目　录

序……（1）

前言……（3）

中国水文地质学的发展史

中国水文地质学的发展与成就……（1）

论水文地质学的新学科体系……（10）

水资源与社会经济可持续发展

中国地下水资源的区域特征与初步评价……（14）

城市水资源问题与对策研究……（22）

农业水资源与可持续发展……（30）

西北干旱区水资源的开发利用与生态环境

河西走廊水资源开发与生态环境……（38）

新疆水资源及其合理开发利用……（42）

西北干旱区水资源与第四纪盆地系统……（49）

沿海地区海平面上升与地质环境

关于海平面上升及其环境效应……（55）

关于海平面上升与控制城市地面沉降……（62）

沿海地区地质环境与地质环境系统……（71）

地下水系统的基本理论及其应用

地下水系统的基本理论与研究范畴……（76）

地下水系统研究与概念模型……（82）

环境地质学与环境地质问题

环境地质工作的基本任务与最新发展……（91）

环境地质学的基本理论与研究领域……（98）

主要论著目录……（104）

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

Contents

Preface …… (*1*)
Foreword …… (*3*)
Historical Development of Hydrogeology in China
The Development and Achievement of the Hydrogeological Science in China …… (1)
A New Schematic System of the Hydrogeological Courses …… (10)
Water Resources and Social-economic Sustainable Development
Regional Characteristics and Assessment of Groundwater Resources in China …… (14)
Studies on the Problems of the Urban Water Supply and Its Protective Measures …… (22)
Agricultural Water Resources Related to Sustainable Development …… (30)
The Exploitation and Utilization of Water Rerources Related to Ecological Environment in Arid Area of Northwest China
Development of Water Resources and Eco-Environment in Hexi Corridor of Gansu Province …… (38)
The Rational Development of Water Resources in Xinjiang Uygur Autonomous Region …… (42)
The Water Resources Related with Quaternary Basin Systems in Arid Area of Northwest China …… (49)
The Rise of Sea Level Related to Geological Environment in Coastal Area
The Rise of Sea Level and Its Environmental Effects in Coastal Area …… (55)
The Rise of Sea Level in Relation with the Control of Land Subsidence in Urban Area …… (62)
The Characteristics of the Geological Environment and the Geo-environmental System in Coastal Area …… (71)
The Basic Conceptions and Applications of Groundwater System
On the Basic Theory and the Scope of Researches of Groundwater System …… (76)
Analysis of Groundwater System Related to Conceptional Model …… (82)
Environmental Geology and Environ-geological Prohlems
The Current Development and the Main Tasks of the Environ-geological Investigations …… (91)
On the Basic Theory and the Researching Scope of the Environmental Geology … (98)
Bibliography of Publications …… (104)

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

Abstract

The whole book is composed of 15 papers and divided into 6 parts mostly written during the past 10 years. The first part is a general introduction to the historical development of the hydrogeology in China. The second part gives an outline of the groundwater resources of China and pays special attention to the hydrogeological problems on urban water supply and agricultural irrigation. The third part is in focus to analyze the complicated relationships between the hydrogeological system and the irrigation system, as well as the water resources system and the eco-environmental system under the man-made influences in arid area. The fourth part delineates the changes of the geological environments in coastal area due to both of the sea-level rising caused by "green house effect", and also the impacts of human activities particularly resulting from the rapid development of the economic constructions. In order to diminish the injury of sea level rising, the importance of controlling land subsidence in urban area due to over-exploitation of groundwater is emphasized because of the magnitude of land subsidence is much larger than that of the rise of sea level. The fifth part is dealing with the basic conception and the application of the theory of groundwater system, especially in the use to establish a conceptional model. The sixth part is mainly to discuss the basic definition and the key themes of the environmental geology, a so\|called "man and earth system" is attempted to be established known as the great open complexity system in concern with both of the natural environment systems and social-eoonomical systems. The scopes and the constructions of this theoretic system are under discussion.

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

中国水文地质学的发展史

中国水文地质学的发展与成就

一、引　言

我国水文地质学作为地质科学中的一门独立学科，实际上创立于新中国建立之后的50年代。传统水文地质学的基本概念在早期50～60年代，主要从前苏联引进。70年代以来，与西方国家之间的学术交流与国际合作日益频繁，促使我国水文地质学的迅速发展；特别是许多新理论、新技术的输入，导致传统水文地质学逐渐演化，进入到现代水文地质学的新时期。

“水文地质学”这一术语，虽然早在19世纪初，就在欧洲被正式提出来；但真正成为地质科学中一门比较完整、系统的独立学科，只是本世纪30～40年代的事。特别是二次大战结束以后，随着地质科学的迅速发展，西方许多国家（包括前苏联）对地下水的研究，开始在地质科学的基础上（如地层学、岩石学、构造地质学、地球化学、地球物理学等），和其它一系列基础自然科学（如数学、物理学、化学、生物学等）以及水文科学相互结合，相互渗透，逐渐发展成为一门跨学科的综合性边缘学科。水文地质学从研究地下水的自然现象、形成过程和基本规律，发展到对地下水的定性、定量评价；它的基本理论，勘察方法和应用方向，也逐步形成。从70年代以来，水文地质学又从地下水系统的研究，进一步扩大为研究地下水与人类圈内由资源、环境、生态、技术、经济、社会组成的大系统。因此水文地质学的研究目标，开始转入到研究整个水系统与自然环境系统和社会经济系统之间相互关系的新时期。

我国对地下水的认识和开发利用，虽具有数千年的悠久历史，但真正运用地质科学的理论与方法，进行地下水的调查研究，仅开端于30年代。如老一辈的地质学家朱庭祜、谢家荣等，曾于这一时期分别到过江西、河南及南京等地区，进行地下水的调查研究，并著有论文或报告。但水文地质学，作为地质科学领域内一门独立的应用地质学科，是在新中国成立后50年代，才迅速发展起来的。

作者曾把我国水文地质学的发展历史，划分为四个阶段，即：①萌芽阶段（20世纪前）；②初始阶段（1990～1950），开始应用地质学的基本理论研究地下水；③奠基阶段（1950～1980），主要在苏联学术思想影响下，奠定水文地质学的理论基础，是区域水文地质学与农业水文地质学的开创时期；④成长阶段（1980～1998），是水资源水文地质学、城市水文地质学与环境水文地质学的发展时期，主要受西方科学技术思潮影响，如系统论、系统工程、计算机技术等新理论、新技术的输入，使我国的传统水文地质学，发展到一个以研究水资源与环境问题为重点的现代水文地质学。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

二、关于区域水文地质学的发展

50年代地质部成立以后，各省的水文地质专业队伍和有关的研究机构以及地质院校等也先后建立，这为水文地质学的发展，创造了必要的条件。当时长春地质学院苏联专家克里门托夫教授，结合讲学编著了《水文地质学》、《水文地质学概论》、《普查与勘探水文地质学》、《地下水动力学》、《矿床水文地质学》等教材，成为我国最早的一批水文地质专业教科书。苏联新的理论，还通过许多著名学者的著述，不断输入中国。如O.K.朗格关于区域水文地质分区理论，G.H.卡明斯基关于地下水的渗流理论，H.A.普洛特尼柯夫关于地下水储量分类与评价，A.B.列别捷夫关于灌区地下水动态预测，以及A.M.奥弗琴尼柯夫关于矿水方面的专著等，对我国水文地质科学的发展，都产生了深远的影响。

