20 % 处于山地陡坡上，还有 10 % 岩石裸露缺乏土壤。以上四项，约占陆地总面积的 70 %，属于不宜利用的山地。地理学家和生态学家称之为“限制性环境”，其余 30 % 才属于“适居地”。全世界总土地面积中，耕地仅占 10.8 %，在各种土地类型中所占比例最小。

（二）中国土地资源状况

中国地域辽阔，土地总面积为 $960\times10^{4}\ km^{2}$,占世界陆地面积的 7.2% ,仅次于俄罗斯（12.8%）、加拿大（7.5%），居世界第三位。但人均土地面积仅 $0.777\ hm^{2}$，相当于世界平均水平的 1/3，人均耕地面积为 $0.106\ hm^{2}$，不足世界人均数的 43%。由于气候、地貌、土壤和水文等自然条件的千差万别，以及 5 000 多年来中国劳动人民对土地资源的开发与利用，逐步形成了复杂多样的土地资源类型。截至 1996 年 10 月 31 日，中国土地调查总面积 $9\ 5067.62\times10^{4}\ hm^{2}$,土地利用现状类型如表 3－1 所示。据国土资源部发布的中国国土资源公报，2002 年全国耕地为 $12\ 593\times10^{4}\ hm^{2}$,比 1996 年减少了约 $410\times10^{4}\ hm^{2}$。

中国土地资源的基本特征主要表现为土地类型多种多样，农业用地占主导

地位，牧草地、林地比重大；山地多、平地少，土地资源区域差异显著，耕地分布不均衡、土地垦殖指数低，林地、草地生产力低下；未利用土地中，大部分分布在西北干旱地区和青藏高原，自然条件恶劣，开发难度大。

表 3－1 中国主要土地资源类型

编码	土地利用类型		面积/10^4 hm^2	百分比/%
土地调查总面积			95 067.62	100.0
1	耕地小计		13003.92	13.7
	其中	灌溉水田	2 857.2	3.01
		水浇地	2 167.02	2.28
		旱地	7 391.98	7.78
2	园地		1002.38	1.0
3	林地		22 760.87	23.9
4	牧草地小计		26 606.48	28.0
	其中:天然草地		26 273.93	27.64
5	居民点及工矿用地		2407.53	2.5
6	交通用地		546.77	0.6
7	水域小计		4230.88	4.5
8	未利用土地小计		24508.79	25.8
	其中	荒草地	4925.46	5.18
		盐碱地	1016.82	1.07
		沼泽地	430.34	0.45
		沙地	5048.92	5.31

注：据国土资源部信息中心（www.mlr.gov.cn），2003

三、土地（壤）环境问题

随着社会经济的迅速发展和人口的不断增加，人类对土地资源的需求日益增长。原先局部的、次要的土地退化现象已转化为严重的全球性环境问题之一，威胁着人类赖以生存的环境。全球共有 20×10^8 hm^2 的土地资源受到退化的影响，即全球农田、草场、森林与林地总面积大约 22% 的土壤发生了不同程度的退化。土地退化是由人类活动诱发或加速的一种自然过程，主要因素是草原垦荒种地、超载放牧、乱伐森林、陡坡开荒、围湖造田、粗放灌溉、土地重用轻养等不合理的土地开发活动，其直接后果是导致土壤生产力的大幅度下降，土地资源受到严重破坏，出现了许多土地环境问题。诸如草场退化、森林破坏、水土流失、泥沙淤积、土壤盐碱化、土壤有机碳储量变化、特殊生境消失、生物多样性减少以及化

肥、农药和工业“三废”对土地的污染等，极大地威胁着人类的生存与可持续发展。

第二节　土地利用对地质环境的影响

人类的土地开发利用活动对地质环境造成许多影响，有的属于有利影响，如植树种草可使土地免遭侵蚀和沙漠化等，我们把这种有利影响称为正环境效应；有的土地开发活动则对地质环境造成种种破坏影响，如因滥伐森林和乱垦草地引起的土地荒漠化等，我们把这种有害影响称为负环境效应。

土地利用的正环境效应是人类遵循自然规律合理开发利用土地而产生的。如人造防护林带可以防风固沙，有效防止水土流失、土地沙质荒漠化；同时具有吸收烟尘和净化有毒有害气体的能力。“三北”防护林体系、长江中上游防护林体系、沿海防护林体系、平原地区防护林体系和太行山防护林体系是当代中国五大生态工程，必将产生巨大的正环境效益。人造梯田、山地丘陵区建设梯级小型水库和塘坝，是山区减少水土流失、解决山区灌溉、增加农业产量的有效方法。

不合理的土地开发利用活动造成的负环境效应对社会发展的影响也比较严重。通常所说的土地环境问题就是指的这种负环境效应，如水土流失、水环境恶化、土地沙质荒漠化、土地盐碱化、砖红壤和土壤板结、土地污染和耕地减少等。正环境效应多属水土保持问题，本节仅论述土地开发利用的负环境效应。

一、水土流失

水土流失是指地球陆地表层土壤、成土母质及岩石碎屑，在水力、风力、重力和冻融等外力作用下，发生各种形式的剥蚀、搬运和再堆积的过程。水土流失是土地退化的另一种表现形式。土壤侵蚀是从土地表层侵蚀率的角度描述土地退化的，而水土流失是从土地表层土壤流失总量角度来描述土地退化的。

水土流失又称土壤侵蚀，是一种渐进性的地质灾害，世界大部分农业区都存在着严重的土壤侵蚀，耕地土壤的损失率一般为 $10 \sim 100\ t/(hm^2 \cdot a)$，大约超出土壤生成速率的 10 倍以上。造成水土流失的原因有自然因素和人为因素两个方面，自然因素主要有气候、土壤、地形、地质、植被等，是水土流失发生、发展的潜在条件；人为因素是加速水土流失的诱发动力，主要包括不合理的土地利用方式、毁林毁草、滥垦滥伐、开垦扩种、顺坡耕种、开矿修路及弃土弃渣等。生产方式落后、生产力水平低以及广种薄收、掠夺式经营等土地利用发生都会造成水土流失。

(一)水土流失的现状

全球的水土流失相当严重。据统计，全世界每年有 $750.0 \times 10^8\ t$ 的耕地表

土流失，其中美国每年流失土壤 40.0×10^8 t，前苏联约 23×10^8 t，印度约 66.0×10^8 t，中国约 50.0×10^8 t。全世界 80 % 的耕地面积面临中度乃至严重的水土流失。在诸如欧洲和美国等土地利用得好的地方，每公顷农田每年流失 17 t 表土。在非洲、亚洲和南美洲，高达 40 t。

中国是世界上水土流失最严重的国家之一，水土流失面积 371×10^4 km^2，占国土面积的 38.7 %，其中水力侵蚀面积为 182.6×10^4 km^2，比 20 世纪 50 年代的 116×10^4 km^2 增加了 57%，风力侵蚀面积为 188×10^4 km^2。全国每年流失的表土在 50×10^8 t 以上，随水土流失带走的氮、磷、钾营养元素相当于全国每年的化肥生成量。水土流失最严重的地区是黄河中游的黄土高原，水土流失面积高达 45×10^4 km^2，约占黄土高原总面积的 83 %，每年流失土壤 22.0×10^8 t，其中 16.0×10^8 t 输入黄河，使黄河成为世界含沙量最高的河流，多年平均含沙量 37.4 kg/m^3，汛期高达 500 ~ 600 kg/m^3，最高达 1 600 kg/m^3。黄河携带的大量泥沙每年约有 4.0×10^8 t 沉积在下游 800 km 长的河床上，使河床年平均增高 10 cm 左右，形成世界闻名的“地上悬河”。

长江流域的水土流失也十分严重。据调查，目前水土流失面积已扩大到 74×10^4 km^2，占长江流域面积的 41 %，每年流失土壤超出 20.0×10^8 t。如果不加以积极治理，长江有变成中国第二条黄河的可能。

（二）水土流失的原因

目前一般都把水土流失的成因分为自然因素和人为因素两类。自然因素是水土流失的物质基础，人为因素诱发并加剧了水土流失的过程。

1. 自然因素

自然因素包括地形、植被覆盖度、水文、降水、土壤结构等。地形起伏大、植被覆盖度低、降水多且强度大的地区，水土流失较为严重。土壤结构决定了土壤的吸水性、抗蚀性和抗冲性。结构松散、渗水性差、抗冲力小的土壤极易被迅速形成的地表径流所分散和冲走。

2. 人为因素

人口增长过快导致加速陆地开垦、毁林毁草开荒以及乱砍滥伐和矿山等工程建设是水土流失日趋严重的动力源；耕地的不合理利用也加剧了水土流失。

（三）水土流失的危害

水土流失作为一种环境地质问题，对人类的影响是多方面的。水土流失是造成山穷水恶，水旱灾害交替发生的根本原因。

1. 破坏土地资源，影响粮食生产

全国每年有 50×10^8 t 沃土付之东流，损失耕地约 6.67×10^4 hm^2，造成北方土地的“沙化”和南方土地的“石化”。水土流失能把原来的森林、草原和耕地冲刷得支离破碎、沟壑纵横，从而降低其利用价值。例如，黄土高原区流水冲刷形

成的沟壑每平方千米达 30～50 条，沟壑面积占原土地面积的 50 % 在山区，水土流失能把山顶、山坡的表土冲刷殆尽，岩石裸露，植被无法生长。石化现象在陕西、湖南、湖北和贵州等省的山区丘陵区十分严重，石化面积增加速度每年达 5 %～7 %，石化面积约占总面积的 15 %。由于水土流失面积迅猛扩大，不仅使粮食产量滞长，还因土地耕作中增加化肥使用量而加大了粮食生产成本。

2. 土地生产力下降甚至丧失

水土流失导致土壤营养元素大量流失，土壤肥力下降，并最终导致农作物、牧草产量和树木生产力下降。在一公顷优良农田土中，生存着大量的蚯蚓、节肢动物、细菌、原生动物和真菌类植物。所有这些养分均可为农作物生长所利用。而水土流失则损坏了土地的生产能力。在中国，黄河、长江两大流域每年流失土壤达 42.0×10^{8} t，其中所含氮、磷、钾等营养元素相当于 50 个年产量为 50×10^{4} t 化肥厂的产量。

3. 流域下游泥沙淤积，影响调洪、灌溉和航运

水土流失还使河、湖、库和海港海湾发生淤积，直接影响水体的调洪能力和农业灌溉、水路航运等。新中国建立以来，全国水库、塘坝淤积库容达 200×10^{8} m^{3}，相当于损失库容 1×10^{8} m^{3} 的大型水库 200 座。全国重点水库因淤积已报废 22 座，黄河干流 7 个大型水库淤积达兴利库容的 40 %；长江流域的湖泊因淤积致使面积减少 1×10^{6} hm^{2}，调蓄能力损失 35.0×10^{8} m^{3}。因河道淤塞、海湾面积缩小还使通航里程缩短、码头功能减弱。

4. 污染水体

被污染的水体携带含大量养分、重金属和化肥、农药的泥沙，大多流入河、湖、库、海，使水体混浊，水质下降，富营养化程度加重，严重影响水体的利用功能.

（四）水土流失的防治对策

水土流失作为一种地质灾害，其发生原因既有自然因素，更有人为因素。治理水土流失不仅涉及自然地理系统、经济系统，还与社会系统相关。

对水土流失的防治应遵循水土流失规律，贯彻“预防为主，防治结合”和“工程措施、生态效益、社会效益和经济效益统筹兼顾”的原则，坚持治理与开发相结合、治山与治水相结合，对全流域统一规划、综合治理，因时、因地制宜，退耕还林还草；加强沿河流域的山地灾害防御、农田基本建设和堤防工程建设；采取“上游保、中游挡、下游导”的措施，开展河道整治工作，提高江、河、湖、库拦蓄洪水的能力，有效减轻水土流失的危害。

二、水环境恶化

土地利用是水环境变化的主要驱动要素之一，土地覆盖变化对水环境的影

响包括水量和水质两个方面的变化。

（一）对水资源量的影响

水文过程与陆地表层系统中各种自然地理要素的时空分布密切相关，特别是对农业开发、都市化等土地利用及其变化具有高度的敏感性和相关性。大面积的森林开采、过度放牧、开荒、草地转为半荒漠、水田改作旱地、围湖造田和建设用地不透水面积的增加等土地覆盖变化，使地表反照率、粗糙度、透水性发生变化，地表径流系数增大，地表径流量增加，地下水补给量减少，下游地区洪水泛滥的频率和程度增强，在不同程度上改变了地表水分的循环状态。

土地覆盖变化还导致流域上下游水量空间分布和产流持续时间的变化。如植被的破坏，使水量在河流的上、下游或干、支流上的分配发生异常，产流主要集中在暴雨过后的几天内，上游或支流因植被减少而不能有效拦阻地表径流，水量减少；下游或干流则因汇水集中、时间短暂，径流量增大甚至发生洪涝灾害。

（二）对水质的影响

土地覆盖变化对水质也有很大的影响。土地利用结构的变化以及河流人工改道、湖泊围垦，使天然水系遭到破坏，丧失或改变了原有的生态功能，影响了水系之间正常的水分和养分交换，降低了天然水体的环境容量及其对污染物的稀释能力，间接导致了水环境的恶化。如中国的长江中下游地区，人类环湖而居，湖泊水体受到人类活动的强烈干扰，湖泊水质普遍恶化。农业生产过程中化学肥料和杀虫剂使用量的不断增加，更加剧了水环境的污染，使湖泊氮磷含量逐年增高，水体富营养化加剧。

三、土地沙质荒漠化

土地沙质荒漠化是生态环境遭受破坏而引起的一种土地退化现象，是非沙漠地区出现的以风沙活动为主要标志的环境退化过程。

沙质荒漠化是荒漠化的主要类型之一，荒漠化是指在干旱、半干旱和某些半湿润、湿润地区，由于气候变化和人类活动等各种因素引发的土地退化，结果导致土地生物和经济生产潜力降低，甚至基本丧失。沙质荒漠化是指在沙质地表产生的土壤风蚀、风沙沉积、沙丘前移及粉尘吹扬等一系列的过程和现象，又称沙漠化。其结果是土地退化、生物生产量降低、可利用土地资源丧失及生态环境恶化，从而严重干扰人类的正常生活和经济活动。

（一）土地沙质荒漠化的现状

据联合国环境规划署统计，当今世界沙漠化面积约占世界陆地面积的25%。全球严重沙漠化土地约为 $8.77\times10^{8}\ hm^{2}$（表 3－2）。全世界每年有 $600\times10^{4}\ hm^{2}$ 土地变为沙漠，其中草地沙化面积 $320\times10^{4}\ hm^{2}$，靠雨水灌溉的农田沙化面积 $250\times10^{4}\ hm^{2}$，人工灌溉农田沙化面积 $12.5\times10^{4}\ hm^{2}$。而面临沙化威

胁的土地面积高达 $3\ 800 \times 10^4\ hm^2$ 。当今全世界有 90 多个国家的 8.5×10^8 人口受害最为严重，因沙漠化而被迫迁居的人数每年约有 300 万。

表 3-2 全球各洲四种程度土地沙质荒漠化面积

大　陆	沙化程度	土地面积/$10^6 hm^2$	百分比/%
非洲	轻微	1 243	71.7
	中度	187	10.8
	严重	303	17.5
	总计	1 733	100.0
亚洲	轻微	798	50.9
	中度	488	28.6
	严重	321	20.5
	总计	1 567	100.0
澳大利亚	轻微	232	36.2
	中度	351	55.2
	严重	52	8.2
	总计	636	100.0
北美洲	轻微	44	9.9
	中度	272	61.5
	严重	120	27.1
	很严重	6.7	1.5
	总计	442.7	100.0
南美洲	轻微	134	43.6
	中度	105	34.1
	严重	68	22.1
	很严重	0.6	0.2
	总计	307.6	100.0
欧洲(西班牙)	中度	14	70.0
	严重	6	30.0
	总计	20	100.0
全球陆地	轻微	2 452	52.1
	中度	1 377	29.3
	严重	870	18.5
	很严重	7.3	0.1
	总计	4 706.3	100.0

注 据 UNEP,1992。

中国是世界上沙漠化和沙质荒漠化土地较多的国家之一，戈壁、沙滩和沙漠化土地共有 $164.6 \times 10^4\ km^2$ ，约占国土总面积的 17.2%，其中沙质荒漠化的土地约 $17.97 \times 10^4\ km^2$ 。中国沙质荒漠化灾害主要发生在干旱、半干旱地区及部分

湿润、半湿润地区，在农牧交错地带尤为严重。现有沙漠及沙化土地主要分布在北纬 35°～50°之间的内陆盆地、高原，形成一条西起塔里木盆地，东至松嫩平原西部，东西长 4 500 km，南北宽约 600 km 的沙漠带，最严重的土地沙质荒漠化地区是东起吉林白城，西至宁夏盐池的农牧交错区；沙质荒漠化涉及内蒙古、新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西、山西、河北、辽宁、吉林和西藏等 12 个省区。

(二)沙质荒漠化的原因

沙质荒漠化是人类强烈经济活动与脆弱生态环境相互影响、相互作用的产物。气候变异和人类活动是沙质荒漠化的两个重要影响因素。

气候变化是造成土地沙质荒漠化的重要因素之一。世界上绝大多数的沙漠和沙漠化土地都分布在降雨少、气候干燥的干旱和半干旱地区。

过度放牧、垦殖、采樵以及工矿与城市建设和水资源利用不合理等人类活动诱发并加速了荒漠化进程。其中因草原过度农垦造成的沙漠化面积占 25.4%，过度放牧造成的占 28.3%，过度采樵造成的占 31.8%，水资源利用不当和工矿、交通、城市建设破坏植被造成的占 9%，因自然风力作用造成的只占 5.5%。

因上游大量引水，造成河流中下游水源减少、地下水位降低而促使土地沙化的情况，在塔里木河中下游平原及河西走廊石羊河下游等地甚为突出。塔里木河流域是干旱区少有的原始胡杨林区，由于上游大量引水，造成中下游水量减少、断流，地下水水位下降，致使胡杨林及其林系植被严重衰退和枯死；随着胡杨林植被系统的破坏和衰退，许多土地开始沙化（表 3－3）。

表 3－3　地下水与胡杨林生长和土地沙化的关系

地下水埋藏深度/m	胡杨林生长状况	土地沙化情况
＜ 4	影响不大	基本不沙化
4～6	生长不良，顶秃叶枯，少数枯死	轻度沙化
6～10	大部枯死	中度沙化
＞ 10	全部植被枯死	强度沙化

人们普遍认为，世界人口猛增是土地沙质荒漠化的根本原因。人口的增加，大大加重了对土地环境的压力，导致土地质量退化和沙化。经济落后也是造成土地破坏的重要因素，为了生存，贫穷的人们不得不对自然资源进行盲目开发，对土地进行超负荷利用，导致生态平衡破坏，形成恶性循环。人为因素叠加于脆弱的生态环境，使植被破坏，加剧风沙活动，导致沙质荒漠化景观迅速形成和发展。

(三)土地沙质荒漠化的危害

土地沙质荒漠化所造成的危害是多方面的。涉及农业、牧业、水利设施、交

通道路、工矿建设及生态环境。但就实质而言，沙质荒漠化灾害主要是毁损土壤肥力，使人类丧失赖以生存的土地资源。

1 可利用土地面积减少

沙质荒漠化的危害主要是侵吞农田、牧场，丧失可利用土地资源，使可供农牧业生产的土地面积减少。据 20 世纪 50 年代与 70 年代末的航片及航测地形图对比分析，25 年内中国北方沙质荒漠化土地增加了 3.9×10^4 km^2，平均每年以 1 560 km^2 的速度蔓延到 80 年代，年平均增加约 2 100 km^2；90 年代初，受沙质荒漠化威胁的人口达 3 500 万，农田 393.5×10^4 hm^2、牧场 493.6×10^4 hm^2 受到沙质荒漠化威胁。沙质荒漠化使耕作层内细粒物质损失 10% ~30%，造成地表粗化和沙丘堆积，可利用土地资源丧失。

2 土地质量降低，生物产量减少

由于风蚀作用，使土壤耕作层变薄、土壤粗化、有机质和养分被大量吹蚀、土壤肥力不断降低，土地质量逐渐下降，农牧业生产能力降低和生物生产量减少。由于沙质荒漠化灾害，农牧交错地带旱作农田与开垦初期相比，产量平均下降 50% ~60%。

3. 阻断交通，毁坏建筑设施

据估计，全国有 2 000 km 铁路、30 000 km 公路和 50 000 km 引水灌渠由于风沙危害造成不同程度的破坏。沙质荒漠化严重影响了边疆地区与内地交通大动脉的正常运行。如 1986 年 5 月 19 ~20 日，新疆哈密地区出现罕见的 12 级大风，使该地区 226.1 km 长的铁路受到危害，积沙 59 处，积沙长度 40.7 km，总积沙量 74 198 m^3；部分设备被毁，中断行车 40 多个小时，造成严重的经济损失。2002 年 8 月、2003 年 3 ~4 月间，兰新铁路上的近百千米长的风区多次刮起 12 级以上大风，迫使乌鲁木齐市发往内地的火车停运或停靠在兰新线沿途车站避风，每次停运时间均达 20 h 以上、滞留乘客几千人次。分布在毛乌素沙地及周围地区的东胜煤田、准格尔煤田、神府煤田和平朔煤田也受到风沙的危害，每年因沙质荒漠化而增加的开发成本约 9 000 万元。风沙淤积渠道，影响了水利工程效益的正常发挥。

4 污染环境

沙质荒漠化加剧了生态环境的恶化。在干旱、半干旱甚至部分半湿润地区，由于受天气过程的热力效应及冷锋侵入的影响，常造成沙尘暴天气。沙尘暴不仅仅是一种灾害性天气过程，而且是沙质荒漠化灾害的一种表现形式。其影响范围广、危害严重，是严重威胁中国北方地区人民生产和生活的重要环境问题。

发生于 1993 年 5 月 5 日的特大沙尘暴，袭击了新疆、甘肃、宁夏、内蒙古四省(区)，造成 200 多人伤亡，4.2 万头(只)牲畜死亡，毁损房屋几千间；土壤风蚀深度 10 ~50 cm，沙埋深度 20 ~150 cm，造成大片农田被毁，37.33 km^2 经济林

被破坏，经济损失达 5.6 亿元。2000 年 3 月至 5 月，中国北方大部分地区连续七次出现大范围的沙尘暴天气，兰州、西安、北京、济南降“黄龙”，上海、南京下“泥雨”的现象多次出现。由于风沙大、能见度低，给交通运输及人们的日常生活和工作带来不利影响，还使大气混浊，妨碍人们的正常活动，对人类身心健康产生损害。沙尘暴还影响到中国南方的部分地区，甚至漂洋过海殃及日本和朝鲜半岛。

(四)沙质荒漠化的防治

防治沙质荒漠化的根本途径在于保护天然植被、建立人工植被，合理调整农业生产结构和布局，加强人工草场生态系统的建设，合理开发利用水资源。采取农业、林草、水利和工程等有效措施进行综合治理。

林草措施包括营造农田防护林网和防沙林带、封沙育草、造林固沙、退耕还林还草等方法。对严重沙化耕地，要改变土地经营方式，采用林网保护下种植饲草或引进灌木恢复植被。

农业耕作措施包括覆盖耕作、粮草结合耕作以及调整农业结构，不同作物间作等措施。

发展水利、建设基本农田，彻底改变广种薄收的轮荒耕作制是防止沙化危害的主要措施之一。利用灌溉水保持土壤水分、增加土壤颗粒的固结力，可减少风沙危害。

工程固沙即设置沙障防止流沙的措施，它是干旱沙区生物治沙不可缺少的先期辅助措施。对于流动沙丘，先在其迎风坡设置粘土或沙蒿沙障，对工程沙障保护下的沙丘，播种固沙植物，以防快速移动的沙丘掩埋尚未形成固沙能力的植物沙障。

四、土壤盐渍化

盐土、碱土和脱碱土统称为盐渍土。土壤盐渍化系指土壤中积聚盐、碱且其含量超过正常耕作土壤水平，导致作物生长受到伤害的现象。盐渍化是一种渐变性地质灾害，它是盐分在地表土层中逐渐富集的结果。由于人类不合理灌溉造成的盐渍化过程，称为次盐渍化，其形成的盐渍土，称为次生盐渍土。

(一)盐渍(化)土发育状况

盐渍土主要分布于世界各地干旱、半干旱和半湿润地带，有时呈带状分布，通常呈小块状分布于其他土壤带之中。美国、埃及和印度灌溉地的盐渍化和沼泽化面积占全部灌溉面积的一半以上。在美国，加利福尼亚南部的英波里尔河谷地区，由于使用曾被盐类污染的科罗拉多河水，导致 $25\times10^4\ km^2$ 耕地严重盐渍化。加拿大草原地区受盐渍化影响的土地面积达 $220\times10^4\ km^2$，每年的经济损失达 $(1.04\sim2.57)\times10^8$ 加元。非洲和亚洲的许多国家因气候干旱，降水少，

蒸发量大，土地盐渍化十分严重。中国盐渍化土壤分布广泛，除滨海半湿润地区的盐渍土外，大多分布在北方的半干旱、干旱地区，如华北平原、河套地区、西北地区。全国盐渍土总面积达 $1\ 016.82 \times 10^4\ km^2$，有潜在盐渍土约 $17.33 \times 10^4\ km^2$，即如果不合理地利用和管理，就会使土地发生盐渍化。农、林、牧用地受盐渍化危害的土地面积有 $36.30 \times 10^4\ km^2$，其中耕地 $9.21 \times 10^4\ km^2$，林地 $1.42 \times 10^4\ km^2$，草地 $23.20 \times 10^4\ km^2$；每年因盐渍化而废弃的土地约 $0.25 \times 10^4\ km^2$。盐渍化耕地粮食损失达 $207 \times 10^4 kg/a$。

(二)土壤盐渍化的形成

盐渍化问题实质上就是土壤中盐分的蓄积过程。当土壤中大量的水分蒸发或排放后，盐分就在土壤表面或土壤中蓄积起来。在盐渍化严重的情况下，盐分的淀积往往呈白色盐结皮出现在土壤表面，成为不毛之地。

中国西北内陆地区盐分的富集主要有两个方面的原因：一是含有盐分的地表水以地面蒸发消耗为主，水流流程较短，所带盐分集聚在地表；二是盐分被水带入湖泊和洼地，盐分逐渐积累，含盐浓度增加，这种水渗入地下，再经毛细作用上升到地表，造成地表盐分富集。

沿海地带由于海水入侵或海岸的退移，经过蒸发，盐分残留地表，形成盐渍土。

平原地区由于河床淤积抬高或修建水库，使沿岸地下水位升高，造成土壤的盐渍化。灌溉渠道附近，地下水位升高，也会导致盐渍化。

干旱气候是发生土壤盐渍化的主要外界因子，蒸发量与大气降水量的比值和土壤盐渍化关系十分密切。地形地貌直接影响地表水和地下水的径流，土壤盐渍化程度表现为随地形从高到低、从上游向下游逐渐加剧的趋势。

引起盐渍化的人为因素主要是灌溉用水管理不善造成的。在大型水库和引河灌区建设过程中，对可能发生的灌区次生盐碱化问题，缺乏环境影响评价，没有采取相应的预防措施，是导致灌区大面积土地盐碱化发生的直接原因。此外，灌、排渠系不配套，不能满足及时排涝防洪和降低地下水的要求；渠系设计水位偏高、渠道渗漏、大水漫灌、田间灌溉渗水量大、渠系有效利用系数低等因素使地下水长时间处于高水位，也加速了土壤表层盐分的积累，最终导致土壤盐渍化。

(三)土壤盐渍化的危害

土壤盐渍化的危害主要表现为使农作物减产或绝收、影响植被生长并间接造成生态环境恶化；采用盐渍土填筑路基时，会使基床强度降低、膨胀松软、翻浆冒泥。有的地方还会因盐渍土被溶蚀，形成地下空洞，导致地基下沉。盐渍土还可侵蚀桥梁、房屋等建筑物基础，引起基础开裂或破坏。

1. 恶化生态环境

盐渍化严重的地区生态环境脆弱，严重制约着经济发展和人民生活水平的

提高。

盐渍化问题是一个既古老又现代的问题。底格里斯河及幼发拉底河流域古代文明的衰亡即盐渍化所致。从公元前 4000 年起，舒美尔人在两条河流的泛滥地带建造水渠，实行了引水灌溉，在发达的农业基础上形成了两河流域的文明。但从公元前 2500 年开始，盐分的蓄积日趋严重，农作物被耐盐品种所替代，人们不得不迁移到别的地方谋生，在这个曾被称为文明摇篮的地方只剩下了人数极少的游牧民。

1964—1970 年修建的埃及阿斯旺大坝增加了尼罗河流域的灌溉面积，但却破坏了水分和盐分的自然平衡，使灌区土壤发生了历史上从未出现过的盐渍化问题，通过建设水坝、扩大灌溉面积来提高农业产量的意图完全落空，为了去除盐分不得不对 4 000 km^2 的农田铺设排水设备。即使如此，在尼罗河三角洲地带仍有 2/3 的土地出现了盐渍化。

2 影响农牧业生产

土地盐渍化严重危害农作物的生长。一般轻度盐渍化土壤，作物减产 25%，中度盐渍化土壤减产 50%，重度盐渍化则减产 75% 以上。牧区盐渍化，使草场生产力下降，牧草质量降低，从而影响畜牧业的发展。

3. 毁坏道路路基

硫酸盐盐渍土随着温度变化，本身体积也产生变化，引起土体变形松胀。结果导致路肩坍塌、路基下陷，影响交通运输安全。由于降雨淋溶造成的退盐作用，会使路基变松、透水性减弱、膨胀性增大，从而降低路基的稳定性。

4. 腐蚀建筑材料，破坏工程设施

盐渍土中的易溶盐，对砖、钢铁、橡胶等材料有不同程度的腐蚀作用。硫酸盐含量超过 1% 或氯盐含量超过 4% 时，对水泥将产生腐蚀作用，使水泥砂浆和混凝土疏松、剥落或掉皮。

(四)土壤盐渍化的防治对策

土地盐渍化的防治应以盐渍化土壤的综合治理与农业可持续发展为目标，统一规划，因地制宜，采取水利措施与农业生物措施相结合的技术途径，推广节水灌溉技术和渠道防渗、防漏技术，提高水资源利用效率，防止地下水位抬升。开展区域水盐运动的监测与预报技术的研究，建立土地资源质量及盐渍化监测预报体系。

对盐碱地和盐渍化土地进行改良，排除土壤中过多的可溶性盐类，降低土壤溶液的浓度，改善土壤理化性质和空气、水分状况，使有益的微生物活动增强，提高土壤肥力，以减轻土地盐渍化程度，改善农业生态环境。

五、土壤污染

各种污染物质进入土壤，引起土壤的组成、结构和功能发生变化，使土壤质量下降，抑制农作物（或植物）的正常生长和发育，某些污染物质甚至在植物体内积累，降低产量和质量，危害人体健康的现象，称为土壤污染。施用化肥和农药是污染土壤的主要途径；其次，垃圾、废渣、污水都以土壤作为处理场所，包括不合理的污灌，例如，大气中的 SO_2、重金属，可以经“干降”和“湿降”而进入土壤，使土壤“酸化”，造成重金属污染。

土壤污染的危害主要表现在对人类健康和植物的影响两个方面。土壤中的污染物超过植物的忍耐限度就会引起植物的吸收和代谢失调，影响植物的生长发育，甚至导致遗传变异；土壤污染对人体健康的影响主要是通过食物链实现的，被病原菌污染的土壤可直接传播疾病；土壤污染还可以引起和促进整个人类生态环境的污染。

六、湿地减少

河流漫滩、沼泽红树林地以及其他形式的湿地只占世界土地面积的 3% ~ 5%。但这些地方对野生生物的保护极其重要。湿地是鸟类的繁衍场，并分布有世界上最富饶而多样的生态系统。湿地的另一重要功能是在干旱区可作为水源积蓄地，并可大大地增强自我净化的能力。湿地对调节、保护生态系统起着重要作用。然而，由于自然因素和人类不合理的开发活动，全球湿地面积正在迅速消失。约有一半面积的湿地变作农业用地。湿地消失可引起当地水体自然净化能力的损失，对鸟类的生存造成危害。

七、耕地日趋减少

耕地减少是当今世界普遍存在的问题。它关系到人类的吃饭问题，归根结底涉及到人类的生存和发展，因此已引起全球的关注。

城市建设、工业、交通和采矿的发展占用大量的农业用地。人口的增长必然带来城市的发展，而且城市扩大的速度比人口增长的速率还要快，这是人类对生活水平的要求不断提高的结果。据统计，美国每年由于城市和交通建设占用农业用地高达 $100 \times 10^4\ km^2$；日本 1960—1970 年间也有类似情况，城市的扩张在吞噬着大量农田。

中国是一个人口多、耕地少的国家。随着人口的不断增加，人地矛盾日益尖锐。全国耕地面积已由 1996 年的 $1\ 3003.92 \times 10^4\ hm^2$ 减少到 2002 年的 $12\ 595.0 \times 10^4\ hm^2$，7 年间净减少耕地 $408.92 \times 10^4\ hm^2$（表 3－4）若按 13 亿人口计，人均耕地不足 $0.1\ hm^2$。

表 3－4　1996 年以来中国耕地面积变化情况

年份	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
耕地面积 /10^4 hm^2	13 003.92	12 993.33	12 966.66	12 919.99	—	12 761.58	12 595.0

注 据国土资源部信息中心（www.mlr.gov.cn），2003

导致中国耕地减少的原因主要有以下几个方面：①为了保护生态环境，调整农业用地结构，占用了大量耕地。如大量耕地改种果树、养鱼、养虾或退耕还林还草等；② 乡镇企业发展和农民盖房占用耕地； ③用于城建、工矿、交通建设的耕地；④兴修水利、砖瓦窑、盖祠堂、修坟墓等也占用大量耕地。此外，水土流失、沙漠化、盐碱化和环境污染等，也使大量耕地失去利用价值。

第三节　土地资源保护与可持续利用

伴随着人口增加和经济发展，土地资源破坏与环境污染越来越严重，人地矛盾越来越突出。保护土地资源，珍惜每一寸耕地，合理开发利用土地资源，已成为当今世界土地持续利用面临的一项紧迫问题。

1. 开展土地资源评价，制定土地利用规划

通过对土地资源进行全面调查与评价，搞清土地资源的种类、数量、质量和分布；开展土地开发利用对环境的影响评价；根据不同土地类型的自然环境特点和生态规律，以及当地的社会经济条件等，编制县市、市地、省市自治区和国家级四级土地利用科学规划；制定山区土地可持续利用规划；制定农林牧副渔、基建、工业、居住、交通、公用等各项建设用地规划，为土地资源的合理开发与持续利用提供科学依据。

2. 建立健全土地资源管理的法律、法规

运用法制的、行政的、经济的综合手段，加强土地资源的法制管理，使土地资源管理逐步走上法制轨道。培植和完善土地市场，建立全国和各地区土地基础地价体系，规范土地市场，实现城市、农村土地市场一体化。建立健全土地信息管理机构，建立国家级和省级土地资源信息管理系统，开发应用遥感图像处理、全球定位系统（GPS）以及决策模型和系统分析技术，实现全国土地市场信息管理的计算机联网。

3. 改造中低产田

农作物丰产的关键在于提高单产，因此，必须增加物力、财力和技术投入，遵循生态规律，改造中低产田。对旱地，主要是解决缺水问题，要增加水利设施，引水灌溉；同时植树种草，提高植被覆盖率，改善生态环境。如果有一半的中低产

田达到中产田水平，每年可增加粮食 165×10^8 kg；另一半如能达到高产田水平，每年可增加粮食 495×10^8 kg。

4. 防止土地退化和土壤污染

水土流失和土地沙质荒漠化是土地退化的主要表现形式。它们的防治必须坚持以下原则：实行预防与治理相结合，以预防为主；治坡与治沟相结合，以治坡为主；生物措施与工程措施相结合，以生物措施为主；生物措施中乔、灌、草相结合，因地制宜。

防治土壤污染：①必须控制污染源，减少“三废”排放量；②对污灌水进行预处理，使之达到国家标准；同时根据作物种类、土壤特性，来确定灌溉方式、时间、水量和次数，实行科学污灌，避免土壤污染；③对已污染的土壤进行治理，根据污染物性质采取各种措施加以治理，以降解、沉淀、中和或分解土壤中的有害污染物质。

5. 合理调整农业生产布局，充分发挥土地优势

土地资源类型多种多样，并且具有明显的地域差异性。因此要根据生物适宜性特点进行农业生产布局，以充分发挥不同地区各种土地类型的优势。例如，平原地区、三角洲地带，土层深厚，水源充足，适宜于粮食作物生产，要优先建立和发展粮食基地，提高土地产出水平。各种树木也都有自己的适宜环境，可在不同地区发展多种多样的林业基地。

第四章　水资源与地质环境

水是重要的自然资源，也是自然环境不可分割的组成部分；水是一切生命的源泉，是生态系统健康发展的关键因素，是人类生活和工农业生产不可替代的重要物质。水对社会经济各个方面的影响都是至关重要的。没有安全、稳定的供水，就没有人类和社会经济的可持续发展。同时，洪水、干旱和污水作为灾害，可对人类社会及自然环境产生严重的不良影响。

水资源的不合理利用已经导致供水短缺、区域地下水水位下降、湖泊萎缩、江河径流量减少、海水入侵、地面沉降、生态环境退化等诸多问题。而人类活动造成的水污染使本已十分短缺的淡水资源数量进一步减少。

因此，在当今世界人口不断增长，城市建设和工农业生产迅速发展，以及人民生活水平日益提高的形势下，人们开始重新认识水的重大作用。世界各国均把水当作一种宝贵的资源去研究、开发、利用和保护。

第一节　水资源与水环境问题概述

水既属于资源的范畴，也属于生态环境的范畴。在各种自然资源中，水资源最重要的特征就是它在水循环中不断地被重复。由于人类活动大量排放废弃物已引起江、河、湖、海的污染，使天然水逐渐失去原有的价值和作用，产生诸多水环境问题。

一、水资源的概念及其特征

（一）水资源的概念

水资源一词很久以前就已经出现，并随着时代的前进而不断地丰富和发展。在《英国大百科全书》中，水资源被定义为全部自然界中任意形态的水，包括气态水、液态水和固态水的全部量。联合国教科文组织（UNESCO）和世界气象组织（WMO）共同制定的《水资源评价活动——国家评价手册》中，把水资源定义为“可以利用或可能被利用的水源，具有足够数量和可用的质量，并能在某一地点为满足某种用途而可被利用”。

因此，可以把水资源理解为人类长期生存和发展过程中所需要的各种水，既有数量和质量的涵义，又包括使用价值和经济价值。水资源概念通常有广义和

狭义之分。狭义上是指人类能够直接使用的淡水，即自然界水循环过程中，大气降水落到地面后形成径流，流入江河、湖泊、沼泽和水库中的地表水，以及渗入地下的地下水。人们用它来满足工业用水、农业用水和生活用水，一般以径流量来表示水资源的数量。广义上是指人类能够直接或间接使用的各种水和水中物质，在社会生产中具有使用价值的水都可称为水资源。它包括地球上所有的淡水和咸水，既包括天然水，也包括人类利用工程或生物措施处理更新中的水。

（二）水资源的基本特征

水是环境中最活跃的要素。它不断地运动着，积极参与自然界中一系列物理的、化学的和生物的过程。地表化学元素的迁移和转化，地球表面的侵蚀、搬运和堆积，土壤的形成和演化，生物的生长和进化，都与水的循环密切相关。水参与了自然界物质的循环。因此，水是一种动态资源，是可以更新的资源。它有别于石油或天然气等矿物资源。

1. 储量的有限性

地球上的水以固、液、汽相三种状态出现，且全部分布在海洋、大气和陆地的贮存库中。地球上水的总量很大，据估计约有 13.6×10^8 km^3。其中咸水占 97.3%，淡水只占 2.7%。而淡水中有 77.2% 以冰盖和冰川的形式存在于极地和高山上，目前还极少被利用（表 4－1）。可见，水资源储量是有限的，人类生命所必需的淡水更加有限，并非用之不尽、取之不竭。

表 4－1 地球上的储水量

水分类型	贮存地点	水量/10^4 km^3	比例/%
地表水	河 流	0.13	0.000 1
	淡水湖	12.5	0.009 2
	咸水湖	10.4	0.007 7
	海 洋	132.00	97.212
地下水	土 壤	6.7	0.004 9
	地下浅层	420	0.31
	地下深部	414	0.305
冰川水	极地、高山	2 920	2.15
生物水	生物体	0.12	0.000 1
大气水	大气层	1.3	0.001
总 量		135 785.15	100.00

据联合国专家最新估计（1997），全球陆地可更新的淡水资源量大约为

$42.75 \times 10^6\ km^3$。其中易于开采、可供人类使用的淡水资源量约（$12.5 \sim 14.5) \times 10^6\ km^3$,不足全球淡水的 1%，即约占全球水储量的 0.007%,这就是湖泊、江河、水库以及埋深较浅易于开采的地下水。

2. 补给的循环性

自然界中各种形态的水由于自然和人为因素的影响处于不断运动和转换中，水的这种运动和转换构成了水文循环。毫无疑问，水文循环不仅对水资源的多少和时空分布有决定性作用，而且对自然条件下甚至污染条件下的水质都有决定意义。

地球上的水处于一种动态平衡的状态。水循环是一个庞大的天然水资源系统。在太阳能的作用下，海洋、湖泊、河流等广阔水面以及土壤表面、植物茎叶等通过蒸发形成水汽，上升到空中凝结成云；在适当的条件下又以雨、雪、雹等降水形式降落下来。这些降落到地表的水分，一部分在地面汇集成江河湖泊，称为地面径流；一部分渗入地下，成为地下径流。它们有时相互交流转换，最后都注入海洋，再以水面蒸发的形式向空气输送水分；被植物吸收后的水分通过茎叶的蒸腾也进入大气圈中。如此，便形成了水的无终止的往复循环过程。处于水循环系统中的地表和地下的淡水，不断获得大气降水的补给，并供给人类利用和满足生态环境平衡的需要。

3. 时空分布的不均匀性

水的分布决定于气候条件，其中以降水最为重要。降水受综合性气候带的控制，各地降水量的多少差别甚大。因此，受降水所决定的水资源在地域上分布很不均匀。以中国为例，南方多为山丘区，降水多，水资源丰富；北方多为平川，降水少，水资源短缺。同时，由于中国地处内陆，除东南沿海较湿润外，大部分属干旱－半干旱地区，降水在年内的分配也很不均匀，多集中于 7～9 月份,因此常出现干旱和洪涝等灾害。中国水资源的时空分布规律表现为：东南多、西北少，山区多、平原少 夏季多、冬季少。

4. 用途的不可替代性

地球在漫长的地质演化过程中，始终伴随着水的参与。水的循环与运动作为一种外动力地质作用，改变着地球的地表形态。一切生物体内都含有水。人的身体有 70% 由水组成，哺乳动物含水 60%～68%,植物含水 75%～90%。如果缺乏水，植物就要枯萎，动物就要死亡，物种就会绝迹，人类就不能生存。此外，水还是景观资源中不可替代的物质。陆地上川流不息的江河，碧波荡漾的湖泊，飞泻直下的瀑布，赋予了大自然多姿多彩的壮丽奇观。

水资源在国民经济建设的各行各业中占有重要的地位。水既是生活资料，又是生产资料，工农业生产和生活供水都要消耗大量水。水是推动人类进步和社会发展的重要的物质资源。

5. 利用不当的危害性

水资源开发利用为社会经济发展、自然环境保护做出了巨大贡献，但水资源开发利用不当则会祸及人类。如水利工程设计不当、管理不善，常造成垮坝事故或引起土壤次生盐碱化，有时还会引起生态环境发生重大变化，如埃及阿斯旺水坝建成后，血吸虫病蔓延，对库区居民的健康造成极大的危害。工业废水、生活污水、有毒农药的施用常造成水质污染，环境恶化；过量抽取地下水也会造成地面下沉，诱发地震等人为灾害。

（三）地下水资源的特征

地下水资源是指赋存和运移于岩土层中具有利用价值的地下水。它服从于大陆水的总循环，并有自己的运动规律，是大陆总水资源的重要组成部分。广义的地下水资源包括淡水、卤水、矿水、热水等。

地下水也是一种矿产资源，但它与一般的矿产资源不完全相同，主要表现在地下水具有流动性和可恢复性等特点，通过补给、径流、排泄的运动形式，循环迁移，显示出有规律的变化。在一般情况下，地下水主要接受降水或地表水直接、间接的补给，而通过潜水蒸发、泉水溢出或地下径流等形式排泄。在正常的自然条件下，补给量与消耗量每年基本上能达到天然平衡。在人为开采条件下，虽然改变了原来的补、排关系，但只要开采量以及其他消耗量与补给量保持平衡，就能维持地下水正常的循环，而不出现异常状况；否则就会由于过量开采而破坏原有的平衡关系，造成水位持续下降、水量逐渐衰竭等现象。

地下水在开采条件下，除得到天然补给外，还会由于水动力条件的改变而得到额外的补充。如外围地区周边补给、河流岸边的渗透补给、相邻含水层的越流补给、承压水的弹性释放补给，以及由于开采使水位降低而扩大的渗透补给等。此外，还有各种形式的人工补给等。

从供水意义来说，最具有实际价值的是地下水的循环交替过程中的可恢复资源部分。在天然条件下，上述可供利用的可恢复资源，称为天然资源；而实际开采利用的地下水资源称为开采资源。天然资源的多少，主要决定于补给条件或天然补给量；而开采资源的水量大小，除决定于天然情况与开采情况下的补给条件外，还决定于开采条件与经济技术条件。

二、水资源供求状况

（一）世界水资源的供求状况

地球在宇宙空间是一个多水的星球，约 70% 的地球表面被水覆盖。地球上水的总体积估计约 $13.6\times10^{8}\ km^{3}$。从地球上的水量分配看，海洋水占地球总水量的 97.3%，约为 $13.19\times10^{8}\ km^{3}$ 陆地上的水只占 2.7%，约为 $0.41\times10^{8}\ km^{3}$。全球各大洲水资源量分配以及人均水资源量也存在着很大的差异（表 4－2）。

表 4-2 全球各大洲水资源量及其利用

地区	水资源量		年供水量			
	总量 /km^3	1998 年人均 /m^3	年份	供水量 /km^3	利用程度 /%	人均用水 /m^3
全球	41 022	6 918	1987	3 240	8	645
非洲	3 996	5 133	1995	145.14	4	202
欧洲	6 234.56	8 547	1995	455.29	7	625
北美洲	5 308.6	17 458	1991	512.43	10	1 798
中美洲	1 056.67	8 084	1987	96.01	9	916
南美洲	9 526	28 702	1995	106.21	1	335
亚洲	13 206.74	3 680	1987	1 633.85	12	542
大洋洲	1 614.25	54 795	1995	16.73	1	591

注：摘自刘昌明等．中国水资源现状评价和供需发展趋势分析．北京：中国水利水电出版社，2001

随着人类文明的进步和社会经济的发展，水资源的需求量也在不断增加。第二次世界大战后，世界经济发展突飞猛进，用水量急剧增加。1995 年全球用水量已达到 $37\ 880 \times 10^8\ m^3$，人均平均用水约 $660\ m^3$，用水总量约占可利用再生淡水资源量的 27%～30%。由于淡水资源在地区上分布极不均匀，许多国家或地区出现了用水紧张的局面，全球约有 4.6 亿人生活在用水高度紧张的国家或地区。

（二）中国水资源的供求状况

中国水资源比较丰富，正常年全国平均降水量约 630 mm，小于全球陆地平均年降水的 800 mm。全国河川多年平均径流量为 $2\ 712 \times 10^8\ m^3/a$，平均径流深为 285 mm；多年平均地下水天然资源量为 $8\ 288 \times 10^8\ m^3/a$，地下水开采资源量为 $2\ 940 \times 10^8\ m^3/a$（表 4-3）。

表 4-3 中国按流域水系分区多年平均水资源量（1956—1979 年）

流域	面积 /km^2	径流总量 /$10^8\ m^3 \cdot a^{-1}$	地下水量 /$10^8\ m^3 \cdot a^{-1}$	水资源量 /$10^8\ m^3 \cdot a^{-1}$
黑龙江	903 418	1 166	431	1 352
辽河及其他河流	345 027	487	194	577
海、滦河	318 161	288	265	421
黄　河	794 712	661	406	744
淮河及山东诸河	329 211	741	393	961
长　江	1 808 500	9 513	2 464	9 613
东南沿海诸河	239 803	2 557	613	2 592

续表

流　域	面积 /km^2	径流总量 /$10^8\ m^3 \cdot a^{-1}$	地下水量 /$10^8\ m^3 \cdot a^{-1}$	水资源量 /$10^8\ m^3 \cdot a^{-1}$
珠江及华南诸河	580 641	4 685	1 116	4 708
西南诸河	851 406	5 853	1 544	5 853
内陆河	3 374 443	1 164	862	1 304
全　国	9 545 322	27 115	8 288	28 124
全　国①		25 933	8 390	26 868

注：摘自刘昌明等．中国水资源现状评价和供需发展趋势分析．北京：中国水利水电出版社，2001。

①水利部：2001 年中国水资源公报。

中国水资源总量居世界第 6 位，仅次于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印度尼西亚。但因人口众多，人均水量很少。按 1997 年人口计算，中国人均水资源量为 2 200 m^3，仅为世界人均水资源量的 1/3 左右，是美国人均水资源量的 1/5，加拿大的 1/50，略高于印度。

1949—1999 年的 50 年间，中国人口增加了 1.3 倍，国民经济生产总值（按可比价格计算）增长了 30 多倍，用水总量增加了 4 倍多（图 4－1）。1950—1980 年，水资源利用以农业用水为主，灌溉农业取得很大的发展，用水总量由 $1\ 030 \times 10^8\ m^3$ 增加到 $4\ 437 \times 10^8\ m^3$．1980 年以来，用水增长以工业和城市生活用水为主，2001 年全国用总水量 $5\ 567 \times 10^8\ m^3$，其中地表水源供水量占 79.9%，地下水源供水量占 19.7%，污水处理再利用和集雨工程供水量占 0.4%。工业和城市

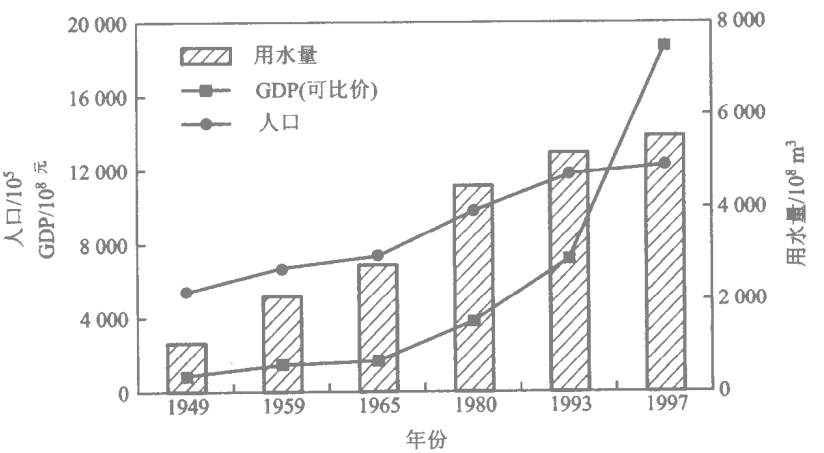


图 4－1　1949—1997 年中国社会经济发展与用水增长趋势

（摘自刘昌明等．中国水资源现状评价和供需发展趋势分析北京：中国水利水电出版社，2001）

生活用水的持续增长与有限供水之间的矛盾，造成了水资源的供需失衡，城市和工业用水挤占了农业用水；国民经济用水挤占了生态环境用水，加剧了生态环境的恶化。

三、水环境问题概述

纵观人类历史，处处闪耀着水对人类社会发展的巨大贡献，同时也记载着水给人类带来的无穷灾难。人类活动，尤其是近百年的人类经济活动，对天然水体的改造作用，已使水文循环深深地打上了人类活动的印记。由于人口的急剧增加，工农业和交通运输业的迅猛发展，水资源短缺、水质恶化、水源污染等水环境问题日趋严重，成了制约社会经济发展的主导因素。

中国淡水资源人均占有量低，时空分布变异性大，水资源与土地资源不相匹配，生态环境相对脆弱。20 世纪 70 年代以来，北方频频出现河道断流和湖泊洼淀萎缩等生态环境问题；南方水体污染及富营养化现象严重；西北干旱、半干旱地区经济用水大量挤占生态用水，使荒漠化趋势蔓延；西南山区坡陡、田高水低，水资源开发利用困难，水土保持工作艰巨。

（一）淡水资源短缺

如前所述，地球上的水是“可再生的”，总量也是恒定的；但真正可为人类直接利用的淡水又是有限的。由于地下水、地表水和降水分布的不均匀，意味着许多干旱和半干旱地区没有可靠的淡水来源；另一方面，人类消费的淡水量一直在迅速增加。淡水资源短缺已成为一个世界性的现象。全世界有 100 多个国家存在着不同程度的缺水问题，严重缺水的国家达 40 多个，约占全球陆地面积的一半。除了欧洲淡水资源比较丰富之外，其他各大洲都不同程度地存在着缺水的问题。最严重缺乏淡水资源的是非洲撒哈拉沙漠及其以南的几十个国家，特别是那些内陆国家。其次，亚洲也存在着较严重的淡水资源短缺的问题。

淡水资源短缺，在许多国家已经成为社会经济发展的制约因素，甚至影响到若干发展中国家人民的基本生存条件。

联合国在 2003 年 3 月 16 日“第三届水资源论坛大会”召开之前发表的最新报告(《世界水资源开发报告》)中指出,世界上有 80 个国家约 15 亿人口面临淡水不足，其中 29 个国家的 4. 5 亿多人生活在缺水状态中。水危机，将给 21 世纪全球政治、经济、和平发展带来巨大的挑战。现在全世界每年排放的污水达 4 000多亿吨,从而造成 5 万多亿吨水体被污染，致使全世界 60亿人口中约 20% 的人无法获得洁净饮水，每年有 220 万人死于与污染或恶劣卫生条件相关的疾病,到 2025 年世界上无法获得安全饮用水的人数将增加到 23 亿,到 2050 年年底，全世界 90 亿总人口当中的大约 70 亿将可能面临用水短缺。

淡水资源短缺的主要原因是：水资源量总体偏少，且时空分布不均；用水量

增长过快，用水超过水源的补给；管理不善，用水浪费；水污染加重，使原来可利用的水源无法使用等等。

（二）水体污染

水是不可替代的自然资源，更是自然环境的不可或缺组成部分；水在经济建设、社会发展和人民生活的作用非常重要。由于人类活动排放的污染物进入河流、湖泊、海洋或地下水等水体，使水和水体底泥的物理、化学性质或生物群落组成发生变化，从而降低了水体的使用价值。人类活动造成水体污染的来源主要有工业废水、生活污水和农业污水三个方面。工业废水是最主要的污染源，具有面广、量大、含污染物质多、毒性大、在水中不易净化的特点；生活污水是人们日常生活中产生的各种污水的混合液；农业中大量使用农药、化肥也会造成水体污染。

中国水污染情况相当严重。根据 2001 年中国水资源公报，全国废污水排放总量为 626×10^8 t（不包括火电直流冷却水），其中工业废水占 62%，生活污水占 38%。排放总量比 1949 年的 20 多亿吨增加了约 30 倍。废污水年排放量大于 20×10^8 t 的有 13 个省（自治区）。大量未经处理或不达标的废污水直接排入江河湖库水域，造成严重的水污染。全国 700 多条主要河流的水质监测评价结果表明，在 12.1×10^4 km 的评价河长中，Ⅰ类水河长占 5.0%，Ⅱ类水河长占 27.6%，Ⅲ类水河长占 28.8%，Ⅳ类水河长占 14.2%，Ⅴ类水河长占 7.8%，劣Ⅴ类水河长占 16.6%。全国符合和优于Ⅲ类水的河长占总评价河长的 61.4%，比上年增加了 2.7 个百分点。在评价的 24 个湖泊中，10 个湖泊水质符合或优于Ⅲ类水，2 个湖泊部分水体受到污染，12 个湖泊水污染严重。在 118 座大城市中约有 98% 的浅层地下水受到不同程度的污染；近岸海域劣Ⅳ类海水占 32%。水污染进一步加剧了部分地区的水资源紧缺状况。

（三）河川径流量减少

由于全球气候变暖，特别是近几十年人类经济活动的加剧，使以河流和湖泊为主的地表水体发生了很大变化，河川径流减少、湖泊萎缩、沼泽湿地缩小，进而导致这些地表水体的环境功能下降。

人类经济活动，如广泛推行综合农业技术措施、林业技术工程、地区都市化等，必然影响地表径流和地下径流的变化。这种河川径流的变化在水分过剩和热量不足的地区表现不明显，而在干旱地区或内陆地区则表现得十分突出。不同类型的经济活动对河川径流量的影响不同，不同时期经济活动的规模不同对径流的影响也不相同。

20 世纪 70 年代以来，中国第二大河流——黄河开始出现断流，并日益加剧。黄河下游频频发生断流的原因虽然很多，但主要因素是经济发展导致用水量急剧增加、管理不善和用水浪费造成的，用水量失控以及不合理调引河水加剧

了黄河水资源的短缺和下游河道断流。由于黄淮海平原普遍缺水，河川径流剧减，河道全年大部分时间断流，成为间歇性河流，入海水量大幅度下降。海河水年径流量从20世纪50年代的$242 \times 10^8\ m^3$已减到90年代的$66.24 \times 10^8\ m^3$左右，个别枯水年份只有7亿多立方米。东北地区的辽河，1998年干流新城子段自5月16日至6月21日出现断流37天，直接造成辽河左岸傍河取水工程和石佛寺等灌区用水紧张。

（四）地下水枯竭

地下水具有水质好、温差小、易开采、费用低等特点。地下水在含水层中的流动速度十分缓慢，自然补给量往往低于抽水量，很容易引起含水层衰竭。随着用水量的增加，人们常常超量抽取地下水，从而引起地下含水层的衰竭和地面沉降。如美国得克萨斯州西部一些地区因对地下水抽采过量，浅部含水层衰竭缺水的土地经常遭受干旱，松散的表土被风吹扬至空中，经常形成沙尘暴。

中国的华北地区因过度开采地下水，已出现全球最大的地下水漏斗，面积达$5 \times 10^4\ km^2$，目前仍在扩大之中。由于区域性地下水位下降，华北平原的地面沉降面积也越来越大；在沿海地区，地下水漏斗极易引起海水入侵。

（五）水文循环发生变化

地面降水与蒸发制约着大气与水圈的关系，渗流与植物根系作用、毛细管作用将地表水体与地下水联系起来，湖泊与水库、冰川与积雪、沼泽与湿地调节着天然水体循环；江河径流、海洋表面蒸发和降水又使陆地水体与海洋形成水的大循环。这是自然条件下，地球上的水文循环过程。然而，在人类的参与下，使地球上的水平衡循环系统发生了巨大的变化。

由于城市建筑物、道路路面、停车场等不透水面积的增大，以及采用管道排水、修建良好的防渗设施，使城区地表径流的汇集加快，地表径流系数增大，对地下水的入渗补给减少，从而改变了城市的水文循环，同样也改变了自然水循环系统的天然功能。此外，因城市能源消耗量大而形成的“城市热岛效应”，对整个城市及其周围地区的大气环流和水文循环也产生一定的影响。

水利工程也是人类改变自然水循环模式的重要方法。如中国的南水北调引水工程，是中国最大的区域性调水项目，它不仅改变调水区和调入区的地表径流量，而且也将影响两区的蒸发与降水，其环境生态效应不容忽视。

总之，人类的绝大多数经济活动，都是通过有意或无意的方式改变着自然水循环系统，从而改变着天然水的循环模式。这个过程，有些是有利于人类用水系统的，有些则是有害的。人类可以设计并建造比自然界更好的水循环系统，以达到天然水体的有效利用。例如，驰名中外的四川都江堰工程，就是古代劳动人民成功地改造自然水循环系统的范例。时至今日，该工程仍然在造福于人类。

第二节　水体污染

水污染问题可追溯到几个世纪以前，早在罗马时期，来自采矿场的重金属和来自城市的病原体就已经在当地引起了严重的水污染。18 世纪末叶，由于城市生活污水的不断注入以及工业废水的排入，英国的泰晤士河变成了恶臭、有毒和充满细菌的“死河”。工业革命以来，由于世界人口的不断激增，工业、农业和交通运输业的迅猛发展，水污染愈来愈严重，已成为全球性环境问题。各种各样的污染物从多方而来：下水道排泄的营养物和化学肥料的流失；农田流失的杀虫剂和除草剂；交通线散溢的油脂与各种化学制品；从空气中沉降下来的污染物质；从垃圾堆中渗流出来的化学物质；工矿企业排放的废余热水等，使地球上的河流、湖泊、海洋等水体受到了不同程度的污染。特别是在污水收集和处理方法不当的情况下，更容易造成污染。因城市生活或工业生产排出的具有细菌与营养物负荷的废水造成的水体污染，常使水中溶解氧减少或导致水体富营养化

一、水体污染的基本概念

（一）水体污染的定义

当进入水体的污染物质超过了水体的环境容量或水体的自净能力，使水质变坏，从而破坏了水体的原有价值和作用的现象，称为水体污染。

水体污染的原因有两类：一是自然的，二是人为的。特殊的地质条件使某种化学元素大量富集、天然植物在腐烂时产生某些有害物质、雨水降到地面后挟带各种物质流入水体等造成的水体污染，都属于自然污染。人为原因造成的水体污染是指人类生活和生产活动中产生的废物对水的污染。人们通常所说的水体污染，是指后者而言。《中国大百科全书——环境科学》一书对水体污染的定义是：“主要是由于人类活动排放的污染物进入河流、湖泊、海洋或地下水等水体，使水的物理、化学性质或生物群落组成发生变化，从而降低了水体的使用价值，这种现象称为水体污染。”

早期的水体污染主要是人口稠密的大城市的生活污水造成的。产业革命后，工业排放的废水和废物成为水体污染的主要来源。20 世纪 50 年代以后，在一些水域和地区，由于水体严重污染而危及人类的生产和生活。随着工业生产的发展和城市规模的扩大，大量未经处理的工业废水和城市污水排放到自然环境中，水污染范围不断扩大，污染程度日益严重。

（二）水体污染的判别指标

水质是指水和其中所含的杂质共同表现出来的综合特性。水质指标则表示出水中杂质的种类和数量，是判断水质和水体污染的具体衡量标准。水质指标

项目总共可有上百种，其中有的指标从名称就可以看出具体的杂质成分，如汞、镉、铁、硫酸根、六六六等；有的则是许多污染杂质的综合性指标，如浑浊度等。

为了反映水体被污染的程度，就要用污水的水质指标来表示。主要的污水水质指标有下列几项：

1. pH 值

水的 pH 值用来表示水中酸、碱的强度。pH 值的定义是溶液中氢离子浓度的负对数。天然水的 pH 值通常受到水中二氧化碳、重碳酸根和碳酸根平衡的控制。其变化范围在 4.5～8.5 之间，一般为 7.0～8.5。

污水的 pH 值对污水处理及综合利用、水中生物的生长繁殖、排水管道使用寿命等都有很大影响，所以被列为检验水质的重要指标之一。

2. 悬浮物

悬浮物是指水中呈固体状的泥沙和胶体等不溶解物质。由于在悬浮物上往往吸附着有毒有害物质，因此，悬浮物不仅影响水的透明度，而且使水质变坏。中国工业“三废”排放标准中规定悬浮物不得超过 500 g/L。悬浮物是废水处理厂设计的重要参数之一，也是废水处理设备处理效果的一项重要指标。

3. 有机物浓度

由于有机物的组成比较复杂，要想分别测定它们的含量比较困难，一般采用下面几个指标来表示有机物的浓度：

(1)生物化学需氧量:用 BOD(Biochemical Oxygen Demand)表示,简称生化需氧量。它是指水中有机污染物经微生物分解所需的氧量（单位体积污水所消耗的氧量,mg/L）。好氧微生物分解有机物是个缓慢的过程，一般需要 20 d 以上的时间。这一过程包括将有机物分解为水和二氧化碳的碳酸化需氧和将氨转变为亚硝酸盐的硝酸化需氧。同时，生化需氧又受有机物种类、数量、重金属以及微生物等多种因素的影响，因此一般测定生化需氧量（BOD）时的氧化率仅为 80% 左右。

目前国内外普遍采用在 20 ℃ 下,5 昼夜的生化耗氧量作为指标，以氧的每升毫克数来表示，称 5 日生化需氧量(BOD_5)。生化需氧量指标越高，说明水被有机物污染程度越深。

(2)化学需氧量:用 COD(Chemical Oxygen Demand)表示,指用化学氧化剂氧化水中有机污染物时所需的氧量。COD 越高，表明有机质越多。目前常用的氧化剂主要是重铬酸钾或高锰酸钾。以高锰酸钾作氧化剂时，测得的值也称耗氧量。但它不能如实反映被微生物分解氧化有机物时所需氧的量，不能代替生化需氧量，且测得的结果比生化需氧量偏高。

(3)总有机碳:用 TOC(Total Organic Carbon)和总需氧量 TOD(Total Oxygen Demand)表示。TOC 是近年来发展的用以间接表示水中有机物质含量的一种综

合性指标。它的测定需要专门的仪器，称为总有机碳测定仪。 TOC 几乎可以反映水中有机物质的总量，但个别耐久的碳化合物不易被燃烧氧化，故所测出的 TOC 值常低于理论值，其含量以 mg/L 计。TOD 是指水中的还原性物质，主要是有机物质在燃烧中变成稳定的氧化物时所需要的氧量，以 mg/L 计。它的测定亦需在专门的总需氧量测定仪中进行。 TOD 能反映几乎全部有机物质经燃烧后变成氧化物时所需的氧量。它比 BOD、COD 更接近于理论的需氧量。

4. 污水的细菌污染指标

每毫升污水中的细菌常以千万计。其中大部分是寄生在已丧失生活能力的机体上，这些细菌是无害的；另一部分细菌，如霍乱菌、伤寒菌、痢疾菌等则寄生在有生活机能的活的有机体上，它们对人、畜是有害的。对污水进行细菌分析是一项很复杂的工作，在水处理工程中，用两种指标表示水体被细菌污染的程度：①每毫升水中细菌（杂菌）的总数；②水中大肠菌的多少。水中含有大肠菌，即说明水已被污染。

5. 污水中有毒物质指标

中国已制定地面水中有毒物质的最高容许浓度和标准，列出了 40 种有毒物质。以上 5 个指标是表示水体污染情况的重要指标，此外还有温度、颜色、放射性物质浓度等。

二、水体的主要污染物及其来源

（一）水体主要污染物

水污染物的种类很多，据不完全统计，约有 150 多种，其中对水体污染有较大影响的共有九类。

1. 需氧污染物

生活污水和某些工业废水中所含的碳水化合物、蛋白质、脂肪等有机物，可在微生物作用下最终分解为简单的无机物质，而在分解过程中需要消耗大量的氧气。亚硫酸盐、亚硝酸盐和硫化物等无机还原性物质排入水体后同样也要消耗氧，这些物质被称为需氧污染物。它们对水体的污染程度一般以 BOD 表示。

需氧污染物虽属无毒有机物，但在氧化分解时会消耗或耗尽水中溶解氧，造成水体缺氧，导致鱼类及大部分水生生物因缺氧而死亡；在厌气条件下发生分解会产生有害物质如甲烷、氨和硫化氢等，使水质变黑发臭。

2. 植物营养物

植物营养物主要指氮、磷、钾、硫及其化合物，它们是植物生长发育所必需的养分，但过多的营养物质进入水体，将造成富营养化，水体质量发生恶化，影响鱼类的生长和危害人体健康。磷、氮两种植物营养物主要来自各种与土地利用有关的排放源。一般说来，森林覆盖区的河水中磷和氮的含量最低；城市河水次

之，农业区和饲养场含量最高（图 4－2）。未被植物利用的氮、磷肥料绝大部分随农田排水和地表径流进入地下水和地表水中。

从农作物生长的角度看，营养组分是宝贵的肥料，但过多的营养物质进入水体，会污染水体，造成水体富营养化，导致水生生物主要是各种藻类大量繁殖，水中溶解氧急剧减少，鱼类大量死亡。

一般讲，总磷超过 20 mg/m^3 ，或无机氮超过 300 mg/m^3 即可认为水体处于富营养化状态。

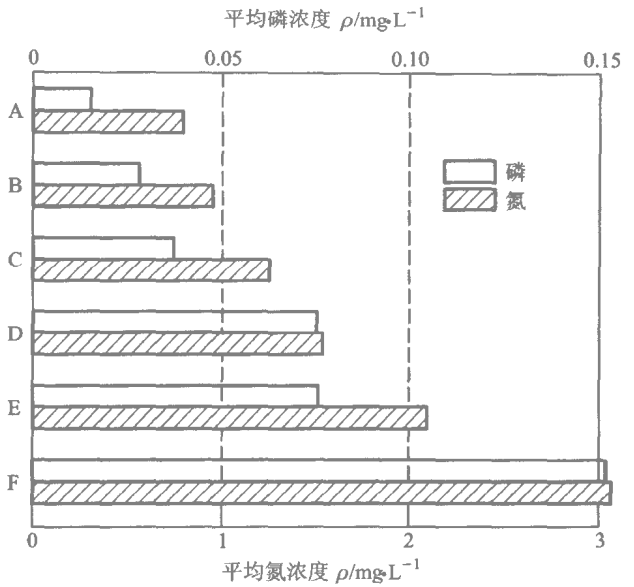


图 4－2　土地利用与河流中氮、磷平均浓度的关系

（摘自 KellerEA，Environmental Geology. New Jersey：Prentice Hall，Inc，1999）

A. 茂密森林；B. 森林为主；C. 森林与农业混合区；

D. 城市；E. 农业为主；F. 农业

3. 重金属

造成水、土环境污染的重金属主要有汞、镉、铅、铬，以及类金属砷等生物毒性显著的重元素，也包括具有毒性的重金属锌、铜、钴、镍、锡等。

采矿和冶炼是向环境中释放重金属的最主要污染源，此外不少工业部门也通过“三废”向环境中排放重金属。

重金属污染物最主要的特性是：在水体中不能被微生物降解，而只能发生各种形态之间的相互转化、分散和富集。重金属经常随自然沉积物一起沉积在河床底部。

4. 有毒化合物

许多合成有机、无机化合物对人和其他生物是有毒的。当它们进入地表水或地下水，就可能导致严重的污染。污染水体的有毒化合物最常见的是氰化物、酚类化合物。它们即使浓度很低，对鱼类及其他更小的水生生物也有毒性。

农药也是化学产品，中国使用的农药，主要是有机氯农药和有机磷农药。农药污染表现为毒性强、残留量大、残毒期和生物学半衰期长。即使微量的农药对生物体也有影响，因此特别要防止农药污染饮用水水源。

5. 酸、碱与无机盐类

酸性废水主要来自矿山排水、工业酸洗废水和酸性降水；碱性废水主要来自碱法造纸、制碱、制革等工业废水。酸、碱废水，可产生各种盐类，所以酸碱污染必然伴随着无机盐类污染。

酸、碱废水破坏水体的自然缓冲作用，消灭和抑制细菌及微生物的生长，妨碍水体的自净功能，腐蚀管道和船舶。酸碱污染不仅能改变水体的 pH 值，而且可大大增加水中的一般无机盐类和水的硬度。

6. 漂浮物

石油、油脂等油类物质及其他漂浮于水面的固体和液体物质，不仅淤塞河道、妨碍航运，而且影响水源利用、恶化水体的感观性状。悬浮物质能够截断阳光、影响水的通气性和水生植物的光合作用，危害鱼类、海鸟和其他水生生物。悬浮物质也增加了水体的浑浊度，降低了水体的旅游价值。水面含油量达到一定程度时，还容易引发火灾。

漂浮在水面上的石油绝大部分需通过自然降解和微生物分解而消失。因此要消耗大量的水中溶解氧（1 kg 石油完全氧化要消耗 40×10^4 kg 海水中的溶解氧），造成水体缺氧。

水中漂浮物主要来自采矿、建筑、农田水土流失、废污水排放、油船、输油管和海上油井事故等。据估计，全世界每年排入海洋中的石油约为 5×10^6 t。

7. 放射性物质

大多数水体在自然状态下都有极微量的放射性。第二次世界大战后，由于原子能工业，特别是核电站的发展，水体的放射性日益增高。

水体中的放射性物质主要来源于核动力工厂排出的冷却水。

放射性物质对于水体是一种新的不利因素，放射性元素（如^{137}铯）在水中的积累比在陆地上迅速。污染水体的最危险放射性物质是^{90}锶，^{137}铯等，它们半衰期长，经水和食物进入人体后，能在一定部位积累，造成对人体的放射性辐照，可引起遗传变异或癌症。

8. 病原微生物和致癌物

所谓病原微生物废水是指含有各种病原虫、寄生虫及卵、病菌、病毒和其他

致病微生物的废水。此种废水未经必要的消毒灭菌、杀虫杀卵等处理，直接排入环境就会造成疫病的传播和蔓延，直接危害人民的健康。

病原微生物是水体污染中主要的污染物。对人来讲，传染病发病率和死亡率都很高。借水体传染的有霍乱、伤寒、副伤寒、菌痢、传染性肝炎、蛔虫、绦虫和血吸虫等。目前伤寒、副伤寒、霍乱基本得到控制，但其他几种还未得到控制。

上述各种污染物质大部分都含致癌物质，如印染废水中的染料有多种芳香胺类致癌物；植物营养物中的亚硝基化合物可致肝癌；重金属铬、镍也可致癌。癌症是当前人们谈虎色变的问题，特别是环境污染带来的致癌物已引起广泛的重视。

9. 工业废热水

废热水是指工业排出的用于冷却的废水，主要来自发电站、钢铁厂、焦化厂等，它使水体温度上升，造成热污染。

水温过高有以下不良影响：①水中溶解氧减少，同时促使水中有机物加快分解，细菌活动性提高，增加氧的消耗②妨碍鱼类的生存和繁殖，除喜温鱼种外，一般的鱼在热水中呼吸急促、食欲减退、消化不良、容易死亡；③加大水中某些毒物的毒性，如当水温升高 10℃，氰化钾对鱼可产生双倍毒性；④河水温度的变化会影响对工业废水进行有效的处理，同时也降低其给水（冷却水）的价值。

（二）水体污染源及其污染特征

凡能释放或排放污染物的场所，均称为污染源。而排放或释放的污染物能引起水污染的污染源称为水体污染源。

1. 污染源分类

关于污染源的分类方案很多，迄今尚未取得统一。以下仅介绍两种主要的分类法。

（1）按污染源成因分类：可分成自然污染源和人为污染源。由于现代人们还无法完全对许多自然现象实行强有力的控制，因此对自然污染源也不能完全控制。人为污染源是可以控制的，但是不加控制的人为污染源对水体的污染远比自然污染源引起的水体污染严重。人为污染源产生的污染频率高、数量大、种类多、危害深，是造成水体污染的主要原因。

人为污染源又可分为工业污染源、农业污染源和城市生活污染源三大类。

（2）按污染源存在形式分类：可分成点源、线源和面源。以点状向水体排放污染物的污染源称为点污染源，还可以细分为稳定点源（如工厂、矿山、居民点等）和非稳定点源（如废渣堆、原料堆放场等）。以线状形式向水体排放污染物的污染源称为线状污染源。来源于较大面积的污染物对水体造成危害的，称为面污染源，也可称为非点源污染，如城市地面、农田、林田等。

另外，尚有按污染源排放的污染物的属性分为物理、化学、生物等污染源，按

纳污水体分为降水污染源、地表水污染源与地下水污染源等。

对地下水而言，除位于地表各种形式的污染源外，还存在地下污染源。如地下固体废物处置场、与潜水有水力联系的下伏高矿化度含水层、废弃矿坑内被污染的水体、排泄污水的钻孔和水井、地下输油管道、损坏了的地下废污水排放管道等。

2. 工业污染源的污染特征

工业污染源是水体的主要污染源，特别是未经处理的污水和废渣，直接流入或渗入地表、地下水体，造成严重的水体污染。

工业废水是水体最重要的污染源。它量大、面广，含污染物多，成分复杂，在水中不易净化，处理也比较困难。由于工业类型、原料、生产工艺以及用水水质和管理水平等的不同，各种工业废水的成分和性质差别是很大的。工业废水主要具有下列特性：

(1) 悬浮物质含量高：工业废水中悬浮物含量高，最高可达 30 000 mg/L，而生活污水一般在 200～500 mg/L；

(2) 需氧量高：有机物一般难于降解，对微生物具有毒害作用。一般 COD 为 400～10 000 mg/L，BOD 为 200～5 000 mg/L（生活污水 BOD 为 210～600 mg/L）；

(3) pH 值变化幅度大：工业废水中的 pH 一般在 5～11，甚至在 2～13 之间；

(4) 温度较高：排入水体可引起热污染；

(5) 易燃：常含有低燃点的挥发性液体，如汽油、苯、甲醇、酒精等；

(6) 多种多样的有害成分：工业废水中含有害成分多，如硫化物、氰化物、汞、镉、铬、砷等。

根据所含成分的不同，可将工业废水分为下列三类：第一类，主要是含无机物的废水，包括冶金、建材等工业排出的废水和氯、碱、无机酸和漂白粉等制造业的一些化学工业废水；第二类，主要是含有机物的废水，包括食品、塑料、石油化工、制革等工业废水；第三类，同时含有有机物和无机物的废水，如炼焦厂、氮肥厂、合成橡胶厂和制药厂等化学工业的废水，以及洗毛厂、人造纤维厂和皮革厂等轻工业的废水等。

工业废渣及污水处理厂的污泥中也含有各种有毒有害污染物，如露天堆放或填坑，当受到雨水及废水淋洗便会进入地表、地下水体中。

此外，工业物品储存装置及运输管道的渗漏常造成水体污染。油船漏油、排污钻孔套管断裂等突发性事故也会引起水体污染。

3. 城市生活污染源的污染特征

由居民生活而产生的水体污染物主要来自人体的排泄物和肥皂、洗涤剂、腐

烂的食物等。此外，科研文教单位实验室排出的废水成分复杂，常含有各种有毒物质；医疗卫生部门的污水中则含有大量细菌和病毒。因此，城市生活污水具有以下特点：

（1）含氮、磷、硫高：一般来说，城市居民每人每天排放污水中的氮约 50 g，大量的氮、磷、硫物质随生活污水排放到环境中，易引起水体富营养化；目前判断水体富营养化采用的指标是：总磷和无机氮分别超过 20 mg/m^3，300 mg/m^3。

（2）含有机物质多；主要有纤维素、淀粉、糖类、脂肪和蛋白质等，它们大多呈胶体状态。在厌气细菌作用下，易产生恶臭物质，如 H_2S 等；

（3）含有大量合成洗涤剂：合成洗涤剂的主要成分是表面活性剂和助洗剂，其中三聚磷酸钠、硫酸钠约占合成洗涤剂用量的 70%。美国生活污水中 50% ~ 75% 的磷是洗涤剂产生的。大量合成洗涤剂随城市污水排入水域，造成水域环境污染，对人体可能有一定的危害。

（4）含有多种微生物：每毫升污水中可含几百万个细菌，病原菌也多。

一般生活污水，相当混浊，温度约高于自然水温 1 ~ 2 ℃，pH 值在 7 以上(软水区为 6.5 ~ 7.5，硬水区为 7.5 ~ 8.5)，BOD 为 100 ~ 700 mg/L。

由于生活情况不同，各城市生活污水的组成、净化速度也不一样，故对水体影响亦存在一定差异。此外，生活污水因与人们日常生活有关，所以在时间上变化明显。

生活污水与工业废水的主要不同点是：生活污水中的生物可分解的有机物大部分呈胶体状态，而工业废水中的有机物则大部分呈溶解状态；生活污水中生物难分解的物质含量少，微生物含量多。

4. 农业污染源的污染特征

农业污染面广、分散、治理难。污染物主要是牲畜粪便、污水、污物、农药、化肥、用于灌溉的城市污水、工业废水及由城市汇集于城市下游的地面径流污水等。与其他污染源比较，农业污染源具有两个显著特点：

①有机质、植物营养物及病原微生物含量高：如中国农村的牛圈所排污水 COD 可高达 4 300 mg/L，是生活污水的几十倍。

②化肥和农药含量高：研究表明，施用的农药、化肥的 80% ~ 90% 进入水体，这些农药、化肥有的半衰期很长，如有机氯农药半衰期约为 15 年，故参与了水文循环，形成全球性污染。

农业污染源是一种面源，由于面广、分散，不易引起人们足够的重视。

5. 自然污染源的污染特征

自然污染源指自然环境本身给水体造成的污染。在现代工业出现之前，自然污染源是水体污染的主要原因。水体的自然污染源一般有以下几种：

（1）在特殊的地质条件下，某种化学元素大量富集，产生毒性，污染水体。

如有些地区地下水与泉水中氟含量过高，使当地居民患有氟斑牙，甚至出现骨骼畸形。

（2）火山喷发和风蚀作用产生的大量灰尘落入水体，造成水污染。

（3）在沿海地区，海水通过潮汐侵入河流、湖泊和地下水层，使其污染。

（4）水生生物的遗体腐败后引起水体有机污染甚至富营养化。

三、污染物的环境水文地球化学效应

污染物进入水体后，即开始复杂的物理、化学及生物因素综合作用的迁移转化过程。一方面，在水体的自净作用下某些污染物浓度降低，最终恢复到原来的水质状态；另一方面，某些作用增加污染物的迁移性能，使其浓度增加，或从一种污染物转化为另一种污染物，从而增加了对环境的危害。不同污染物在水体中的环境水文地球化学特征不同，各种水文地球化学作用对污染物的迁移可能存在两种效应：阻止迁移效应（或称净化效应）和增强迁移效应。

（一）水体污染机制与水体自净

1. 水体污染机制

污染物在水体中，始终存在着相互关联的水体污染与水体自净两个过程。水体污染的发生与发展，取决于这两个过程的强度，它们随污染物的性质、污染源大小及受纳水体三个方面的对比关系而定。在物理、化学、生物及生物化学等因素的作用下，水体污染的机制是极其复杂的。

（1）物理作用：水中污染物在水及其自身力的作用下迅速扩散，并随着分布范围的扩大，浓度相应降低，但其化学组成和化学性质不变。主要的物理作用包括水流的湍动作用、分子扩散作用、水流的冲刷作用等。

（2）生物化学作用：进入水体的污染物随水流迁移时，必然与水中各种各样的胶体和悬浮物接触，通过吸附一解吸、胶溶一凝聚等作用进行物质交换，经历水体污染与自净过程。

（3）化学作用：水体污染物，除随水流一起运动，还因介质条件的变化，各种成分之间以及与水体的原有成分之间发生化学作用。如酸化、碱化、中和、氧化一还原、分解一化合等化学作用，这种作用不仅可使污染空间扩大，而且也能使水体污染加重。

（4）生物作用：生物作用可扩大水体的污染范围，使污染物毒性增大，或使污染物在水中富集。生物作用包括生物分解作用、生物转化作用和生物富集作用。进入水体的有机物或某些矿物成分在生物作用下进行的分解作用有好气分解、厌气分解两种；某些元素在生物作用下发生形态和价态的变化，可转变为毒性更强的物质；或者通过生物累积与生物放大过程发生生物富集作用，使生物体内的某种污染物的含量大大超过水体中的浓度。

2. 水体自净作用

水体的自净能力，即自然净化能力，是大自然维持自身平衡的一种趋向。广义的水体自净是指受污染的水体，经过水中物理、化学与生物作用，使污染物浓度降低，恢复到污染前水平的现象。狭义上说，水体自净是指经水体中的微生物氧化分解有机污染物使水体净化的过程。

自然界各种水体本身都具有一定的自净能力。如果污染物质大量地、源源不断地进入水体，超过了水体的自净能力，就会使水质变坏造成污染。

（1）水体自净过程的特征：污染物进入水体，即开始了水体自净过程，由弱到强直至趋于稳定，水质逐渐恢复到污染前的水平。水体自净过程表现为：进入水体的污染物在自净过程中浓度逐渐下降；大多数有毒物质在多种作用综合影响下，转变为低毒或无毒的化合物；溶解状态的重金属污染物被吸附或转变为不溶性的化合物而发生沉淀；复杂的有机物被微生物利用和分解，最终变为 CO_2 和 H_2O；不稳定污染物转化为稳定化合物。

对于一条河流，当污染物质排入河流后，首先被流水混合、稀释和扩散，比水重的颗粒即沉降堆积在河床上；可氧化的物质被水中的氧气所氧化；有机物质则通过水中微生物发生生物化学的氧化分解，还原成液体或气体的无机物；另外，阳光还可以杀死某些病原细菌。与此同时，河流的表面又不断地从大气中获得氧气，使氧化过程和微生物消耗掉的氧气得到补充。经过一段时间，河水流到一定距离时，就恢复到原来清洁的状态。这一过程，沿河流的水流方向大体分为四段（图 4－3）：第一段为清洁段，处于排污口的上游，河水中尚未混入污染物，溶解氧一般处于饱和状态，水质洁净。第二段为污染段，由于大量污染物排入，河流水质恶化，生物分解活动激烈，水中溶解氧大量消耗；生化需氧量很高，耗氧作用超过复氧作用，溶解氧逐渐下降，直到出现溶解氧临界点。第三段是恢复阶段，这一河段，生化需氧量下降，溶解氧逐渐恢复，耗氧量低于复氧量，水质逐渐好转。第四段为清水段，溶解氧接近饱和，水质清洁，自净过程完成。在整个水质自净过程中溶解氧（DO）形成一条“氧垂曲线”。如果临界点水体处于无氧状态，河流将出现厌氧分解，水质迅速恶化、黑臭。

（2）水体自净作用：从净化的机制看，水体自净作用可以分为物理作用、化学作用和物理化学作用、生物和生物化学作用等。它们同时发生，又相互影响、交织进行。但一般地说，物理作用和生物化学作用在水体自净过程中最为重要。

物理自净作用是指污染物进入水体后，只改变其物理性状、空间位置，而不改变其化学性质。主要包括水体中所发生的混合、稀释、扩散、挥发、沉淀等过程。

化学自净作用是指污染物在水体中以简单或复杂的离子或分子状态迁移，并发生了化学性质或形态、价态上的转化，使水质亦发生化学性质上的变化，但

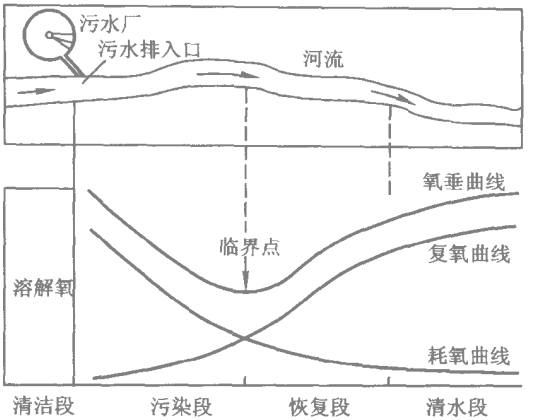


图 4－3　河流水体自净过程示意图

未参与生物作用。化学自净作用包括酸碱中和、氧化一还原、分解一化合、吸附一解吸、胶溶一凝聚等。化学自净作用可以改变污染物在水体中的迁移能力和毒性大小，亦能改变水环境的化学反应条件。

生物自净作用是指水体中的污染物经生物吸收、降解作用而发生消失或浓度降低的过程。如污染物的生物分解、生物转化和生物富集等作用。水体生物自净作用即狭义的自净作用，主要指悬浮和溶解于水体中的有机污染物在微生物作用下，发生氧化分解的过程。

污染物进入水体，立即被水体稀释和混合、吸附、凝聚或生成不溶性物质沉淀于水底，使水质得到改善。同时，水中各种生物的生理生化作用，也使被污染的水体得到净化。

水体自净作用是一个十分复杂的过程，在不同的时间和空间有不同的结果，并受多种因素的综合影响，如地形、地质及水文地质、水文、微生物种类与数量、水温、流速、复氧能力（风力、风向、水体湍动情况）以及污染物的组成和浓度等。

（二）污染物的环境水文地球化学特征

各种污染物质以不同形式进入水体后，虽然都经历着物理、化学和生物的作用过程，但它们对水体的污染机理和迁移转化过程有着各自的特征，存在着不同的水文地球化学效应。

1. 污染物在地下水系统中的迁移转化

污染物质绝大多数是从地面随下渗水流经土层而进入含水层的，很少有直接向淡水含水层排泄废弃污染物的情况。因此，从研究污染物迁移角度出发，一个完整的地下水污染系统应由以下各单元组成：污染源、农作物、表土层（耕作层）、犁底层、下包气带和含水层，如图 4－4 所示。

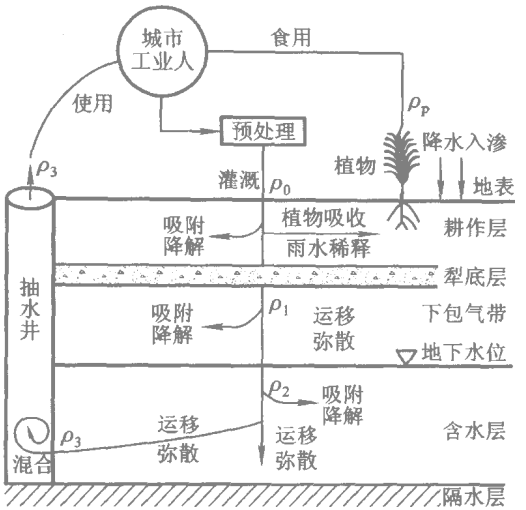


图 4－4　地下水污染系统示意图

污染物质在地下水系统内的迁移转化过程是：人为污染源→表土层→下包气带土壤→含水层→人类抽取并使用地下水。

人类活动排放的污染物经预处理后以浓度 ρ_0 从地表入渗进入表土层。这里（地表以下 0～20 cm）含有大量有机质，微生物活动频繁，土质均匀疏松，有较多的虫孔和根系孔隙，透气、透水性能较好。污染物质可在表土层中产生过滤、截留、降解、吸附、络合、沉淀以及植物根系吸收等一系列复杂的物理、化学及生物反应。

大量的实践亦表明，表土层比其下部包气带和其他土层具有较大的自净能力和环境容量，如对 BOD 可去除 95% 左右，对 COD 亦可去除 85% 左右，对各种重金属亦有较强的去除能力。然而，不论自净能力有多大，势必还有一部分污染物，特别是当超过土壤环境容量之后，一定会继续向下运移。污染物质经耕作层之后其浓度由 ρ_0 降低至 ρ_1。其迁移转化的过程是：

（1）当污染物质穿过土壤的犁底层之后，进入下包气带土层中：下包气带的土层厚度一般为几十厘米到几十米不等。这里腐殖质不多、微生物活动显著减少、植物根系和虫孔不发育。因此，污染物质在该层内的迁移、转化较弱，自净能力明显地低于表土层。在这一土层内起主要作用的是土壤颗粒的吸附作用和污染物质的转化，以及有机物在厌氧条件下的降解作用。污染物质在下包气带迁移、转化之后达到地下水面时其浓度已变为 ρ_2。含水层是被地下水完全充满土壤孔隙的饱水单元体。污染物进入含水层之后，在复杂的水动力条件下，经过稀释、转化、运移等作用，浓度由 ρ_2 降至抽水井附近的 ρ_3。当人类开发利用地下水

时，污染物则以 ρ_3 的浓度随地下水返回到人类圈。

（2）另一种循环过程是：从污染源进入耕作层之后，污染物质不是随水流向下渗透，而是被植物根系吸收，进入植物的根、茎、叶和果实之中，通过食物链以 ρ_p 的浓度返回到人类圈。

不同污染物的迁移能力受污染组分自身性质和环境因素的影响，迁移过程中所发生的作用各不相同（表 4－4）。

表 4－4　各种化学组分通过近中性粘土矿物柱的相对迁移能力

化学组分	主要衰减机理	相对迁移能力
OPP①	吸附－交换	低
Pb^{2+}	沉淀／交换	低
Cd^{2+}	沉淀／交换	低
Hg^{2+}	沉淀／交换	低
Cr^{2+}	沉淀／交换	低
Cu^{2+}	沉淀／交换	低
Ni^{3+}	沉淀／交换	低
$PCB_8$②	吸附／微生物降解	中等
Fe^{2+}	氧化－还原	中等
K^{+}	阳离子交换	中等
Mg^{2+}	阳离子交换	中等
NH_4^{+}	阳离子交换	中等
WSOC③（麦草畏）	微生物降解	高
Na^{+}	阳离子交换	高
Cl^{-}	弥散	高
COD	微生物降解	高
Cr^{6+}	稳定的水溶组分	高
HHC④	弥散	高
Mn^{2+}	从粘土中洗提出来	较易洗提
Ca^{2+}	从粘土中洗提出来	重新被吸附
NO_3^{-}	反消化作用／生物作用	较高
细菌	吸附／过滤	较低
病毒	吸附	较低

注：摘自林炳营．环境地球化学简明原理．北京冶金工业出版社，1990

①有机氯农药；②多氯联苯；③水溶有机化合物；④低分子卤代烃。

2. 氮的环境水文地球化学特征

以硝酸盐形式（NO_3-N）存在的溶解氮是地下水中最常见的污染物。由于 NO_3-N 是饮用水的一个重要参数，且其污染范围广、面积大，从而成为水污染研究的一项主要内容。在未受污染的天然水体中，NO_3-N 的含量多小于 30 mg/L，但在受污染的地下水中，其含量可达几百 mg/L 至几千 mg/L。例如，中国陕西、河南一些地区的“肥水”,其 NO_3^- 高达 4 000 mg/L 以上；美国得克萨斯州的鲁尼尔斯(Runnels)县,地下水中 NO_3^- 平均值为 250 mg/L,最高达 3 100 mg/L。

地下水中的溶解氮除常量组分 NO_3^- 外，还有微量组分 NH_4^+、NO_2^-、NH_3、N_2、N_2O 和有机氮。这些氮通常来自城镇生活污水和生活垃圾，食品、皮革、造纸等工业废水，化肥和农家肥（动物废物）以及大气污染形成的酸沉降等。此外，某些地区天然土壤中的硝酸盐也是地下水污染系统中 NO_3-N 的重要来源。

在一般污染水中，氮主要是以 NH_4^+ 及有机氮的形式存在，它们进入地下水污染系统的表土层之后，有机氮通过矿化作用形成 NH_4^+,转化为无机氮 然后发生亚硝化和硝化作用，使无机氮进一步转化。一般过程是：

$$\text{有机氮}\longrightarrow NH_3-N\longrightarrow NO_2-N\longrightarrow NO_3-N$$

影响氮转化的环境因素及地质因素主要有：湿度、pH 值、土壤含水量、污水及土壤中的有机质、包气带岩性及地质结构、含水层类型等。

3. 重金属的环境水文地球化学特征

近年来，随着微量金属在人体健康生态学上的研究逐渐深人，地下水中微量金属污染及其污染机理问题，已引起人们极大的关注。目前已列入饮用水标准中的微量金属有汞（Hg)、铬(Cr)、镉(Cd)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、铁(Fe)、锰(Mn)和银(Ag)。

在上述微量金属中，除铁外，天然地下水中的浓度一般都小于 1mg/L。但在受污染地区和某些特定地质条件的天然地下水中，其浓度可能超过饮用水水质标准。铬被认为是最有可能使地下水水质恶化的一种重金属，汞和镉是最危险的重金属污染组分。

微量重金属进人地下水污染系统之后，主要的迁移转化作用有：土壤的过滤、截留、络合、沉淀和吸附,以及植物的吸收、随水流迁移、弥散等。它们的迁移和转化受介质的 pH 值和 Eh 值控制，一般在氧化环境及酸性介质的水中浓度较高,而当介质 pH 值升高时，多数金属元素化合物经水解沉淀，在 H_2S 还原环境里形成金属硫化物沉淀。多数金属离子都能形成有机或无机的络合物、螯合物，从而提高它们在水中的迁移能力。金属元素及其化合物能被生物选择吸收，在机体内积累和转化，并可借助于食物链危害人体健康。相对于有机污染物，重金属及其化合物一般比较稳定，不易被分解净化。

(1) 汞(Hg)：在自然界里，除含汞矿床外，水体、土壤及生物体内均可能含

有汞。汞的人为来源主要是用汞的化学工业，如玻璃、颜料、炼油及电池等。

环境中的汞可以无机或有机的形式存在。无机汞包括金属汞（Hg）、汞离子（Hg^{2+}）和汞的硫化物（HgS）；有机汞主要有甲基汞（CH_3Hg^{3+}）和乙基汞（$C_2H_5Hg^{+}$）。汞在水溶液中的存在状态主要决定于介质的 pH 值和 Eh 值。汞在环境中的迁移转化作用主要有：无机汞各种形式间的氧化还原作用、各种无机和有机胶体对汞离子的吸附作用、与水中阴离子的络合作用、无机汞转化为有机汞的甲基化作用，以及甲基汞的生物富集作用等。汞进入水体中，经过上述作用，或沉于底泥，或溶于水中，或富集于生物体，或挥发到大气中，从而构成汞在环境中的循环。

土壤中的胶体颗粒对汞离子有很大的吸附能力，使汞常常富集在土壤、污泥、河流底泥里。土壤中汞的聚集深度约 25 cm，往下其含量即为背景值，这说明地表污染源的汞很难向下迁移进入地下水。

（2）铬(Cr)：铬在自然界中主要富存于超基性岩的铬铁矿中，在菱铁矿中也有一定富集。地表水中含铬一般为 10 μg/L，铬的主要污染来源是电镀工业、铬盐化工、制革、颜料、制药等工业排放的含铬废水、污泥及工业固体废物。

地下水中的铬有两个氧化态：Cr^{3+} 和 Cr^{6+}，分别以阳离子和阴离子的形式存在，即 $Cr(OH)^{3+}$ 和 $HCrO_4^-$ 或 CrO_4^{2-}。其中六价铬的毒性比三价铬更大。在浅层地下水中，因为它处于相对比较好的氧化条件，所以很易受 Cr^{6+} 的污染。CrO_4^{2-} 在氧化条件下是稳定的溶解组分，而三价铬在一般的地下水中（pH = 6 ~ 9）是不稳定溶解组分，很容易形成 Cr_2O_3 或 $Cr(OH)_3$ 沉淀，只有在 pH = 5 时，才以稳定的溶解形式 $[Cr(OH)^{2+}]$ 出现。一般来说，阻碍六价铬迁移的机理有两个：吸附和氧化还原。

当土壤中存在阴离子吸附剂时，在合适的 pH 值下，CrO_4^{2-} 即被泥沙所吸附。研究表明，主要起吸附作用的不是有机质，而是铁的氧化物及氢氧化物薄膜。地下水中 Cr^{6+} 的迁移常常受氧化还原条件的影响。如果地下水含水层或包气带地层中富含有机质及二价铁，则很容易使 Cr^{6+} 还原为 Cr^{3+}，并形成 $Cr(OH)_3$ 沉淀。

地下水 Cr^{6+} 污染的可能性及其严重程度，主要取决于该系统中铁和有机质的含量。Cr^{6+} 在水中成为一个稳定的溶解组分，与 pH 值和 Eh 值有着明显的关系，即含 Cr^{6+} 地下水是碱性的氧化环境。

（3）铅(Pb)：冶炼、化工、农药、油漆、搪瓷、陶瓷、蓄电池及塑料等工业的“三废”排放都可造成环境的铅污染。此外，作为汽油防震剂的四乙基铅使汽车尾气成为重要的铅污染源。铅已经成为全球性的污染物质，对人类的潜在威胁很大。

铅在天然水体中的含量和形态受 CO_3^{2-}、SO_4^{2-} 和 OH^- 等的影响，在中性和

弱碱性溶液中，铅的浓度为氢氧化物所限制；在酸性条件下，为硫酸盐所限制，酸性水中铅离子(Pb^{2+})的含量远高于在碱性水中的含量。

铅的化合物溶解度很小，进入水体中的铅易于沉淀，而难于迁移。铅一般在污染源附近被底泥吸附，或与铁锰水合物共同沉淀，或以碳酸盐形式沉淀。铁和锰的氢氧化物对铅有强烈的吸附能力，含氧化铁、氧化锰的沉积物中可以发现高浓度的铅。铅在环境中的迁移形式主要是随悬浮物被流水搬运迁移。

(4) 镉(Cd)：镉广泛应用于电镀、汽车及航空、颜料、油漆、印刷等行业。无论是从毒性还是蓄积作用来看，镉都是继汞、铅之后污染环境、威胁人类健康的三大金属元素之一。日本富山县疼痛病就是水田污染的典型事例。工厂排出的含镉废水是水体的主要污染源，进入水体的镉很快被水中的微粒吸附或产生化学沉淀，表现出明显的、迅速地向底泥转移的过程。因此，一般在水中检测到的镉含量较低，而在底泥中有时要高得多。

由于镉向底泥的转化是水体污染的一个主要过程，底泥的再搬运和沉积将对环境发生二次污染。

4. 微量非金属的环境水文地球化学特征

(1) 砷(As)：在地壳岩石中，砷常与硫结合形成硫化物。含砷的矿物主要有雄黄、雌黄、毒砂、砷华、硫砷铜矿等。这些矿物中的砷都是三价，经氧化后，可变为五价砷酸盐。砷常用于颜料、农药、药品、合金和玻璃工业，这些行业的固体和液体废物多含有砷。

一般地下水中砷含量多小于 0.1 mg/L，但在含砷矿床地下水、油田水及热水中砷含量往往较高。砷是个变价元素，地下水中的砷主要以三价和五价出现。在氧化条件下，砷为五价，多以带负电的络合阴离子出现。如地下水有足够的铁和锰存在，可形成难溶化合物 $FeAsO_4$ 和 $Mn_3(AsO_4)_2$。所以，在富氧的浅层地下水中，砷的浓度不会很高。在还原条件下，砷为三价，以带负电或不带电的络合离子存在。如地下水中有足够的硫存在，则可形成 As_2S_3 和 AsS 等矿物沉淀，这些硫化物的溶解度极低。

砷从水中的析出反应主要是被吸附于粘土颗粒而沉淀，天然水中的溶解性砷含量很低，水体中砷污染物主要存在于悬浮物和底泥中。

(2) 氟(F)：地壳中氟的平均含量为 270×10^{-6}，各种岩石都可能存在含氟矿物，其中以火成岩为最多。含氟矿物的溶解是地下水中 F^- 的天然来源，而人为来源主要是：冶金工业使用萤石做添加剂、含氟废渣的淋滤、钢铁企业的含氟废水、含氟磷灰石的开采和含氟液体及固体废物。此外，铅厂、玻璃厂、搪瓷厂等企业有时也使用含氟的原料，但因其用量小，一般不会造成地下水 F^- 的污染。

天然地下水中，氟的富集受到气候、地理、地层岩石中含氟矿物、水文地质条件及水文地球化学条件等多种因素的控制。如 pH 值不变，则 F^- 浓度随 HCO_3^-

增加而增大；如果 HCO_3^- 不变，则 F^- 浓度随 pH 值增加而增大。氟在土壤中的吸附受到土壤和矿物性质的影响，与土壤的 pH 值、Al、Fe、有机质和粘粒含量明显相关。如果土壤中 Al、Fe、粘粒及有机质含量低，pH 值高，则土壤对 F^- 的吸附能力小，F^- 易于被植物摄取，且可能向下淋滤进入含水层；反之，若 Al、Fe、粘粒及有机质含量高，pH = 5.0 ~ 6.5 间，则土壤对 F^- 具有高的吸附容量，植物不会受氟的毒害，也不会危及地下水水质。

5. 酚、氰的环境水文地球化学特征

酚是芳香烃的衍生物，是羟基直接连在苯环上形成的。酚呈弱酸性，电离常数一般为 10^{-10} 左右，是比碳酸还弱的酸。

冶金、炼焦、炼油、塑料、合成纤维、农药等工业废水中都含有酚。工业上大量产生的主要是苯酚（挥发酚），毒性较大，对水污染也较严重。

环境中的氰化物污染往往是电镀厂、化工厂排放废水及杀虫剂或其他药剂所造成的。氰在水中有多种存在形式。有简单的盐类，如氰化钾、氰化钠、氰化氨等，其溶解度大，毒性很强。氰比酚更易于挥发。

水体中酚、氰含量随时间和迁移距离而减少的时空变化规律主要决定于氧化作用。氰化物还能与重金属形成络合物而降低毒性。酚、氰的净化作用还有土层的吸附作用、微生物分解作用和植物净化作用等。

四、水体污染的危害

污染物排入水体后，不仅使水体的色泽、浊度、味道、pH 值、溶解氧含量等发生变化，有机污染物、重金属、农药、病原微生物等有害物质的含量增加，还引起水质的恶化，造成生态环境污染，威胁人类健康，给工农业生产造成重大经济损失。水体污染是当今世界上的重大环境问题之一。

1. 危害人体健康

水污染对人体健康的影响，主要有以下几个方面：

（1）引起急性和慢性中毒：天然水中只要有微量的重金属即可产生毒性效应，一般重金属产生毒性的范围大约在 1 ~ 10 mg/L 之间，毒性较强的金属如汞、镉产生毒性的范围在 0.001 ~ 0.01 mg/L 以上。水体中的某些重金属可在微生物作用下转化为毒性更强的金属化合物，如汞的甲基化作用。生物从环境中摄取重金属可以经过食物链的生物放大作用，逐级在较高级的生物体内成千上万倍地富集起来，然后通过生物进入人体，在人体的某些器官中积蓄起来造成慢性中毒，影响人体正常生活。20 世纪 50 ~ 60 年代日本发生的水俣病（甲基汞中毒）、骨痛病（镉中毒）均是水体污染造成的人体中毒事件。排入水体中的砷、铬、农药、多氯联苯、铅、钡、氟等也可引起中毒，对人体造成危害。

（2）致癌作用：某些有致癌作用的化学物质，如砷、铬、镍、铍、苯胺、苯并

(a)芘和其他的多环芳烃、卤代烃污染水体后，可以在悬浮物、底泥和水生生物体内蓄积。长期饮用有这类物质的水，或食用体内蓄积有这类物质的生物就可能诱发癌症。

(3) 发生以水为媒介的传染病：人畜粪便等生物性污染物污染水体，可能引起细菌性肠道传染病如伤寒、副伤寒、痢疾、肠炎、霍乱等。腺病毒、呼吸道病毒、传染性肝炎病毒以及某些寄生虫如蛔虫、鞭虫、血吸虫等，也可通过污染水而传播。据测定每升生活污水中病毒可达 50 万到 7 000 万个。

2. 影响工农业生产

在工业生产过程中，需消耗大量的水。不同的工矿企业对水质均有一定的要求，若使用被污染的水就会造成产品质量下降、损坏设备、甚至停工停产；如果对污水进行处理，就需增加水处理费用，从而直接影响产品的成本。

污水灌溉可造成大范围的土壤污染，破坏农业生态系统。酸碱进入水体使水体的 pH 值发生变化，破坏其自然缓冲作用，消灭或抑制细菌及微生物的生长，阻碍水体自净，还可腐蚀船舶，大大增加水体中的一般无机盐类和水的硬度。水中无机盐的存在能增加水的渗透压，对淡水生物和植物生长有不良影响。

3. 对水生生物的影响

水污染使水生生物遭受危害，影响渔业生产。随着工农业生产的迅猛发展，人类向环境排放的“三废”中，除了一些直接有毒和有害的元素及化合物外，还包括了大量的磷、氮等植物所需的营养物质。这些营养物质排入江河湖海，使水体中植物营养物大量增加，就会发生水体富营养化，使大量藻类增殖，甚至出现赤潮。赤潮是指水中浮游生物爆发性增加而形成的一种水体变色现象。

藻类过度生长繁殖，不仅使鱼类生活的空间减小，还造成水中溶解氧的急剧降低，使水体处于严重缺氧状态，从而严重影响鱼类生存。

此外，石油污染水体，油膜覆盖水面，阻碍水体的复氧作用，会造成水体严重缺氧，影响浮游植物的光合作用，降低水体的初级生物生产力，水生动物也不能顺利地从水中吸进氧气和排出二氧化碳。

五、水体污染防治对策

原则上讲，水体污染防治应以预防为主，加强管理，综合防治，充分考虑技术上的可行性和经济上的合理性。在采取技术措施的同时，还应结合行政措施、法律措施和经济措施。

1. 改进生产工艺技术,减少‘三废’排放量

通过企业的技术改造，改进生产工艺，实行“三废”资源化、无害化，尤其是废水资源化。可供推广的资源化处理系统有：

(1) 企业内部资源化处理系统：如水循环系统，重金属、人工合成有机毒物

的中间产物、副产物和流失物的再利用系统等。

（2）企业外部资源化处理系统：如一个企业的中间产物、副产品和“废物”转化为另一企业的原材料或半成品系统，工业和农业的有机废物制造沼气、肥料的系统等。

（3）外环境资源化系统：如土地处理系统，氧化塘系统，污水灌溉系统等。

此外，还有通用的废水无害化处理系统。但废水处理的等级应因地制宜，根据废水性质、处理后的用途以及各地的环境自然净化能力、经济能力等，采用多种处理设施，做到技术可行和经济合理的统一。

2. 调整产业结构，合理安排工业布局

自然净化能力是控制环境污染的重要因素，合理进行工业布局可以充分利用环境的自净能力，起到控制污染的作用。凡兴建工矿企业，都应根据企业性质、区域环境条件，特别是含水系统结构和含水层防污性能来选择厂址。更要注意选择适宜的地点作为废水、废渣的处理场所。为了确保水资源的质量，应严格建立供水水源地的防护带。

3. 重视区域水污染综合防治，加强水资源管理

从区域环境出发，对污染物的发生、排放、迁移、转化以及环境效应等进行全面调查研究。从整体功能考虑，针对区域水污染的主要问题，确定水资源管理目标，深入进行环境系统分析，优化最佳方案，为水污染综合防治提供依据；加强水资源管理，采取切实可行的防治措施；设立专门的管理机构，实施监督、执法的权力。

第三节　水资源开发对地质环境的影响

由于水的理化特性，它在生态与环境中表现得特别活跃。随着社会经济的不断发展和人口的日益增长，当今水资源的开发利用更具双重性：一是水被用于满足人类的需求而得到的利益；二是水被利用后水分条件变化引起某些环境问题而付出的代价。

水资源开发利用的环境问题是极其复杂的，主要表现在以下几个方面：

①问题的多样性：这是环境问题本身量大面广的本质所决定的。对水资源开发利用工程进行环境影响评价时，内容少者为两个数量级，多者可达到三个数量级。

②层次的多维性：水资源开发利用是一个系统工程，从生态与环境影响的角度对系统分解，除了从纵向分出层次外，在横向上又相互联系，构成复杂的交叉重叠现象。例如，水质的污染在纵向上可为多维演变，在横向上又涉及水生生态的若干层次。

③时空尺度的变异性：水资源开发利用引起的生态与环境变化，在时间尺度上有缓急之分；在空间上，除各地环境背景不同而产生的差异外，一个地点的环境变化会波及到另一个地点。

由于水资源开发而不断出现的地下水源枯竭、水体污染、海水入侵、地面沉降、岩溶塌陷、土壤盐渍化、沼泽化、沙漠化等环境水文地质问题，都是地质环境中物质迁移和能量交换的结果。水在原生和次生环境中，不仅以其化学成分和物理性质变化影响环境，而且还可由其水量、水位、水力坡度和水压力等动力学特征影响环境。

一、环境水文地质作用

环境水文地质作用是指地下水在人为和自然因素影响下，由水化学、水动力学、水物理学和生物学性质变化引起的对人类生产和生活环境的制约作用。按作用的机制，环境水文地质作用主要有环境水文地球化学作用、环境水动力学作用、环境水物理学作用、环境水文地质生态作用。各种作用的控制指标及其环境影响结果等列于表 4－5。

表 4－5　环境水文地质作用的类型及作用结果

分　类	作用实质	控制指标	常见作用	作用结果	环境影响
环境水文地球化学作用	物质迁移	pH,Eh	溶解—沉淀,氧化—还原，吸附—解吸，稀释—浓缩等	有害元素富集、贫化、毒性改变、净化等	水质变坏,引起地方病、公害病、包气带缺氧等
环境水动力学作用	能量转化	水力坡度、孔隙水压力、真空度	荷载效应,孔隙水压力、效应、应力,腐蚀效应	地面沉降,诱发地震、岩溶塌陷等	破坏交通,影响开矿,损坏市政建设或直接危及人身生命安全等
环境水物理学作用	热量转化	温度、热量、冻土层厚度	冻胀作用、融缩作用、热污染	冻土区地基失稳,热融滑坡等	破坏建筑,影响交通,妨碍渔业
环境水文地质生态作用	生态效应	毒性、浓度、水位	富营养化、蒸发作用、水土流失	生物物种减少,土地盐渍化、沙漠化	影响农业、林业、渔业、旅游业

注：摘自杨忠耀．环境水文地质学．北京：原子能出版社，1990

（一）环境水文地球化学作用

环境水文地球化学作用是指在一定渗流和水文地球化学条件下物质迁移、转化的作用，是决定污染物质迁移转化规律的主要作用。主要有酸碱作用、氧化－还原作用、吸附一解吸作用、络合与螯合作用、稀释和浓缩作用、生物净化与

浓集作用、放射性衰变和细菌的衰亡作用，以及污染质在水中的弥散作用。通过这些作用，水污染物质在环境系统中发生迁移、富集、转化、分散、净化、毒性改变，从而造成水质恶化、公害病等不良环境影响，或使水体发生净化作用。

（二）环境水动力学作用

环境水动力学作用是指由地下水动力学要素变化而引起的地质环境中相间能量的交换作用。通过荷载效应、应力腐蚀效应、孔隙水压力效应、潜蚀及吸蚀效应等作用，破坏地质环境中相间或相内力的平衡，引起地面沉降、岩溶塌陷等灾害发生。地下水位的升降变化，会造成水力坡度、渗透速度、水压力等动力学特征的变化。

（三）环境水物理学作用

环境水物理学作用是指地下水对热能的传播和转化而引起的建筑物地基失稳和地下水水质变坏的环境作用。由于人工热流出物的影响，水温度发生变化可引起水体热污染，影响水质和水生生态平衡。

（四）环境水文地质生态作用

水质、水量和水温等变化都可引起生态平衡的破坏。大量开采地下水造成的区域性水位下降，使包气带土壤水分减少，土壤结构破坏，出现土壤沙化和草原退化；不恰当的引水灌溉造成的地下水水位上升引发土壤盐渍化，从而破坏农业生态平衡；水污染物中氮、磷等营养物过多，可造成湖泊、海湾等水体中藻类灾害性的生长，使水体质量下降，危害水生生态系统。

二、水资源开发的负环境效应

人类对天然水资源的开发利用，不仅改变了天然水循环过程，使水量平衡在时间上和空间上出现了新的分配体系，而且给地质生态环境带来了一定的影响。其中有对人类经济活动有利的正环境效应和不利的负环境效应。

（一）区域地下水位下降

区域性地下水水位下降是水资源开发负环境效应的主要表现形式之一。由于超量开采地下水，地下水降落漏斗不断扩大，最终出现区域性水位下降，结果导致水资源短缺甚至枯竭。区域性地下水水位下降还是地面沉降、岩溶塌陷、地裂缝等地质灾害的主要诱发因素。

1. 区域水位下降的原因

地下水的动态变化，实质上是其补给与排泄两个环节宏观上的综合表现。例如,在含水层中,补给水量大于排泄水量,便引起水量增加,水位上升;反之,则水量减少，水位下降。从一个地区来说，地下水未经大量开采之前，基本上处于一种动态均衡状态，地下水位大致保持相对稳定。但是，随着人类生产活动加剧，地下水多年平均开采量超过多年平均补给量，就会破坏这种动态均衡状态，

消耗含水层的“储存量”，其结果就出现了直观上的地下水位逐年下降。

地下水超量开采的直接后果是地下水降落漏斗范围不断扩大，区域地下水水位持续下降。据水利部统计（2001 年），中国每年地下水超采量 80 多亿立方米，形成地下漏斗区 56 个，面积达 8.7 万多平方千米，这相当于近 3 个海南岛的面积。漏斗最深处达 100 多米。截止到 1999 年底，因严重超采地下水，华北平原已出现世界上面积最大的地下水下降漏斗，总面积在 $5\times10^4\ km^2$ 以上，基本连成一片。漏斗中心水位逐年下降，个别地区的抽水井深度达几百米。天津、沧州、衡水、德州一带的深层地下水水位下降漏斗面积达 $3.18\times10^4\ km^2$ 。浅层水水位降落漏斗分布于北京市及京广铁路沿线的保定、石家庄、邢台、邯郸到安阳一带，面积达 $1.89\times10^4\ km^2$。

2. 区域水位下降的危害

水位持续下降是地下水开采超量的主要标志。它不仅使取水工程的出水量减少或导致机井干枯、抽水设备报废，而且还可引发其他环境地质问题，如地面沉降、地表塌陷、泉水流量减少、生态环境恶化等。

（1）城市地下水资源枯竭：地下水资源是绝大多数城市主要的供水水源。由于城市人口集中、工业企业密集，地下水开采量远远超出补给量，水资源日趋减少乃至枯竭的趋势愈加明显。中国北方的北京、沈阳、石家庄、济南等大城市的地下水开采模数均已超过 $100\times10^4\ m^3/km^2\cdot a^{-1}$ ，结果造成补给量与排泄量的平衡关系失调，地下水水位持续下降，部分地区出现含水层被疏干的严重现象。

（2）泉水流量减少：岩溶泉域地区，由于不合理开采地下水，水位不断下降，造成泉水流量减少甚至断流。素以泉城著称的济南市，由于超量开采地下水，趵突泉群等四大泉群自 1972 年开始，由长年出流变成季节出流，到 20 世纪 80～90 年代则出现了多次断流的现象，单次断流时间最长的达两年之久。 20 世纪 50 年代，太原的晋祠泉流量为 $1.98\ m^3/s$，到 80 年代仅为 $0.43\ m^3/s$。泉水断流不仅减少了河水的径流量，还给城市建设和旅游观光带来不利影响。

（3）生态系统改变：区域地下水位下降，还影响到城市花草和树木的生长，植被覆盖率降低，湖泊水面和湿地减少，生态环境发生根本性变化。城市地下水位下降还在一定程度上加剧了城市“热岛效应”。如 20 世纪 50～60 年代，石家庄市区地下水埋深 2～4 m，树木无需灌水即可生长，林草茂盛，植被覆盖率较高。80 年代以后，由于地下水位下降，市区树木每年需灌水 3～4 次，才能使耐旱的树种成活，而不耐旱的柳树等已不能正常生长了。

（4）地面沉降和岩溶地面塌陷灾害加剧：人工抽取地下水是引发地面沉降的决定性因素。许多地区的地面形变监测资料表明，地面沉降中心与地下水漏斗分布范围有较好的对应关系。中国的东北平原、华北平原、长江三角洲、东南

滨海地区、内陆盆地等都出现了地面沉降现象；由于强烈开采地下水而遭受塌陷严重危害的城市，北方有唐山、泰安、平顶山、枣庄、郑州等地，南方主要分布在两广和西南岩溶发育区的城市。

3. 防止区域性地下水位下降的措施

水资源的可持续利用与保护对人类社会持续稳定发展是至关重要的。因此，必须采取有效的措施保护地下水资源，防止地下水水位持续性下降，减轻或避免由此引发的一系列环境问题。

（1）保证开采均衡条件下的“合理降深”，把设计开采量作为一个具有权威性的指标。在不超标情况下，地下水就会得到补给恢复，保持收支均衡状态。

（2）为了保证开采区地下水位不发生持续下降，保持地下水埋藏条件与水压状态分布的正常状况，即保持地下水—岩石—空气压力的平衡条件不受破坏，依据区域性地表水与地下水、供水与排水等综合规划进行统筹安排。

（3）开采地下水过程中，实行节制性有计划开采。

（4）保证不减少补给因素。如由于截流使地表水库或地下水径流减少。

（5）实行人工回灌，开辟地下水的补给源。如地面渗入法、坑渠渗入法及管井注入法等。

（二）地面沉降

地面沉降是指某一区域内由于各种原因导致的地表浅部松散沉积物压实加密引起的地面标高下降的现象，又称作地面下沉或地陷。地面沉降的特点是波及范围广、下沉速率缓慢、以垂直运动为主，往往不易察觉，但它对于建筑物、城市建设和农田水利危害极大。

19 世纪末以来，随着世界范围内人类工程活动强度和规模的不断增大，工业发达城市以及内陆盆地、地下水水源区和油气田开采区陆续出现了地面下沉现象。意大利的威尼斯城是最早被发现因抽取地下水而产生地面沉降的城市。美国内华达州的拉斯韦加斯市，自 1905 年开始抽取地下水，由于地下水位持续下降，地面沉降影响面积已达 1 030 km^2，累计沉降幅度在沉降中心已达 1.5 m，并使井口超出地面 1.5 m 。同时还发生了广泛的地裂缝，其长度和深度均达几十米。

20 世纪 50～80 年代，日本地面沉降遍及全国的 50 多个城市和地区。东京地区的地面沉降范围达 1 000 多平方千米，最大沉降量达到 4.6 m，部分地区甚至降到了海平面以下。

墨西哥、中国、欧洲和东南亚一些国家中的许多城市或地区，由于抽取地下液体均出现了较严重的地面沉降问题（表 4－6）。

1. 地面沉降的形成机制

人类活动是诱发高速率地面沉降的重要因素。抽取地下液体与地面沉降关

表 4-6 世界各地地面沉降概况一览表

国名	地区	面积/km^2	累计沉降情况			最大沉降速率/$mm.a^{-1}$	主要含水层埋深/m	地下水位降落值/m
			起讫年份	沉降量/m	平均速率/$mm.a^{-1}$			
日本	东京	2 070	1929—1984	4.56	82.9	195	>250	
	大阪	635	1935—1984	2.86	58.4	163	>200	23
	新瞙	655	1957—1969	2.70	142	530	420~660	44
墨西哥	墨西哥	7 560	1938—1968	8.0	266	420	50~500	>28
美国	圣克拉拉	510	1915—1967	3.9	75	219.6	150~366	56
	圣华金	9 000	1925—1970	8.5	258	366	305~764	137
	得克萨斯	10 000	1943—1964	1.5	71	170	50~600	61
	内华达州	500	1935—1963	1.0	35.7	—	60~300	30
意大利	威尼斯	510	1952—1973	0.14		0.51		6.5
中国	上海		1921—1974	2.70	50.9	150	60~160	25~30
	天津	8 000	1959—1985	2.69	103.5	140	102~180	20~50
	宁波	91	1965—1986	0.3	26	—	30~100	26
	台北	100	1955—1971	1.6	100	—	30~200	—

系最为密切。由土的固结理论可知，土体覆盖层荷载引起的总应力由土壤孔隙中的水和土颗粒共同承担。其中由水承担的部分称为孔隙水压力（p_w），它不能引起土层压密，又称为中性压力；由土颗粒承担的部分则直接造成土层压密，称为有效压力(p_e)，二者的总和等于总应力，即 $p = p_e + p_w$。从孔隙含水层中抽取地下水并不能使总应力发生变化，但水位降低会引起孔隙水压力减少，导致土中有效应力的等量增加，结果引起粘土层产生次生固结压密。同时，水位降减少了水的浮托力，并产生附加应力（相当于水位降的水柱重量），含水砂层排水固结，压密下沉。这种变形在时间上没有滞后性并可随着水位的抬高而回弹。粘土层的固结变形和砂层的压密变形的相互叠加就造成了地面沉降。

由于透水性能的显著差异，上述孔隙水压力减小、有效应力增大的过程，在砂层和粘土层中是截然不同的。在砂层中，随着承压水头降低，有效应力迅速增至与承压水位降低后相平衡的程度，砂层压密是在“瞬时”完成的。在粘性土层中，压密过程进行得十分缓慢，往往需要几个月、几年甚至几十年的时间；因而直到应力转变过程最终完成之前，粘土层中始终存在有超孔隙水压力（或称剩余孔隙水压力）。它是衡量该土层在现存应力条件下最终固结压密程度的重要指标。相对而言，在较低应力下砂层的压缩性小且主要是弹性、可逆的，而粘土层的压缩性则大得多且主要是非弹性的永久变形。因此，在较低的有效应力增长

条件下，粘性土层的压密在地面沉降中起主要作用，而在水位回升过程中，砂层的膨胀回弹则具有决定意义。

2. 地面沉降的分布规律

国内外所出现的地面沉降都发生在大量抽取地下水或抽取其他地下流体（石油、天然气等）之后。并且地面沉降中心与地下水降落漏斗的中心相吻合。

地面沉降的速率与地下水开采量或开采速度有良好的对应关系，地面沉降及单层压密量与承压水位的变化密切相关。

在许多地区，采用人工回灌或限制地下水开采，成功地恢复和提高了地下水位，控制了地面沉降的发展，在有些地区用上述办法还促使地面有所回升。

中国发生地面沉降的城市多位于滨海平原、三角洲平原、河流冲积平原和内陆盆地等地。这些地区广泛分布有巨厚的第四系松散层。

以上所述的时空分布规律，有力地证实了地面沉降与超采地下流体所引起的水位或液压的下降之间的成因联系。

3. 地面沉降的危害

地面沉降常产生于那些具备特定地质环境的工业化和城市化地区，给当地的社会经济发展和人们生活带来危害。地面沉降所引起的不良后果包括：沿海城市低地面积扩大，海堤高度下降而引起海水倒灌；海港建筑物破坏，装卸能力降低；地面运输线和地下管线扭曲断裂；城市建筑物基础脱空开裂；桥梁净空减小，影响通航；深井井管上升、井台破坏，城市供水及给排水系统失效；农村低洼地区洪涝积水，使农作物减产等。它是一种威胁人类生活和生存的环境地质问题或地质灾害。

在中国许多大中城市都程度不同地出现了地面沉降。如天津市在 100 km^2 的范围内，地面沉降量已超过 1 m；太原市的最大沉降量也已达 1.38 m，并出现了房屋裂缝、地下管道断裂等现象；榆次市由于地下水位下降，使潇河大坝产生不均匀沉陷，严重影响到枢纽工程的安全。

4. 地面沉降的控制和治理

地面沉降与地下水开采紧密相关，只要地下水位以下存在可压缩地层就会因过量开采地下水而出现地面沉降，而地面沉降一旦出现则很难治理，因此地面沉降主要在于预防。

（1）限制和压缩地下水开采量：地面沉降可通过调整取水工程布局和削减开采量来控制地下水位的下降。在进行开采设计时应根据允许降深值来确定开采量。已经发生地面沉降的地区，应不超过造成沉降的允许水位降来计算降深值，根据所能取得的实际最大开采量来规划工农业的发展。上海市为治理地面沉降，限制和压缩地下水开采，采取了许多可行的措施——以地表水代替地下水；以人工制冷设备代替地下水冷源，即在夏季增加人工制冷设备，作为工业空

调辅助冷源，减少夏季地下水开采量；综合利用，采用深井联络网实行地下水重复利用，调整地下水开采层次，合理分配各含水层的供水量。

（2）人工补给地下水（人工回灌）：这是用于防止地面沉降和增加地下水开采量的最积极的措施。选择适宜的地点和部位向被开采的含水层、含油层施行人工注水，使含水（油、气）层中孔隙液压保持初始平衡状态，最大限度地减小因抽液而产生的有效应力增量。把地表水的蓄积储存与地下水回灌结合起来，建立地面及地下联合调节水库，一方面利用地面蓄水体有效补给地下含水层，扩大人工补给来源；另一方面利用地层孔隙空间储存地表水，形成地下水库，以增加地下水储存资源。

（3）地面沉降区治理措施：对已产生地面沉降的地区，根据其灾害规模和严重程度采取地面整治措施，主要方法有：①在沿海低平原地带修筑或加高挡潮堤、防洪堤，防止海水倒灌、淹没低洼地区；② 改造低洼地形，人工填土加高地面；③改建城市给、排水系统和输油、气管线，整修因沉降而被破坏的交通线路等线性工程，使之适应地面沉降后的情况；④ 修改城市建设规划，调整城市功能分区及总体布局，规划中的重要建筑物要避开沉降区。

（三）海水入侵

海水入侵是由于滨海地区地下水动力条件发生改变，引起海水或高矿化咸水向陆地淡水含水层运移而发生水体侵入的过程和现象。又称盐水入侵、海水内浸、咸水入侵等。沿海城市是人口高度集中和经济快速发展的地区，对淡水资源的需求很大。由于超量开采，地下水水位持续大幅度下降可造成咸淡水界面发生变化，海水向淡水含水层侵入，地下水矿化度增高，水质恶化。

海水入侵是沿海地区水资源开发带来的特殊环境问题，在国内外广泛存在。美国的长岛、墨西哥的赫莫斯城，以及日本、以色列、荷兰、澳大利亚等国家的滨海地区都存在这一问题。

中国海岸线长达 1.8×10^{4} km，沿海地区是中国经济发展的重点地区，海水入侵会带来严重的经济损失。如大连、锦西、秦皇岛、青岛、厦门等地，由于海水入侵，水质恶化、大量水井报废、粮食绝产、果园被毁，严重地妨碍了工农业生产和旅游业的发展。

1. 海水入侵的机制

海水入侵地下水是咸淡水相互作用、相互制约的复杂的流体动力学过程。在自然状态下，含水层中的咸、淡水保持着某种平衡，滨海地带地下水水位自陆地向海洋方向倾斜，陆地地下水向海洋补给排泄，二者维持相对稳定的平衡状态。在这种情况下，滨海地带密度相对较小的地下淡水浮托在密度相对较大的海水或咸水之上，二者间形成宽度不等的过渡带或临界面。在咸淡水平衡状态下，这个过渡带或临界面基本稳定，可以阻止海水入侵。如果大量开采地下水使

淡水压力降低，临界面就要向陆地方向移动，原有的平衡被破坏，含水层中淡水的储存空间被海水取代，于是就发生了海水入侵。

关于海岸带含水层中海水一淡水关系的基本理论在国内外已进行了广泛的研究。20 世纪初，欧洲的某些滨海地区，在开发地下水的过程中率先发现了海水入侵问题，即在含水层中出现了盐水。吉恩和赫兹伯格分别对这一现象进行了分析，他们认为，在天然条件下海岸带附近咸、淡水分界面的埋深相当于淡水位高出海平面高度(h_f)的 40 倍。开采地下淡水时，经常在开采井附近形成降落漏斗和咸水入侵的反漏斗；如果开采量过大，则咸水反漏斗扩大上升，使咸水进入开采井中而污染水源（图 4－5）。

过渡带的盐分浓度随时间呈周期性变化，其厚度及在含水层中的位置和形态受多种因素的影响,如水文、气象、含水层特性、人类活动、海平面变化、咸淡水密度比和淡水入海量等，其中淡水入海的径流量和海平面变化起主要作用。

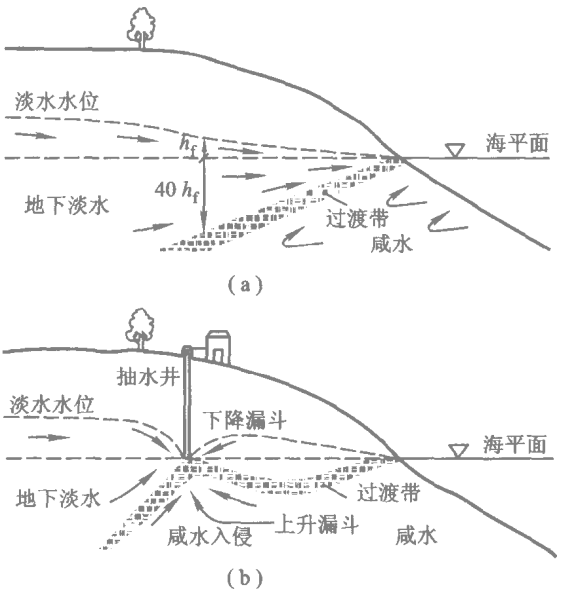


图 4－5 滨海含水层中淡水和咸水的流动过程及分界面变化示意图

(a) 水力平衡条件下海水与淡水的不相混溶界面；

(b) 滨海含水层中淡水和海水的流动过程及混合带

2. 海水入侵的危害

海水入侵的危害主要表现在恶化地下淡水水质、加剧水资源供需矛盾、影响工农业生产、破坏沿海地区的自然生态环境。

（1）供水井报废：由于持续干旱，地表水资源逐渐减少，地下水开采量不断增加，致使水井密度较大的地段水位明显下降甚至出现较大范围的降落漏斗，从而引起海水大量入侵，导致某些浅井被迫停采、报废或部分失效。

（2）水质恶化，地方病蔓延：海水入侵使地下淡水资源更加缺乏，沿海地区的居民和牲畜饮用水受到影响。有些地区不得不耗费巨额资金通过开凿深井或从外地运水等措施来解决生活用水。但受自然和经济条件的限制，若不能获得清洁的淡水资源，只能饮用咸水或污染水，从而导致多种地方病的蔓延和发展。

（3）影响工农业生产：海水入侵不但使农田失去灌溉水源，而且随着地下水变咸，土地逐渐盐渍化，农业生产受到严重影响。海水入侵地区的农作物减产一般都在 20% 以上，干旱年份减产 40% 以上，甚至绝收。由于水质恶化，水质要求较高的企业不得不开辟新的水源地或实行远距离异地供水，这不仅增加了产品的生产成本，同时也可能使新辟水源地遭受污染，扩大海水入侵的范围。

（4）生态环境恶化：海水入侵使沿海地区淡水环境恶化、土地资源盐渍化，从而导致植物群落由陆生栽培作物为主的生态环境转化为耐盐碱的野生植被环境。

3. 海水入侵的防治对策

海岸带淡水资源的管理与一般地区有所不同。它不仅要求合理开采和有效分配水资源，同时要求积极采取措施，限制海水入侵。一般情况下，应使海岸带地下水水位高于海平面，保证一定数量的淡水流入海中，使常年可利用水资源量小于淡水含水层的补给量。

（1）合理开采地下淡水资源：为使咸、淡水保持稳定的动态平衡，必须合理确定地下水开采量的临界值，防止地下水水位大幅度下降并使之保持在海平面或地下咸水水位以上。此外，要合理地布置开采井，放弃咸、淡水界面附近的抽水井，分散开采地下水，定期停采或轮采、缩短水位恢复时间，以防止形成降落漏斗。

（2）人工回灌：限制开采淡水固然简单可靠，但供水需求又常常无法满足，因此还可采用人工回灌的办法，增加地下淡水的水头和流速。人工回灌在中国和世界许多国家已有实践。回灌水源主要有当地雨季的地表水、外地引水、处理后的废污水等。

（3）阻隔水流：主要适用于海水入侵通道比较狭窄的地区。具体方法是在海岸线附近布置一排抽水井进行抽水，在地下含水层中形成一个抽水槽隔离带（水头降落带），从而阻止咸水向正在开采的淡水含水层入侵。与此相反，利用净化后的废污水进行回灌，在含水层的咸、淡水分界面上形成高于外围地区地下水位的“补给水丘”，借助“水丘”的压力阻止海水向内陆运移，也可减缓或阻止海水入侵。

此外，还应合理开发利用滩涂资源，严格控制滨海平原地下卤水开采量；严禁在近海河床挖砂，减少海（咸）水渗入强度及海水入渗量；在沿海河道适宜地段修筑防潮堤，防止海水沿河床上溯。

（4）监测预测：建立地下水动态监测网进行水位、水化学监测和海水水文动态监测。根据海水入侵的形成机制和入侵规律，预测海水入侵速率、规模和危害范围，从而为有效地防治海水入侵提供科学依据。

三、水资源开发的正环境效应

水资源开发利用对地质一生态环境的影响，除上述各种负效应外，在某些环境条件下，也有对环境变化有利的一面，即水资源的合理开发利用对环境还会产生正效应。

（一）控制土壤返盐

土壤盐分变化与潜水动态密切相关。地下水位埋深越浅，潜水蒸发量越大，向表土输送的盐分就越多，也就越容易造成土壤盐渍化。反之，如果将地下水位控制在一定的深度，就能抑制土壤返盐，并使盐碱地得到改良。如河北平原石津灌区实行井灌与渠灌相结合，控制地下水位埋深在 2.5～3.0 m，使全灌区盐碱地面积由 1972 年的 42.13×10^4 hm^2 减少到 80 年代的 2.4×10^4 hm^2；山东禹城试验区改引黄灌溉为井灌，加上明沟排水，使盐碱地大幅度下降。

（二）调蓄地下库容

在地下水位埋深较浅地区，合理降低水位可增大地下调蓄库容，有利于降水入渗补给。从 1975—1988 年，河北平原京津以南地区，浅层水水位平均下降了 5.9 m，腾空了地下库容 2.9×10^{10} m^3，增大了地下调蓄能力。在黄河平原上，从 1966 年以后，地下水的开采不断增大，加上深挖河道降低地下水的排泄基准面，促进了地下水的水平排泄，使该区地下水位埋深长年处于 2～3m 的状态，增强了降水入渗能力，也减少了地表径流。

（三）改善水质

傍河开采地下水，激发河流补给，不仅供水稳定，而且可利用岩层的天然过滤和净化作用，使难于利用的多泥沙河水，转化为水质良好的地下水，为沿河城镇和工业集中供水提供水源。北京、西安、兰州、西宁、太原、哈尔滨等大城市，大型供水水源地均为傍河取水型。

第四节　水资源保护与可持续利用

水资源是地球生命的支持系统和社会经济发展的物质保证。要创造人类持续发展的社会、经济和生存环境，必须对水资源实行持续开发利用的原则。全球

水文循环使世界各地的环境连成一个整体。为实现水资源的持续开发，必须从总体出发综合利用和管理水资源，在开发利用过程中保护水资源环境，并使其服从人类发展的需要。

一、水资源保护与可持续利用的目标和内容

随着人口的增长和经济的发展，更多的城市和地区出现了严重的缺水问题，淡水资源供给日益受到水质恶化和水生态系统破坏的威胁。水污染严重和水资源短缺已成为实现水资源可持续利用的两大重要障碍。

（一）水资源保护与可持续利用的总体目标

水资源保护与可持续利用是一个涉及多部门和多学科的复杂问题。其总体目标是：积极开发利用水资源和实行全面节约用水，以缓解目前存在的城市和农村严重缺水危机，使水资源的开发利用获得最大的经济、社会和环境效益，满足社会、经济发展对水量和水质的日益增长的需求，同时在维护水资源的自然功能，改善生态环境的前提下，充分合理地利用水资源，使得经济建设与水资源保护同步发展。

（二）水资源保护与可持续利用的主要内容

水资源保护与可持续利用主要涉及以下七个方面的内容，即水的长期供求计划与水资源评价；水资源、水质和水生态系统的保护；地下水资源的可持续利用与保护；保障城市生活和工业可持续用水；水污染控制和污水资源化；气候变化对水资源的影响及其适应战略；水资源管理体制改革及其能力建设。

为了实现水资源保护与可持续利用的总体目标，满足社会经济可持续发展对淡水资源的需求，必须以国民经济和社会发展与国土整治规划为依据，在江河湖海库流域综合规划和水资源评价工作的基础上，按照供需原理和综合平衡原则制定水资源供求计划；积极开展水资源评价，逐步建立以流域为单元并与区域相结合的水资源管理体制；从全局和整体来考虑水资源利用和水质、水生态系统的保护；开发湖泊河流、地下水污染控制技术，提高水的重复利用率；通过需求管理、供给管理以及价格机制实现水资源的有效分配；提高公众水资源意识，鼓励公众参与节水、水资源规划管理以及水资源评价活动。

二、水资源保护与可持续利用对策

目前，水资源短缺和水质污染问题，已使人民健康受到危害，经济发展受到阻碍。为了确保当代人民的生活水平不断提高和子孙后代的生存权利，采取正确的策略保护水资源、防治水污染已刻不容缓。下面根据中国水资源问题，提出一些对策措施。

（一）缓解缺水地区水资源紧缺的对策

中国水资源问题，已引起国家和社会的广泛关注。我们必须从战略高度认识水资源的重要性，立足于建立节水型社会。坚持开源节流、以节流挖潜为主的原则；坚持经济规划布局与水资源条件相适应的原则；坚持开发利用与保护管理并重的原则。

1 大力开发以农业节水为重点的全面节水工作

目前中国工业、农业用水量都是十分惊人的，节约水资源消耗量的潜力很大。中国农业人口多，农村面积大，农业灌溉用水占全国总用水量的 70% ~ 80% ；但由于农业技术落后，灌溉用水的浪费十分巨大。对蔬菜田，如将地表漫灌改为滴灌，用水量即可从 6 000 m^3/hm^2 减少至 3 750 m^3/hm^2。因此，必须改进灌溉技术，采用小畦灌、低压管灌、喷滴灌等措施，同时注意改善田间管理，合理设计农作物结构，改变耕作技术。

发展节水型工业的具体措施有三：一是采用先进的工艺技术，例如，以气冷设备代替水冷设备，以逆流漂洗系统代替顺流漂洗系统，以压力淋洗系统代替重力淋洗系统等，这样可以使用水量节约 20% ~90%。二是发展工业用水的重复使用和循环使用技术，做到一水多用，使一定量的水发挥数倍甚至数百倍的功效。三是加强管理，改进设备，杜绝浪费。目前很多工厂存在着设备老化、管理水平低、跑冒滴漏严重等现象。据估计其浪费水量约占总耗水量的 20% ~ 30% .

2. 水资源开发和环境保护统筹规划

上下游用水，工农业用水，地表水与地下水供水，经济发展与水资源条件，资源开发与生态环境保护，应作为一个复杂的系统工程统筹规划，使水量与水质、资源与开发工程一体化，提高水资源的社会、经济和环境的综合效益。

3. 多渠道开源充分利用本地水源

对于缺乏水资源的城市，城市废水的再生和利用往往是一项开发第二水资源的重要技术措施。城市废水水质较工业冷却水或洗涤水复杂得多，但通过有效的净化手段可以令其再生并被重复利用。如用于农业灌溉、工业冷却、浇洒道路、洗涤汽车等；也可用来补给地下水，防止地下水位下降或海水入侵。事实证明，城市废水的再生与利用除能缓解水资源的短缺外，还可减轻水环境的污染，变害为利，使污水资源化。

充分开发利用本地水资源的途径还有拦蓄地表水；扩大开发利用浅层地下淡水、微咸水；沿海地区扩大利用海水，以稻田和水产养殖场构成地表水入渗带防止海水入侵；矿区实行排供结合等。

4. 综合利用,涵养水源

充分发挥‘地下水库’、‘土壤水库’和‘绿色水库’的作用,综合调度地表水与地下水，实现大气降水、地表水和地下水的合理转化，涵养水源，保护生态

环境。

从综合效益出发，对地下水补给区、井灌渠灌结合区、地下水抽咸补淡区等地区，应根据需要和可能扩大地表水、灌溉水的入渗，利用地下库容调蓄，促进水资源的多次转化，增大重复利用率；加强田间管理，保持土壤水分，减少无效蒸发和灌溉用水量；坚持水土保持和植树造林，发挥“绿色水库”的水分调蓄功能。

5. 加强水资源开发利用监督管理，建立、健全水资源保护法规

传统体制下形成的水资源管理体制不利于水资源的有效开发、利用和保护。由于条块分割和人为地将完整的水系分开，经常发生部门之间、地区之间以及流域上下游之间的水事纠纷，很难实现水资源的统一与合理调配。因此，必须进行改革，建立和完善以河流流域为单元的水资源统一管理体制，把城市和农村、地表水和地下水、水质和水量、开发和保护、利用和治理统一起来。同时，建立一套水资源保护法律体系,使水资源在工业、农业、城市发展、水力发电、内陆渔业、运输、娱乐以及维持生态平衡等方面的利用和保护取得最大的综合效益。

（二）地下水开发利用的主要对策

地下水资源是城市和工农业用水的重要供水水源。地下水资源的可持续利用与保护对人类社会持续稳定发展是至关重要的。

1. 地下水应优先用于保证居民生活用水

城乡居民生活用水虽然在总用水量中所占比例较小，但与地下水实际开采量相比，还是相当可观的。在今后社会经济日益发展和环境保护日趋困难的条件下，保障安全卫生的生活饮用水的供应将非常艰巨。长期稳定优质供水，满足十几亿人的饮水需要，是关系国计民生的大事，必须把中国城乡居民饮水问题放在重要的战略地位。为此应采取以下措施：

（1）严格限制把符合饮用水标准的优质地下水挪作它用，必须在满足本地区人口增长对水资源需求的前提下，经有关部门批准，方可用于非饮用供水。

（2）大力开展找水改水工作，解决边远地区居民生活饮用水问题。

（3）加强地下水水源保护，建立水源保护区和相应的管理制度，严格保证居民饮用水的稳定与安全。

（4）调整城市供水结构，保证优质地下水用于城镇居民生活。

2. 合理调控地下水位，大力开展井灌井排、旱涝盐碱综合治理

中国农田灌溉和盐碱地治理的实践经验证明，以合理调控地下水位为中心的旱涝盐碱综合治理措施是成功的。

开采地下水，发展井灌，不仅可以防治土壤盐渍化，而且能够取得抗旱防涝的效益。汛前开采地下水灌溉，腾出地下水库容，有利于汛期集中降水的入渗，达到分洪除涝的目的。

3. 积极开展水资源的地下人工调蓄

为缓解水资源紧缺，许多国家采取了水资源地下调蓄和人工引渗补给地下水的措施，在工农业和城市供水中取得了良好的效果。

利用“地下水库”调蓄水资源，具有不占耕地、不需搬迁、投入少、卫生防护条件好等一系列优点。水资源地下调蓄已成为缓解水源紧缺、扩大可利用水资源以及改善地质环境的重要措施。

4. 调整和优化地下水开采布局

为了解决中国地下水开发中存在的问题，并考虑今后长远发展的需要，应对地下水开采布局做必要的调整：严格限制超采区的地下水开采量，分散布置开采水井；控制深层地下水的开采，大力开发浅层水和合理利用微咸水；兴建大中型傍河地下水源地，激发河流补给，自然过滤泥沙，保持稳定供水；在岩溶大水矿区，实行排供结合，提高矿区排水利用率；建立可操作的地下水资源管理模型，对地下水开采优化和开发利用实行有效的监督管理。

5. 建立健全地下水资源管理体系

强化科学管理，制定有效的经济政策，促进地下水资源的合理开发与保护；健全地下水资源信息系统；建立健全地下水资源开发利用的管理法规和监督体系，实行水资源综合规划和管理。

（三）中国水资源保护及水污染防治的当务之急

保护水资源、防治水污染的任务艰巨繁重，非一朝一夕所能奏效，在制定水资源保护的战略对策时，必须分清轻重缓急，根据需要及可能综合考虑。

1. 切实保护饮用水水源地

目前中国不少城市饮用水源的水质未达到国家水环境质量二级标准，甚至达不到三级标准。因此，为保证人民的身体健康，必须严格划定并建设集中饮用水水源的保护区和防护带，禁止一切污染水源的工程项目；积极发展推广饮用水处理新技术，确保饮用水的安全可靠；提高水质检测技术，尤其应重视对具有“致癌、致畸、致突变”有机物的检测。

2. 优先发展清洁生产技术

发展无废少废生产技术、工业生产全过程污染控制技术，以节约资源、减少污染，促进持续发展。

对污染严重的企业，应列为发展清洁生产技术的重点，以便尽快地控制和减少污染物的产生量及排放量。对分布在全国广大地域的乡镇企业，开发和推广清洁生产技术更是应优先采取的行动。

积极建立有关推广应用清洁生产的法规、评价审计方法及信息管理系统，建立应用清洁生产的示范工厂，加强有关清洁生产的培训活动及教育。

3. 加快城市废水处理厂的建设，大力发展城市废水资源化

工业企业排出的废水，凡符合市政下水道水质标准的，应接入城市废水处理

厂集中处理，不符合标准的应进行预处理或单独处理。

城市废水处理厂应因地制宜，采用高效低耗的处理流程。在缺水的城市和地区，应根据需要，大力开发废水回用，把再生废水作为第二水源，实行分质供水。废水处理厂的建设应贯彻分期建设的方针，规模从小到大，处理水平从低到高，在有条件的地方应优先采用天然生物净化系统。

4. 严格控制乡镇企业污染及农业污染

限制污染严重的乡镇企业的发展，合理布局乡镇企业及禽畜养殖业，严格控制对水资源系统的污染和破坏。

农业是水体富营养化及农药污染的主要来源，应指导农民科学、合理地使用化肥与农药，防止浪费和流失，减轻对水环境的危害。

5. 按流域、区域进行水污染的综合治理和水资源利用的合理规划

水资源和水环境涉及地面水与地下水、工业废水与城市污水和各种污染源，是一个十分复杂的系统。因此，按流域、区域进行水污染的综合治理和水资源利用的合理规划，也是一项应该立即着手进行的工作。

必须指出，保护水资源、防治水污染是关系到持续发展、人民生活及子孙后代的大事。我们必须给予足够的重视，投入必要的人力、物力和财力，确保中国国民经济持续稳定的发展。

第五章 矿产资源开发与地质环境

矿产资源是人类赖以生存、建设和发展的重要物质基础，开发利用矿产资源对人类社会的进步起到了巨大的推动作用。随着人口的增加，人类对矿产资源的消费量也在日益增长。人类在开发利用矿产资源的过程中，不可避免地对环境造成各种各样的破坏性影响。这种影响是长期而复杂的，是对矿产资源开发的一个严峻挑战。只有努力降低环境代价，才能使矿产资源的开发利用纳入 21 世纪社会、经济可持续发展的轨道。

第一节 矿产资源及其特性

矿产是在地球演化过程中形成的物质资源。人们的生活水平随着矿产可用价值的增加而提高。矿产资源的可用性也是社会财富的一种衡量指标。没有矿产资源，我们所处的现代文明是不可能出现的。

一、矿产资源的概念及其特征

（一）矿产资源的基本概念

资源是指维持生命和生活所必需的和经常利用的物质。根据资源的再生性，可分为可更新资源和不可更新资源两大类。可更新资源是指通过比较迅速的自然循环作用或人为作用能为人类反复利用的各种自然资源，如空气、淡水、生物产物（食物、木材）等。不可再生资源是指在人类开发利用后，在现阶段不可能再生的自然资源，如煤炭、石油等矿产资源。

矿产资源是指所有埋藏于地壳中或出露于地表，可被人们开采利用的矿物质聚集体。广义的矿产资源指在内外力地质作用下，元素、化合物、矿物和岩石相对富集，人类开采后能得到有用商品的物质形态和数量。狭义的矿产资源是指自然界产出的物质在地壳中富集成具有开采价值或潜在经济价值的形态和数量。

矿产资源一般包括能源资源和原料资源两类。能源资源即矿物燃料和核燃料；原料资源有金属原料（金属矿产）和非金属原料（非金属矿产）。在目前世界矿业生产总值中，燃料产值约占 70%，非金属原料约占 17%，金属原料约占 13%。人类社会对矿产资源的需求量约占自然资源需求总量的 70%。

（二）矿产资源的特征

1. 不均匀性

不同类别的矿产通常具有不同的地质形成条件，有色金属多与岩浆活动有关，而煤、天然气和石油等都分布于沉积岩地区。矿产资源在地区分布上表现为明显的不均匀性。如世界 1/3 的锡分布在东南亚，相当大的一部分石油集中于波斯湾地区等。

2. 有限性

相对短暂的人类历史而言，矿产资源是不可再生的，蕴藏量也是有限的。随着人类的大规模开发利用，矿产资源在不断减少，有的甚至发生短缺和枯竭，出现所谓的“危机”。有限性决定了矿产资源的宝贵性，因此必须合理开发，综合利用。

3. 相对性

对人类生存和社会发展的不同阶段而言，各种矿产资源又都具有相对性。在勘探、开发和冶炼技术落后的时代，低品位的“矿石”对人类而言如同岩石一样，不具有资源的意义；冶炼技术提高后，人类能够从昔日低品位“矿石”提炼有用的物质时，这些“矿石”才具有资源价值。因此，在不同的人类历史阶段，矿产资源具有相对性。矿石的埋藏深度亦决定其是否具有资源价值，不能被人类开采的地下深处的矿石即使品位很高，也不能称为矿产资源。例如，湖北大冶铜矿在三千多年前开始采掘，一直到东汉时期，开采的只是浅层的矿石；随着近代科技的发展，深部矿床才作为资源而被人类开发。

4. 生态性

矿产形成于地壳演化，矿产资源赋存于地质—生态环境中。人工开发矿产资源后，会对地质生态环境产生影响，破坏原有的地质生态环境的平衡状态，严重的可诱发不良现象而成为灾害。位于晋陕蒙交界处的神府—东胜矿区地处毛乌素沙地与黄土高原丘陵沟壑区的过渡地带，自然生态环境差；建设初期，由于煤炭资源开发与环境保护建设未能同步进行，导致生态环境进一步恶化，土地沙化、地下水位下降、水土流失、沙尘暴、地面沉陷等灾害加剧，河流泥沙含量在开矿后的 1987—1989 年增加了 15% ～63% ，采矿堆弃的废矸石达 $1\ 391.77 \times 10^4$ m^3，占用了大量的土地，原有地表植被遭破坏。

二、矿产资源的供给与需求

矿产资源是近代工业的基础；特别是能源，它是维持现代工业社会不断运转的必要条件。一个国家的发展程度也大体上可以用该国人民的人均能源消费量来加以表示。

（一）矿产的种类与成因

1. 矿产的种类

地球上的矿产按用途可以分为三大类，即金属矿产、非金属矿产和能源矿产。

（1）金属矿产：金属矿产指能够作为工业上提取金属原料的有用矿物资料。金属矿产按工业用途及金属本身性质，还可进一步划分为黑色金属矿产、有色金属矿产、贵金属矿产、稀有金属矿产等。

（2）非金属矿产：非金属矿产，系指那些除能源矿产、金属矿产外，能够提取有用非金属元素、化合物或能直接利用的岩石和矿物集合体。工业上只有少数非金属矿产是用来提取某一种元素如磷、硫等，大多数是利用非金属矿物的某种物理性质、化学性质或工艺性质。非金属矿产可用做冶金辅助原料、化工原料、工业制造业、陶瓷及玻璃原料、建筑材料等。它是人类使用历史最悠久、应用领域最广泛、开发前景最广阔的矿产资源。

（3）能源矿产：又称矿物燃料，是人类获取能量的重要物质资源，是工农业发展的动力和现代生活的必需品。能源矿产包括煤、泥炭、石油、天然气、铀矿等。尽管水力、太阳能、海洋能、风能等越来越广泛地开发利用，但在能源消费结构中，能源矿产仍占 90% 左右，是人们取得能量的主要源泉。能源矿产利用与环境地质问题，将在第六章中专题论述。

2. 矿产的成因

矿产的成因与整个地质循环密切相关，并受构造作用、地球化学循环以及水循环等作用的影响。矿产的形成作用一般包括：岩浆作用、变质作用、沉积作用、生物作用和风化作用等。

（1）岩浆作用：岩浆作用形成的矿床是元素富集过程的结果。它可以形成具有经济价值的多种金属矿产。有些矿床是早期晶体分离作用形成的；有些是由晚期岩浆作用形成的。

（2）变质作用：矿床经常在岩浆岩及其侵入围岩的接触带处发现，该区以接触变质作用为特征。区域变质作用和热液变质作用也可形成某些有用矿床。

（3）沉积作用：沉积作用对聚集有价值的可开采的矿床具有重大意义。在搬运过程中，风和流水使沉积物按大小、形状和密度分选。用于建筑方面的最好的砂或砾石都是由风或流水的搬运、沉积而形成的。沉积作用还可以形成金和金刚石砂矿；许多蒸发岩矿床的形成也与沉积作用密切相关。

（4）生物作用：生物作用也可形成矿床。许多矿床是在被生物强烈改造的生物圈环境中形成的。有机物如贝壳和骨骼可形成含钙矿物，人们已鉴定出几十种生物生成的矿物。生物成因矿物对沉积矿床的形成意义甚大。

（5）风化作用：风化作用也可以使一些物质达到一定浓度，并具有开采价值。如富铝火成岩风化后产生的残留土壤，可使难溶的含水氧化铝和氧化铁相

对富集，形成铝矿（铝土矿）。镍矿和钴矿也可在富铁镁火成岩风化后残留的土壤中找到。

风化作用还涉及低品位矿床变成高品位矿床的次生富集作用。

（二）矿产资源的供应状况

从绝对意义上说，地球的矿物是无穷无尽的。只要有足够的手段，人们可以从任何一块岩石、任何一把泥土中分析和提炼出周期表上几乎所有的元素。然而，由于技术水平与经济效益的限制，我们还不能从任何岩石中提取所需的物质。只有当某种元素富集到一定程度时，才具有可开采价值。例如铁矿，其可采的最低品位为 30% ~40% ，现已查明的世界储量为 1.5×10^{11} t ,仅为地壳中铁元素含量的二十一万分之一。

1. 世界矿产的储量与生产状况

由于成矿时期和地质作用的复杂多变，矿产的分布很不规律。从全球范围来讲，大部分矿产的已知储量只在很少的几个国家中出现，而且，每个国家都缺少某些有用矿物的储量。截至 1997 年，全球已探明的主要金属与非金属矿产储量为 $1\ 450 \times 10^{8}$ t,其中美国、加拿大、澳大利亚、南非主要矿产储量占世界 80% 以上。

地球的矿产资源储量虽是巨大的，但总是有限的。而且大多数资源可能将在 21 世纪内完全枯竭。尽管还有其他的计算方法或数据略有出入，但这个总趋势是基本相同的。即从现在起再过 100 年左右，绝大多数重要的不可再生资源如果不是消耗殆尽也将变得极端昂贵。

2. 中国矿产的储量状况

中国是世界上矿产资源比较丰富、矿种比较配套齐全的少数几个国家之一。截至 2000年底，世界上业已发现的近 200 种矿产，在中国已发现 171 种，探明有一定数量的矿产有 153 种，其中能源矿产 8 种,金属矿产 54 种，非金属矿产 88 种,水气矿产 3 种。按 45种主要矿产储量的价值计算，矿产储量总值占全世界的 9.86% ，探明储量潜在价值仅次于美国和俄罗斯，居世界第三位。按单位国土面积拥有的主要矿产储量价值计，每平方公里国土面积内拥有矿产资源价值为世界陆地平均水平的 1.54 倍，居世界第六位。但是，由于中国人口众多，人均拥有矿产资源量只相当于世界人均拥有资源量的 27% ，相当于美国人均的 1/10、前苏联的 1/7。

（三）矿产资源的需求

随着世界人口的不断增加和人们生活水平的提高，人类对矿产资源的需求量越来越大。如果世界人口在今后几十年内增长一倍，那么很简单，要保持目前的生活水平，矿产资源的用量也要增加一倍。当前，一个不平等的实例是，美国仅占世界人口的 5% ，每年却消耗掉全世界一年所消耗的资源的 30%左右 在发达国家与不发达国家之间，存在着矿物资源消费量的差异，世界人口的 20%享

受着整个世界收入的80%（表5-1）。如果全世界每人的消费量要达到美国的水平，那么，全球矿产资源的生产量就必须提高好几倍。

表5-1 世界各大洲对某些金属矿物的消费比率（%）

地区	铝	铜	锌	铅	镍	锡
欧洲	32	36	36	40	41	34
美洲 （其中美国占百分数/%）	40 （79）	36 （75）	32 （65）	37 （77）	27 （81）	31 （66）
亚洲 （其中日本占百分数/%）	24 （62）	25 （63）	27 （54）	19 （49）	31 （78）	31 （58）
非洲	2	1	3	3	1	2
澳大利亚和新西兰	2	2	2	1	0	2

第二节 矿产资源开发对地质环境的影响

矿产资源是人类社会文明必需的物质基础。开采矿产是人类在生产过程中和自然环境相互作用最强烈的形式之一。事实证明，一个国家或地区的环境污染状况，在某种程度上总是与其矿产资源消耗水平相一致的，所以，开发矿产所产生的环境问题，日益引起各国的重视：一方面是保护矿山环境，防治污染；一方面是合理开发利用，保护矿产资源。

一、概 述

采矿过程形成的能量和交换物质转移是影响矿山地质环境的主要因素，矿产资源开发利用对环境具有长期而复杂的影响，其后果非常严重。影响方式可以是物理的或化学的；直接的或间接的；长期的或短期的。矿产资源的开发利用，不仅污染空气、土壤和水体，而且还引起土地退化、沙质荒漠化和水环境变化等；同时，矿产资源的开发利用还直接影响着社会经济的发展。不同类型的矿山企业的开采工艺和影响环境的技术强度不同，它们对环境的影响方式也有所差

别(图 5-1)。



图 5-1 矿山生产活动对地质环境的影响

由于人类对矿产的需求持续增长，而高品位矿床越来越少；这样，人们不得不采用更大的工程来开采低品位的矿体，从而对环境造成更严重的影响。大规模的开采，通过直接搬运物质而改变地貌景观；或在另一些地区堆积废弃物而占用土地。矿区尘埃会影响空气质量；即使控制矿井排水和减少污染，水资源仍旧遭到破坏。当微量元素被雨水从废矿石中淋滤出来并在土壤或水体中富集时，就会对动植物乃至人类产生危害。伴随着采矿活动，土地、土壤、水、空气的物理变化会直接或间接地影响了生物环境。

二、露天采矿对地质环境的影响

矿山开采可大致分为两种类型，即露天开采和地下开采。与地下开采相比，露天开采有许多优点：操作灵便、采收率高、开采成本低、作业安全、生产效率高、劳动条件优越，适合于大规模开采。矿产资源开发总量中 50%～60% 的煤、85%～90% 的金属矿藏、50% 的化学矿山原料、100% 的非金属和建筑材料，都是露天开采。露天采矿对环境的影响表现在：泉水枯竭、河水改道、边坡失稳发生崩塌、滑坡；矿山剥离堆土及矿渣堆积占用土地；淤塞河道、导致水患和矿山泥石流；矿山“三废”（矿渣及尾矿、矿水及尾水、选冶废气及可燃性矿渣自燃）造成的土壤、水体及大气污染；破坏地貌景观，形成矿山荒漠化，加速