各国水文地质学的发展都是从区域水文地质的调查研究开始，我国也不例外。从50年代中期起，我国有计划地在全国开展区域水文地质普查，推动了区域水文地质学的发展。1958年编制出版第一幅比例尺1：300万中国水文地质图和第一本专著《中国区域水文地质概论》；1959年为纪念建国十周年，出版了我国第一本利用本国资料编著的《实用水文地质学》。1957年正式出版发行我国第一个《水文地质工程地质》刊物。这一时期发表了许多有关中国水文地质分区、中国潜水分带规律、中国的自流盆地，以及有关华北平原、松辽平原、关中平原、内蒙高原、河西走廊，柴达木盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地等的区域水文地质论文或专著。因此50年代是我国区域水文地质学的开创时期。70～80年代除少数困难地区外，我国区域水文地质普查基本完成，并开始转入重点经济发展区，如黄淮海平原、济、徐、淮地区，长江三角洲、东北经济区等地区，开展区域地下水资源与环境水文地质评价的调查研究，完成了许多重要研究成果。

在区域水文地质普查资料的基础上，从60年代起，我国中小比例尺水文地质图编图工作迅速发展，并创立了一套具有中国特色的水文地质图编图方法，编制出版了许多按省、市或按地区编制的图幅、图系或图集。其中1978年出版的《中华人民共和国水文地质图集》，基本上系统地反映了我国从50年代以来，区域水文地质工作的主要成果。在此以后，北京、河北、辽宁等省市，也都编制出版了本地区的水文地质图集。

80年代以来，在普查资料基础上，还开展了许多专题研究。如四川、湖南等省对红层裂隙水的研究，中国玄武岩裂隙孔洞水的研究，黄土地下水的研究，以及北方岩溶水的研究等，均已取得重要成果。此外，在普查工作中普遍应用了遥感技术，在系统总结大量遥感资料的基础上，编制出版了《北方遥感水文地质应用文集》，同时还编制了《北方典型遥感水文地质图象集》与《中国岩溶地区典型遥感水文地质图象集》，促进了我国遥感水文地质的发展。以上大量成果，为创建我国的区域水文地质学，奠定了良好基础。

三、关于农业水文地质学的发展

60年代，由于在华北开展大规模的抗旱打井运动，成为农业水文地质学的开创时期。针对农田供水与盐土改良两项任务，开展了大量的调查研究，编制了大量图件，为北方地区发展井灌，实行农田水利化，作出重要贡献。70～80年代又进一步开展许多为发展农业服务的

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

专题研究，如黄、淮、海平原旱、涝、盐等自然灾害综合治理的研究，河南商丘地区潜水资源与人工调蓄的研究，河套平原和银川平原关于水盐均衡和盐土治理的研究，以及河西走廊地下水合理开发利用的研究等，为农业水文地质学的发展奠定了基础。

地质部门对土壤水的研究是一个薄弱环节，而土壤水研究是促进农业增产与建立节水型农业体制的关键。从70年代到80年代，随着许多均衡试验场的建立，以及负压计、中子仪等新的测试技术的引进，促进了包气带土壤水运移规律的研究。河南水文地质总站与有关部门合作，通过“四水”转化关系的机理研究，对土壤水运移机理进行系统分析，并通过田间作物的观测试验，应用土壤水分运动通量法和定位通量法，计算了有植被条件下的降水入渗量、蒸发量以及其它有关数据，建立了“四水”均衡模型，证明在“四水”相互转化关系中，土壤水起着重要的调蓄作用与相互制约作用。这对如何充分发挥土壤水的功能，提高作物用水效率，建立节水型农业，具有重要的实际意义。

零通量面法是近期国外发展起来的一种研究土壤水补给、损耗和均衡的田间试验新方法；对研究土壤水分运动，有重要的实用价值。它采用测量土壤含水量和土壤水势的先进技术，方法简便；与数值模拟方法或地中渗透仪测试方法相比，具有经济、区域代表性强，设点推广容易等优点。不久前水文地质工程地质研究所完成了专著《零通量面方法应用基础研究》，系统地论述了零通量面的基本原理、形成规律及其计算方法。研究工作采用物理模拟试验和田间试验相结合的方法，提出了零通量面法的应用范围以及零通量面法与定位通量法的联合运用法；并建立了改进型定位通量法，提出零通量面法与改进型定位通量法联合运用等各种不同的计算方法。这为今后开展土壤水的研究，创造了有利条件，对发展我国农业水文地质学，也能起到重要作用。

四、关于环境水文地质学的发展

随着城市建设和工业建设的迅速发展，人民生活水平的不断提高，城市水资源的供需矛盾与相应发生的环境问题日趋严重。因此从70年代到80年代，各省都开展了主要为城市和工业建设服务的水文地质工作。也可以说，这是我国城市水文地质学的开创时期。虽然早在50年代，北京、西安、包头、太原等城市，就已进行过水源地的勘察研究，但当时主要局限于水资源评价，而当前城市水文地质研究的目标，不仅要查明城市区域水文地质条件，对地下水资源作出评价，而且还要分析研究水质污染与地下水大量开采所引起的各种负环境效应，如海水入侵、地面沉降、岩溶塌陷等地质灾害。

从70年代开始，大多数大中城市，开展了城市地下水污染现状的调查，包括污染源、污染途径、污染成份、污染程度、分布范围、发展趋势等等。80年代在污染现状调查的基础上，进一步开展了地下水污染机理的研究，包括污染物质的运移、累积、转化与自净过程，特别是污染物质的机械渗滤作用，物理化学吸附作用，离子交换作用，浓缩或稀释净化作用，以及放射性元素的衰变作用等的研究。

研究工作普遍采用了室内模拟试验等新方法。例如呼和浩特市所进行的地下水硝酸盐氮污染机理与防治对策的研究，运用多种模拟试验，研究三氮在包气带介质环境中的行为过程，深入分析硝化与反硝化作用的主要影响因素。通过微生物检验和生物化学的研究，认为硝酸盐氮的污染机理，主要是以硝化作用为主的生物化学反应过程，证明硝化菌在三氮转化中占

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

有重要地位，是硝化反应中的主要影响因素。生物化学作用在污染机理研究中，是我国的一个薄弱环节，这项成果，是对生物化学作用研究的一个突破。此外，如上海地下水砷污染研究，北京关于地下水硬度变化机理的研究等，都进行了大量室内模拟试验，大大提高了研究水平。西安进行的污灌现场入渗试验，以及济宁水质模拟研究所进行的弥散试验，均取得良好效果，查明了污染物的运移、富集规律，为选择污染治理对策，提供了科学依据。

为了预测水污染的发展趋势，并进行合理控制，近年来水质模型的研究，也已取得很大进展。1984 年完成的《山东济宁地下水水质模拟及其污染趋势预测的试验研究》，是我国最早的一项水质模型研究，起到了带头示范作用。以后石家庄、新乡、平顶山等城市，对地下水管理模型的研究，都在建立水量模型的同时，建立了研究溶质运移的模拟模型。在计算方法上，普遍采用了有限元或有限差分等数值法，从而提高了参数的精度和计算结果的可信性与可靠性。

许多城市开展了地下水的环境质量评价，并已逐渐由单项有害离子评价，进入到综合评价；由单项环境因素评价，进入到综合因素评价；从现状评价，发展到趋势评价；由数理统计分析，发展到污染预测和建立水质数学模型。各种评价方法，如综合指数法、概率统计法，以及聚类分析法（包括模糊聚类法与系统聚类法），均得到普遍应用。在模型研究方面，王秉忱等编著的《地下水污染与地下水水质模拟》，及朱学愚编著的《地下水运移模型》，为研究水质模型奠定了理论基础。林学钰等编著的《地下水水量模拟及管理程序集》，简明论述了建立各种模型的技术方法与求解过程，详细罗列了计算程序与使用指南，为开展水质模拟和预测研究，提供了有利工具。