水土流失等。

（一）土地资源的占用和破坏

建设矿山要大兴土木，开山整地，构筑交通网、工业民用厂房和市镇等；采矿，特别是露天采矿，要剥离地表覆盖层，同时有大量的废矿石排放，所有这些都需要占用大量的土地。据统计，一座大型矿山平均占地达（$18 \sim 20) \times 10^4\ m^2$，小矿山也达几万平方米。这是采矿业普遍存在的一个严重问题。

土地破坏在一定程度上也影响了矿区的生态平衡。土地破坏了，植物、土壤及其中的微生物也跟着一起被消灭，地表丧失了稳定性，会导致严重的水土流失，乃至造成泥石流和滑坡事故。被破坏的地表、废石堆、尾矿池更是大气、水体、土壤的污染源。

1. 露天采矿破坏土地

目前，世界上年产 15×10^4 t 以上矿石的矿山大约有一半是露天开采，矿石产量的 75% 左右来自于露天开采。许多大矿山，如美国明尼苏达州希宾铁矿、新墨西哥州圣利塔铜矿、中国的山西平朔煤矿等，都是露天开采的。位于美国犹他州 Bingham 峡谷的北美最大铜矿露天采场，椭圆形的采坑长达 7.5 km、宽约 4.5 km，深度近 1 000 m。澳大利业南部的莫雷韦尔露天采煤场也是世界上最大的人造矿坑之一，每小时都有数千吨的煤炭从矿坑中运出。露天采矿对环境的影响主要表现为占用大量土地，彻底改变矿区地表的景观。

澳大利亚查莱斯（Chalice）金矿区原来是一片绿色的原野，为了确保向选矿厂提供足够的矿石，每天需要剥离大量土体，剥采比高达 15∶1，剥离出来的土体不仅占用土地，还使这一地区形成了荒漠化景观。

中国重点金属矿山，约有 90% 是露天开采，每年剥离岩土约为 $(2.2 \sim 2.6) \times 10^8$ t，露天矿坑及堆土（岩）场侵占了大片农田。到 1995 年，全国 1 173 家国有大中型矿山企业中，占用土地面积 729 971.6 hm^2，其中仅露天开采矿场、排土场、尾矿场和塌陷区占地面积就有 212 817.4 hm^2，占矿山用地面积的 29.15%，其他工业用地、行政生活用地等为 5 171.54 hm^2，占 70.85%。

露采可使矿区土地破坏得面目全非，原有的生态环境再也不能恢复。植被和土壤盖层被剥离，废石堆随处可见。如果地下水位较高，矿坑可能被淹没。俄罗斯高加索地区的基斯沃斯克，原来是一个三面环山、气候宜人的绿洲，第二次世界大战后，由于不断开山取石烧窑，结果使该地暴露在北方寒冷气流袭击之下，加上工业烟尘四逸，导致这个游览胜地遭到了彻底破坏。

对于露天采矿，除采场破坏大量土地外，与之配套的排土场、尾矿库和厂房、住宅等附属设施的占地面积往往是采场的几倍（表 5－2），这不仅造成自然景观和生态环境的破坏，还引起严重的与工农业争地的矛盾。

表 5-2 辽宁省鞍山露天铁矿占地面积概况

矿山名称	占地总面积/km^2	采场		排土场		尾矿地		附属设备	
		占地面积/km^2	占总面积百分比/%	占地面积/km^2	占总面积百分比/%	占地面积/km^2	占总面积百分比/%	占地面积/km^2	占总面积百分比/%
东鞍山铁矿	14.32	1.75	12.22	4.51	31.49	2.46	17.18	5.60	39.02
大孤山铁矿	15.03	2.38	15.83	7.54	47.63	2.45	16.30	2.66	17.70
眼前山铁矿	13.17	2.66	20.20	5.84	44.34			4.67	35.46
齐大山铁矿	13.64	4.81	35.26	4.41	32.33	2.39	17.52	2.03	14.88
弓长岭铁矿	41.52	5.87	14.14	4.78	11.51	7.66	18.45	23.21	55.90
总计	97.68	17.47	17.88	27.08	27.72	14.96	15.32	38.17	39.08

2. 废石堆、尾矿堆放占用土地

矿山挖出大量的矿渣及尾矿，它们的堆放也占用大量土地。在美国的矿山土地破坏面积中，露天采空区占 59%，露天排土场、废石堆占 38%，剩下的 3% 具有地面下沉和塌陷的危险。

据有关资料，露天开采每采 1 t 矿石通常要剥离 5～10 t 覆盖岩土，生产 1 t 铜约形成 400 t 废石和尾矿。据此有人估计，美国哈尔鲁斯特露天磁铁矿开采完毕时会有 300×10^8 t 尾矿产生，可能使明尼苏达州北部形成第二个撒哈拉沙漠。

据中国 28 个重点露天矿调查，堆土（岩）场占地总面积达 4 470 hm^2，每年新占土地约 400 hm^2 以上。在 1985 年全国重点煤矿形成的矸石山有 671 座，堆放量 7.8×10^8 t，至 1988 年增加到 730 座，堆放量 9×10^8 t，今后每年还要新排放 6 000 t，继续扩大占用土地。

（二）露天矿边坡失稳破坏

露天矿边坡稳定性问题是露天开采的主要环境地质问题之一。在露天矿设计中，首要的问题是确定合理的边坡角。边坡角是在垂直边坡走向的剖面上从最上一个台阶的坡顶线到最下一个台阶的坡底线的连线与水平线的夹角。边坡角愈小，剥采比愈大。大型露天矿边坡角每增加 1°可减少剥岩量几千万吨，节省投资 2 000 万～3 000 万元人民币。但是，露天矿边坡角如果设计过陡，将产生边坡破坏。加强露天矿边坡稳定性问题研究，合理地确定边坡角是露天矿工程中的一项重要任务。

露天开采人为地塑造了边坡，随着开挖深度的加大，边坡的规模也不断扩大，既严重地破坏了地应力的自然平衡，又导致了人工边坡的变形、破坏和滑移。露天矿边坡的破坏主要有两大类：具有明显滑动面的边坡失稳破坏和蠕变一坍

塌变形破坏。前者包括平面滑动模式、楔形体滑动模式和曲面滑动模式，后者有倾倒破坏模式、溃屈破坏模式（图 5－2）。此外，还有上述不同模式之间的相互组合形成的复合式破坏模式。边坡岩土体中软弱结构面的发育程度及其组合关系是控制露天矿边坡稳定性的主要地质因素。

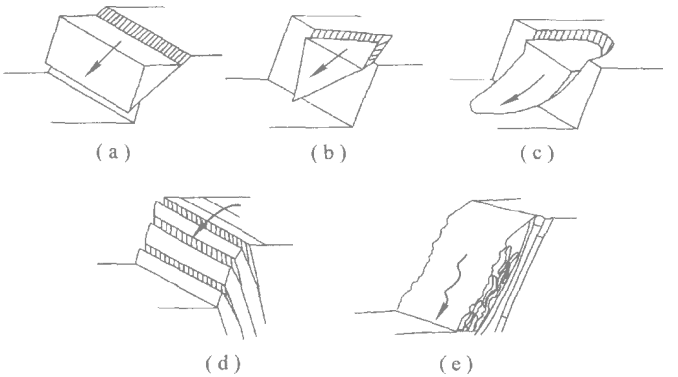


图 5－2　露天矿边坡破坏模式示意图

a. 平面滑动模式；b. 楔形体滑动模式；c. 曲面滑动模式；d. 倾倒破坏模式；e. 溃屈破坏模式

中国辽宁抚顺西露天矿是一座大型矿山，东西长 6 600 m，南北宽 2 200 m，设计最终采深 400 m。1914 年投产，1927 年首次出现滑坡；尔后，边坡变形、滑坡、倾倒相继发生，几乎遍布采坑四周，采场揭露的不同埋深的各类岩体均发生过变形破坏。其中北帮西区 1960—1984 年先后发生过 13 次滑坡，多次破坏采掘平台、运输线路和车辆、排水系统及输电设备，甚至发生机车脱轨事故。位于河北省的首钢迁安水厂露天矿，自投产以来边坡发生 109 处滑塌和变形失稳，其中 35 处受断层、节理等软弱结构面控制。

露天矿边坡失稳破坏的影响因素主要有岩石性质、岩体结构、地质构造、水文地质条件、风化条件、边坡形状、爆破振动等。边坡失稳防治的原则是以防为主，综合整治。在边坡开挖和采矿过程中，应及时排除地表水、深降强排地下水，减少爆破次数、降低爆破强度，合理确定不同深度岩体的边坡角，适时修整边坡轮廓，提高边坡稳定性。对大型采矿边坡，还需构筑抗滑挡土墙、抗滑桩、灌注水泥砂浆及减载、排水等工程措施。

（三）水土流失

废石堆、尾矿坝如果设置不当或管理不严，会造成严重的滑坡、泥石流事故，导致更大范围的土地破坏以及生命财产的损失。特别是一些小型采矿场，多在河床、公路、铁路两侧采石开矿，乱采乱挖，乱堆乱放，经常把矸石甚至矿石堆放

在河床、河口、公（铁）路边等处，一遇暴雨就造成水土流失，产生滑坡、泥石流，将尾矿、矸石等冲入江河湖泊，造成水库河塘淤塞，洪水排泄不通，甚至冲毁公路、铁路，交通中断，给国民经济造成严重损失。

中国 1 173 家大中型矿山的调查表明，产生水土流失及土地沙化所破坏的面积 1 706.7 hm^2 及 743.5 hm^2，治理投资的费用已达 2 393.3 万元。1985 年，湖南省某金属矿山，因暴雨引发的山洪，冲垮了尾矿坝，使 90 多万立方米的尾矿随洪流而下，导致河谷两侧矿山和生活区部分建筑物夷为平地，1 000 hm^2 良田被淹没，交通全部中断，死亡 40 余人，造成矿山直接经济损失 600 余万元。山西某铁矿，尾矿坝被洪水冲垮，使下游两个县的 400 余公顷良田被毁。

河南秦岭西峪沟金矿是中国最大的黄金生产地之一，由于乱采滥挖，并将数万立方米的矿渣堆放在沟底，以致河道严重受阻。1994 年 7 月中旬，暴雨形成的泥石流沿沟下泄，使道路及生产、生活设施遭到严重破坏，51 人丧生，损失惨重。

三、地下采矿对地质环境的影响

地下采矿对地质环境的影响主要表现为：地下采掘开挖引起地面开裂与沉陷；矿坑疏干排水造成地面塌陷、泉水枯竭、河水断流及区域地下水位下降；深井排水或注水诱发地震等。

（一）采空区地面塌陷与地裂缝

采用井下开采的矿山，由于采空区上覆岩土体冒落而在地表发生大面积变形破坏并伴随地表水和浅层地下水漏失的现象和过程，称为矿区地面变形。如果地面变形呈现面状分布，则为地面塌陷；如为线状分布，则为地裂缝。矿区地面塌陷造成大量农田损毁，地表建筑物遭受严重破坏。

据初步统计，中国因采矿引起的地面塌陷已超过 180 处，累积塌陷面积达 1 150 km^2。中国发生采矿塌陷灾害的城市近 40 个，造成严重破坏的 25 个，每年因采矿地面塌陷造成的损失达 4×10^8 元人民币以上。半个世纪以来，山西省大同市累计生产原煤二十多亿吨，形成 450 km^2 的煤矿采空区。河北省开滦煤矿累计地面塌陷面积约 1×10^4 hm^2，因塌陷无法耕种的绝产农田 2 000 余公顷；20 世纪 80 年代以来，由于受地面塌陷影响而迁移村庄 31 处，迁建费用近 2×10^8 元人民币。由于地面发生大面积变形塌陷（沉陷）和积水，致使大量农田废弃，村庄搬迁。例如，辽宁省本溪市在已采空的 18.7 km^2 中有 6.5 km^2 的地面建筑物遭到破坏。采空区地表平均下沉达 2 m，最深的达 3.7 m。造成建筑物墙体移位、断裂、房屋倾斜，甚至倒塌，地上和地下的供水、排水、供热、通讯、人防等管网和设施遭到了不同程度的损坏。当地居民形容本溪市就像一座被架空了的“空中楼阁”。又如，由于采煤，石嘴山市城区已形成南北长 4.1 km、东西宽 1.7 km、

面积达 4.97 km^2 的塌陷区，最大塌陷深度达 20 m。塌陷区裂隙交织，地面到处可见塌陷形成的陡坎、裂缝，一般裂缝长 20～40 m，宽 0.13 m 左右，深约 5 m。最大裂缝长 100 余米，宽 0.4 m，深达 15 m 左右。

矿层开采后，采空区主要依靠洞壁和支撑柱维持围岩稳定。但由于在岩体内部形成一个空洞，使其周围的应力平衡状态受到破坏，产生局部的应力集中。当采空区面积较大、围岩强度不足以抵抗上覆岩土体重力时，顶板岩层内部形成的拉张应力超过岩层抗拉强度极限时产生向下的弯曲和移动，进而发生断裂、破碎并相继冒落，随着采掘工作面的向前推进，受影响的岩层范围不断扩大，采空区顶板在应力作用下不断发生变形、破裂、位移和冒落。从平面上看，地表塌陷区比其下部引起塌陷的采空区范围大，塌陷区中央部位沉降速度及幅度最大，无明显地裂缝产生；内边缘区下沉不均匀，呈凹形向中心倾斜，为应力挤压区；外边缘区下沉不明显，多数情况下形成张性地裂缝，为应力拉张区。从剖面上看，塌陷呈一漏斗状，破裂角和极限角决定了“漏斗”的开口程度（图 5－3）。如果矿体埋藏浅、厚度不大，冒落带直达地表则在采空区正上方形成下宽上窄的地裂缝。

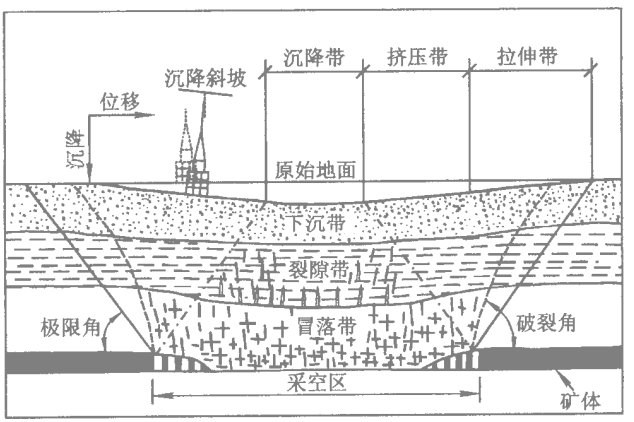


图 5－3　矿山采空区地面塌陷示意图

引自潘懋等．灾害地质学．北京：北京大学出版社，2002

（二）破坏水文地质环境

井巷开掘，使地下水的赋存状态发生变化；矿床疏干排水改变了地下水的天然径流和排泄条件，同时导致地下水资源的巨大浪费，使区域地下水水位大幅度下降，造成矿区水文地质环境的恶化。此外，疏干碳酸盐围岩含水层时，其溶洞则构成了地面塌陷的隐患；当塌陷区或井巷与地表储水体存在水力联系时，更会酿成淹没矿井的重大事故；岩层疏干影响的预测和设计不合理时，还会导致露天边坡、台阶的蠕动和过滤变形而发生灾害。

矿床开采必然会改变岩体的原始应力场，由此引起的水文地质条件和环境的影响范围，按开采规模有时可达数千平方公里，影响深度露天开采时可达 500～700 m，地下开采时可达 1 500～2 500 m。

1. 矿井突水

许多矿床的上覆和下伏地层为含水丰富的石灰岩，特别是石炭二迭纪煤系地层，不仅煤系内部有含水性强的地层，还有下伏的巨厚奥陶纪灰岩，随着开采的延深，地下水深降强排，产生了巨大的水头差，使煤层受到来自下部灰岩地下水高水压的威胁，在一些构造破碎带和隔水层薄的地段发生突水，严重威胁着矿井和职工的生命安全。据统计，中国主要煤矿区，因突水全淹矿井已达 58 次之多，造成经济损失 27 亿元。1984 年开滦范各庄矿，一次淹井损失近 5 亿元；有些新井因水的威胁长期不能投产，也达不到设计生产能力。在北方岩溶区，煤矿约有 150 多亿吨储量，铁矿约有 3 亿多吨储量因受水威胁而难于开采。

当采矿平洞通过河流、水库下部，并有地表水和地下水连通通道时，不仅突水极为严重，而且还造成水库渗漏等问题。如中国四川奉节县后淆水库，库区煤层被挖掘开采，揭穿水库底部裂隙通道，发生大量突水，不仅煤层无法继续开采，而且造成水库渗漏报废。

2. 海水入侵

为了保证地下采矿巷道的安全，必须对采矿区的地下水进行疏干。在沿海地区，因疏干排水常使地下水位低于海平面，结果导致海水入侵，破坏了当地淡水资源，影响了生活供水和生态环境。海水入侵的范围随疏干排水的强度增大而不断扩大。如中国辽宁省的金州湾石棉矿、复州湾粘土矿矿区均因疏干排水而出现了海水入侵现象。

3. 区域地下水位下降

为了保证矿山的开采，必须对进入井巷内的地下水或威胁井巷安全的含水层的地下水进行疏干排水，从而使矿区附近的浅层地下水被疏干，附近的地表水也因排水或河流的人工改道而被疏干。结果造成区域地下水位下降，生态环境恶化，植物难以生长，有的矿区甚至出现土地石化和沙化。因采矿疏干排水还造成矿区附近水源缺乏，严重影响人民生活和经济发展。如中国山西省因采矿而造成 18 个县缺水，20 多万人吃水困难，2 万多公顷水浇地变成旱地。矿坑突水有时也会造成区域地下水位下降，如开滦范各庄矿突水后，以突水点为中心的 10 余千米范围内，水位下降了 20～30 m，使厂矿、工业和生活供水原有系统失灵，发生吊泵，形成无水可供的局面。

（三）矿区山体开裂破坏

高陡临空地形地貌部位，由于山崖或山脚的采矿活动，常造成上覆山体开裂变形，甚至发生崩塌灾害。此类崩塌特点是，崩塌前岩体内的开裂和崩塌后形成

的后缘边界多沿岩体内原有的构造裂隙面或卸荷裂隙面发生和发展；表现为蠕变一倾倒一坍塌模式。其破坏机制是，原有裂隙规模扩大并由闭合发展为张开状态，或产生新的裂隙，继而产生倾倒变形、膨胀，局部出现滑移，最后出现坍塌。

矿区山体崩塌形成灾害的事例在世界各地均有发生。中国湖北盐池河磷矿山体崩塌、四川鸡冠岭山崩，以及长江西陵峡链子崖山体开裂等均与山脚采矿活动有关。湖北省宜昌盐池河矿区巨型山崩发生于 1980 年 6 月 3 日凌晨 5 点，100 多万立方米的岩体从 300 m 的高处急剧下落，在山脚形成厚达 20 多米的块石堆积体；山崩摧毁了位于崖下的矿务局和坑口的全部建筑，造成 284 人丧生，损失惨重。

1994 年 4 月 30 日，四川省武隆县鸡冠岭发生巨大的山崩，崩塌体总体积为 $397\times10^4\ m^3$，分布面积为 $17.85\times10^4\ m^2$。崩塌岩体入江时形成涌浪高达 30 余米，当即形成一拦河坝，使乌江断流半小时。7 月 2～3 日，鸡冠岭地区下了一次暴雨，诱发乌江鸡冠岭崩塌堆积体大规模坍滑，方量约 $(180\sim200)\times10^4\ m^3$，部分块石入江，加高、增宽了原来的堵江乱石坝，使乌江的客货运输完全中断。山崩摧毁了刚刚投产的兴隆煤矿（年产 6×10^4 t），将 1 条拖轮、1 条载货量 160 t 的驳轮和 2 只渔船击沉，另 1 条载货量 230 t 的驳船被落石砸坏，并推向对岸。山崩还造成 30 多人伤亡，直接经济损失 1 089 万元，间接经济损失无法统计。

研究地下采矿诱发山体开裂、崩塌，应重点调查山坡岩体性质、结构特征、构造地质条件和地下水作用特征，分析采矿引起的应力应变特征、边界条件、岩体剪切滑动及破坏特征等 同时，分析、研究采矿方法、顶板管理方法、采矿强度、采空巷道形状和采空区面积等要素对水体开裂的影响程度。

（四）采矿诱发地震与岩爆

采矿诱发地震是指开采地下固体、液体矿产过程中出现的地震。据其成因不同，矿震可分为诱发构造型矿震、诱发塌陷型矿震及掌子面岩爆、煤爆诱发矿震等三类。

1. 诱发构造型矿震

这是因采矿导致断层的复活和弹性能量的提前释放造成的地震。可进一步分为采矿直接引发矿震和抽水采矿诱发矿震两类。

采矿直接引发矿震是由于采矿使地下应力失去平衡而诱发的地震。采矿形成的自由空间使采空区周围的岩体由原来的三向受压变成两向或单向受压，引起应力的重分布，在采空区范围内沿原有断裂形成应力集中地段，促使地壳岩体应变能提前分散释放，从而诱发地震。例如，辽宁省北票煤田台吉井区，历史上从未发生过破坏性地震活动，微震活动也少见。1921 年台吉井开始采煤；至 1970 年，当采掘到距地面 500～900 m 深时，井区开始出现微震活动；到 1981 年 8 月 20 日，井区共记录到 $Ms\geqslant0.5$ 级地震 160 次，其中有感地震 37 次，造成不

同程度破坏的地震有 4 次。

采矿抽水也可诱发地震。抽水后，断裂面（带）失去水压而发生卸荷作用，形成偏差应力。当偏差应力大于断面的抗剪强度时，即诱发地震。湖南省恩斗桥矿区抽水前无地震活动记载，但抽水疏干后，相继发生了 16 次有感地震活动；震中靠近恩口向斜中部，震源深度相对较大。

2. 诱发塌陷型地震

矿区诱发塌陷地震多起因于采空区和顶板陷落。地震波由顶板块体脱落敲击底板而产生，矿震分布范围较小，震源极浅，大多处于开采平面上。震级小但震中烈度高。例如，具有 80 多年开采历史的山西省大同煤矿，1956 年至 1980 年间因顶板塌落而产生的有感地震达 40 多次；最大震级 $Ms = 3.4$ 级，释放能量约 1.0×10^9 J。

塌陷型矿震在岩溶发育地区经常出现。中国南方的粤、鄂、湘、桂、赣及浙等省（区）的岩溶充水矿区普遍存在地面塌陷，因塌陷而引起的冲击震动也时有发生。

3. 岩爆

岩爆又称冲击地压，是指承受强大地压的脆性煤、矿体或岩体，在其极限平衡状态受到破坏时向自由空间突然释放能量的动力现象，是一种采矿或隧道开挖活动诱发的地震。在煤矿、金属矿和各种人工隧道中均有发生。

岩爆属于小规模的地应力释放现象，表现为坑壁岩石碎块或煤块等突然从围岩中弹出，并伴随巨响、气浪和震动；抛出的岩块大小不等，大者直径可达几米甚至几十米，小者仅几厘米或更小。大型岩爆通常伴有强烈的气浪和巨响，甚至使周围的岩体发生振动。岩爆可使洞室内的采矿设备和支护设施遭受毁坏，有时还造成人员伤亡。四川绵竹天池煤矿就曾多次发生此类岩爆，最大的一次将约 20 t 的煤抛出 20 m 以外。

岩爆产生于具有大量弹射应变能储备的硬质脆性岩体。由于采掘活动，使地下洞室和坑道发生地应力局部集中，在围岩应力作用下产生张、剪脆性破坏，在消耗部分弹性应变能的同时，剩余能量转化为动能，使洞壁附近的围岩变成岩块(片)隔离母体,获得弹射能量,向凌空方向猛烈抛(弹、散)射。

岩爆发生的条件是：岩体经受过较强的地应力作用；围岩内储存较大的弹性应变能；埋藏位置具有较紧密的围限条件；机械开挖造成应力的突然释放。为此，应利用钻屑法、地球物理法、位移测试法、水分法、温度变化法等多种方法进行预测预报，合理选择洞轴线和洞室断面形状，施工中采取超前应力解除、喷水或钻孔注水软化围岩，减少岩体暴露的时间和面积的扩展并及时支护围岩等措施，可有效防治岩爆及其危害。

四、工矿废物对地质环境的污染

随着矿山的开发，矿区排放大量废水，如矿坑排水、洗矿废水、尾矿石堆淋滤水，以及矿区其他工业（如炸药厂、选矿厂、机械厂等）和医疗、生活方面的废水等。这些废污水，大部分未经处理，排放后直接或间接地污染地表水、地下水和周围农田、土地，再进一步污染农作物。有害元素成分的挥发也污染了空气。

1．选矿废水污染

中国每年大约排放 36×10^8 t 选矿废水，这些废水中大部分未达到“工业废水排放标准”，不少含有许多有害的金属离子和物质，其固体悬浮物远远超标。中国北方岩溶地区的煤、铁矿山，每年矿坑排水 12×10^8 t，绝大部分为酸性水，其中仅 30% 左右经处理使用，其他都自然排放。江西某含硫多金属矿床，排放 pH 值为 3 的强酸性矿坑水，造成矿区附近河水污染，鱼虾绝迹，水草不生，河水中金属离子含量超标，矿山下游 25 km 长河段的河水不能饮用。同时也造成矿区地下水和农田污染，土壤 pH 值降低，金属离子含量增高，土壤物理性质变坏，农作物生长受到抑制，水稻也被污染，直接影响到人民身体健康。这种现象在中国许多矿山都可见到，特别是最近几年乡镇及个体开矿、选矿、炼矿（炼焦炭）等活动加剧，加上管理不善，致使污染更为严重。

2．煤矸石污染

煤矸石中含有大量的有机成分，同时富含金属、碱土金属和硫化物等，是无机盐类污染源，可通过大气降水淋滤而污染环境。煤矸石从地下运到地表弃置，所处环境的急剧变化使其风化作用加强，促进了可溶性成分的溶解，加重了矸石山的环境污染。

大气降水渗入煤矸石后，少量直接渗入矸石堆地下，大部分形成溢流水，向地势低洼处积聚排泄。大量可溶性无机盐溶于水中直接入渗补给地下水，造成矸石山周围地下水污染。主要表现在地下水呈现高矿化度、高硬度，硫酸盐、钠离子含量普遍高于地区背景值。

辽宁省抚顺煤田堆积的矸石山占地面积达 22.4 km^2，为市区面积的 8.1%，并继续以每年 200×10^4 t 的排放量增加。矸石山西侧有五处溢流泉，年均溢流量达 118×10^4 m^3。由于矸石自燃，使溢流泉水温度达 30～50 ℃，溢流泉泉水含盐量高，水化学类型以 Na_2SO_4 型为主。抚顺市 24 地下水监测井孔中，80% 以上的井水硬度超过背景值的 5.4 倍，井水矿化度均超过背景值，最高值达 5 200 mg/L，超背景值 10.41 倍。

煤矸石溢流水污染使土壤盐分升高而导致盐碱化，使作物生长发育受到影响，甚至导致部分耕地弃荒。

另外，采矿对地质环境的影响还有矿山地热对环境造成的热污染、瓦斯突

出、矿石自燃对大气的污染、放射性污染等。

五、矿产资源开发影响地质环境的主要因素

（一）矿产资源开发利用阶段

矿产的开发利用是一个复杂的过程，包括勘探、开采、冶炼等几个重要步骤，其中每个过程都对环境产生破坏作用，但程度有所差异。如勘探和试验阶段对环境产生的影响要比开采和冶炼阶段产生的影响小得多（表 5－3）。

表 5－3　矿产资源开发利用的不同阶段对环境造成的危害

开发利用阶段	对环境造成的破坏作用
勘查	土地占用；植被破坏；钻井废水造成地表及地下水污染
开采	占用、毁坏土地；破坏植被、地貌，造成水土流失；挖掘过程使地面沉降，形成地下水漏斗，诱发地震；矸石和其他固体废物处置造成滑坡、泥石流；粉尘噪音污染；酸性矿坑水的排放污染地表、地下水体
冶炼	粉尘、噪音污染；尾矿堆放诱发泥石流和滑坡；颗粒物、有害气体、废水及有机化学物质的排放造成水体、空气、土壤等污染

对矿床的勘探活动包括分析资料和野外勘探工作，由于工程量相对较小，这个过程对环境造成的破坏是局部、轻微的。开采阶段的影响为局部或地区性的，较前者严重。冶炼阶段的破坏性最大，所造成的污染可以破坏元素的地球化学循环，其影响甚至是全球性的。

（二）采矿方法

露天开采费用较低，有利于开采品位较低的矿体，从而提高了资源的利用率；但是，露天开采严重破坏地表景观，并占用大量土地，造成环境污染等。在其他条件相同的情况下，地下开采对矿山环境的影响比露天开采时要小得多。地下开采对地表景观的破坏程度较小，对大气和水体的污染亦不像露天开采那么严重；地下开采对土地资源的破坏主要表现为地面沉降或地面塌陷。

（三）矿物特性

矿产的种类不同，在开发利用过程中所造成的环境影响也不同。可燃有机矿产的燃烧主要形成二氧化碳、二氧化硫等气体，造成温室效应或形成酸雨；金属矿床的开采常造成严重的重金属污染，对人体构成极大的危害；硅藻土中所含的晶质可以致癌，石棉可以皂成硅肺病；建筑材料的开采直接地破坏着自然景观。

（四）其他因素

地理位置、地形和气候条件以及开采规模等因素，对矿山环境会造成不同程度的影响。

开阔平坦地区或低洼地带，水流流速较小，水流的搬运能力较低，水土流失的情况较缓和；相反，开发陡峭地区的矿山，粉尘、噪音能传播很远的距离，污染范围大，水土流失严重。中国南方许多有色金属矿山位于山区，周围丛山既是噪音、粉尘传播的天然屏障，又是遭受破坏了的自然景观的掩护体。在这些矿山中，当山洪暴发时很容易出现滑坡、井下灌水事故，水土流失也较严重，在一定条件下又易发生逆温及山谷风等现象，导致大气的严重污染。

一个地区的雨量、温度、湿度、常年风向及风力等因素，强烈地影响着污染物向矿区周围环境中搬运、迁移，制约着采矿对环境影响的程度和污染范围。

开采规模与环境影响之间存在一定的关系。在其他条件相同情况下，矿石产量大，废石废渣排放速度也大，原材料及燃料消耗增加，导致“三废”污染加剧，受影响的地表范围也广。然而，当社会对矿产资源的需求量一定时，提高矿井产量，可以减少矿井的总数，对环境总的影响还是可以减少的。

第三节　矿山地质环境治理

矿山开发区是人类工程经济活动对地质环境影响极为强烈的地区。必须采取以防为主、综合治理的方针，才能保护和改善矿区地质环境质量。因此，必须做好从勘查、设计、开采到闭坑四个阶段的环境保护和综合治理。

矿产勘探与设计阶段，必须在查明环境地质条件的基础上，开展地质环境质量现状评价和影响评价，预测矿床开采后可能产生的环境地质问题；合理规划工业场地、交通运输线路、生活区以及矿渣等固体废弃物的堆放场地，优选采矿方式和选冶工艺措施，防止或减少环境地质问题的发生。以采取相应的防范措施，为开采提供依据。

矿山建设开采阶段，应严格规范矿业生产活动，防止、减少环境地质问题的发生、发展，治理已产生的环境地质问题。根据环境地质条件，控制已有环境地质问题的发展，使矿区恢复成环境质量良好的地区。

矿山闭坑阶段，需要做好以“造地复田”为主的综合治理，恢复耕种或种草绿化、营造树木、人工造湖，使矿区地质环境向良性转化。

一、矿山地质环境治理的基本原则

治理矿产资源开发引起的环境地质问题，应遵循以下六条原则。

1. 立法原则

以法律的形式确定矿山开采者对矿区环境破坏及其治理所应承担的责任，并以法规的形式确定治理工作必须达到的环境质量标准。

2. 生态风险评价原则

在实施矿山开采活动前，应当根据有关法律、矿区各类资源赋存情况、开采活动可能引起的生态破坏类型和程度，以及开采者从事开采和生态重建的技术经济能力等，进行生态风险评价。

3．最少量化原则

尽可能使开采所占用的土地最少，使开采过程造成的景观破坏、环境质量破坏和生物群落破坏最少，使矿山废弃物的生成量最少。

4．资源化原则

它有两层意思：其一是使受到破坏的土地、水域等，经过治理，能作为合格的自然资源再度具有生态经济价值；其二是使开采活动产生的矿山废弃物在其他的工业活动中得以利用。

5．无害化原则

它是指对矿山废弃物进行的无害化处置。在多数情况下，矿山废弃物的利用率远小于它的生成率；即使经过再利用，仍会有相当数量的废弃物产生。对矿山废弃物的无害化处置，通常有两种方法：一种是去毒法，以化学方法或生物方法去除废弃物中的有害成分；另一种是隔离法，以物理方法阻止废弃物中的有害成分向周围环境渗漏。对于一些具有潜在资源价值，但在技术经济上一时难于开发的废弃物，隔离法是一种比较恰当而又经济的选择。

6．生态系统的恢复和重建原则

这一原则是矿山环境治理对策中最重要和最基本的内容，包括采矿地环境质量的恢复以及生物群落的恢复和重建。在任何情况下，采矿活动都会造成土地、环境质量以及生物群落的破坏，而且这些破坏往往是数量极大的。最小量化原则、资源化原则和无害化原则只能在一定程度上减缓这些破坏，但远不能取代生态系统的恢复和重建原则。

在上述六条原则中，立法原则和风险评价原则，在发达国家已实施多年；最少量化原则和资源化原则是在考虑资源环境问题时为限制污染生成量而提出的，也已成为国际社会普遍接受的通则，目的是确保矿山开采活动对生态资源和环境的破坏程度最低；无害化原则与生态系统恢复和重建原则，早已为致力于环境保护的生态学家们所倡导。“无害化”和“生态系统的恢复和重建”两项原则可以视为矿山环境生态重建的两根支柱。

二、露天矿的复垦与利用

露天开采的剥离物，可边剥边回填到采空区内，叫做内排土，也可临时堆放在矿区边界以外地面，叫做外排土。设置内排土场的优点很多：实现了边采边填，采矿完毕，也就回填了采空区，剥离物不占用土地。采用外排土场时，需要大面积的土地堆放剥离物，开采完毕时再把它回填采空区，若采空区不回填，就

废石场复垦。从土地利用和环境保护角度看，应尽量创造条件，实现内排土的开采方法。

1. 外排土露天采空区的恢复和利用

应该根据对土地恢复的要求、露天矿坑的深浅、填充物料的供给，以及坑内有无积水或涌水等多种因素考虑采空区的复垦问题。

砾石采场、石灰石或花岗岩等建筑材料供给地，一般都是无覆盖层的浅坑，采完后没有物料（石、土等）回填或者不要求回填，可视条件进行如下处理：

（1）如果矿坑与地表或地下水体相通，永久地被水淹没，且面积又足够大，则可将其辟为水库、鱼塘、人工湖泊或水上娱乐场所。

（2）对于间歇性被水淹没的矿坑，既可用来储水，灌溉农业、调节小气候，也可回填复垦为农业用地。或辟为其他有用的场地，如运动场、公园等。但应注意：当矿坑与地下水或地表水有水力连通时，若充填物选择不当，可能造成水体污染。

（3）对无水采空区，其底板往往是平坦的，只要通过研究实验，采取适当的措施，改善采空区植物生长的条件后，是可以再种植的。

（4）对于覆盖物少的深露天矿坑，通常难于找到或需耗资才能找到大量的回填材料。若矿坑处于潜水面以下，给水充足，或者排水差而被淹没，则最宜用作水库，灌溉农田，“水库”周围植树造林，构成幽静的风景点。干燥的深露天矿坑则可改建成打靶场、爬岩训练场，或作其他用途。

2. 内排土露天采场的复垦和利用

采矿、复垦两条腿走路的开采方法，对保护土地、防治环境污染非常有利，应该尽量采用内排土场的露天开采方法。缓倾斜薄矿床和某些砂矿床，是适宜开辟内排土场进行开采的（图 5－4）。一般来说，对急倾斜厚矿体就较难实现内排土开采方案，但是对有几个采场的矿区，若周密规划采掘进度，先强化开采某几个采场，形成采空区，有意识地开辟内排土场，也是可以实行内排土

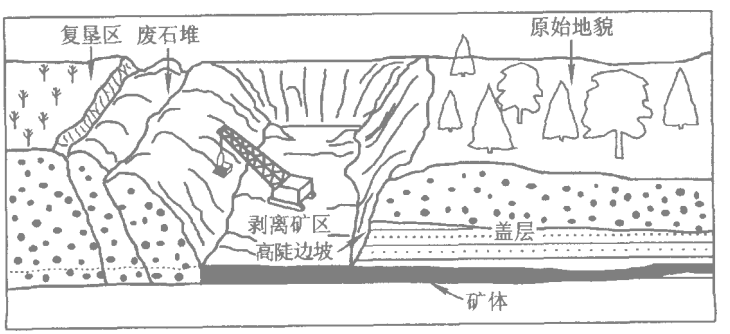


图 5－4　内排土露采矿与复垦示意图

开采的。

内排土开采是把复垦作为开采过程中的一个组成环节，可以说，某个复垦方法就是相应的采矿方法，它有如下几种：索斗铲开采复垦法、汽车回运复垦法、轨道回运复垦法、沿等高线分区段剥离开采复垦法、横向采掘复垦法等。

三、废石堆、尾矿池复垦

矿床地下开采掘出的大量废石，除部分作井下填料使用外，绝大部分需堆存于地表。露天开采采用外排土场时，占地面积更大。这些废石堆必然会带来一系列环境问题，必须认真及时地进行复垦。

1. 废石堆复垦

目前，国内外普遍采用土壤层覆盖法进行废石堆复垦，即废石堆复垦后的结构是，由下而上为坚硬或粗粒岩土一底土层一表土层。因此，在堆放废石之前应将堆场中表层土壤和底层土壤分别掘出并储存，以备用作覆盖层。

废石堆放时还应预先设计堆置方法并布置防排水系统和通气系统，以防止有害物质的淋滤，减少自热、自燃或爆炸的可能性。

复垦废石堆时，首先要根据具体条件，将废石堆平整成符合利用要求的场地。如用于农业种植的废石堆，其表面坡度应小于用作植树造林场地的坡度；切忌平整或周围高、中间低的场地。然后铺盖表土，表土的厚度和性质应视场地再种植的可能性来决定，如种植农作物要求土质好、厚度大，植树造林对表土土质要求低一些。再种植的植物品种应与场地岩土性质相应，同时应注意环境因素，如气候条件、废石场朝向以及生物学因素（昆虫病害、动物危害）等。

2. 尾矿池复垦

矿山的尾矿池是一个面积相当大的平坦地块，如任其遗弃，则将成为大气粉尘污染源，即使在较小风速下，也容易发生“尘暴”。由于雨水淋漓、侵蚀、酸（碱）废水及各种有毒有害金属离子和杂质不断渗出，还会污染水体、土壤；若坝体倒塌，可酿成严重恶果。相反，复垦废弃的尾矿池，则可达到变害为利的目的，增加农副收入，消除污染，改善环境。

尾矿池是由极细微的颗粒物质堆积而成，凝聚能力差，透气和容气性能低；缺乏植物生长的营养物质，土壤细菌及微型动物无法生存；富集多种重金属元素，完全不符合植物生长的土壤结构。因此，种植前应设法固结表层，在坝坡上覆盖山皮土，施加肥料，并创造良好的表层透气和容气的条件。

国外有的矿山，在尾矿池表面铺盖约 1 m 厚的废石层，它对再种植能起到良好效果 可稳定表层砂土,保护植物根系,防止水分蒸发,抵御风、水侵蚀,此外还有固坝防塌的作用，是一种可取的方法。

四、地面塌陷和废弃矿井整治

1. 地面塌陷的整治和利用

地表下沉和塌陷是地下开采、尤其是地下采矿普遍出现的土地破坏问题。通常，地表塌陷区的边界超出地下的对应采空区的边界范围，塌陷面积大于采空区面积，体积约为采出矿石体积的 60% ~70% 。恢复由此破坏的土地面积对保护矿山环境和利用土地资源是极为重要的。

（1）对于塌陷的水淹区域，可用作农业灌溉、发展渔业及其他养殖业，以及改建为水陆公园。

（2）开发利用煤矸石，化害为利。在暂不能利用的情况下，用煤矸石填充塌陷区。这样，煤矸石不需另占地面，填充的塌陷区可再种植或作其他用途，同时减少或消除塌陷区和废石堆对环境的污染；若经周密规划，则可变荒芜之地为风景宜人、工农业兴旺的良好场地。

（3）可以利用塌陷区作为固体废物的储存场所，特别是在煤矿区附近都建有大型火力发电厂，可利用塌陷区来储存粉煤灰；在金属矿山中，塌陷区亦可作为废石堆存放区。

应该注意，当地表塌陷区与地下水或地表水体相通时，不要因充填而造成水体的污染。

2. 废弃矿井、地面设施的整治和利用

报废矿井的地面遗留有道路、管道、建筑物以及井筒、井架等生产、生活设施。应结合矿山地理位置、地形条件、当地经济状况等因素，进行整治和综合利用。

矿区内的铁路、公路和一些专用建筑物，常常随它们服务的矿山报废而失去其原来的作用，应尽量使这些设施和建筑物在发展乡镇企业和振兴地区经济中发挥作用。而那些专用的结构物，如井架等，应予拆除，使矿山面貌转变为符合当地生态环境功能的场所。

历史上遗留下来的老矿区，往往没有井筒平面布置图纸，增加了处理上的困难，这样的井筒及其他出口，必须可靠地封闭，消除危险隐患。对新近采完关闭的矿井，如果没有专门用途及可靠的安全保证，亦应密闭井筒及平峒口。

应当指出，对废弃的地下矿井，应该周密地做出适当处理，以免发生地面沉降或塌陷。同时，还应保存完整的技术资料（如井上、井下对应位置图、巷道布置、采空区大小及位置等等）。

五、矿山“三废”的综合利用

逐步实行尾矿、矸石及矿坑排水资源化，把矿坑排水纳入水资源管理系统，

有条件的矿山可通过改变排水方式，改井下集中卧泵排水为地面井直接排水，把矿坑疏干排水与解决供水水源结合起来。这样既减少了污染，又解决了供水水源；还应努力提高选矿厂用水的复用率,尽量减少排放量 对洗选后的尾矿,应进一步提取有用矿物和元素加以利用，提高经济效益。对矿山矸石应作为巷道、露天采场的充填物利用，或用来制作建筑材料（如制砖、烧水泥等），以尽量减少地面堆放，避免污染环境。

第六章 能源与地质环境

能源是人类生产和生活所必需的物质基础。早在原始社会，人类便学会了钻木取火，开始了能源的利用。在人类的能源利用史上，不论从薪柴转向煤炭，还是由煤炭转向石油、电力，每次能源变革都立足于能源开发利用技术的飞跃，都伴随着产业革命，使生产力获得极大发展。同时，能源利用对人类生存环境的破坏和污染也相伴而生。能源环境问题已成为国际社会普遍关注的重要问题。调整能源结构、开发新能源已成为人类社会持续发展所必须解决的一项课题。

第一节 能源与能源环境问题概述

一、能源的概念及其分类

（一）能源的基本概念

从字面上看，“能源”即能量的来源。能源的科学定义是指能为人类利用并可获得能量的资源。能源的范围随着人类社会生产和科学技术的发展而不断扩大，它包括提供某种形式能量的物质资源和某种物质的运动形式。矿物燃料、风力、水力、太阳能等都是能源。

（二）能源的分类

地球上可供人类使用的能源主要来自地球以外的天体，最主要的是来自太阳的辐射能，薪柴、化石燃料、水能、风能、海流能、波浪能等都是由太阳辐射能转化而来的。地热能和放射性核燃料是地球本身蕴藏的能量，而潮汐能则是地球和其他天体相互作用而产生的能量。为了便于研究，人们从不同的角度对能源做了分类。

1. 按照能源的生成方式划分

可分为一次能源和二次能源。一次能源也叫初级能源，是自然界现已存在，可以直接使用而不改变其基本形态的能源，如煤炭、石油、天然气、水力、太阳辐射等。二次能源也叫次级能源，是指由一次能源加工转换而得到的产品能源，如电能、汽油、沼气、火药、酒精等。

2. 按照能源的形成和再生性划分

可分为可再生能源和不可再生能源。可再生能源一般指不会随人类的开发

利用而递缩的能源，即能够重复产生的自然能源，如水力、潮汐、太阳辐射、风力、地热等。不可再生能源指经过漫长的地质年代生成，一旦使用在短期难以再生成的能源，如化石燃料、核燃料。

3. 按照能源的利用历史和使用状况划分

可分为常规能源和新能源。常规能源指在一定历史时期和科学技术水平下，已经被人们广泛应用的能源。在当今，水力、煤炭、石油、天然气、核裂变材料均属常规能源。新能源指由于科学技术进步新发现的能源资源或利用先进技术新开发的能源产品；过去曾被利用过而现在又以新的方式利用的能源也属新能源。前者如太阳能、地热能、海洋能、沼气(生物质能)等；后者如风能，人类早在柴草能源时期就广泛利用风力带动风车汲水、推磨碾米，后来被电动机所代替，最近几年利用风力发电，重新引起人们的重视，所以风能是一种“古老的”新能源。

然而，常规能源和新能源是相对的概念，在不同的历史时期和不同的科学技术水平条件下，其范围是不同的。19 世纪初，蒸汽机刚开始使用时，煤炭曾是那时的新能源；而现在煤炭却已是常规能源了。20 世纪 50 年代，核能刚被利用，被人们称为新能源，随着科学技术的进步，现在全球已建立了 300 多座原子能发电站。工业发达国家已把核能看成是常规能源，但发展中国家仍把它看作新能源。

4. 按照能源使用方式划分

可分为燃料性能源和非燃料性能源。燃料性能源指通过直接燃烧而产生能量的能源，如矿物燃料、生物燃料、核燃料等。非燃料性能源指不需通过燃烧就可获得能量的能源，如风能、水能、潮汐能、地热能、太阳能等。

此外，根据能源使用过程中对环境污染的情况，还可把它分为清洁性能源和污染性能源。前者如太阳能、水能和海洋能等，后者如煤炭、石油、裂变核燃料等。能源的各种分类方法可归纳如表 6－1 所示。

表 6－1　能源综合分类

按使用状况分	按性质分	按生成方式分		
		一次能源		二次能源
		可再生能源	不可再生能源	
常规能源	燃料能源		煤、石油、天然气；油页岩、油砂	煤气、焦炭、汽油、煤油等；液化石油气、甲醇、丙烷、酒精等
	非燃料能源	水能	电、蒸汽、热水	

续表

按使用状况分	按性质分	按生成方式分		
		一次能源		二次能源
		可再生能源	不可再生能源	
新能源	燃料能源		核燃料	沼气、氢能
	非燃料能源	太阳风、风能、地热能、潮汐能、海洋能、生物质能		激光

注：本表摘自李铁锋等. 环境地学概论. 北京：中国环境科学出版社，1996

二、常规能源的供给与需求

（一）常规能源的供应状况

目前，已为人类广泛开发利用的常规能源主要有煤炭、石油、天然气、核裂变材料^{235}U和水力等。其中前三种都是由远古的化石演变而成的燃料，称为矿物燃料或化石燃料，它们是在地球演变过程中某些特定阶段的自然产物。

1. 矿物燃料

矿物燃料是世界上重要的能源资源，它们均是有机质死亡后在埋藏条件下形成的。矿物燃料的产出几乎遍布全球，但它们在地质时代和空间上的分布是相当复杂的。从时代上讲，无论煤炭还是油气，主要储藏在某些特殊地质时代的地层中，如中国主要聚煤时期有古生代的石炭二叠纪，中生代的侏罗纪，新生代的第三纪。从地区分布上看，全球矿物燃料的地质储量在各地有着很大的差别，前苏联拥有最大的煤炭储量，其次是北美洲和中国；世界油气资源主要集中在北纬20°～40°之间和50°～70°之间，近60%的世界石油储量集中分布在中东，其次为北美(10.5%)、南美(8.4%)(图6-1)。

中国煤炭资源可采储量$1\ 145\times10^8$ t，居世界第三位，煤炭占各种化石燃料资源总储量的95%以上；已探明的石油开采资源为33.2×10^8 t，居世界第11位；天然气探明储量$15\ 276\times10^8$ m³，居世界第19位；可开发的水能约3.79×10^8 kW，居世界第一位。

2 水力能源

地球上成千上万条川流不息的江河为人类提供了丰富的水力能源。人类很早以前就利用水轮机打谷、碾米，但直到交流发电机发明之后，水力才被大规模开发利用，它是仅次于石油天然气和煤的主要能源。据世界资源研究所发表的《世界资源报告》，1986年水力发电在全世界发电量中占21%。

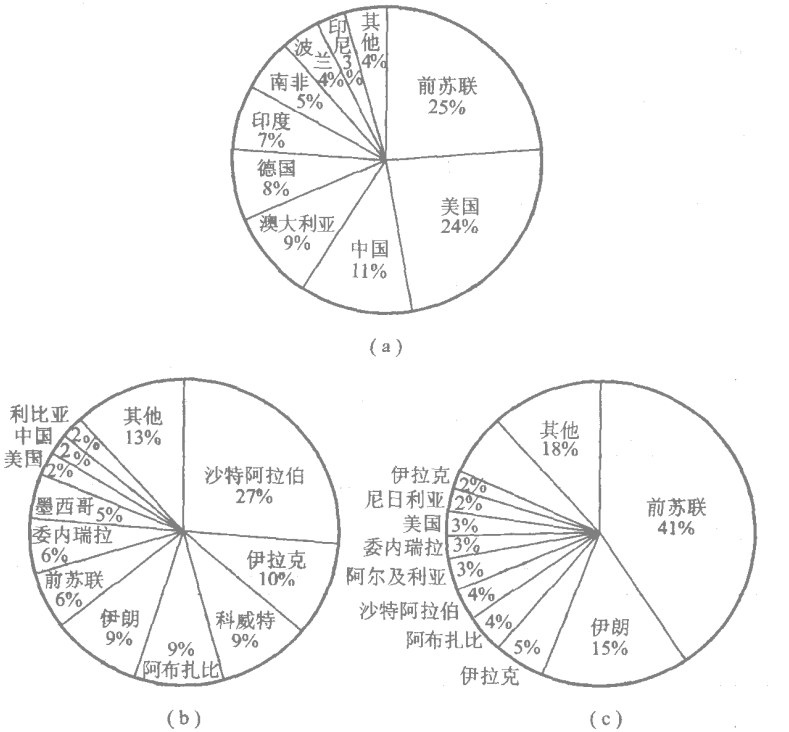


图 6－1　全球矿物燃料资源储量分布百分比

(摘自朱永峰等.矿产资源经济学.北京：中国经济出版社，2000)

(a) 煤炭；(b) 石油；(c) 天然气

目前，全世界现有技术可开发的水力资源蕴藏量约为 22×10^8 kW **。但水力资源的开发程度在不同地区是很不相同的，西方发达国家的水力开发程度已达** 40% **以上，某些国家的电力高度依赖于水力；而对于发展中国家，情况则完全不同。**

中国地域辽阔，河流众多，地形高差大，水力资源极为丰富，占世界第一位。全国水力资源理论蕴藏量为 6.8×10^8 kW **，可供开发利用的水能资源约为** 3.8×10^8 kW **，年发电量可达** 1.9×10^{12} kW·h **。但** 2001 **年全国发电量为** $14\ 780\times10^8$ kW·h **，开发程度仅** 19% **，低于世界平均开发程度的** 22% **；人均年发电量** 1 158.31 kW·h **，只占世界人均发电量的** 1/4。

3. **核能**

核能是重要的现代能源之一，特别是在能源结构从石油转向非油能源的时期，核能、煤炭和节能被视为解决能源短缺的希望。核电是当代经济、安全、可靠

的优质二次能源，许多工业发达国家和一些发展中国家都在积极发展核电。

目前，人类所利用的核能的生成物质是铀（^{235}U）。铀在地壳中的丰度约为 2×10^{-6}。据 OCED/IAEA(1989)，世界铀总储量为 359.7×10^{4} t，其中目前经济可采储量 162.5×10^{4} t。澳大利亚储量最多，储量超过 10×10^{4} t 的国家依次为南非、尼日尔、巴西、前苏联、加拿大和美国。中国铀矿资源特点是矿床规模小，成群产出，品位偏低，埋深较大。

（二）能源消费

能源是人民生活和社会发展的物质基础。能源需求与国民经济的结构、经济与人口的增长速度、能源生产和消费等多项因素有关。随着工业生产和现代农业的飞速发展、大众生活水平的提高以及战争和军备竞赛，世界能源生产和消费总量在迅猛增加（表 6－2）。在能源消费中，化石燃料仍占有重要的地位。1998 年世界一次能源消费结构为石油 39.9%、天然气 23.5%、煤炭 26.7%、核电 7.3%、水电 2.6%；中国的结构为石油 19.8%、天然气 2.1%、煤炭 71.6%、核电及水电 6.5%。

表 6－2 近 50 年全球能源消耗 单位：10^{13} MJ

年份	1950	1960	1970	1980	1990	2000	50 年累计
消耗量	7	11	19	33	56	95	1700

近几十年来，中国能源建设有了长足的发展（表 6－3）。煤炭产量自 1989 年突破 10×10^{8} t 以来，一直居世界第一位，1996 年达 13.96×10^{8} t，创历年最高产量；石油年产量自 1997 年以来，一直保持在 1.6×10^{8} t 以上，居世界第五位。2001 年全国发电装机容量达 3.38×10^{8} kW，全年发电量达 $14\ 780\times10^{8}$ kW·h，仅次于美国，均居世界第二。

表 6－3 中国能源消费总量及构成

年份/a	能源消费总量 /10^{4} t(标准煤)	占能源消费总量的比重/%			
		煤炭	石油	天然气	水电
1957	9 644	92.3	4.6	0.1	3.0
1962	16 540	89.2	6.6	0.9	3.2
1975	45 425	71.9	21.1	2.5	4.6
1985	76 682	75.8	17.1	2.2	4.9
1990	98 703	76.2	16.6	2.1	5.1
1995	131 176	74.6	17.5	1.8	6.1
1997	138 173	71.5	20.4	1.7	6.2
1999	122 000	67.1	23.4	2.8	6.7

注：摘自中国能源网 www.china5e.com,2003

三、能源环境问题概述

能源是发展农业、工业、国防、科学技术和提高人民生活水平的重要物质基础。能源利用的广度和深度是衡量一个国家生产力发展水平的主要标志之一。随着能源的供应和燃料消耗量日益增多，在其开采、输送、加工、转换、利用和消费过程中，都直接或间接地改变着地球上的物质平衡和能量平衡，必然对生态系统产生各种影响，成为环境污染的主要根源。特别是当能源供应不甚合理或燃料使用不当，在低燃烧效率消耗能源时，更会加重对环境的污染。

所谓能源环境问题，就是指人类在开发和利用能源过程中对环境造成的危害，以及这种危害反过来对人类社会的影响。它包括生态环境的破坏和环境污染两个方面。目前，全球主要能源环境问题有：温室效应、酸雨、臭氧层破坏、烟雾和热污染等。

(一)温室效应

20 世纪 80 年代以来，全球气候异常，热浪向全球各个角落袭来。西欧出现了历史上罕见的暖冬；千百年来风景优美、气候宜人的开罗，也一反常态，被 40℃高温骚扰而烦躁不安；被称为“世界粮仓”的美国，正忍受着半个多世纪以来最严重的干旱；南亚在暴风雨袭击的同时，又不得不忍受热浪及干旱的重压，产粮区土地龟裂。自 1986 年开始,中国连续 16 年出现了冬季偏暖的现象，暖冬天气使全国多个城市的气温刷新纪录，2001 年 2 月下旬北京平均气温破建国来最高记录。

气象记录表明,20 世纪中 6 个最热的年头都出现在 80 年代以来的十几年间,1995 年是近 100 年来最热的一年。与 100 年前相比，现在全球平均温度提高了约 0.6 ℃。计算机测算表明，再过 40～50 年，全球温度将比现在提高 1.0～3.1 ℃。变暖的速度比 19 世纪快 10～50 倍。

气候变暖与大气层的化学成分变化直接相关。太阳光照射到地球表面，一部分辐射能量被地球表面和云层反射，一部分被大气层和空气分子散射回宇宙空间，剩余部分则被地球表面所吸收，使地表增温。大气层吸收太阳辐射能量的气体主要有二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等等，俗称“温室气体”。这些气体的作用犹如一个温室的罩子，允许太阳辐射的能量穿过大气到达地表，同时又防止地球反射的能量逸散到天空。这种现象，其结果是使低层大气变暖。二氧化碳是引起温室效应的主要气体。研究表明，19 世纪中期，即世界大规模工业化以前，大气中二氧化碳的含量约为 290×10^{-6},现在已上升到 350×10^{-6} 左右。大气层的化学成分在过去几千年的时间里基本上是稳定的，工业化以来发生的急剧变化，则成为气候必然变暖的原因所在。

大气层化学成分出现上述变化的主要原因有：矿物能源消耗量大幅度增加；

大面积森林及植被破坏。矿物能源消耗量大幅度增加导致二氧化碳排放量剧增，而森林植被锐减破坏了自然生态吸收二氧化碳制氧的机能。全世界因人为活动导致大气中二氧化碳增加量中矿物能源消耗所起的作用占 50% 以上，砍伐森林的作用约为 25% 左右。

温室效应带来一系列环境危害。首先，由于气温升高，使海水变暖并膨胀、极地冰雪融化，从而导致海平面上升，沿海地区受到风暴潮、暴雨的灾害将更加严重，有些沿海城市和岛屿将被海水淹没。其次，旱涝出现频率上升，中纬度内陆湖泊、水库水位将会下降甚至干枯，而高纬度低地则可能经常出现渍涝；不少现有的水利设施可能失效，一些内河湖泊和航运也将受到影响。再次，在中纬度的一些地区，夏季少雨，蒸发量大，会变得酷热难忍，森林失火和草原失火增多，水资源问题将更为尖锐。气候变暖对农业的影响则有利有弊，高纬度地区的生长季节会延长，有些干旱、半干旱地区降雨会增多，同时二氧化碳本身也是一种肥料。但由于地球上多数地区是雨热同季，如果夏季变得干热少雨，而冬季温湿多雨雪，将不利于农作物生长，并导致病虫害加重。

（二）酸沉降

目前，酸沉降的危害已成为一个严重的世界性问题，被称为“空中死神”。所谓酸沉降，是指大气中 pH 值小于 5.6 的酸性物质的沉降现象。酸沉降包括湿沉降和干沉降，前者包括雨、雹、雾、露等沉降，后者包括酸性气体、颗粒物及有关物质沉降。酸雨仅是这种复杂的酸沉降现象中的一种，也是最常见的。不过由于历史的原因，现在仍有人沿用酸雨一词来表示广义的酸沉降。

在正常情况下，洁净的雨水溶解大气中的二氧化硫等物质降落地面时 pH 值大约为 6 左右，即呈微酸性。当大气中的二氧化硫和氮氧化物遇到水滴或潮湿空气，即转化为硫酸和硝酸，溶解在雨中即导致雨水的 pH 值降至 5.6 以下，形成所谓的酸雨。据测定，酸雨的主要成分是硫酸和硝酸，两者占总酸量的 90% 以上。

煤的主要化学成分是碳（C），但也含有其他的许多杂质成分，如硫（S）。硫在煤中的含量约为百分之一，在燃烧时生成酸性气体二氧化硫（SO_2）煤燃烧时产生的高温还能使周围的空气发生部分化学变化，空气中的氧气与氮气发生化学反应，生成酸性气体氮氧化物（NOx）。二氧化硫和氮氧化物为矿物能源消费过程中排放的主要污染物；这些酸性气体在雨水中的表现形式是硫酸根（SO_4^{2-}）、硝酸根（NO_3^-）和铵离子（NH_4^+）。

目前，在人类活动所排放的二氧化硫和氮氧化物的总量中，矿物能源利用所占的份额达 80% 以上，矿物能源利用在酸雨形成中的作用为 75% 以上。

酸雨造成的环境问题是严重的，也是多方面的。

（1）土壤及湖泊、河流酸化：酸雨及二氧化硫等尘埃降落到地面，导致土壤

酸化。一方面，土壤中的钙、镁、钾等养分被淋溶，土壤日益贫瘠化；另一方面，酸化的土壤又影响土壤中微生物的活性，造成土壤肥力下降，影响植物和农作物生长。酸雨还导致湖泊、河流甚至地下水等水体的酸化，破坏水生生态系统。

（2）森林及植物受损：受酸雨侵蚀的植物叶子，叶绿素含量降低，导致光合作用受阻，引起叶子萎缩和畸形，造成生产量下降。

（3）对建筑交通设施及古迹等的影响：一切裸露于大气中的物体，不论是建筑物、桥梁、工业装备、金属材料等，还是古代文化遗产如古建筑、雕刻、古迹等，都必将遭到酸雨无情地腐蚀而严重损坏。

（4）严重摧残人类的健康：在污染浓度高的地区，酸雨对人体健康的直接危害已十分严重。很多国家由于酸雨的影响，地下水中的铝、铜、锌、镉的浓度已超过正常值的 10～100 倍。酸雨还通过食物链对人体健康造成间接危害。

（三）烟雾事件

烟雾形成的基础是向大气排放污染物。在一定的气候下，大气中的污染物经阳光的作用，就会形成对人类有害的烟雾。一般地说，城市或工业区最容易出现烟雾，其中矿物能源消费排放的污染物占形成烟雾物质的 80% 左右，个别污染物质甚至高达 100%。已发生过的烟雾事件主要有两种类型，即煤烟型烟雾和光化学烟雾。

煤烟型烟雾以 1952 年伦敦烟雾事件最为著名。1952 年 12 月 5 日～8 日，因受冷高压的影响，伦敦上空出现了无风状态。当时的逆温层在 60～150 m 的低空，仿佛一个大盖子将从工厂和家庭的烟囱排出的烟尘滞留在下面。漂尘、二氧化硫含量较平时高出 5～6 倍，甚至十多倍。在短短的几天里，造成死亡人数较平常多 4 000 人左右，患有呼吸器官疾病者是平时的 4 倍，心脏病发作者是平时的 3 倍。这次事件中大气污染物的 60% 是家庭采暖的烟气所致。

光化学烟雾最早记载于 1946 年的洛杉矶烟雾。与煤烟型烟雾不同，光化学烟雾主要是汽车和石油化工排放的碳氢化合物和氮氧化物，经太阳光能的作用发生化学反应，产生一种浅蓝色烟雾，其中含有臭氧、乙醛及过氧乙酸硝酸脂等氧化剂。这是一种刺激性很强的毒雾，主要刺激眼、鼻、喉，引起眼病、喉头炎和不同程度的头痛，严重的造成死亡。

（四）臭氧层破坏

臭氧是一种气体。臭氧层主要分布在离地球表面 10～70 km 范围内，尤其集中在 20～30 km 的高空平流层中。其浓度的峰值约在 25 km 高度上。这层薄薄的臭氧像一道屏障挡住了太阳光中的紫外线辐射。假如地球没有这道屏障，太阳散射的强大辐射会毫无阻挡地直接照射到地球。那么，生命或许就会退回到依靠水体保护的非常原始的阶段。

科学研究表明，如果臭氧减少 10%，地表的紫外线辐射将增加 20%，人类患

皮肤癌患者的数量必将增加。据 1970—1980 年对平流层上层的观测，每 10 年臭氧减少 2% ~3%。进入 20 世纪 80 年代，科学家们陆续在南极、北极上空发现了“臭氧层空洞”。南极上空受到破坏的臭氧层已超过 10%。每到春季就会形成一个臭氧层空洞，1986 年的面积大到可以容纳下美国大陆，深到可以装下珠穆朗玛峰。2000 年，南极上空的臭氧空洞变化异常，8 ~9 月间迅速扩大，面积一度达到 $2\ 800 \times 10^4\ km^2$，相当于 3 个美国大陆的面积；空洞由椭圆形扩大成三角形，并到达南美洲有人居住的区域上空。北极上空的臭氧空洞面积相当于南极臭氧空洞面积的 1/5。

氟里昂是导致臭氧层破坏的主要原因，它和四氯化碳、三氯乙烷一起对臭氧层破坏所起的作用占 80% 以上。矿物能源的消费，也是臭氧层破坏的重要原因。有的科学家估计，化肥和燃料产生的氧化氮，可能导致臭氧减少 15%.

据国际有关组织的实验，臭氧减少 1% 很可能会使皮肤癌发病率增加 4%。目前，全世界每年死于皮肤癌的人大约有 10 万人。紫外线增加，还会危害植物及森林等的发育、生长，使农业减产；杀死海藻，使鱼类和其他水产品减产。

（五）热污染

热污染是指现代工业生产和生活中排放的废热所造成的环境污染。火力发电厂、核电站和钢铁厂的冷却系统排出的热水，以及石油、化工、造纸等工厂排出的生产性废水中均含有大量废热。热污染可以污染大气和水体。废热水排入地面水体之后，能使水温升高。在工业发达的美国，每天排放的冷却用水达 $4.5 \times 10^8\ m^3$，接近全国用水量的 1/3 废热水含热量约 $250\ 010^8\ kW$，可使 $2.5 \times 10^8\ m^3$ 的水温升高 10 ℃.

刚排出的冷却水的温度有时可高达 40 ℃，若持续大量排放可使水体温度大幅上升，导致水环境发生一系列化学、物理和生物学变化。通常水温升高 10 ℃，化学反应速率约增加一倍，水中有毒物质、重金属离子等对水生动物的毒性增强，如氰化物、锌离子等对鱼类的毒性随水温升高而增强。

由于水温升高使水中溶解氧降低，水体处于缺氧状态，同时水中细菌分解有机物的能力增强，水生动物的耗氧量增加，造成水中溶解氧进一步降低。在热效力作用下，某些水生生物发育受阻或死亡，另一些水生生物可能生长繁殖加快，水体富营养化，生态环境平衡遭受破坏。此外，水温上升还可能引起一些致病微生物滋生、泛滥，导致疾病流行，危害人类健康。

第二节　能源开发对地质环境的影响

人类不断地开发利用能源，形成了当今社会高度发达的物质文明和精神文明。然而，能源的开发利用也给人类赖以生存的自然环境带来了严重的污染和

破坏。时至今日，人类生存空间出现了前所未有的严重环境污染。

一、能源与环境的关系

能源与环境有着十分密切的关系。一方面，人类在获得和利用能源的过程中，会改变原有的自然环境或产生大量的废弃物，使人类赖以生存的环境受到破坏和污染，引起种种有害的后果；另一方面，能源与经济的发展，又对环境的改善起着巨大的推动作用。能源供应的不断增加和经济力量的增强，可以提供更多的资金和技术，促进自然环境的治理和改造。

在产业革命以前的漫长岁月中，能源消费以薪柴为主。由于用量不大，植物的自然生长足以补充其作为能源的消费；而且，环境容量可以“吸收和消化”薪柴利用过程中排放的废弃物。这时期，能源开发利用对环境的影响不大。产业革命后，矿物燃料成为能源消费的主体，现代环境问题随之产生。经济增长、人口增加导致能源消费需求急剧上升，人类赖以生存和发展的环境逐步恶化。

二、常规能源开发利用对地质环境的影响

（一）煤炭资源开发利用中的环境问题

煤炭开发、加工和利用的环境影响是多方面的。在煤炭的开采和加工过程中，带有明显行业特点的环境影响主要有以下几个方面：矿区地面沉陷、占用土地、酸性矿井水造成的污染、煤矸石堆放以及煤炭焦化造成的污染、煤炭燃烧产生的污染等(图 6－2)。

地表沉陷是地下开采煤炭的一个主要环境问题。地下煤层被采出后，破坏了岩体内部原有的力学平衡状态，使岩层发生位移变形，岩体的完整性受到破坏而引起地表沉陷。

为了保证矿井正常生产，必须把井下涌水不断排到地表。pH 值小于 6 的酸性矿井水中还含有大量的悬浮物（主要是煤粒），当把酸性矿井水排至地面时，就会污染水体、土壤和农田。

煤矸石是煤矿采掘和原煤选洗排放的废弃物。一般地说，煤炭开采过程中要排出 20%～30% 左右的煤矸石。煤矸石的堆放大量占用土地，破坏地表生态系统。同时，矸石自燃排放的 SO_2、CO 和烟尘等有害物质还会污染大气，或形成酸雨污染水体和土壤。矸石山还可能发生崩塌事故，对当地居民的生命财产造成危害。

煤炭在燃烧过程中，排出多种污染物，包括烟尘、二氧化硫、氮氧化物、二氧化碳、一氧化碳、烃类、醛类以及大量的灰渣。烟尘可增加大气悬浮物的含量；降低大气能见度，影响植物的光合作用。进入大气中的硫氧化物可转化为高度活泼的硫酸或硫酸盐而形成酸雨，直接或间接地腐蚀破坏许多物质。大气中二氧

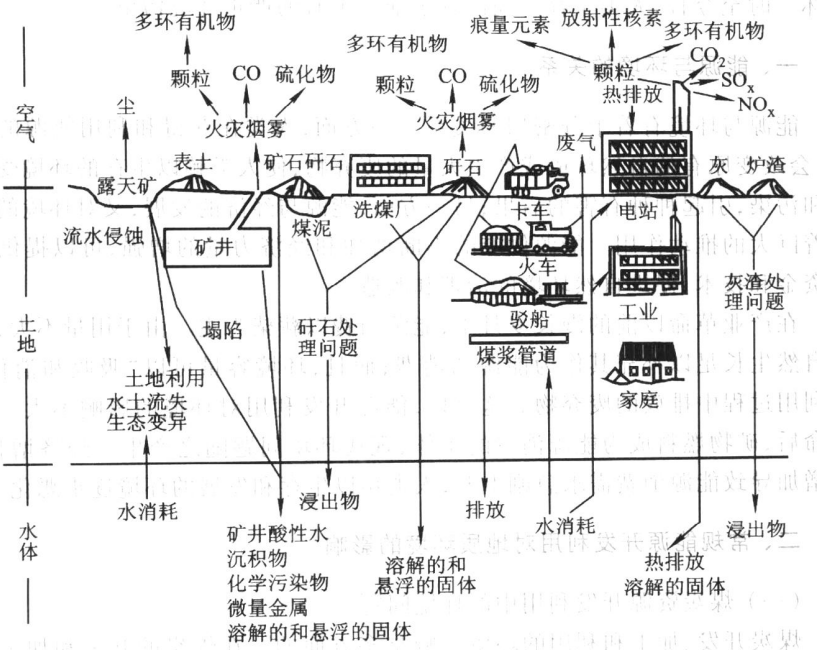


图 6－2　煤炭开采、加工和利用的环境影响

化碳含量增加,会产生“温室效应”,引发一系列严重后果。

煤矿露天开采活动包括采场剥离与开挖、矿区内地表河流改道、洗选厂房建设、剥离土体堆放场以及生活区建设等，其环境影响主要是大量占用土地,对地表、地下水体产生影响,破坏自然生态环境(图 6－3)。



图 6－3　煤炭露天开采对矿区地质环境的影响

（二）石油开发利用中的环境问题

石油勘探、开采、加工、运输和利用中的环境影响也是多方面的，主要有：开采对地表的破坏，泥浆和含油污水、废气与炼厂渣对环境的污染。

1. 石油开采对环境的影响

石油开采过程产生的洗井水和钻井泥浆往往含有石油，伴随石油同时采出的油层水多是含油污水，这些污染物质的排放对周围水体、土壤、农田和动植物都会造成危害。

2. 储运过程中对环境的影响

石油储存和装运过程中，会有部分原油和石油产品漏出，污染环境。油船压舱水和清舱水的排放以及油船事故性溢油，会严重影响海洋环境。

3. 加工转化过程中对环境的影响

石油加工过程中可产生瓦斯、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢和沥青烟气等废气，造成空气污染炼厂废渣和废污水中含有大量的硫、酸、碱、盐、油、酚、氰等物质，它们的排放会造成土壤、水域和农田的污染。

石油在加工转化过程中往往需要增加某种添加剂，因而使其产品在消费过程中对环境的影响更为严重。第一次世界大战期间，当人们首次将铅粉作为附加剂掺入汽油以防爆炸，并使汽车功率加大时，无不认为这是个科学大“奇迹”。但是，半个世纪过后，人们却又面对这个“奇迹”大伤脑筋。因为汽车排放的有害铅尘，对人类健康的危害越来越大。

（三）水能开发利用的环境影响

水是一种经济、洁净、可再生的能源，水力发电基本上不产生污染物。但是，水力发电要依靠建造水库才能实现，水库的建设虽然对工农业生产和人民生活带来巨大利益，但也要付出巨大的环境代价。修建水库是对河川水文条件在时间和空间上进行人为的调节和再分配，必然引起自然环境和生态系统的改变，对水库库区及其下游流域的地质环境产生重大的影响（图 6－4）.

1. 对自然环境的影响

水库蓄水，抬高了水库周围的地下水位，在一定条件下可能形成局部土地浸渍和沼泽化。在多泥沙河流，水库破坏了河流中的泥沙运行规律和平衡条件，会造成大量泥沙淤积，使河床急剧抬高。

修建水库还会引起下游河道的变迁，使原有防洪工程体系与新的水文条件不相适应。有些大型水坝建成后，使河口三角洲失去一年一度的泛滥，从而使得土地肥力降低，人海水量减少，海水倒流浸渍，加重了土壤盐碱化。流域性的水利水电开发和跨流域调水工程，对区域环境的影响更加深远，它可使水位降低，水面缩小，含盐量上升；由于排向下游的河水流量减小，河流携带的泥沙相应减少，结果导致入海河口海岸侵蚀加剧、海水入侵程度加重。

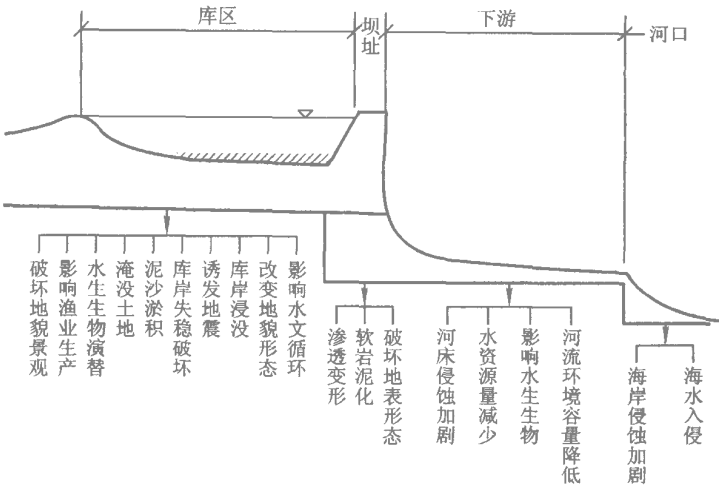


图 6－4　水能开发利用的河流流域对地质环境的影响

2．对地震的影响

在一定的地质构造条件下，水库蓄水改变了地表静载分布和原有地质构造的应力平衡，会诱发地震。在北美、非洲、中亚、西伯利亚、印度和中国等地都发生过水库诱发地震的事例。

3．对生物的影响

大型水库的修建，将导致大量的野生动植物被淹没而死，严重时甚至绝灭；与此同时，可能有另外一些生物孕育而生。从而破坏了原有的生态平衡。最明显的是，上游原来是陆地生态系统，建立水库后则成为水生态系统，而下游则发生相反的变化。

水库为发展渔业提供了广阔的水面，在淡水渔业中占有重要地位。但由于拦河筑坝截断了鱼类回游通道，水文条件的改变又可能破坏一部分天然产卵场。在水库的生态条件下，一些喜流水性的鱼类，因条件不适而受到抑制。故水库天然繁殖的鱼类种群和数量，常不及河流湖泊丰富。

4．水文地球化学方面的影响

修建水库不仅改变了河流原有的水动力环境，而且也使水库地区的水文地球化学环境发生改变。水库回水范围内河水流速减慢，对排入河流的污染物质的稀释净化能力降低；水库水体基本处于静止状态，对进入水库中的污染物质的净化作用主要表现为物理沉淀和化学反应，净化能力较河水的搬运稀释作用减弱；大型水库中的水还会出现热分层现象，致使各层水的密度、温度和溶解氧都

有所不同；库底静水层由于分解有机物，减少了水中的溶解氧，对水生生物产生一定的影响。

综上所述，拦河筑坝建水库，会产生多种多样的环境影响。中国长江三峡水库的修建曾引起长期争议，有赞同者有反对者。反对者多半基于生态学的观点，认为对生态环境的影响太大。

（四）核能利用中的环境问题

1. 核能的特点与利用方式

核能有两种：一种是核裂变能，一种是核聚变能。目前，以铀、钍等原子核发生分裂产生的核裂变能已属常规能源。

当前，核能的利用以发电为主，核电是一种清洁能源。核燃料代替化石燃料发电，对环境质量的改善有着积极的作用。目前世界各国都在开发利用核能发电，已有核反应堆发电站数百座，中国也开始利用核能发电，修建了大亚湾核电站和秦山核电站。核能利用在能源消耗中的比例正在逐渐上升。

2. 核能开发利用的环境影响

然而，核能利用仍存在着潜在的环境影响。它与其他常规能源相比，真正的不同点在于放射性（表 6－4）。这些在核能生产和废物处置中产生的辐射公害已引起了人们的关注。从开采核原料到放射性废物的最终处置，都会有不同数量的放射物进入环境中。灾难性核事故发生的机会虽然很低，但随着每个反应堆的投入使用，事故的几率增加了。1986 年前苏联切尔诺贝利核电站的放射性污染事故造成了极为严重的结果，致使 13 人死亡，300 多人因辐射致伤，河流、水库受到辐射污染，数千平方公里的土地若干年内无法耕种。目前，核废料的处置以密封深埋为主，但有许多问题需要解决。此外，由于快中子增殖反应堆中裂变材料的浓度比较高，熔融后能生成临界质量，易失去控制而引起小规模的核爆炸。

表 6－4 煤、石油、天然气和铀发电对环境产生的影响对比

能源	对土地的影响	对水的影响	对生物圈的影响
煤	破坏地面，产生大量固体废物，土壤和岩石受酸雨淋滤	酸性矿山排水、水温增高，酸雨	空气污染物引起的呼吸道疾病问题、酸雨造成的排水
石油	高矿化度盐卤水废物、输油管道建造、酸雨淋滤	石油漫溢、水温升高、酸雨	空气污染物引起的呼吸道疾病问题、酸雨造成的破坏
天然气	输气管道建造	水温增高	无明显影响
铀	放射性核废物处置	水温升高、某些放射性液体	正常运行时不存在或可忽略

三、新能源开发及其对地质环境的影响

由于煤炭、石油、天然气等常规能源储量有限，易造成地质环境的污染和破坏，人们开始注重对各种新能源进行积极的探索研究和开发利用。新能源是一个相对的概念，现在的常规能源在过去也曾被视为新能源，当代的新能源主要是指太阳能、生物质能、风能、地热能、海洋能和氢能。这些能源资源非常丰富，取之不尽，用之不竭。世界能源的开发利用正在向多样化方向发展。

（一）太阳能的开发利用及其环境影响

1 太阳能的特点与利用方式

阳光用之不竭，太阳能的直接转换将是构成可持续发展的世界能源体系的基石。太阳能的优点不仅在于数量庞大，而且还在于它比其他任何再生能源分布得广泛、均匀。太阳能与煤、石油、原子能等能源相比，具有很明显的优点；普遍存在、无害环境、长久使用、能量巨大。但在利用时也存在分散和不稳定的缺点。

太阳能的利用大体包括两个方面：一是直接利用太阳光线的辐射热能，一是利用太阳能发电。太阳能的转换方式有：光电转换，光热转换和光化学转换。在太阳能热利用技术中，最简单的形式就是玻璃暖房或塑料棚，太阳能热水和建筑物太阳能采暖技术已经成熟，并得到广泛应用。先进的太阳能采暖建筑物通过建造空心集热墙，使太阳加热墙内空气，形成热对流，达到取暖效果。太阳能暖房可以作为生活用房、动植物养殖以及干燥室。

以色列和约旦等国家，太阳能加热器已为家庭提供了 25% 和 65% 的热水。在美国已建立了 100 万个主动式太阳能系统和 250 000 座被动式太阳房。先进的太阳能集热器产生的热水温度高达 200 ℃，可满足许多工业部门生产用蒸汽需求。

太阳能发电技术也有所突破，发展很快。20 世纪 70 年代以来，世界许多国家都把太阳能发电作为一个重要的能量来源。利用聚光镜加热生产蒸汽，推动汽轮机发电；或利用光电效应，通过单晶硅、多晶硅等将太阳光直接转换成电能，又称光电池发电。目前光电池的性能在不断改进，有的光电转换效率高达 35.6%。日本目前已建成 2 000 kW 太阳能电站；美国、前苏联和西欧一些国家也正在试验装置更大的太阳能电站。中国开展太阳能利用的研究始于 20 世纪 70 年代中期，目前推广应用的项目主要有太阳能灶、太阳能热水器、太阳能温室、太阳能采暖等。

2. 太阳能开发利用的环境影响

太阳能直接利用的能源系统基本上不会对环境造成污染。但是，太阳能若集中大量地开发利用可能会造成太阳能回流减少，并影响局部环境的气候变化；

还可造成雨量减少和生态变迁。

（二）风能的开发利用及其环境影响

1. 风能的特点与利用方式

风能是一种“古老”的能源，它是指空气流动所产生的动力能。风能具有蕴藏量大、可以再生、分布广泛和没有污染的优点，但也有密度低、不稳定和地区差异大等弱点。

对地球表面可以利用的风能能量估计不一，多数人认为每年有（13～500）$\times 10^8$ kW·h 的电力。据估算，在地面以上 100 m 的高度内，陆地风机可吸取的能量每年约为 1 000 kW·h 电，相当于全世界电力生产量的 1/10 左右。

风能可以直接驱动农业机械，风速达到 3～27 m/s 即可以发电。风能发电前景诱人，新一代风能装置使风能脱颖而出，成为在价格上可与低成本矿物燃料相竞争的一种可再生能源。20 世纪 90 年代以来，全球风力发电能力每年平均以 22% 的速度增长，已成为全球各种能源中增长最快的一种。1992 年底，全世界装机容量达 270×10^4 kW，平均单机容量达 200 kW 到 1998 年底，全球风力发电装机容量已发展到 960×10^4 kW（表 6-5）。

表 6-5 全球主要国家风能装机容量单位：10^4 kW

年份 / 国别	1995 年	1996 年	1997 年	1998 年	2000 年 6 月
全球	490.0	617.2	750.0	960.0	
美国	165.0	179.4	180.0	203.5	250.0
德国	113.0	157.6	208.0	288.0	500.0
丹麦	61.0	78.5	103.0	126.5	175.0
荷兰	25.0	30.5			
英国	19.3	26.4			
西班牙	13.0	21.6	42.0	81.5	
印度	58.0	82.0	90.0		
中国	3.7	5.7	16.7	28.1	

注：本表摘自华安增．能源发展方向．中国矿业大学学报，2002，(1)

中国自 1958 年起就已开始利用风力资源发电，在许多省份兴建了不少中、小型风力电站，到 1998 年，全国风力发电装机容量已达 28.1×10^4 kW。最近几年，中国在广大农村和牧区推广应用小风力发电机，解决了电网覆盖不到的农牧户的照明。在东南沿海和一些风能资源极其丰富的大风地区，则把风力发电作为一种工业动力，补充常规能源。

2. 风能开发利用的环境影响

风能属于洁净的、取之不尽的能源，但风能也存在分散、间歇、能量密度不高，以及风力不均等弱点。风能利用对环境的影响，主要是噪声。当风车布置不当时，也会影响景观。如受飓风袭击，有可能会造成安全事故。此外，风能集中利用，还会造成风向下游风流减速和风量减少，影响局部气候。

（三）生物质能的开发利用及其环境影响

1. 生物质能的特点与利用方式

生物质能是太阳能以化学能形式贮存在生物中的一种能量形式，一种以生物质为载体的能量，它直接或间接地来源于植物的光合作用，在各种可再生能源中，生物质是独特的，它是贮存的太阳能，更是一种惟一可再生的碳源，可转化成常规的固态、液态和气态燃料。生物质能通常包括薪柴、木炭、农业残余物（如谷壳、甘蔗渣、秸秆）、能源树等，由上述物质经过一定的工艺过程制成的醇类、沼气等也属于生物质能。

世界生物质能资源非常丰富，每年植物光合作用固定的碳达 2×10^{11} t，含能量达 3×10^{21} J，因此每年通过光合作用贮存在植物的枝、茎、叶中的太阳能，相当于全世界每年耗能量的 10 倍。生物质遍布世界各地，其蕴藏量极大，仅地球上的植物，每年生产量就相当于目前人类消耗矿物能的 20 倍，或相当于世界现有人口食物能量的 160 倍。虽然不同国家单位面积生物质的产量差异很大，但地球上每个国家都有某种形式的生物质，生物质能是热能的来源，为人类提供了基本燃料。2001 年，美国消耗的可再生能源中有 50.4% 来自生物质能，自 1992 年来首次取代水电，成为美国可再生能源的头号来源。

为了广泛有效地利用生物质能，世界各国都在研究高效生物能的转换技术，以促使生物质成为具有广泛用途的热能、电能和动力用燃料。从当前生物质能的利用情况看，发展沼气能源具有较高的经济效益和环境效益。特别是它与农田、家畜饲养、人类居住、鱼塘、发电系统、加工厂等组成生态农场，对建立农村良性生态系统循环起着重要的作用。

生物质能作为能源利用具有全程良性循环的特征，可将人类生产、生活中的废弃物作为能源利用，最终残余物可作腐殖质还田；而扩大地球表面的绿色面积可使二氧化碳含量减少，改善大气环境质量。生物质能提供的是低硫燃料和廉价能源；与其他非传统性能源相比较，技术难题较少。但在开发利用中也存在产地分散、密度小、体积大、热值低、水分偏多（50% ~95%）以及不便于收集、运输和储藏的缺点。

2. 生物质能开发利用的环境影响

生物质能的利用对环境有许多积极的影响，但它也有一些消极的影响。一方面，生物质如果采伐不当，通常会导致生物质能源枯竭，水土流失加剧，土壤肥

力减退，破坏生态平衡（图 6－5）；另一方面，木材、秸秆等在燃烧时会排放出大量的颗粒物、有机化合物、一氧化碳和多环有机物等废气。

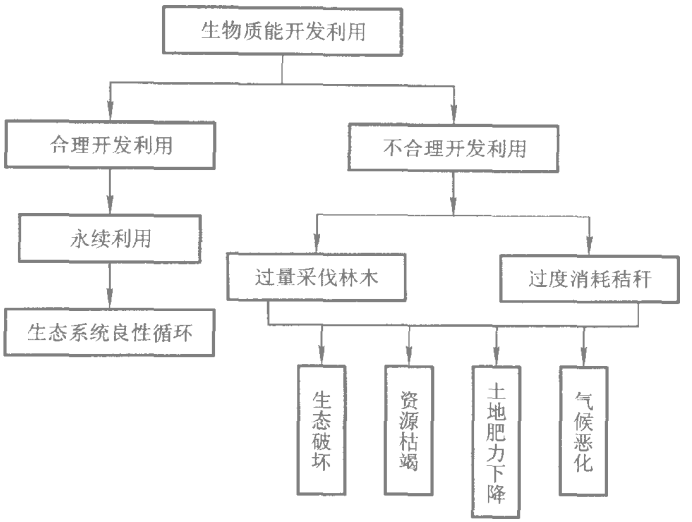


图 6－5　生物质能开发利用的环境影响

（四）地热能开发利用及其环境影响

1. 地热能的特点与利用方式

地热能是可再生能源系统中另一个重要的能源，它是可再生能源中惟一与阳光无直接关系的能源。地热电站可不间断地发电，在没有阳光或无风的时候也能提供电力。

地热能是来自地球深处的可再生热能。它起源于地球的高温熔融岩浆和放射性物质（U、Th、^{40}K）的衰变。地下水的深处循环和来自极深处的岩浆侵入到地壳后，把热量从地下深处带至近表层。按其属性地热能可分为 4 种类型：①水热型，即地球浅处（地下 100～4 500 m）范围内的热水或水热蒸汽；②地压地热能，即在某些大型沉积盆地深处（3～6 km）存在着的高温高压流体，其中含有大量甲烷气体；③干热岩地热能，是由于特殊地质条件造成高温但少水甚至无水的干热岩体，需用人工注水的办法才能将其热能取出；④岩浆热能，即储存在高温（700～1 200 ℃）熔融岩浆体中的巨大热能。上述地热能中，只有水热型地热资源已达到商业开发利用的阶段。根据开发利用目的，可将水热型地热能分为高温（>150 ℃）及中低温（中温 90～150 ℃　低温 <90 ℃）水热资源。前者主要用于地热发电，后者主要用于地热直接利用（供暖、制冷、工农业用热和旅游疗养等）。在有些地方，热能随自然涌出的热蒸汽和水而到达地面，自史前起它们

就已被用于洗浴和蒸煮。通过钻井，这些热能可以从地下的储层引入水池、房间、温室和发电站。

地球是一座天然的能源库，在它的内部蕴藏着大量的热能，地壳 5 km 内的浅部地热能大约是全世界原油和天然气储量的 4 000 万倍。然而，由于它是弥散的，只有极少部分在经济上有开采价值。在现代技术条件下，利用地热的方法主要有地热发电和地热供热两种，干热岩和地压地热也已引起重视。美国利用干热岩发电试验成功后，又开始了地压地热的开发试验；日本已将干热岩开发列入了新能源利用计划，其 1990、1995、1998 年世界地热发电装机容量分别为 586.7×10^4 kW、679.8×10^4 kW 和 823.9×10^4 kW 。中国从 20 世纪 70 年代初开始将地热资源作为能源开发利用，截至 1999 年底，包括台湾在内的中国地热电站的总装机容量达到 3.2×10^4 kW。

2. 地热能开发利用的环境影响

应用地热发电对环境的影响有下述几个方面：

（1）对土地的影响：建设地热电站要破坏大量地表，植被遭到破坏。在利用过程中提取地热流体还会引起地表下沉。

（2）对大气的影响：在地热电站生产中排放的废气含有硫化氢、二氧化碳和氨等污染物，会对大气产生影响。

（3）对水体的影响：地热水质的差别很大，某些地热水中含污染物较少，而大多数地热水都相对地含有溶解固体。某些地热电站排出的废水，可使河流底泥中的砷和汞含量增高。

（4）热污染：由于地热电站的地热利用率较低，以致冷却水用量大于火电站，因此，热污染较重。

（五）海洋能开发利用及其环境影响

1. 海洋能的特点与利用方式

海洋能源通常指海洋中所蕴藏的可再生的自然能源，主要为潮汐能、波浪能、海流能（潮流能）、海水温差能和海水盐差能。更广义的海洋能源还包括海洋上空的风能、海洋表面的太阳能以及海洋生物质能等。按储存形式又可分为机械能、热能和化学能。其中，潮汐能、海流能和波浪能为机械能，海水温差能为热能，海水盐差能为化学能。海洋能是一种具有巨大能量的可再生能源，而且清洁无污染，但地域性强，能量密度低。

海洋能的利用已有悠久的历史，中国沿海地区劳动人民早就利用潮汐的力量来推动水磨、水车。利用海洋能发电是从 20 世纪才开始的，1911 年第一个波浪发电装置试验成功；1913 年在法国的诺德斯特兰德岛附近建成了第一座潮汐发电站；1929 年世界上第一个海洋温差发电装置在墨西哥湾岸边装起。在当前能源紧缺、新技术不断发展的情况下，许多国家都十分重视海洋能的开发。世界

潮汐能的开发利用有了较大的发展，法国、俄罗斯、加拿大和韩国已经或即将建成的潮汐电站达 66×10^4 kW 。英国、印度、韩国等也都在规划建设大型潮汐电站；美国、日本、法国等则在加紧研究海洋温差发电；挪威、丹麦、英国和日本还建立了一批波浪发电装置。

中国大陆海岸线长约 18 000 km,海岛岸线长约 14 000 km，是一个海洋能资源十分丰富的国家。根据现有技术水平，中国海洋能的可再生量约为（4～5）× 10^8 kW ,其中潮汐能 1.1×10^8 kW ，大部分分布在浙江、福建两省，约为全国总量的 81% 波浪能 0.7×10^8 kW,主要分布在广东、福建、浙江、海南和台湾的附近海域；海流能的蕴藏量为 0.5×10^8 kW,主要分布在浙江、福建等省 海洋温差能约为 1.5×10^8 kW ，主要分布在南海和台湾以东海域，尤其是南海中部的西沙群岛海域和台湾以东海区。目前，中国已建有潮汐发电站总装机容量 5 930 kW，年发电量 $1\,021 \times 10^4$ kW·h。

2. 海洋能开发利用的环境影响

海洋能开发利用，会对近海海域的海洋动力条件产生影响，使泥沙运动发生变化，改变海岸带侵蚀与淤积的天然动态平衡，发生岸线变迁，甚至对港口建设产生破坏性影响。

第七章 人类活动与地质环境

生产力的发展，使人类对自然条件的改变，产生了巨大的作用。人类的工程活动在改变着地球的面貌，甚至导致地球上出现一些新的地质现象。人类活动对环境所起的作用是多种多样的，对环境可以造成不同规模、不同程度、不同性质的影响。这些影响可能是局部的或区域的，动力的或静力的；发生的部位可能是浅部的，也可能是深部的；可能是化学的作用，也可能是生物的或是机械的作用；作用的时间可能是短期的，也可能是长期的。

第一节 工程活动与地质环境

人类工程活动是人类生存活动中重要的组成部分，对地质环境影响较大的人类工程活动主要有水利水电工程、矿业工程、道路工程、跨流域开发工程、城镇或工业土木工程等。每种类型的工程又包含一系列的工程建筑物，组成工程系统。比如，地下开采的矿业主体工程是矿井、坑道和采场；水利水电工程有水利枢纽、水库工程、引水工程、下游灌溉工程及输变电工程等。各类工程系统及工程建筑物对地质环境的作用方式和强度不同，产生的环境效应亦不尽相同（表 7－1）。

表 7－1 大型工程活动的环境地质效应

工程类型	作用方式	环境效应
水利水电工程	附加荷载 岩体爆破 边坡开挖	诱发地震，库岸再造，水库淤积，突水溃泥，岩爆，岸边浸没，土壤盐碱化与沼泽化，改变水生生态系统，加剧下游河床侵蚀，河口泥沙减少，海岸侵蚀，海水入侵等
跨流域调水工程	岩土开挖、爆破 弃土填堆 拦截地表径流	改变天然水系，土壤盐渍化，影响水生生物，水质污染，渠道边坡失稳等

续表

工程类型	作用方式	环境效应
矿业工程	废物堆排 开挖、爆破 疏排地下水	诱发地震，边坡失稳破坏，山体开裂崩塌，突水溃泥，岩爆，煤与瓦斯突出，区域地下水位下降，采空塌陷，水土环境污染，破坏植被，水土流失，土地荒漠化等
交通工程	岩土开挖 弃土填堆 工程振动	边坡失稳，塌方，突水溃泥，岩爆，岩溶塌陷，泥石流，水土流失，破坏植被等
城市土木工程	岩土开挖 废弃物堆填 地表径流改道 水资源开发	地面沉降，岩溶塌陷，地裂缝，基坑变形与破坏，水资源短缺，水土环境污染等

一、大型水利水电工程环境地质问题

大型水利水电工程是国民经济和社会发展的基础设施，大中型水库是江河治理的关键工程之一。水利水电工程一般都具有明显的蓄水防洪、调节径流和提高水资源利用率的作用，在灌溉、供水和发电等方面具有巨大的经济效益。但是，在水利水电工程的影响下，河流原有的水文情势和水力条件都会发生变化，库水位周期性升降和水量的不断变化，都会引起库区及其周边地区地质环境的改变，对生态地质环境产生不良的影响，诱发一系列水利水电工程的环境地质问题。

大型水利水电工程对地质环境的影响和破坏主要表现在：地形地貌的改变、水利工程影响区水文地质条件的变化及其环境影响、水库岸坡失稳、水库淤积、水库渗漏与浸没、水库诱发地震、大坝下游引水灌溉区土壤盐渍化等。

（一）地形地貌的改变

水库蓄水后，在大坝的上游回水范围内和大坝下游地区，由于河流水动力条件的改变，从而引起地形地貌的变化。

水库兴建后，库区回水范围内大片的土地淹没在水下，并出现宽阔的水面。在泥沙淤积作用下，原来不平的库底逐渐淤高淤平，从而发生地貌的改变。如中国的丹江口水库，建库前汉江多年平均输沙量为 115×10^6 t，水库蓄水后，98% 的入库泥沙集中淤积在距坝 50～130 km 的库区内，淤积厚度最大 25 m，大坝下游

6 km 的黄家港站含沙量几乎为零。由于下泄河水流量的减小，河流输沙能力减少约 41%.

水库下游一定范围内的河段地形地貌也将发生变化。因水库拦蓄了洪水，下游河段原来被洪水淹没的滩地、沙洲，将常年暴露在河面以上，或被开垦成为可耕的土地。下游河道河水流量和水中泥沙含量的大量减少，使原为淤积的下游河道变为冲刷环境；下游河段的支流可在支流汇口处产生局部泥沙淤积，形成新的水下浅滩、沙洲；入海泥沙量的减少使河口附近由淤积环境变为海水动力作用下的侵蚀环境，海岸线不断后退。如埃及阿斯旺水库，建库前，尼罗河每年有 $(6\sim18)\times10^7$ t 泥沙排入地中海；建库后，由于泥沙被拦蓄在库内，改变了河口地段地中海海湾、罗赛泰及达米塔河口的淤积结构，河口附近的海岸线侵蚀后退，形成达米塔和罗赛泰群岛。

此外，修建水库大坝，需要移动大量的土石方。无论是开挖坝基、取料场取料，还是堆放废土，都会改变库区一定范围内的地形地貌。

（二）水文地质条件的改变

1. 库区水动力场的改变

水库蓄水后，库区沿岸一定范围内的地下水位将产生大幅度的抬升，库岸地段内的地下水水力坡度减缓，地下水运动发生变化，从而引起与地下水运动有关的一系列环境地质问题，如地下水补排条件的改变等；壅高后的地下水位接近或超出地面时，便产生浸没、湿陷、沼泽化等环境地质问题。

2. 库区水化学场的改变

水库将河水拦蓄在库内，使原河水在洪枯水季节的化学成分差别缩小或消失，起到混合均化作用，库水的溶解氧、硫化氢、二氧化碳等含量也发生变化。夏季深水层出现缺氧或无氧现象；二氧化碳含量由表水层向底层递增，并有一定的季节变化。影响库水化学性质的因素有：补给水源的化学成分；土壤中的元素含量 集水区的化学特征 水库的库容大小、库水温度、蒸发、水生物作用等。

3. 库区水温度场的改变

地处温带的大型深水水库，一般情况下库水冬暖夏凉。夏季的库水温度出现分层现象，表层水温高，深部水温低。如丹江口水库在 8 月份前表层水温平均为 29.6℃ ,底层水温平均 14.9℃ ,水深 15 ~ 25 m 处存在一跃温层；水库下泄与下游天然河水的温差，要经相当长的流程才消失，有时可达数百公里。

4. 库外水文地质条件的改变

水库蓄水后，大坝下游河段的河水位及流量发生改变，地表水与地下水的补排关系也发生变化，原来的地下水补给河水可能变为库水补给地下水。如地处干旱地区的河西走廊，因在其南北山沟谷大量兴建中小型水库，减少了下游地区地下水的补给量，导致泉水枯竭，地下水位普遍降低，水质恶化，自流灌溉变为提

水灌溉。库水还可以通过分水岭向相邻谷地（或低洼处）渗漏，致使邻谷或盆地水位升高。

（三）水库边岸再造

水库蓄水后库区水文条件急剧变化，在库岸斜坡与库水相互作用过程中因库岸失稳坍落和岸边淤积而引起的岸坡形态的改变称为水库边岸再造。水库建成蓄水后，抬升的水位浸没自然条件下的水上斜坡，使斜坡岩土体因饱水而强度降低；库水涨落引起地下水位波动变化还对斜坡岩土体产生动水压力；水库水体波浪拍打库岸增强了波浪的冲刷作用。原来处于平衡状态的岸坡为适应新的环境，不断发生坡形的再造，形成新的稳定性岸坡。水库边岸再造主要有岸坡坍蚀和岸坡崩滑破坏两类。

岸坡坍蚀的过程如图 7－1 所示。水库蓄水后，随着水位迅速上升，水体范围随之扩展，形成开阔的人工湖泊。上升的库水抬高岸边地下水位，浸润原先处于干燥状态的岩土，减小土体或软弱夹层的抗剪强度，使库岸岩土体的物理力学性质发生改变。由风力引起的水面波浪是改变库岸形态的动力因素之一。库岸岩土遭受浸湿和波浪的冲蚀，逐渐形成岸壁的初期塌落［图 7－1(a)］,破坏的快慢取决于岩土的强度及波浪的能量大小。如果原岸坡较高，则岸壁上形成与库水位 1 在同一高度的浪蚀龛［图 7－1(b)］。波浪不断对被湿化的库岸冲击、磨蚀，自然崩落和冲击下来的岩土碎屑成为悬移质和推移质被波浪回流带离破脚淤积在岸边，于是库岸边线后移，水下浅滩开始生成［图 7－1(c)］。波浪重复的作用，库岸不断坍落、后退，浅滩逐渐增长，同时也改变着波浪与库岸相互作用的特征。直至浅滩尺寸拓宽到足以消耗全部波能，库岸后退与浅滩的发展渐趋稳定，形成最终的平衡剖面［图 7－1(d)］。

大型崩滑破坏大多发生在基岩库岸地区，产生突发性的坍岸，一次滑坍规模很大，大量岩块瞬间倾入水中，急剧改变库岸地貌形态和库区水文特征。坍塌的岩体冲击库水产生涌浪，如发生在近坝或坝肩附近，涌浪可越过坝顶，危及大坝和下游的安全。意大利瓦依昂水库，1963 年 10 月 8 日发生库岸滑坡，滑体规模达 2.6 亿多万立方米，整体滑落时间约 20 秒,涌浪高出坝顶 100 多米,库水越过大坝冲毁下游村镇，死亡 3 000 余人。

影响库岸再造宽度和发展速度的因素包括内在因素和外在因素两类。内在因素有库岸地形地貌、斜坡岩土体性质、岸坡结构、地下水类型、库岸植被覆盖程度和岸边人工建筑物的分布。库岸愈高陡、库岸线曲率愈大、切割愈破碎，愈容易产生库岸的坍落。外在因素有库水动态、风浪特性、大气降水和库面浮冰。库区泥沙来源和运移规律也是一个重要因素。

水库建成蓄水后，应建立完善的库岸边坡监测系统，对库岸的变形及其演化趋势进行监测，对容易发生岸坡失稳、坍滑的地段开展稳定性评价，遵循以防为

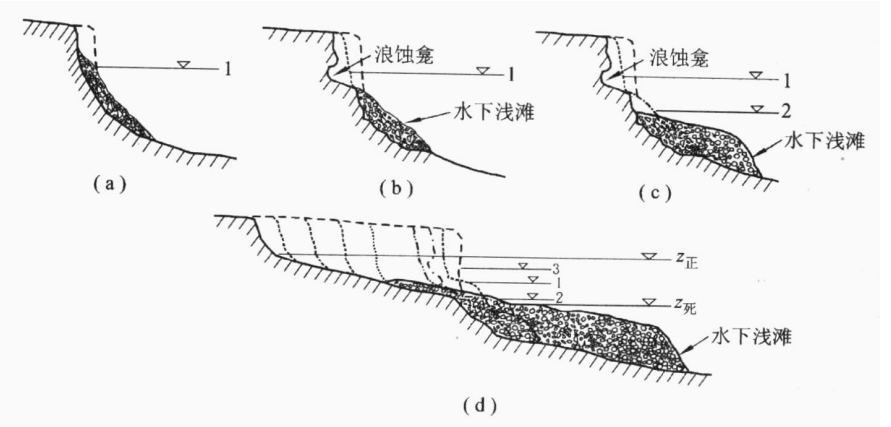


图7－1　水库边岸再造的一般过程

（摘自张咸恭．工程地质学．北京：地质出版社，1983）

（a）水库岸壁的初期破坏；（b）、（c）浪蚀龛及水下浅滩的形成；（d）最终平衡剖面的形成

1、2、3．不同时期水库水位；$z_{正}$．水库正常蓄水位；$z_{死}$　水库死水位

主、防治结合、因地制宜综合治理的原则，采取抛石、草皮护坡、砌石护坡、护岸墙、防波堤等措施减缓或阻止库水对岸坡的侵蚀。

（四）水库淤积

在河水含泥沙量大的河流上建库，河水进入水库后流速骤减，水流搬运能力下降，所挟泥沙在库尾或支流的入库口堆积，形成水库淤积。水库淤积的主要危害是影响水库的正常使用，缩短水库使用寿命，而且会给上下游防洪、灌溉、航运、排涝治碱、工程安全和生态平衡带来影响。例如，三门峡水库坝高 106 m，设计库容 $96.4\times10^{8}\ m^{3}$，控制黄河流域面积 688 421 km^{2}。1960 年建成蓄水至 1978 年的 18 年间，泥沙淤积量已达 $37.6\times10^{8}\ m^{3}$，占设计库容的 39%。水库淤积还使其上游潼关一带河床不断淤高并向上延伸，河水外溢，两岸土地大范围被淹。

影响水库淤积的环境因素主要是入库河水的泥沙含量和库岸地带的崩、滑、流发育状况以及水库水位调度特性等。河水泥沙含量高的重要原因就是河流上游地区滥伐森林、坡地开荒，以及采矿、筑路等不合理的人类活动。因此，减少水库淤积的有效措施是加强水土保持工作，整治冲沟、植树种草和流域综合治理。在水库上游泥沙含量高的支流、沟谷上修建拦沙库。同时，加固库岸不稳定地段，尽量避免库岸失稳坍塌；修建水库时还应设置泄流排沙设施。

（五）水库浸没

水库蓄水后，库岸岩土体被水浸泡而逐渐饱和，地下水水位随之上升而形成壅水。若岸坡相对平缓、地下水水位接近甚至高出地面，导致库岸岩土体强度降低、大片土地变成沼泽或严重盐渍化的过程和现象，称为水库浸没。

水库浸没对临近库岸地带的工农业生产和居民生活危害巨大，平坦、肥沃的良田因地下水位上升而沼泽化或盐渍化；地基承载力降低，建筑物遭受破坏。若地基为黄土或具膨胀性的土层，影响更为严重。浸没还可造成附近矿坑充水，矿山被迫关闭。

水库浸没是各种因素综合作用的结果，库岸地形、岩性和结构、水文地质、水文气象、水库运行状态及人类活动等均对水库浸没有一定的影响。容易发生水库浸没的地段包括：① 平原型水库的大坝下游、顺河坝或围堤外侧；② 地下水位埋藏浅、地表水和地下水排泄不畅、补给量大于排出量的库岸地段；③ 水库附近封闭或半封闭的洼地边缘。

（六）水库诱发地震

人类工程活动所引发的地震称为诱发地震（induced earthquake），地下核爆炸、采矿、深井注水、抽采地下流体、水库蓄水等均可诱发地震。水库诱发地震一般指与水库蓄水相伴的地震活动性的增强。水库诱发地震最早发现于希腊的马拉松水库，伴随该水库蓄水，1931 年库区就产生了频繁的地震活动。20 世纪 50～60 年代，世界各地修建的大中型水库急剧增加，诱发地震的水库数量也随之呈现出上升的趋势。尤其是进入 60 年代以后，全球水库地震的频度和强度都达到了高峰，几座大型水库相继发生 6 级以上的地震，造成大坝及库区附近建筑物的破坏和人员的伤亡。

水库蓄水后，水体的巨大荷载使库区及其周围地应力场发生变化，可能使原来地震活动微弱的地区发生较强烈的地震或使地震活动强烈地区的发震次数增多。目前，全球已有 120 多座水库诱发了地震活动。其中大于 5 级的水库诱发地震 16 例，大于 6 级的水库诱发地震 4 例，造成较严重影响的水库诱发地震如表 7－2 所示。

1. 水库诱发地震的基本特征

与构造成因地震（即正常地震）相比，诱发地震有其自身的一系列特征，主要表现在以下几个方面。

（1）表示频度与震级关系的 b 值较大：一般比构造成因地震（即正常地震）的 b 值大 1.3～1.5 倍。这是水库诱发地震一个很重要的特点，是区别诱发地震和正常地震的主要标志之一。

（2）地震震级比正常地震低：至今为止还没有超过 6.5 级的水库诱发地震。

（3）多数诱发地震的震源深度很浅：其范围在 1～11 km 之间，一般为 4～7 km。

（4）地震烈度：地震烈度较同震级的天然地震烈度高，震波垂直分量的作用较显著，破坏作用较强。

（5）地震频率与水位：地震频率异常高，且与水位的高低、尤其是水位的大

幅度升降呈明显的正相关关系；最大主震或大震群的出现往往滞后于最高水位的出现。

（6）地震的震型：以前震一主震一余震型为多，也有群震型，孤立型罕见；余震衰减率比正常地震的余震衰减率低得多。广东省新丰江水库于 1959 年 10 月蓄水后地震活动加剧，1962 年 3 月 19 日发生 6.1 级地震，从此余震不断，至 1978 年底的 16 年间共记录地震 3.1 万次之多。

表 7-2 全球主要水库诱发地震一览表

国别	库坝名称	坝型	坝高/m	库容/$10^8 m^3$	开始蓄水年份	发震年月	最大地震	
							震级	时间
赞比亚	卡里巴湖	拱坝	125	1 526	1958.1	1961.7	6.1	1963.9.23
印度	柯伊纳大坝	重力坝	103	2 708	1962.6	1963	6.4	1967.12.10
希腊	克雷马斯塔湖	重力坝	147	47.5	1965.7	1965.12	6.2	1966.2.5
中国	新丰江	大头坝	105	130	1959.10	1960.5	6.1	1962.3.18
日本	黑部大坝	拱坝	180	1.488	1960	1961.8	4.9	1961.8.19
法国	蒙大纳大坝	拱坝	130	2.75	1962.4	1963.4	4.9	1963.4.25
瑞士	康特拉	拱坝	233	0.86	1964.8	1965.5	4.0	1965.10.11
巴基斯坦	曼格拉水库	土石坝	135	72.5	1967.2	1967	3.6	1967—1968
前苏联	努雷克大坝	土石坝	300	110	1972	1972.12	4.5	1972—1973
希腊	马拉松湖	重力坝	63	0.41	1929.10	1931	5.0	1938.
新西兰	本莫尔湖	土石坝	110	20.4	1964	1964	5.0	1964.
中国	丹江口水库	重力坝	97	160	1967.11	1970.1	4.7	1973.11.29
中国	参窝水库	重力坝	50	54	1972.11	1973.2	4.8	1974.12.22

2. 水库诱发地震的机制

水库蓄水后对库底岩体可产生三个方面的效应：水库水体的荷载效应、物理化学效应和空隙水压力效应。虽然水库水体对库底岩石的荷载效应可能在岩体中产生附加应力场并使水库边缘产生张应力和切应力，从而恶化先存断裂面的应力条件，并且，水库诱发地震的震级与水库蓄水后的水位存在一定的正相关关系，但水库诱发地震的确切诱因尚未完全查明，已有震例表明这类地震不是由于水库荷载直接或单独造成的，而是水库蓄水和某种地质作用共同引发的。美国科罗拉多州丹佛废液处理井诱发地震为水的空隙水压力诱发地震机制提供了一例实证，由于岩体裂隙面或断裂带上空隙水压力的存在，降低了作用在该面

（带）上的有效应力，从而降低了抗剪强度，使在缓倾角的断裂面（如逆掩断层面）上的块体也有可能产生倾向滑移或在一定推力下产生逆倾向错动。人们普遍认为，水库蓄水后的库水效应叠加于库区原有天然应力场之上，使水库蓄水前自然积累起来的应变能得以较早地释放出来。

3. 水库诱发地震灾害

水库诱发地震的直接后果是大坝及震中地区建筑物的破坏和人类生命财产的损失，其间接灾害包括水库枢纽运转功能失效，库水下泄、淹没下游城镇和农田，发电、航运系统中断，水库放空所带来的水库效益亏损等一系列严重后果。水库诱发地震有的震级可达 6 级以上，如印度的科伊纳水库诱发地震震级达 6.4 级，使科伊纳市绝大部分砖石房屋倒塌，死亡 177 人，伤 2 300 余人，水库大坝及附属建筑物也受到严重损害，影响破坏半径达 50 km，水库被迫放空进行加固处理。如中国广东省的新丰江水库诱发地震也威胁到大坝的安全，右岸坝顶部附近产生了上百条不同程度的裂缝，出现轻微渗漏，极震区几千间房屋严重破坏，死伤数人。

4. 水库诱发地震研究

水库诱发地震的研究主要包括区域地壳稳定性、水库诱发地震判据、库区水文地质条件和岩体结构面特征、库区微震活动、诱震地质环境分区、诱震类型、最大震级对建筑物和环境危害的评价以及对策研究等方面。通过调查研究，查明库坝区诱震的地质环境，分析诱震的可能性及其危害，预测库坝区震情变化发展趋势，为大坝设计提供应否采取抗震措施的依据，以确保大坝的安全运营。

二、道路交通工程环境地质问题

铁路、公路是国民经济建设的命脉，修筑铁路或公路等交通线，势必大量开挖边坡、掘进隧道，从而造成山体边坡失稳、隧道洞顶塌陷和疏干地下水等灾害事件，已屡见不鲜。如 1986 年 6 月 21 日哥伦比亚西南部一段山间公路发生大滑坡，致使几十辆汽车被大量土石方吞没。中国的宝成、鹰夏等铁路线都是有名的‘病害’线。1997 年以来，中国的交通建设投资每年以超过 20% 的幅度增长，在建或即将建设的交通工程量巨大，对地质环境的破坏作用及其诱发的环境地质问题将日益增多。

1. 边坡变形失稳

在交通线路建设中，由于开挖路堑和平整路基使自然山坡的应力平衡条件发生变化，常导致边坡变形失稳，发生崩塌、滑坡、泥石流等灾害或造成路基、路堑失稳变形，尤其是道路经过软弱破碎岩体时，可形成崩滑密集段；遇暴雨时可形成泥石流；通过老滑坡体时，还有可能使滑坡复活。如成昆铁路全线有 183 处滑坡，其中因道路工程建设引起或复活的古滑坡有 77 处，占滑坡总数的 42%。

全球范围内修建铁路和公路所搬运和堆添的土石方量甚至超过了河流搬运和堆积的物质量，交通线路对山体斜坡稳定的破坏，主要是由于开挖路堑破坏自然边坡的稳定坡角而使坡体应力场变化，或切断各种软弱结构面形成易于崩滑的不稳定楔体；当线路通过古滑坡体时，若选线不当，或在车辆振动、暴雨、地震等外力作用下，可能导致古滑坡复活，引起大规模的灾害事件。修建铁路或公路，还会产生大量废弃的土石，堆置或处理不当，将发生滑塌或在雨水作用下成为泥石流的物源区；对地表天然植被的破坏也加快了水土流失的速率。

为了保证路基路堑边坡的稳定性，必须做好选线的工程地质勘察工作，收集并分析沿线的水文、气象、地貌、地质等方面的资料，使选定的线路路基具有足够的强度、水—温稳定性和整体稳定性，针对影响路基稳定性的主要因素提出应采取的处理措施。

2. 水文地质环境的改变

交通线路建设工程，影响并改变地表径流的原有状态，或使浅层地下水含水层被截断，地下水的补给、径流、排泄条件发生变化，地下水不能流向下游，导致下游地区地下水补给减少，井、泉干枯，甚至出现土壤荒漠化现象；当线路穿越山腰处时，则在道路的上边坡出现地下水露头。开凿很深的路堑时，道路路基可能低于当地的地下水位，从而引起地下水水位下降。

在岩溶发育地区修筑交通线路，可能出现路基基底冒水、水淹路基、隧道涌水、大规模突泥和大面积地面沉陷等环境地质问题。例如，在京广复线南岭隧道施工中，曾发生严重的突泥现象，先后两次突泥共计达 10 500 m^3 ,淤塞导洞长达 347 m，致使导洞棚架倒塌、地面下沉 17 m、陷穴面积达 1 400 多平方米，造成巨大的经济损失。

3. 洞室破坏与隧道涌水

隧道工程引起的环境地质问题，主要是疏干地下水和产生地表塌陷，特别是隧洞穿过强岩溶化岩层时尤为显著；当隧洞穿过破碎岩体时，可能产生洞顶坍落、洞壁垮帮。地下水是造成塌方和使围岩失稳的重要原因。如地下水可使岩质软化，并使其强度降低；促使围岩中的软弱夹层泥化，减少层间阻力，造成岩体滑动；地下水涌出时，在动水压力作用下，将出现流沙及渗透变形；有时还会发生突水事故，并引起地下水位下降，破坏原有的水文地质环境，导致附近井、泉干枯，地表发生塌陷。

青藏铁路的关角越岭隧道长达 4 006 m,最大埋深 520 m ，由于其地处强烈的晚近活动构造带内，在以地应力为主的各种因素作用下，路基和隧道出现了难以整治的拱顶裂缝和掉块、边墙裂缝、底板隆起、路基中心线偏移与导坑缩径等地质“病害”。

影响隧道围岩稳定性的因素主要有包括岩层产状、地质构造、地下水、地震

等地质因素和隧道埋深、几何形状、跨度和长度、施工方法、围岩暴露时间及衬砌类型等工程因素。

4. 交通线路建设环境地质问题的预防

交通工程建设一般分为可行性研究、初步设计、施工和营运等阶段。各阶段的环境地质调查研究主要有以下几个方面：

（1）可行性研究阶段：主要开展线路规划，通过对道路沿线地质环境和社会经济条件以及开发建设要求，全面分析道路工程与地质环境相互作用，分析预测交通线路工程在不同地区的适宜性和可能产生的环境地质问题，为线路工程的综合规划提供宏观决策依据。

（2）初步设计阶段：主要对道路沿线的环境地质要素、环境地质作用及问题进行全面的评价、预测，经多方案对比优选，为道路沿线的地质环境保护提供依据和对策建议。

（3）施工、营运阶段：主要针对施工、营运中所产生的环境地质问题，查明其发育分布特征与规律，并对重要线路、典型问题进行深入研究，评价其危害程度，制定切实可行的防治措施。

交通线路环境地质问题及其危害的防治原则是：以防为主、防治结合、重点预控。在设计阶段，充分认识和掌握道路沿线地形地貌和地质条件，尽量避免线路经过可能出现环境地质问题的地段。同时，选择适当的调控手段，采取避绕、加固、保护和综合治理等措施，减轻或避免不良环境地质问题，保证行车安全和交通线路的畅通。

三、跨流域调水工程环境地质问题

水资源合理配置是水资源可持续利用的重要基础。跨流域、长距离调水工程的目的是调整水资源数量在空间上的天然分布，使其与经济社会发展格局相适应，从水资源丰沛的地点，以经济合理的代价，调出符合数量和质量要求的水资源，满足缺水地区经济社会可持续发展的需求。水资源的地域调配措施包括利用天然河道或修建人工渠道、运河、管道、泵站等输水、引水、提水等调水工程。

在世界的大江大河上几乎都能找到调水工程的影子。公元前 2400 年，为了满足今埃塞俄比亚境内南部的灌溉和航运需求，埃及兴建了世界上第一条跨流域调水工程，成为跨流域调水的鼻祖。世界著名的调水工程有：中国的京杭大运河、美国的中央河谷及加州调水、澳大利亚的雪山工程、巴基斯坦的西水东调工程等(表 7－3)。目前，世界上已有 20 多个国家和地区兴建了 160 多处跨流域调水工程。

中国是世界上修建调水工程最早的国家之一，如京杭大运河，以公元前 486 年兴建的沟通长江、淮河流域的“邗沟”为基础，经多次改建扩建后，于 1293 年

连通成全长 1 700 余千米，贯穿 5 大流域的人工运河，为发展华夏的农业灌溉和水上交通作出了重大贡献。公元前 221—219 年建成的沟通长江和珠江水系的灵渠至今仍在发挥灌溉、航运等综合利用效益。

跨流域调水可以扩大农业灌溉面积、提高粮食产量、促进航运、改善受水地区的水质和自然环境，同时具有防洪效益。但跨流域调水人为地改变了天然水系，不仅引发流域生态系统的变化，还淹没大量土地，迫使工程沿线居民搬迁，使被引水河流下游水资源发生变化，若用水管理不当，还可能造成受水地区土壤次生盐渍化等。

下面仅以中国南水北调工程为例论述跨流域开发工程可能引发的环境地质问题。

表 7－3　国内外主要跨流域调水工程基本情况表

国家	工程名称	水量调出区	水量调入区	调水方式	引水量 /$m^3 \cdot s^{-1}$	年调水量 /10^8 m^3	开工年份
美国	中央河谷	萨克拉门托河	圣华金地区	提水	636	134	1937
美国	加州水利	费瑟河等	南加州地区	提水	292	52	1959
加拿大		尼切克河	凯马诺电厂	自流	185		1925
埃及	努巴里亚	尼罗河	努巴里亚	提水	116		1966
前苏联		额尔齐斯河	努拉河	提水	75	25	1962
巴基斯坦	西水东调	印度河	巴基斯坦东部	自流	1492	160	1960
法国	普罗旺斯	迪朗斯河	唐德贝尔湖	自流	40		1963
澳大利亚	雪山工程	雪山河	墨累河	自流		23.7	1949
印度		比阿斯河	萨特累季河	自流	225	47	1961
罗马尼亚		多瑙河	罗通海湖	提水	200	20	
德国		多瑙河	莱茵河	提水	27	3	1974
伊拉克	萨萨尔	底格里斯河	萨萨尔河	自流	600		1956
西班牙	北水南调			提水	66	10	
秘鲁	马赫斯			自流	260		
中国	江水北调	长江下游	江苏北部	提水	470		1961
中国	引滦工程	滦河流域	天津、唐山	自流	140	19.5	1982

续表

国家	工程名称	水量调出区	水量调入区	调水方式	引水量/$m^3 \cdot s^{-1}$	年调水量/10^8 m^3	开工年份
中国	南水北调东线	长江下游	黄淮海平原	提水	1000	192	2003
	南水北调中线	长江中游	黄淮海平原	自流	800	237	规划
	南水北调西线	长江上游	黄河流域	混合		195	规划

注：据南水北调规划设计管理局 www.nsbd.mwr.gov.cn,2003 编制

（一）输水渠道阻塞天然径流问题

中国的南水北调是从长江向黄淮海平原调水的举世闻名的巨大工程，分东线、中线和西线三种规划方案。其中东线和中线方案，流经 10 个省、市，横穿长江、淮河、黄河和海河四大水系，仅中线干渠就与 168 条自西向东流动的天然河道相交，对自然条件下的地表径流和地下水流起到拦阻和堵塞作用，将影响地表天然河道的泄洪排涝功能。若渠道渗水将使地下水位上升，形成一条地下水坝，阻止地下水向东流动，使干渠西侧产生一个地下回水区。

（二）渠道稳定性问题

西线方案地处青藏高原，地势陡峻，地层褶皱强烈，多为陡倾岩层，地质构造复杂，是地震高烈度区，将给工程抗震带来一定的影响，工程建筑物可能因地震而遭受破坏。此外，西线调水工程影响区域内多为高地应力分布区，工程开挖可能引起卸荷回弹与应力释放，造成斜坡、洞室的变形破坏，发生岩爆、崩塌、滑坡等灾害现象。冻土的冻融滑塌和热融沉陷也对西线工程的渠线和地下工程产生危害和影响。

中线方案除穿越膨胀土地段、岩溶发育的可溶岩地段和广阔的煤系地层及矿山采空区外，还需在黄河河底开挖倒虹吸隧道。可能出现的环境地质问题有：膨胀土土体胀缩，引起地基变形、边坡滑塌等；部分渠线通过砂砾石和岩溶发育的可溶岩地段时的渠道渗漏、渗透变形、浸没和次生盐渍化等；在渠道水流冲刷、侵蚀、渗透变形作用下，出现散浸、管涌、堤岸崩塌等。

东线方案沿线存在许多条带状散布的碳酸盐岩裸露区，地表岩溶缝隙、溶沟、溶槽及地下溶洞、落水洞和暗河等是很好的汇水场地或地下水通道，可能引发严重渗漏、岩溶塌陷等环境地质问题。

（三）调水沿线土壤盐渍化和水质污染问题

目前，黄淮海平原已经形成比较完善的排水系统，一般情况下不会导致北方灌区土壤盐渍化。但当输水水位高于干渠两侧地下水位时，侧渗作用将抬高沿线地下水水位，改变土壤水分和盐分的运移条件。东线干渠穿过黄淮海冲积平

原东缘，地势低洼，地形平坦，地下水位埋藏浅，矿化度高，土壤地球化学过程以累积为主，是中国盐碱土主要分布地区之一。南水北调后水量平衡将发生重大变化，可能引发次生盐渍化，应采取积极防范措施。

中线和东线方案的黄淮海平原地势平缓、中小地形坡洼交错，排水不畅，地下水埋深较浅，植被覆盖度小，地表水蒸发量大。若灌溉方式不当，导致地下水水位上升，水盐状态改变，可能产生严重的土壤次生盐渍化。

（四）对下游水文情势和航运的影响

中线调水工程需要加高丹江口大坝，从而改变丹江口水库及汉江中下游的水文情势，虽然削减了洪峰流量，有利于中下游的防洪，但却对中下游的生态环境带来一定的负面影响。调水（130～140）$\times 10^8$ m^3 占丹江口坝址断面径流量的 1/3，占汉江流域径流量的 22%，河道水位将下降 0.6～1.0 m，可能引起汉江中下游水文情势变化，汉江中下游出现 1 000～3 000 m^3/s 的天数将减少约 100 d，对汉江下游河道冲淤、水环境容量、航运和沿江引水将产生一定影响。

西线工程初步规划从大渡河、雅砻江、通天河三条河年均调水（120～170）$\times 10^8$ m^3，占这三条河总径流量的 54%～77%，对下游临近引水口河流的侵蚀冲刷将产生一定的影响。

（五）东线南水北调对长江河口环境及水生生物的影响

长江河口宽达 90 km，水域辽阔，水文特性和河床演变复杂，现状环境受径流量大小、潮汛强弱、河道深浅及含盐度高低等因素的综合影响。东线调水 1 000 m^3/s 将改变这些因素的量值及其相互关系，但可能引起盐水入侵、拦门沙增加、渔场变化及水质污染等问题。

东线方案的输水线路流经洪泽湖、南四湖、东平湖等淡水湖泊。调水后，沿线湖泊水位抬高、水深增加，静水或缓流水体变成速流水体，泥沙含量增加，湖水透明度减小，湖中有机物质和营养盐类冲淡，水生植物光合作用减弱，将威胁水生植物的生存，使鱼类饲料减少，进而影响整个水体生态系统。

为了减少跨流域调水工程对自然环境的影响，必须开展大量的基础地质、水文地质、工程地质和环境地质调查与研究。在调水规划区内，优选路线，预测和评价调水工程施工和营运期可能发生的地质环境变化；对调水区、通过区和受水区可能出现的环境地质问题进行分析预测并提出科学合理、经济可行的解决措施。

第二节　城市化与地质环境

城市的发展与其所处的地质环境甚为密切，地质环境是城市社会的载体，其质量的优劣、容量的大小及其变化直接影响着城市社会的发展。良好的地质环

境为城市的发展与繁荣提供了必需的物质基础；恶劣的地质环境制约了城市的发展，甚至毁灭曾经辉煌一时的都市，如中国的楼兰古国被茫茫沙漠埋于地下，意大利的庞培城因火山喷发而在地球上消失。

城市的形成、运转和发展，要求地质环境提供丰富而优质的固体矿产资源、能源、水资源、土地空间以及优美、安全和充满生机的生态环境。反过来，城市建设与发展中的各种工程活动在不断地影响和改造着地质环境，使地质环境原有的物质流和能量流发生改变，甚至引发新的地质作用和现象。城市生态系统显示出人类对自然系统的干预达到了最大限度。城市景观使原有地形发生改变，形成新的地貌景观；同时破坏了自然地质生态系统，形成全新的城市生态系统。城市生态系统的输出，使大量废弃物和污染物质进入到地质环境中。

一、城市生态系统及其特征

城市生态系统是一个综合系统，由自然环境、社会经济和文化科学技术共同组成。它包括作为城市发展基础的房屋建筑和其他设施，以及作为城市主体的居民及其活动。城市在更大程度上属于人工系统。

城市是一个开放系统。它需要从外界获得空气、水、食品以及燃料和其他物质。这些物质在城市中经过集中和利用，一部分成为有用的产品，另一部分成为废水、废气、废渣等有毒有害物质，再返回到城市系统之外（图 7－2）。

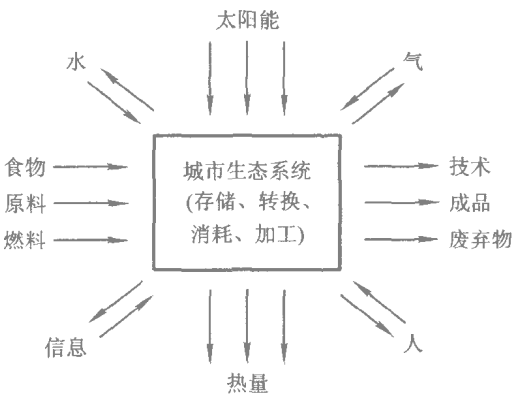


图 7－2　城市生态系统的输入与输出

城市生态系统是在人类参与下创造的新环境，与自然生态系统比较，具有如下几个方面的特征：

（1）城市环境的容量：城市环境容量的大小取决于地理位置制约下的自然环境背景。任一地区的原生天然环境，都是地理位置制约下的各个要素相互影

响、相互制约、共同作用并呈有机统一的产物。城市所处的地理位置（包括其水平与垂直方向），对其环境容量起着决定性作用，如位于向风海岸、山地迎风坡的城市，其自然环境容量必然大于位处内陆、峡谷的城市。不仅如此，这种地理位置制约下的自然环境背景的差异，又使区域环境污染的性质显示出强烈的地区特征。

（2）非生态结构无限扩大：城市生态系统呈“倒金字塔”。人口的急剧增加，要求不断扩大城市用地空间，并加速城市各项功能的运转效率。于是，大规模的建筑集群不断涌现，错综复杂的交通线密如蛛网；混凝土结构物、沥青铺面等迅速增加，最终造成城市地区生态与非生态结构比例发生根本变化，非生态空间实体的构成无限扩大。从而使生产者（绿色植物）的生物量及个体数相应剧减，而同时依赖外来食物供养的人口却按几何级数猛增，导致生产者与消费者（即绿色植物与人口）的结构关系发生倒转，形成“倒”的城市生态系统金字塔。

（3）城市是一个开放系统：城市是一个流量大、容量大、密度高、运转快的巨大开放系统，与环境之间存在着广泛的物质交换和能量转换。城市从环境中输入大量的物质和能量，经过城市活动又向环境输出大量的高强度物质流和能量流。在城市生态系统中，人口、物质、能量、信息、价值都高度密集并迅速转化，输入、转化、输出的功率和效率都很高。

（4）地质作用的重点和强度的差异：不同类型、不同功能的城市，其地质作用的重点和强度存在着很大的差异。例如，山地城市因地形坡度大、建设过程中岩土体的挖填方量大，重力地质作用显著，边坡失稳与水土流失灾害严重；平原城市和滨海城市常因过量抽汲地下水而诱发地面沉降、海水入侵；矿业城市则因开采地下矿产资源，人为改变地应力场、地下水渗流场，形成地下采空区，容易出现地面塌陷、地裂缝、“三废”污染等灾害。在同一城市内，不同城市功能区地质作用的差异也很明显，工业区的地基静荷载和动荷载较强，住宅区主要是生活垃圾对土壤和水体的污染。

与城市化过程相关的环境地质问题很多，如区域地壳稳定性问题、地基稳定性问题、深基坑开挖引起的边坡稳定性问题、水质污染及水资源保护问题、城镇固体废弃物处置问题、城市地质灾害、城市土地利用与规划等。本节主要叙述城市水环境问题、城市地质灾害和城市土地利用问题。

二、城市化与水环境

水对于城市居民以及城市系统内各个行业都是最根本的资源，水资源的利用与处理及其天然作用对城市系统的影响更大。多数大城市因水资源短缺而必须从其他地区调水。把水作为资源使用时，未消耗的部分通常也受到了一定程度的污染，对城市内和城市附近的水体造成危害。在城市化过程中，对水、土资

源的开发利用，必然改变城市所在地区的水环境状况（表 7-4）。

表 7-4 城市化过程的水环境效应

	水土利用情况	产生的水环境效应
城市化初期	清除植被，建造房屋及城市公用设施	蒸发量减少、暴雨径流增大，河流沉积作用增大
	抽取地下水	地下水水位下降
	修建化粪池和污水道	土壤水分增多、地下水位可能上升，附近水井和河流受到污染
城市化中期	大面积建造房屋、清除表土，回填水塘，铺设路面、构筑暗渠	加速地表的侵蚀作用和河流的沉积作用，洪水泛滥、地下水位下降
	未经处理或处理不彻底的污水排入河流和排污水井	河流或水井受污染、鱼类和其他水生动物死亡、下游地区水质恶化
城市化晚期	房屋、街道和建筑成片分布，城市化完成	渗滤作用减小、水位降低，水文循环发生变化
	大量的未经处理的废料排入河流中	污染加剧、水生生物大量死亡，下游地区水质恶化
	浅井因污染而废弃	潜水位上升
	人口增加、新建供水系统，修建水库引水	如果供水来自流域以外，则当地河水的流量会增大
	建设下水道系统及污水处理厂，改善排水系统	从城区排出更多的水，含水层的渗滤回收进一步减弱
	开采深层地下水，增加水的开采量	区域水位降低、地面沉降，水质恶化，滨海地区咸水入侵
	注水回灌，废水回收利用	地下水位升高，有效利用水资源

（一）城市水灾害问题

城市化的结果，使地面不透水面积增加，地表径流增大，地下入渗减小，排水河道流量加大，洪峰到达时间提前，致灾能量增大。同时，由于地下设施增加，城市财产和人口增加，灾害所造成的损失也在不断增加。

随着城市现代化的发展，城市洪涝灾害的内容和模式也有所改变，出现了近代城市灾害问题，如地下交通及生活设施的淹没损失，城市交通网络、电、供水、通讯、信息系统发生故障等问题。

事实上，城市洪涝灾害绝不仅仅指大洪水，更重要的是城市遭受暴雨的自适应能力，因为这才是城市最普遍的水患困扰。由于暴雨强度大、区域性强、城市防洪体系不健全等因素的影响，许多城市在遭受暴雨袭击后常常造成巨大的经济损失。

（二）城市水资源短缺

由于城市人口密度大、工业高度集中，城市生活、工业生产的用水量不断增加，水资源供需矛盾日趋严重。许多城市因超量开采地下水，形成大面积的地下水位下降漏斗，出现区域性地下水位下降。水资源不足已成为城市社会与经济发展的重要制约因素。

中国北方城市、沿海城市缺水早已是十分严峻的问题。由于缺水进而导致大量超采地下水，引起地面沉降，从而又加重了城市的洪涝灾害。沿海城市地区的地下水位降低常造成海水入侵、地下水咸化，这更加剧了沿海城市的水资源紧张局面。

随着城市经济的发展和生活方式的变化，城市需水量逐年递增，水资源供需矛盾将变得更加尖锐。

（三）城市水环境的污染问题

人口集中、工业化程度高的城市，其下游水体常常被污染。污染源是城市生活污水和工业废水、城郊农用化肥和农药，还有受污染的大气降水形成的地表、地下径流。

随着人类活动的加剧，淡水用量急剧增加，排放的废污水量也在不断增加，从而导致环境质量的下降和水质污染。水质受到污染不仅威胁生物的生存，破坏水源，减少可供水量，加剧水资源紧张，而且殃及居民的健康。同时水域的污染也使水域景观恶化，降低了这些城市的旅游开发价值；被污染的水体表面的水热条件也会改变。

根据 1999 年中国水资源公报，全国工业废水（不包括水电直流冷却水）和城镇生活污水年排放总量已从 1949 年的 20 多亿吨增加到 606×10^8 t（工业废水占 67%，生活污水占 33%），而城市污水处理率仅为 14%，工业污水处理达标率也很低，大量未经处理或不达标的废污水直接排入江河湖库水域，造成严重的水污染。全国 700 多条主要河流的水质监测结果表明，在总长 11.4×10^4 km 的评价河段中，Ⅰ、Ⅱ类水只占 30%，Ⅲ类水占 32%。流经城市的河段 64% 为Ⅳ类或劣Ⅴ类水，50% 的城市地下水均不同程度地遭到污染，城市湖泊受到中度污染，有些淡水湖泊水体富营养化严重；在 118 座大城市中约有 98% 的浅层地下水受到不同程度的污染；近岸海域劣Ⅳ类海水占 32%。水污染进一步加剧了部分地区的水资源紧缺状况，每年因水域污染而造成的经济损失约 300 亿元。

（四）城市水环境的保护与水资源合理利用

随着社会经济的不断发展，城市的数量和规模都在不断扩大，城市用水已日益成为严重威胁城市安全及发展的一大问题。解决这一问题必须从两方面着手：一是从技术的角度加强城市规划和建设中的水环境系统规划和管理；二是从经济角度理顺水利工程的投入产出关系，合理利用水资源。

1. 城市防洪

城市防洪主要是防止洪水（外水）和涝水（内水）两项。外水包括上游产生的江河洪水、溃坝洪水、风暴潮、山洪等，对此应当有相应的预报系统和防洪堤、挡潮闸等设施。一般地讲，城市防洪标准应达到能抵抗百年一遇洪水的水平，但随着城市经济的发展，防洪标准也应当进一步提高。就防内水而言，由于忽视了排除内水的基本设施建设，许多城市变成“无雨旱灾、小雨小灾、大雨大灾”的怪城。这是典型的由城市化引起的内涝灾害。目前一些发达国家已开始注意解决这一问题，所采取的措施包括：① 建立完善的雨水系统，保证降雨及时排出市区；②建设大型排水泵站，及时排除低洼地区积水；③ 建设城市蓄水设施，调蓄雨洪。

2. 城市供水

城市附近的各类水体，包括地表水体和地下水体，应当具备城市供水功能，这就要求一定的水量和水质条件。在水量不充沛的地区，应当设立水源保护地，建设水库进行水量调节。同时，针对不同的用水要求进行供水区域划分。生活用水要选择在未被污染或污染不太严重，能满足饮用水要求的上游河段，工业用水可安排在下游河段。

对于城市生活和工业用水管理，还应制定城市水源保护区规划，实行谁收益谁补偿制度，协调上游保护和下游利用之间的关系；制定各行业的用水标准定额，并实行用水定额供应计划，取消居民用水包费制度；加强工业布局和产业结构调整，鼓励节约用水和清洁生产，提高水资源的重复利用率和降低单位产品的用水量；严格控制工业污染和提高森林覆盖面积，以保护或改善水质和水源保护区；提高公众觉悟，选择正确的水资源消费模式，推动公众参与保护水资源的活动和树立节约用水的观念。

3. 城市水环境保护

城市水环境保护首先要求保持城市区域内水体水质清洁，这也是保障城市供水，保持良好生态环境的基本要求。为达到这一要求，必须防止水体污染，城市的污水不能直接排向河道或湖泊，实施污水总量控制和排污许可证制度；完善水环境质量标准；结合旧城改造和新城市建设，完善城市污水管网系统；城市必须建设足够的污水处理厂，提高污水处理的比例；因地制宜选用多种污水处理方法，合理地开发城市污水的多种用途，实现城市污水资源化。

三、城市化与地质灾害

地质灾害是地质环境的一种变异现象。在城市大规模建设活动中，可诱发和激化各种地质灾害，成为对城市发展的潜在的消极的制约因素。

（一）城市地质灾害的特点

城市地质灾害作为“天、地、生、人”大灾害系统的重要子系统，不同灾害互

为因果并相互反馈。各类城市地质灾害都不是孤立存在的，常形成集社会人文、工程技术、自然生态为一体的灾害群。城市地质灾害的特殊性尤其与城市这个特殊地域在社会经济发展中的地位和作用是分不开的。

1. 城市地质灾害的多样性

由于城市是人类对地质环境干扰破坏最严重的地区，不同类型和风险水平的地质灾害广泛分布。如由于人类抽采地下水而出现的地面沉降和地表塌陷；城市固体废弃物堆放对土地和地下水的污染；沿海城市开采地下水而诱发的海水入侵，等等。

2. 城市地质灾害的复杂性

一方面是某种地质灾害的出现常常表现为多种灾因的复杂叠加，即成因多元性；另一方面是一些平常的灾变常会在城市系统中酿成大灾，即灾害的诱发性。以地震为例，它可以诱发城镇河道、水库的洪灾；可以造成地下煤气管道破裂或诱发火灾；地震在山城还会引起滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害。

3. 城市地质灾害的突发性

许多城市地质灾害的出现具有突然性，它们骤然发生、历时短、爆发力强、成灾快、危害大。

4. 灾害破坏的严重性和影响的广泛性

在城市地区，人口和财富相对集中，建筑物密集，工厂林立。一旦发生灾害，就会造成严重的破坏，危及城市建筑和人民生命财产，并对城市的社会经济发展产生巨大而广泛的影响。

5. 城市地质灾害的持续性

城市地质灾害的持续性主要是指主灾后往往伴随发生各种次生灾害。另外，某些地质灾害本身就属于累进性地质灾害，即以缓慢性的物理、化学的变异和迁移为特征的地质灾害，如地面沉降。

（二）城市地质灾害的种类

从广义来讲，凡对城市造成威胁的地质灾害均属城市地质灾害的范畴。由于城市处于陆地上各种类型的地貌单元，所处地质环境条件复杂多样，每一种陆地地质灾害都对其影响范围内的城市造成危害。可以说，城市地质灾害的种类繁多，几乎包含了所有陆地地质灾害类型。

地质灾害的形成是一种动态和具有随机性的过程，多数表现为突发性和难以预见性。在城市范围内各类地质原生灾害与次生灾害造成的破坏是巨大的，这些灾害包括强烈地震、洪水泛滥、泥石流、崩塌、滑坡、水土污染、地面沉降、地表塌陷，以及特殊地基土（软弱土、湿陷土、膨胀土等）在外因作用下转化而成的次生灾害。能够诱发城市地质灾害的环境因素主要有动力地质作用，不同性状的岩土类型、水文地质条件、人类活动等。

四、城市化与土地利用

城市建设、建筑、工业和交通运输的发展需要占用大量的土地。据统计，世界上大城市的面积正以高出人口增长率两倍的速度在不断膨胀之中，而城市多是位于地势较低平的地区，这就使得城市化的发展大量占用农用耕地。据统计，美国每年由于城市和交通建设占用农业用地高达 $100 \times 10^4\ km^2$ ；日本 1960—1970 年间因城市化而失去 7.3% 的耕地。发展中国家也有类似情况，城市的扩张在吞噬着大片良田。

城市用地主要为工业用地、仓储用地、交通运输用地、生活居住用地和绿化用地等五大类。为使城市土地利用合理化，必须进行城市总体规划和土地利用控制。城市土地利用控制主要包括土地利用方式及土地空间安排两个方面，它是与城市规划中功能区用地布局、土地利用现状紧密结合的。土地利用控制的目标是使城市发展与环境保持统一，科学地利用城市日益紧缺的土地资源。

五、城市环境地质研究

城市环境地质研究主要涉及两方面的问题：一是城市选址、规划、建设过程中所遇到的环境地质问题；二是城市建成后及发展过程中因地质环境反馈作用而出现的环境地质问题。在城市环境地质研究中应开展城市环境地质与城市规划协调研究、城市地下空间开发与优化设计环境地质问题研究、高层建筑地基环境地质研究、城市地质环境优化利用与地质环境保护研究、城市水资源与城市可持续发展问题的研究等。

城市环境地质研究的任务是根据城市经济社会发展规划、城市建设总体规划，正确认识城市建成区和规划区的地质环境特征，合理利用城市地质资源，减少城市建设对地质环境的影响，避免或减轻各种潜在地质灾害和工程活动诱发的次生灾害带来的损失，提高城市建设的经济效益；制定合理的土地功能区划，合理开发地下空间，以有效地利用城市土地，提高城市用地的使用率。

第三节　农业活动与地质环境

农业生产与地质环境存在着密切的联系：一方面，土壤是在地质历史时期由表层的岩石圈物质演化而来的，农业生产需要良好的地质环境质量；另一方面，农业活动对土壤系统的改造又造成许多环境地质问题，如土壤污染、土壤环境中微量元素的淋失与重新分配、水资源短缺、富营养化和水土流失等。

一、农业化学化对地质环境的影响

农业活动对环境引起的直接污染主要与农业化学化有关。过量使用肥料，可导致地表水富营养化、地下水中硝酸盐浓度升高、土壤酸化或使温室气体 N_2O 释放量增加。有机废物施用可能引起重金属在土壤中的积累。农业灌溉则可能引起土壤盐渍化和沼泽化。

（一）化肥与环境污染

为了最大限度地提高农作物单位面积产量，大量使用化肥成为现今农业活动的基本特征之一。随着化肥使用量的增加，有机肥与化肥的使用比例逐渐减小，农业非点源营养物质的排放持续上升。为提高农业产量而向土壤中添加的化肥往往多于作物生长所需的营养物，如中国苏南地区的农田氮肥年均使用量为 345 kg/hm^2，是科学施肥量（120～180 kg/hm^2）的两倍左右；磷肥年均使用量为 18 kg/hm^2。施用的氮肥只有 30%～50% 被植物吸收，其余的分别进入大气和水环境中，这在一定程度上加速了太湖水体的富营养化进程。

世界上许多地区因化肥的使用引起了严重的环境问题，如人类的农业活动就彻底改变了氮和磷两种最重要的营养物质的全球自然循环。长期大量施用氮肥会带来一系列的环境问题，如大量使用铵态氮肥，硝化作用产生的酸会使土壤酸性增加；而硝态氮通过食物链进入人体，可在消化系统中被还原成亚硝酸并与人体内的血红素结合影响血液中氧的运输，危害人体健康；流失的氮和磷进入地表水后就会引起湖泊、河流和近海水体的富营养化；水体中硝酸盐含量过高则威胁着饮用水的安全卫生。

磷肥和钾肥施用不当也会引起农田环境污染。氯化钾施入土壤后，溶于水中的钾离子与土壤胶体中的钙离子代换生成氯化钙，氯化钙很容易随水流失，减少土壤钙质，破坏土壤团粒结构，使土壤发生板结，物理性状恶化。水溶性磷肥在土壤溶液中可生成磷酸根离子，与铝、锰、铁、钙等发生反映，形成易于沉淀的铝、锰、铁、钙的磷酸盐类，使土壤的通气性、透水性变差。

为了减少化肥对水体和土壤的污染，必须根据区域农田环境特征和作物需肥规律，确定合理的施肥量和施肥期，加强有机肥（农家肥）与化肥的结合使用，推广科学的施肥方法，提高化肥利用率，减少化肥损失和对环境的污染。

（二）农药与环境污染

缺水、病虫害和杂草丛生是影响农业增产的重要因素。为了提高农作物产量，许多国家通过大量使用农药来减少病虫害和杂草对农作物的危害。据有关资料，20 世纪 40 年代至 80 年代，全球农药使用量几乎每 10 年增长 1 倍，1960、1970、1980 年世界农药的市场价值分别为 8.5 亿、27 亿、116 亿美元。1986 年除莠剂、杀虫剂、杀菌剂的市场价值分别为 0.076 亿、54.5 亿、32.5 亿美元。目前，

中国每年有上百万吨的农药制剂施于农田环境中，遭受农药污染较重的农田土壤约 $13.33 \times 10^6\ hm^2$。

农药是一种主要的环境“三致”物质。由于致畸作用直接危害后代健康，致癌、致突变作用的潜伏期长，潜在毒性对人体健康造成的危害更大，更具有不可逆性。有的化学农药还是主要的环境激素，进入动物和人体内后会干扰内分泌，使生殖机能异常。

农药被喷撒到田间后，可能由风或水传输到周围的空间，在地表水体和土壤中达到足够的浓度而引起毒害，这些农药及其代谢物甚至会迁移到地下水系统，污染饮用水源。研究表明，农药在土壤中的降解半衰期超过 21 天或在水中的溶解度大于 30% 时，极易渗入地下水，造成地下水的污染。某些不易挥发和难于降解的农药残留物则长期储存于土壤中，引起后茬作物危害和粮食污染；或进入农田水系，在水生生物中累积。有机农药在水体中分解会大量消耗水中的溶解氧，形成缺氧环境，影响作物和水生生物的生长。

农药对环境的危害还表现在使用农药后会不同程度地威胁生物多样性，导致生态系统的稳定性下降。使用农药不仅杀死了昆虫，许多有益的传粉昆虫也可能被农药杀死，昆虫的捕食者和寄生者也难逃厄运，因而破坏了原有的自然生态平衡。

为了减少或防止使用农药对环境造成的危害，必须采取虫害的综合控制方法而限制农药的使用量，如使用捕虫机、自然天敌，种植抗虫害品种，实行混作轮作等。同时，还应加强对农药的管理和科学研究，发展高效、低剂量、环境相容性好的农药制剂。

（三）农业废弃物与环境污染

为了调节地温、蓄水保墒和增加作物产量，地膜覆盖栽培技术于 20 世纪 70 年代末被广泛应用于农业生产。地膜使用后约有 20% 残留在土壤中，残片积聚在土壤耕作层和地表，在自然状态下降解缓慢，形成“白色污染”，影响景观。残膜的聚集阻碍土壤毛细管水的运移和大气降水的渗透，使土壤水分、养分和空气的运行受阻，造成土壤板结，对土壤孔隙度、通气性和透水性产生不良影响，导致土壤生产力下降。

此外，作物的秸秆、叶子和根常常被丢弃在田间，用作堆肥或烧掉，这不仅损失了能源，其排放物 CO_2 和 NO_x 还会造成大气污染，甚至对全球温室效应产生一定影响。

二、农业活动对土地资源的破坏

农业生产使土地利用结构发生了很大的变化，如水田改作旱地、部分洼地或水稻田被挖掘为鱼塘等，耕地内部调整过程中流域水系的破坏，使部分河流人工

改道而丧失了原有的生态功能，影响了水系之间的水体和养分交换，降低了水环境容量和对污染物的稀释能力。

不恰当的林业生产则使森林遭受破坏，裸露的土壤直接经受雨水的冲溅和侵蚀，加剧了水土流失的规模和速率，暴雨时常引发洪水，造成水涝灾害。

农业活动对土地资源的破坏主要表现为土壤盐渍化、沙漠化、水土流失、土壤退化、地减少等形式。详见第三章所述。

第四节　人工废弃物处置与地质环境

一、概述

随着世界人口的剧增、城市化进程的加速、现代工业化生产的发展以及人民生活水平的提高，人类对资源的消耗越来越大，由此而产生的各种废弃物日益增多。世界各国每年产生的城市废物约为（$80 \sim 100) \times 10^8$ t，其中，美国每年约产生 2.2×10^8 t 生活垃圾，现有处置场 5 万余处，占地超过 1.18×10^4 km^2.