地下水大量开采所引起的各种负环境效应，主要包括水量枯竭、水质恶化、海水入侵、地面沉降、岩溶塌陷，以及生态环境恶化等问题，对人类生活和社会经济造成威胁，因此是城市水文地质工作中的重要研究内容之一。

地下水由于过量开采所形成的水量枯竭，是当前城市水资源开发中最突出的一个严重问题。但过量开采并不意味着水资源不足，这与水资源的开发与水源地的布局是否合理直接有关；当然也与城市发展和工业布局，是否与水资源条件相适应，直接相关。所以严格的讲，这是一个水资源的合理开发与科学管理问题。北京近郊区的七个水源地，由于过度集中，长期处于超采状态。近年来经过全面规划，先后在潮白河冲积扇增建了水源 8 厂与利用密云水库地表水修建的水源 9 厂，使北京市供水紧张状况基本得到缓解。目前正在高碑店修建设计污水净化能力每天 100 万方的污水处理厂，如果投产后同时再采取人工补给等措施，那么北京的供水问题，是基本可以得到解决的。沈阳、济南等城市，同样都出现严重超采，但近年通过管理模型的研究，说明如果扩大开采范围，合理调整水源地布局，地表水、地下水综合开发，水源枯竭问题也是可以得到克服的。

人工补给是扩大水资源，解决过量开采的一个重要途径。近年来各地对地下水人工补给，进行了大量试验研究。如北京黄村进行的人工补给试验，石钢大口径井回灌试验，以及若干厂矿冷却弃水的回收试验等，均已获得成功；有的已经实现投产，发挥了经济效益。为了解决北京供水紧缺问题，水文公司完成了《北京西郊地下水库试验研究报告》，根据回灌水动力场、温度场、浓度场的变化规律，分别建立了数学模型，圈定了边界范围，制定了工程规划和优化调蓄方案，预计可建成 8 亿立方米的大型地下水库。北方许多城市条件类同，这为今后北方城市开展人工补给的研究，开创了前进道路。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

地下水硬度升高，是各城市出现水质恶化最为普遍而又突出的一个问题。如前所述，通过模拟试验与深入分析，已初步得出结论，其形成机理与表土层结构、含水层结构、地下径流条件、废水排放，以及由于地下水开采造成的水动力场的变化等因素有关，因此是多因素形成的，成因比较复杂。由于各地区具体条件不同，所以每一地区的主导因素与形成原因，也因地而异。

沿海城市的海水入侵问题，以大连市开展研究最早。通过详细的分析研究与现场测试，根据水质变化与开采时间、开采降深和开采强度的相关关系，在保证水质条件不变的情况下，计算了最大容许降深与最大合理开采量。过去国外关于海水入侵的模型研究，主要假设咸淡水之间有一个截然的分界面，而实际上咸、淡水层之间显然存在一个过渡带。近年来南京大学在山东莱州、龙口所进行的海水入侵数学模型研究，是在考虑咸、淡水之间存在过渡带的前提下，建立了我国第一个三维咸淡水界面运移数学模型，这在国际上也是一项突破。北海市滨海水源地，是多层承压含水层，如何确定海底边界是一个难题。通过对多层承压含水层海底边界类型的分析研究，提出海底排泄边界的“等效边界”新概念，和确定“等效边界”的新方法，解决了模型计算问题，这也是海水入侵研究中一项新进展。

由于过量开采所造成的地面变形，如上海地面沉降，从60年代起就已开始研究，基本查明了沉降机理，并采取了人工回灌等综合治理措施，建立了回灌量、开采量与沉降量的相关模型；到70年代，基本得到控制，受到较高评价。80年代与比利时专家合作，又在二维渗流模型的基础上，加上反映地面沉降的一维有限元解，组成水动力模型与土力学模型相统一的二维渗流与一维固结的渗流沉降模型，并通过数值模拟，预测开采量与回灌量不同比值下，可能发生的沉降量。这在国内外都是首创。通过多年来实行“冬灌夏用，夏灌冬用”的观测试验，在地下水储能研究方面，查明了采灌过程中储能含水层水温的时空运移规律，建立了单井、对井、群井灌采水量与水温关系的三维热运动模型，这项成果同样是具有开创性的。此外，天津、常州、西安等城市，对地面沉降的研究，也取得不同程度的进展。

关于岩溶塌陷，不论在南方或北方，都进行了深入研究。岩溶地质研究所1990年出版的专著《中国南方岩溶塌陷》，对岩溶塌陷的基本原理、形成条件与形成机制，进行了详细分析，提出了分类方法与防治措施，在《北方岩溶》的专题研究中，对北方的岩溶塌陷问题也进行了系统总结。除上述情况以外，地裂缝是另一种特殊的与地下水开采有关的地面变形现象。西安市出现的多条雁行排列的地裂缝，对城市建筑造成严重危害，经过长期深入研究，认为新构造运动是形成地裂缝的内因，而大量开采地下水是主要外因，对地裂缝的发展起到激发作用。看来这一结论，是比较符合实际的。

综上所述，我国从70年代以来，在城市水资源与环境水文地质研究方面，都取得了重大进展。地矿部水文地质工程地质司主编的《中国2000年城市地下水资源及环境地质问题预测研究》，比较全面的综合反映了我国城市水文地质工作的主要成果。国际水文科学协会1988年出版的《水资源开发的环境效应与管理》一书（英文），其中地下水部分主要由我国专家共同编著，内容包括过量开采、人工补给、水质恶化、海水入浸、地面沉降、岩溶塌陷、生态环境与模型研究等，分别论述了各类环境负效应的基本原理、形成机制、计算方法与治理措施，并附有若干城市的实例研究，系统反映了我国近年来在这一领域所取得的重要成果，在国外受到较高的评价。

关于环境水文地质学，是在城市水文地质学发展的基础上成长起来的，现在基本上已经

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

逐渐形成水文地质学中的一个独立分支。值得高兴的是1990年先后出版了两本作为教科书用的《环境水文地质学》，标志这门新学科的诞生。美中不足的是两本书的内容，都比较偏重污染环境水文地质与医学环境水文地质方面，而且引用的实例也比较少，不能充分反映我国10年来所取得的大量研究成果。作者在80年代初，曾著文探讨环境水文地质学的基本概念与研究范畴，认为存在两种不同观点。一种观点是把环境水文地质学的研究内容，局限于与人体健康有关的污染环境水文地质与医学环境水文地质方面；另一种观点，主张包括研究与人类生活和生产活动有关的一切环境水文地质问题。因此作者认为，前者属于狭义的环境水文地质学，而后者属于广义的环境水文地质学。

所谓广义的环境水文地质学，主要包括：①区域环境水文地质；②污染环境水文地质；③医学环境水文地质；④工程环境水文地质；⑤生态环境水文地质。10年来大量事实说明，以上五项内容中，区域环境水文地质研究，已经取得大量成果。举例来说，地矿部门开展的十几个大片的区域水文地质工程地质综合评价研究，都把区域环境水文地质，作为主要研究内容之一。京津唐地区开展了环境水文地质问题与环境水文地质区划的研究；松花江流域与长江中下游，开展了地下水环境背景值的调查研究；北京、西安、上海、长春、宁夏等编制了环境水文地质图集或图系，水文所正在编制“中国环境水文地质图”，都属区域环境水文地质研究范畴。由此说明，区域环境水文地质的研究，是环境水文地质学的主要内容之一。