废弃物主要来源于人类的生产和消费活动，通常是指生产、生活中的废弃物，俗称垃圾。固体废物常指被丢弃的固体和泥状物质，包括从废水、废气中分离出来的固体颗粒物。固体废弃物按其来源可分为：矿业废弃物、工业废弃物、城市废弃物、农业废弃物和放射性废物等五种类型（表 7－5）。

表 7－5　固体废弃物的种类、主要组成物质和来源

种类	主要组成物质	来源
矿业废弃物	废矿石、尾矿、金属、废木、砖瓦灰石等	矿山、选矿
工业废弃物	金属、矿渣、砂石、陶瓷、涂料、绝热和绝缘材料、粘接剂、废木、塑料、橡胶、烟尘等	冶金、交通、机械、金属
	肉类、谷物、果类、蔬菜、烟草等	食品加工
	橡胶、皮革、塑料、纤维、燃料、金属等	橡胶、皮革、塑料
	锯末、碎木、化学药剂、金属填料、塑料等	造纸、木材、印刷
	化学药剂、塑料、橡胶、涂料、沥青、石棉、油毡等	石油化工
	金属、玻璃、木材、塑料、陶瓷、化学药剂、绝缘材料等	电器、仪器仪表
	布头、纤维、塑料、橡胶、金属等	纺织服装
	金属、水泥、石膏、砂石、石棉、纤维等	建筑材料
	炉渣、煤灰、烟灰	电力工业

续表

种类	主要组成物质	来源
城市废弃物	食物垃圾、纸屑、布料、木料、塑料、陶瓷、金属、玻璃、粪便、灰渣、碎砖瓦、废器具等	居民生活
	沥青及其他建筑材料、废汽车、电器等	商业、机关
	碎砖瓦、树叶、废塑料、农药等	市政建设
农业废弃物	秸秆、菜叶、废塑料、农药、禽粪等	农、林、牧
	死禽兽、腐烂鱼虾、污泥等	水产
放射性废物	金属,含放射性废渣、粉尘、污泥、器具、建筑材料等	核工业、核电站、医院

固体废弃物在一定条件下会发生化学、物理或生物的转化，对周围环境产生一定的影响，若处理方法不当，有害物质可通过水、气、土壤、食物链等途径污染环境，进而危害人类的安全。如何科学、妥善地处理、处置日益增多的各类废弃物，使之不对人类生存环境产生危害，已成为当今世界亟待解决的环境问题之一。本节主要讨论城市废弃物与放射性废物的处置对地质环境的影响。

二、城市废弃物处置的环境地质问题

城市人口的增多以及城市居民消费水平的提高，使城市废弃物的排出量急剧增加。然而，堆放和处置场地却在日益减少；加之处理不当所造成的对土壤、地下水的严重污染，加剧了对地质环境和人类健康的危害，成为严重的环境问题。近年来，随着科学技术的发展，很多国家在减少污染、回收利用、科学开发废弃物资源方面取得了丰硕的成果，展现了综合处理、合理利用城市废弃物的美好前景。

（一）城市废弃物的构成

城市废弃物系指城市居民的生活废弃物、商业废弃物、道路扫集物，但不包括建筑废弃物和工业废弃物。城市废弃物包括主要以蔬菜、果皮、煤灰为主的厨房废弃物，以废旧塑料、废旧报纸、废铁制品、废旧电器和家具为主的家庭废弃物，伴随商业活动排出的各种包装纸屑、塑料包装物等商业废弃物，市政维护管理中产生的街道清扫废弃物，等等。

城市废弃物是人类生活必然的副产物，已成为世界各城市面临的一大公害。美国为高消费国家，年产废弃物 2.2×10^{8} t,人均 1t 多,居世界之首;日本年产废弃物 0.4×10^{8} t ,人均 0.4 t;英国年产废弃物 0.15×10^{8} t 据统计,目前中国直接来源于城市居民家庭的生活废弃物年产量达 0.35×10^{8} t,与日本城市废弃物

量接近。

城市废弃物的产量与构成，随着人口数量、居民生活水平、生活习惯、家用燃料结构、工业水平及经济基础等情况不同而异。在工业发达国家的城市废弃物中，废纸、废玻璃、废金属等可回收物品比例较高，而发展中国家的城市废弃物主要为残剩食物、炉灰、街道扫集物等，可回收物品比例较低。与西方发达国家相比，中国城市废弃物构成中有机成分含量少，无机成分含量多（表 7－6）。国外生活废弃物中可燃成分一般均在 50% 以上，如英国为 70%，美国为 60%；而中国生活废弃物中可燃成分所占比例很小。

表 7－6 中国与西方国家城市生活废弃物构成比较 %

国别	厨房	废纸	塑料	炉灰砖瓦	金属	玻璃	其他
美国	27.1	43.8	3.1	3.7	9.1	9.0	5.2
英国	27.0	38.0	2.5	11.0	9.0	9.0	3.5
法国	22.0	34.0	4.0	20.0	8.0	8.0	4.0
荷兰	21.0	25.0	4.0	20.0	3.0	10.0	17.0
瑞士	20.0	45.0	3.0	20.0	5.0	5.0	2.0
日本	18.6	46.2	12.7	–	–	–	16.5
中国	31.0	2.5	1.5	60.5	1.0	2.0	2.5

（二）城市废弃物对地质环境的影响

1. 侵占土地

城市废弃物最明显的危害，就是与人类争夺土地，挤占人类的生存空间。每堆积 1×10^4 t 城市废弃物，约需占地 670 m^2。美国每天产生城市废弃物 60.3×10^4 t，如将其按 3 m 厚堆放或填埋，需占用土地 1.63 km^2。至 20 世纪 90 年代初，全美废弃物填埋场多达 75 000 个。目前，中国现有约 670 座大城市，城市生活垃圾年产量从 1986 年的 $5\ 200\times10^4$ t 猛增到 1996 年的 1.66×10^8 t，增长速度为每年 10%；2000 年，中国累积堆存废弃物量已达 60×10^8 t，占地 5.4×10^8 m^2，占用农田 6.7×10^4 hm^2。

2. 污染土壤和空气

城市废弃物及其浸出液中的有害物质，如重金属铅、铬、铁等滞留在土壤中，会改变土质和土壤结构，使土壤酸化、碱化或硬化；有毒物质在土壤内产生毒质与其他物质反应，可杀灭土壤中的微生物，影响土壤中微生物的活动，使土壤丧失腐解能力，妨碍植物根系生长，最终导致草木不生。这些有害物质还可能被某些植物吸收，通过食物链进入家畜或人体，造成危害（图 7－3）。

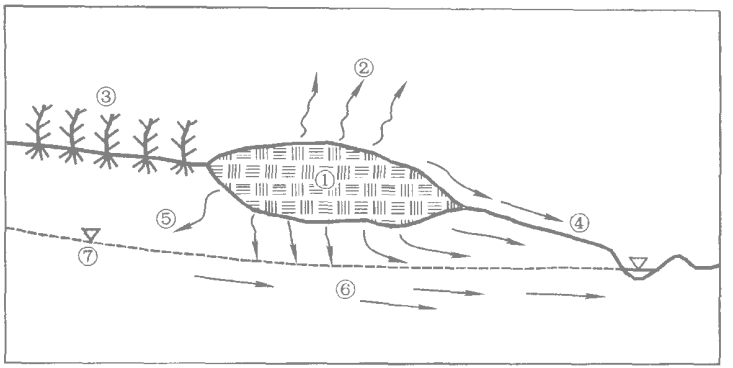


图 7－3　固体废弃物填埋场有害物质进入环境的几种途径

①固体废弃物；②有毒气体向空气中散发；③植物吸收；④地表径流汇集淋滤液；⑤土壤滞留；⑥渗滤进入地下水系统；⑦地下水位

城市废弃物在适宜的温度和湿度下，某些物质被细菌分解，可能释放出恶臭或有害气体，造成空气污染；焚烧可燃废弃物排出的废气也会污染空气；城市废弃物中的细颗粒或粉末状物质，如炉灰、干污泥等随风飞扬到空中，随风吹散，也会污染大气环境，影响人体健康；在废弃物的运输和处理过程中，也会产生有害气体和粉尘，污染大气。

3．污染水体

城市废弃物对地表水体的危害，很大程度上归因于人们直接把城市废弃物倾倒于湖泊、河流沿岸或排水沟渠两侧。这些废弃物受水浸泡，产生多种有害物质，污染水体，恶化水质，影响水生生物的生长。某些河流的变黑发臭，就与人们日复一日地向水中倒废弃物有关。

城市废弃物的露天堆放或土地掩埋是地下水的重要污染源。在一些底部未采取防渗措施的废弃物堆放场地或垃圾填埋场，因大气降水的淋滤而产生的含多种污染物质的液体通过包气带可进入含水层中。当地下水位高于填埋场底部时，垃圾中的有害物质直接被地下径流溶解并带走，造成下游地区地下水的污染；如果地下径流排泄补给地表水，则地表水体亦遭污染。

不同类型土体的地下水渗流速度有很大差别，也影响了有害物质对环境的污染程度。如填埋场边界为封闭完好的页岩或泥岩，因其吸附性好，透水性差，地下水径流非常缓慢，垃圾渗流液很少扩散，故污染范围小。若填埋场边界为渗透性好的砂土或砂质粉土，地下径流速度快，大气降水渗入作用强，垃圾渗流液扩展较快，则污染严重。

一般情况下，污染物质在含水层中随地下水流作横向迁移形成羽状的污染

晕(图 7－4)。污染物的成分视所排放的固体废弃物而异。固体废弃物填埋场一旦对地下水造成污染且没有采取补救措施，污染可延续很长时间，少则几十年，多则几百年。

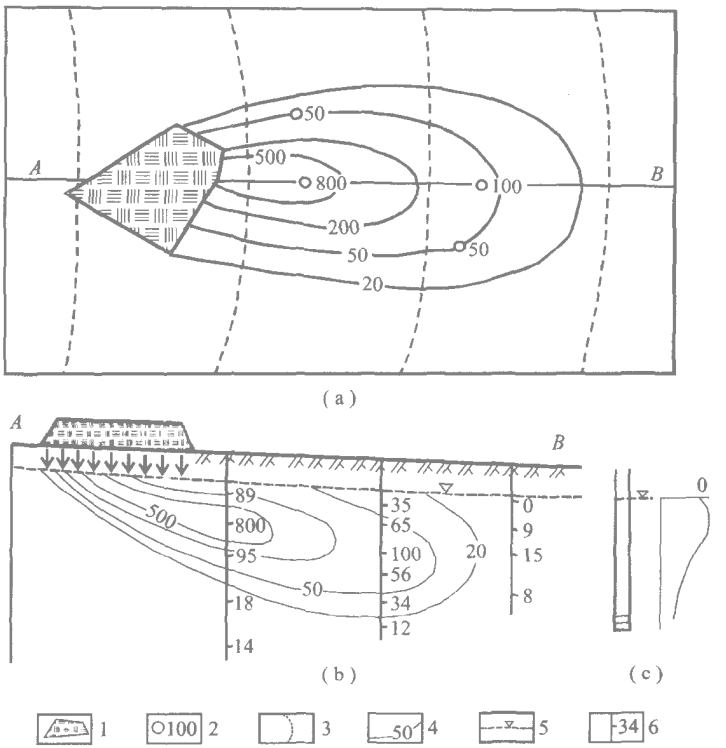


图 7－4　固体废弃物堆下地下水污染分布图

(摘自杨忠耀，环境水文地质学，北京：原子能出版社，1990)

(a) 平面图；(b) 剖面图；(c)沿深图

1. 废弃物堆边界；2. 含水层中的钻孔及微量组分含量；3. 等水位线；4. 污染组分含量 mg/L 等值线；5. 地下水位线；6. 钻孔中取水样地点及指示剂含量(mg/L)

4. 危害人体健康

目前，已确认至少有 20 多种人类疾病是和废弃物污染有关；某些传染性废弃物直接向空气中传播病菌而致人生病。若城市废弃物未经任何无害化处理或处理不当，被污染的土壤和水体可经过食物链对人体健康造成危害；如果食用被污染的蔬菜或饮用被污染的水体，则可能使人感染疾病。

（三）城市废弃物的处置方法

城市固体废弃物经过收集、运输、转运、预处理（压缩、破碎、焚烧、回收利用

等）后，最终需作安全处置，对城市固体废物的处理工艺主要分三类，即破碎压实、焚烧和资源回收再利用。

目前，广泛采用的城市固体废弃物的处置方法主要有：露天填埋法、卫生填埋法、焚烧法、堆肥法、固化法和综合利用法等。前三种处置方法在西方主要发达国家中的废弃物处理率高达 90% 以上。

1. 露天填埋法

露天填埋法是处置固体废物最古老和最普遍的方法，对废物不作任何预处理而将固体废物直接填入溪谷、天然洼地、废弃的卵石坑或采石场，而不进行任何处理。露天填埋法工艺简单，处置成本低廉。

露天填埋法只需用废弃物车把废弃物运出城区、堆放到填埋场即可。有时，就地焚烧一些有机物以减少体积。这种处置方式的缺点是，垃圾易腐烂、发臭，苍蝇、蚊虫滋生，极易造成严重的环境污染。目前发达国家已很少采用这一方法。

2. 高温堆肥法

堆肥作为城市废弃物处理与处置的方法已得到广泛重视。有机废弃物在微生物作用下，发生生物化学反应而降解形成一种类似腐殖质土壤的物质，可作肥料被用来改良土壤。食品废弃物、花园有机废弃物、纸和粪便等均适于堆肥。

堆肥是实现城市垃圾资源化、减量化的一条重要途径。堆肥法有露天堆肥法、快速堆肥法和半快速堆肥法三种，以好氧性建筑为基础的半快速堆肥法得到了很大的发展。

但堆肥法具有堆肥周期长、占地面积大、卫生条件差、肥效低、需要事先分离出无机质废弃物等缺陷。

3. 焚烧法

焚烧法就是利用高温（900～1 000℃）燃烧易燃或惰性残余废弃物。这个温度足以燃烧所有可燃物质，剩下的只有灰尘和不可燃物质。经焚化后未燃尽的垃圾残余通常是无生命的，可用作合适的填料。

在大城市附近，土地资源紧张，一般缺乏废弃物填埋场所，可用焚烧法处理废弃物。废弃物经过燃烧，可以减少体积，便于填埋，还可以消灭各种病原体，把一些有毒有害物质转化为无害物质并可回收热能。近年来，焚烧成为很多国家综合利用废弃物资源所采取的重要手段。它可做到无害排放，从体积（重量）上基本消灭废弃物（焚烧后残灰一般仅为原废弃物体积的 5%～10%），并释放热能。现在，欧美等发达国家正努力开发废弃物新能源，利用废弃物焚烧发电。

就环境保护角度来讲，焚烧处理也存在大气污染问题，焚烧炉排出的有毒气体有氯化氢、硫氧化物、氮氧化物、PCB（多氯联苯）等。所以必须对焚烧尾气进行二次处理。此外，焚烧法的投资总额和操作费用一般高于卫生填埋和堆肥法，

焚烧废弃物时还需要昂贵的费用控制二次污染，维修费用也高。但无论如何，废弃物焚烧发电在开发新能源方面具有十分重要的意义。

4. 土地卫生填埋（城市废弃物地质填埋）

卫生填埋的工程原理是将废物限制在尽可能小的区域内，并进行压缩和分层处置，每层废弃物的表面均用土料覆盖，共同构成一个填筑单元。密实的盖层可有效地阻止昆虫、鼠类和其他动物进入废物填地，隔绝了废物与空气的接触，避免或减少了进入地表水和空气中的污染物质。利用坑洼地填埋城市废弃物，是一种既可处置废弃物，又可覆土造地的环保措施之一。

土地卫生填埋又称为地质填埋，其影响因素包括地形起伏、地下水的位置、降水量、土壤和岩石类型、处置场地位于地表水和地下水系统的位置等。废矿坑、废粘土坑、废采石坑等最适宜填埋处置城市废弃物，但应尽可能靠近生产厂，避开风景区、文物古迹、野生动物保护区；远离活动性断层带、洪水泛滥区、低洼湿地以及滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害多发区。

选定填埋场地时，一般要求填埋场地的水文地质条件为地层渗透性差，区域地下水位低于场地最低处 3 m 以上［图 7－5(a)］好的场址应设在干燥地区,潮湿气候条件下或地下水位较高时，废弃物应埋在地下水位线以上、相对不渗透的粘土层和淤泥土中［图 7－5(b)］，在填埋场底板和最浅部含水层间至少要有 10 m 厚的相对隔水层。由于底部隔水层的存在，几乎没有污染物质的渗滤。

如果废弃物填埋场位于基岩裂隙含水层的水面之上［图 7－5(c)］,当潜水面比较高或隔水层较薄且透水时，则基岩裂隙含水层将会发生大范围地下水污染。若填埋场地下伏有倾斜灰岩含水层，上部覆盖可渗透的砂和碎石土层［图 7－5(d)］，地下水亦可能发生严重污染。而在渗透性很小的页岩分布区，污染程度很小。

为了尽量减少固体废弃物填埋对地下水的污染，在选择填埋场地时，还应考虑如下情况：

(1) 包气带的岩性：包气带为透水性较差的细粒结构，如粘土层、亚粘土层以及裂隙、溶洞不发育的基岩，且要求潜水位埋深较大。这样淋滤的污水不容易渗入地下水中，而且即使有少量的淋滤污水下渗，亦具有足够的净化空间和较强的净化能力。

(2) 应选在地下水补给地表水的河谷地段：应尽量使填埋地点靠近地表水，以使受固体废弃物淋滤而污染的地下水及早向河水排泄，减少对地下水的污染。

(3) 填理场的设置：填埋场不应设在有可能供饮用水的含水层地区。如非设不可，则必须处于地下水水源地下游的一定距离外。

(4) 固体废弃物堆放场底部的铺设：应敷设厚塑料布或人工粘土层，以防止淋滤液下渗；或用钻孔及沟渠收集淋滤液体进行处理后再排入地表水体。

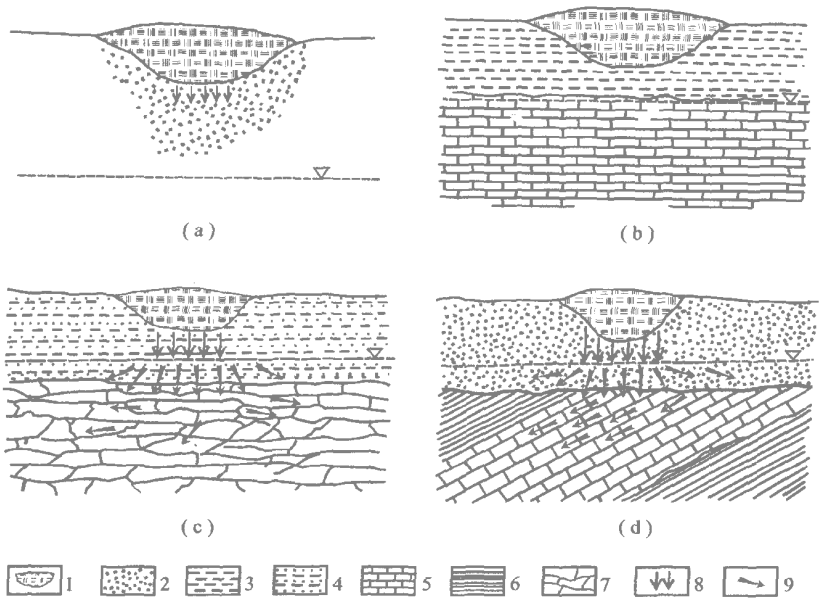


图 7-5　不同环境条件下的固体废弃物填埋场

(a) 干燥环境；(b) 潮湿环境；(c) 位于基岩裂隙含水层之上；(d) 位于灰岩含水层之上

1. 废弃物填埋场；2. 砂砾石层；3. 粘土和淤泥；4 砂页岩；5. 灰岩；6. 页岩；7. 基岩裂隙；8 污染物质淋滤下渗；9. 污染物质在地下水中的运移和弥散

竣工后的卫生填埋场，可用于其他各种用途，包括用作停车场或仓库、花园、公园等，位于山地斜坡或具有一定高差的卫生填埋场，还可开辟为滑雪斜坡、赛车道及其他娱乐设施场地。

5. 综合利用法

综合利用是实现城市废弃物资源化、减量化的重要手段之一。在废弃物排入环境之前进行分类和分离，回收利用可再生的废品，隔离特别有害的组分供特殊处理，既可以循环利用资源、减轻后续处理的负荷，又可以减少污染、保护环境。

垃圾中可回收再利用的废品有废纸、废塑料、废玻璃、废橡胶、废电池、废旧金属等。此外，垃圾中的厨房废物、庭院废物和农贸市场废物等可降解有机物，是生产有机肥料的上好原料。回收利用垃圾中的废弃资源，不但可以减少最终需要无害化处置的垃圾量，减轻对环境的污染，而且能够节约资源、节约能源，减少垃圾的处理处置费用。分离后的可燃废物用来焚烧发电。垃圾资源化是解决城市固体废弃物处置问题的一条重要途径。

（四）城市废弃物地质填埋技术的研究

城市固体废弃物地质填埋具有成本低廉、处置彻底、环保效果好等优点，受到世界各国的普遍采用。地质填埋处置理论、方法和技术的研究受到国内外学者和工程技术人员的广泛重视。

城市垃圾的地质填埋技术主要包括填埋场底部防渗衬垫系统铺设技术、垃圾渗滤液处理技术、垃圾污染环境的生物化学治理技术、填埋场终期开发利用技术及环境影响监测技术等。

目前，国内外学者在城市固体废弃物地质填埋技术上已取得了丰硕的成果，运用物理学、化学、地下水动力学、微生物学、工程地质学等学科的理论和方法，开展了以下几个方面的研究：垃圾场中污染质溶液在场地土体及地下水中的运移规律和物理化学及生物化学作用机理；垃圾填埋场一土壤系统中微生物对污染物在地下水和包气带中的积累、迁移转化、降解和消散的相互作用机理与调控机制；不同衬垫材料对垃圾污染质的净化机理和阻隔能力；垃圾污染土壤和水体环境的生物、化学治理技术和方法；等等。成本低廉、技术可靠、行之有效的填埋场渗滤液处理技术是地质填埋技术的研究重点，也是今后的发展方向。

三、放射性废物处置的环境地质问题

放射性废物是指在处理或操作放射性物料的过程中所产生的具有放射性的废物。具放射性的核废物与一般的化学污染物有显著区别，即核废物的放射性与其化学状态无关。每一种放射性核素都有一定的半衰期，能放射具有一定能量的射线。除了在核反应条件下，任何化学、物理或生化的处理都不能改变放射性核素的这一特性。

（一）放射性废物的种类与特性

1. 放射性废物的种类

放射性废物主要类型有超铀废物、核燃料循环后待处置的放射性废物、已退役的核设施废物、铀选矿厂尾渣等。国际原子能机构根据放射性强度将放射性废物划分为低强度放射性废物（简称低放废物）、中强度放射性废物（简称中放废物）、高强度放射性废物（简称高放废物）三类，亦常称之为微居里级、毫居里级和居里级废物。低放废物包括医疗用的放射性废物、科研实验的放射性废物、铀选矿厂尾渣，以及核燃料循环前几个阶段所产生的放射性废物。高放废物是核燃料循环最后阶段所产生的废物。

高放废物是废弃的核燃料，即燃烧后处理产生的高放废液及其固化体。高放废物的体积虽然不足核燃料循环所产生的放射性废物体积的 1%，但其所含放射性量却超过核燃料循环总放射性量的 99%。高放废物有极强的 β、γ 辐照水平，释热率高，含有较多半衰期长和毒性大的 α 放射性核素。

本书主要论述核燃料循环后产生的放射性废物处置的环境地质问题。

2. 放射性废物的特性

（1）不同程度的放射性：放射性废物中化学元素的原子核能衰变放出具有穿透能力的放射性射线，过量辐射会危害人体健康。

（2）潜在危害期长：放射性废物中通常含多种半衰期长短不一的放射性核素，要使放射性废物衰变到无害的程度，至少要 10～20 个半衰期，即中低放废物要求 300～500 年的安全期，而高放废物至少要求 1 万年的安全期。

（3）强放热性：高放废物的初始温度极高，若不采取冷却措施，就会继续升温乃至处于沸腾状态，产生强大的热量。

（4）较强烈的腐蚀性：放射性废液常呈强酸性或强碱性，对贮存容器及处置场地的岩土体都有较强烈的腐蚀性，且易与岩（土）体中的某些物质反应形成新的有利的或有害的物质。

（二）放射性废物对地质环境的影响

随着核电技术的日臻完善，高效、清洁的核电与火电、水电一起成为全球的三大能源支柱。在许多西方发达国家，核电在电力中占有很大比重。2002 年中国核电总装机容量已达 540×10^4 kW，预计到 2005 年，中国核电发电量将占全国总发电量的 3% 左右。这些核电站在发电的同时也产生了大量的放射性废物。目前中国核电站每年产生 150 t 高放核废物，预计到 2010 年高放核废物的积存量将达到 1 000 t。

放射性废物排入环境后，可造成对大气、水体和土壤的污染。放射性核素可被生物富集，使某些动物、植物，特别是一些水生物体内放射性核素的浓度增高许多倍。放射性废物对人体的危害主要通过放射性核素外辐射和内辐射两个途径。人体浸没在放射性污染的空气环境中，全身和皮肤受到高放废物外辐射产生的危害最大，低放废物对人体的危害主要是通过内辐射引起。一旦受到核辐射，则人体细胞组织、内脏和神经系统将被严重损坏，造成发烧、呕吐、昏迷，甚至突然死亡；超剂量的低强度辐射能引发白血病、肿瘤、癌症等疾病；长期低剂量辐射，短时期内不会出现严重后果，但可引起体内病变，或对下一代产生有害影响。

1. 低放废物对地质环境的影响

（1）排入地表水体的影响：放射性核素排入地表水体后，可造成排放口附近稀释不充分的河段出现放射性污染，这与排污量、浓度、组分和河水条件及排入方式等有关；由于水体底质的强烈吸附沉淀作用，在地表水不超标的情况下水体底质也可能被污染；放射性核素还因生物浓集作用而对水生生物造成污染。

（2）地下排放的影响：放射性废物地下排放的环境影响，决定于其在地下水中的迁移能力，这种迁移能力主要决定于放射性元素的半衰期、岩层透水性、水交替强度、包气带中放射性核素污染晕的分布规律。

中低放射性核废料危害较低，一般情况下，在查清排放处置场地的地质条

件、严格控制排放标准的前提下，低放废物的处置是能够保证卫生安全的。但也应注意下列可能恶化环境的现象：

①放射性地下水在排泄地点溢出到地面上造成对地面水或低地土壤和植物的污染(图 7－6)。

②污染地下水被取水设备（水源井、钻孔等）吸入水源地，影响居民正常供水。应该考虑到由于形成降落漏斗而可能使远离取水设备的水参与补给地下取水。

③含有铀的裂变产物的地下水流污染矿床或采矿巷道。这不仅要考虑正在开采的矿床，而且也要考虑目前虽未开采但有利用前景的矿床。

④在用于排放放射性废液的含水层中造成高压区，污染水可能由此处向上涌出地面或涌入有实用价值的上方含水层中。水的向上涌出可能通过隔水层顶板的人为破坏（修水井、观测孔、勘探孔等）和天然水文地质窗来实现。

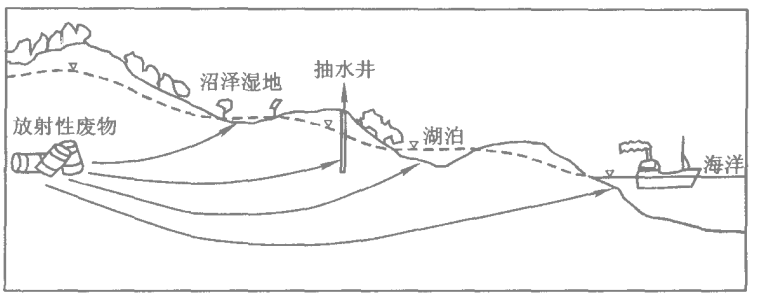


图 7－6　地下放射性废物污染环境的途径

2. 高放废物对地质环境的影响

放射性核素从处置库中的高放废物体转移到人类生活环境，其主要媒介体是地下水。在正常情况下，其动力学过程是极其缓慢的，输运量也微乎其微。因为除了核素本身衰变外，还存在着一系列逆过程，如稀释分散、介质吸附、凝聚、沉淀、矿化、离子交换，等等。造成高放废物处置库破坏的事故可能有火山爆发、地震、断层、冰川、陨石坠落等自然事故和采矿、钻井、地下水汲取、战争等造成的人为事故及废物感生事件造成的事故。但是研究表明，这些事故的风险几率很小($10^{-9}\sim10^{-13}/a$)。当然，由于水文地质情况的复杂性和不确定性、自然事件和人为事件的不确定性，以及人口分布和人们生活习性改变的不确定性，这一几率也存在不确定性。

（三）放射性废物的处置方法

随着和平利用原子能事业的迅猛发展和世界范围内的能源短缺，全球兴建的核电站已达 320 余座(堆)，运行了 5 000 多个堆年。这些运转多年的核电站

里，已产生了大量的放射性废物。目前，放射性废物的处置已成为人们极为关注的问题。

放射性废物处置与处理是两个不同的概念。处理是指针对处置方案对放射性废物进行固化以及固化前的分离、回收、焚化、压缩、包装、运输等一系列环节。放射性废物处置是指将放射性废物永久地封存在适宜的洞穴、地下贮存库或其他场所，通过天然屏障和人工屏障建立起来的多重屏障实现有害物质与外界环境的隔离，保证人类及其生存环境免遭侵袭，对放射性废物实行安全可靠的永久性处置。国际上放射性废物的处置方案构想很多，有宇宙处置、海底沉没处置等。但地质处置是目前世界上最集中研究的处置方案。

1. 放射性废物的处理

放射性废物在安全处置之前，必须根据其性质进行必要的处理。放射性废物处理的目的是尽可能地减少放射性废物的体积（减容），使之适合于运输、处置的过程。

对固体放射性废物，常用的处理方法有：① 用化学药剂擦洗、喷镀或电解法去污；② 切割；③压缩、焚烧、融熔或粉碎；④使用气密性容器如钢桶等封装。

对液体放射性废物主要进行固化处理，即把水泥、沥青、石膏、塑料、水玻璃等凝结剂同放射性废液加以混合进行固化，或在放射性废液中加入硅酸钠、粘土等添加剂烧结固化，使放射性废液成为一种坚硬的、不被浸出的固化体，从而达到稳定化、无害化、减量化的目的。

2. 低放废物的处置方法

低放废物的处置方法多半是存放在地表或埋于地下，具体方法有：①将废物置于地表的混凝土或钢结构容器内或盖有透水性差的粘性土体内存放；②将废物储存在地表以下几米的容器内，用天然土体或者用人工设计的物料回填；③将核废物放置在容器内，埋藏在孔深 10～20 m 的大钻孔内，用膨润土或专用填料回填。

目前，国际上处置中低放射性废物的通用方法是在地面开挖深约 10～20m 的壕沟，修建各种防辐射工程屏障，将密封好的核废料罐放入其中并掩埋，一段时间后，这些废料中的放射性物质就会衰变成对人体无害的物质。这种处置方法的技术已经十分成熟，安全性也有保障。

除上述几种处理方式外，在原联邦德国，曾把低放射性废物埋藏于基本上无水的固体钾盐废矿坑里。由核电站排放出的冷却水有时还排入稀释能力强的地表水体，如大型湖泊、海洋中。

某些放射性废物衰变到很低的放射性强度需要几十年甚至几百年的时间，处置不当或地质条件差仍会造成环境污染。例如，美国 11 个低放废物埋藏地点中，已有 3 个向环境中渗出放射性成分，出现污染地下水的问题；在加拿大主要

铀提炼厂废物的埋藏地点里，发现含有^{226}Ra的淋滤液流出，不得不挖出重埋。

低放废物处置的环境地质条件应满足：① 地震烈度低、地质构造稳定，并与裂隙岩层隔绝；②处置层岩性均匀、分布范围广、厚度大；③ 处置层岩土具有较高的吸附和离子交换能力；④ 没有直接进入生物圈和饮用水含水层的通道；⑤地下水埋深足够大，在几百年内，地下水位变动的上限应位于处置单元底板以下；⑥ 地下水流速非常缓慢，滞后于放射性废物衰变及吸附等引起放射性物质的迁移；⑦ 场址边界与地表水体间的距离大于 500 m、且处于下游方向，不会被百年一遇的洪水淹没。只有在这样的地质环境里，才能保证低放废物不会因地质条件的原因而污染环境。

3. 高放废物的处置方法

低、中水平放射性废物已有比较满意的处理和处置方法，但高放废物能不能安全处置，仍是人们普遍关注的问题。高放废料中含有多种对人体危害极大的高放射性元素。

20 世纪 60 年代以来，世界各国开始研究高放废物的处置方法，目前已经提出了多种处置方案（表 7－7），但现实可行又为各国普遍接受的只有地下深层处置法，如竖井—坑道处置、钻孔处置和竖井）—坑道—大口径钻孔联合处置法。

表 7－7　高放废物处置方案

处置方法		基本思路	可行性
深层地质处置	竖井—巷道—钻孔处置	选择适当地质层在 600～1 000 m 深层开设巷道，适当布置钻孔，将固化体放置在钻孔中（叠堆积）	研究最多，具有实用性、可行性
	超深钻孔深岩层熔融处置	将废物放置在 3～15 km 深的超深钻孔中将高放废物（或高放废液）不经中间储存冷却，直接放入（或注入）深岩层中，利用衰变热使废物和岩石一起熔成固熔体	技术难度大、投资高，尚待评价和研究开发
洋底沉积处置		将废物置于深洋底下沉积层中	IAEA 正组织一些国家的专家研究评价
分离—嬗变（核焚烧）		将锕系核素和长寿命裂变元素从废物中分离出来，送到高能加速器或反应堆中，将其转变成短寿命核素	正在重新评价其风险、代价和利益
冰层处置		将废物埋藏于格陵兰或南极洲冰层底下	国际公约不允许，路途遥远，冰盖演化具不确定性
宇宙处置		将废物送到其他星体上	费用昂贵，风险大

地下深层处置是在一定深度的地壳内建造一个贮存场（库），将放射性废物经包装后永久放置在贮存场（库）内，利用地质体作为处置介质，对放射性废物衰变热吸收和扩散，对核素提供密封，以阻止其迁移、泄漏，进而达到隔离的目的。地下深层处置的屏障分工程屏障（高放废物体、包装容器、外包装、缓冲介质、回填材料和处置库工程构筑物）与天然屏障（基岩和外围土层）两大部分。

竖井一坑道处置法是在地质条件适宜地区，由地表打竖井到深部，然后由竖井底部打水平坑道，并将废物罐堆放在坑道中或由坑道底板打下去的盲竖井或钻孔中。

深钻孔处置是将装有放射性废物的容器放置于数千米乃至上万米的超深钻孔中，由于废物处置部位深，对生物圈影响极小，而且处置技术较简单。

竖井一坑道一大口径钻孔联合处置法就是地下深处的废旧坑道内向下垂直钻进大孔径钻孔，将高放废物罐堆放在大口径钻孔中，利用粘土等回填材料填满剩余的地下处置室空间和通向地面的竖井。这是目前世界各国普遍采用的高放废物的处置方式。典型的实例如美国新墨西哥州东南部盐层中的实验处置库，该库占地 7.7 km^2 ,围绕处置库设有宽约 1.6 km 的地面缓冲带。该库能容纳美国所有商业处理工厂于 2010 年前产生的全部核废物。

放射性废物地下处置库的选址原则：① 地表地形起伏小；②无大断裂、不整合面分布，无垂向节理、断裂，区域地壳稳定性好；③ 处置地层均匀一致，呈水平或近水平产状，有一定厚度和伸展范围；④ 上覆、下伏及侧向岩层能提供较好的附加包容能力；⑤ 处置地层具有较强的离子交换能力和对放射性核素的吸附能力，能有效阻滞放射性废物中泄出的放射性核素和裂变产物等；⑥ 岩层具有良好的物理、化学性质，如低渗透性、热传导性、高密度、高强度等，能及时传导、散失废物的衰变热。此外，还应避免长距离运输，在可能条件下，处置库库址应该尽量靠近废物产生地；所选择的地层应该是低经济价值或无经济价值的，并且不接近有价值的矿产；库址人烟稀少，无开发意义。

根据上述原则，比较适合建地下放射性废物处置库的基岩可选用结晶岩（如花岗岩、玄武岩、凝灰岩、片麻岩、辉长岩等）、蒸发岩（盐岩）、泥质岩（粘土、页岩）等，几种主要的可用作放射性废物处置库的岩石类型及其特点如表 7－8 所示。

表 7－8　可用作放射性废物处置库的岩石类型及其特点

岩石类型	优　　点	缺　　点
岩盐	致密、均质、可塑性强，强度大，放射性核素的阻滞作用强，孔隙度和渗透率极低，热导率较大，具有裂隙自封闭能力，侵蚀能力极小，易于开凿	易发生蠕变、溶解性强，温度增高时热导率降低，吸收辐射线后岩盐结构有变化，液体包裹体能向热源方向移动，是一种有用矿产

续表

岩石类型	优　　点	缺　　点
花岗岩	分布广、规模大、质地均一，强度大，孔隙度小、渗透率低，导热性、热稳定性、抗辐射性较好，裂隙多被次生矿物充填，对放射性核素有滞留作用	存在节理、裂隙，断层带、断裂与裂隙影响岩体的渗透性
玄武岩	非常致密，孔隙度极低，规模大，导热性能好，熔化温度高，强度大	常发育垂直柱状节理，渗透性较强，阻滞核素的迁移能力有限
凝灰质岩	非常致密，孔隙度极低，厚度巨大、分布广泛，强度大，有较强的吸附能力，渗透性较差	
沉积粘土岩	分布广，渗透率小，可塑性及耐热性好，离子交换能力和对核素、裂变产物的吸附能力较强，易保持化学封闭体系	裂隙较发育，岩性不均一，强度低，水文地质条件复杂，不利于建造地下工程，一般出露较浅

注：本表摘自戴塔根等，环境地质学．长沙：中南大学出版社，1999

第八章　地质灾害

第一节　地质灾害概述

一、地质灾害的定义及其内涵

地质灾害是指由于地质作用（自然的、人为的或综合的）使地质环境产生突发的或累进的破坏，并造成人类生命财产损失的现象或事件。人类直接生活和生存在地壳的表面，这里也是地球各圈层相互作用最密切、最强烈和最敏感的部位。地球各圈层在运动变化以及相互作用和影响过程中，将会单独或综合地产生各种地质作用，使地表发生变异。这些变异中有些对人类构成灾害，即地质灾害。地质灾害与气象灾害、生物灾害等一样是自然灾害的一个主要类型，具有突发性、多发性、群发性和渐变影响持久的特点。由于地质灾害往往造成严重的人员伤亡和巨大的经济损失，所以在自然灾害中占有突出的地位。

由地质灾害的定义可知，地质灾害的内涵包括两个方面，即致灾的动力条件和灾害事件的后果。地质灾害是由地质作用产生的，包括内动力地质作用和外动力地质作用。随着人类活动规模的不断扩展，人类对地球表面形态和物质组成正在产生愈来愈大的影响，因此，形成地质灾害的动力条件还包括人为活动对地球表层系统的作用，即人为地质作用。

只有对人类生命财产和生存环境产生影响或破坏的地质事件才是地质灾害。如果某种地质过程仅仅是使地质环境恶化，并没有破坏人类生命财产或影响人类的生产、生活环境，只能称之为灾变。例如，发生在荒无人烟地区的崩塌、滑坡、泥石流，不会造成人类生命财产的损毁，故这类地质事件属于灾变；如果这些崩塌、滑坡、泥石流等地质事件发生在社会经济发达的地区，并造成不同程度的人员伤亡和（或）财产损失，则可称之为灾害。

二、地质灾害的类型及其特征

（一）地质灾害分类

目前对地质灾害的灾种范围有多种不同的认识，大致可分为两种观点：一是把由地质作用引起或地质条件恶化导致的自然灾害都划归为地质灾害，主要包

括地震、火山、崩塌、滑坡、泥石流、地面沉降、地裂缝、土地荒漠化、海水入侵、部分洪水灾害、海岸侵蚀、地下水水位升降、水土环境异常与地方病、矿井突水溃沙、岩爆、煤与瓦斯突出、冻土冻融、水库淤积、水库及河湖塌岸、水库渗漏、特殊土类灾害、冷浸田等近 30 种灾害；二是仅限于以岩石圈自然地质作用为主导因素而形成的自然灾害，主要包括地震、火山、崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地裂缝、海水入侵、特殊土类灾害等十几种。

按不同的原则，地质灾害有多种分类方案。现将一般划分类型叙述如下：

（1）按空间分布状况：地质灾害可分为陆地地质灾害和海洋地质灾害两个系统。陆地地质灾害又分为地面地质灾害和地下地质灾害；海洋地质灾害又分为海底地质灾害和水体地质灾害。

（2）按灾害的发生原因：地质灾害可分为自然动力类型、人为动力类型及复合动力类型。自然动力类型地质灾害可分为内动力亚类和外动力亚类；人为动力类型地质灾害按人类活动的性质还可进一步细分；复合动力类型可分为内外动力复合亚类、人为内动力复合亚类、人为外动力复合亚类。以自然成因为主的地质灾害主要有火山、地震、泥石流、滑坡、崩塌、地裂缝、砂土液化、岩土膨胀、土壤冻融等；由人类活动诱发的地质灾害主要有水土流失、土地沙漠化、土壤盐碱化、地面沉降、地面塌陷、坑道突泥、突水等（表 8－1）。

表 8－1　地质灾害成因类型划分表

类　型	亚　类	灾　害　举　例
自然动力型	内动力亚类	地震、火山、岩爆、瓦斯爆炸、地裂缝等
	外动力亚类	泥石流、滑坡、崩塌、岩溶塌陷、地面沉降、荒漠化等
人为动力型	道路工程	滑坡、崩塌、荒漠化、黄土湿陷等
	水利水电工程	泥石流、滑坡、崩塌、岩溶塌陷、地面沉降、诱发地震等
	矿山工程	地面塌陷、坑道突水、泥石流、诱发地震、煤与瓦斯突出等
	城镇建设	地面沉降、地裂缝、地下水变异等
	农林牧活动	水土流失、荒漠化、与地质因素有关的洪涝灾害等
	海岸港口工程	海底滑坡、岸边侵蚀、海水入侵等
自然与人为动力复合型	内/外动力复合亚类	泥石流、滑坡、崩塌等
	内动力/人为复合亚类	岩爆、瓦斯爆炸、地裂缝、地面沉降等
	外动力/人为复合亚类	泥石流、滑坡、崩塌、水土流失、荒漠化等

注：本表摘自潘懋等．灾害地质学．北京：北京大学出版社，2002

（3）按地质环境或地质体变化的速度不同可划分为突发性和缓慢性地质灾害两类。前者主要有火山、地震、泥石流、滑坡、崩塌等 后者主要有水土流失、土地沙漠化、土壤盐碱化等。

（二）地质灾害特征

尽管地质灾害的类型繁多，产生原因各异，分布广泛，但它们的活动、分布和危害等却有许多共同的特征。

1. 地质灾害的必然性与可防御性

地质灾害是地壳内部能量转移或地壳物质运动引起的。灾害发生后，能量和物质得以调整并达到暂时的、相对的平衡；随着地球的不断运动，新的不平衡又会形成。因此，地质灾害是伴随地球运动而生并与人类共存的必然现象。

然而，人类在地质灾害面前并非无能为力，通过揭示地质灾害的发生机制和分布规律，进行科学的预测预报和采取适当的防治措施，就可以对灾害进行有效的防御，减轻或避免灾害造成的损失。

2. 地质灾害的随机性和周期性

地质灾害是在多种动力作用下形成的，其影响因素更是复杂多样，地质灾害发生的时间、地点和强度等具有很大的不确定性。可以说，地质灾害是复杂的随机事件。

但是，受地质作用周期性规律的影响，地质灾害还表现出周期性特征。如地震活动具有平静期与活跃期之分，泥石流、滑坡和崩塌等地质灾害的发生也具有周期性，表现出明显的季节性规律。

3. 地质灾害的突发性和渐进性

地质灾害的发生和持续时间具有突发性和渐进性的特征，突发性地质灾害具有骤然发生、历时短、爆发力强、成灾快、危害大的特征，如地震、火山、滑坡、崩塌、泥石流等。渐进性地质灾害则发生缓慢，持续时间长，如土地荒漠化、水土流失、地面沉降、煤田自燃等。渐进性地质灾害的危害程度逐步加重，涉及范围广，尤其对生态环境的影响较大，所造成的后果和损失比突发性灾害更为严重，但不会在瞬间摧毁建筑物或造成人员伤亡。

4. 地质灾害的群体性和诱发性

许多地质灾害不是孤立地发生或存在的，前一种灾害的结果可能是后一种灾害的诱因。在某些特定的区域内，地质灾害常常具有群发性的特点。崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝等灾害的群体性和诱发性尤为突出。雨季或强震发生时，常常引发大量的崩塌、滑坡、泥石流或地裂缝灾害。

在泥石流频发区，通常发育有大量潜在的危岩体和滑体，暴雨后极易发生严重的崩塌、滑坡活动，由此形成大量碎屑物融入洪流，进而转化成泥石流灾害。

5. 地质灾害的成因多元性和原地复发

不同类型地质灾害的成因各不相同，大多数地质灾害的成因具有多元性，受气候、地形地貌、地质构造和人为活动等综合因素的制约。

某些地质灾害具有原地复发性，如中国西部川藏公路沿线的古乡冰川泥石流，一年内曾发生泥石流 70 多次，实属罕见。

6. 地质灾害的区域性

地质灾害的形成和发展往往受制于一定的区域条件，因此其空间分布经常呈现出区域性的特点。如中国“南北分区，东西分带，交叉成网”的区域性构造格局对地质灾害的分布起着重要的制约作用，90% 以上的崩塌、滑坡、泥石流灾害发育在第二级地貌阶梯山地及其与第一和第三级阶梯的交接部位；第三阶梯东部平原的地质灾害类型主要为地面沉降、地裂缝、胀缩土等。

7. 地质灾害的破坏性与“建设性”

地质灾害对人类的主导作用是造成多种形式的破坏，但有时地质灾害的发生可对人类产生有益的“建设性”作用。如山区陡峭斜坡地带发生的崩塌、滑坡为人类活动提供了相对平缓的台地，人们在古滑坡台地上居住或种植农作物。

8. 地质灾害影响的复杂性和严重性

地质灾害的发生、发展有其自身复杂的规律，对人类社会经济的影响表现出长久性、复杂性特征：① 重大地质灾害常造成大量的人员伤亡和人口大迁移；②受地质灾害周期性变化的影响，经济发展也相应地表现出一定的周期性特点；③地质灾害地带性分布规律还导致经济发展的地区性不平衡。

9. 地质灾害人为成因的日趋显著性

不合理的人类活动使地质环境日益恶化，导致大量地质灾害的发生。如超量开采地下水引起地面沉降、海水入侵和地下水污染；矿产资源的不合理开采和某些工程项目的盲目上马导致崩塌、滑坡、泥石流等灾害的频发等。

除天然地震和火山喷发外，大多数地质灾害的发生均与人类经济活动有关，全球滑坡灾害的 70% 与人类活动密切相关。单纯人为作用引起的地质灾害数量越来越多，规模越来越大，影响越来越广，经济损失也愈加严重。

10. 地质灾害防治的社会性和迫切性

地质灾害除了造成人员伤亡，破坏房屋、铁路、公路、航道等工程设施，造成直接损失外，还破坏资源和环境，给灾区社会经济发展造成广泛而深刻的影响。因此，有效地防治地质灾害不但对保护灾区人民生命财产安全具有重要的现实意义，而且关系到地区、国家乃至全球的可持续发展。

三、中国地质灾害的空间分布规律

中国地域辽阔，经度和纬度跨度大，自然地理条件复杂，构造运动强烈，故自然地质灾害种类繁多、灾情十分严重。同时，中国又是一个发展中国家，经济发

展对资源开发的依赖程度相对较高，大规模的资源开发和工程建设以及对地质环境保护重视不够，人为地诱发了很多地质灾害，使中国成为世界上地质灾害最为严重的国家之一。

地质灾害的空间分布及其危害程度与地形地貌、地质构造格局、新构造运动的强度与方式、岩土体工程地质类型、水文地质条件、气象水文及植被条件、人类工程活动等有着极为密切的关系；同时又与人类活动有关。受上述诸因素制约，中国地质灾害的区域分布具有东西分区、南北分带的特点，如海拔 4 000 m 以上的青藏高原,寒冻作用普遍,冻胀、融沉、泥流、雪崩等灾害发育 第一级与第二级阶梯地貌过渡地带,地形切割强烈,山地地质灾害,如滑坡、崩塌、泥石流、水土流失等分布广泛，灾度也高；西北诸省土地荒漠化作用强烈；东部平原区除土地盐渍化广泛分布外,地面沉降、岩溶塌陷、地裂缝广泛发育 沿海诸省,海水入侵、海岸侵蚀等强烈发育。

本章只论述内、外动力成因的几种主要地质灾害，人类活动诱发的地质灾害分别在其他相关章节中讨论。

第二节　地震灾害

地震是地壳运动的一种形式。岩石圈物质在地球内动力作用下产生构造活动而发生弹性应变，当应变能量超过岩体强度极限时，就会发生破裂或沿原有的破裂面发生错动滑移，应变能以弹性波的形式突然释放并使地壳振动而发生地震。地下核爆炸、兴建大型水库、地下注水等人类活动也可诱发地震。据统计，全世界每年大约发生几百万次地震，人们能够感觉到的仅占 1% 左右，七级以上的灾害性地震每年多则二十几次，少则三、五次。

强烈地震可使大范围的建筑物瞬间沦为废墟，是一种破坏性很强的地质灾害。地震灾害不仅造成建筑物倒塌而使人类生命财产遭受重大损失，而且还会诱发大规模的砂土液化、崩塌、滑坡和海啸等次生地质灾害；地震的破坏范围有时可扩展到数百公里甚至数千公里之外。

一、地震活动概述

(一)地震波

地震所产生的震动是以弹性波的形式传播出来的，这种弹性波称为地震波。地震时通过地壳岩体在介质内部传播的波称为体波；体波经过折射、反射而沿地面附近传播的波称为面波。面波是体波形成的次生波。

体波包括纵波和横波。纵波又叫疏密波，由介质体积变化而产生，并靠介质的扩张与收缩而传递，质点振动与波的前进方向一致；在某一瞬间沿波的传播方

向形成一疏一密的分布（图 8－1(a)）。纵波振幅小、周期短、速度快，又称为初波（P 波，Primary Wave）；纵波可以在固体介质或液体介质中传播。横波又叫扭动波，是介质性状变化的结果，质点的振动方向与波传播方向互相垂直，各质点间发生周期性的剪切振动（图 8－1(b)）。横波振幅大、周期长、传播速度小，又称为次波（S 波，Secondary Wave）；横波不能通过对剪切变形没有抵抗力的液态介质。

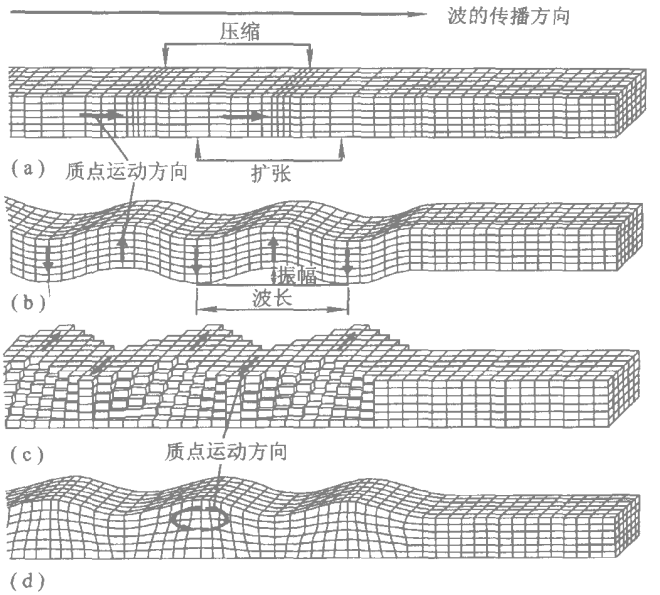


图 8－1　地震波在地表附近传播方式示意图

（摘自 Keith S　Environmental hazards. London：Routledge，1996）

(a) 纵波；(b) 横波；(c) 勒夫波；(d)瑞利波

面波是体波到达地面后激发的次生波。它仅限于地面运动，向地面以下迅速消失。面波分为两种：一种是在地面上作蛇形运动的勒夫波（Love wave），质点在水平面上垂直于波前进方向作水平振动（图 8－1(c)）。勒夫波在层状介质界面传播，其波速介于上下两层介质横波速度之间。另一种是在地面上滚动的瑞利波（Rayleigh wave），质点在与平行传播方向相垂直的平面内作椭圆运动（图 8－1(d)），与 P 波的辐射有关。瑞利波产生的振动使物体发生垂直和水平方向的运动。

（二）地震的类型

按形成原因，地震可分为两大类：天然地震和人为地震。前者主要有构造地

震、火山地震和塌陷地震；后者主要有水库地震、深孔注水地震和爆破地震等。

1. 构造地震

地壳运动过程中，在地壳不同部位受到力的作用，在构造脆弱的部位容易发生破裂和错动而引起地震，这就是构造地震。全球 90% 以上的地震属于构造地震。

2. 火山地震

火山地震主要是由于地下岩浆的冲击或强烈爆炸导致地层的错动引起的。火山地震的特点是震源常局限于火山活动地区，震源深度一般不超过 10 km，地震震级较小，影响范围不大，火山地震数量不多，约占全球地震总数的 7%。

3. 塌陷地震

地面岩溶塌陷或大规模的崩塌、滑坡也能够产生地震，即塌陷地震。在石灰岩分布地区常发育大量的地下溶洞，当溶洞大到难以支撑其顶部岩层的压力时，就发生岩石的崩塌陷落，引发地震。塌陷地震的特点是震源很浅、震级较小，影响范围小，破坏性也很小。

4. 诱发地震

采矿、地下核爆破及水库蓄水或向地下注水等人类活动均可诱发地震。矿山开采过程中，岩体或矿体发生破坏，使内部积聚的弹性能得到迅速释放就会产生地震。大型水库在蓄水后诱发地震的实例在国内外已有很多报道。

（三）地震震级与地震烈度

地震能否使某一地区建筑物受到破坏取决于地震能量的大小和该建筑物区距震中的远近。所以需要有衡量地震能量大小和震动强烈程度的两个指标，即震级（M，magnitude）和烈度（I，intensity）。它们之间虽然具有一定的联系，但却是两个不同的指标。

1. 地震震级

地震震级以地震过程中释放出来的能量总和来衡量，释放出来的能量愈大则震级愈高。由于一次地震释放出来的能量是恒定的，所以在任何地方测定，都只有一个震级。现有记载的地震震级最大为 8.9 级，这是因为地震震级超过8.9时，岩石强度便不能积蓄更大的弹性应变能的缘故。由于地震是地壳能量的释放，震级越高，释放能量越大，积累的时间也越长（表 8－2）。在易发震地区，如美国旧金山及其周围地区，平均一个世纪才可能发生一次强烈的地震。这就是说，大约需要 100 年积累的能量才能超过断层的摩擦阻力。这期间由于局部滑动的结果可能发生小地震，但储存的能量还是能够逐渐积累起来，因为断层的其他地段仍然处于锁定状态。

表 8-2 地震震级和发生的频率以及特有的破坏效应

里氏震级	每年的数量/次	修正的烈度	居住区震动的特有效应
<3.4	800 000	I	只能被仪器记录到
3.5~4.2	30 000	II、III	室内的一些人有感觉
4.3~4.8	4 800	IV	大多数人有感觉,窗户响动
4.9~5.4	1 400	V	每个人均有感觉,盘子跌破,门晃动
5.5~6.1	500	VI、VII	建筑物轻微破坏,墙面破裂,瓦块掉落
6.2~6.9	100	VIII、IX	建筑物破坏较重,烟筒倒塌,房屋脱离基础
7.0~7.3	15	X	严重破坏,桥梁塌落,许多高大建筑物倒塌
7.4~7.9	4	XI	大毁灭,绝大多数建筑物倒塌
>8.0	5~10 年一次	XII	完全破坏,可见地面波动,物体被抛向空中

注 本表摘自 Barbara W M. Dangerous Earth. John Wiley & sons, Inc.,1997

2. 地震烈度

地震烈度是指地面及各类建筑物遭受地震破坏的程度。地震烈度的高低与震级的大小、震源的深浅、震中距离、地震波的传播介质以及地震区地质构造等条件有关。比如，距震中愈远，烈度愈低；震源愈浅，烈度愈大，破坏性愈小。

在地震区把地震烈度相同的点用曲线连接起来，称为等震线。地震的等震线图十分重要，从等震线图中可以看出一次地震的地区烈度分布、震中位置，推断发震断层的方向；利用等震线还可以推算震源深度或用统计方法计算在一定的震中烈度和震源深度情况下的烈度递降的规律。

（四）地震的时空分布规律

1. 地震活动的周期性

大量研究表明，地震的发生具有周期性。即在某一时期内地震的发生特别频繁，地震数量多，地震震级大，表现为地震活跃期。在两个地震活跃期之间，地震数量相对较少，地震震级小，此时为地震平静期。由于世界各地震带的地质构造不同，地壳厚度不一，地幔层内物质运动状态、速度等均有所差异，所以地震形成的过程长短有别。不同地震带的地震活动周期是不一致的。有的几十年，有的上百年。如中国东部地震带（台湾除外）一个周期约 300 年左右，西部地震带约 100~200 年左右，台湾仅为几十年。在一个较长的地震活跃期内还有一些年份存在着一个或数个地震活跃小周期，称为地震活跃幕。

2. 地震活动的空间分布

地震活动的空间分布有垂直分布和地表平面分布两种情况。前者是指震源深度在垂直剖面上的变化规律；后者则是震中在地表的地理位置上的分布规律。

（1）地震的垂直分布：根据震源的深度可把地震分为浅源地震（0～70 km）、中源地震（71～300 km）和深源地震（>300 km）。

①浅源地震分布广泛，发震次数约占全球地震总数的72.5%，释放的能量占全球地震释放总能量的85%。浅源地震的震源深度多在地表以下30km深度范围内。

②中源地震的发震次数约占地震总数的23.5%，释放的能量约占总释放能量的12%。中源地震主要发生在环太平洋地震带和地中海喜马拉雅地震带。

③深源地震约占地震总数的4%，释放能量约占总释放能量的3%。大部分发生在环太平洋地震带。

（2）地震在地表的平面分布：地震特别是浅源地震，其产生多与断层错动有关；全球地震的分布与大地构造密切相关。这些地震集中的地带称为地震带。全球范围内的主要地震带是环太平洋地震带、欧亚地震带（地中海喜马拉雅地震带）、大洋中脊地震带和大陆裂谷地震带（图 8－2）。

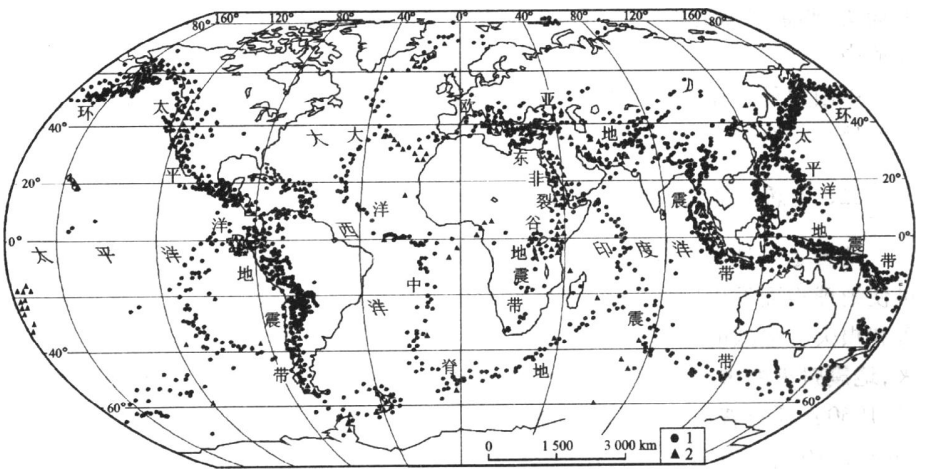


图 8－2　全球地震带分布图

（摘自 Barbara W M. Dangerous earth. John Wiley & sons, Inc.,1997）

①全球约80%的浅源地震、90%的中源地震和几乎全部深源地震都发生在环太平洋地震带，地震释放的能量约占总释放能量的80%。该带沿一系列山脉而行，从美洲南端的合恩角沿西海岸到阿拉斯加向西横跨到亚洲，在亚洲沿太平洋海岸自北向南经日本、菲律宾、新几内亚，最后到达新西兰而构成环路。

②欧亚地震带（或称地中海喜马拉雅地震带）为全球第二大地震带，释放能量约占全球地震能量的15%。震中分布较环太平洋地震带分散，所以该地震带

的宽度大且有分支。它从直布罗陀一直向东伸展到东南亚。此带地震以浅源地震为主，在帕米尔、喜马拉雅分布有中源地震，深源地震主要分布于印尼岛弧。

③大洋中脊地震带主要分布于各大洋的中部地带。这一地震带远离大陆且多为弱震，20 世纪 60 年代海底扩张和板块构造理论的发展才使人们注意到这一地震带。这一地震带的所有地震均产生于岩石圈内，震源深度小于 30km，震级绝大多数小于 5 级。

④大陆裂谷地震带也多发浅源地震，主要发生在东非大裂谷、红海地堑、亚丁湾、死海、贝加尔湖及夏威夷群岛等地区。

上述地震分布绝非偶然，而是在一定的大地构造背景之下的现代构造运动的产物。由于大洋中脊增生、板块俯冲和转换断层等岩石圈运动，才形成了上述有规律分布的全球性地震带。

按地质成因，地震可分为板块增生带地震、转换断层地震和板块汇聚边缘地震。比较而言，稳定的大陆内部则相对宁静。但板块内部环境也能成为大地震的场所，非常强烈的地震偶尔也发生在板块的内部，即正常稳定的大陆板块内部环境中。

中国地处欧亚板块的东南部，位于太平洋板块、欧亚板块、菲律宾海板块的交汇处，从而构成了中国构造活动与地震活动的动力背景。

二、地震活动对人类的影响

地震是一种突发性的地质灾害，对人类及其生存的环境有着巨大的影响，它可使地球表面发生剧烈变化、破坏原有的地形地貌，同时对人类生命财产构成危害和损失。强烈的地震灾害可以把整座城市毁于一旦。仅 20 世纪 60 年代以来，地震毁灭的重要城市就有蒙特港（智利，8.6 级，1960 年）、阿加迪尔（摩洛哥，1960）、斯科普里（南斯拉夫，1963）、安科雷奇（阿拉斯加，1964）、马拉瓜（尼加拉瓜，1972）、唐山（中国，死亡 24.2 万人，1976）、塔巴斯（伊朗，1978）、阿斯南（阿尔及利亚，1980）、亚美尼亚（哥伦比亚，1999）等。20 世纪初以来，因强烈地震已夺去上百万人的生命（表 8－3），造成直接经济损失数千亿元。

（一）地震效应

在地震影响范围内，地壳表层出现的各种震害及破坏现象称为地震效应。对于工程建筑物来说，地震效应大致可分为场地破坏效应和强烈震动效应两个方面，它与场地工程地质条件、震级大小和震中距等因素有关。

1. 场地破坏效应

按形成条件和对建筑物的破坏形式与规模，可将场地破坏效应分为地面破裂效应、斜坡破坏效应和地基基底效应三种基本类型。

表 8－3　20 世纪初以来死亡人数超过千人的灾难性大地震统计表

地　点	震级	死亡人数/人	年.月.日	地　点	震级	死亡人数/人	年.月.日
印度古吉拉特邦	7.9	30 000	2001.1.26	土耳其	6.9	1 300	1983.10.30
萨尔瓦多	7.6	1 500	2001.1.13	也门扎马尔省	6.0	3 000	1982.12.13
台湾中部大地震	7.3	2 405	1999.9.21	伊朗克尔曼省	6.8	3 000	1981.6.11
土耳其伊兹米特市	7.8	17 890	1999.8.17	意大利	7.2	2 735	1980.11.13
哥伦比亚西部	6.0	1 890	1999.1.25	阿尔及利亚	7.3	2 590	1980.10.10
巴布亚新几内亚	7.1	2 100	1998.7.17	伊朗东北部	7.7	25 000	1978.9.16
阿富汗塔哈尔省	7.1	3 000	1998.5.30	中国河北唐山	7.8	242 700	1976.7.28
阿富汗塔哈尔省	6.1	4 500	1998.2.4	危地马拉	7.5	22 778	1976.2.4
伊朗东北部	7.1	1 560	1997.5.10	中国辽宁营口	7.3	1 400 多	1975.2.4
俄罗斯萨哈林岛	7.5	1 989	1995.5.28	秘鲁北部	7.7	70 000	1970.5.31
日本阪神	7.2	6 430	1995.1.17	智利蒙特港	8.6	数千人	1960.5.22
印度	6.4	22 000	1993.9.30	日本		3 770	1948
印度尼西亚	6.8	3 900	1992.12.12	智利奇康	8.3	28 000	1939.1.24
印度	6.1	1 600	1991.10.20	那布勒斯		3 000 多	1930.7.23
阿富汗	6.8	1 200	1991.2.1	中国云南大理	7.1	14 000	1925.3.16
印度尼西亚	7.8	1 620	1990.7.16	日本横滨	8.3	142 800	1923.9.1
伊朗西北部	7.3	50 000	1990.6.21	中国宁夏海原	8.6	18 万	1920.12.16
亚美尼亚西北部	6.9	25 000	1988.12.7	意大利		20 多万	1909.1.2
萨尔瓦多	5.5	1 500	1986.10.10	智利	8.6	20 000	1906.8.16
墨西哥中部	8.1	9500 多	1985.9.19	美国洛杉矶		3 000	1906

注：本表摘自潘懋等. 灾害地质学. 北京：北京大学出版社，2002

（1）**地面破裂效应：地震导致岩土体直接出现断裂或地裂，跨越断裂或断裂**

附近的建筑物及道路、各种管线会因此而发生严重破坏。

（2）斜坡破坏效应：地震导致斜坡岩土体失去稳定，触发各种斜坡变形或破坏，引起斜坡地段的建筑物破坏，称为斜坡破坏效应。因地震而引发的崩塌、滑坡、溜滑等均属斜坡破坏效应。斜坡破坏效应不但对斜坡上的建筑物造成破坏，有时还会破坏斜坡下方的道路及其他建筑物，造成人员伤亡和财产损失。例如，1920年中国宁夏海原地震，在约 $250km^2$ 的范围内发生了大量的黄土崩塌滑坡，死亡 18 万人，其中大部分是由于黄土滑坡和窑洞坍塌所致。

（3）地基基底效应：地基基底效应主要表现为地震使地基岩土体产生振动压密、液化、变形或移位而导致地基承载力下降以至丧失，由此造成建筑物的破坏。地基基底效应可分为以下几种情况：

①地基强烈沉降与不均匀沉降：前者主要发生在软弱土层、疏松砂砾、人工填土等地基中，后者主要发生在地基岩性不同或层厚不同的情况下；

②地基水平滑移：主要发生于斜坡地基；

③砂土地基液化：这是地基失效的常见形式。

2. 强烈地振动破坏效应

地振动破坏效应是反映地震波直接建筑物破坏的现象，包括建筑物的水平滑动、晃动及共振等造成的破坏，这是地震效应中的主要震害，约 95% 的人员伤亡和建筑物破坏是由强烈地振动直接造成的。

（1）地震力对建筑物的作用：地震发生时，由地震波产生的惯性力作为一种荷载作用于建筑物，使建筑物发生变形和破坏。

（2）地震周期对建筑物的影响：建筑物地基受到地震波的冲击而振动，同时引起建筑物的振动。地基土石和建筑物具有各自的振动周期，当两者的振动周期相等或相近时便引起共振，导致建筑物振动的振幅加大，以至建筑物倾倒、破坏。一般来讲，建筑物愈高，自振动周期愈长；所以，长周期的地基振动使较高的多层建筑物破坏，而低层建筑物却无损坏。距震中愈远，地面振动的周期愈长，因而常见到距震中较远处的高层建筑物遭受破坏的现象。

（二）地震灾害

地震灾害按其与地振动关系的密切程度和地震灾害要素的组成可分为原生灾害和次生灾害。地震原生灾害源于地震的原始效应，是地震动直接造成的灾害，如地震时房屋倒塌、地震喷沙冒水等。地震次生灾害泛指由地震运动过程的结果而引起的灾害，如地基失效而引起的建筑物倒塌、地震使水库大坝溃决而发生的洪灾、地震引起斜坡岩土体失稳破坏而造成的灾害、地震海啸引起的水灾等。

1. 地表错动和地裂缝

地震发生时，原有的断层和新生断层活动强烈，常发生垂直与水平错动；在

地面发生断层破裂的地方，建筑物产生裂缝、道路中断、所有位于断层上或跨越断层的地形地貌均被错开。有时地面还会产生规模不同的地裂缝。

2. 破坏地面建筑物

强烈地震可使极震区的房屋荡然无存，烈度 7 度区的房屋倒塌破坏也十分严重。桥梁、水利设施、地下管道、水坝、涵洞等构筑物也遭到严重破坏。1668 年山东郯城 8.5 级地震波及大半个中国，距震中 240 km 的济南，烈度高达 7 度，其破坏性可想而知。

3. 砂土液化

在地震力作用下，饱水沉积物和表土的突然震动或扰动能够使看似坚硬的地面变成液状的流沙，砂粒悬浮于水中，土体完全丧失强度和承载能力。砂水悬浮液在上覆土层压力作用下可冲破土层薄弱部位喷到地表，形成喷砂冒水现象。地震导致的砂土液化往往是区域性的，涌出的砂掩盖农田，压死作物，使沃土盐碱化、砂渍化，同时造成河床、渠道井筒等淤塞。砂土液化还可导致地基失稳，地面沉降，使房屋倾斜、桥梁落架。例如，1975 年 2 月 4 日，中国辽宁省海城发生的 7.3 级地震，震中区以西 25～60 km 的下辽河平原数百平方公里范围内砂土强烈液化，到处喷水冒砂，喷水水头高达 5～6m，总喷砂量达 $817\times10^4 m^3$，压盖农田约 5 100 hm^2，许多道路、桥梁、民用建筑、工业设施、水利工程和堤防遭受破坏。1964 年美国阿拉斯加地震时，砂土液化和诱发滑坡是使安克雷奇大部分地区遭受毁坏的主要原因。1976 年，中国唐山大地震时发生的大面积喷水冒砂现象也是砂土液化引起的。

4. 崩塌、滑坡

在陡峭的斜坡地带，地震震动可能引起表土滑动或陡壁坍塌等地质灾害。美国的阿拉斯加州、加利福尼亚州以及伊朗、土耳其和中国均发生过地震滑坡、地震崩塌灾害。房屋、道路和其他结构物被快速下滑的土石所毁坏。1920 年 10 月 16 日，中国宁夏海原发生的大地震死亡 18 万人，主要是由于黄土滑坡和窑洞坍塌造成的。在强震区的海原、固原和西吉县地震滑坡数量多得无法统计。仅西吉县夏家大路至兴平间 65 km^2 范围内，滑坡面积高达 31 km^2。在会宁、静宁、隆德、靖远四县发生滑坡 503 处。

5. 海啸

地震的另一个次生效应是地震海浪，也称海啸。水下地震是海啸的主要原因。据统计，1900—1983 年，太平洋地区共发生 405 次海啸，其中大多数属于地震海啸。强烈海底地震引起的海啸，可使海浪高达 20～30 m，对船只、海港、海岸及建筑物和生命财产带来巨大的危害（表 8－4）。

表 8－4　全球有历史记录以来的地震海啸

时　间	海啸发源地	波浪爬高/m	产 生 的 影 响
1755.11.1	东大西洋	5～10	葡萄牙的里斯本市遭破坏,从欧洲到西印度洋群岛受影响
1868.8.13	秘鲁—智利	>10	波及新西兰,夏威夷受损
1896.6.15	日本本州	24	约 26 000 万人淹死
1933.3.2	日本本州	>20	3 000 人死于海浪
1946.4.1	阿留申群岛	10	夏威夷希洛岛 150 人淹死,财产损失合 25×10^6 美元
1960.5.23	智利	>10	沿智利海岸 909 人死亡,834 人失踪;日本死亡 120 人
1964.3.28	阿拉斯加	6	加利福尼亚死亡 119 人,财产损失达 104×10^6 美元
1992.12.2	印度尼西亚	26	137 人死亡,村庄被毁
1992.9.2	尼加拉瓜	10	170 人死亡,500 人受伤,1.3 万人无家可归
1998.7.17	巴布亚新几内亚	23	2 100 多人死亡,6 000 人失踪

注：本表摘自潘懋等灾害地质学. 北京：北京大学出版社，2002

1964 年美国阿拉斯加乌尼马克岛附近强烈水下地震引发的海啸波浪以每小时 800 km 的速度沿太平洋传播,4.5 小时后袭击了夏威夷的希洛。虽然在宽阔海域波高只有 1 m，但当遇到陆地时最大波高比正常高潮位高出 18 m。这次地震海啸摧毁了近 500 座房屋，使 1000 多座遭破坏，造成 159 人死亡。另一场由地震引起的毁灭性海啸发生于 1755 年葡萄牙海岸带，仅在里斯本就有 60 000 人死亡。1998 年 7 月 17 日，由于太平洋海底地震而引发的海啸袭击了位于南半球的巴布亚新几内亚，高达 23 m 的海啸波浪冲向巴布亚新几内亚沿岸 29 km 范围的村庄,造成 3 000 多人死亡,6 000 人失踪。

6. 地面标高改变

有时地震还会造成大范围的地面标高改变，诱发地面下沉或岩溶塌陷。1976 年唐山大地震时就有多处岩溶塌陷发生。 1964 年美国阿拉斯加地震时造成从科迪亚克岛到威廉王子海峡约 1 000 km 海岸线发生垂直位移，有的地方地面下沉 2 m 多，而在另外一些地方地面垂直抬升达 11 m。地震诱发的地面下沉属于永久性的地面标高降低，在雨季可能无数次地发生洪水灾害，有时甚至造成永久性的积水。如美国密西西比河田纳西州一侧穿过新马德里的瑞尔弗特

(Reelfoot)湖就是在 1811—1812 年一系列地震发生时因地面沉降引起洪水而形成的。

7. 洪水

洪水是地震的次生灾害，地震诱发的地面下沉、水库大坝溃决或海啸均可发生洪水。1933 年，中国四川叠溪发生的 7.5 级地震，使岷江被堵，形成 4 个地震堰塞湖。45 天后湖水坝体溃决，造成下游水灾，洪水泛滥长达 1 000 km，冲毁农田 3 400 hm^2，房舍无数，淹死 2 万多人。

8. 火灾

火灾是一种比地面运动造成的灾害还要大的次生破坏形式。地面运动使火炉发生移动、煤气管道产生破裂、输电线路松弛，因而引发火灾。地面运动还使输水干线发生破损，扑灭火灾的供水水源也被中断。例如，1906 年 4 月 18 日，美国旧金山 8.3 级地震后引起连续燃烧 3 天的大火，烧毁了 12 km^2 的 521 个街区、28 188 幢房屋，死亡 400 人，损失达 4 亿美元。火灾造成的损失比地震造成的直接损失大 10 倍。许多年后这次地震还被称为“大火”。

此外，地震还可引起煤气泄漏、毒气扩散、造成人畜死亡而引发疾病传播，地震灾区停工停产、灾区社会动荡与不安以及政治、经济、社会和法律职能失调等可看作是地震的衍生灾害，是地震对人类社会长期效应的表现。

三、地震活动的监测与预报

地震灾害是人类面临的最可怕的地质灾害之一。地震预报是地震学研究的重要课题之一。1906 年 4 月美国旧金山地震发生后，科学家们就提出了依据地壳形变观测进行地震预报的观点。但由于人类对地震孕育、前兆异常机理等内在机制的认识还不够深入，地震预报的各种方法都还处于理论探讨阶段。

(一)地震监测

地震监测是地震预报的基础。通过布设测震站点、前兆观测网络及信息传输系统提供基本的地震信息，从而进行地震预报甚至直接传入应急的防灾减灾的指挥决策系统。

目前，全球许多活动断层都处于严密的监测控制之下。监测方法包括动物群异常反应的观察、人工定期水准测量、水井水位变化记录、使用各种精密仪器自动监测断层活动性等（图 8-3），更为先进的地震监测系统是在活动断层区布置自动监测仪器，并通过通讯卫星把数据传递到地震监测中心。

全球范围内几乎所有多地震的国家都已建立了地震监测站网，并形成了全球数字化地震台网(GSN, global seism net)。GSN 是由分布在全世界 80 多个国家总计 128 个台站组成的。目前，中国已在全国主要的地震活动区建立了地震监测系统，建成了北京、上海、成都、昆明、兰州等六个地震数据电信传输台网的

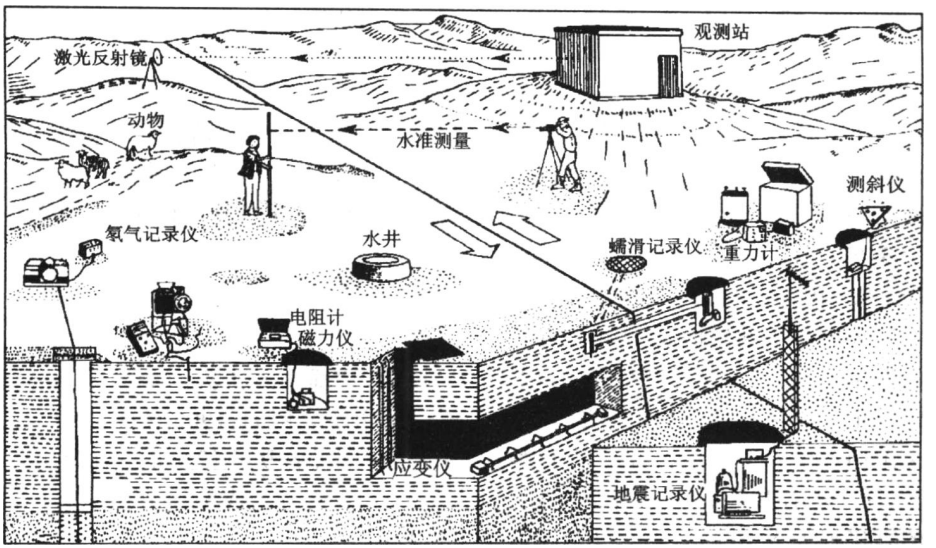


图 8－3　活动断裂带地震活动监测方法综合示意图

（摘自 Keith S. Environmental hazards. London：Routledge，1996）

12 个区域无线遥测地震台网以及 9 个数字化地震台站。现有地震和十余种前兆专业地震监测台站、观测点共计 970 个。

最有前途的地震监测技术包括利用卫星测量地面的微小变化。通过全球定位系统（GPS）、地面接受网追踪地球上空沿轨道运行的卫星传来的测距信号。如果测距信号所反映的从地面站到卫星的距离发生变化，则说明地面产生了位移或变形。地震连续发生时还会产生一种“干涉图”，即反映获得两次雷达影像之间地面变化的等值线图。它具有很高的清晰度，可使地震学家能够深入地认识地壳变形的速率，从而及时发布地震的早期警报。

（二）地震预报

地震预报是指在地震发生前，对未来地震发生的震级、时间和地点进行预测预报，并及时公布于众，让预测受灾区人们做好预防工作，以减少人员伤亡和财产损失。根据时间尺度的不同，可将地震预报分为 5 个阶段，即长期预报、中期预报、短期预报、临震预报和主震后余震预报。

但是，人类的视线还无法穿透厚实的岩层直接观测地球内部发生的变化，因此，地震预报，尤其是短期临震预报始终是困扰世界各国地震学家的一道世界性难题。

1. 预报的主要内容

从广义上讲，地震预报可划分为三个研究内容各异的层次，即地震参数预

报、地震灾害预测和地震灾害损失预测。地震参数预报以地震事件的发生时间、地点和强度三个参数（简称时、空、强三要素）为主，即狭义的地震预报。通过对地震前地震活动、地形变、地磁（电）场、地下水位及其化学成分等的长、中、短、临各阶段前兆变化特征的研究，结合地震地质和深部地球物理场的背景资料，完成对未来地震时、空、强三要素的预报。

按预报的时间长短，地震预报分为长期预测（几年到几十年或更长时间）、中短期预报（几个月到几年）和临震预报（几天之内）。

地震灾害损失预测就是评估潜在地震灾害的损失，预测未来地震灾害中人员伤亡和经济损失。地震灾害损失预测一般以地震灾度来衡量。本章第五节将详细论述地震灾害损失预测问题。

2. 预报方法

地震长期预测是根据构造运动旋回和地震活动周期进行的。在特定区域内未来几年或几十年内地震的预测已经取得了比较满意的成功。地震的中短期预报和临震预报还远未取得成功。其部分原因是地震机制和过程深埋地下，不便于人们进行研究和监测。地震的短临期预报主要基于先兆现象的观察，而先兆现象并不是在所有的地震发生之前都会出现。

地震预报是与地震监测密不可分的。许多单项地震预报方法就是从某一学科出发监测地壳形变、地下流体变动、大地电场、磁场、重力场的异常变化等发展而来的。

（1）大地形变测量旨在测定地壳表面点位之间相对位置的变化，从而以获取地壳形变的信息。地壳形变是地壳运动的一种外部表象，而地震是地壳运动的一种特殊形式。它们之间存在着某种形式的必然联系。

（2）定点形变测量是通过建立形变台站，利用水平摆倾斜仪、石英伸缩仪、水管倾斜仪等形变仪器监测地壳形变的方法监测研究定点形变观测中记录的大量信息，并进行图像类比分析，可作为临震预报的一种方法。

（3）地震孕育过程能引起地壳内部多种地球化学参数的变化。地下水中气体、化学组分的异常变化主要与强震或距离较近的中强地震有关。其中地下水气体组分的变化与强震孕育密切相关。氦和氡异常可以作为地球化学前兆的中长期指标。地下水动态预报地震的方法也在地震监测预报实践中发挥了重要的作用。

（4）地震孕育的过程，也是震源区地下应力、应变缓慢积累的过程。在这一过程中，地电阻率、地下岩石磁性等也会发生相应的改变。因此，观测地应力变化、地应变异常以及地壳介质电性参数和磁性参数的变化过程，并研究其与地震的关系，以实现地震预报。

（5）在各单项预报研究的基础上，应用现有的震例经验和现阶段对孕震过

程的理论认识，研究在地震孕育、发生过程中各种地球物理、地球化学、空间环境等多种异常现象之间的关联与组合，及其与孕震过程的内在联系，综合判定震情并进行地震预报。

（6）除上述各种技术方法外，有时通过观察动物的异常行为也能预报地震。许多动物在大地震发生前行为特别反常，如动物园里一向安静的熊猫高声尖叫、天鹅拒绝靠近水、蛇不进洞等，成群结队的老鼠在大街上奔跑而不惧怕行人。

随着科学的不断发展，计算机技术的飞速前进，计算机在地震综合预报中的广泛应用成为发展的必然趋势。此外，研制高精度的地震监测仪器、多学科联合攻关综合预报、充分利用遥感技术、空间定位系统等现代高新技术也是地震预报的必由之路。

第三节　火山喷发灾害

火山喷发是一种危害严重的地质灾害。公元 1000 年以来，全球已有几十万人直接或间接死于火山喷发。大规模的火山喷发还对人类赖以生存的自然环境造成不可估量的破坏和影响。目前，全球近 1/10 的人口生活于有潜在喷发危险的火山阴影之下，而世界上大部分最危险的火山都处于人口稠密的发展中国家。火山喷发的危险性和减轻火山灾害的迫切性与重要性已引起世界各国的关注。

一、火山活动概述

地球具有明显的圈层结构，从地表向地心由地壳、地幔和地核三部分组成。莫霍面以下地幔层的上部是由近似橄榄岩的物质组成的，镁、铁成分较多，压力大、密度高，局部呈熔融状态。地壳运动、岩浆活动和火山喷发活动均与此圈有关。在地球内力作用下，地幔物质在不停地运动，当岩浆中的气体游离出来，越集越多，使内压力不断增大，达到一定极限时，岩浆就顺地壳裂隙或薄弱的地带喷出地表，形成火山喷发。火山活动是岩浆活动的一种形式，也是地球内能和热量释放的一种形式。

（一）火山的类型与喷发样式

1. 火山的类型

根据火山活动的状况可分为死火山、休眠火山和活火山三种。在地质历史时期有过活动，而在人类历史中没有活动的火山称为死火山，它对人类不会造成危害。在人类历史时期曾经有过活动，而近代长期没有活动的火山称休眠火山。现在仍在活动或周期性活动的火山称活火山，它对人类具有极大的危害性。

火山喷发的时间长短、规模和危害程度不尽相同。喷发酸性熔岩（如流纹岩)的火山,因熔岩粘性大,所含气体多,爆发力强,常喷出大量气体、熔岩、火山

碎屑物和火山灰，这种火山称爆炸式火山。它破坏性大，对人类危害严重。喷发基性熔岩（如玄武岩）为主的火山，其熔岩粘性小，温度高，气体和岩流常慢慢逸出，很少产生火山碎屑物，称宁静式火山。这种火山对人类危害相对较小。

2. 火山喷发样式

对火山喷发进行严格分类难度很大。在绝大多数喷发事件中，活动类型和火山喷出物的性质都在变化，有时是逐渐的（几周、几个月或几年），有时每隔一天甚至一小时就发生变化。尽管如此，根据喷发样式、喷出物种类以及火山堆积物和火山地形可把火山喷发分为中心式喷发和裂隙式喷发两大类若干亚类，其中中心式喷发的亚类比裂隙式要多（图 8－4）。

中心式喷发和裂隙式喷发的明显区别是前者多为爆炸式火山，后者多为宁静式火山。爆炸式火山如 1980 年华盛顿州的圣海伦斯（Mount St. Helens）火山喷发、1982 年墨西哥的埃尔奇乔恩（El Chichon）火山喷发和 1991 年菲律宾的皮纳图博（Pinatubo）火山喷发，均造成严重的生命和财产损失。宁静式火山喷发比猛烈的爆炸式喷发相对安全，美国夏威夷群岛的火山喷发多为宁静式。

（二）火山喷发物

爆炸式火山喷发时，首先喷出黑色气体烟柱，然后喷出大量围岩碎块及熔岩物质，降落在周围地区；最后冒出灼热熔岩，沿山坡向下流动。火山喷发停止后，还会有残余气体喷出和温泉涌现。而宁静式火山很少喷出烟柱和固体碎屑，只溢出灼热的熔岩流。

1. 气体喷发物

气体喷发物中，水汽比例很大，约占 60% ～90% ；其他成分主要有 H_2S、SO_2、CO_2、HF、HCl、NaCl、NH_4Cl 等。它们可形成各种矿产而为人类所利用。

2. 液体喷发物

液体喷发物主要是熔岩流，熔岩流的流动性随二氧化硅的增加而减弱，基性熔岩粘度小、易于流动，酸性熔岩则不易流动；狭长带状长度可达数十公里；熔岩被可由几平方公里到上万平方公里，如印度德干高原玄武岩熔岩被，面积达 $6 \times 10^4\ km^2$；熔岩呈短而厚的穹隆状。

3. 固体喷发物

由围岩碎块和熔岩块组成，总称火山碎屑物。主要有火山灰、火山渣和火山弹。

（三）火山的空间分布

火山活动主要与上地幔物质运动有关，同时也与地壳运动和地质构造有关。火山主要分布在地壳厚度薄、构造活动剧烈的地区。目前，全世界死火山约有 2 000 余座，活火山 850 座。从总体看，它们的分布有一定的规律性。

全球火山分布与地震带分布基本一致（图 8－2），主要的火山带有环太平洋

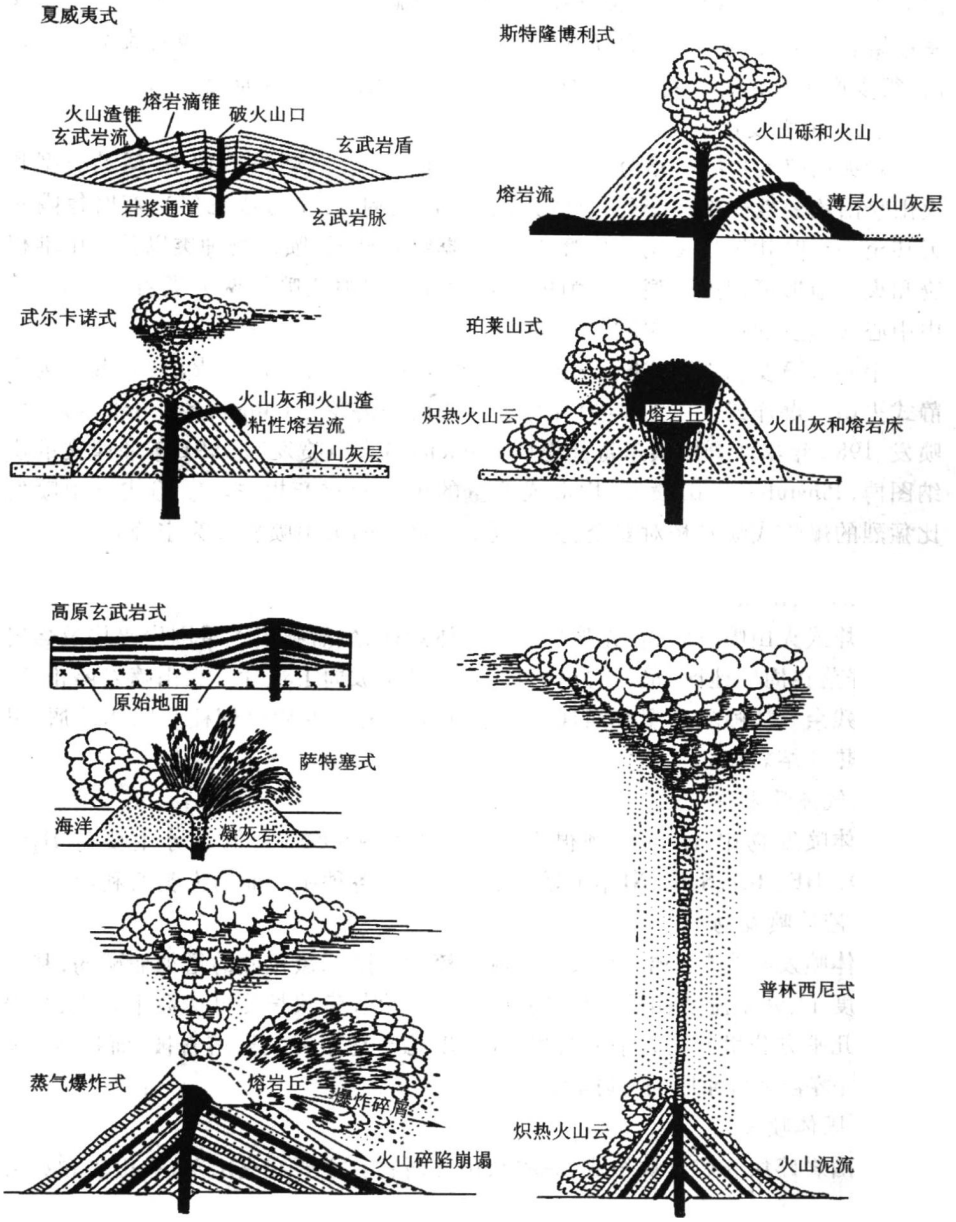


图 8－4　火山喷发样式图

（摘自 Alwyn S. Volcanoes. UCL press Limited，1994）

火山带、地中海火山带、大西洋海底隆起火山带和东非大裂谷火山带。到目前为

止，中国已发现的火山锥约 660 座，其中绝大部分是第四纪死火山，近代还活动的火山很少，中国近代火山主要分布东北环蒙古高原区域、西南青藏高原区域和东部环太平洋西岸区域。

二、火山喷发对人类的影响

火山喷发对人类赖以生存的地球环境的影响可产生两种效应，即灾害效应和资源效应。火山喷发灾害可分为直接灾害和间接灾害两种类型（表 8－5）。任何一次火山喷发都可能产生多重灾害。火山喷发的直接灾害与喷发物质的性质密切相关。次生灾害中，火山泥流、大气影响（振动波和放电）、岩浆活动引起的地震和地面位移虽然比较普遍，但破坏程度较低。就人员伤亡而言，海啸和因喷发引起的饥荒与疾病对人类造成的灾难巨大（表 8－6）。

表 8－5 火山喷发的环境效应

灾害效应		资源效应
原生灾害效应	次生灾害效应	
火山地震灾害	气候效应	矿产资源
熔岩流灾害	火山喷发物滑坡	景观资源
火山碎屑流灾害	次生碎屑流、火山泥流	地热
水汽爆炸	洪水、海啸	矿泉水
有毒气体逸散	酸雨	宝玉石
火山喷发物降落	大气冲击波	
侧翼定向爆炸	喷发后造成的饥荒与疾病	
地面运动	地面变形	

表 8－6 公元 1800 年以来死亡千人以上的火山灾害

火山	国家	年份/a	死亡的直接原因			
			碎屑物喷发	泥流	海啸	饥荒
马尤恩	菲律宾	1814	1 200			
坦博拉	印度尼西亚	1815	12 000			80 000
伽伦甘哥	印度尼西亚	1822	1 500	4 000		
马尤恩	菲律宾	1825		1 500		
阿乌	印度尼西亚	1826		3 000		

续表

火山	国家	年份/a	死亡的直接原因			
			碎屑物喷发	泥流	海啸	饥荒
科托帕希	厄瓜多尔	1877		1 000		
科拉克托	印度尼西亚	1883			36 417	
阿乌	印度尼西亚	1856		3 000		
阿乌	印度尼西亚	1892		1 532		
苏弗里埃尔	圣文森特	1902	1 565			
珀莱山	马提尼克	1902	29 000			
圣玛丽亚	危地马拉	1902	6 000			
塔尔	菲律宾	1911	1 332			
克卢特	印度尼西亚	1919		5 510		
默拉皮	印度尼西亚	1930	1 300			
拉明顿	巴布亚新几内亚	1951	2 942			
阿贡	印度尼西亚	1963	1 900			
埃尔希琼	墨西哥	1982	2 000			
鲁伊斯	哥伦比亚	1985		23 000		

（据 Barbara W M 等,1997;Verstappen H T 等,1989 编制）

（一）火山喷发灾害

火山喷发活动的威力是巨大的，其破坏性也是严重的。火山活动的危害表现为两个方面：一是破坏人类的生存环境，二是直接造成人类生命财产的损失。

1. 火山熔岩流灾害

大规模熔岩流是宁静式喷发火山的特征，熔岩流对人类的危害程度主要取决于熔岩流的规模、流速、火山口外壁斜坡坡度和熔岩流的粘滞性。熔岩流的规模越大、流速越快、火山斜坡坡度越陡、熔岩流流体的粘滞性越小，危害就越严重。1783 年冰岛的拉基(Laki）火山喷发，沿 24 km 长的裂隙带同时喷出无数的“熔岩喷泉”,时间长达 5 个多月。熔岩覆盖面积达 565 km^2，涌出的熔岩体积估计在 12.3×10^9 m^3 左右。这是有史以来最大的一次熔岩流。它掩埋了 14 个农庄,并使另外 30 多个农庄遭到了重创。熔岩流摧毁了房屋和农作物，烧死了牲畜，覆盖了田野，并使占当时人口总数 22% 的人在随后的饥荒中死亡。 1944 年 6 月墨西哥帕里库廷火山毁灭了帕里库廷村和圣胡安 · 德帕兰格里库提诺市，500 余人葬身于熔岩流，昔日繁华的城市只剩下教堂的尖顶尚未被熔岩流淹没。

2. 火山碎屑流灾害

火山碎屑流灾害，称为火山碎屑流，这是火山喷发最具毁灭性的灾害形式之一。火山碎屑流能量大、流速快，可从火山口流到 100 km 外或更远的地方，流动速度可达 700 km/h 以上。在相当短的时间内，火山碎屑流可摧毁火山口周围附近方圆几千米甚至上百千米范围内的森林、村庄、桥梁及建筑物等，使火山口附近居民的生命财产安全受到严重威胁。20 世纪最具破坏性（按死亡人数算）的火山碎屑物流是 1902 年发生在马提尼克的加勒比岛珀莱山（Mount Pelee）火山喷发。在这次喷发中，热火山灰崩塌沿帕莱山侧面以约 160 km/h 的速度向下冲去，瞬间掩埋了圣皮尔(St. Pierre)市,造成 29 000 人死亡。

3. 火山喷发物降落造成的灾害

大规模的火山喷发将火山碎屑（火山集块、火山角砾、火山弹）及火山灰抛向空中，当这些物质降落时就会掩埋、破坏地面建筑、森林及动植物，甚至危害人的生命。在 1902 年危地马拉的圣玛丽亚火山喷发中，降落的火山灰堆积厚度达到 200 mm，致使许多房屋屋顶塌落，从而造成 6 000 多人丧生。然而，火山碎屑喷发造成的灾害大多数是由火山灰的大范围降落造成的。1991 年 6 月菲律宾皮纳图博火山爆发后，由于火山周围方圆 30 km 范围内的农田都被火山灰所覆盖,约 100 万人的生活受到了影响。

4. 火山地震灾害

火山喷发往往伴随着地震。喷发之前常常出现局部地震，它们可能是由于岩浆房膨胀造成裂隙张开和滑动而引起的。美国的圣海伦斯火山（1980）和菲律宾的皮纳图博火山（1991）大喷发前夕，每天都记录到几百次小地震。公元 79 年维苏威火山喷发的地震前奏持续了 16 年。有时地震活动与喷发同时进行，有时喷发开始后地震就停止了。地震活动可能持续几天或几周，长者可能持续几个月甚至几年。强烈的火山地震可导致房屋倒塌，危及人们的生命安全。

5. 有毒气体逸散

许多火山通过喷气孔或间歇喷泉在不同程度上连续喷发气体。虽然水蒸气是火山喷发的主要气体，但火山气体中也含有其他气体，其中大多数可能对人类、动物或植物有害。1986 年 8 月 21 日晚 9:30 左右，伴随着大量的气体从喀麦隆的尼奥斯火山口湖中冒出，并迅速向邻近的山谷蔓延。这股高密度的气体“烟流”厚度约为 50 m，运动速度达到 72 km/h。贴近地面的气体烟云向外扩展了 25 km 四个村庄笼罩在烟云之下，当地的居民首先感到疲乏、头晕、闷热和精神混乱，然后便失去了知觉。这次事件使约 1 740 人窒息而亡，另有 8 300 头左右的牲畜死亡，鸟类、昆虫和其他任何动物都未能幸免一死。

6. 火山喷发对气候的影响

火山喷发对全球气候变化起着重要的作用。气候效应主要是由于火山喷发

期间火山灰和颗粒非常细的悬浮物质进入平流层而产生的。火山碎屑物和富硫气体通过阻挡太阳光的入射能量使太阳直接辐射显著减少，或使太阳光在空中的散射辐射增加，或者吸收太阳光以及热辐射，从总体上造成太阳总辐射减少，使大气透明度显著降低，致使地表温度在火山喷发后的相当一段时间（一般 1 ~ 3 年）内明显降低。这就是人们通常所说的“阳伞效应”或“火山冬天”效应。如果火山喷出的气体以 CO_2 为主，其温室效应可能与火山灰尘粒的“阳伞效应”相互抵消，或者使火山喷发后的一段时间内地表温度升高。菲律宾的皮纳图博火山于 1991 年 6 月 2 日爆发后,大约 8 km^3 多的细粒火山碎屑物质和富硫气体冲入 35 km 高的大气层，火山灰覆盖面积达数千平方公里，引起长达 2 年多的全球气温明显变冷。

7. 火山泥流

火山喷发时熔岩流的逸出和火山碎屑物质的积聚使火山山体斜坡荷载加重、坡度变陡而造成不稳定因素，最终可能导致火山斜坡物质发生块体运动而成为灾害性事件。雨水或山顶冰雪融水能够疏松堆积在陡峭火山斜坡上的火山碎屑，从而引发可怕的泥流。

火山泥流流速快、能量大、成分复杂，是一种破坏力极大的流体，可毁坏其所流经地区的农作物、森林、桥梁及建筑物等，给人类社会造成极大的破坏。1919 年发生在爪哇的凯鲁特（Kelut）火山喷发，在不到一个小时的时间内摧毁了 130 km^2 的农田,同时使大约 5 500 人丧生。

8. 洪水

在山谷外的低洼地区外，火山灰的堆积可导致河流洪水泛滥，尤其是在易遭受热带飓风和季雨的国家。火山碎屑物阻碍了降水的入渗，从而使地表水径流量剧增，同时火山碎屑物填充河谷又使河流降低了泄洪能力。洪水伴随火山喷发或先于火山喷发进而引发泥流的现象很常见。山顶火山口湖的破裂也可能引起洪水。埋在永久冰盖下面的火山使融化的水在地下积聚，最终以冰爆形式喷出而形成洪水。河流被熔岩流或火山泥流堵塞也可导致洪水发生。

9. 海啸

强烈的水下喷发可能产生巨大的海浪，就是海啸。1883 年 8 月 27 日的夜晚，印度尼西亚的科拉克托（Krakatau）火山喷发引起一系列巨大的海浪，淹没了附近的海岸带。当 6 km^3 的岩浆喷出时，直径约 8 km 的破火山口发生坍塌并滑入水下 200 多米深处，由此而引发了至少三次大海啸和一系列较小的海啸，波浪高出正常海面 40 多米。重达十几吨的轮船被海浪带到距离岸边 2.5 km、高出海平面 24 m 的内陆；船上水手有 28 人被淹死。这次火山灾害造成 36 417 人死亡，其中绝大多数是被淹死的，沿岸 165 个村庄被毁。

10. 饥荒和疾病

火山喷发物降落地面后常常掩盖农田、摧毁庄稼并进而引起饥荒。1815 年坦博拉火山的大规模喷发不仅使 12 000 多人当场死亡，降落的火山灰还毁坏了印度尼西亚大片的农田，造成另外 80 000 多人死于火山喷发后的饥荒和疾病。

（二）火山活动的益处

同大多数地质灾害不同的是，火山喷发还为人类提供了一定的可以开发利用的资源。火山活动在对人类造成种种危害的同时，也给地球环境和人类带来许多好处。从地球演化的角度看，各个地史时期火山活动所产生的效益远远超过它所造成的灾害。

（1）火山喷发活动产生了地球大气圈和水圈：现代大气圈和水圈是地球构造的最外部两个圈层。它们的形成要归功于地史时期的火山喷发活动。

（2）火山物质是地壳的基本组成成分：沉积岩和变质岩都是由岩浆岩经过内外力地质作用演变而来的。火山喷发后沉降下来的火山灰是有效的天然肥料，特别是当它们富含钾、磷和其他基本元素时更是这样。

（3）金矿、银矿、铜矿等内生矿产均与火山活动有关，许多重要的宝玉石资源基本上都与火山作用有着直接或间接的联系，如与火山期后热液作用有关的欧泊、紫晶、玛瑙、鸡血石、寿山石等。天然硫矿床、石棉、硅藻土等非金属矿床也是火山活动的产物，火山灰、浮岩等是很好的建筑材料，玄武质熔岩是用途广泛的石材。

（4）火山活动为人类提供了大量的地热资源：意大利能源需求的 1/3、新西兰能源需求的 10% 都是由地热资源提供的，冰岛雷克雅未克居民的热水供应，几乎都是由地下热水提供的。火山活动强烈地区通常也是温泉和矿泉密集分布的地区，中国的长白山、五大连池、内蒙古阿尔山、云南腾冲及台湾等地都是温泉集中地。

（5）火山地貌常常可以形成重要的风景资源：许多国家公园都是以火山为中心的，如埃特纳、富士山等。中国的五大连池、天池、腾冲等地也是风景美丽、引人入胜的旅游地。

三、火山活动的监测与预报

（一）火山活动的前兆现象

火山活动常伴随着地下热过程、区域应力场变化和火山物质的迁移等，火山喷发之前必然在火山地区出现各种环境异常变化。火山喷发前可能观察到的各种物理和化学异常现象如图 8－5 所示。但是，并非所有这些现象在每一次火山喷发前都表现出来。

（二）火山活动监测

系统的火山监测工作始于 20 世纪初，1912 年夏威夷火山观测台（VHO）在



图 8－5　火山喷发前兆现象分类框图

（摘自潘懋等．灾害地质学．北京：北京大学出版社，2002）

基拉韦厄破火山口北缘建立。目前，美国、日本、意大利、法国、英国等火山活动多的国家都建立了较为系统的火山监测站。

目前在火山的地球物理和地球化学监测中，地震和地形变是最广泛使用的常规监测方法。地磁、地电、重力、遥感和热辐射等方法经常用于火山活动监测。多种手段的综合监测和系统分析对于预测火山喷发具有重要的意义。

1．地震定位

利用控制爆炸法在火山的一个侧面进行爆炸产生地震波，在火山的另一个侧面通过地震记录仪记录爆炸产生的地震波。如果在地震波的传播途径中有液体存在，S 波将被阻挡，形成所谓的阴影带（图 8－6）。重复这一方法，就能勾划出岩浆体的形状并监测岩浆体位置的变化。

计算机技术的发展使地震监测可以快捷精确地进行岩浆的地震定位。使用地震反射波和折射波探测岩浆房位置和岩浆活动，已成为火山地震学和火山监测的主要方法。

2．地形变测量

地下深处的岩浆涌向地表时可能导致地面发生变形，特别是大的火山喷发之前常出现地面形态和标高的改变，如鼓胀、突起和穹隆等。地形变测量是仅次于地震监测的最重要的监测方法。利用计算机进行数据收集和分析处理，地形变连续监测的精度已得到提高。激光测距仪、高精度倾斜仪、钻孔式体积应变

仪、蠕变仪、卫星定位系统(GPS)和航空测量等先进的技术手段已广泛应用于监测火山地区的地面变化和应力应变状态。

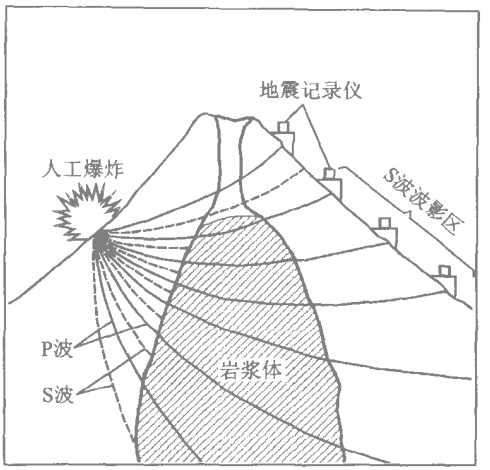


图 8-6 火山喷发的人工地震监测方法示意图

(摘自 Montgomery C W. Environmental geology. Wm. C. Brown Publishers,1997)

3. 地电测量

地球具有天然的弱电场，下部岩浆体的变化可能引起岩石电阻率的改变。目前常用的地电测量可分为两类：一类是利用天然电流或电磁场的方法，如自激法、AMT 法（声频磁大地电流法）和甚低频引入法；另一类是利用人工电流或电磁场的方法，如电流电阻法、充电法等。

4. 地磁观测

岩石中的矿物大多具有天然磁性，磁铁矿是最常见的一种。如果磁铁矿被加热到它的居里点（575℃）以上，其磁场强度将会突然降低。而岩石的熔融温度在 800℃ 到 1 200℃ 之间。如果岩浆体运移到岩石附近，岩石很可能被加热到它的居里点以上，岩石磁场强度也会降低。利用这种热磁效应以及压磁效应而导致的地磁异常变化可进行火山活动的监测。

5. 地球化学方法

火山喷发之前从喷气孔中喷射出来的气体有时会发生成分变化。如盐酸(HCl)和二氧化硫(SO_2)的比例相对于水蒸气的比例有上升的趋势。利用地球化学方法来测量火山的气体释放和温度变化也被广泛用于火山活动监测。地球化学方法测量和研究的对象有火山挥发物、地下水和土壤中各种气体成分和含量、气溶胶、地下水和喷气孔中的放射性氡气等。1986 年伊豆大岛火山喷发前观测到喷气孔化学成分 CO_2、H_2 和 SO_2 等的变化，对预报伊豆大岛火山的喷发

提供了重要依据。

（三）火山喷发预报

火山喷发预报的许多判别因素在火山监测过程中就已经被确定下来了。监测对预报有两方面的好处：一是使科学家们能够得知岩浆在火山“管道”中的分布和运动；二是能够及时探测前兆并确认异常现象。把多种物理的和化学的异常现象综合到一起就可能形成比较全面而清晰的指示标志来预报即将发生的喷发事件。

预报火山喷发，首先要辨别活火山、休眠火山和死火山，研究火山的活动历史，确定火山历史上的喷发样式；其次，要确定火山喷发的周期；最后，则是根据火山活动的监测结果对火山喷发的时间、规模和喷发样式进行预测、预报。

第四节　斜坡变形破坏地质灾害

斜坡包括天然斜坡和人工开挖而形成的边坡，其特点是具有一定的坡度和高度。在重力作用下，斜坡总是不断地降低其高度，并使其坡度变缓。有斜坡的地方便存在斜坡岩土体的运动，就可能造成灾害。斜坡变形破坏地质灾害是内、外动力地质作用下斜坡岩土体处于不稳定状态或失稳的一种现象。筑路、修建水库、露天采矿、开垦斜坡等人类活动是触发或加速斜坡岩土体产生运动的重要因素。

斜坡岩土体变形破坏的形式是多样的。变形的基本形式主要有拉裂松动和蠕动；破坏的基本形式有崩塌、滑坡和流动。

一、崩塌

（一）崩塌的特征

斜坡岩土体中被陡倾的张性破裂面分割的块体突然脱离母体并以垂直运动为主，翻滚跳跃而下，这种现象和过程称为崩塌。崩塌表现为岩块（或土体）顺坡猛烈地翻滚、跳跃，并相互撞击，最后堆积于坡脚，形成倒石堆。其主要特征为：下落速度快、发生突然；崩塌体脱离母岩而运动；下落过程中崩塌体自身的整体性遭到破坏；崩塌物的垂直位移大于水平位移。具有崩塌前兆的不稳定岩土体称为危岩体。

根据崩塌物质的不同，可分为土崩和岩崩；按其规模大小不同，又可分山崩和坠落石；如这种现象发生在海湖、河岸边者则称为岸崩。

（二）崩塌的形成条件

崩塌是在特定自然条件下形成的。地形地貌、地层岩性和地质构造是崩塌的物质基础；降雨、地下水作用、振动力、风化作用以及人类活动对崩塌的形成和

发展起着重要的作用。

1. 地形地貌

从区域地貌条件看，崩塌形成于山地、高原地区；从局部地形看，崩塌多发生在高陡斜坡处，如峡谷陡坡、冲沟岸坡、深切河谷的凹岸等地带。崩塌的形成要有适宜的斜坡坡度、高度和形态，以及有利于岩土体崩落的凌空面。崩塌多发生于坡度陡、高度大、坡面凹凸不平的陡峻斜坡上。

2. 地层岩性与岩体结构

岩性对岩质边坡的崩塌具有明显的控制作用。块状、厚层状的坚硬脆性岩石常形成较陡峻的边坡，若构造节理发育且存在凌空面，则极易形成崩塌。若软岩在下、硬岩在上，下部软岩风化剥蚀后，上部坚硬岩体常发生大规模的倾倒式崩塌；若软弱结构面的倾向与坡向相同，则极易发生大规模的崩塌。

土质边坡主要表现为坍塌，包括溜塌、滑塌和堆塌。按土质类型，稳定性从好到差的顺序为碎石土 > 粘砂土 > 砂粘土 > 结构面发育土；按土的密实程度，稳定性由大到小的顺序为密实土 > 中密土 > 松散土。

3. 地质构造

断裂和褶皱构造对崩塌具有明显的控制作用，与区域性断裂平行的陡峭斜坡、几组断裂线交汇的峡谷区、断层密集分布的陡坡地带以及岩层变形强烈的褶皱核部均可产生规模较大的崩塌。在褶皱两翼，当岩层倾向与坡向相同时，易产生滑移式崩塌；特别是当岩层构造节理发育且有软弱夹层存在时，可能形成大型滑移式崩塌。

4. 地下水

地下水对崩塌的影响表现为充满裂隙的地下水及其流动对潜在崩塌体产生的静水压力和动水压力；裂隙充填物在水的浸泡下抗剪强度大大降低；充满裂隙的地下水对潜在崩落体产生向上的浮托力；地下水还降低了潜在崩塌体与稳定岩体之间的摩擦力。

5. 地振动

地震、人工爆破和列车行进时产生的振动可能诱发崩塌。地震时，地壳的强烈震动可使边坡岩体中各种结构面的强度降低，甚至改变整个边坡的稳定性，从而导致崩塌的产生。

6. 人类活动

修建铁路或公路、采石、露天开矿等人类大型工程活动常使自然边坡的坡度变陡，从而诱发崩塌。当勘测设计不合理或施工措施不当时更易产生崩塌。施工中采用大爆破的方法使边坡岩体受到振动而发生崩塌的事例屡见不鲜。

（三）崩塌的类型及其形成机制

崩塌是岩体长期蠕变并最终发生破坏的结果。崩塌体的大小、物质组成、结

构构造、活动方式、运动途径、堆积情况、破坏能量等虽然千差万别，但崩塌的产生都是按照一定的模式孕育和发展的。按崩塌发生时受力状况和力学机制的不同，可将其分为倾倒式崩塌、滑移式崩塌、鼓胀式崩塌、拉裂式崩塌和错断式崩塌五种。不同类型的崩塌在岩性、结构面特征、地貌、崩塌体形状、岩体受力状态、起始运动形式和主要影响因素等方面都有各自的特点（表 8－7）。在一定条件下，可能出现一些过渡类型，如鼓胀—滑移式崩塌、鼓胀—倾倒式崩塌等。

表 8－7　崩塌的类型及其主要特征

类　型	岩　性	结构面	地貌形态	崩塌体形状	力学机制	失稳因素
倾倒式崩塌	黄土、灰岩等直立岩层	垂直节理、柱状节理、直立岩层面	峡谷、直立岸坡、悬崖等	板状、长柱状	倾倒	水压力、地震力、重力
滑移式崩塌	多为软硬相间的岩层	有倾向凌空面的结构面	陡坡，通常大于45°	板状、楔形、圆柱状及其组合形状	滑移	重力、水压力、地震力
鼓胀式崩塌	直力黄土、粘土或坚硬岩石下有厚层软岩	上部垂直节理、柱状节理，下部为近水平的结构面	陡坡	岩体高大	鼓胀	重力、水的软化
拉裂式崩塌	多见于软硬相间的岩层	多为风化裂隙和重力拉张裂隙	上部突出的悬崖	上部硬岩层以悬臂梁形式突出来	拉裂	重力
错断式崩塌	坚硬岩石、黄土	垂直裂隙发育，无倾向凌空面的结构面	大于45°的陡坡	多为板状、长柱状	错断	重力

注：本表据蒋爵光．铁路工程地质学．北京：中国铁道出版社，1991 修改

1．倾倒崩塌

垂直节理或裂隙发育的岩石陡坡横向稳定性较差。如果坡脚遭受不断地冲刷掏蚀，在重力作用下或有较大水平力作用时，岩体因重心外移倾倒产生突然崩塌。其特点是崩塌体失稳时，以坡脚的某一点为支点发生倾倒。

2．滑移崩塌

临近斜坡的岩体内存在软弱结构面时，若其倾向与坡向相同，则软弱结构面上覆的岩体在重力作用下具有向凌空面滑移的趋势。一旦不稳定岩体的重心滑出陡坡，就会产生崩塌。地下水静、动水压力及其对软弱面的润湿作用和地震是

岩体发生滑移崩塌的主要诱因。

3. 鼓胀崩塌

边坡附近若存在垂直节理发育的软弱岩层，当降雨或地下水使下部岩层软化时，上部岩体重力产生的压应力超过软岩的抗压强度后即被挤出，发生向外鼓胀，一旦重心移出坡外即产生崩塌。

4. 拉裂崩塌

当陡坡由软硬相间的岩层组成时，由于风化作用或河流的冲刷掏蚀作用，上部坚硬岩层在断面上常常突悬出来。当拉应力超过岩石的抗拉强度时，拉张裂缝就会迅速发展，最终导致突出的岩体突然崩落。重力、震动力、风化作用（特别是寒冷地区的冰劈作用）等都会促进拉裂崩塌的发生。

5. 错断崩塌

陡坡上长柱状或板状的不稳定岩体，当无倾向坡外的不连续面和软弱岩层时，一般不会发生滑移崩塌和鼓胀崩塌。但是，在某些因素作用下，可能使长柱或板状不稳定岩体的下部被剪断，从而发生错断崩塌。地壳上升、流水下切作用加强、凌空面高差加大等都会导致长柱状或板状岩体在坡脚处产生较大的自重剪应力，从而发生错断崩塌。人工开挖的边坡过高过陡也会使下部岩体被剪断而产生崩塌。

二、滑坡

在斜坡变形破坏地质灾害中，滑坡分布最广、发生频率最高、危害最大，是山区主要的地质灾害。

（一）滑坡的特征

在自然地质作用和人类活动等因素的影响下，斜坡上的岩土体在重力作用下沿一定的软弱面“整体”或局部保持岩土体结构完整而向下滑动的过程和现象及其形成的地貌形态，称为滑坡。滑坡的特征：① 表现为发生变形破坏的岩土体以水平位移为主，除滑动体边缘存在较少的崩离碎块和翻转外，滑体上各部分的相对位置在滑动前后变化不大。 ② 滑动体始终沿着一个或几个软弱面（带）滑动，岩土体中各种成因的结构面均有可能成为滑动面，如古地形面、岩层层面、不整合面、断层面、贯通的节理裂隙面等。 ③ 滑坡滑动过程可以在瞬间完成，也可能持续几年或更长的时间。规模较大的“整体”滑动一般为缓慢、长期或间歇的滑动。④在较平缓的斜坡中仍可发生滑坡。

（二）滑坡的形成条件

在各种自然因素和人为因素的影响下，斜坡一直处于不断地发展和变化之中。滑坡的形成条件主要有地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件和人为活动等因素。

1. 地形地貌

斜坡的高度、坡度、形态和成因与斜坡的稳定性有着密切的关系。高陡斜坡比低缓斜坡更容易失稳而发生滑坡。斜坡坡度大于 10°、小于 45° 、下陡中缓上陡、上部形成环状坡形的地段是产生滑坡的有利地形。山地的缓坡地段，由于地表水流动缓慢，易于渗入地下，因而有利于滑坡的形成和发展。山区河流的凹岸易被流水冲刷和陶蚀，黄土地区高阶地前缘斜坡坡脚易被地表水和地下水浸润，前缘开阔的山坡，铁路、公路和矿山等工程的边坡等部位，极易发生滑坡。

2. 岩土体类型及性质

斜坡岩土体的性质是决定斜坡抗滑力的根本因素。虽然不同地质时代、不同岩性的地层中都可能形成滑坡，但滑坡产生的数量和规模与岩性有密切关系。坚硬完整的岩石能够形成很陡的高边坡而不失稳；而软弱岩石或土只能形成低缓的斜坡。沉积岩层中的软弱岩层，易构成滑动面（带），产生滑坡。岩浆岩组成的斜坡稳定性较好，但若原生节理发育，也常有崩塌发生。变质岩的斜坡稳定性一般比沉积岩为好，片岩类依其矿物成分不同，工程地质性质有着极大的差异。石英片岩、角闪片岩的强度很高，能维持较高的陡坡；而由千枚岩、片岩组成的斜坡，滑坡十分发育。

3. 地质结构

斜坡中的各种结构面对斜坡稳定性有着重要影响，特别是软弱结构面与斜坡凌空的关系，对斜坡稳定起着很大的作用。

若软弱结构面走向与斜坡面走向近于平行且倾向一致，则当结构面倾角小于坡角时，斜坡稳定性最差，极易发生顺层滑坡；当倾角大于坡角时，斜坡稳定性较好。若软弱结构面倾向与斜坡倾向相反，即岩层面倾向坡内，斜坡较稳定；若软弱结构面走向与坡面走向成斜交关系，则交角越小稳定性越差；软弱结构面走向与坡面走向近于垂直时，斜坡稳定性好，很少发生大规模的滑坡。

4. 水文地质条件

地下水对滑坡的形成起着重要作用。如果山坡上方或侧方有丰富的地下水补给，则斜坡内的软弱结构面就可能成为滑动面而发生滑坡。地下水在滑坡的形成和发展过程中所起的作用表现为：地下水进入滑坡体增加了滑体的重量，滑带土在水的浸润下抗剪强度降低；地下水位上升产生的静水压力对上覆岩层产生浮托力，降低了有效正应力和摩擦阻力；地下水与周围岩体长期作用改变岩土的性质和强度，从而引发滑坡；地下水运动产生的动水压力对滑坡的形成和发展起促进作用。

5. 外力诱发因素

斜坡在具有上述某条或几条地质条件情况下，许多外力因素均可诱发滑坡。地震是造成斜坡破坏最重要的触发因素之一，许多大型滑坡的发生与地震密切

相关。暴雨、融雪水形成的径流沿节理、裂缝和破碎带渗入斜坡土石体内，产生静、动水压力，并降低土石体的内摩擦力，最终导致滑坡。

人工开挖边坡或在斜坡上部加载，改变了斜坡的外形和应力状态，增大了滑体的下滑力，减小了斜坡的支撑力，从而引发滑坡。采矿、筑路、修建水坝、开垦农田、砍伐森林等，都可诱发滑坡的产生。

（三）滑坡的类型

滑坡形成于不同的地质环境，并表现为各种不同的形式和特征。合理的滑坡分类对于认识和防治滑坡是必要的。目前，人们从不同的观点和应用目的出发提出了多种分类方案，但尚未形成统一的认识。下面介绍几种主要的滑坡分类。

（1）按滑动面特征划分：

①均质滑坡：发生在均质的没有明显层理的岩体或土体中的滑坡。滑动面不受层面的控制，而是决定于斜坡的应力状态和岩土的抗剪强度的相互关系。

②顺层滑坡：沿已有结构面发生滑动而形成的滑坡。这些结构面是前期地质作用而形成的，如岩层层面、不整合面、节理或裂隙面、松散层与基岩的界面等。

③切层滑坡：指滑动面与岩土体中的结构面相交切的滑坡。

（2）按滑动性质划分：

①牵引式滑坡：斜坡下部首先失稳发生滑动，继而牵动上部岩土体向下滑动的滑坡。

②推动式滑坡：斜坡上部首先失去平衡发生滑动，并挤压下部岩土体使其失稳而滑动的滑坡。

③混合式滑坡：属于牵引式滑坡和推动式滑坡的混合形式。

（3）按滑坡的主要组成物质和滑体规模划分：首先按组成滑坡的物质成分分为堆积层滑坡、黄土滑坡、粘性土滑坡和岩层滑坡四大类，然后又可按滑体的规模分为浅层滑坡（滑体厚仅数米）、中层滑坡（滑体厚几米至 20 m 左右）、深层滑坡（20～50 m）和极深层滑坡（大于 50 m）四个亚类。

（4）按滑坡体岩土类型划分：有堆积层滑坡、黄土滑坡、粘土滑坡、破碎岩石滑坡、岩层滑坡等类型。斜坡的物质成分不同，滑坡的力学性质、形态特征及滑体结构等也有所不同，此分类法能够综合反映滑坡的特点。

（5）按滑坡时代划分：有新滑坡、老滑坡、古滑坡三种类型。

（四）滑坡与崩塌的关系

滑坡和崩塌产生于相似的地质构造和地层条件下，具有大致相同的触发因素。在长期频繁发生崩塌的地点，累积大量的崩塌堆积体，构成滑坡体的物质基础，在一定条件下可发生滑坡。有时崩塌在运动过程中直接转化为滑坡，有 时岩

土体的重力运动形式介于崩塌运动和滑坡运动之间，令人无法区别此运动是崩塌还是滑坡，因此称为滑坡式崩塌，或崩塌型滑坡。崩塌体击落在老滑坡体或松散不稳定堆积体上部，在崩塌的重力冲击下，可使老滑坡复活；滑坡向下滑动过程中突遇地形变陡，滑坡体就会由滑动转化为坠落（崩塌）；有时滑坡发生后，其后缘的高陡岩壁会因断裂而发生崩塌。

但崩塌与滑坡又有明显的区别，表现在：① 与母体关系不同，崩塌体完全脱离母体（山体），而滑坡体则有部分滑体残留在滑床上；② 崩塌体和滑坡体位移量不同，崩塌体的垂直位移量远大于水平位移量，而滑坡体的水平位移量大于垂直位移量。同时崩塌位移的速度比滑坡快；③ 崩塌与滑坡堆积物的形态各异，崩塌堆积物呈锥形体，结构零乱，毫无层序，而滑坡堆积物整体性较好，有一定层序和结构特征；④崩塌堆积物表面基本无裂缝，而滑坡体表面分布许多具一定规律性的纵横裂缝，如滑坡体上部的弧形裂缝，中部两侧的剪切裂缝，前部的横张裂缝，滑坡舌部位的扇形张裂缝等。

（五）中国崩塌、滑坡灾害的分布状况

崩塌、滑坡的分布受地质构造、气候等因素的控制。中国大致有 5 个不同的斜坡岩土体变形破坏多发区。

（1）西南地区：包括四川、西藏、云南、贵州四省区。该区为高山、高原、盆地分布区。山陡、谷深，地质构造复杂，断裂发育，新构造运动强烈，降雨较多，所以，崩塌、滑坡分布广泛，类型多样，频率高、规模大、危害严重，甚至成为经济发展的制约因素。

（2）秦岭－大巴山地区：该区主要分布高山、中山和盆地，地质构造和岩性错综复杂，沟谷纵横，降水较充沛，是崩塌、滑坡灾害的频发区。区内的宝成铁路沿线经常发生崩塌和滑坡，给交通运输造成严重的危害。

（3）西北黄土高原区：包括山西、陕西、宁夏、甘肃等省区。其特点是土层深厚松散、气候干燥、植被稀少，水土流失严重。黄土崩塌、滑坡广泛分布，但规模较小，频率较低。

（4）东南、中南等省区：主要为中低山和丘陵区，地质构造和岩性较复杂，沟谷较浅，风化侵蚀强烈，降雨丰沛，人口密度大，崩塌、滑坡频繁发生，但规模较小，而且多数崩塌与滑坡是由人类的工程－经济活动诱发生成的。

（5）青海、西藏与黑龙江北部的冻土地带：主要发育冻融堆积层崩塌和滑坡，规模较小，频率也较低。

三、泥石流

（一）泥石流的特征

泥石流是山区特有的一种突发性的地质灾害现象。它常发生于山区小流

域，是一种饱含大量泥沙石块和巨砾的固液两相流体，呈粘性层流或稀性湍流等运动状态，泥石流流体容重一般在 1.2～2.3 t/m^3 之间。泥石流爆发过程中，有时山谷雷鸣、地面震动，有时浓烟腾空、巨石翻滚；混浊的泥石流沿着陡峻的山涧峡谷冲出山外，堆积在山口。泥石流含有大量泥沙块石，具有发生突然、来势凶猛、历时短暂、大范围冲淤、破坏力极强的特点，常给人民生命财产造成巨大的损失。

泥石流具有如下三个基本特征，并以此与挟沙水流和滑坡相区分：①泥石流具有土体的结构性，即具有一定的抗剪强度（τ_0），而挟沙水流的抗剪强度等于零或接近于零；②泥石流具有水体的流动性，即泥石流与沟床面之间没有截然的破裂面，只有泥浆润滑面，从润滑面向上有一层流速逐渐增加的梯度层，而滑坡体与滑床之间有一破裂面，流速梯度等于零或趋近于零；③泥石流一般发生在山地沟谷区，具有较大的流动坡降。

（二）泥石流的形成条件

泥石流的形成条件概括起来主要表现为三个方面，即大量失稳的松散固体物质、充足的水源条件和特定的地貌条件。

1. 物源条件

泥石流形成的物源条件系指物源区土石体的分布、类型、结构、性状、储备量和补给的方式、距离、速度等。而土石体的来源又决定于地层岩性、地质构造和气候条件等因素。

从岩性看，第四系各种成因的松散堆积物最容易受到侵蚀、冲刷。因而山坡上的残坡积物、沟床内的冲洪积物以及崩塌、滑坡所形成的堆积物等都是泥石流固体物质的主要来源。厚层的冰碛物和冰水堆积物则是冰川型、融雪型泥石流的固体物质来源。

泥石流强烈发育的山区，都是地质构造复杂、岩石风化破碎、新构造运动活跃、地震频发、崩滑灾害多发的地段。这样的地段，既为泥石流准备了丰富的固体物质来源；又因地形高耸陡峻，高差对比大，为泥石流活动提供了强大的动能优势。节理裂隙发育的岩石以及板岩、千枚岩、片麻岩等变质岩属于易风化岩石，其风化物质为泥石流提供了丰富的松散固体物质来源。

2. 水源条件

水不仅是泥石流的组成部分，也是松散固体物质的搬运介质，地表径流是爆发泥石流的动力条件。形成泥石流的水源主要有大气降水、冰雪融水、水库溃决水、地下水等，由此可将泥石流分为暴雨型、冰雪融化型和水体溃决型等类型。暴雨型泥石流是中国最主要的泥石流类型。

3. 地形地貌条件

地形地貌对泥石流的发生、发展主要有两个方面的作用：一是通过沟床地势

条件为泥石流提供位能，赋予泥石流一定的侵蚀、搬运和堆积的能量；二是在坡地或沟槽的一定演变阶段内，提供足够数量的水体和土石体。沟谷的流域面积、沟床平均比降、流域内山坡平均坡度以及植被覆盖情况等都对泥石流的形成和发展起着重要的作用。

泥石流地貌一般可划分为形成区（包括汇水动力区和固体物质补给区）、流通区和堆积区三部分。泥石流形成区位于流域的上游沟谷斜坡段，山坡坡度30°～60°，地形呈树冠状或羽毛状沟谷，有利于地表径流和固体物质的聚集。泥石流流通区一般位于泥石流沟谷的中下游，沟槽地形较为顺直、稳定，沟槽坡度较大，多峡谷地形。泥石流堆积区是泥石流固体物质停积的场所，位于冲沟的下游或沟口处，堆积体多呈扇形、锥形或带形。

除上述三种主要因素外，地震、火山喷发和人类活动都有可能成为泥石流发生的触发因素，而引发破坏性极强的泥石流灾害。人类活动导致地质和生态环境的破坏，往往诱发泥石流或加重其危害程度。山区滥伐森林，不合理开垦土地，破坏植被和生态平衡，会造成水土流失，并产生大面积的山体崩塌和滑坡，为泥石流提供了固体物质来源。

（三）泥石流的类型

泥石流的分类方法很多，依据主要是泥石流的形成环境、流域特征和流体性质等。各种分类都从不同的侧面反映了泥石流的某些特征。尽管分类原则、指标和命名等各不相同，但每一个分类方案均具有一定的科学性和实用性。

1．按泥石流的物质成分划分

（1）泥石流：由大量的粘性土和不等的砂粒、石块组成。是最常见的一种泥石流类型。

（2）泥流：固体物质组成以粘性土为主，含有少量砂粒和石块，其粘度很大，流动时呈稠泥状。

（3）水石流：主要由水和粒径不等的砂粒和石块组成。

2．按泥石流的流动状态划分

（1）粘性泥石流：含有大量粘性土的泥石流或泥流，固体物质含量约占40%～60%，最多可达80%。水不是搬运介质，而是其组成成分；石块呈悬浮状态，突发性强，持续时间短，破坏力大。

（2）稀性泥石流：以水为主要成分，粘性土含量很少，固体物质约占10%～40%，有很大的分散性；水为其搬运介质，石块常以滚动或跳跃方式向前运动，具有强烈的下切作用；其固体物在谷口呈扇状散流堆积，形似一片“石海”。

3．按形成环境划分

从全球范围看，可将泥石流分为陆地泥石流和水下泥石流两大类。按形成条件，陆地泥石流有地带性泥石流和非地带性泥石流之分。由地带性因素形成

雨水泥石流和融水泥石流；非地带性因素形成地震泥石流、火山泥石流、崩塌泥石流、滑坡泥石流、溃决泥石流和人为泥石流等（图 8－7）。

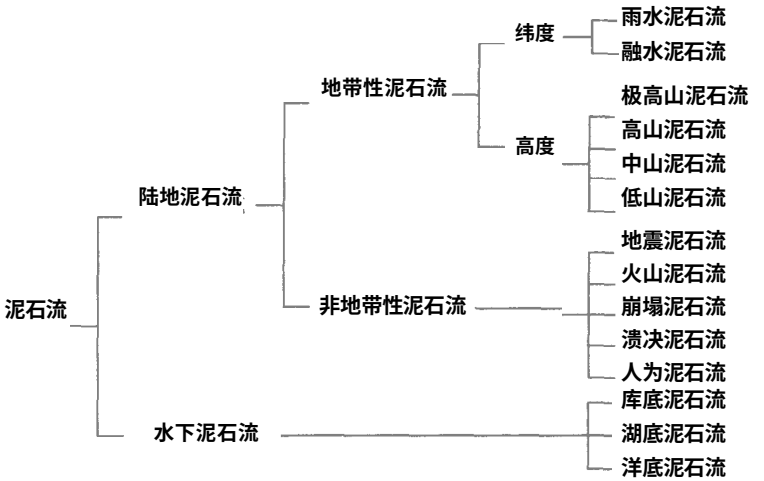


图 8－7　泥石流的环境分类图

（摘自吴积善等，泥石流及其综合治理，北京：科学出版社，1993）

（四）泥石流的运动特征与机理

1. 泥石流的运动学特征

从运动角度来看，泥石流是水和泥沙、石块组成的特殊流体，属于一种块体滑动与携沙水流运动之间的颗粒剪切流。细颗粒物质少的稀性泥石流，流体重度低、粘度小、浮托力弱，石块呈翻滚、跃移状运动。含细颗粒多的粘性泥石流，流体重度高、粘度大、浮托力强，颗粒间粘聚力大，整体性强，惯性作用大，各种大小颗粒均处于悬浮状态，石块呈悬浮状态或滚动状态运动。泥石流流路集中，停积时堆积物无分选性，并保持流动时的整体结构特征。与洪水相比，泥石流具有强烈的直进性和冲击力。泥石流粘稠度越大，运动惯性也越大，直进性就越强；颗粒越粗大，冲击力就越强。泥石流在急转弯的沟岸或遇到阻碍物时，常出现冲击爬高现象，越过沟岸摧毁障碍物。

2. 泥石流的运动机理

泥石流的运动机理主要取决于其物质组成。粘粒的性质与含量决定着泥浆的结构、浓度、强度、粘性和运动状态。按粘粒含量的变化，可将泥石流运动模式划分为塑性蠕动流、粘性阵流、阵性连续流和稀性连续流，它们的运动机理各不相同。

（1）塑性蠕动泥石流：流体中具有极高的粘滞力，在运动中石块之间泥浆变形所产生的阻力相当大，泥石流运动速度缓慢，流体中石块大体可保持相对稳定

的状态，所有的石块被“冻结”在粗粒浆体内，运动过程中石块与浆体互不分离，等速前进。许多塑性泥石流是直接由滑坡体演变而来的。

（2）粘性阵流泥石流：流速很快，泥石流携带的石块数量不如粘性泥石流多，泥浆体的粘滞度小，运动能耗小。沙粒被束缚在结构体中，石块与浆体构成较紧密的格式结构，绝大部分石块悬浮在结构体内。

（3）阵性连续流泥石流：泥浆更接近于流体性质，属过渡性泥浆体，具有一定的湍动特性，石块多呈推移质。起动速度低，搬运力下降；流体中石块的自由度增大，相互间容易发生碰撞。

（4）稀性连续流泥石流：泥浆体的粘滞作用很小，接近水流特征，流态湍乱，石块翻滚并相互撞击。

四、斜坡变形破坏地质灾害对人类的影响

斜坡变形破坏对人类的危害十分严重，它可破坏地表、毁坏农田，掩埋和阻断公路、铁路和航运交通，摧毁村庄房屋和其他地面建筑物，破坏矿山建设等；危害最大的是造成人员伤亡。

1. 对居民点和人民生命财产安全的危害

规模较大的崩塌、滑坡、泥石流（崩滑流）能摧毁村镇，淹埋或砸毁房屋，造成人畜伤亡。如 1987 年 9 月 17 日四川巫溪县城龙头山发生岩崩，摧毁一栋宿舍、两家旅馆、29 户民房，死亡 122 人。1989 年 7 月，重庆、万州、南充、达县、涪陵等地连降暴雨，爆发滑坡、崩塌、泥石流 12.9 万处，毁房 13.8 万间，死亡和失踪 759 人，伤 2 318 人，经济损失 15 亿元以上。

2002 年 8 月上旬，云南省玉溪市新平县境内连续降雨，导致山体斜坡松散堆积物饱水，14 日凌晨爆发大面积的山体滑坡和泥石流，洪水夹杂着淤泥、石块、树枝，向村庄和田野蔓延，致使者竜、水塘、戛洒 3 个乡的 10 个村庄受灾，611 户房屋倒塌，受灾人口达到 21 782 人，毁坏农田 9 100 hm^2，近 30 km 长的公路和 22 座桥涵被冲毁，死亡 60 多人，直接经济损失达 1.6 亿元。

2. 对工厂、矿山的危害

几乎所有矿山都不同程度地遭受到滑坡、崩塌、泥石流灾害的危害或威胁。这些山地地质灾害在某种程度上已经成为影响矿山建设和矿产开发的“公害”。在露天矿山，崩塌、滑坡、泥石流灾害几乎影响着矿山生产的整个过程。崩滑流可摧毁厂房、矿山设施和其他地面建筑等，同时造成人员伤亡。中国湖北十堰第二汽车制造厂一直处于滑坡、崩塌、泥石流灾害的不断侵扰之中，在厂区 18 km^2 范围内，共有滑坡、崩塌 270 处，总方量达 750×10^4 m^3，严重威胁着厂区的安全和工厂生产。1982 年 7 月底，在突降暴雨的诱发下，多处发生滑坡、崩塌、泥石流，崩滑流物质冲入两个专业厂的七个车间，工厂被迫停产数天。云南省威信县

墨黑煤矿区曾在 1948 年、1984 年、1987 年和 1988 年多次受到崩塌的破坏，摧毁煤矿通讯井 2 处，回风巷 800 m、运输巷 450 m，毁坏 10 万伏高压输电线 800 m，导致煤矿停产，经济损失 113 万元。

3. 对工程设施的危害

崩塌、滑坡、泥石流对水利工程的危害主要表现为破坏大坝、水电站、变电站，冲毁水渠管道、淤积水库、河道和农田。崩滑流灾害常常使水利工程不能正常运转，经济损失严重。1963 年发生在意大利瓦依昂（Vaiont）大坝南侧的大规模堆积物滑移给大坝及其下游的居民带来了毁灭性的灾难。由于连降大雨，1963 年 10 月 9 日晚，瓦依昂水库南侧发生快速的大规模坍塌滑动，滑体长 1.8 km，宽 1.6 km，体积超过 2.4×10^{8} m^{3}；滑动物质持续时间不足 30 秒钟，运动速率达 30 m/s，高出坝顶 100 m 的波浪冲出水库，并沿瓦依昂河谷向下游的村镇冲去，3 000 多名居民被洪水淹死。这一事件被看作是世界上最大的水库大坝灾难。

4. 对道路交通的危害

对铁路、公路的危害主要表现为掩埋线路、破坏路基和路桥、错断隧道，摧毁棚洞，砸坏站房，造成翻车事故，导致人员伤亡。中国西南地区的宝成线、成昆线和陇海线是崩塌、滑坡灾害最严重的路段，铁路运输经常受到崩塌、滑坡的破坏。全国遭受泥石流危害的铁路路段近千处，铁路跨越泥石流的桥涵达 1 386 处。1949—1985 年遭受较重的泥石流灾害 29 次，一般灾害 1 173 次。其中，列车颠覆事件 9 起，死亡 100 人以上的重大事故 2 次，19 个火车站被淤埋 23 次。1981 年 7 月 9 日四川甘洛利子依达沟泥石流冲毁跨沟铁路大桥，颠覆一列火车，致使 2 个车头、3 节车厢坠入沟中，死亡 300 余人，中断行车 16 昼夜，损失 2 千万元。云南东川支线仓房以北线段，平均每 1.5 km 长线路上就有一条泥石流沟。该线自 1958 年动工后，因遭滑坡、泥石流灾害破坏后维修线路所耗的费用为原设计预算的 4 倍。

5. 对河道、航运的影响

由于特殊的地形地貌，河流沿岸特别是峡谷地段多为滑坡、崩塌的密集发生段，对河流航运的危害和影响很大。号称黄金水道的长江是遭受滑坡、崩塌灾害最严重的河运航道。数十年来，因滑坡、崩塌造成的断航事故时有发生。1982 年 7 月 18 日云阳鸡扒子老滑坡复活，180×10^{4} m^{3} 土石滑入长江，河床填高 30 余米，江岸外移 50 m，在鸡扒子航段 600 m 范围内形成三道“水坝”，严重阻碍了长江航运，仅清航整治费就达 8 000 多万元。崩塌、滑坡经常堵塞河流，形成天然坝和水库，导致上游回水，或水库溃决，形成洪水和泥石流灾害。2000 年 4 月 9 日，位于中国西藏林芝地区波密县境内的易贡藏布河扎木弄沟发生大规模的山体滑坡，体积约（$2.8\sim3.0$）$\times10^{8}$ m^{3}。滑坡体堵塞了易贡藏布河 7 km 长的主

河道，形成汇水面积达 1 万多平方千米的“湖泊”。至 6 月 10 日晚，“易贡藏布湖”累计水位涨幅达 35.94 m，6 月 11 日凌晨“大坝”溃决，使下游通麦大桥和两座吊桥被冲垮，通麦大桥至易贡茶场及排龙乡的公路全部被冲毁。此次山体滑坡为世界罕见，也是迄今为止中国发生的最大规模的山体崩滑灾害。

6. 滑坡对农田的危害

滑坡、崩塌还对农田造成危害，使耕地面积减少。大量耕地的毁坏，严重地阻碍了受灾地区农业生产的发展和农民生活水平的提高。如 1983 年 3 月 7 日，甘肃省东乡族自治县发生的洒勒山滑坡，覆盖范围南北长达 1 600 m，东西宽 1 700 m，面积约 1.4 km^2，毁坏耕地 1.67 km^2；滑坡还造成两座小型水库部分被淤埋、阻塞，破坏灌溉设施四处、公路及高压电线 1.3 km 长，使洒勒、新庄、三个村庄被摧毁，死亡 237 人，重伤 27 人，400 余头牲口被埋没。

五、斜坡岩土体变形破坏的监测与预报

（一）斜坡岩土体变形破坏的监测

斜坡岩土体变形破坏监测的主要目的是了解和掌握斜坡岩土体变形破坏的演变过程，及时捕捉崩滑流灾害的特征信息，为崩塌、滑坡、泥石流及其他类型斜坡岩土体变形破坏的分析评价、预测预报及治理工程提供可靠资料和科学依据。同时，监测结果也是检验斜坡岩土体变形破坏分析评价及防治工程效果的尺度。

1. 监测内容

斜坡岩土体变形破坏监测的内容主要涉及斜坡岩土体变形破坏的成灾条件、演变过程和地质灾害防治效果等。具体内容有斜坡岩土表面及地下变形的二维或三维位移、倾斜变化监测；应力、应变、地声等特征参数的监测；地震、降水量、气温、地表水和地下水动态和水质变化以及水温、孔隙水压力等环境因素的监测。

2. 监测方法

在监测技术方法方面，已由过去的人工皮尺监测过渡到仪器监测，现在正向自动化、高精度的遥控监测方向发展。目前国内外常用的崩塌滑坡监测方法主要有宏观地质观测法、简易观测法、设站观测法、仪表观测法及自动遥测法等，用以监测崩滑体的三维位移、倾斜变化及有关物理参数和环境影响因素的改变。由于斜坡岩土体变形破坏的类型较多，特征各异，变形机理和所处的变形阶段不同，监测的技术方法也不尽相同。

（1）宏观地质观测法：利用常规地质调查方法通过对地表裂缝、地面鼓胀、沉降、坍塌、建筑物变形特征及地下水变异等宏观变形迹象及其发展趋势进行调查、观测，结合仪器监测资料进行综合分析，可初步判定崩塌、滑坡体所处的变形阶段及中短期变形趋势，作为临崩、临滑的宏观地质预报判据。

（2）设站观测法：在斜坡岩土体变形破坏调查与勘探的基础上，在可能造成严重灾害的危岩体、滑坡变形区及容易爆发泥石流的沟谷设立线状或网状分布的变形观测站点，在变形区影响范围以外的稳定地区设置固定观测站，利用经纬仪、水准仪、测距仪、摄影仪及全站型电子速测仪、GPS 接收机等定期监测变形区内网点的三维位移变化，是一种行之有效的监测方法。

（3）全球定位系统（GPS）测量法：GPS 用于斜坡变形监测的优点是选点限制小；观测不受天气状况影响，可进行全天候观测；观测点的三维坐标可以同时测定，对运动的观测点还能精确测出它的速度；观测精度比较高。此方法特别适合地形条件复杂、建筑物密集、通视条件差的滑坡的三维位移监测。目前，中国已将 GPS 技术应用于三峡库区重大危岩体、滑坡变形体以及铜川市川口滑坡治理效果监测。

（4）仪器仪表观测法：仪器仪表观测法主要有测缝法、测斜法、重锤法、沉降观测法、电感电阻位移法、电桥测量法、应力应变测量法、地声法、声波法等用以监测危岩体、滑坡变形体的变形位移、应力应变、地声变化等。

（二）斜坡变形破坏地质灾害的预测预报

斜坡岩土体变形破坏预报包括两方面内容，即空间预测和时间预报。

1. 斜坡变形破坏的空间预测

空间预测内容包括：可能发生变形破坏的区域、地段和地点；斜坡岩土体变形破坏的基本类型；变形破坏可能发生的规模；斜坡岩土体变形破坏的运动方式、速度和距离。依据预测范围的大小可以大致划分为区域性预测、地区性预测和场地预测。

区域斜坡稳定性的空间预测首先通过野外地质调查、遥感解译和试验分析，确定影响因子及其表示方法，在建立地质模型的基础上进行预测预报（图 8－8）。

2. 斜坡变形破坏的时间预报

崩滑流发生时间预报主要依据斜坡岩土体变形破坏的演化规律来确定，预测预报大多采用如下三种方式：一是通过仪器监测，自动报警预报；二是采用实验数据，通过公式计算进行预报；三是采用监测数据进行预报。

按照所预报的时间长短关系，可以把斜坡岩土体变形破坏预报分为中长期预报和短期临时预报。就目前研究水平而言，斜坡破坏时间预报的方法主要有两类，即根据宏观征兆预报和根据观测资料预报。

泥石流的时间预报，实际上是泥石流可能爆发条件的定量表示。泥石流的爆发，是在一定的地形、地质条件下，由于强烈的地表径流激发所致。因此，有可能用临界降水量或临界径流量这一指标来预报泥石流。

崩塌、滑坡的各种预测预报方法及其适用条件如表 8－8 所示

表 8－8　各种预报方法适用性表

崩塌、滑坡预报方法		适用条件
确定性预报模型	斋滕迪孝法	属加速蠕变经验方程，精度较低，适用于滑坡的中、短期预报和临滑预报
	K·KAWAWURA	
	HOCK 法	
	极限分析法	适于滑坡的长期预报
非确定性预报模型	灰色预报	多属趋势预报或跟踪预报，适于各类崩塌、滑坡的中、短期预报。当崩塌、滑坡到达变形加速阶段时，可以较准确地预报剧（崩）滑时间
	生长曲线预报	
	马尔柯夫法	
	趋势叠加法	
	指数平滑法	
	非线性相关分析法	
	卡尔曼滤波法	
	动态跟踪法	
	泊松旋回法	
	AB 模型	
类比分析法	多参数预报模型	可识别崩塌、滑坡的变形阶段，适于临滑预报
	力学图解分析法	用于崩塌滑坡判据，以及判定破坏形式
	黄金分割法	可用于中长期预报

注：本表摘自钟荫乾．滑坡与降雨关系及其预报．中国地质灾害与防治学报，1998，(4)

六、斜坡岩土体变形破坏的防治

斜坡岩土体变形破坏防治工程是针对自然或人为作用产生的崩塌、滑坡、泥石流进行防护与治理的工程或措施。它不同于其他建筑工程，一般不产生直接经济效益。因此，在实现整治目标的基础上，应尽可能降低治理费用。斜坡岩土体变形破坏防治工程必须根据地质体的破坏机制对症施治，以改善斜坡岩土体自身及周围的生态环境为原则，把崩塌、滑坡、泥石流灾害作为一个系统工程来对待。

（一）崩塌的防治

崩塌防治，必须遵循标本兼治、分清主次综合治理、生物措施与工程措施相结合、治理危岩与保护自然生态环境相结合的原则。通过治理，最大限度地降低危岩失稳的诱发因素，达到治标又治本的目的。

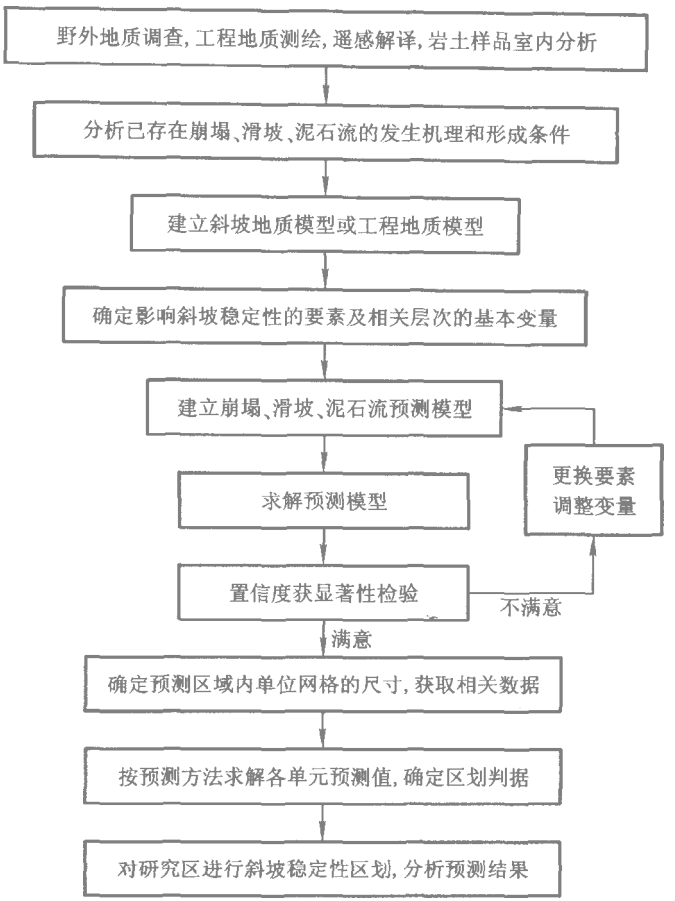


图 8－8　区域性斜坡稳定性空间预测流程框图

（摘自潘懋等．灾害地质学．北京：北京大学出版社，2002）

崩塌落石防治措施可分为防止崩塌发生的主动防护和避免造成危害的被动防护两种类型。具体方法的选择取决于崩塌落石历史、潜在崩塌落石特征及其风险水平、地形地貌及场地条件、防治工程投资和维护费用等。图 8－9 列出了主要的崩塌防治措施。

对中、小型崩塌可修筑明洞、棚洞等遮挡建筑物或落石平台、落石槽、拦石堤或拦石墙等拦截建筑物。对危险块体连片分布，并存在软弱夹层或软弱结构面的危岩区，首先应清除部分松动块体，再修建支护墙保护斜坡坡面。

根据危岩体的实际情况，还可采用灌浆加固、锚杆、疏干岸坡与排水防渗等措施，对可能发生大规模崩塌的地段，即使是采用坚固的建筑物，也经受不了大

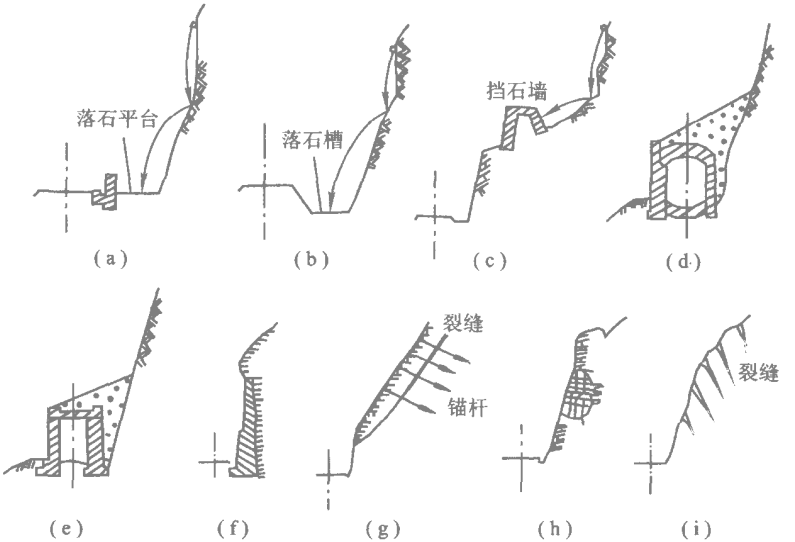


图 8－9　崩塌落石防治工程措施示意图

(a) 落石平台；(b) 落石槽；(c) 挡石墙；(d) 明洞；(e) 棚洞；(f) 支护墙；(g) 锚固；(h) 嵌补；(i) 灌浆勾缝

型崩塌的破坏，故铁路或公路必须设法绕避。

（二）滑坡的防治

滑坡的防治较之危岩更加复杂，必须在查明其工程地质条件的基础上，深入分析其稳定性和危害性，找出影响滑坡的因素及相互关系，综合考虑，全面规划，因地制宜，以长期防御为主，防御工程与应急抢险工程相结合，生物措施与工程措施相结合，治标与治本相结合，治理与开发相结合。

一般来讲，治理滑坡的方法主要有“砍头”、“压脚”和“捆腰”三项措施。“砍头”就是用爆破、开挖等手段削减滑坡上部的重量；“压脚”是对滑坡体下部或前缘填方反压，加大坡脚的抗滑阻力；“捆腰”则是利用锚固、灌浆等手段锁定下滑山体。

滑坡的防治措施可归纳为“排、稳、固、挡”四个字。“排”即排水，包括排出滑坡体内的地下水[图 8－10(a)]；拦截和旁引可能流入滑坡体内的地表水[图 8－10(b)]；对穿过滑坡区的引水或排水工程做防渗漏处理；避免在滑坡区内修建蓄水工程；对滑坡区地表做防渗处理；防止地表水对坡脚的冲刷等。“稳”即稳坡，包括降低斜坡坡度，滑坡后部削方减重及滑坡前缘回填压脚[图 8－10(c)]；以生物工程和护坡工程来保护边坡等。“固”即加固，包括采用各种形式的抗滑桩、预应力锚索和预应力抗滑桩、抗滑明硐等工程，或采用灌浆、电化学加

固、焙烧等方法以改变滑带岩土的性质来进行加固，增大滑面的抗滑力。“拦即拦挡、拦截，如挡土墙等拦挡工程［图 8－10(a)］。

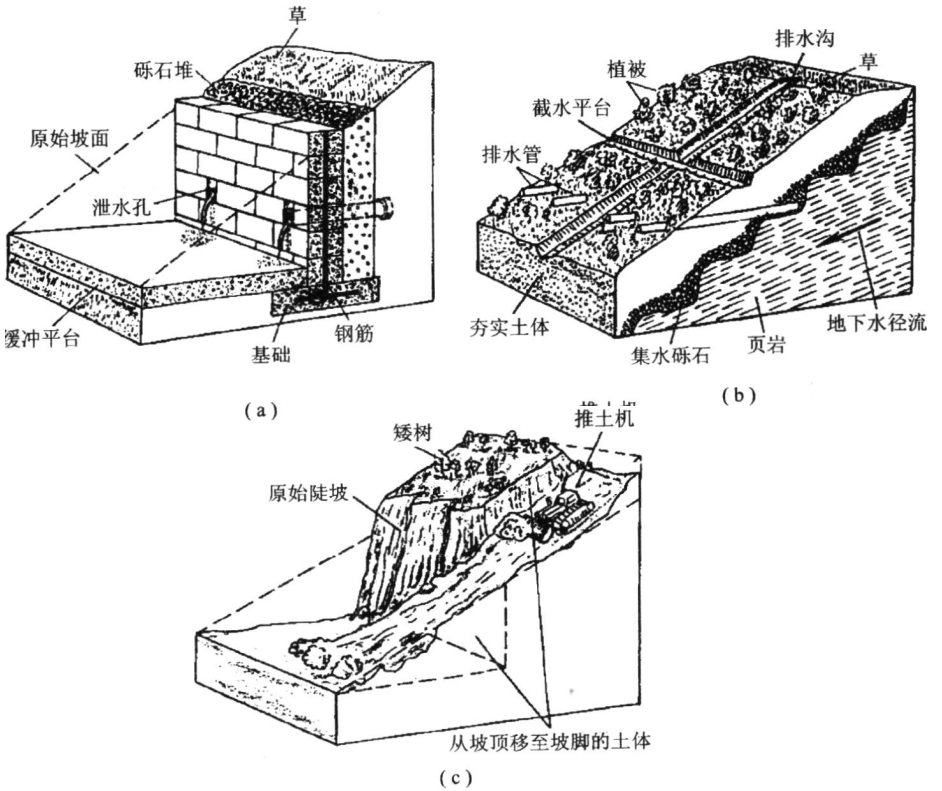


图 8－10　滑坡治理工程措施示意图

（摘自 Barbara W M. Dangerous earth. John Wiley & sons, Inc. ,1997）

按滑坡治理措施的施工方式、适用条件和主要作用，可将其分为防御避让、护坡护岸、削坡卸载、排水防渗、排引地下水、拦挡抗滑、固结加固和生物工程等类型。

（三）泥石流的防治

泥石流的防治必须遵循全面规划、分清类别、重点突出、因害设防、合理设计、工程措施与生物措施相结合的原则。

泥石流防治措施可归为工程措施和生物措施两大类（表 8－9）。工程措施几乎适用于各种类型的泥石流防治，尤其是对急需治理的泥石流可有立竿见影之功效。目前所采用的主要工程措施有排导工程、拦挡工程和综合整治工程。泥石流治理的生物措施主要是指保护与营造森林、灌丛和草本植被，采用先进的农牧业技术以及科学的山区土地资源开发措施等。生物措施既可减少水土流失、削减地表径流和松散固体物质补给量，又可恢复流域生态平衡，增加生物资

源产量和产值。生物措施是治理泥石流的根本性措施。

表 8－9　泥石流综合治理措施一览表

总　目	分　目	细　目	主要作用
工程措施	治水工程	蓄水工程	调蓄洪水、消除或削减洪峰
		引水、排水沟	引、排洪水，削减或控制下泄水量
		截水沟	拦截滑坡或水土流失严重地段的上方径流
		防御冰雪融化	提前融化冰雪，防止集中融化；加固或清除冰碛堤
		拦沙坝、谷坊	拦蓄泥沙、固定沟床、稳定滑坡、抬高侵蚀基准
	治土工程	挡土墙	稳定滑坡或崩塌体
		护坡、护岸	加固边坡、岸坡，免遭冲刷
		变坡	防止坡面冲刷
		潜坝	固定沟床，防止下切
	排导工程	导流堤	排导泥石流，防止泥石流冲淤危害
		顺水坝	调整泥石流流向，畅排泥石流
		排导沟	排泄泥石流，防止泥石流漫溢成灾
		渡槽、急流槽	在道路上方或下方排泄泥石流，保障线路安全
		明洞	道路以明硐形式从泥石流下通过，保证线路畅通
		改沟	把泥石流出口改到邻沟，保护该沟下游建筑物安全
	停淤工程	停淤场	利用开阔的低洼地区停积泥石流体
		拦泥库	利用宽阔平坦的谷地停积泥石流，削减下泄量
	农田工程	水改旱	减少入渗水量，停积泥石流体，减少地下水
		水渠防渗	防止渠水渗漏，稳定边坡
		坡改梯	防止坡面侵蚀，控制水土流失
		田间排、截水	引、排坡面径流，防止泥沙，稳定边坡，减少侵蚀
		填缝筑埂	防止博渗，拦泥沙，稳定边坡，减少侵蚀
生物措施	林业措施	水源涵养林	涵养水源，减少地表径流，削减洪峰
		水土保持林	控制侵蚀，减少水土流失
		护床防冲林	保护沟床、防止冲刷、下切
		护堤固滩林	加固河堤、保护滩地、控制泥石流危害
	农业措施	等高耕作	减少水土流失
		立体种植	增加复种指数、扩大覆盖面积、减少地表径流
		免耕种植	改善土壤结构，减少土壤侵蚀
		选择作物	选择水保效应好的作物，减少水土流失
	牧业措施	适度放牧	控制牧草覆盖率，减少水土流失
		圈养	保护草场，减轻水土流失
		分区轮牧	防止草场退化，控制水土流失
		改良牧草	提高产草率、覆盖率，减轻水土流失

注：本表摘自吴积善等．泥石流及其综合治理．北京：科学出版社，1993

第五节　岩溶地面塌陷

一、地面塌陷的概念和类型

地面塌陷是地面垂直变形破坏的另一种形式。它的出现是由于地下地质环境中存在着天然洞穴或人工采掘活动所留下的矿洞、巷道或采空区而引起的，其地面表现形式是局部范围内地表岩土体的开裂、不均匀下沉和突然陷落。地面塌陷的平面范围与地下采空区的面积、有效闭合量或洞穴容量等量值有关，一般可由几平方米到几平方公里或更大一些。

按成因，地面塌陷可分为天然地面塌陷和人为地面塌陷两类。如果地面塌陷发生在岩溶地区，则称为岩溶地面塌陷，否则，为非岩溶地面塌陷，后者主要有黄土塌陷、火山熔岩塌陷和冻土塌陷等类型。人为地面塌陷主要是由于地下采矿、过量抽取地下水、地面加载或振动而诱发形成的。

岩溶地面塌陷是一种常见的自然动力地质现象，多发生于碳酸盐岩、钙质碎屑岩和蒸发岩等可溶性岩石分布地区。因此，本节主要叙述岩溶地面塌陷的影响因素、形成机制、危害方式和防治措施。

二、岩溶地面塌陷的影响因素

岩溶地面塌陷指覆盖在溶蚀洞穴发育的可溶性岩层之上的松散土石体，在外动力因素作用下发生的地面变形破坏。其表现形式以塌陷为主，并多呈圆锥形塌陷坑。激发塌陷的直接诱因有降雨、洪水、干旱、地震以及抽水、排水、蓄水等人为因素，因抽水而引发人为塌陷的机率最大。

自然条件下产生的岩溶塌陷一般规模小，发展速度慢，不会给人类生活带来较大的影响。但在人类工程活动中产生的岩溶塌陷规模较大，突发性强，且常出现在人口聚集地区，给地面建筑物和人身安全带来严重威胁，造成地区性的环境地质灾害。

三、岩溶地面塌陷的形成

岩溶洞穴或溶蚀裂隙的存在、上覆土层的不稳定性是塌陷产生的物质基础，地下水对土层的侵蚀搬运作用是引起塌陷的动力条件。自然条件下，地下水对岩溶洞隙充填物质和上覆土层的侵蚀作用也是存在的，不过这种作用很慢，规模一般不大；人为抽采地下水，对岩溶洞隙充填物和上覆土层的侵蚀搬运作用大大加强，促进了地面塌陷的发生和发展。此类塌陷的形成过程大体可分如下四个阶段：

（1）在抽水、排水过程中：地下水位降低，水对上覆土层的浮托力减小，水力坡度增大，水流速度加快，水的侵蚀作用加强。溶洞充填物在地下水的侵蚀、搬运作用下被带走，松散层底部土体下落、流失而出现拱形崩落，形成隐伏土洞。

（2）隐伏土洞在地下水持续的动水压力及上覆土体的自重作用下：土体崩落、迁移，洞体不断向上扩展，引起地面沉降。

（3）地下水不断侵蚀、搬运崩落体隐伏土洞继续向上扩展：当上覆土体的自重压力逐渐接近洞体的极限抗压抗剪强度时，地面沉降加剧，在张性压力作用下，地面产生开裂。

（4）当上覆土体自重压力超过了洞体的极限抗压、抗剪强度时：地面产生塌陷（图 8－11）。同时，在其周围伴生有开裂现象。这是因为土体在向下塌落的过程中，不但在垂直方向产生剪切应力，还在水平方向产生张力所致。

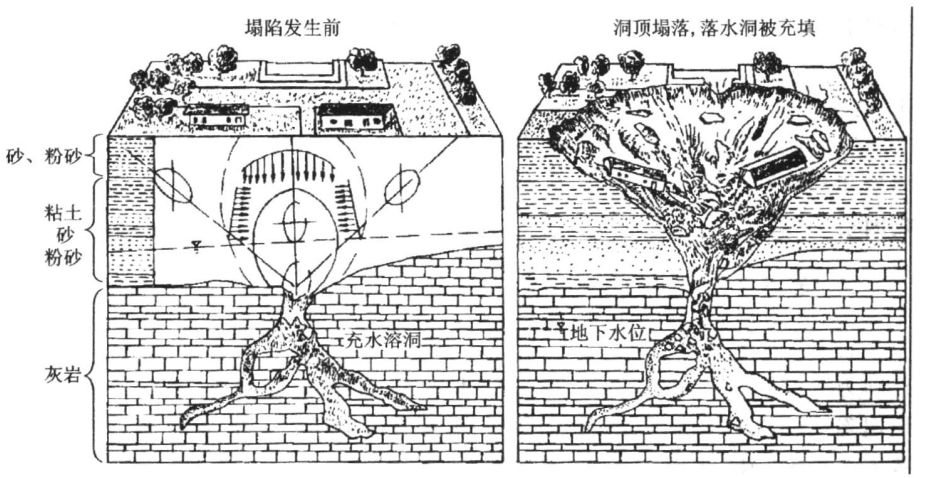


图 8－11　岩溶地面塌陷形成过程示意图

（摘自潘懋等．灾害地质学．北京：北京大学出版社，2001）

四、岩溶地面塌陷的分布规律

1. 塌陷多产生在岩溶强烈发育区

中国南方许多岩溶矿区的资料说明，浅部岩溶愈发育，富水性愈强，地面塌陷愈多，规模愈大。

2. 塌陷主要分布在第四系松散盖层较薄地段

地面塌陷的分布，受第四系厚度和岩性控制。在其他条件相同的情况下，盖层愈厚，成岩程度愈高，塌陷愈不易产生。相反，盖层薄且结构松散的地区，则易形成地面塌陷。如广东沙洋矿区疏干漏斗中心部位，盖层厚度为 40～130 m，地

面塌陷少而稀。而在漏斗中心的东南部和东部边缘地段，因盖层厚度较小（8～23 m），地面塌陷多而密。

3. 塌陷多分布在河床两侧及地形低洼地段

这些地区的地表水和地下水容易汇集并进行强烈交替，在自然条件下就可能发生潜蚀作用，形成土洞，进而产生地面塌陷。

4. 塌陷常分布在降落漏斗中心附近

由采、排地下水而引起的大量的地面塌陷，绝大部分产生在地下水降落漏斗影响半径范围以内，尤其分布在近降落漏斗中心及地下水的主要径流方向上。

五、岩溶地面塌陷的危害

岩溶塌陷的产生，一方面使岩溶区的工程设施，如工业与民用建筑、城镇设施、道路路基、矿山及水利水电设施等遭到破坏；另一方面造成岩溶区严重的水土流失、自然环境恶化，同时影响各种资源的开发利用（图 8－12）。



图 8－12　岩溶地面塌陷的危害形式

（摘自潘懋等，灾害地质学，北京：北京大学出版社，2001）

1. 对矿山的危害

地面塌陷可成为矿坑充水的诱发型通道，严重威胁矿山开采。如淮南谢家集矿区，因矿井疏干排水，在 1978 年 7 月，河底岩溶盖层很快产生塌陷，河水被瞬时吸入地下，岸边的房屋也遭受破坏。湖北大冶铁矿，1978 年平巷突水引起柯家沟河谷地面塌陷，出现 70 多个陷坑，河水沿塌陷坑漏入地下而断流，岸边有 4 000 m^2 建筑物被毁，矿山专用铁路损坏，高压输电线遭破坏，造成经济损失近

百万元。

2. 对城市建筑的危害

在城市地区，地面塌陷常常造成建筑物破坏、市政设施损毁，交通线路中断等危害。如湖北武汉中南轧钢厂，因附近开采岩溶地下水，于 1977 年在该厂区内发生地面塌陷，形成 5 个陷坑，大者直径在 16 ~ 22 m，深 8 ~ 10 m，共造成 1 500 t生产用煤和 600 t 钢坯陷入地下。1996 年发生于桂林市市中心的体育场塌陷，虽然塌陷坑直径只有 9.5 m，深度也只有 5 m，但由于塌陷紧靠“小香港”商业街，造成整个商业街关闭 15 d，营业额损失近千万元。1997 年 11 月 11 日，桂林市雁山区柘木镇岩溶塌陷共形成塌陷坑 51 个，影响面积达 0.2 km^2，使近 100 间民房受到破坏，直接损失达 300 多万元。

3. 对道路交通的影响

1987 年 8 月 8 日，辽宁省瓦房店三家子发生岩溶塌陷，范围 1.2 km^2，共有大小陷坑 25 个。塌陷使长春一大连铁路约 20 m 长路基遭到破坏，累计停运 8 小时 5 分。

4. 对坝体的影响

1962 年 9 月 29 日晚，云南省个旧市云锡公司新冠选矿厂火谷都尾矿坝因岩溶塌陷突然发生垮塌，坝内 150×10^4 m^3 泥浆水奔腾而出，冲毁下游农田 530 hm^2 和部分村庄、公路、桥梁等，造成 174 人死亡，89 人受伤。

六、岩溶地面塌陷的防治

1. 岩溶地面塌陷的预防

要避免或减少地面塌陷的产生，根本的办法是减少岩溶充填物和第四系松散土层被地下水侵蚀、搬运。

①采、排水井设置合理的过滤器装置，避免或减少土粒进入井内被水带走。

②采、排地下水时，避免采用大降深，以降低地下水流速和侵蚀搬运能力。

③调整开采层位，封堵岩溶发育，并与覆盖层相连通的浅层水，开采深层地下水。

④矿山疏干排水时，对地下岩溶通道进行局部注浆或帷幕灌浆处理，减小矿井外围地段地下水位下降幅度。

⑤加强地下水动态观测，合理开采地下水。

2. 塌陷的治理措施

治理岩溶地面塌陷的措施主要有回填、改道、拦截、灌浆、加固等。

（1）回填塌陷坑：当坑底未见基岩出露时，宜采用粘土回填、夯实，并使其高出地面 0.2 ~ 0.5 m。如塌陷坑底基岩出露时，先用块石封闭洞口，然后用粘土回填、夯实。

（2）局部改河道：为防止河水直接灌入矿区坑道，对河床地段的塌陷坑，除进行清基封洞口外，还可考虑用局部改河道的方法，使河道绕过危险区，减少塌陷发生的可能。

（3）拦截河水：对于河床边的塌陷，在河床与塌陷之间修筑拦水坝，将河水与塌陷隔开。

（4）灌浆堵洞：这种方法可以制止因矿坑突水引起的地面塌陷。

（5）加固处理：建筑物地基发生塌陷时，应做加固处理。加固方法有木桩加固和钢筋混凝土桩加固两种。在预测可能产生塌陷的地区进行建设时，也可采用加固地基的方法，防止地面塌陷对建筑物的破坏。