在工程环境水文地质方面，主要是研究地下水与地面变形的关系。如前所述，近10年来，关于地面沉降、岩溶塌陷、地裂缝等研究，不仅取得大量成果，而且已有向独立学科发展的趋向。在生态环境水文地质研究方面，重点目标是西北干旱地区由水资源开发所引起的沙漠化、盐渍化、沼泽化以及湖泊干枯、萎缩等生态环境恶化问题。近年来在石羊河、格尔木河及塔里木河等流域，都进行了有关研究；在南方开展了地下岩溶水与农业生态环境的研究；在华北、东北地区开展了大型引水工程，对生态环境影响的研究等。1991年我国还专门召开了生态环境水文地质学术讨论会。在国外“地下水生态学”已日益引起重视，今后有可能将发展成为一门新学科。

值得一提的是，近年来医学环境水文地质学有很大进展，特别是对地下水化学成份与癌症关系的研究，有所突破。江西鄱阳湖地区，通过地下水环境背景值的调查，对38项元素或离子的含量和分布，与10种癌症死亡率之间的相互关系，进行了详细的统计分析，把地下水化学成份与癌症的相关性，划分为以下三大类：①具二重性，即对某几种癌症呈正相关，对另几种呈负相关；②呈正相关；③呈负相关。每一类又按显著程度划分若干亚类，并提出影响系数的新概念。根据影响系数，可以按地下水化学成分，对癌症的发生与发展，作出评价。此外，通过许多科研单位的共同合作，科学出版社出版了《中华人民共和国地方病与环境图集》；若干地方病比较严重的省、自治区，如内蒙、甘肃、吉林、云南等，也分别出版了本地区的地方病环境图集，能比较系统地反映水文地质环境与地甲病、高氟病、克山病、大骨节病等几种主要地方病的相互关系。

五、关于水资源水文地质学

关于地下水资源的勘查与评价，据地质部门统计，自建国以来登记上表的地下水水源地，共计1243处，已开采的832处，其中大型水源地（允许开采量$5\times10^4m^3/d$以上）494处，中

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

型（$1\times10^4\sim5\times10^4m^3/d$）519 处，小型 230 处。按含水介质类型划分，孔隙水类型共 846 处（68%），岩溶水类型 315 处（25%），裂隙水类型 82 处（7%）。可见除孔隙水类型外，裂隙水与岩溶水类型也占有较大比例。

自 70 年代以来，由于应用数学和地下水动力学的相互渗透，以及电算技术的推广和应用，大大丰富和突破了传统水文地质学的内容，使水文地质学从定性研究发展到定量研究的新阶段。地下水资源计算的基本理论，从稳定流发展到非稳定流，从二维流发展到三维流，从一般均衡法、比拟法，进入到解析解、数值解。举凡有限单元或有限差分法、相关分析法以及解析解法等，在地下水资源评价中得到普遍应用。因而不论在理论上和具体计算技术上，都较以前提高到一个新的水平。地矿部近年编写出版的《中国典型水源地勘察实例汇编》，以及国家矿产储量管理局组织编写的《地下水水源地的勘查与评价》，总结了各种类型地下水水源地勘探方法与资源评价的重要经验，是我国水源地勘探与城市水资源研究的一个初步总结。

80 年代出版的《中国干旱半干旱地区地下水资源评价》（曲焕林主编），汇集了北方地区地下水资源研究的大量成果，是我国在 70 年代以来北方区域地下水资源评价研究的系统总结，基本反映了我国这一领域在 70～80 年代初的理论水平与技术水平。我国区域水文地质条件复杂，因此报告中基本上包括了各种不同地区类型的数学模型。例如以地下水弹性效应为基础的数学模型，以地下水延迟给水效应为基础的数学模型，以及以反常水位效应为基础的数学模型等。

商丘在人工调蓄条件下建立的多年均衡法与有限元法结合的数学模型，石羊河流域根据地下水动态演变规律应用不规格有限差分法建立的数学模型，以及黄土层饱和与非饱和地下水的联合数学模型等，在国内均有开创意义。在参数研究方面，以地下水弹性效应为基础的泰斯公式，得到普遍应用。其它如以延迟给水效应为基础的布尔顿理论和纽曼理论，含水层系统的越流理论，以及辐射井的计算公式等，也都得到应用，开拓了参数研究的新领域。在黄土地下水研究方而，建立了与岩溶裂隙水有区别的以反常水位效应为基础的黄土双重孔隙介质潜水井流新理论，这是对黄土层渗流理论研究的一个新突破。

此外，有关地下水资源评价的基本理论和计算方法，已有若干专著或论文集出版，如朱学愚等所著《地下水资源评价》，陈雨孙所著《地下水运动与资源评价》，李俊亭所著《水文地质统计和随机模拟》，《地下水流数值模拟》，以及论文集《地下水资源评价理论与方法的研究》等，为我国地下水资源评价研究，奠定了理论基础。

80 年代后期地下水资源研究的一个重要标志，是把主要目标逐渐转向管理模型的研究，即研究如何合理开发、利用、调控和保护地下水资源，使之处于对人类生活与生产最有利状态。因此它不仅涉及水文地质学的各个领域，面且涉及与地下水开发活动有关的自然环境、社会环境和技术经济环境等各方面的问题，通过数学模型和最优化技术，建立地下水管理模型，实现管理目标。最近出版的作为教材用的《地下水资源管理》一书（陈爱光等编著），是我国第一本内容比较全面，有关管理模型基本理论和研究方法的专著。从系统工程的观点出发，对地下水资源管理的含义，概括为“在一定约束条件下，通过某些决策变量的操纵，使系统按既定的目标达到最优。”所谓约束条件，除水量，水质约束条件外，还包括环境约束条件（特别是开采引起的负环境效应）、社会经济约束条件，以及工程技术约束条件等。90 年代林学钰等又先后发表《实用地下水管理模型》和《地下水管理》等专著。

《石家庄市地下水资源科学管理研究》是我国较早完成具有代表性的关于管理模型的研究

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

成果，按照系统化、模型化、最优化的总体构思，以水文地质模型为基础，把水量模型、水质模型和优化模型融化为一体，从而为控制石家庄市地下水降落漏斗的发展，防治地下水水质恶化，提供了切实可行的综合治理决策方案。甘肃省武威地区还采用目前不多见的多目标规划法，建立了以经济产值最大为目标的农业用水分析模型和跨流域调水模型；并就金昌地区水质管理建立了水质多目标管理模型，这对西北干旱地区条件类似的山前平原，进行水资源开发管理的研究，具有指导意义。目前许多城市如北京、西安、沈阳、新乡、平顶山等，都开展了管理模型的研究，根据不同目标与不同要求，分别建立了有以城市供水为目标的水资源管理模型，为水质控制改良和环境生态改善的管理模型，水质水量联合管理模型，水量调配和供排结合的管理模型，地表水、地下水联合调度模型，以及全流域为工农业生活用水优化分配的规划管理模型等。唐山、邯郸等城市，还建立了水资源经济管理模型。

为保证提供建立模型所需要的大量水文地质信息，就必须建立相应的信息-检索系统和数据库。近年来通过对数据管理系统的研究，河南环境水文地质总站已先后开发了“河南省地下水资源数据管理系统”和“地下水均衡试验观测数据处理系统”，并都已正常运行。山西环境水文地质总站也建立了山西地下水动态数据库（GWD）管理系统，不仅可对动态资料进行输入、修改、查询、统计、打印报表、绘制图形，而且具有多种数量处理功能。许多城市如秦皇岛、石家庄、新乡等，也都分别建立了数据库与数据管理系统。

在信息系统研究的基础上，国内正在计划开展关于城市水资源环境管理专家决策系统的研究。专家系统是人工智能研究领域中的一个重要研究方向，通过对信息数据库、知识库、推理解释系统和知识获取的研究，可以建立通用的城市水资源-环境管理专家决策系统，从而将水资源-环境管理这一复杂系统工程微机化、自动化，为城市水资源业务管理部门提供操作方便的技术工具，不仅可对水资源状态进行实时分析、过程模拟和信息输出，还可对水资源管理实现最佳决策选择。所以开发专家决策系统，是水文地质工作者今后一项重要任务，也是缓解城市水资源供需矛盾的一项不可缺少的战略措施。

综上所述，地下水资源的研究范畴日益扩大，从地下水资源的定义、分类，到地下水系统的研究，发展到地下水系统与自然环境系统和社会经济系统相互关系的研究；从概念模型、数学模型，发展到管理模型的研究；从信息系统发展到专家决策系统的研究；从水资源管理发展到水资源保护的研究，等等。所以地下水资源的研究，已逐渐形成一门分支学科，可以称之为“水资源水文地质学”。

六、结论与展望

现代科学发展的重要特征之一，是向高度分化和高度综合平行并进。水文地质学作为应用地质科学中一门独立学科，其发展过程，同样遵循这一规律。50～60年代作为水文地质学的开创时期，主要内容仅包括普通水文地质学，专门水文地质学，地下水动力学，水文地球化学，以及矿床水文地质学等基本课程。这一早期发展阶段的水文地质学，可以概括的称为“传统水文地质学”。

70～80年代，随着国民经济的迅速发展和国际学术交流与科技合作的日益频繁，新理论、新技术不断输入，特别是受系统论和系统工程等学术思潮的影响，水文地质学的研究内容，也突破传统的研究范畴，发生了巨大演变，新的分支学科如雨后春笋。例如普通水文地质学逐

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

渐向区域水文地质学发展，并派生岩溶水文地质学，古水文地质学等分支。地下水动力学与水文地球化学逐渐演变为以研究地下水资源为重点的资源水文地质学，并向以研究模型为主的数学水文地质学和资源管理水文地质学发展。另一方面专门水文地质学逐渐发展为城市水文地质学与农业水文地质学，并在此基础上，发展为环境水文地质学。环境水文地质学的发展，又派生区域环境水文地质学，污染环境水文地质学，医学环境水文地质学，工程环境水文地质学，生态环境水文地质学以及地震水文地质学等分支。在方法技术方面，由勘探水文地质学，逐渐发展为钻探水文地质学，物探水文地质学，遥感水文地质学，同位素水文地质学，监测水文地质学，计算机水文地质学，制图水文地质学，地下水分析化学等分支。由此可见，水文地质学的研究内容、理论水平与技术方法等，到80年代后期，已经发展到一个崭新的新时期，可以称之为“现代水文地质学”时期，以区别于“传统水文地质学”。

现代水文地质学进入到90年代以后，将是一个日新月异、高速度发展的新时代。资源水文地质学与环境水文地质学，将在90年代扮演主要角色，并将相互结合起来，逐渐演变为“资源环境水文地质学”。今后数学模型与管理模型的研究将愈加多种多样，并由研究阶段进入到实际运行阶段。结合农业方面，以土壤水与作物关系为中心的水分运移循环模型与建立节水型农业结构，将是重点研究课题之一。在信息管理系统方面，将应用遥控技术，建立全国统一的数据库系统。信息数据库管理系统将向建立水资源-环境管理专家决策系统及知识库与推理解释系统发展，并将在水资源管理功能方面，发挥重要作用。许多分支学科，如水资源管理水文地质学，以及环境水文地质学的各分支学科将迅速发展并日臻完善。

区域水文地质学预计将在90年代进入一个新的发展高峰。各省、市、自治区将编制新的水文地质图集与水文地质志和开展各种专题研究，组织编写《中国区域水文地质概论》等系统性总结性的报告或专著。第二代《中华人民共和国水文地质图集》需要通过改编重新再版。组织编制《中国环境水文地质图集》也是90年代的一项重要任务。在编图技术方面，将由机助系统进入到完全由计算机系统控制的自动制图新时期。

目前我国水文地质学的若干领域，已经进入国际先进行列，如区域水文地质学、岩溶水文地质学、环境水文地质学（特别是地面沉降研究与储能研究方面）等，都基本达到国际先进水平。90年代我国在改革开放政策的指引下，国际学术交流与科技合作将发展到一个新的水平，更多的国际重要学术会议将在中国召开。我国在有关国际组织中，将日益发挥重要作用。我国的水文地质科学，也将进入国际先进行列。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

论水文地质学的新学科体系

一、水文地质学的历史演变

水文地质学主要研究地下水在自然环境与人类活动影响下，数量和质量在时间和空间上的变化与演变规律；并在此基础上，研究如何应用这一规律，有效地利用和调节控制地下水，以兴利防害。水文地质学在地质科学领域内，是应用地质学中的一个重要分支，也是最年轻的一个分支学科。作为地质科学与水文科学相互渗透、相互结合而形成的一门新的边缘学科，并发展成为一门系统的独立学科，实际上是从50年代开始的。所以中国水文地质学的发展历史，是与新中国的建立与发展分不开的。

近半个世纪以来，水文地质学的成长与发展，大致可划分为两个阶段：从50年代到70年代中期，可以称为奠基阶段，主要接受苏联学术思想的影响，基本依照苏联模式；从70年代中期到90年代，可以称为发展阶段。这一时期由于实行改革开放政策，国内外学术交流日益频繁，因此受西方学术思想影响较大。特别是系统科学、环境科学、现代应用数学与计算机技术等新思想、新理论与新技术的输入，使水文地质学的基本概念与研究范畴发生了巨大变革，其结果使水文地质学从定性研究进入到定量研究阶段，纳入到系统工程的轨道，与现代科学更紧密的融合起来。因此我们可以把50～70年代奠基阶段的水文地质学称为传统水文地质学，而70～90年代发展阶段的水文地质学，称为现代水文地质学。

现代水文地质学的基本特征，主要表现为：

(1) 与现代科学的新理论新学科紧密结合，如系统论、信息论、控制论与相应产生的系统科学、环境科学、信息科学等，对水文地质学的发展发生了重大影响。近年来正在发展的开放复杂巨系统理论，非线性动力系统理论，以及耗散结构理论等，都会对今后水文地质学的发展，发生深远影响。

(2) 现代应用数学与水文地质学的结合，特别是数值模拟方法得到普遍应用，模型研究成为水资源研究的主要内容，使水文地质学从定性研究发展到定量研究的新阶段。

(3) 地下水的研究，从地下水系统与自然环境系统相互关系的研究，扩大到与社会经济系统的研究。地下水资源的研究，也从数学模型发展到管理模型与经济模型的研究。

(4) 许多新的分支学科的产生与发展，如区域水文地质学，岩溶水文地质学、遥感水文地质学、环境水文地质学、医学环境地球化学、污染水文地质学，以及数学水文地质学、水资源水文地质学等。

(5) 新技术、新方法的应用，除计算机技术外，如遥感技术、同位素技术、自动监测技术、室内模拟技术，以及高精度水质分析技术等，都得到普遍应用，推动了水文地质学的发展。