第六节　地　裂　缝

在自然因素和人为因素作用下，地表岩土体产生开裂并在地面形成一定长度和宽度裂缝的现象，称为地裂缝。地裂缝一般产生在第四系松散沉积物中，与地面沉降不同，地裂缝的分布没有很强的区域性规律，成因也比较多。如果地裂缝产生在人类活动区，特别是人口集中、经济发达的城市，则会造成严重的危害。

一、地裂缝的特征

地裂缝的特征主要表现为发育的方向性、延展性和灾害的不均一性与渐进性。

（一）地裂缝发育的方向性与延展性

地裂缝常沿一定方向延伸，在同一地区发育的多条地裂缝延伸方向大致相同，在平面上一般呈直线状、雁行状或锯齿状条带状分布。据统计，河北平原的地裂缝以 NE5°和 NW85°最为发育。

（二）地裂缝灾害的不均一性

地裂缝以相对差异沉降为主，其次为水平拉张和错动。地裂缝的灾害效应在横向上由主裂缝向两侧致灾强度逐渐减弱，且地裂缝两侧的影响宽度以及对建筑物的破坏程度具有明显的非对称性。同一条地裂缝的不同部位，地裂缝活动强度及破坏程度也有差别，在转折和错列部位相对较重，显示出不均一性。如西安大雁塔地裂缝东段的活动强度最大，灾害最严重，中段灾害次之，西段的破坏效应很不明显。在剖面上，危害程度自下而上逐渐加强，累计破坏效应集中于地基基础与上部结构交接部位的地表浅部十几米深的范围内。

（三）灾害的渐进性

地裂缝灾害是因地裂缝的缓慢蠕动扩展而逐渐加剧的。因此，随着时间的推移，其影响和破坏程度日益加重，最后可能导致房屋及建筑物的破坏和倒塌。

（四）地裂缝灾害的周期性

地裂缝活动受区域构造运动及人类活动的影响，因此，在时间序列上往往表现出一定的周期性。当区域构造运动强烈或人类过量抽取地下水时，地裂缝活动加剧，致灾作用增强，反之则减弱。

二、地裂缝的成因类型

地裂缝是累进性发展的渐进性灾害。按其成因可分为两大类：一种是内动力形成的构造地裂缝，如地震裂缝、基底断裂活动地裂缝、隐伏裂隙开启裂缝等；另一种是非构造型，即外动力作用形成的地裂缝，如松散土体潜蚀地裂缝、黄土湿陷地裂缝、膨胀土胀缩地裂缝、滑坡地裂缝等。

构造地裂缝的延伸稳定，不受地表地形、岩土性质和其他地质条件影响，可切错山脊、陡坎、河流阶地等线状地貌。构造地裂缝的活动，具有明显的继承性和周期性。

构造地裂缝在平面上常呈断续的折线状、锯齿状或雁行状排列；在剖面上近于直立,呈阶梯状、地堑状、地垒状排列。

三、地裂缝的规模及分布

地裂缝的分布没有很强的区域性规律。从规模上看，多数地裂缝的长度在数十米至数百米，宽度在数厘米至数十厘米，垂直落差在数厘米至数十厘米，有些没有垂向变形。最长者可达几公里，最宽者可达 1 米以上，垂直落差最大者也可达 1 米。

中国地裂缝类型复杂，除伴随地震、滑坡、冻融以及特殊土的胀缩或湿陷活动产生的地裂缝外，主要是断裂构造蠕变活动而产生的构造地裂缝。断裂蠕变地裂缝的分布十分广泛，在华北和长江中下游地区尤为发育。汾渭盆地、太行山东麓平原和大别山东北麓平原形成了三个规模巨大的地裂缝发育地带。此外，在豫东、苏北以及鲁中南等地区，还有一些规模较小的地裂缝发育带。目前，中国地裂缝在陕西、河北、山东、广东、河南等 17 个省（区、市）共有 430 多处,1 073 条以上,总长超过 346.78 km。

四、地裂缝的危害

地裂缝活动使其周围一定范围内的地质体内产生形变场和应力场，进而通过地基和基础作用于建筑物。由于地裂缝两侧出现的相对沉降差以及水平方向的拉张和错动，可使地表设施发生结构性破坏或造成建筑物地基的失稳。

各种地裂缝对人类的影响主要表现为破坏地表建筑物和其他人工设施，危害居民生命财产安全。西安地裂缝灾害已闻名中外，影响范围超过 150 km^2 ,给

城市建设和人民生活造成了严重的危害。地裂缝所经之处道路变形、交通不畅，地下输排水管道断裂、供水中断、污水横溢 楼房、车间、校舍、民房错裂,围墙倒塌；文物古迹受损。该市主要地裂缝有 10 条，其中最长的一条达 10 km ,合计总长度约 40 km 。地裂缝均呈北东偏东方向平行伸展。各年平均位错率为 1.33 mm。由于地裂缝活动，使多所大专院校和中小学、91 家工厂、97 个企事业单位和 41 个村庄受害；有 132 幢楼房遭受破坏,1 057 间房屋受损 有 60 处主干道、10 处地下管道、3 眼深水井和 427 堵围墙等遭受不同程度的破坏，仅房屋毁坏造成的经济损失就达 2 165 万元。

五、地裂缝灾害防治措施

地裂缝灾害多发生在由主要地裂缝所组成的地裂缝带内，所有横跨主裂缝的工程和建筑都可能受到破坏。对自然成因的地裂缝应加强调查研究，开展地裂缝易发区的区域评价，以避让为主，从而避免或减轻灾害损失。对人为成因的地裂缝关键在于预防，合理规划，严格禁止地裂缝附近的不合理工程活动。

(一)避让措施

在构造成因地裂缝发育区进行开发建设时，首先应进行详细的工程地质勘察，调查研究区域构造和断层活动历史，对拟建场地查明地裂缝发育带及潜在危害区，作好城镇发展规划、合理规划建筑物布局，使工程设施尽可能避开地裂缝危险带，特别要严格限制永久性建筑设施横跨地裂缝。

对已在地裂缝危害带内修建的工程设施，应根据具体情况采取加固措施进行加固。如跨越地裂缝的地下管道工程，可采用外廊隔离、内悬支座式管道并配以活动软接头连结措施等预防地裂缝的破坏。对已遭受地裂缝严重破坏的工程设施，需进行局部拆除或全部拆除，防止对整体建筑或相邻建筑造成更大规模的破坏。

（二）控制人为因素的诱发作用

对于非构造地裂缝，可针对其发生原因，采取措施防止或减少地裂缝的发生。例如，采取工程措施防止发生崩塌、滑坡，通过控制抽取地下水防止和减轻地面沉降塌陷等；对于黄土湿陷裂缝，主要应防止降水和工业、生活用水的下渗和冲刷；在矿区井下开采时，根据实际情况，控制开采范围，增多、增大预留保护柱，防止矿井坍塌诱发地裂缝。

第九章　地质环境与人体健康

第一节　表生环境地球化学特征

一、地壳中的元素

岩石圈是地球的固体外壳，它是由岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类岩石构成的。地表环境中由于裸露的岩石类型不同，因此构成了不同地带环境中元素背景的差异性。在整个地球演化过程中，上述三大类岩石类型在各种动力地质作用下，不断地形成和转化。它们的化学成分是构成岩石圈的基本岩石成分，也是自然环境中岩石化学成分的本底含量。

地壳中的元素含量是指在地壳形成和演化过程中，不同地壳部位和地质体中元素的平均含量。它是地球圈层分异演化的结果。通常将地壳中元素的平均含量称为丰度值,即‘克拉克值”。

地壳中的元素尤其在地表环境条件下的元素绝大多数以化合物形式存在，只有极少数以原子结合成单质形式存在。元素之间相互结合成化合物，除了受外界环境中的物理化学条件影响外，还取决于原子本身的结构和性质。

自然环境中元素的存在形式主要有独立矿物、类质同像混入物、胶体吸附、有机化合物和络合物等。它们都是元素的共生组合形式。

人类在地球上出现以后，人类活动对地表环境化学演化产生越来越明显的影响。人类活动的大量废弃物排放到岩石圈表面，进入水、生物和大气系统，参与环境中的各种化学反应，可能改变局部的或全球的环境化学性质。

二、表生环境中元素的迁移转化

在宇宙中，一切物质均处于不停地运动之中。组成地壳物质的化学元素也在不断地进行着地球化学循环。在地表环境中，这种地球化学循环运动主要表现为元素的迁移转化。在一定的物理化学条件或人类地球化学活动的作用和影响下，地表环境中的元素随时空的变化而发生迁移转化，并在一定环境下发生重新组合与再分布，形成元素的分散或聚集，由此而产生元素的“缺乏”或‘过剩”。

（一）表生环境中元素迁移的特点

元素在地表环境中的迁移与在地壳内部的迁移显然是不相同的，因为地表环境与地壳内部的环境条件不同。元素的迁移特点除受自然地理条件影响外，还明显地受人类地球化学活动的影响。

（1）地表环境是地球内部能量释放与太阳辐射能量作用的交织带：由于太阳辐射能量占优势，控制着地表环境呈明显的周期性、地带性和地区性变化，因而地表环境中元素的迁移过程亦具有周期性、地带性和地区性变化特点。

（2）地表环境中水是较强的天然溶解剂：水在大气圈和岩石圈上部进行着不断的溶解循环，出现以淋滤与淀积为主的化学元素的水迁移过程。人类活动对水资源的开发利用，更加剧了元素在地表环境中的迁移作用。

（3）地球表面是生物的生存环境：各种生命体活动对元素的吸收（或摄入）与分解（排泄）造成元素的生物小循环。

（4）地球表面的地质与地貌条件不同：由于地球表面地质、地貌条件的不同，使地表环境的物理化学条件如氧化还原、酸碱度、氧化还原电位等也有所不同，元素在迁移过程中发生再分配和重新组合的地质地理迁移循环。

（5）地表环境是人类生存与活动的地方：人类活动影响元素的迁移过程，在局部地区可能改变元素的迁移环境，引起某些元素和化合物的浓集。

（二）地表环境中元素的迁移类型

地表环境中元素的迁移包含元素空间位置的移动以及存在形态的转化两层意思，前者指元素从一地迁移到另一地；后者则指元素在空间迁移过程中从一种形态转化为另一种形态。

地表环境中的元素迁移需要借助某种介质进行。介质不同，其迁移类型亦不同。按介质类型，可将元素的迁移分为空气迁移、水迁移和生物迁移三种形式。

1. 按介质类型划分

（1）空气迁移：空气迁移是指元素以气态分子、挥发性化合物和气溶胶等形式在空气中进行的迁移。属于空气迁移的化学元素有 O、H、N、C、I 等。以气溶胶形式迁移只是在近代工业发展以来，因工业废物的大量排放才出现的一种形式。

（2）水迁移：水迁移是指元素在水溶液中以简单的或复杂的离子、络离子、分子、胶体等状态进行的迁移。元素可以胶体溶液或真溶液的形态随地表水、地下水、土壤水、裂隙水和岩石孔隙水等发生迁移运动。水迁移是地表环境中元素迁移的最主要类型，大多数元素都是通过这种形式进行迁移转化的。

（3）生物迁移：土壤、水、肥料或农药中的元素通过生物体的吸收、代谢和生物本身的生长发育以至死亡等过程实现的迁移，属于生物迁移。这是一种非常复杂的元素迁移形式，不同的生物种或同一生物种不同的生长期对元素的吸收、迁移均有差异或不同。

通常，环境中元素的迁移方式并不是决然分开的，有时同一种元素既可呈气态迁移，又可呈离子态随水迁移。如组成原生质的 O、H、C、N 等元素，在某些情况下呈气态分子（O_2、CO_2、NH_3、CH_4）形式进行迁移；在另外情况下则呈离子态（如 SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、NH_4^+ 和 NO_3^- 等）随水进行迁移。

2. 按物质运动的基本形态划分

按物质运动的基本形态还可将元素迁移划分为机械迁移、物理化学迁移与生物迁移三种类型。

（1）机械迁移：指元素及其化合物被外力机械的搬运而进行的迁移。如水流的机械迁移、气体的机械迁移和重力机械迁移等。

（2）物理化学迁移：指元素以简单的离子、络离子或可溶性分子的形式，在地表环境中通过物理化学作用所进行的迁移。

（3）生物迁移：通过生物体而发生的元素迁移。

（三）元素的性质及其迁移强度

地壳中绝大多数元素呈化合物状态，所以在讨论地壳中元素迁移问题时，应注意元素化学键的特性。化学键分为离子键和共价键两种基本类型。一般来说离子键型矿物比共价键型矿物更易溶解，所以也更易迁移。电负性差别大的元素键合时，多形成离子键型化合物，易溶于水，迁移性好，如 NaCl。电负性相近的元素键合时，多形成共价键型化合物，如 CuS、FeS_2 等，它们不易溶于水，迁移性不好。

元素的化合价愈高，溶解度就愈低。如氯化物（Cl^-）较硫酸盐（SO_4^{2-}）易溶解，硫酸盐较磷酸盐（PO_4^{3-}）易溶解。

同一元素其化合价不同，迁移能力也不同。低价元素的化合物其迁移能力大于高价元素的化合物。例如 $Fe^{2+} > Fe^{3+}$，$Cr^{3+} > Cr^{6+}$，$Mn^{2+} > Mn^{4+}$，$S^{2+} > S^{6+}$ 等。

原子半径或离子半径是元素重要的地球化学特性。它影响土壤对阳离子的吸附能力。土壤对同价阳离子的吸附能力随离子半径增大而增大。就化合物而言，相互化合的离子其半径差别愈小，溶解度也愈小，如 $BaSO_4$、$PbSO_4$ 的溶解度都较小。离子半径的差别愈大，则溶解度愈大，如 $MgSO_4$。

总之，自然界中元素的迁移强度有很大的差异。А.И. 彼列尔曼采用“水迁移系数”来表示元素迁移的强度，并测得了风化壳中元素的水迁移序列。他将这些元素分为强淋出的（Cl、Br、I、S）、易淋出的（Ca、Mg、Na、F 等）、活动的（Cu、Ni、Co 等）、惰性的和实际上不活动的（Fe、Al、Ti 等）五个等级。

（四）影响地表环境中元素迁移的外在因素

同一种元素在不同自然景观中的迁移能力是极不相同的。影响元素迁移的最大外力是活的有机体和天然水。主要的外在因素有环境的 pH 值、氧化还原电位（Eh）、胶体、腐殖质、气候和地质地貌条件等。

1. 环境的 pH 值

表生环境中的 pH 值主要指土壤和天然水的 pH 值。土壤酸度可分为活性酸度与潜性酸度两类。前者为土壤溶液中游离的氢离子形成的酸度，用 pH 值来表示；后者为吸附于土壤胶体上的氢离子所形成的酸度，包括代换性酸（用 pH 表示)和水解性酸(用 mol/g 表示）。活性酸度和潜性酸度是一个平衡系统的两个方面，二者处于动态平衡之中。一般情况下，潜性酸度远远大于活性酸度。土壤的酸度主要来源于土壤溶液中各种有机酸类（如草酸、丁酸、柠檬酸、乙酸等)和无机酸类(如碳酸、磷酸、硅酸等)。

天然水的 pH 值主要受风化壳土壤酸碱度的影响。腐殖酸和植物根系分泌出的有机酸，无疑是影响天然水 pH 值的另一个重要方面。天然水的 pH 值大致与土壤带的 pH 值相吻合。

在地表环境中，pH 值可影响元素或化合物的溶解与沉淀，决定着元素迁移能力的大小。大多数元素在强酸性环境中形成易溶性化合物，有利于元素的迁移；在酸性和弱酸性水中，有利于 Ca^{2+}、Sr^{2+}、Ba^{2+}、Ra^{2+}、Cu^{2+}、Zn^{2+}、Cd^{2+}、Cr^{3+}、Fe^{2+}、Mn^{2+}、Ni^{2+} 的迁移；在碱性水中($pH>8$) Fe^{2+}、Mn^{2+}、Ni^{2+} 等元素很少迁移，而 Cr^{6+}、Se^{4+}、Mo^{2+}、V^{5+}、As^{5+} 等则易于迁移。在地下水的 pH 为 6～9 时，碱金属和碱土金属易于迁移，而在强酸性及强碱性条件下，可能生成氢氧化物沉淀，不利于迁移，Hg、Cd、Pb、Zn 等金属具有很强的亲硫性和亲氧性，在低 pH 值条件下发生水解，形成金属的羟基络合物，能促进这些元素在环境中的迁移。

2. 氧化还原电位(Eh)

环境中的氧化还原条件对元素的迁移具有一定的影响。一些元素在氧化环境中可进行强烈迁移，如硫、铬、钒等元素在氧化作用强烈的干旱草原和荒漠环境中形成易溶性的硫酸盐、铬酸盐和钒酸盐而富集于土壤和水中。在以还原作用占优势的腐殖酸环境中（如沼泽），上述元素便形成难溶的化合物而不能迁移。

相反，另一些元素如 Fe、Mn 等，在氧化环境下形成溶解度很小的高价化合物，难于迁移；而在还原环境下，则形成易溶的低价化合物，发生强烈迁移。

3. 络合作用

在地表环境中，重金属元素的简单化合物通常很难溶解，但在它们形成络离子以后，则易于溶解发生迁移。据有关研究，羟基络合作用与氯离子络合作用能促进大量重金属在地表环境中的迁移。羟基对重金属的络合作用实际上是重金属离子的水解反应，重金属能在低 pH 值下水解，从而提高重金属氢氧化物的溶解度。氯离子作用对重金属迁移的影响主要表现在两个方面：一是显著提高难溶重金属化合物的溶解度；二是减弱胶体对重金属的吸附作用。

络合物的稳定性对重金属的迁移能力也有影响。络合物越稳定，越有利于重金属迁移；反之，络合物易于分解或沉淀，不利于重金属迁移。

4. 腐殖质

腐殖质对元素的迁移主要表现为有机胶体对金属离子的表面吸附和离子交换吸附作用，以及腐殖酸对元素的螯合作用与络合作用。在腐殖质丰富的环境中，Cu、Pb、Zn、Fe、Mn、Ti、Ni、Co、Mo、Cr、V、Se、Ca、Mg、Ba、Sr、Br、I、F等元素可被有机胶体吸附，并随水大量迁移。腐殖质与 Fe、Al、Ti、U、V 等重金属形成络合物，较易溶于中性、弱酸性和弱碱性介质中，并以络合物形式迁移；在腐殖质缺乏时，它们便形成难溶物而沉淀。

5. 胶体吸附与元素迁移

胶体使元素迁移的作用主要发生在气候湿润地区，这里的天然水呈酸性，且有机质丰富，有利于胶体的形成。元素常以胶体状态发生迁移。在湿润地区，胶体最易吸附的元素有 Mn、As、Zr、Mo、Ti、V、Cr 和 Th 等，其次有 Cu、Pb、Zn、Ni、Co、Sn 等元素。而在气候干旱地区，天然水呈碱性，有机质很少，不利于胶体的形成，因而由胶体使元素迁移的可能性极小。

各种胶体对元素的吸附具有选择性。例如，褐铁矿胶体易吸附 V、P、As、U、In、Be、Co、Ni 等元素；锰土胶体易吸附 Li、Cu、Ni、Co、Zn、Ra、U、Ba、W、Ag、Au、Tl 等；腐殖质胶体易吸附 Ca、Mg、Al、Cu、Ni、Co、Zn、Ag、Be 等；粘土矿物胶体则常吸附 Cu、Ni、Co、Ba、Zn、Pb、U、Tl 等元素。

6. 气候条件

气候条件对地表环境中元素迁移的影响主要表现在直接影响和间接影响两个方面。

（1）直接影响：地表环境中化学元素的迁移形式主要是在水介质中发生的物理化学迁移，而气候变化的主要因素是降水量和热量。降水量的多少和干燥程度以及温度的高低，对化学元素的迁移有重大影响。在炎热的湿润地区，各种地球化学作用反应剧烈，原生矿物多高度分解，淋溶作用十分强烈，风化壳和土壤中的元素被淋失殆尽，结果使水土均呈酸性反应，元素较贫乏，腐殖质富集，为还原环境。在干旱草原、荒漠气候带，降水量少，阳光充足，蒸发作用十分强烈，水的淋溶作用微弱，各种地球化学作用的强度较弱，速度也十分缓慢。地表环境中富集大量氯化物、硫酸盐等盐类。许多微量元素也大量富集，尤以 Ba、Sr、Mo、Ph、Zn、As、Se、B 等元素为最显著。

（2）间接影响：主要表现在生物迁移作用方面，气候愈温暖湿润，生物种类和数量愈多，地表环境中的有机质或腐殖质愈多，生物吸收、代谢各种元素的过程愈强烈。地表环境中的许多元素可通过大量生物的吸收、代谢作用进行迁移。而在干旱气候条件下，生物种类和数量很少，地表有机质和腐殖质缺乏，元素的生物迁移微弱，地表环境中的元素多发生富集。

7. 地质与地貌

地质构造、岩性等地质条件均对元素的迁移产生影响。岩层褶皱剧烈、断裂构造发育、节理错综复杂的地区，侵蚀作用、地球化学作用和元素的迁移比较强烈，元素随水流或其他介质大量迁移。坚硬的岩石难以侵蚀风化；质地软弱的岩石易于风化侵蚀，其中元素随淋失作用、搬运作用而迁移。此外，与地质构造密切相关的火山作用给地表环境带来某些元素，如 B、F、Se、S、As 和 Si 等；与岩浆活动有关的多金属矿床可使地表环境中富含 Hg、As、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、V、W、Mo 等元素，从而对元素的迁移、聚集产生一定的影响。

地形地貌条件对元素的迁移影响十分明显，一般山区为元素的淋失区，低平地区为元素的堆积富集区。对内陆河流而言，坡降较大的中上游为元素的淋失地段，坡降较平缓的下游则为元素的堆积地段。研究表明，因某些元素“缺乏”引起的地方病常常分布在元素淋失区；因某些元素“过剩”而引起的地方病常发生在元素堆积区。

三、表生环境地球化学的地带性特征

地球上的气候、水文、生物、土壤等，都与温度的变化密切相关。伴随地表热能的纬度分布规律，气候、水文、植物、土壤等呈现明显的地带性分布规律，表现为纬度地带性、经度地带性和垂直地带性。

元素的化学活动与水、温度、生物、土壤等因素密切相关。因此，表生地球化学环境也具有地带性规律，它与气候、植被、土壤的地带性基本一致（表 9－1）。

表 9－1　中国的自然地带与地球化学环境地带

位置	气候带	植被带	土壤带	地球化学环境带
东部地区	寒温带	落叶针叶林	棕色针叶林土	酸性，弱酸性还原和中性氧化的地球化学环境
	温带	落叶阔叶林	暗棕壤、棕壤褐土	
	亚热带	常绿阔叶林	黄棕壤、黄红壤、红壤砖红壤性土、砖红壤	
	热带	季雨林		
西、北部地区	温带	森林草原	黑钙土、黑垆土	中性氧化和碱性、弱碱性氧化的地球化学环境
		草原	栗钙土、灰钙土	
		荒漠、半荒漠	灰棕漠土、风沙土	
		荒漠、裸露荒漠	棕漠土、风沙土、盐土	
	高寒带	森林草甸	高草甸土	中性、碱性、弱碱性还原的地球化学环境
		草原	高山草原土	
		荒漠	高山寒漠土	

各种自然带与地球化学环境之间关系十分密切，它们互相联系、互相影响、互相制约。地球化学环境按地理纬度从北向南可分为：酸性、弱酸性还原的地球化学环境；中性氧化的地球化学环境；碱性、弱碱性氧化地球化学环境；酸性氧化的地球化学环境。

（一）酸性、弱酸性还原的地球化学环境带

本带气候较为寒冷、湿润，年降水量约为 600～1 000 mm，蒸发微弱，水分相对充裕，植被茂盛，土壤湿度大，腐殖质大量堆积，透气性不良，多属于还原环境。在地表水、潜水中含有大量腐殖酸，土壤呈酸性反应，pH 值多为 3.5～4.5。植物残体得不到彻底分解，长期处于半分解状态，多数元素被禁锢在植物残体中，环境中的化学元素缺乏。

富含腐殖质的酸性还原环境决定了本带的地球化学作用的性质和强度。本带的分解淋溶作用较强，在酸性条件下，Ca、Mg、K、Na、Sr、B、I、Cu、Co、Ni、Cr^{3+}、Mn^{2+}、Fe^{2+}、Al、Si 等元素易从矿物中淋溶和迁移。尤其是 Fe^{2+}、Mn^{2+} 具有较高的迁移能力。这些元素大多被有机胶体所吸附，或形成金属有机络合物、螯合物，被水迁移。由于生物必需元素缺乏，常出现许多地方病或地方性疾病。

（二）中性氧化的地球化学环境带

本带热量较充分，年降水量为 600～1 200 mm，蒸发作用不强，地表水通畅，潜水位较低，土壤湿度适中，透水性较好，多为氧化环境。植被不十分发育，而且植物残体分解较彻底，很少有腐殖质堆积。本区元素的淋溶作用不强，富集作用亦不显著，无明显的过剩或不足的现象。天然水多为中性，pH 值在 7 左右 矿化度为 500 mg/L 左右，水质一般较好。

本带所属范围较广，包括森林草原景观和与其相邻的草原景观和森林景观。在中国，本带的特点是天然植被几乎砍伐殆尽，取而代之的是大面积的农田和局部的次生林。

（三）碱性、弱碱性氧化的地球化学环境带

本带气候干旱，年降水量为 250～400 mm，或更少 热量充足，蒸发强烈，水分不足，地表水系不发育，潜水位很低，土壤的透气性良好，为氧化环境。本带属于干旱、半干旱草原，包括部分沙漠区，植被稀少，且残体被彻底分解，腐殖质贫乏。地表水、潜水多属碱性，pH 值为 8～10，矿化度 500～1 000 mg/L，甚至更高，在碱性介质中，V^{5+}、Cr^{6+}、As^{5+}、Se^{6+} 等元素活性较大，易迁移。但由于淋溶作用微弱，蒸发强烈，上述元素仍富集于该环境中的水土和生物体中。此外，Ca、Na、Mg、SO_4^{2-}、Cl^-、F、B、Zn、Ni 等也在土壤中大量富集。

在本环境中的大部分地区，生物元素是过剩的。因而，流行某些地方病。如氟斑牙、氟中毒，有时还出现砷中毒、硒中毒，或因环境中 As 过剩而产生皮肤癌。

（四）酸性氧化的地球化学环境带

本带热量丰富，水分充沛，年降水量为 1 000～3 000 mm 左右，植被发育，元素的生物地球化学循环强烈，风化、淋溶作用也十分强烈。风化壳中的 Ca、Na、Mg、K、Se、Mo、Cu、S、Li、Rb、Cs、Sr、B、I 等元素大量地淋溶流失，而残留的 Fe_2O_3、Al_2O_3 和 SiO_2 形成红色的风化壳。

在本区发育着典型的砖红壤和广泛分布的红壤，局部为黄壤。由于碱土元素缺乏，土壤呈酸性，pH 值为 3.5～5，地表水和潜水多为酸性软水，pH 值小于 6。

本区属于热带、亚热带雨林景观，大致分布于赤道南北 30。以内的范围内。水土和食物中碘异常缺乏，地方性甲状腺肿的分布十分广泛。因钠不足以致影响人体发育，而出现矮小症。

（五）非地带性的地球化学环境

在自然界中，某些局部地球化学环境不受地理纬度分带的影响。例如，在湿润的森林景观带可以出现高氟区、高硒区；而在干旱的荒漠景观中可以出现沼泽，造成局部腐殖质堆积的环境。

非地带性的地球化学环境主要可分为两种类型，即元素富集的氧化的地球化学环境和腐殖质富集的还原的地球化学环境。例如，在某些火山、温泉分布区可造成局部环境水和土中 S、F、Si、Se、As 等元素的富集。在某些煤系地层、凝灰岩分布区和硫化矿床的氧化带，Se 高度富集。在某些多金属矿区或金属矿床的氧化带，水土中富集 Cu、Pb、Zn、Mo、Cd、Hg 等元素。在上述环境中因某些元素的过剩，可导致人类和牲畜的许多地方性中毒性疾病。

非地带性的腐殖质富集的地球化学环境以沙漠中的沼泽最为典型。例如，在毛乌素沙漠、昭乌达盟等地的沙漠区，有许多小范围的沙丘间的沼泽，有的沼泽底部堆积有薄层草炭，有机质含量高。

四、人类活动对原生地球化学环境的影响

大气圈、水圈和生物圈参与地表化学环境的演化。人类是生物圈的重要组成部分，人类活动对地表化学环境产生越来越明显的影响。20 世纪以来，伴随人口的增加和社会经济的发展，各种生产和生活活动向地表环境中排放大量化学元素或化合物，与原生地球化学环境叠加，并参与环境中的各种化学反应，使地表地球化学环境演化更加复杂。

人类活动对地球化学环境最明显的影响是环境污染。其中最重要的是工业、农药和化肥对水、大气、土壤等环境和生物的污染。多种化学元素或化合物通过食物链作用，在人体中产生积累，严重影响人体健康。

目前，人类活动对地球化学环境产生的最主要、最常见的污染是有毒化学元

素和农药污染。这两种污染通过食物链，对人体健康产生严重危害。

第二节　原生环境地球化学异常与人体健康

地质环境是由地壳、空气、水等所组成的，也称原生环境。人类在其长期进化中，在利用和改造自然环境的同时受到环境的制约，并最终适应了环境。原生地球化学环境对人体有良性和恶性两个方面的作用。温泉水中含有的矿物质对人体皮肤、关节等疾病的治疗作用就属于良性作用；特定地球化学环境条件下形成的“矿泉水”含有钙、镁、锶等元素，是人体健康所需的有用元素，因而被大量开发饮用。然而，由于地球化学元素的地带性分布规律，某些人体组织不可缺少的微量元素在一定的环境中却非常缺乏或含量过高，结果导致生活在这些环境中的人群因对某些微量元素的摄入量不足或摄入过多而发病。

在人类活动影响下，特别是当人类向环境中排放有毒有害废弃物时，会改变原生地球化学环境，形成环境污染。环境污染物反过来又作用于人体，使人类健康受到危害。

一、地球化学元素与人体健康

1. 人体中元素含量与地质环境中元素的相关性

人体中各种元素组成的平均丰度与地壳岩石中的平均丰度具有一定的相关性。20 世纪 70 年代初，英国地球化学家汉密尔顿做了一个科学实验，他调查了 220 名英国人血液中 60 种化学元素的含量。同时测定了地壳中各相应元素的含量，用含量均值的对数绘制了元素相关图（图 9－1）。

从图 9－1 可见，除了人体原生质中的主要成分碳、氢、氧、氮和地壳中的主要成分硅以外，其他化学元素在人体血液中的含量和地壳中这些元素的含量分布规律具有惊人的相似性，由此可以说明人体化学组成与地壳演化具有亲缘关系。现代人体的化学成分是人类长期在自然环境中吸收交换元素并不断进化、遗传、变异的结果。人体中某种元素的含量与地壳元素标准丰度曲线发生偏离，就表明环境中该种元素对人体健康产生了不良影响。

2. 微量元素的生理功能

摄入人体中的各种微量元素，有属于人体必需的，没有它们人就无法生存或不能保持健康状况，如氟、锌、钴、溴、铜、钒、硒、锰、碘、镍、钼、铬等有些元素对人体不起生理功能作用，如锆、铷、铌、铝、硼、金、银、钛等有些元素对人体则具有毒害作用，如砷、镉、汞、铅、锑、铊及稀土金属等。人体对各种微量元素的需求量取决于年龄、生理条件、环境条件及遗传因素等。据联合国世界卫生组织和文献公布，成年人对一些必需微量元素的需求量如表 9－2 所示。

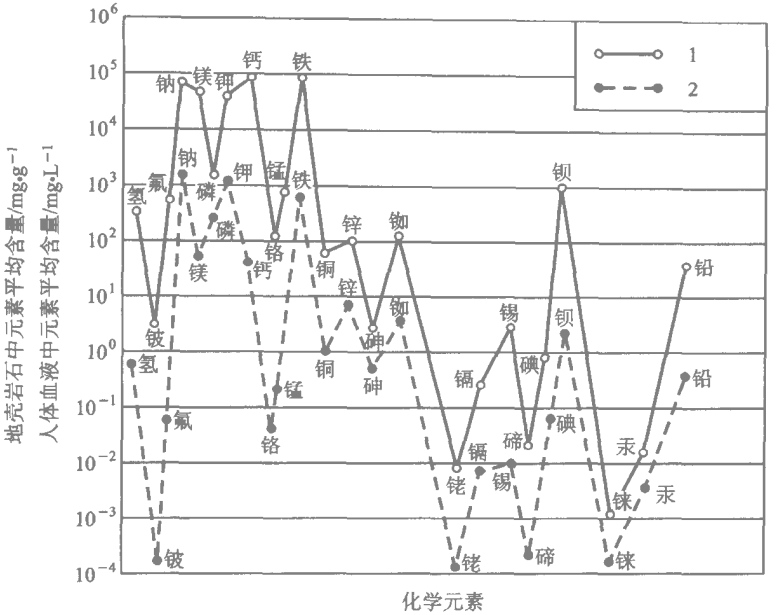


图 9－1　人体血液与地壳中元素含量的相关性

(摘自杨忠芳等. 现代环境地球化学. 北京：地质出版社,1999)

1. 地壳岩石中元素含量平均值；　2. 人体血液中元素含量平均值

表 9－2　人体必需微量元素对成人的供给

微量元素	成人一日需要量
铁	12 mg
锌	10～15 mg
氟	1.5 mg
铜	30μg/kg 体重
碘	140μg
锰	5～10μg
硒	20～50μg
铬	2～2.5μg
钼	2μg/kg 体重
钴	0.1～0.3 mg
钒	0.1～0.3 mg

注：摘自胡汉升. 环境医学北京：中国环境科学出版社，1986

人体内的微量元素虽然甚少，但在生物化学过程中却起关键性的作用，它们作为酶、激素、维生素、核酸的成分，维持生命的代谢过程。微量元素的重要生理功能表现在：①在酶系统中起特异的活化中心作用。酶是一种大而复杂的蛋白质结构，它的作用在于强化生化作用。几千种已知的酶中，大多数含有一个或几个金属原子。失去金属元素，酶的活力就丧失或下降；获得金属元素，酶的活力就恢复。②在激素和维生素中起特异生理作用。如甲状腺激素中缺少碘原子，就失去效用，人体就会得甲状腺肿大病。③输送宏量元素的作用，如血红素中的铁是氧的携带者，它把氧带到每个组织、器官的细胞中去，供应代谢的需要。④微量元素在体液内，与钾、钠、钙、镁等离子协同，可起调节渗透压、离子平衡和体液酸碱度，以保持人体的正常生理功能。

3. 元素的协同和拮抗作用

当某些共存的微量元素一同摄入人体内时，彼此之间往往发生错综复杂的拮抗或协同的作用，影响体内的生理平衡。一些非必需的元素置换或取代必需的元素，如金或银取代铜，砷取代磷，钨取代钼等都能危害人体健康；不论人或动物，当铁充足而缺少铜时，一样可发生贫血症，说明铜与铁在人体内显示生理协同作用 而另一些元素则具有拮抗作用，如硒与汞、铜与锌、铊与硒、铜与镉等，它们在人体内共存时，常表现为一种元素对另一种元素的生理功能产生干扰作用。正因为微量元素之间存在着如此复杂的相互拮抗和协同的关系，所以，在评定某微量元素对人体影响时，除了注意该元素的特异性质外，还必须注意和它有相关性的元素是否存在。

二、人体对环境致病因素的反应与地方病

环境的任何异常变化，都会不同程度地影响到人体的正常生理功能，但是，人类具有调节自己的生理功能来适应不断变化着的环境的能力。这种适应环境变化的正常生理调节功能，是人类长期发展过程中形成的。如果环境的异常变化超出人类正常生理调节的限度，则可能引起人体某些功能和结构发生异常，甚至造成病理性的变化。这种能使人体发生病理变化的环境因素，称为环境致病因素。人类的疾病多数是由生物的、物理的、化学的致病因素所引起。有毒气体、重金属、农药、化肥以及其他有机及无机化合物属于化学性因素；细菌、病菌、虫卵等属于生物性因素；噪声、振动、放射性物质的辐射作用、冷却水造成的热污染等则为物理性因素。这些因素和反应达到一定程度，都可以成为致病因素。在环境致病因素中环境污染又占最重要的位置。

疾病是机体在致病因素作用下，功能、代谢及形态上发生病理变化的一个过程。人体对致病因素引起的损害有一定的代谢能力。当代偿过程相对较强时，机体还能保持相对的稳定，暂不出现疾病的临床症状，如果致病因素停止作用，

机体便向恢复健康的方向发展；如果致病因素继续作用，代偿功能发生障碍，机体则以病理变化的形式反应，表现出各种疾病所特有的临床症状。

疾病的发生、发展与地球化学环境之间有着不可分割的联系。许多疾病往往反映出强烈的区域性特征，而不同时期、不同区域都表现出一定的疾病类型。由于区域生态环境中元素异常造成特定环境的特有的地方病，即原生性地方病。“地方病”与各地的地理位置、地形、地质、水文、气候及居民生活习性等条件的不同所导致的。在地质环境影响人体健康的各种因素中，最重要的一种是不同地区水、土、大气所含的化学元素种类和数量不同。一般的规律是：在元素受到强烈淋溶的寒温带地区、元素缺乏的沙土地区或元素难以释放的沼泽地区，容易发生元素缺乏症，相反，在元素浓集的干旱地区和火山喷发区，又容易发生元素中毒性疾病。最常见的地球化学性地方病主要有：甲状腺肿、氟中毒、克山病、大骨节病等。

三、地方性甲状腺肿

甲状腺肿，又称地甲病，是一种因环境缺碘或富碘所引起的地方病。

1. 地质地理分布

甲状腺肿是一种流行较广泛的地方病。地理特征上，集中分布于世界几大著名的山脉，如亚洲的喜马拉雅山区在尼泊尔境内为最重的病区，患病率高达90%～100% 欧洲的阿尔卑斯山、高加索山、南美的安第斯山，该病广泛分布，澳大利亚的新西兰岛、新几内亚岛，非洲马达加斯加岛是该病较重的流行地；中国是世界甲状腺肿流行较严重的国家之一，广泛分布于山区和内陆，如长白山、大兴安岭、小兴安岭、燕山、太行山、吕梁山、秦岭、川东和川西山区、云贵高原、青藏高原以及天山山脉、昆仑山山脉等。

甲状腺肿的分布受地质因素影响比较明显。地层中有机质层不发育或缺失，饮水和土壤中碘不足都会引起甲状腺肿。碘过量也可引起此种疾病发生。据有关调查资料，缺碘地区的人群，若饮用外来含碘丰富的食物和食盐，可减少或消除地方性甲状腺肿流行。施用富含碘的农肥可提高植物性碘含量，从而消除此种疾病的流行。

2. 碘的地球化学环境

原生碘存在于地壳岩石中或通过火山直接喷出地表。碘是一种极活跃的组分，在地表环境极易氧化，常以分子状态或化合物的形式存在。在地球化学演化过程中，碘单向集中在地表大气圈、水圈和生物圈中。

但碘也有相对富集和贫乏的环境。在极地、高山地区少，洼地、滨海地区多；在湿润淋溶地区少，在干旱地区多；在花岗岩、石英岩中少，在玄武岩、海相页岩中多 在灰化土、沙土中少，在沼泽土、腐殖土、黑钙土、盐渍土中多。

在天然水中碘的含量变化幅度也很大。在大气降水中，沿海地区为 2μg/L，内陆为 0.2μg/L，如在日本，雨水中的碘为 1.3～2.6μg/L。山区的地表水、浅层地下水含碘低，为 0.0～2.0μg/L；而在平原地区则较高，为 5～10μg/L；在盐碱地区为 10～30μg/L。海水的含碘量为 50μg/L。油田水一般为 5～100μg/L，最高可达 500μg/L。

由于碘的生物富集作用，使生物中含碘量较高，海生生物含碘量比地壳中碘丰度的克拉克值高 100～1 000 倍，陆生植物含碘量比地壳中碘丰度的克拉克值高 10 倍，所以有机质中含碘量较高，因而有机质含量高的土壤中碘也相应较高。生物富碘作用可使石油和沥青质沉积物中富集碘，并成为碘资源的主要来源。

3. 碘的生物化学作用

碘是人体的必需微量元素，它在人体内含量甚微，但功能却很大。人体的含碘量约为 30～50 mg，但是在 30g 重的甲状腺内就聚集了 10 mg。碘在甲状腺内合成为甲状腺素，每个甲状腺素分子内必定有 4 个碘原子。因此，人体内缺碘就不能合成甲状腺素，就会导致甲状腺组织代偿性增生，颈部显现结节状隆起，即甲状腺肿大。

4. 甲状腺肿流行的影响因素

甲状腺肿的致病原因比较复杂。引发该病的因素有地质地理、土壤、水、食品和生活卫生条件等（表 9－3）。

表 9－3 影响地方性甲状腺肿流行的因素

影响因素	利于流行	不利于流行
地质历史	侵蚀、冲刷严重	侵蚀、冲刷程度轻
土壤地质	砂土、灰化土、泥炭土、土层薄、有机质少	黑土、栗色土、红色土、土层厚、有机质多
地理位置	内陆山区	平原、沿海、盆地
降　　水	降雨集中，降水大于蒸发	降雨量分散，蒸发占优势
食　　物	当地产植物性食品为主	饮食多样化，海产品、动物性食品多
饮　　水	地表软化或石灰化水	矿化度高的井水或泉水
致甲状腺肿物质	有	无
生活卫生条件	不良	良
防治措施	无	有

绝大多数甲状腺肿是因缺碘而引起的。成年人每天应摄入碘 100～300μg，

甲状腺肿流行区人体摄入量一般都低于 50μg。而长期摄入过多的碘也可引起甲状腺肿病。在环境中，存在着干扰人体吸收碘的因素，如饮水中有较多的 Ca、F、Mg、Zn、Cu、Li 等元素，或富含腐殖酸、微生物等，都能影响人体对碘的吸收。此外，食用牛奶（牧草中有过多的十字花科植物）、芸苔属植物、大豆等也会影响对碘的利用，诱发甲状腺肿。这些食物中含有较多的过氯酸盐、硫氰酸盐、亚硝酸盐等。它们被称为致甲（甲状腺肿）物质。由此可见，只要选用适宜的饮水和食物，食用碘盐和海菜就可以有效地防治甲状腺肿的发生。

四、地方性氟中毒

地方性氟中毒，亦称“地方性氟病”。它是因长期饮用高氟水或食用高氟食物而引起的一种慢性中毒性地方病。

1. 地质地理分布

氟中毒病在世界的分布与地球化学环境密切相关，主要受岩石、地形、水文地球化学变化、土壤以及气候等因素的影响。

（1）火山活动区发病带：火山爆发喷出的火山灰、火山气体等喷发物中含有大量氟，这些喷出物在火山口周围呈环状分布。生活在火山周围的居民多患氟斑牙病和氟中毒症。世界上一些著名的火山如意大利的维苏威火山、那不勒斯火山、冰岛的火山区等，均有地方性氟中毒病发生。但也有例外，如中国东北地区的长白山天池、牡丹江镜泊湖、五大连池，以及云南的腾冲地区等，历史上均发生过火山喷发，但现在并未发现氟中毒病人。

（2）高氟岩石出露区和氟矿区发病带：某些岩石如萤石、冰晶石、白云岩、石灰岩，以及氟磷酸盐矿中含有丰富的氟，经过物理化学风化作用、淋溶作用和迁移转化等地球化学变化，使地表水和地下水中的氟含量增高。生活在该区的居民长期饮用高氟水，发生氟中毒。

（3）富氟温泉区发病带：温度超过 20 ℃ 的泉水能溶解多种矿物质，温泉水中含氟量一般比地表水高，而且随泉水温度增高氟含量不断增加。许多温泉区有氟中毒病发生。如西藏谢通门县卡嘎村温泉，水温 60 ℃，水中氟含量达 9.6～15 mg/L 泉水周围三个村的居民患严重的氟中毒病。

（4）沿海富氟区发病带：在海陆交替地带，长期受海水浸润，形成富盐的地理化学环境，海水中含量较高的氟也易于在此带富集；沿海地区由于大量开采地下水，导致海水入侵，不仅使土壤盐渍化、水井报废，也使地下水中氟含量增高，从而引起氟中毒病的发生。如中国的天津、沧州、潍坊等地区，均有一定数量的氟斑牙和氟中毒病出现。

（5）干旱、半干旱富氟地区发病带：干旱、半干旱气候干燥，降水量少，地表蒸发强烈，地下水流不畅，氟化物高度浓缩，形成富氟地带，是氟中毒病高发区。

如在印度的许多地区，地面氟化物大量蓄积，总量达 12×10^6 t 全球约为 85×10^6 t)，地方性氟骨症患者高达 100 万人以上，称为世界“氟病大国”。

由此可见，全球地方性氟中毒发病区分布相当广泛，约有 30 多个国家高发氟中毒病。中国各地均有程度不同的氟病流行，全国有 762 个县（族）有氟病发生，约占全国县(族)的 1/3。主要分布在黑龙江、吉林、宁夏、内蒙古、陕西、河南、山东等省区。

2. 氟的地球化学环境

氟的天然来源有两个：一是风化的矿物和岩石，二是火山喷发。因自然地理条件不同，土壤的含氟量差异较大。在湿润气候区的灰化土带，属于酸性的淋溶环境，有利于氟的迁移，土壤中氟含量较低。干旱和半干旱草原的黑钙土、栗钙土含氟量较高，在盐渍土和碱土中其含量更高。

氟在天然水中广泛分布，但极不均一。在海水中约为 0.1 mg/L；河水中为 0.03 ~ 7 mg/L；温泉水中为 1.5 ~ 18 mg/L；盐湖水中最高为 20 ~ 40 mg/L。

氟在酸性环境中以络合物的形式迁移，在碱性环境中多呈离子状态。地表水和潜水中氟的含量与气候带密切相关。湿润气候带约为 0.05 ~ 0.20 mg/L，干旱草原气候带为 2 ~ 12 mg/L。天然水的氟含量还受地貌和微地貌的控制，一般是山区低，平原高 岗地低，洼地高。

3. 氟病与饮水

氟是一种重要的生物必需元素。在人体的各部位都有它的踪迹。但是，80% ~ 85% 的氟都集中于骨、齿中。氟是构成骨、齿的重要元素。

正常人体内含氟约 2.6 g，其中 90% 集中在骨骼与牙齿中。每人每天的正常需氟量为 1 mg 左右，如果每天进入体内的氟超过 4 mg，氟就在体内蓄积，时间长了就发生氟中毒。轻者为“斑釉病”，重者为“氟骨症”。严重的氟病患者肌肉萎缩，脊柱弯曲，四肢变形甚至瘫痪。人体中的氟有 65% 来自饮水，35% 来自食物。饮水中氟含量高于 0.5 mg/L，龋齿率逐渐升高；大于 1.0 mg/L，氟斑牙病率逐渐升高；大于 4.0 mg/L 出现氟骨症。中国西南地区的云南、贵州等省，饮水中氟含量不高（低于 1 mg/L），氟主要来源于食物，食物中的氟来源于煤。当地燃烧含氟量很高的煤，并用煤烘烤粮食和蔬菜，大量氟进入粮食和蔬菜中，如烘烤玉米含氟量高达 40.96 mg/L，辣椒平均含氟量高达 466.73 mg/L，当地人又特别喜欢吃辣椒，该地区每人每天摄取氟总量约为 17.9 mg/L 因而成为中国严重的氟病分布区。

在氟病区寻找低氟水是水文地质工作者的一项重要任务；对饮水降氟也是一个有效途径，通常采用的降氟剂是硫酸铝或氯化铝等。在低氟区预防龋齿的方法是对饮水进行“氟化”，将水的含氟量提高到 0.6 ~ 0.8 mg/L。通常利用的氟化剂是 NaF、$NaSiF_2$ 和 KF 等。此外，减少食物中的含氟量，限制高氟煤的燃

烧和工矿企业含氟“三废”向环境中的排放，是预防食物型氟病和高氟煤烟污染型氟病应采取的措施。

五、大骨节病

大骨节病是一种地方性畸形骨关节病，主要发生在儿童和少年中，其症状为关节疼痛，关节增粗变形，运动障碍和肌肉萎缩，严重影响人们的劳动和生活。

1. 地质地理分布

大骨节病的分布与地势、地形有密切关系。在中国，大骨节病多分布于山区、半山区,海拔 500～1 800 m 之间。如中国东北地区，大骨节病多分布于山区、丘陵地带，以山谷低洼潮湿地区发病最重。在西北黄土高原地区，以沟壑地带发病较重。此外，大骨节病分布与气候有关，病区多属于陆地性气候，暑期短，霜期长，昼夜温差大。

中国的大骨节病，从东北到西藏呈条带状分布，包括黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、山西、北京、山东、河北、河南、陕西、甘肃、四川、青海、西藏、台湾等 15 个省市自治区、296 个县市旗，患者达 200 万人。其中发病最多的是黑龙江省（66 个县市）。中国是该病最多的国家。在俄罗斯的西伯利亚、朝鲜北部、瑞典、日本、越南等国也有此病发生。

2. 大骨节病的环境地质类型

大骨节病分布广泛，横跨寒、温、热三大气候带，自然环境复杂多变。病区地质环境可划分为四种类型：

（1）表生天然腐殖环境病区：沼泽发育，腐殖质丰富，土壤多为棕色、暗棕色森林土、草甸沼泽土和沼泽土等。在本区，饮用沼泽甸子、沟水、渗泉水者大骨节病较重；而饮大河水、泉水、深井水者病情较轻或无病。大骨节病病村多分布于分水岭两侧河流中上游的谷地、山间盆地、碟形洼地；或分布于高原盆地、谷地。

（2）沼泽相沉积环境病区：主要分布于松辽平原、松嫩平原和三江平原的部分地区，主要为半干旱草原和稀疏草原。本区地势低平，水流不畅，沼泽湖泊星罗棋布，有的已被疏干开垦。发病与否主要决定于水井穿过的地层。凡水井穿过湖沼相地层，多为发病区。

（3）黄土高原残塬沟壑病区：黄土广布，因侵蚀作用强烈，水土流失严重，形成残塬、沟壑、梁峁地形。群众多饮用窖水、沟水、渗泉水和渗井水。由于水质不良，大骨节病很重。而饮用基岩裂隙水、冲积或冲洪层潜水者病轻或无病。

（4）沙漠沼泽沉积环境病区：属干旱、半干旱沙漠自然景观，固定、半固定沙丘呈浑圆状或垄岗状。多数干燥无水；少数为芦苇沼泽，底部有薄层草炭，沼泽呈茶色并且有铁锈的絮状胶体。群众多就地掘井，凡饮用此水者多患大骨节病。

3. 大骨节病的病因及防治

大骨节病至今病因未明，多年来国内外学者提出很多学说，如生物地球化学说、食物性真菌中毒说、综合生态效应说等，其中以生物地球化学说研究最多。

（1）生物地球化学说认为：大骨节病是矿物质代谢障碍性疾病，是由于病区的土壤、水及植物中某些元素缺少、过多或比例失调所致。有人认为环境中缺乏 Ca、S、Se 等元素或金属元素 Cu、Pb、Zn、Ni、Mo 等过多可致病另有人认为，环境中元素比例失调，如 Sr 多 Ca 少、Se 多 SO_4^{2-} 少或 Si 多 Mg 少等也可致病。此外还有人认为，大骨节病与环境中腐殖酸含量高有关。

（2）食物性真菌中毒说认为：大骨节病是因病区粮食（玉米、小麦）被毒性镰刀菌污染，而形成耐热毒素，居民长期食用这种粮食引起中毒而发病。用镰刀菌毒性菌株给动物接种，可使动物骨骼产生类似大骨节病的病变。

（3）综合生态效应说认为：病区有致病生态因子的多样性，如环境元素分布异常，食物霉变，蛋白质与蔬菜缺乏，以及生活方式等多种因素形成的综合生态效应，导致“膜缺陷”，是大骨节病的原因。

防治大骨节病的根本原则是设法消除致病因子，积极调节和改善环境因子。实践证明，改水防病是一种行之有效的措施，如将病区饮水中的腐殖酸含量控制在 0.05 mg/L 以下，就可以收到明显的效果。此外，提倡杂食、增强营养，适量服用 Na_2SeO_3 片剂，对大骨节病也有一定的防治效果。

六、克山病

克山病是一种分布较广的地方病，国内外都有发生，并具有地理地带性分布的特点。中国克山病发病区的分布与巨厚的中新生代陆相沉积岩系有关，同时与地形地貌也密切相关。在地理分布上表现为一条从东北到西南的斜长条带。据统计，中国有 15 个省、自治区的 303 个县（旗）有克山病的分布。

1. 克山病病区的环境地质类型

纵观中国病区，克山病可分为：东北型、西北型和西南型三种类型。

（1）东北型：其特点是克山病与大骨节病的分布和病情轻重基本平行。克山病患者又是大骨节病患者。它包括了大骨节病的表生天然腐殖环境和湖沼相沉积环境两种病区类型。病区多饮用富含腐殖酸的潜水和地表水。

（2）西北型：以陕西渭北黄土高原、陇东黄土高原病区为代表。病村多饮用受有机污染的窑水、渗泉水和沟水。

（3）西南型：属此类型的有云南高原病区、川东山地丘陵平坝病区。病村多饮用水田渗井水、沟水、坑塘水和涝池水。水质不良，有机污染严重。

这三种类型病区的共同特点是饮水中富含腐殖质。

2. 克山病的病因及防治

克山病的生物地球化学研究最多，并取得了较大的进展。据林年丰等对腐殖酸进行的系统化验研究表明，克山病与饮水中腐殖酸过量有关。腐殖酸可能通过两种途径引起克山病：一种是腐殖酸可与多种元素形成络合物或螯合物，它们影响人体对 Se、Mn、Mg 等元素的吸收，导致人体缺乏这些微量元素而致病；另一种可能因某种低分子腐殖酸的毒性直接损害心肌而致病。此外，环境中亚硝酸盐、Ba 含量高，也可引起中毒，导致克山病的发生。有机质对微量元素具有较强的螯合与络合能力，因而使水体中缺乏某些微量元素。中国克山病多处在深洞或较湿润的含有机质较高的偏酸性水区。据调查研究，水中有机物耗氧量与克山病发病率对数成正相关。饮水中 Ca、Mg 含量低或环境中 Se、Mo 等微量元素缺乏与克山病有较密切关系。

克山病的病因还有营养缺乏说和生物病因说。营养缺乏说认为，病区食物缺乏维生素 A、B、C 以及氨基酸等。生物病因说认为，克山病是一种病毒引起的自然疫源性疾病；有人认为是某些心脏肌肉病毒感染而引起的心肌炎；也有人认为是传染后过敏引起的心肌炎或食物中某些真菌中毒引起的心肌病，等等。还有一些病毒学家认为，克山病区存在的某种或某几种病毒，因水土条件适宜发生相互作用，直接或间接地作用了心脏肌肉而发病。

克山病的防治主要是通过改水（或换水）阻截致病因子进入人体；同时，还应注意加强营养，控制各种条件因子。在 Se 含量低的环境中，增加人体对 Se 的摄入量可起到防病治病的作用。

七、癌症

癌是一种顽症，对人类生命的威胁很大，占所有疾病死因的第二位，仅次于心脏病。研究表明，约有 80% 的癌症是由环境因素引起的，其分布具明显的地区性和地带性，有集中高发的现象，其中消化系统癌症的地区性分布最为明显。

1. 癌症的分布特征

癌症在世界各地均有分布，但它有明显集中高发的现象。在一些国家或地区集中高发，而在另一些国家或地区则很少发生，死亡率相差 10 倍，乃至百倍。

食道癌的高发区主要位于东南非和中亚地区，如莫桑比克、南非、乌干达、伊朗、阿塞拜疆、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦食道癌发病率很高。中国食道癌的平均死亡率约为 11/10 万，但分布不均，总趋势是北方高于南方、内地高于沿海。食道癌的高发区环境特征是：气候干旱、水源缺乏、土壤盐渍化程度较高；地表及地下水的矿化度均较高，水质属于硫酸盐一重碳酸盐水或硫酸盐一氯化物水，水中 As、Se、Mo、V、Cr、B、Ni、I、F 等元素富集。

肝癌主要流行于低纬度地带，如东南非和东南亚地区。在欧洲、北美洲、大洋洲很少发生肝癌。非洲莫桑比克首都马普托肝癌死亡率最高，为 146.6/10

万；挪威、芬兰等北欧国家最低，死亡率仅(1.0～1.2)/10 万。中国肝癌平均死亡率约为 10/10 万，高发区位于广西、江苏、广东、福建、上海、浙江等沿海地区。肝癌高发区多为水源缺乏的干旱、半干旱的环境，或者是饮水水质不良的沿海湿热气候地带。

胃癌主要分布在中、高纬度地带，如芬兰、荷兰、瑞典、英国、俄罗斯、日本、美国、加拿大等国的部分地区，低纬度带和赤道附近胃癌则较少发生。中国胃癌的平均死亡率约为 15/10 万，总的分布趋势是西北黄土高原和东部沿海各省较高。胃癌高发带的主要自然特征是气候寒冷湿润、植被繁茂、土壤多富含腐殖质；地表水、潜水为富含腐殖质的重碳酸盐一硅质软水，矿化度一般为 100～200 mg/L，甚至小于 100 mg/L，Ca、Mg、Se、Mo、Cu、Zn 等元素缺乏。

2. 地球化学环境与癌症

癌症的分布往往与某些类型的岩石或土壤有关。如南非的食道癌高发区多为玄武岩层分布区；中国山西某地的食道癌可能与无烟煤的分布有关；河南的食道癌主要分布于安山岩和中更新统的洪积层分布区；广西南宁的肝癌高发区主要为石灰岩分布区，而在砂、页岩地区肝癌发病率显著降低。

除了岩石和土壤成分与癌症有着较密切的关系外，地貌可影响水文条件和水的化学成分。如太行山中南段，食道癌高发地多为风化物堆积的负地形，低发点多为剥蚀的正地形，在两个相邻的地质单元内，人群的死亡率差异明显，通常山区高于宽谷、盆地高于沟谷、缓坡高于陡坡。

大量的调查资料表明：肝癌、食道癌高发区，饮用池塘水、沟渠水的居民为多，而饮用深井水的居民发病率明显较低。从水质上看，池塘水、沟渠水的有机污染严重，直观指标表现为浑浊、着色(黄、绿、灰等色)、异味、异臭、微生物繁盛，水缸底有胶体絮状沉淀物。化学指标是硝酸根离子、腐殖酸含量高，化学耗氧量高，Se、Mo、Mg 和 Ca 含量低。

第三节　环境污染对人体健康的影响

环境的任何污染，都会直接或间接地影响人体健康。影响的大小取决于环境污染的程度、污染持续时间和人体的耐受限度。有的环境污染在很短时间便可造成较严重的急性危害，有的需经过很长时间才显露出对人体的慢性危害，甚至可通过遗传而影响到子孙后代的健康。因此，根据中毒的程度以及病症显示的时间，可将环境污染对人体健康的影响分为：急性影响、慢性影响和远期影响三种类型。

急性影响主要表现为急性或亚急性中毒事件。如 1983 年 4 月，中国湖北省江陵县农药厂排放含砷废水，严重污染附近的饮用水源，致使 1 046 名工人和农

民患急性砷中毒,中毒者恶心、呕吐、四肢无力,眼睑浮肿,许多人还出现咳血、吐血和便血等症状。此种影响往往后果严重，很容易引起人们的注意。如震惊世界的 1952 年伦敦烟雾事件及 1984 年 12 月印度博帕尔毒气泄漏事故，均造成数千人死亡。

当污染物浓度较低，长期作用于人体时，可以产生慢性中毒。由于慢性中毒潜伏期长，病情进展不明显，很容易被人忽视，而一旦出现症状时，往往产生不可挽救的后果。环境污染对人体健康的远期影响只是慢性影响的一种特殊情况，它的危害结果显示时间可能更长。大多数远期影响具有致癌、致畸胎的性质，故危害较大。

一、环境污染物的迁移转化规律

环境污染物根据其物质属性可分为三类：一是化学性污染物，它是环境中的主要污染物，对人体健康威胁最大、影响最广，常见的有各种有害气体、有毒重金属及各种农药、石油化工厂污染物；二是生物污染物，为各种病原微生物及寄生虫卵等；三是物理性污染物，常指噪声、电磁辐射等。

1. 污染物在环境中的迁移转化

污染物在环境中的迁移转化是指污染物排放到环境后，在环境中经过物理、化学和生物学的作用，在生物圈内发生的迁移转化过程。这种迁移、转化、循环、富集具有一定的规律性，取决于污染物本身的理化和具体的环境条件。在非生物环境介质中，污染物总是由浓度高的地方向浓度低的地方迁移；在生物体中，由于某些物质的理化特性，对那些具有蓄积性的化学污染物，很容易在生物体中富集，而使污染物逐级浓缩，生物死亡后，经过腐败分解，这些污染物最终又回到环境中去。污染物在环境中转化，既有降解过程，又有合成过程；即有有机物的无机化，又有无机物的有机化。污染物在环境中一般是由不稳定转向稳定，也可由稳定转向不稳定。

污染物在环境中的迁移转化机理是错综复杂的，可归纳为三个方面：物理性迁移转化(稀释作用、沉淀作用)、化学性迁移转化(中和作用、氧化还原作用、光化学反应)、生物性迁移转化(生物降解作用、生物转化作用、生物积累、浓缩、放大作用）。

2. 污染物在人体中的迁移转化规律

环境污染物（毒物）作用于人体后，是否能对人体健康产生危害，首先取决于污染物的浓度大小和污染物在人体内的代谢速度。污染物在人体内的代谢过程包括吸收、迁移、分布转化和代谢等。污染物进入人体后，一方面干扰和破坏人体的正常生理功能，使人体中毒或产生潜在性危害，另一方面人体通过各种防御机制与代谢活动使污染物降解并排除体外。因此，了解环境污染物在人体中

的代谢过程对研究污染物与人体相互作用的规律是十分重要的。

环境污染物通过人体细胞膜进入血液的过程称为吸收。吸收途径主要是呼吸道、消化道和皮肤。血液是污染物在人体内得以迁移运转的主要介质。污染物与血液中何种成分结合将影响其在血液中的迁移速度。

污染物的分布与侵入途径和污染物的毒性溶解性、存在状态、代谢特点以及器官的特殊条件均有密切关系。如经肺部吸入的汞蒸汽，则随血液流向脑组织的侵入率大，这一特点是汞蒸汽主要造成脑组织损伤的重要原因之一；可溶性的被盐吸入后主要沉积于骨内，而不溶性铍盐则以存留在肺内为主。

环境污染物在体内转变成其他衍生物的过程称为生物转化。生物转化的结果常常是使污染物的极性增强，成为水溶性更强的化合物。代谢产物或污染物易于排出体外，其毒性也相对减弱或消失。但有少数污染物经生物转化后其毒性更强。

排泄是污染物以其代谢产物排出体外的过程，是人体物质代谢全过程的最后一个环节。排泄的主要途径是通过肾脏进入尿液和经过肝脏的胆汁进入粪便。此外，人体的呼吸、汗液、乳汁、唾液、泪液、毛发脱落也都是排泄途径。肾脏是最重要的排泄途径，其排出的污染物数量超过其他各种途径所排之和。

二、化学污染对人体健康的危害

当今世界上已有的化学物质达 5 百万种之多，而且每年还不断的有数以千计的化学物质合成。据估计，进入人类环境的约有 96 000 种。化学污染问题已日趋严重，致使人类疾病的构成也发生了变化。过去以传染病为主的疾病谱，现在已被非传染性疾病，如心血管病、公害病、职业病等所代替。

化学污染物按其形态可分为气体污染物、液体污染物和固体污染物；根据化学组成，又可将其分为无机污染物和有机污染物。化学污染物对人体危害的特点表现为：低浓度长期效应、多因素联合作用、远期和潜在性的影响。影响化学污染物侵入机体的因素一是污染物的溶解性，二是污染物的渗透性。

有毒有害化合物的生物效应可分为五个阶段：通常在第一阶段有毒污染物（元素）负荷增加，未出现生物学反应；第二阶段出现生理学反应，但不明显，而且是可逆的，即减少污染物负荷量便可复原；第三阶段出现疾病前驱明显生理变化，且是不可逆的；第四阶段人体内有毒元素积累过量产生疾病；第五阶段疾病在体内发展，最终导致死亡。表 9－4 列出了几种主要的有毒有害化合物的来源、分布及对人类健康的影响。

表 9-4 环境中有毒有害化合物对人体健康的影响

污染物名称	来　源	分　布	对人体的主要影响
硫氧化合物	含硫燃料	大气和水	心肺疾病,呼吸系统疾病
氮氧化合物	燃烧过程	局部空气	急性呼吸道病症
臭氧	汽车尾气光化学反应	局部空气	刺激眼睛、哮喘病
一氧化碳	燃烧不完全	局部空气	血红蛋白降低,缺氧,煤气中毒
硫化氢	工业过程燃料燃烧	局部空气	影响呼吸中枢、烦恼、疲劳
粉尘(漂尘)	燃料、工业过程灰化、运输等	空气	影响肺部组织、支气管炎等
氟化物	炼铝、炼钢、制磷肥、氟化烃等	空气、水	过量主要使骨骼造血、神经系统、牙齿等受损害
汞(Hg)	氯碱工业、造纸工业、汞催化剂等	食物、水域、土	影响神经系统、脑、肠
铅(Pb)	汽车尾气、铅冶炼化工、农药等	空气、水、食物	影响神经系统、红血球
镉(Cb)	有色冶炼、化工电镀等	空气、水、土壤、食物	骨痛病、心血管病等
酚类化合物	炼焦、炼油、煤气工业	水	影响神经中枢、刺激骨髓
硝酸盐	污水、石棉燃料、硝酸盐肥工业	水、食物	可在体内合成亚硝胺
有机氯	农药、自来水消毒剂、工业废弃等	土壤、水、大气、食物	影响皮肤组织、肝等
多氯联苯	电力工业、塑料工业、润滑剂等污水	水	使皮肤及肝损害
石棉	采矿、石棉水泥工业、汽车制动系统	空气、水	慢性肺尘病、肺癌
真菌毒素	食物及动物饲料	染有黄曲霉素的食物	损害肝脏,是肝的致癌物
有机磷类	农药	土壤、水	引起神经功能紊乱,致癌,致畸

三、生物性污染对人体健康的危害

所谓生物性污染主要是指寄生虫卵、细菌立克次体、病毒等病原体，随着粪例、痰、飞沫等排泄物排入环境后，污染空气、土壤、水源等。其危害是造成寄生虫病和某些传染病的流行。

寄生虫有很多种，如蛔虫、钩虫、血吸虫等。它们均在肠道排卵，一条雌蛔虫可排出 20 万个虫卵。虫卵随粪排出体外，如不经无害化处理就用做肥料施用，就会造成土壤污染和水体污染。

寄生虫卵侵入人体的途径一般分两类：一类是经口侵入，例如，当环境条件适宜时，在湿润的土壤中，当温度达到 25 ℃ 左右时，蛔虫卵便孵化成为具有感染性虫卵。这种虫卵粘附在瓜果、蔬菜或手上，当生吃没洗干净的瓜果蔬菜或饭前不洗手就吃食物时，虫卵便经口侵入体内。另一类是经皮肤侵入体内的。例如，钩虫卵，在适宜温度下，在土壤中发育成具有感染性的钩蚴卵，当赤脚下田时，感染性虫卵中的钩蚴，就会钻进皮肤而侵入体内。血吸虫卵也是在人和牲畜下水耕地、过河或游泳时，尾蚴就钻入皮肤，侵入体内。

第十章 环境地质调查评价与制图

第一节 环境地质调查

一、环境地质调查的任务与内容

环境地质调查的目的是通过对区域地质环境条件和由自然地质作用及人类活动引起的环境地质问题的调查研究，评价预测资源开发与国土整治的环境地质条件，论证重大区域性环境地质问题和有关地质灾害的地质环境背景，拟定地质环境保护对策，为区域经济与社会可持续发展、生态环境建设与地质环境保护提供科学依据。

环境地质调查的具体任务是：① 查明区域地质环境条件；② 调查主要环境地质问题和地质灾害的类型与特征、成因机制、分布规律及其危害；③ 分析地质环境系统演变的基本规律，评价预测其对人类生存环境的影响；④ 评价人类活动对地质环境的影响，预测其发展趋势；⑤ 编制环境地质图系，开展环境地质区划；⑥ 研究重大环境地质问题和有关灾害的地质环境背景，论证地质环境综合整治与保护对策。

环境地质研究的对象和目的千差万别，涉及的内容十分广泛，环境地质调查的基本内容应包括以下几个方面：

（1）区域地质环境条件：包括气象、水文、地形地貌、地层岩性、地质构造及水文地质条件等。

（2）区域地壳稳定性：区域性大陆地壳或岩石圈的活动性，特别是活动断裂的运动特征与地震活动等。

（3）岩土体的物质组成与结构特征：岩土体的粒度成分与矿物成分、成因类型，岩体结构类型，工程地质岩组类型等。

（4）资源开发与利用：水资源（地下水和地表水）、土地资源、矿产资源等的分布状况和开发利用程度，资源开发利用过程中引发的环境地质问题。

（5）地表水、地下水特征：地表水的径流特征与水质状况，地下水补给、径流、排泄特征，地下水水化学特征，含水层的物理力学性质等。

（6）物理地质现象（地质灾害）：内、外动力地质作用下发生的各种地质灾

害的稳定状态、发育规律、危害方式和发展趋势。

（7）环境地质问题：环境地质问题的类型、特征、分布危害及其发展趋势；重要环境地质问题专项调查与示范研究。

（8）人类工程活动：人类工程活动的类型、强度、范围、历史、已造成的危害和未来趋势，地质环境对人类工程活动的敏感性与反馈作用。

（9）环境污染源：污染源的类型、特征及分布，污染物种类与危害性，污染物质的迁移、转化途径等。

（10）地质环境综合整治措施：针对现有环境地质问题采取的防治措施及其效果等。

二、环境地质调查的基本程序

环境地质调查大致遵循区域地质调查的基本工作程序，虽然目前还没有专门的环境地质调查规范规程，但可参照国家有关部门发布的相关的规范规程，如《工程地质调查规范》（ZBD14003－89）、《区域水文地质工程地质环境地质综合勘查规范》（GB/T14158－93）以及《城市地区区域地质调查工作技术要求》（ZB/TD10004－89）等，根据具体的研究目的和对象，拟采取相应的技术方法，确定工作程序。

①充分收集已有的水文、气象、地质、“水工环”地质、遥感、物探、化探和主要环境地质问题与地质灾害的资料，以及大江大河流域整治规划、生态环境建设规划、防灾减灾规划等，在此基础上编制项目设计。

②整理分析已有的前人研究成果，提取有用的资料信息，建立研究区地质环境要素的空间数据库和图形数据库。

③开展航空和卫星遥感资料信息处理，确定调查路线和重点调查区及具体的调查方法。

④开展地面调查、物探、钻探、实验测试等项工作；建立地质环境动态监测网点。

⑤建立环境地质信息系统。

⑥ 开展环境地质专题研究。

⑦ 全面分析研究，开展环境地质评价、预测、论证，提出综合整治对策。

⑧ 编制环境地质图系，撰写研究成果报告。

三、环境地质调查方法

环境地质调查的方法包括地质调查、物探、钻探、现场试验、室内测试和长期动态观测等。

1. 遥感解译

利用研究区的航空或卫星遥感影像资料，通过对比分析，提取不同时期的环境地质信息与演变趋势。

2. 地面调查

充分利用已有基础地质资料，补充必要的野外调查。重点调查研究区地质环境条件及其演化规律、主要环境地质问题、人类工程活动的类型及其环境地质效应等，同时验证遥感影像资料的解译成果。

3. 地球物理勘探

根据研究区特点和有待查明的环境地质问题，有的放矢地采用先进适用的技术方法开展物探方法调查工作，注意做好物探成果的综合解译与查证。地球物理勘探方法包括航空物探、地面物探和测井（硐探）等；从物理原理上讲，有电法、地震法、重力法和磁法等。目前正在发展的 CT 成像在环境地质调查中已发挥重要作用。

4. 钻探

主要用于区域性控制和专门问题的查证，以及地质环境监测点的布设。

5. 实验测试

为分析研究地质环境演变规律，在地面调查阶段，采集水体、土壤和岩石等样品，利用古地磁、热释光、同位素年龄、孢粉、微体古生物、原子吸收光谱法、离子色谱法、超声波和流变仪等测试技术开展实验室测试分析，获得环境地质评价所必须的数据资料。

6. 动态监测

根据工作区地质环境条件和需要解决的问题，确定监测项目、监测网点布置原则、布设位置、监测内容与要求、监测工作量等。如用于观测地震、活动断裂、地下水、危岩体或滑坡的长期动态观测可为环境地质问题的发生发展提供重要数据，监测手段有地面位移（三角控制测量、微震台网和短基线测量等）、深部位移（多层移动测量计、测斜仪和磁标志法等）、热红外跟踪摄影与现场声发射（AE）自动记录仪和 GPS 等。为确保监测周期，控制性的监测点应在工作初期布设并运行。

7. 地球化学勘探

地球化学勘探在查明活动断裂分布与活动性以及地裂缝、地下岩溶发育程度等方面具有重要作用，通过探测汞、钍、铀和氡等放射性或挥发性元素的含量，分析评价不同区域的环境地质条件。

8. 环境地质信息系统建设

以建立环境地质空间数据库系统和评价、预警与综合整治计算机辅助决策系统为目标，实现环境地质评价数据标准化和监测数据采集的自动化，评价、预测和综合防治研究的模型化、可视化与人工智能化。

第二节　环境地质评价

一、环境质量与环境质量评价概述

环境质量，顾名思义就是环境素质优劣的程度。其中优劣是质的概念，程度是量的概念。具体地说，环境质量是指在一个具体的环境内，环境的总体或环境的某些要素对人类以及社会经济发展的适宜程度。地质环境质量，在一定程度上，是由地球物理因素和地球化学因素决定的。

环境质量评价实际上是对环境质量优与劣的评定过程，而且是一种有方向性的评定过程。这个过程包含有多个层次，如环境评价指标体系和评价标准的确定、环境监测、环境识别等，最终的方向是评定人类活动与环境质量之间的价值关系。

环境质量评价的意义在于通过对环境质量现状定量判定和预测某项人类活动对环境质量的影响，为控制环境污染、制定环境规划、促进国土整治和资源开发利用等提供科学依据。

在进行环境质量评价时，由于评价的对象、目的和范围的不同，可将其分为不同的类型。按评价的时段可分为环境质量回顾评价、环境质量现状评价和环境质量影响评价；按被评价的环境要素数量可分为单要素评价、多要素联合评价和环境质量综合评价；按评价区域类型可分为城市环境质量评价、水域或流域环境质量评价、经济开发区环境质量评价、风景旅游区环境质量评价，乃至全国、全球环境质量评价等。

二、环境质量评价的原理和一般程序

（一）环境质量评价的原理

在环境质量评价的概念中，“环境”一词是指自然因素与人类活动相互作用形成的复杂的综合体，它不完全等同于自然综合体。环境的地域分异规律就是环境质量评价的理论依据。

组成环境的要素可以分解为许多构成因子，如地下水可以分解为化学组成、物理性状和动态特征。这些构成因子作为整体的一个局部，其性状是由整体的性状决定的；反之，每个因子的性状是反映整体性状的信息。正是基于这一原理，为了描述环境要素或整体环境质量的好坏，就可以根据要说明的问题，选择一定数量的评价因子，将其转换为可比的指标，最后进行加权综合，得到环境要素的质量指标，由各个要素的质量指标又可得到整体环境的质量指标。这种方法的思路来源于目前许多学科常用的原则和方法——主导因素或主导指标法。

例如，滑坡体是一个复杂的地质体，在其发生、发展过程中受到诸多因素的影响，如斜坡岩土体性质、地质构造、地形地貌、地表植被覆盖度、地下水动力因素、大气降水、地震振动、人为开挖斜坡等，其中，某些因素属于主导因素，另一些则属于次要因素。在进行滑坡灾害评价时，首先需要确定发生滑坡灾害的主导因素，如降雨诱发型滑坡的主导因素是大气降水、岩土体性质和植被覆盖度等；然后在主导因素中确定主要指标（主要因子），如大气降水的降雨强度或降雨持续时间、松散土体的粒度成分、岩体软弱结构面发育程度等，建立滑坡灾害评价的指标体系，通过各种定性、定量的方法揭示滑坡发生的成因机制、目前的稳定状态(现状评价)和未来的发展趋势(影响评价)。

（二）环境质量评价的一般程序

环境质量评价工作是建立在环境质量的调查、监测和趋势研究等工作基础上，并按一定的目的要求和方法进行的。环境质量评价的一般程序如下：

（1）确定评价因子：进行环境质量评价，首先必须了解评价对象的范围、内容和功能；分析环境的成因、演化及其影响因素，分解环境的构成因子。这是环境质量评价的前期准备工作。

（2）选择评价参数：环境要素的功能不同，评价的目的不一样，选择的评价参数也就有所差异。若进行环境质量的综合评价，则选择的参数应该尽量齐全；而为了某项特殊目的进行评价时，对评价参数应做专门设计。

（3）参数的标准化：各个评价参数的度量单位是不一样的，其数值大小和意义也不相同。为了评价参数在同一基准上相互比较，需要将参数等标化，即将所有的参数都和它们各自的环境标准进行比较，使它们转换成具有相同环境意义的定量数值，这一过程就叫参数的等标化或指标化。在进行环境质量评价时，应根据环境功能和评价目的选择不同的标准进行等标化处理。

（4）确定评价参数的权系数：为了说明某一要素或全环境质量的好坏，需要将等标化后的评价参数进行加权综合。为此，需要确定评价参数的权系数，即评价参数对环境质量影响程度的大小。为此，要深入研究标志污染物在环境中的污染状况及对生物和人体健康的影响，并运用近代数学工具，进行数学分析。目前用来确定权系数的方法主要有特尔斐法、模糊数学法和序列综合法。

（5）建立环境质量评价数学模型：根据环境要素及评价因子在所研究的区域环境中的作用，以及污染物在多介质多元体系中的运动规律，建立一个完善的、科学反映环境质量状况的数学模型。

（6）划分环境质量等级，绘制环境质量图件：由上述模型得到的是环境质量的定量表征。同样的数值，在不同的环境要素或单元间往往代表不同的环境质量内容。即便是在同一环境要素或单元内，这些定量化数值的物理含义也不一定相同。为此，要进行环境质量的分级，即根据环境质量指数及其对应的生态效

应将质量指数划分等级。根据不同的目的和要求，绘制环境质量图件。

（7）编写环境质量评价报告：给出环境质量评价的结论，必要时还应提出环境污染防治对策。

三、环境质量评价方法

选择环境质量评价方法时必须考虑以下三个要素：①必须确定与这一价值关系有关联的标准或目标函数；②必须假定一些调节这一价值关系的模型，该模型在合理的置信度下，可以对不同备选方案进行比较；③建立效用或损失概率分布来判断不确定条件下产生的后果。这三个要素一般地讲不同时考虑，而是按照评价的目的和要求加以选择。例如，在地质灾害评价中要重点考虑第 3 个要素，因为地质灾害评价所要解决的矛盾是在众多不确定因素下分析这一价值关系变化的可能性。

目前，国内外使用的环境质量评价方法很多，但大体上可分成：专家评价法、环境指数评价法、经济评价法、运筹学评价法和模糊综合评价法等。

（一）环境指数评价法

环境指数评价法是最早用于环境质量评价的一种方法。它具有一定的客观性和可比性，常用于环境质量现状评价中。环境指数可以设计成随环境质量的提高而递增的质量指数，也可设计为随环境污染程度的增加而递增的污染指数。它包括单因子指数、多因子指数和综合指数。环境指数评价法的工作流程是：①分析、整理数据和资料；②确定所要评价的环境要素及其评价因子；③选择评价标准；④评价因子的标准化处理；⑤确定各个指标的权重；⑥建立评价模型；⑦进行环境治理评价，开展环境质量分级和区划。

（二）专家评价法

专家评价法是一种古老的方法，但至今仍有重要地位。这是将专家们作为索取信息的对象，组织专家运用专业方面的经验和理论对环境质量进行评价的方法。该方法具有以下两个特点：①评价可以考虑某些难以用数学模型定量化的因素，如社会、政治因素；②在缺乏足够统计数据和原始资料的情况下，可以作出定量估计。有代表性的专家评价法是特尔斐法，该方法以匿名方式通过信函征求专家们的意见。通过对前一轮的意见进行汇总整理，作为参考资料再发给每个专家，供他们分析判断，提出新的论证。如此多次反复，专家的意见渐趋一致，结论的可靠性越来越大。其特点是：匿名性、轮回反馈沟通情况和多次统计分析。它是一种系统分析方法，是在意见和价值判断领域内的有益延伸。这种方法在环境预测和环境价值判断方面具有很大的价值。