40多年来水文地质学的发展，由于紧跟现代科学新思潮，从传统水文地质学，走向现代水文地质学，取得了重大进步。不仅在理论上有极大提高，而且在实际应用中，对国民经济规划、国土整治、城市和工业建设，以及环境保护等，都发挥了重要作用。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

二、水文地质学的新学科体系

现代科学的发展过程，主要表现在高度分化和高度综合的轮回上升，即由分到合，由合到分，不断循环或同步前进的进化过程。不同学科之间的互相渗透而形成新的边缘学科，是产生新的分支学科的主要动力。分支学科的发展，又是促进学科发展的重要动力和必备的条件。回顾50年代各地质院校创办之初，水文地质专业仅有普通水文地质学、地下水动力学、水文地球化学和专门水文地质学等基本课程。但从70年代以来，随着分支学科的发展，情况发生了很大变化，教学课程日新月异，出现了百花齐放的新局面。

水文地质学的各分支学科，按其性质可划分为三个方面，即理论水文地质学、应用水文地质学及技术方法水文地质学。它们彼此之间并无绝对界限，而往往是相互交叉、相互促进，组合成一个新的完整的学科体系（图1）。

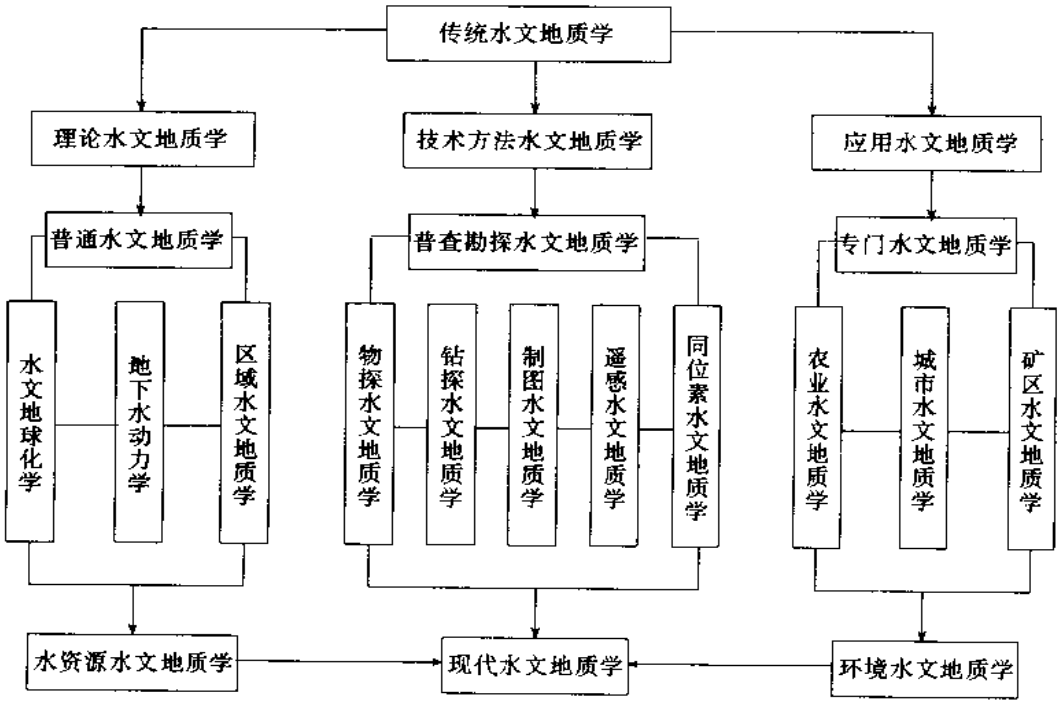


图1　水文地质学的新学科体系与发展演变图

普通水文地质学逐渐向区域水文地质学发展，并派生岩溶水文地质学、古水文地质学等分支；地下水动力学与水文地球化学相互结合，逐渐演变为以研究地下水资源为重点的资源水文地质学，并向以研究数学模型为主的数学水文地质学和资源管理水文地质学发展（见图2）。另一方面，专门水文地质学逐渐发展为城市水文地质学、农业水文地质学和矿区水文地质学，并在此基础上，发展成为环境水文地质学。环境水文地质学的发展，又派生区域环境水文地质学、污染环境水文地质学、医学环境水文地质学、生态环境水文地质学，以及地震

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

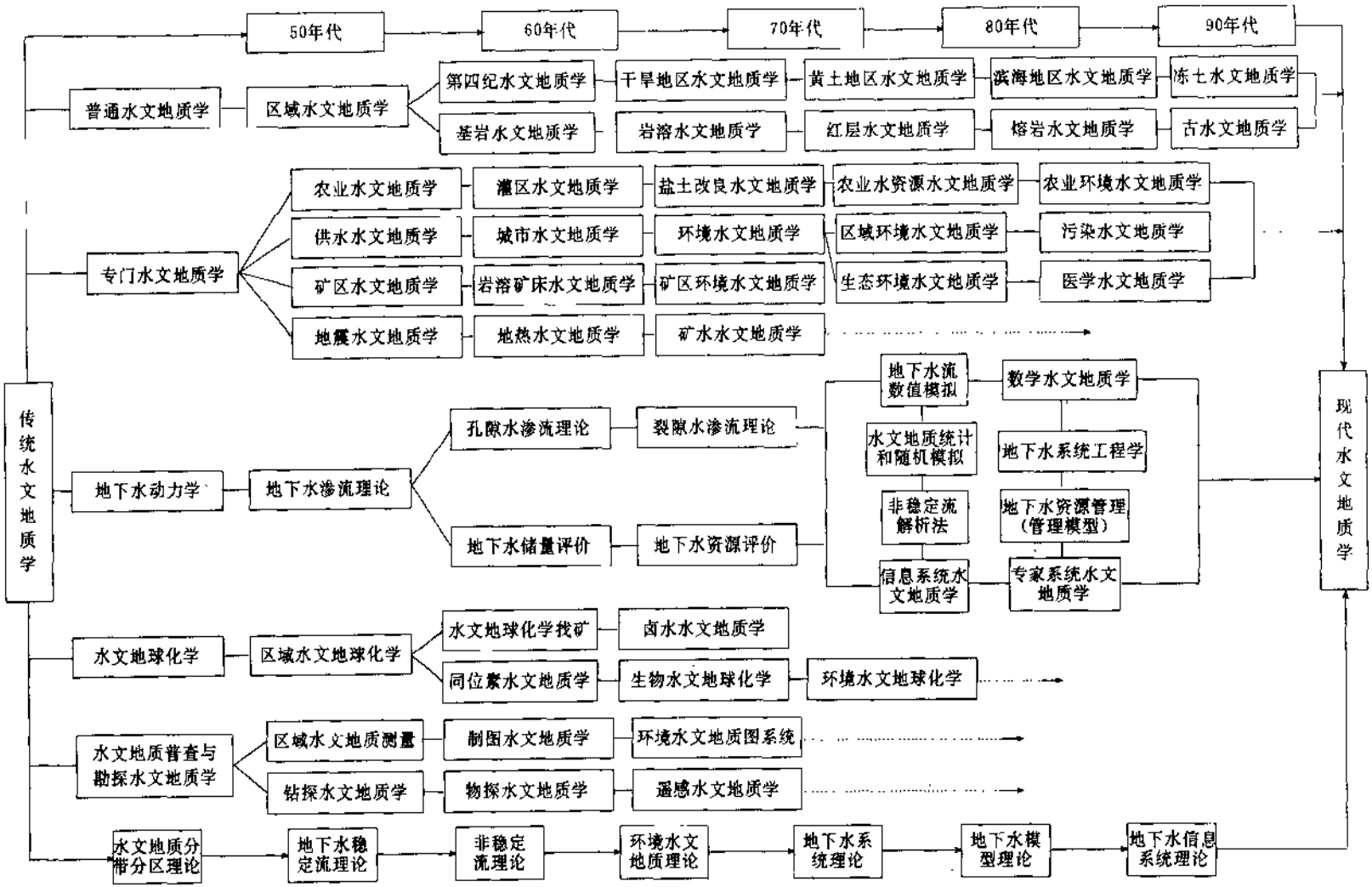


图2　水文地质学新学科体系综合图表

水文地质学等分支。在技术方法方面，由普查勘探水文地质学，逐渐发展为钻探水文地质学、物探水文地质学、遥感水文地质学、同位素水文地质学、监测水文地质学、计算机水文地质学、制图水文地质学，以及地下水分析化学等分支。由此可见，水文地质学的研究内容、理论水平与技术方法等，到90年代已经发展到一个崭新的时期。