（三）经济论评价法

通过费用与收益的相互比较评价人类活动与环境质量之间的关系，其立足

点在于环境质量在人类活动过程中具有经济价值。人类活动对地质环境质量的影响，可能危害环境质量，从而把经济费用强加于社会，结果导致价格和产出水平的变化。经济论评价法的评价过程大致可分为四步：①确定经济要素、社会要素与环境要素之间的关系，或者确定人类行为对环境的影响；②将这种关系或影响加以定量化，如水体中污染物质的增加使人群发病率增加多少等；③对这些量值尽可能用货币价值来表示，以便于进行经济分析。

经济论评价法的经典方法是费用效益法，费用效益分析的关键是要计算出费用和效益的货币值，在环境质量效益评价中把环境质量看作是一种人类所需的物品和劳务，直接评价该物品或劳务的效益或费用。

（四）模糊综合评价法

环境是一个多因素耦合的复杂动态系统，其中既有确定的可循的变化规律，又有不确定的随机变化规律。不确定性主要是由于认识有限、数据不充分或不可靠、环境质量本身具有随机性和可变性等三个方面的因素造成的。环境质量的这种精确与模糊、确定与不确定的特性都具有量的特征。有的时候可以用精确的语言来表述，有的时候则需要模糊的语言来表述。

20 世纪 60 年代中期，模糊数学理论的诞生和发展，给环境质量综合评价，特别是定量评价产生了新的飞跃。模糊逻辑、模糊数学综合评判、模糊因子分析、模糊模式识别、模糊主成分分析等的广泛应用，使得更精确地刻画地质环境质量特征成为可能。模糊数学综合评价的基本思路是基于地质环境质量以及影响因素、因子边界的模糊性，通过建立地质环境质量评价指标体系、指标量化分级体系、指标权值分配体系、构造模糊数学评价模型，进而对区域地质环境质量进行评价和区划。模糊数学方法的关键是可用隶属度来刻画环境质量的分级界线，然后根据已有的分级系统和实际数据进行级别划分。

模糊评价方法的一般步骤是：建立或完善评价因子的分级系统；根据分级系统的不同标准分别建立各评价因子在相应级别的隶属函数；计算各个评价因子对于不同级别的隶属度；n 个评价因子隶属于 k 个不同级别的隶属度组成隶属度矩阵 R 确定 n 个评价因子的权重值，归一化并构成权重向量 A。用模糊矩阵的乘法求出运算结果 $A \cdot R$；取评价结果向量中最大值对应的级别为本次模糊评价的分级结论。当同时存在两个或两个以上最大值时，取次大值贴近的一个作为最后评价结果的级别。

第三节　地质环境质量现状评价

从词义上说，地质环境质量评价就是研究地质环境的优劣程度。它是认识和研究地质环境的一种科学方法。在对地质环境的开发和利用中，要确定地质

环境质量状况对人类生存和发展的适宜性，就必须进行环境质量评价。

一、地质环境质量评价概述

地质环境质量评价的范畴主要包括区域地质环境、城市地质环境、地质灾害、地质地貌类自然保护区和有明显地质地貌特色的风景名胜区、与地下水有关的地质环境以及矿山地质环境。

（一）区域地质环境质量评价

区域地质环境质量评价是为国土规划和国土整治服务的。国土规划要解决的问题，从根本上说是处理好人类活动与资源、环境的关系，使之能够相互协调发展。

无论是区域规划或是专题规划，国土规划都具有区域性特性。国土是指一定地域范围内自然资源和地质环境的综合体，所以，区域地质环境研究和评价，是进行国土规划和整治的重要基础。中国地域辽阔，自然地质环境条件各异，加强对自然的和人为的地质作用和现象的监测、评价，对保护与合理利用地质环境，搞好国土整治都具有实际意义。

对区域地质环境的监测、评价，不仅要评价其现有状态的区域规律，而且要研究地质环境条件在人类活动影响下可能发生的变化，预测地质灾害发生、发展的区域规律，以便合理地规划地质环境的开发利用和减轻地质灾害的危害。区域地质环境评价的重点是地质环境条件的区域规律、地质灾害、区域地壳稳定性和人类活动对地质环境的影响等四个方面。涉及的内容主要有各种工程建筑活动、开发矿产活动、农业生产活动、综合活动和地质灾害五个方面。区域地质环境评价可分为三个层次：①在区域地质环境调查、评价的基础上，制定区域地质环境开发、利用、保护和治理规划纲要，从宏观上解决区域地质环境开发利用的方向，存在的主要问题，治理和保护的重点及应采取的措施；②针对区域的重大工程和经济活动布局，预测人类活动对地质环境可能造成的影响，从而对工程项目的适宜性及其影响后果做出评价；③对区域内在建和已建的工程建筑活动、开发矿产活动、农业生产活动、地质灾害和综合活动等，进行监测和评价，从时间、空间和强度三个方面，不断地进行变化趋势的预测、预报，为减轻和防治地质灾害提供依据。

（二）城市地质环境质量评价

这是地质环境质量评价的重点之一。因为城市是人类工程建筑活动和工业生产活动最集中的地区，对地质环境的影响最为突出。城市地质环境质量评价的重点是：①城市区地壳稳定性评价，包括地震活动性、断层活动性及由地震诱发的各种不良地质作用的强度；②地基稳定性，地基岩性、埋深、物理力学性质及地下水因素；③供水条件和水资源保护问题，水资源评价、合理开发、管理和保护；④城市废弃物处置的地质条件评价和监测；⑤建筑材料的调查和评价；⑥城

市地质灾害（包括自然形成的和人类活动影响形成的）的评价、监测和预测。

城市地质环境质量评价必须贯穿于城市规划、建设和城市正常运行的全过程。但是，在城市建设的不同阶段，其监测、评价的内容和方式，应有所不同。

城市总体规划阶段主要围绕上述六个重点内容对城市地区各类建筑物和交通干线的规划布局和土地的合理利用做出评价。城市详细规划阶段则从地基条件和地质环境角度做出进一步评价，分析拟建工程的适宜性，并对地质环境可能发生的变化做出评价、预测。城市设计、开发阶段的评价主要是为各类拟建工程和场地选定提供有关地质环境质量优劣的依据，提出可采取的地质环境治理措施。城市运营阶段的环境质量评价任务是监测和评价城市开发过程及运行阶段可能出现的地质环境问题和灾害，及时进行预测、预报，采取有效的减灾和防治性措施。

（三）地质灾害的监测、评价

地质灾害包括自然地质灾害和人为地质灾害两大类。地质灾害种类繁多，对人类的危害广泛而严重。地质灾害监测与评价的重点是：①对各类地质灾害的地质环境背景进行评价；②研究各类灾害性地质作用发生和发展的规律、强度、形成机制及作用速率；③从工程建设和地质环境的相互作用出发，评价和预测各类工程建设可能产生的灾害性地质作用及危害程度；④对区域性和严重危害人类生产、生活的地质灾害开展长期监测，进行时间、空间、强度的预测、预报；⑤开展地质灾害的防治研究和指导防治工作。

（四）地质地貌类自然保护区和风景名胜区的评价

建设自然保护区是保护自然资源和地质环境的重要手段，也是科学研究和教学、实习的良好基地。自然保护区总面积占国土总面积之比值的大小，已成为衡量一个国家科学文化水平的重要标志。为使有经济、科研、旅游或其他特殊价值的地质资源和地质景观不遭受毁坏，有必要加强地质地貌类自然保护区的规划与评价。这类评价的主要内容是在区域及城市地质环境调查、评价的基础上，做出地质地貌类自然保护区和风景名胜区的规划，对拟建的保护区和风景名胜区进行环境质量评价，并建立监测、保护标志，拟订保护性方案和措施。

（五）与地下水资源有关的环境质量评价

对地下水进行环境质量评价，包括开发前期和开发过程中的评价。评价的主要内容有水源地地质环境质量评价；对水资源可能引起的地质环境问题进行预测；加强地下水动态和污染的监测评价。在开发过程中制定区域开采和人工回灌计划，进行宏观调控，防止地下水的过量开采和造成新的地质灾害。

（六）矿山地质环境质量评价

随着矿产开发利用规模的加大，矿山环境的污染和破坏日趋严重。矿山排放的废气、废水、废渣及尾矿对环境造成严重的污染和破坏，如水土流失、泥石

流、地面塌陷等。矿山开发还存在着边坡失稳，地温地压增大，土地合理利用，水环境条件变化和土地恢复等问题。因此，需要加强矿山地质环境的监测与评价。

在矿山开发前，要对开发区及其临近区域进行环境地质评价，确定合理的开发方式和方案，并预测开发过程中地质环境可能发生的变化，为矿山合理布局提供规划依据。在矿山开发过程中，要加强地质环境的监测与评价，掌握环境变化的动态，提出对策，减少地质灾害。矿山开发后，仍要对地质环境变化进行监测和评价。同时，围绕矿山土地复垦，进行环境评价。

二、地质环境质量评价指标体系的设计原则

地质环境是一个由众多因子构成的复杂巨系统，这些因子之间相互作用、相互制约的关系直接或间接地反映了地质环境质量的优劣程度。建立能够综合体现地质环境质量状况及人类居住适宜性的指标体系是开展环境地质评价的基础。要选取众多指标中最敏感、最便于度量和内涵最丰富的主导性指标，使指标体系能够准确地描述地质环境质量现状和未来的变化趋势。确立地质环境质量评价指标体系应遵循科学性、系统性、可比性、针对性、时空多层次性和可操作性的原则。

三、地下水环境质量现状评价

地下水环境质量评价主要是指对那些以地下水作为供水水源的城市和工矿企业区所进行的环境质量评价。这项工作必须建立在已有的地质、水文地质和环境水文地质调查的基础上，必要时还要进行环境水文地质的监测和试验。

地下水环境质量现状评价要求在全面掌握地下水污染现状、成因、范围和程度的基础上，系统地对主要环境水文地质问题做出定量评价和描述。地下水环境质量评价，必须以地下水资源和地质环境的质量变化为重点，结合研究区的环境水文地质条件类型进行评价。地下水环境质量评价的一般程序如图 10－1 所示。

（一）评价因子的选择与评价标准

1. 评价因子的选择

自然界中影响地下水质量的有害物质很多。在不同城市和地区，污染源的差异很大，污染物的种类也各不相同。因此，影响地下水质量因子的选择，要根据研究区的具体情况而定。一般来说，可选用对地下水质量有决定作用的因子，如氧平衡参数、无机污染参数、有机污染物参数、生物污染指数、毒理参数以及水的物理性质参数等。由于地表污染源、地层地质结构、地貌特征、植被特点、人类开发工程、水文地质条件及地下水开发现状等因素对地下水赋存、运移和质量的好坏有直接影响，也常把它们作为环境质量评价因子的选择对象。

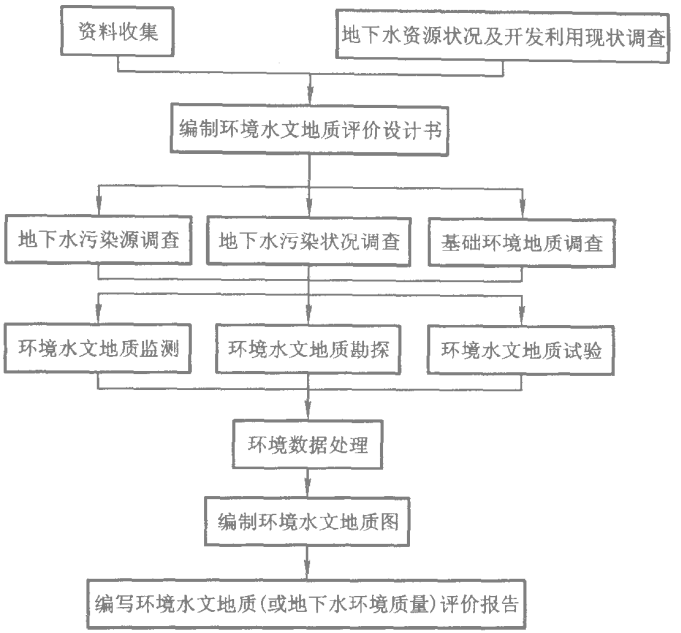


图 10－1　地下水环境质量评价工作程序框图

2. 评价标准

评价标准是地下水评价的前提，在中国许多地下水污染现状评价中，无论是数理统计法或是单项指标制图法，都涉及到污染标准问题，而且各家认识不尽一致。目前在国内比较流行的有两种标准：一是以国家饮用水标准作为评价标准，二是以地区的污染起始值或背景值作为评价标准。通常把前者称为环境质量评价，即地下水质量是否符合各种目的的用水标准；后者称为地下水污染评价，即研究地下水的污染程度。应当指出，地下水污染是一个从量变到质变的过程。以背景值为标准，有利于研究这一过程，而且能显示研究区某些特殊的环境特征。

如果取得地下水污染背景值比较困难，有时也采用对照值作为评价标准。对照值可以是历史水质数据；或者是研究区内无明显污染水点的地下水水质数据，即基线值；或者是研究区外，与研究区地质和水文地质条件相似地区的某些水点的水质数据。

(二)评价方法

地下水环境质量现状评价的方法很多，概括起来有数理统计法、环境水文地质制图法、综合指数法和模糊数学法等。在实际工作中可根据具体目的和研究

程度来选择方法。

1. 数理统计法

这种方法是以监测点的检出值与背景值或生活饮用水标准做比较，算出监测样品或监测井的超标率及其分布规律，最后进行污染程度评价。它适用于环境水文地质条件简单、污染物质比较单一的地区，往往在环境质量评价的初期使用，该方法常常同环境水文地质制图法联合使用。

2. 环境水文地质制图法

环境水文地质制图法是以图件作为环境水文地质评价的主要表达形式，图件大体可分为三类：

（1）环境水文地质条件图系：包括地质环境分区图，主要反映表层地质环境，特别是第四系表层岩性、厚度分区、地貌界限和微地貌形态；地下水资源赋存条件图，反映含水层的埋藏情况及天然防护条件；人工环境条件图，反映污染源的分布和自然环境中迁移扩散的位置以及人类工程活动对地质环境的影响。

（2）单要素地下水污染现状图：采用等值线或指示符号进行污染程度分级，以污染指数表示各种有害物质的污染程度。

（3）环境水文地质评价图系：包括地下水污染类型图，以污染源和地下水污染成因类型为依据，进行污染类型的划分；地下水水质综合评价图，以多项污染物质、多项指标等因素作为水质好坏的分级依据，综合反映水质的好坏。

3. 综合指数法

综合指数法即前述环境指数评价法。它是为了评价某一水井或某一地段地下水中各种污染因子综合作用的结果，以便互相对比。当地下水环境质量评价以地下水的背景值或污染起始值为标准，其计算结果称为污染指数；若以饮用水标准为准则进行评价，其计算结果称为水质指数。

4. 模糊数学法

采用模糊数学模型，须先进行单项指标的评价，然后分别对各单项指标给予适当的权重，最后应用模糊矩阵复合运算的方法得出综合评价的结果。这一方法在地下水环境质量评价中已得到广泛的应用。

四、城市地质环境质量现状评价

城市地质环境质量主要是指地质环境（或背景）对城市发展和建设的适宜程度。城市地质环境质量现状评价是研究城市地质环境质量构成及其时空变化规律的方法，其目的是为城市规划或工程建设布局提供决策依据。

（一）城市地质环境质量的构成

对城市而言，地质环境包括岩土体、地质构造、水资源、地形地貌、内外动力地质作用等要素。因此，城市地质环境质量的构成主要有区域地壳稳定性、水资

源状况、工程建设条件、外动力作用状况、人类工程经济活动状况等方面。

1 区域地壳稳定性

区域地壳稳定性主要反映了城市建设的总体地质构造环境的优劣，它往往决定着城市的发展规模和城市类型。与工程地质有关的环境质量评价的核心问题就是稳定性的研究。影响区域地壳稳定性的因素很多，最主要的有三个，即断裂活动性、历史地震及地震烈度。

2. 水资源状况

水资源不仅反映了地表水、地下水的水量，而且反映了水质状况，它在很大程度上限制着城市的人口增长和工业化进程。水资源的影响因素主要包括地下水、地表水的天然储量和水质状况两个方面，如地下水水量、地表水径流量、地下水矿化度、人为排放的污水对环境的影响程度等。

3. 工程建设条件

工程建设条件直接影响城市工程建设的质量和市政设施的布局，它反映了地质环境对工程建设的适应性和敏感性，即地质环境是否会因为工程设施的修建而恶化，是否会加重或诱发不良的地质作用和地质灾害。工程建设条件还表现为天然建筑材料的数量和质量，其影响因素主要是地基稳定性、动力作用、地形地貌、地下水水位和水质、土体振动液化势等。

4. 外动力作用状况

外动力作用状况主要影响到城市市政设施的稳定性和运营状态。决定外动力作用状况的因素主要是流水、地形坡度、地貌单元等。

5. 人类活动状况

人类活动状况可能造成城市生态环境恶化，是对环境不合理利用的结果，它同样影响到城市的发展。如不合理开采地下水引起地面沉降而危及建筑物的安全等。

（二）城市地质环境质量评价方法与程序

城市是在自然地质环境的本底上建立起来的人工环境。地质环境为城市提供了物质基础，城市建设在很大程度上改造了地质环境。城市地质环境质量评价包括定性评价和定量评价两种方法。

定性的评价方法有经验法、外推法、演绎法等。在城市环境质量评价中，它们常用于城市环境问题的分析、人类活动对地质环境影响分析、城市地质环境质量恶化的原因分析以及综合防治对策分析等。 20 世纪 80 年代以来，在城市地质环境质量评价中，人们开始利用地质环境质量指数法、模糊数学法、灰色系统及系统工程等方法进行定量和半定量评价。近年来，费用效益分析方法也在城市地质环境质量评价中得到应用。

依据评价原理，城市地质环境质量评价主要按下述程序进行（图 10－2）：

①依据城市总体规划确定城市主要用地类型；

②调查获取土地利用的特征及所需的评价参数；

③依据城市地质环境主题要素，建立场地岩土模型，计算土地开发的基本费用；建立风险费用模型，计算土地开发的风险费用；

④建立地质环境质量损益评价模型，对地质环境场地单元进行评价；

⑤根据评价结果，编制城市地质环境质量评价图，并进行敏感度分析，确定土地利用的最佳选择方案。

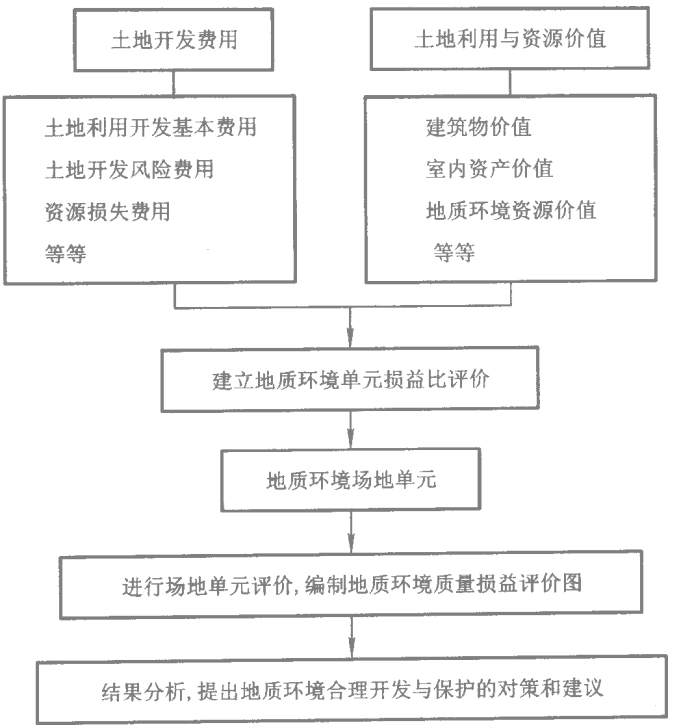


图 10－2　城市地质环境质量经济评价原理框图

五、区域地质环境质量综合评价

区域地质环境质量综合评价实质上是评价人类与地质环境之间的相互适应性问题。在某种程度上，可以认为它是研究地质环境、地质资源与人类活动之间的对立统一问题，是某一地区地质环境人类活动容量的总体评价。所以，一个地区地质环境质量的优劣，不仅与地质环境、资源条件和环境地质问题的发育程度有关，而且与人类开发活动的饱和程度有关。

基于自然单元分级体系的区域环境质量综合评价将人类环境视为由许多不同的环境因子构成的自然单元，每一单元具有相对的均一性，高级单元的性状用低级单元的综合指标来表征。因此，评价环境因素和整体环境的质量时，可根据问题的性质，选择评价因子，并将其转化为可比的指标；然后，按评价指标的相对重要性加权综合，用环境因素质量的综合指标来衡量整体环境的质量。区域地质环境质量现状评价指标体系应包括地质体对工程建筑的适宜程度、地质资源的丰富程度与开发效益、水资源的丰富程度与开发利用的可能性、地质灾害与环境地质问题的发育程度以及地质环境的人类活动容量等（图 10－3）。

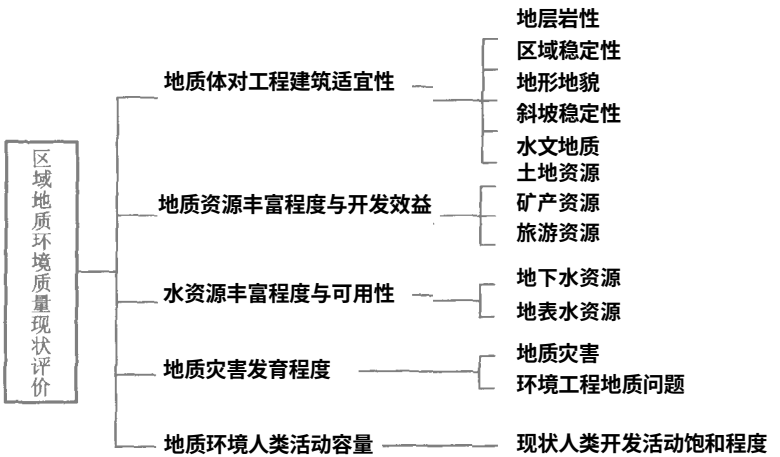


图 10－3　区域地质环境质量现状评价体系

第四节　地质环境质量影响评价

一、环境影响评价概述

环境影响强调的是人类活动对环境产生的作用。环境影响评价是建设和开发项目可行性研究的一个组成部分，用以识别和预测某项人类活动对环境所产生的影响，论证和选择技术上可行、经济和布局上合理，对环境的不利影响较少的最佳工程方案，为有关领导部门的决策提供科学依据。

环境影响评价能为某一地区的社会经济发展指明方向，合理确定某一地区产业的结构、规模和布局。环境影响评价过程是对一个地区的自然条件、资源条件、环境质量条件和社会经济发展现状进行综合分析的过程。

环境影响评价发展至今，国外已提出了很多评价方法与分析技术。如图形

叠置法、列表清单法、矩阵法、网络法、系统分析法等。中国目前使用的多是对单个环境要素进行预测的方法，如模式计算法、类比调查法、模拟实验法等。

二、地质环境质量影响评价的基本原则

地质环境质量是该系统在某个确定时期的综合效应的静态描述。引起综合效应改变的不仅是单要素的变化，而且取决于系统内诸要素之间按某种特定规律的组合关系。因此，地质环境质量影响（预测）评价应遵循以下基本原则：

①对整体环境地质质量的预测应在单项环境地质影响要素质量预测的基础上进行；

②评价要素应具有预测意义，需要筛选那些随时间变化显著和对地质环境质量有明显影响的环境地质因素；

③规划是未来的发展蓝图，用预测值与规划期望值作差值统计分析，可找出不适宜发展的地区及其原因，以便对建设规划和工程措施做出超前调整布置；

④地质环境系统是一个开放的、动态变化的体系，具有内部诸因素之间，子系统之间、内外系统之间的物质、能量和信息的更换、迁移和转化的复杂关系。因此，地质环境质量影响评价应该建立在因素种类和因素组合关系的双重预测的基础上。

三、地质环境质量影响评价的方法

地质环境质量影响评价除可直接借鉴环境科学中环境影响评价的预测方法外（图 10－4），有时还可根据地质环境自身特点采用某些定性或定量的评价方法。下面介绍几种常用的定量评价方法。

1. 时间序列分析法

“时间序列”指按时间顺序观测的有序数列。也就是说，观测值是随时间而变化的。观测值往往又可分解出趋势性的变化、周期性的变化和随机性的变化。在环境地质研究中，可以把时间序列的概念推广到按一定方向排列的有序数列。这一方向变化就比喻为时间的变化，不管它是否与时间有关系。例如，在观测某水源井中污染物的变化时，如果污染源是固定的，就可以观测到污染物在每年枯、丰水期的变化规律，在多年观测中还可看出污染物总的变化趋势。在实测数据中，除有用的趋势性变化信息外，还包括随机干扰，采用自相关方法可把周期性成分和随机干扰分离开来。如将滑动平均的项数取作要消除的周期成分的长度，所得的加权或算术平均值即为趋势性变化。此外，还可采用时间序列的互相关函数，分析预测两环境因素间的相关关系。如果趋势性成分呈现随时间变化的规律，可用回归分析方法求出该趋势与时间的关系，并进行预测。

2. 信息量法

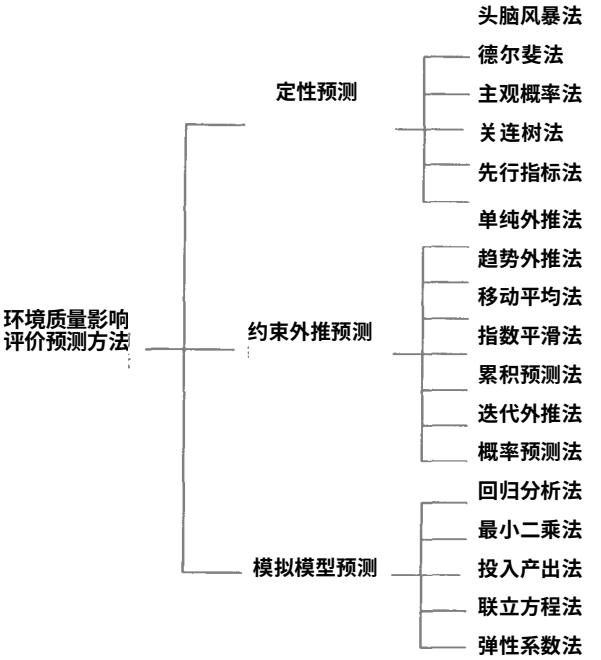


图 10－4　环境质量影响评价常用的预测方法

信息量法是从信息理论中引出的一种统计预测方法，广泛用于环境地质研究中，如滑坡、斜坡稳定性的空间预测。按这种方法，某种地质因素提供发生滑坡的可能性是通过计算其信息量来度量的，即用信息量大小来评价地质因素及其状态与滑坡发生的关系（即危险性）。

3. 动态系统分析方法

环境是一个大动态系统，它由系列的中、小系统组成。首先对整个环境作粗略的、宏观的分析，找出其关键问题，决定评价的主要目标。大型水库的评价在于研究由于沿河筑坝引起的水生生态系统的变化以及沿岸陆生生态系统的影响。围绕着评价主要目标进行中、小系统分析，即对自然、社会、经济环境等及其组成要素进行具体分析和评价；然后根据大量资料和实测数据，进行综合分析和评价，利用系统论、控制论和信息论等理论，从物质和能量输入、转化以及输出和反馈等作用，确定物质和能量在环境中的来龙去脉，建立各种模式，分析环境质量现状及其可能变化的趋势，从而提出对策。

4. 网络法

环境是一个复杂的系统，受一种因素影响后，常发生连锁反应。例如，修建公路可能引起水土流失，被侵蚀的土壤进入河流、湖泊、水库使地表水体泥沙含

量增高，进而使河床变浅、河流改道、水库淤积，结果导致洪水泛滥、水环境容量降低、水库功能减弱，甚至恶化水生生态系统。这样由一级影响导出二级、三级等影响，用网络法进行环境影响评价比较切合实际。

5. 灰色关联分析与灰色预报

在环境地质研究中，不论其影响因素还是形成机理，既有大量已知信息，也有大量未知信息，且部分信息清楚，部分信息不清楚。因而可以把该系统视为灰色系统，进行灰色关联分析和灰色预报。

（1）灰色关联分析：对一个发展变化的系统，关联分析实际上是动态过程发展态势的量化比较分析，其结果是由关联度来表示的关联分析对数据量没有太高的要求，可广泛用于环境地质因素之间关联程度的分析。

（2）灰色预报：灰色预报是通过灰色建模实现的。由于原始数列呈现出离乱的情况，离乱的数列即灰色数列，称灰色过程。对灰色过程建立的模型，称为灰色模型。灰色建模是用原始数据列建立微分方程。

建立灰色模型是为了预测，比如在地下水动力场系统中，可以应用降水量变化数列与地下水位变化数列建立灰色 $GM(1,1)$ 模型。由该模型可以通过降水量的数值来预测地下水位变化。

第五节　环境地质区划与制图

一、环境地质区划

环境地质区划就是根据地质环境的结构特征和功能进行区域划分，指出各个区域的有利因素和不利因素，使人类活动充分利用有利的地质环境条件，避开和限制不利的条件。不同的区域存在着具有自身特征的环境地质问题，地质环境的容量与质量和对人类活动的相容性等也存在一定的差异。所以，环境地质区划资料是进行国土开发利用和编制区域环境整治规划不可缺少的基础资料，也是进行环境管理、保护地质环境的科学依据。

（一）环境地质区划的原则

地质环境的演变方向和对人类活动的反馈作用，既取决于自然地质条件，也取决于人类活动对地质环境作用的性质。因此，环境地质区划应当根据地质环境本身的组成与结构、人类活动的类型与强度，进行地质环境分区。

1. 自然地质条件与人类活动因素相结合的原则

地质环境是相对于人类而言的地质空间，是人类活动作用的重要客体。同一地质环境对不同形式的人类活动的反应不同，所以在考虑自然地质条件，研究组成地质环境的各种组分特征的同时，必须考虑各种人类活动因素，研究其对地

质环境的影响。

2. 综合因素与主导因素相结合的原则

由于组成地质环境的有利因素和不利因素很多，同时又要考虑人类活动因素，因此必须在综合分析各要素后，抓住主要矛盾进行综合与概括。

3. 重视环境地质问题影响因素分析的原则

与环境地质问题发生、发展关系最密切的因素是地貌、岩性、构造、气候和人类活动等，所以进行区划时应以这些因素的地区差异为主要分区依据。

4. 相似性与差异性的原则

对于不同级别的区域，从地质环境、人类活动和环境地质问题等不同的角度或综合的角度，概括环境地质单元的相似性和差异性。

5. 预测性原则

地质环境是一个动态系统，特别是在人类活动的影响下，有时变化十分强烈和迅速。环境地质区划的目的之一是为国民经济服务，所以必须根据地质环境各项要素的变化趋势和国家经济发展规划，准确预测未来不同时段的地质环境状况，合理规划人类活动的形式和规模，避免因人类活动而造成地质环境恶化。因此，环境地质区划应具有一定的预测性。

（二）环境地质区划的内容与步骤

环境地质区划是环境地质科学中的一个重要的理论问题，也是一个方法问题。一个好的环境地质区划，以及根据该环境地质区划编制的发展规划，有利于社会、经济与地质环境保护的协调发展。

环境地质区划的内容与步骤如下：

①在分析研究自然地质条件的基础上，划分出不同的地质环境单元。每一类地质环境单元，都是一个具有特定地质、地理、水文和气候特征的地质空间。

②对单元内已显露出的和潜在的环境地质问题，作出评价和预测，提出防治对策。

③对每一个单元进行地质环境容量和质量的评价，评定其对不同形式人类活动的承受能力。

④评价研究区不同形式的人类活动对各类地质环境已造成或可能造成的影响，说明影响的性质、范围和程度。

⑤在综合分析上述各方面条件的基础上，指出目前在各地质环境区域开发利用中存在的不合理之处（如果有的话），提出不同地质环境区合理开发利用与保护的建议。

二、环境地质制

（一）环境地质制图的原则与内容

1. 环境地质制图的原则

实际上，环境地质制图是在传统地质制图基础上的一种深化和改革，两者既有联系又有区别。从实用角度看，它们如同地基和建筑物之间的关系。没有过去几十年甚至上百年的基础性的地质制图，环境地质制图工作只能是空中楼阁。环境地质制图的原则应包括以下几个方面：

（1）制图目的的有针对性：环境地质制图的目的，不能仅仅满足于“为了合理开发利用和保护水、土、矿产资源，把地质灾害的损失减少到最低限度”这样一个总目标，关键在于能为规划决策者服务。因此，要增加图件的实用价值，就要从调查用图者的实际需要和使用效果来着手编制图件。

（2）制图内容的易读性：大量丰富的基础地质图件为工程规划设计者所忽视，原因之一就是传统的地质图不能为没有受过基本地质训练的读者所理解。因此，编制环境地质图件就必须做到图面简洁、文字简明扼要、结论确切。

（3）制图成果的及时性：按实用功能，环境地质图可分为：条件图、评价图和预测图。这些图件应在制订规划决策之前，及时送到有关人员手中。如果编图时间过长，某些数据、条件和结论都将发生改变，可影响规划决策的准确性。

（4）成果形式的灵活性：环境地质制图要求制图者时刻为用图者着想，环境地质图的编制数量应以能解决当地主要地质问题为限。条件简单的地区仅要几张图就能解决问题，对于新兴城市规划用的图件其总数可能要多些，原则上是基本满足要求，不必求全。

2. 环境地质图的内容

环境地质图系是环境地质调查、评价和区划研究成果的图件表达方式，应反映研究区域的地质环境质量现状和未来发展趋势、对人类活动的适宜性以及人类活动影响下地质环境质量的变化。

环境地质图图系应反映的内容大致包括以下几个方面：

①地质环境（包括地质资源）的基本条件，地质环境对人类生存和发展的制约作用，人类开发利用地质环境和地质资源的状况；

②内外动力地质作用及其引发的地质灾害与环境地质问题；

③水资源、矿产资源、能源等开发利用的环境地质问题和地质灾害；

④各类工程建设与地质环境的相互作用及主要环境地质问题；

⑤废弃物的处理、处置及对地质环境的污染；

⑥ 开发利用地质资源与保护地质环境的对策措施。

把环境地质图系看作一个等级系统，环境地质图系可划分为四个图组（图10－5），第一级图组主要为实际调查、野外勘探和室内实验所得到资料的图件表达，反映了天然地质环境要素的背景值以及人类工程活动、环境污染和社会经济发展的现状。在第一级图组基础上，利用环境地质调查、勘探和实验分析数

据，建立地质环境评价模型，对研究区进行环境地质现状评价和影响评价后编制的图件属于第二级图组，主要为环境地质专业人员所利用；第三级图组是针对不同评价目的编制的规划图，包括环境地质专题规划图和环境地质综合区划图；第四级图是一份详尽的综合性成果，应系统、全面地反映环境地质分析评价结论、环境地质规划成果以及环境地质综合整治对策，该图可提供给土地利用和城市规划人员以及政府决策者使用。

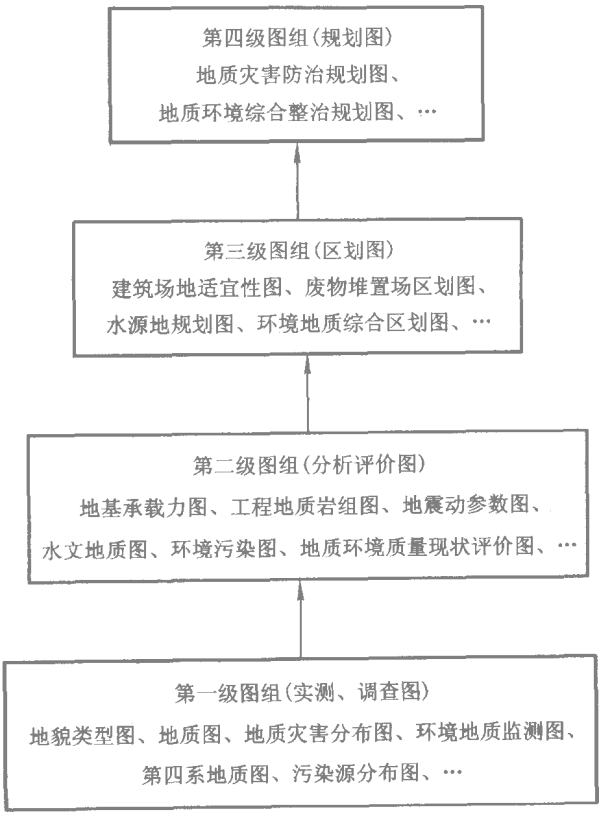


图 10－5　环境地质图图系

按这种系统编制图件，其优点是利用第二级图组的图件就能回答一个城市地区某种专门性的地质问题。对于已经编制完成基础地质图的城市来说，编制第三级和第四级图件，不需要增加多少投资，仅需有针对性地二次综合，从中提炼出实用的环境地质信息，就能达到环境地质制图的目的。原地质矿产部水文地质工程地质研究所在进行“沿海重点建设城市及经济特区环境地质研究”中把环境地质图系划分为条件图（或现状图）、评价图和规划图三个等级，并确定

其基本内容包括：灾害性地质环境因素、资源性地质环境因素和一般性地质环境因素三个方面（表 10－1）。

环境地质图的内容应视需要而定，主要以资源开发、国土整治、污染治理和土地利用为目的的环境地质图，影响地质环境质量的自然因素和人为因素是图中必须表达的内容。一些重要的文化因素和有特殊意义的非地质因素也应作为编图要素。环境地质图高级别图组的使用对象是国土开发和城市规划人员或工程设计人员，图中应尽量减少地质专业术语，引进易懂的语言，把环境地质图作为规划人员和地质学家的共同语言，使之成为土地利用和区域（城市）规划的必要工具。

表 10－1　环境地质图系的内容和等级

内容	1. 条件或现状图（反映性认识）		2. 评价图（评价性认识）	3. 规划图（决策性认识）
	a. 分析型	b. 综合型	综合型（浅思维加工）	综合型（深思维加工）
A. 灾害性地质环境因素图	地震危害图、地下水污染现状图……	地质灾害图……	地质灾害可能性图；地下水污染难易程度图……	最佳土地利用图或环境地质综合区划图
B. 资源性地质环境因素图	建材分布图……	矿产资源分析图……	地质资源保护图；地质资源潜力图……	
C. 一般性地质环境因素图	坡度分布图、地下水位埋深图、岩土类型图……	水文地质图、工程地质图……	水资源潜力图；地基适宜性图；废物处置适宜性图……	

（二）环境地质制图的步骤

编制环境地质图系的过程，实质上就是开展环境地质调查、分析、评价的过程。随着计算机技术的发展，环境地质制图工作已由过去的手工制图发展为利用计算机数字化制图。

编制某一地区或城市的环境地质图系，首先必须确定对规划和建设具有重要参考价值的制图主题，建立基于地理信息系统的环境地质空间数据库系统，运用环境地质理论与方法，构建环境地质评价模型，开展环境地质综合评价；在环境地质综合评价的基础上编制图件，编写说明书。

1. 主题选取

依据上述环境地质制图的原则，从区域或城市总体规划的需要出发，环境地质图系的内容应以实用性评价图为主体。在内容选取时，应遵循实用性、经济性和主题突出性的规则。

2. 评价方案的选定

不同的制图目的有不同的评价方案，考虑的因素和条件也各不相同。例如，以城市建设为目的的环境地质制图与污染防治为目的的制图，其评价方案不应相同。

3 评价因素的确定

适宜性评价直接受影响因素的制约，必须把那些最重要的因素包括在内，正确选取环境地质的主题特征。如城市建设与规划的环境地质图系，应侧重于土地的建筑适宜性、地基持力层埋深与厚度、软土厚度、地下岩溶发育程度、高强度人类活动影响下的环境质量变化趋势等因素，编制地壳稳定性分区图、场地地震区划图、土地工程能力与适宜性图、土地工程开发费用比率图、第四系松散地层地基承载力图、天然地基适宜性等级图、地下水水位与埋深图、地下水水质图、水资源开发利用规划图、城市地质灾害评价图、城市垃圾处理与处置规划图等。

4. 评价因素的排序及其权重赋值

处于同一系统内的诸因素对于该系统的贡献是不相等的。只有正确排定它们在系统中的重要性序次并赋予权重，评价的结论才能符合实际。

5. 评价等级的划分与地质环境质量区的圈定

编制适宜性图件时，通常需要把图幅划分成若干个单元（网格），然后把每个网格中诸因素得分相加，逐格判别相应的评价等级。把参与评价的各因素分别计分，然后逐一统计各个网格（评价单元）的总分，并结合具体的环境地质条件，进行评价等级的划分，确定不同等级的界限值。最后，根据等级界限值和每个网格的计算分值，圈定地质环境质量区。

6. 说明书的编写

说明书是图件的辅助性成果，篇幅要尽可能短，只把图上难于表达的内容置于说明书中，如编图原则、方法、程序、数据图表和结论等。此外，说明书还应告诉读图者如何读懂图件，利用它能解决什么问题，并尽量使专业术语通俗化。

第六节　环境地质研究新技术与新方法

随着科学技术的不断发展，环境地质研究已普遍运用遥感（RS）、全球定位系统（GPS）、地理信息系统（GIS）和先进的物探及测试技术等高新技术，并正在向环境地质调查、评价、预测、决策与成果发布的全程计算机化方向发展。

一、遥感

遥感(RS)具有信息量大、宏观、快速、多时相动态监测的优势，在地学中的应用走过了从定性评价到半定量、定量评价，从指示要素分析到计算机模型模拟，从单一解译到综合方法互初等阶段。遥感技术，特别是卫星遥感具有常规监测技术难以比拟的优势，它能够迅速、动态地获取大量环境信息，节省环境监测与调查费用；同步或准同步地获取环境信息，受人为因素影响较小，数据信息真实；基本不受地形、地貌条件限制，可迅速提供任意区域或点的环境信息。目前已在环境地质调查、评价和预测等方面得到广泛的应用。

利用遥感图像不仅可以获得地下水赋存状况、污染危险性以及咸水入侵的可能性，而且还可以为地下水合理利用提供区域信息，如小范围灌溉区的适宜性、居民点位置、大小等。干旱地区的水均衡状况，常用多光谱土地利用分类来估算地下水灌溉区面积。用经验模型可概算灌溉消耗和输送过程中的蒸发损失。遥感技术还在大型工程规划选址、稳定性评价、地质环境变迁及城市环境、矿山复垦、河流输沙等方面得到了广泛的应用。

高光谱遥感能在可见光、近红外、中红外和热红外波段等波谱范围内，分离成数百个很窄的波段来接收信息，与 TM 和 SPOT 的波段相比，可以探测出许多陆地卫星不能探测的地物,为环境质量评价提供了“质”高“量”准的手段。

遥感技术随着空间技术和计算机技术的发展，目前正进入一个能快速、及时提供多种对地观测及测量数据的新阶段。卫星遥感图像的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率都有很大提高。利用 CCD 阵列传感器可以达到 1 m 的分辨率,军用甚至达到 10 cm 的分辨率。基于空间重复轨道的雷达干涉测量技术(INSAR)可以导出 ±5 m 精度的数字高程模型(DEM)，差分干涉雷达技术(DINSAR)测定相对位移量可达到厘米甚至毫米级精度，在斜坡岩土体位移破坏、土地利用状况、环境污染和环境破坏监测方面具有广阔的应用前景。

二、全球定位系统

美国国防部于 1973 年批准建立新一代卫星导航定位系统，即全球定位系统 GPS。它是一种可以定时和测距的空间交会定点的导航系统，可为全球用户提供连续、实时、高精度的三维位置、三维速度和时间信息，为陆海空三军提供精密导航，以及收集情报、应急通讯等军事目的。随着卫星导航定位系统的卫星不断升空和组网,GPS 接收机和各类配件日趋完善，各种不同的应用软件不断更新,使 GPS 技术在导航定位等领域获得迅速推广应用。

现在,GPS 与现代通信技术相结合使测定地球表面三维坐标的方法，从静态发展到动态，从数据后处理发展到实时（或准实时）的定位与导航，极大地扩展

了它的应用广度和深度。 GPS 全站仪的发展，在地形和土地测量，以及各种工程建设、斜坡岩土体变形破坏、环境地质调查、环境变化和灾害监测等方面适应性广泛，具有相对定位测量的精度高、观测速度快、效率高、费用低并可实现自动数据传输和通讯等优点。

三、地理信息系统

地理信息系统（ GIS）是一种以采集、存储、管理、分析和评价全球或区域与空间地理分布有关数据的空间信息系统。经过近 30 年的发展，GIS 已经从信息存储、建立数据库、查询检索、统计分析和自动绘图等基本功能，转向建立多功能、多目标、多层次的专业化评价分析模型实现智能化的专家系统和空间决策支持系统，为城市和矿区的土地利用、环境规划和灾害治理等走向定量化、数字化、科学化开辟了广阔的前景。以 GIS 为基础，以地质环境质量评价模型为核心，由数据库、模型库、方法库、知识库及其管理系统构成的预警决策支持系统是 GIS 的发展方向之一，并将在环境地质研究中发挥重要作用。

（一）空间数据库的建设

环境地质研究的基本思路是调查、监测、采集数据→分析评价和解释判断→概念化并建立数值模型→进行验证、改善模型，即提供数据→评价整理数据→建立模型→验证模型、提供分析结果的数据信息流动、处理和加工过程，每一环节都与数据信息系统密不可分。

建立空间数据库系统是实现 GIS 在环境地质研究中广泛应用的基础，数据的规范化整理与信息资源的共建共享均依赖于空间数据库。

空间数据库系统应包括两部分，即数据库和图形库。前者由监测数据和调查数据组成，包括文本、数据、表格、图表、光电扫描信息和影像数据等 后者主要存放已形成的图件，包括地形底图、基础性地质图件、城市建设或区域开发的规划图等。

（二）专题信息系统和区域信息系统的开发

环境地质学的研究对象极为复杂，涉及多个相关学科，数据相互交叉、庞杂，加之表达对象的不确定性，因此，建立全国性的统一的环境地质信息系统难以实现，需要在实际操作中区分数据特点，分别建立全国性的专题环境地质信息系统和特定范围内的区域环境地质信息系统。并可通过网络实现数据信息的共享。如水位监测、地质灾害等信息，在全国范围内具有统一性，适合于建立全国性的信息系统，而地下水资源管理等数据对象则很难建立全国性统一标准，适合建立区域性的信息系统，为当地有关部门使用和服务。

（三）预警决策支持系统的建立

空间决策支持系统（ SDSS ）是近年来在常规决策支持系统与 GIS 相结合的

基础上发展起来的一种新型的信息系统。地理信息系统具有空间数据获取、存储、更新、运算、显示及制图制表等项功能，但缺乏对环境地质复杂对象的分析、评价和决策的功能，难于满足各级决策者的需要。因此，建立基于 GIS 的预警决策支持系统,是 GIS 在环境地质研究中的重要应用方向。

中国环境地质监测院在建立全国重点地质灾害数据库的基础上，开发研制了以 GIS 为基础的全国地质灾害评价预测支持系统，运用 GIS 分析技术,对各因素进行统计分析、信息叠加复合，研究地质灾害类型、分布规律、成因机制、级别和灾害损失度等，运用专家评判、模糊综合评价和危险性指数等方法对地质灾害危险性现状进行评价和预警分析，为政府决策人员提供了强有力的辅助支持。

预警决策支持系统的发展方向是：充分考虑高速网络技术、空间信息技术、虚拟现实技术、大容量数据处理与存贮技术、预警决策智能化、计算预警结果可视化等技术以及计算机硬件的发展趋势，以遥感、卫星定位系统、数字化、矢量化为数据采集、处理和识别手段，以 GIS 、空间数据仓库技术为数据存储、检索、集成、综合和分析工具，建立由方法库、知识库、模型库和专家系统等组成的预警与决策支持系统。

（四）专业模型模拟结果的可视化

可视化是地理信息系统的主要功能，也是直观地显示空间数据信息的主要手段。利用可视化技术，将层位结构、速度模型从不同层面、不同视角形象而动态化地展现出来，有助于人们对地质体特征的分析和更深刻的认识。

在环境地质研究中，不仅需要分析观察固体废物处置场和崩塌体、滑坡体、地面塌陷区、地裂缝、海水入侵范围的剖面和平面特征，还需要揭示它们在不同角度、不同方向和不同深度的空间特征及展布规律。因此，需要从三维角度对这些空间实体进行显示。

针对地下地质体的三维 GIS 是近几年来最热门的研究课题之一。绝大多数商业化的 GIS 软件还只是在二维平面的基础上模拟并处理现实世界所遇到的现象和问题，只有少量的 GIS 软件能进行真三维的分析和显示，但它们在几何建模和分析功能上还存在着不足。

（五）计算机辅助制图

计算机制图就是利用计算机及其辅助设备和软件技术，把地质资料转化为数据输入计算机，经过数据处理之后，最终以图形表述方式输出。

传统的在纸上绘制图件的方法已逐渐被淘汰，人工绘制图件繁杂缓慢，图件不易保存，成果图件不能更改，若有资料更新，必须进行人工重新绘图。计算机自动辅助制图大大简化了地质制图过程，提高了制图效率。可实现对地图数据分层信息成片存贮，易于管理和查询，灵活地分幅检索、添加图幅（层）、删除图幅（层）。原始资料与成果图件保存在同一系统内，可统一编目，便于查询。计

算机辅助制图有利于图形数据的存储、保管和使用，利用计算机网络还可实现图形数据共享。计算机辅助制图已成为环境地质制图的必然发展趋势。

西方发达国家经过多年的探索，到 20 世纪 80 年代中期实现了计算机辅助编制和出版正式地学图件，包括对原有纸质图件的修编再版和新的地质填图项目的一次性成图。中国地学计算机辅助制图技术的研究开始于 20 世纪 80 年代初期，中国地质大学（武汉）自主研制开发的 MapGIS 在编制、出版地学图件方面具有国际先进水平。

计算机制图是地理信息系统的重要功能，在空间数据库系统的支持下，利用 GIS 强大的数据组织、数值计算、综合分析功能，对环境地质评价的原始数据进行运算，是决策评价和分区效果的关键。

通过辅助制图子系统，采用综合分析方法，提出各种可能的制图方案，采用人一机对话的方式，反复进行分析、比较、识别和最佳选择，然后简便快速地输出图形结果。这是人工编图所无法比拟的。

利用计算机编制环境地质图件的一般步骤为：①由环境地质专业人员根据图件要求，确定制图主题，选择评价因素，建立评价指标体系；②按评价指标体系采集数据，建立地质环境空间数据库（包括图形数据库）；③对评价区域按指标划分评价单元，建立各评价单元的基本信息图层；④定性初评，选择适宜的方法、模型，对指标数据进行计算，进行定量评价预测；⑤通过调整某些控制参数或另选方法模型进行计算，得出几种不同的结果，然后对比、筛选，确定符合实际的评价结果；⑥利用 GIS 的图形叠加分析功能，将不同的评价结果图层进行叠加分析，得出综合评价图；⑦添加图框、图名、图例、比例尺等地图要素，打印输出图件。

四、地球物理探测技术

物探技术能提供多种描述地质体的物理参数并具有速度快、成本低和不破坏地质环境的优点，在环境地质调查、评价、研究中已得到了广泛的应用。核磁共振、探地雷达、高分辨率地震、层析成像等技术在 20 世纪 90 年代的进一步改进和广泛应用，在很大程度上提高了地球物理勘探解决问题的能力，环境物探得到了世界多数国家地球物理学会的正式承认，对促进环境物探的发展具有深远的影响。本节仅就近年来具有代表性的传统技术的改进、新技术的发展及环境地质物探方法的新领域作一概括地介绍。

（一）地震方法与技术

地震勘探是环境地质调查的主要物探方法，通过人工手段激发地震波，研究地震波在地层中的传播规律，以查明地下地质构造，获取地层和岩性信息。主要方法有反射地震、折射地震、横波勘查、面波勘查和三维地震。三维地震可探测

地下复杂反射体的大小和形状，但由于资料采集和处理比较困难以及费用昂贵等原因，还没能得到较多的应用。

（二）高精度磁法勘探

高精度磁测技术是近年发展起来的一项新技术，和常规磁测比较，它具有读数精度高、观测参数多和野外施工方便快速等特点。其工作原理与常规磁测方法基本一致。新型的高精度磁力仪自动化程度高，可点测，也可自动连续观测，观测数据可通过接口实时传输到便携式计算机上，由专用软件进行处理和成图。

瞬变电磁法（TEM）利用接地电极或不接地回线脉冲电流，在地下建立起一次脉冲磁场。在一次场的激励下，地质体将产生涡流，其大小与地质体的电特性有关。在一次磁场间歇期间，该涡流将逐渐消失并在衰减过程中，产生一个衰减的二次感应电磁场。通过设备将二次场的变化接收下来，经过处理、解释可以得到与断裂带、采矿中的陷落柱及地下岩溶等资料。而瞬变电磁法则受环境影响较小，可开展水上作业。

（二）高密度电阻率法与联合三极测深剖面法

高密度电阻率法和联合三极测深剖面法均是将电阻率测探和剖面法综合使用的一种方法，可获取地下电阻率分布的最大信息，既可研究深度方向的电性变化，也可研究水平方向的岩性变化，在探测地下洞穴或陷落柱等地质体时具有较高的分辨率。

高密度电阻率法具有多装置、多极距的组合方法，一次布极即可进行多装置数据采集。主要特点是高密度排列、测点密度大；一次布极连续观测；自动变换多种装置观测获取多参数；通过参数换算取得更多突出有效异常的比值参数，更利于推断解释。

（四）高精度重力勘探

高精度重力勘探方法与常规重力勘探的原理基本相同，所不同的是采用微伽级重力仪观测，精度可达 $10\times10^{-8}\ m/s^2$，适用于探测小构造，同时可沿不同高度进行梯度测量获取重力梯度，对划分地质体的边界十分有效。

（五）探地雷达

探地雷达是一种既古老而又年轻的物探技术，20 世纪 90 年代以后在中国得到较多的应用。其工作方法与地震相似，通过雷达天线向地质体内发射一短脉冲信号，信号在地质体内的传播主要取决于地质材料的电特性。当这种电特性发生变化时将发生反射、折射等现象。利用放置在相应位置上的接受器将信号接受下来，经放大、数字化处理和显示，为解释提供必要的数据和图像。

目前，有关开发公司相继推出了多态雷达系统和层析雷达系统等多种仪器。利用全自动组合地质雷达激光经纬仪系统，一人可在 2 h 内完成 25 m×25 m 范围的三维数据采集，三维空间方向上的定位精度为 ±2.5 cm。数据处理、成图可

在 1 h 内完成，比传统方法的效率提高 5 ~ 10 倍。

探地雷达可用于浅部地下环境调查、土壤与基岩面的探测、基岩节理和裂隙的确定等 还可用于地下埋藏物、岩溶、建筑地基探测,道路、桥梁、水坝探测和质量无损检测，以及滑坡、隐伏洞穴的探测等。

（六）核磁共振(NMR)技术

地面核磁共振找水技术是目前惟一可用于直接探测地下水的物探技术。利用该项技术除了可以获得水源分布和水量多少的信息，还可以获得有关含水层的信息。1997 年后，中国引进了三台法国生产的核磁共振仪器，开始了地面核磁共振找水技术的应用研究。

NMR 找水的理论基础是包括水中 H^+ 在内的许多原子核都具有非零磁矩，并且处于不同化学环境中的同类原子核（如水、苯或环乙烷中的氢原子）具有不同的共振频率。因此，在给定的频率范围内，如果存在有 NMR 信号，就说明试样中含有该种原子核类型的物质。 NMR 以核磁共振现象为基础，通过建立非均匀磁场和地球物理 NMR 层析，可研究地下水的空间分布。

（七）地球物理层析成像(CT)技术

地球物理 CT 的发展主要受医学 Cr 的影响。在地学 CT 中，一般通过在钻孔一钻孔、地面—钻孔和井下坑道间发射和接收地震波、声波或电磁波，并将相应位置上接收到的有关地球物理场的信号经 CT 处理后得到勘测区的图像。与医学 CT 比较,地球物理 CT 的目标体形状不规划、参数复杂、计算数据量大。CT 技术在矿区采矿工作面超前探测、岩溶、断裂带等的调查中发挥了有益的作用。

随着三维高分辨率地震、探地雷达及层析成像等技术的广泛应用，将进一步增强地球物理勘探方法在环境地质调查、评价中的作用，实现对滑坡、地下水污染等环境地质问题在时间和空间域内的监测。

主要参考文献

1. 《中国自然保护纲要》编委会. 中国自然保护纲要. 北京：中国环境科学出版社,1987
2. H. A. 施罗德［美］著. 痕量元素与人. 北京：科学出版社,1979
3. UNEP. 沙漠化现况与联合国防治荒漠化行动计划执行情况. Nairobi,1992
4. 长江水利委员会. 长江工程地质研究. 武汉：湖北科学技术出版社， 1997
5. 陈德兴，邵器行. 环境地球化学研究现状与进展. 地学前缘,1996,3(1):119 ~ 126
6. 陈光曦. 泥石流防治. 北京：中国铁道出版社,1983
7. 陈静生. 环境地球化学. 北京：海洋出版社,1990
8. 陈梦熊. 关于海平面上升及其环境效应. 地学前缘,1996,3(2):133 ~ 140
9. 陈永文. 中国国土资源及区域开发. 上海：上海科技出版社,1989
10. 陈余道,蒋亚萍. 城市地下水开发利用的生态环境问题. 中国地质灾害与防治学报,1997,8(1):63 ~ 68
11. 程鸿. 中国自然资源手册. 北京：科学出版社,1990
12. 慈龙骏,吴波. 中国荒漠化气候类型划分与潜在发生范围的确定. 中国沙漠,1997,17(2):107 ~ 111.
13. 戴塔根，刘悟辉，马国秋. 环境地质学. 长沙：中南大学出版社,1999
14. 段永侯，罗元华. 中国地质灾害. 北京：中国建筑工业出版社,1993
15. 顾小芸，冉启全. 地面沉降预测和防治措施研究. 中国地质灾害与防治学报,1998,9 (增刊):7 ~ 13
16. 郭映忠. 三峡库区重庆段城市滑坡的研究与防治，中国地质灾害与防治学报,1999. 10(2):10 ~ 18
17. 国家地震局科技监测司. 中国地震预报方法研究，北京：地震出版社， 1991
18. 国家科委. 中国 21 世纪议程. 北京：中国环境科学出版社， 1994
19. 盛业华，郭达志，张书毕等工矿区环境动态监测与分析研究. 北京：地质出版社,2001
20. 哈承佑. 环境地质学进展与展望. 水文地质工程地质,1999,26(5):24 ~ 29
21. 韩宗珊. 长江三峡工程环境地质评价与预测. 北京：中国科学技术出版社,1993

胡汉升. 环境医学. 北京：中国环境科学出版社，1986
22. 华安增. 能源发展方向中国矿业大学学报，2002,31(1):14~18
23. 华小梅，江希流. 我国农药环境污染与危害的特点及控制对策. 环境科学研
24. 究,2000. 13(3):40~43
纪万斌等. 塌陷与灾害. 北京：地震出版社,1996
25. 季子修，施雅风. 海平面上升、海岸带灾害与海岸防护问题. 自然灾害学报，
26. 1996,3(2):56~64
蒋爵光. 铁路工程地质学. 北京：中国铁道出版社,1991
27. 金淮. 海水入侵与滨海地下水的管理. 见：水资源开发与环境. 北京：科学出
28. 版社,1990
金鉴明. 自然保护概论. 北京：中国环境科学出版社，1991
29. 李鄂荣，姚清林. 中国地质地震灾害. 长沙：湖南人民出版社,1998
30. 李鄂荣. 环境地质学. 北京：地质出版社,1991
31. 李家熙，吴功建，黄怀曾等. 区域地球化学与农业和健康. 北京：人民卫生出
32. 版社,2000
33. 李天斌，陈明东. 滑坡预报的几个基本问题工程地质学报，1999,7(3):200~206
34. 李铁锋,李魁星,潘懋. 三维地理信息系统及其在滑坡灾害评价中的应用前景. 工程地质学报,2000,8 (增刊):507~512
35. 李铁锋,潘懋,刘瑞珣. 基岩斜坡变形与破坏的岩体结构模式分析. 北京大学学报（自然科学版）,2002,38(2):239~244
36. 李铁锋,潘懋. 环境地学概论. 北京：中国环境科学出版社，1996
37. 李铁锋，孙卫东. 三峡库区万县市移民迁建新址地质环境质量经济评价研究. 中国地质灾害与防治学报，2000,11(1):45~49
38. 李铁锋. 论人地关系危机与地球科学. 河北地质学院学报，1996,19(6):753~757
39. 李晓红. 矿产资源的合理开发与利用. 重庆：重庆出版社,1994
40. 林炳营. 环境地球化学简明原理. 北京：冶金工业出版社,1990
41. 林炳营. 环境地学基础. 重庆：科技文献出版社重庆分社,1989
42. 林年丰. 环境水文地质学北京：地质出版社，1990
43. 刘昌明，陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析. 北京 中国水利水电出版社,2001
44. 刘传正环境工程地质学导论. 北京：地质出版社,1995
45. 刘传正. 论地质灾害防治工程的地质观与工程观. 工程地质学报，1997,5(4):368~374

46. 刘嘉麒. 中国火山. 北京：科学出版社，1999
47. 刘起霞，李清波，邹剑峰. 环境工程地质. 郑州：黄河水利出版社，2001
48. 刘守全，张明书. 海洋地质灾害研究与减灾. 中国地质灾害与防治学报，1998，9（增刊）：159～163
49. 刘玉海. 21 世纪中国沿海城市面临的主要地质灾害问题. 中国地质灾害与防治学报，1998，9（增刊）：120～126
50. 刘兆昌. 地下水系统的污染与控制. 北京：中国环境科学出版社，1991
51. 柳源. 论地质灾害的基本属性. 中国地质灾害与防治学报，1999，10（3）：15～18
52. 娄华君，王宏，夏军. 地质信息可视化的应用——城市环境地质研究之发展方向. 中国地质，2002，29（3）：330～334
53. 卢金凯. 中国水资源. 北京：地质出版社，1991
54. 卢耀如. 国土地质——生态环境综合治理与可持续发展. 中国地质灾害与防治学报，1998，9（增刊）：91～99
55. 鲁益矩. 全国国土综合开发重点地区水资源和地质环境评价. 北京：地质出版社，1994
56. 陆玉珑. 滑坡滑动面的性状与整治工程. 滑坡文集（第十一集），北京：中国铁道出版社，1994
57. 罗国煜. 工程地质学基础. 南京：南京大学出版社，1990
58. 罗元华，张梁，张业成. 地质灾害风险评价方法，北京：地质出版社，1998
59. 骆培云. 新滩滑坡与临阵预报. 见 中国典型滑坡，北京 科学出版社，1988
60. 马少鹏，王来贵. 加拿大岩爆灾害的研究现状，中国地质灾害与防治学报，1998，9（3）：107～112
61. 马宗晋，郑功成. 灾害学导论. 长沙：湖南人民出版社，1998
62. 马宗晋. 自然灾害与减灾. 北京：地震出版社，1990
63. 毛同夏. 环境地质学中几个重要问题的探讨. 见 环境地质研究，北京 地震出版社，1991
64. 南京大学地理系. 自然地理基础. 北京：商务印书馆，1980
65. 潘懋，李铁锋. 灾害地质学. 北京：北京大学出版社，2002
66 商宏宽. 自然灾害研究中几个观念问题的讨论. 工程地质学报，1996，4（3）：17～23
67. 宋俊高，朱元清等. 关于建立城市防震减灾应急决策信息系统（GIS 应用）的设想，地震学报1998，20（2）：210～216
68. 隋鹏程. 中国矿山地质灾害. 长沙：湖南人民出版社，1998
69. 孙广忠. 地质工程理论与实践. 北京：地震出版社，1996

70. 孙红月，尚岳全. 顺斜向坡变形破坏特征研究，工程地质学报， 1999,7(2):141~146
71. 孙玉科,杨志法,丁恩保等. 中国露天矿边坡稳定性研究. 北京：中国科学技术出版社,1999
72. 孙竹友. 环境·资源·利用·保护. 北京：中国政法大学出版社,1989
73. 田洪斌. 能源知识 500 题. 兰州：甘肃人民出版社,1995
74. 汪民,吴永峰. 地下水微量有机污染. 地学前缘,1996,3(2):169~175
75. 王琪. 矿产资源开发利用对自然环境的影响见：可持续发展之路. 北京：北京大学出版社,1994
76. 王长贵. 中国新能源的开发与利用. 北京：能源出版社,1986
77. 王恭先. 滑坡防治工程措施的国内外现状，中国地质灾害与防治学报， 1998,9(1):1~9
78. 王景明. 冀京津区自然灾害及其防治. 北京：地震出版社,1994
79. 王明德. 环境地质制图刍议. 见中国环境地质研究. 北京：科学出版社,1988
80. 王庆一. 中国能源. 北京：冶金工业出版社,1988
81. 王时麒. 我国矿产资源勘查开发形势与可持续发展战略. 见：可持续发展之路. 北京：北京大学出版社,1994
82. 王士革. 山坡型泥石流的危害与防治. 中国地质灾害与防治学报， 1999,10(3):45~50
83. 王士天. 大型水域水岩相互作用及其环境效应研究. 地质灾害与环境保护,1997,8(1):69~88
84. 王思敬. 工程地质学的任务与未来. 工程地质学报,1999,7(3):195~199
85. 王允鹏，周亚明. 黑龙江省地质灾害与防治对策. 中国地质灾害与防治学报,1998,9 (增刊):148~152
86. 王子平. 灾害社会学. 长沙：湖南人民出版社,1998
87. 魏加华,李宇,张建立等. 人工神经网络在水源地影响评价中的应用. 地球学报,2001,22(3):283~288
88. 吴波. 我国荒漠化现状、动态与成因. 林业科学研究,2001,14(2):195~202
89. 吴德春. 能源经济学. 北京：中国工人出版社,1991
90. 吴积善，田连权. 泥石流及其综合治理. 北京：科学出版社1993
91. 席守诚. 中国地理环境与自然资源. 北京：中国科技出版社,1992
92. 夏其发. 滑坡研究综述. 中国地质灾害与防治学报,1994,5(4):
93. 肖和平. 煤矿诱发地震研究. 华南地震,1998,18(4):83~87
94. 徐光宇，皇甫岗. 国外火山减灾研究进展. 地震研究,1998,21(4):397~405
95. 徐嘉谟. 关于滑坡预报问题. 工程地质学报,1998,6(4):319~325

徐水源. 桂林环境工程地质. 重庆：重庆出版社，1988
徐卫亚，孙广忠. 论地质灾害学研究. 见；第四届全国工程地质大会论文选集. 北京：海洋出版社，1992.
96. 徐文，雷冶平. 大方县城滑坡群防治研究. 中国地质灾害与防治学报，1998，9（1期）：59～63
97. 闫满存，李华梅，文启忠等. 区域地质环境质量评价研究的现状与趋势. 地球科学进展，1999，14（4）：371～376
98. 阎世骏，刘长礼. 城市地面沉降研究现状与展望. 地学前缘，1996，3（1）：93～98
99. 阳友奎. 崩塌落石的 SNS 柔性拦石网系统. 中国地质灾害与防治学报，1998，9（增刊）：313～321
100. 杨顺安，晏同珍. 预测滑坡学概要. 中国地质灾害与防治学报，1998，9（增刊）：1～6
101. 杨忠芳，朱立，陈岳龙. 现代环境地球化学. 北京：地质出版社，1999
杨忠耀. 环境水文地质学. 北京：原子能出版社，1990
102. 叶笃正. 中国的全球变化预研究. 北京：地震出版社，1992
103. 叶锦昭. 世界水资源概论. 北京：科学出版社，1993
104. 叶文虎. 环境质量评价学. 北京：高等教育出版社，1994
105. 叶镇杰. 矿山环境工程. 长沙：中南工业大学出版社，1987
106. 易庆林，王尚庆. 崩塌滑坡监测方法适用性分析. 中国地质灾害与防治学报，1996，7（增刊）：93～101
107. 殷跃平，李媛. 区域地质灾害趋势预测理论与方法. 工程地质学报，1996，4（4）：75～79
108. 殷跃平. 三峡库区移民迁建地质灾害研究. 中国地质灾害与防治学报，1998，9（增刊）：59～67
109. 于维汉. 地方病及其防治. 哈尔滨：黑龙江科技出版社，1985
110. 曾国安. 灾害保障学. 长沙：湖南人民出版社，1998
111. 张斌，符文熹. 深埋长隧道岩爆的预测预报及防治初探. 地质灾害与环境保护，1999，10（1）：25～28
张梁，张业成等. 地质灾害灾情评估理论与实践. 北京：地质出版社，1998
112. 张秋文，张培震. 地震中长期预测研究的进展和方向. 地球科学进展，1999，14（2）：147～152
113. 张寿全，王思敬. 人类活动与中国沿海环境工程地质问题. 地学前缘，1996，3（1）：69～76
114. 张天曾，中国水利与环境. 北京：科学出版社，1990

119. 张咸恭. 工程地质学. 北京：地质出版社，1983
120. 张业成. 我国洪涝灾害的地质环境因素与减灾对策建议. 地质灾害与环境保护，1999，10(1)：1～13
121. 张振克. 太湖流域湖泊水环境问题、成因与对策. 长江流域资源与环境，1999，8(1)：81～86
122. 张倬元，王士天. 工程地质分析原理. 北京：地质出版社，1994.
123. 张宗祜，袁道先. 我国跨世纪的重大地学问题——环境地学发展前景. 地质科技管理，1995，(5)：60～69
124. 赵改栋. 煤矿采空塌陷的成因条件及政府对策选择. 中国地质灾害与防治学报，1997，8(4)：44～48
125. 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(1999)，2000.7
126. 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2001)，2002.7
127. 钟立勋. 中国重大地质灾害实例分析. 中国地质灾害与防治学报，1999，10(3)：1～10
128. 钟荫乾. 滑坡与降雨关系及其预报. 中国地质灾害与防治学报，1998，9(4)：81～86
129. 钟佐新. 地质环境及其功能的控制与开发. 地学前缘，1996，3(1)：11～16
130. 周平根. 从系统观点论环境地质学的研究方法. 地学前缘，1996，3(2)：35～42
131. 朱汝烈. 我国地质灾害勘察、监测新技术方法现状和展望. 中国地质灾害与防治学报，1998，9 (增刊)：344～348
132. 朱耀琪. 浅论地质环境的监测评价和监督管理. 见：环境地质研究. 北京：地震出版社，1991
133. 朱永峰，孙世华. 矿产资源经济学. 北京：中国经济出版社，2000

134. Alwyn S. Volcanoes. UCL press Limited，1994
135. Barbara W M，Brian J S，Stephen C P. Dangerous earth. John Wiley & sons，Inc.，1997
136. Barbara W M，Brian J S，Stephen C P. Environmental geology. New York：John Wiley & sons，Inc.，1996
137. Charles J C，Pobert D H，Francis T S. Physical geology. Harper & Row，1976
138. Coates D R. Environmental geology. John Willey & Sons. Inc.，1992
139. James F. McDivitt. International mineral Development Sourcebook. Sussex：Chandlers Printers Limited，1993
140. Keith S. Environmental hazards. London：Routledge，1996
141. Keller E A. Environmental geology. New Jersey：Prentice Hall，Inc.，1996

142. Montgomery C W. Environmental geology. Wm. C. Brown Publishers, 1997
143. Patrick L A. Natural disasters. Wm. C. Brown Publishers, 1996
144. Robert W D , Barbara B D. Mountains of fire. Cambridge University Press, 1991

再版前言

自本书第一版出版迄今已 5 年有余。5 年多来，环境地质学已经成为地球科学领域不同交叉渗透的前沿学科，一系列理论研究成果和重大环境地质问题的解决进一步完善了环境地质学理论体系，RS、GPS 和 GIS 等高新技术和手段为环境地质学从定性到定量、从宏观到微观、从浅部到深部的多层次系统研究提供了广阔的前景。国内一些学者相继编著出版了各具特色的环境地质学教材，高等院校的地球科学专业更加注重培养环境地质理论研究和工程实践的人才。

本书以潘懋、李铁锋、孙竹友编著的《环境地质学》（地震出版社，1997 年 8 月第一版）为蓝本，保持了原版的篇章体系，充分吸收国内外的最新研究成果，增加了环境地质学研究方法的论述，使学生在掌握环境地质学基本理论和方法的同时，能够运用所学知识积极参与灾害治理与环境保护的实践。

在本书编写过程中，得到了许多同事的支持和帮助；北京大学教务部教材办公室对本书的编写和出版给予了大力支持。地震出版社的王伟先生协助办理了本书版权的转让事宜。本书出版过程中，高等教育出版社徐丽萍先生付出了辛勤的劳动。在此向他们表示衷心的感谢。

书中错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

潘　懋

2003 年 5 月 28 日

于北京大学逸夫贰楼

第一版前言

随着人口的剧增和工业化进程的发展，地球环境遭到了不恰当的开发和破坏，使人类面临诸多的环境问题。人们逐渐认识到发生于地球表层环境的全球性重大变化正在直接影响着人类的生存和社会发展。1992 年联合国第二届环境与发展大会通过了《21 世纪行动议程》，使世人更加意识到环境保护的重要性和迫切性。20 世纪 90 年代被联合国确定为“国际环境教育十年”和“国际减灾十年”。最近几届国际地质大会一再强调，为了解决当前许多环境问题，特别是全球性环境问题，地质学家应该为此做出贡献。当代地质科学比以往任何时候都更有能力研究和解决人类社会发展中的许多重大问题。同时，人类生存和社会发展对地质科学的要求也越来越高。许多国家的地质机构已把工作重点逐渐转移到环境地质调查、研究方面上来。

我国人口众多，经济上属于发展中国家，环境问题更加严重。许多环境问题是由于不合理利用各种地质资源、不断进行工程建设而造成的。目前，我国在环境地质研究方面，已开展了大量的调查工作，并取得许多重要成果。许多高等院校的相关学科纷纷调整专业方向，注重培养环境人才；传统水文地质、工程地质工作多数已被环境地质工作所代替，具有我国特色的环境地质学理论体系正在逐渐形成。

本书的编写集作者多年的教学经验和科研成果，同时参考了国内外大量的最新研究成果。全书共分十章，第一、二章分别介绍了环境地质学的基本概念、研究内容和环境地质学理论研究的几个前沿问题；第三、四、五、六章分别论述了土地资源、水资源、矿产资源和能源的供求状况及其开发利用对地质环境的影响，以及资源保护和可持续利用；第七章介绍了地质灾害的特征及其对人类的影响；第八章叙述了几种主要人类活动与地质环境之间的相互作用和相互影响；第九章论述了地质环境与人体健康的关系；第十章以地质环境质量评价为主要内容论述了环境地质学的基本工作方法。

环境地质学的理论体系和研究方法正处在不断发展和完善之中，某些方面的研究和探索还很不够。由于我们的水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请读者批评指正。在本书编写过程中，得到了许多同事的支持和帮助；书中图件由河北地质学院李艳秋老师清绘。在此向他们表示衷心感谢。

作　者

1996 年 7 月

前言
第一章　绪论
第一节　环境地质学的研究对象、内容与分科
一、环境地质学的研究对象与任务
二、环境地质学的研究内容
三、环境地质学的分支学科
第二节　环境地质学的研究方法及与其他学科的关系
一、环境地质学的研究方法
二、环境地质学与其他学科的关系
第三节　环境地质学的发展简史
一、环境地质学的孕育阶段
二、环境地质学的创立与发展阶段
第二章　环境地质学的基本理论问题
第一节　地质环境的内涵与基本特征
一、地质环境的内涵
二、地质环境的基本特征
第二节　环境地质作用
一、自然地质作用
二、人为地质作用
三、人地关系与可持续发展
第三节　环境地质学理论研究的几个前沿问题
一、全球变化问题
二、地球各圈层的相互作用问题
三、陆地水圈演化与地下水渗流理论
四、生态环境地质问题
五、医学环境地质问题
六、地质灾害防治
七、地质环境工程
八、地球表层系统非线性演化问题
九、环境地质质量评价与区划
十、环境地质信息系统建设
第三章　土地资源与地质环境
第一节　土地资源与土地（壤）环境问题
一、土地资源的概念及其特征
二、土地资源状况
三、土地（壤）环境问题
第二节　土地利用对地质环境的影响
一、水土流失
二、水环境恶化
三、土地沙质荒漠化
四、土壤盐渍化
五、土壤污染
六、湿地减少
七、耕地日趋减少
第三节　土地资源保护与可持续利用
第四章　水资源与地质环境

第一节　　水资源与水环境问题概述
一、水资源的概念及其特征
二、水资源供求状况
三、水环境问题概述
第二节　　水体污染
一、水体污染的基本概念
二、水体的主要污染物及其来源
三、污染物的环境水文地球化学效应
四、水体污染的危害
五、水体污染防治对策
第三节　　水资源开发对地质环境的影响
一、环境水文地质作用
二、水资源开发的负环境效应
三、水资源开发的正环境效应
第四节　　水资源保护与可持续利用
一、水资源保护与可持续利用的目标和内容
二、水资源保护与可持续利用对策
第五章　　矿产资源开发与地质环境
第一节　　矿产资源及其特性
一、矿产资源的概念及其特征
二、矿产资源的供给与需求
第二节　　矿产资源开发对地质环境的影响
一、概述
二、露天采矿对地质环境的影响
三、地下采矿对地质环境的影响
四、工矿废物对地质环境的污染
五、矿产资源开发影响地质环境的主要因素
第三节　　矿山地质环境治理
一、矿山地质环境治理的基本原则
二、露天矿的复垦与利用
三、废石堆、尾矿池复垦
四、地面塌陷和废弃矿井整治
五、矿山“三废”的综合利用
第六章　　能源与地质环境
第一节　　能源与能源环境问题概述
一、能源的概念及其分类
二、常规能源的供给与需求
三、能源环境问题概述
第二节　　能源开发对地质环境的影响
一、能源与环境的关系
二、常规能源开发利用对地质环境的影响
三、新能源开发及其对地质环境的影响
第七章　　人类活动与地质环境
第一节　　工程活动与地质环境
一、大型水利水电工程环境地质问题
二、道路交通工程环境地质问题

三、跨流域调水工程环境地质问题
第二节　　城市化与地质环境
一、城市生态系统及其特征
二、城市化与水环境
三、城市化与地质灾害
四、城市化与土地利用
五、城市环境地质研究
第三节　　农业活动与地质环境
一、农业化学化对地质环境的影响
二、农业活动对土地资源的破坏
第四节　　人工废弃物处置与地质环境
一、概述
二、城市废弃物处置的环境地质问题
三、放射性废物处置的环境地质问题
第八章　　地质灾害
第一节　　地质灾害概述
一、地质灾害的定义及其内涵
二、地质灾害的类型及其特征
三、中国地质灾害的空间分布规律
第二节　　地震灾害
一、地震活动概述
二、地震活动对人类的影响
三、地震活动的监测与预报
第三节　　火山喷发灾害
一、火山活动概述
二、火山喷发对人类的影响
三、火山活动的监测与预报
第四节　　斜坡变形破坏地质灾害
一、崩塌
二、滑坡
三、泥石流
四、斜坡变形破坏地质灾害对人类的影响
五、斜坡岩土体变形破坏的监测与预报
六、斜坡岩土体变形破坏的防治
第五节　　岩溶地面塌陷
一、地面塌陷的概念和类型
二、岩溶地面塌陷的影响因素
三、岩溶地面塌陷的形成
四、岩溶地面塌陷的分布规律
五、岩溶地面塌陷的危害
六、岩溶地面塌陷的防治
第六节　　地裂缝
一、地裂缝的特征
二、地裂缝的成因类型
三、地裂缝的规模及分布
四、地裂缝的危害

五、地裂缝灾害防治措施
第九章　　地质环境与人体健康
第一节　　表生环境地球化学特征
一、地壳中的元素
二、表生环境中元素的迁移转化
三、表生环境地球化学的地带性特征
四、人类活动对原生地球化学环境的影响
第二节　　原生环境地球化学异常与人体健康
一、地球化学元素与人体健康
二、人体对环境致病因素的反应与地方病
三、地方性甲状腺肿
四、地方性氟中毒
五、大骨节病
六、克山病
七、癌症
第三节　　环境污染对人体健康的影响
一、环境污染物的迁移转化规律
二、化学污染对人体健康的危害
三、生物性污染人体对健康的危害
第十章　　环境地质调查评价与制图
第一节　　环境地质调查
一、环境地质调查的任务与内容
二、环境地质调查的基本程序
三、环境地质调查方法
第二节　　环境地质评价
一、环境质量与环境质量评价概述
二、环境质量评价的原理和一般程序
三、环境质量评价方法
第三节　　地质环境质量现状评价
一、地质环境质量评价概述
二、地质环境质量评价指标体系的设计原则
三、地下水环境质量现状评价
四、城市地质环境质量现状评价
五、区域地质环境质量综合评价
第四节　　地质环境质量影响评价
一、环境影响评价概述
二、地质环境质量影响评价的基本原则
三、地质环境质量影响评价的方法
第五节　　环境地质区划与制图
一、环境地质区划
二、环境地质制图
第六节　　环境地质研究新技术与新方法
一、遥感
二、全球定位系统
三、地理信息系统
四、地球物理探测技术

主要参考文献