三、水文地质学面向跨世纪的挑战

综上所述，在理论水文地质学方面，将着重向水资源水文地质学发展；而应用水文地质学方面，将着重向环境水文地质学发展。今后水文地质学的发展趋向，可能演变为资源环境水文地质学。在理论水文地质学方面，将以渗流理论为基础，以水资源水文地质学为重点，以模型研究为中心，加快开发三维地理信息系统在模型研究中的应用。在应用水文地质学方面，将以环境水文地质学及其分支学科，作为主要发展方向。在技术方法研究方面，将以制图水文地质学、遥感水文地质学与同位素水文地质学，作为主要发展方向。在信息系统研究方面，将加强对数据管理系统、动态监测信息系统、遥感信息系统，以及专家决策系统的开发与应用。

在面临我国经济建设进入高速发展时期，经济建设与资源、环境的矛盾将日趋严重。如何协调好水资源与环境同社会经济可持续发展的关系，将是摆在我们面前的一项严峻任务。诸如城市水资源紧缺与水资源管理，农田灌溉与建立节水农业，西北水资源的合理开发利用与防止生态环境恶化，水污染与污染治理，城市环境水文地质问题，长江三峡工程、黄河小浪底工程建成以后水环境的变化及其影响，酸雨的发展及其对地下水的影响，塔里木盆地沙漠地区油田供水问题，缺水山区人畜饮用水问题，地方病分布区的改水、换水问题，海平面上升对沿海地区水环境的影响，等等，举不胜举。我们理所当然应该作好准备，鼓足勇气，满怀信心地迎接跨世纪的新挑战！

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

水资源与社会经济可持续发展

中国地下水资源的区域特征与初步评价

我国疆域辽阔，陆地总面积960万平方公里，各地区的自然条件与水文地质条件互不相同，如南方与北方就存在显著差异。为了查明各地区域水文地质条件与地下水分布情况，在地质矿产部统一领导下，从50年代开始，就有计划地在全国范围内开展了区域水文地质普查。到目前为止，全国除青藏高原与部分高山、沙漠等困难地区外，2/3以上的地区，都已完成区域性调查。

通过上述大量工作，基本查明了我国的区域水文地质条件与地下水资源分布概况。1981年在北京召开了全国地下水资源评价会议，交流了工作经验，并委托水文地质工程地质研究所，负责组织和统一汇总全国地下水资源计算成果。这项任务现已基本完成。据统计全国地下水天然资源年均$8716\times10^8m^3/a$，并分别计算了孔隙水、裂隙水及岩溶水的资源量，同时也统计了全国地下水的开采量。本文引用的数据，大部分是根据该报告的计算结果。

一、区域水文地质特征

我国幅员广阔，不仅包括了各个不同的纬度气候带，而且在地势上从滨海平原、丘陵、山地到世界屋脊的青藏高原，包括各种不同的气候条件、地貌单元与大地构造背景，因此区域水文地质条件异常复杂，各地区水文地质特征因地而异。

如果以我国中部横贯东西的秦岭山脉作为南北之间的天然分界线，则南北两方受纬度分带的控制，自然条件呈明显的差异。北方平原广泛分布（包括西部内陆盆地广阔的山前平原），沉积了巨厚的第四纪砂砾堆积，形成储水条件良好的巨厚含水层。华北大气降水少于800mm，向西逐渐减少过渡到典型的内陆干旱戈壁沙漠带。南方年均降水一般达1000～2000mm，基岩广泛分布，形成丘陵山地，平原所占面积较少，因此主要分布裂隙水与岩溶水。我国东部与西部由于受地貌、地质条件以及东南及西南季风的影响，出现显著的经向分带与垂向分带的规律，与纬向分带互相交错，造成水文地质条件的复杂化。

根据自然条件的不同，我国共可划分为六个水文地质区（图1），兹分述如下：

（1）东部大平原区：主要包括松辽平原与黄淮海平原，大气降水500～800mm，地下水主要受降水垂向渗入补给。

（2）内蒙古高原与黄土高原区：大气降水250～500mm，为东部半湿润带与西部干旱沙漠带的过渡地带，因受地质条件的限制，缺水现象较为严重，仅在局部的断陷盆地内，如关中

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

平原、河套平原、山西的五大盆地等，地下水较为丰富。

(3) 西部内陆盆地区：主要包括河西走廊、准噶尔、塔里木与柴达木等大型内陆盆地，为典型的极端干旱的戈壁沙漠区，降水小于 250mm。广阔的山前平原，主要接受山区河流的渗入补给，形成自流盆地。

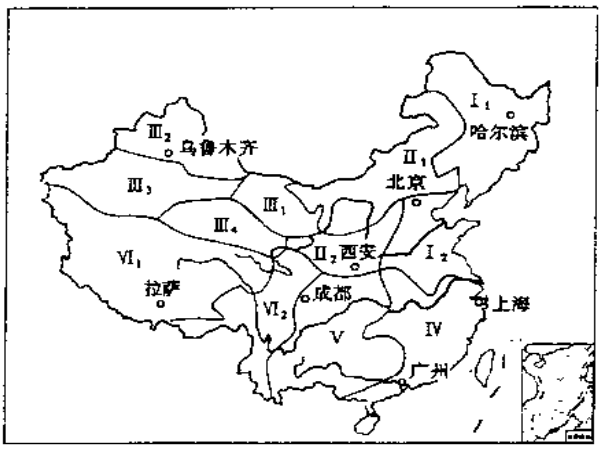


图 1　中国水文地质分区略图

Ⅰ. 东部大平原区：Ⅰ1　松辽平原，Ⅰ2　黄淮海平原；Ⅱ. 内蒙古高原与黄土高原区：Ⅱ1　内蒙古高原，Ⅱ2　黄土高原；Ⅲ. 西部内陆盆地区：Ⅲ1　河西走廊，Ⅲ2　准噶尔盆地，Ⅲ3　塔里木盆地，Ⅲ4　柴达木盆地；Ⅳ. 东南、中南丘陵山地区；Ⅴ. 西南岩溶丘陵山地区；Ⅵ. 青藏高原区：Ⅵ1　冻土高原，Ⅵ2 高山深谷区

(4) 东南、中南丘陵山区：降水丰富，平原面积小，大部分地区主要分布裂隙水与岩溶水。沿海地带滨海平原分布第四系淡水含水层。

(5) 西南岩溶丘陵地区：广泛分布古生界巨厚的碳酸盐岩，地下水以岩溶水为主，地下暗河十分发育。

(6) 青藏高原区：平均海拔 4000m 左右，完全受垂直分带控制。高原地区含水层主要属冻土或冰川成因类型。

30 多年来，通过在全国开展区域水文地质普查，基本查明了上述各类地区的区域水文地质条件与地下水资源的分布，从而为合理开发利用我国地下水资源提供了科学依据。

二、区域地下水资源的初步评价

我国总降水量为年平均 $60000\times10^8m^3/a$，除蒸发渗漏外，地表径流量为 $26000\times10^8m^3/a$。通过水均衡法计算，地下水的天然资源总计为 $8716\times10^8m^3/a$（表 1）。天然资源主要是指直接或间接接受降水或地表水转化入渗的地下水多年平均补给量，一般用各项补给量的总和或各项排泄量的总和来表征。

表 1　中国水资源略表*

降水总量 $10^8m^3/a$	地表水资源 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	地下水资源 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	总水资源 $10^8m^3\cdot a^{-1}$
60000	26000	8716	28047

* 总资源已扣去重复量。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

按地貌条件划分，地下水的天然资源，在平原地区为 $2503\times10^8m^3/a$，主要属第四系孔隙水；在山区为 $6218\times10^8m^3/a$，主要属裂隙水与岩溶水。裂隙水与岩溶水占总资源量的71.28%，而平原区的孔隙水虽仅占 28.73%，但具有重要实用意义（表 2）。

在地区分布上，平原地区孔隙水北方占 70%，而南方仅占 30%；裂隙水南方三倍于北方，而岩溶水南方占 91%，北方仅占 9%（表 3）。由此可见，北方广大平原地区的地下水，占有十分重要的地位，而南方岩溶水资源占有重要地位。北方的广大平原为我国主要产粮区，耕地面积占全国耕地面积的 50%以上，在地表水严重不足的情况下，可更好地发挥地下水的优势。

表 2　地下水资源分类表

分布地区	地下水类型	地下水天然资源量 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	占全国地下水资源 %
平原区	孔 隙 水	2503.54	29
山区	裂 隙 水	4178.63	48
	岩 溶 水	2039.67	23

表 3　地下水资源分布简表

分类 / 地区	孔隙水资源 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	%	裂隙水资源 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	%	岩溶水资源 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	%	总　计 $10^8m^3\cdot a^{-1}$
北　方	1773.17	70	1139.55	27	192.64	9	3105.36
南　方	730.37	30	3034.08	73	1847.03	91	5611.48
总　计	2503.54	100	4173.63	100	2039.67	100	8716.84

平原地区的各项补给量，主要包括降水入渗、河流入渗、渠系入渗、灌溉回归以及山区侧向补给，其中以降水入渗占主导地位。根据全国平原孔隙水主要补给项的统计（表 4），降水入渗占 64%。华北平原根据河北、河南、山东三省的计算，地下水资源总计为 $359.09\times10^8m^3/a$，其中降水入渗量平均占天然资源的 78.79%（表 5）。由此可见，北方地下水降水入渗的比例更大，因而降水对地下水资源起决定作用（见图 2）。由于东南及西南季风影响，雨季降水集中，而旱季则水量严重不足，年际变化也较大，造成水资源在时间上分配的不平衡。

表 4　全国平原孔隙水主要补给项统计表

降水渗入量 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	河流渗入量 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	渠道渗入量 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	灌溉回归量 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	山区侧向补给量 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	总　计 $10^8m^3\cdot a^{-1}$
1569	345	360	169	60	2503
64%	13%	14%	7%	2%	

表 5　华北平原降水入渗量统计表

省　名	地下水资源 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	降水入渗量 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	%
河　北	110.23	77.43	70.24
河　南	128.50	105.00	81.71
山　东	120.36	100.50	83.50
总　计	359.09	282.93	78.79

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

从图 2 中可以看出，潜水位的年际和多年周期变化曲线，既受降水控制，又受到人工开采的明显影响。春灌季节开采量增大，水位急剧下降，至雨季前出现最低水位。雨季到来以后，开采量减少，水位也开始回升，至翌年春灌前出现最高水位值，形成一个水文年的水位变化过程。由此可见，水位动态与开采量密切相关，即水位的升降幅度与开采强度成反比关系。一般在枯水年，降水量愈少，则开采量愈大，而丰水年则相反。因此从多年均衡来看，由于枯水年与丰水年互相调剂，仍能基本保持平衡。

华北平原由于地下水位埋藏较浅，垂向交迭作用强烈，因而地下水的天然资源，实际反映以降水入渗为主导的浅层水调节储量。所以全部天然资源，在上述有利的开采条件下，基本上绝大部分均可开采利用。根据计算结果，证明黄淮海平原与松辽平原的天然资源，同该地区的可采资源十分接近（表 6），两者相差无几。

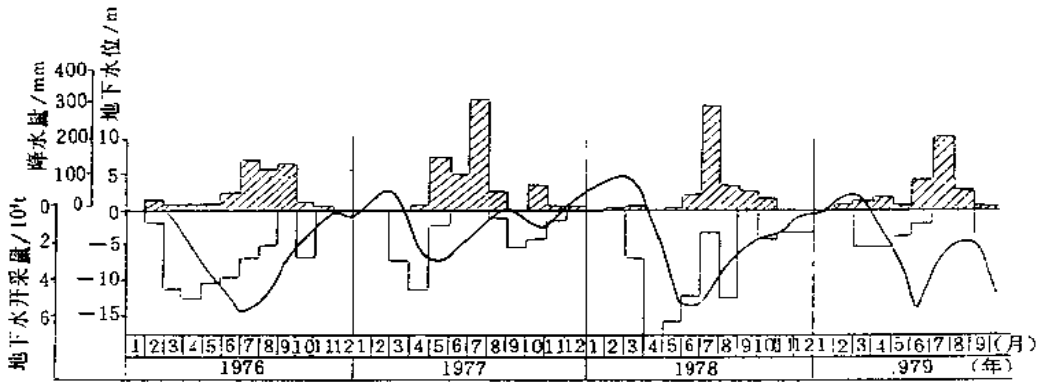


图 2　河北中部地下水位动态变化曲线与降水及开采量的关系

表 6　东部大平原地下水天然资源与可采资源对比表

地　区	天然资源 $10^8m^3 \cdot a^{-1}$	可采资源 $10^8m^3 \cdot a^{-1}$
黄淮海平原	462.53	460.39
松辽平原	297.81	234.53

根据河南的经验，如果合理控制地下水位，不仅能减少潜水蒸发，并且有利于降水入渗补给和有利于包气带蓄水能力，同时还能起到治盐防涝的作用。如河南商丘地区，原水位 1～2m，由于采取了井灌、井排等措施，地下水位在汛前控制在 5m 左右，汛后 3m 左右，形成一个天然的地下调节水库，不仅能起调蓄作用，又有利于降水的转化，并能消除或减轻涝、盐等自然灾害，使粮食产量成倍的大幅度上升。根据河南黄河平原的计算，地下水位未控制前，可采资源为 $41.2\times10^8m^3/a$，可灌耕地 1650×10^4 亩（1 亩＝（10000/15）m^2，下同），而合理控制水位以后，可采资源扩大到 $64.22\times10^8m^3/a$，可灌耕地 2569×10^4 亩。

西北干旱地区，降水十分贫乏，而蒸发异常强烈。但高山地带情况有所不同，降水量较大，不论是地表水与地下水均主要来源于高山的降水（包括冰雪融水），汇成山区河流流入山

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

前平原。其中60%～80%的地表径流量（包括渠系），在山前戈壁带完全渗入地下，成为地下水。地下径流中约40%～50%在冲积扇前缘溢出形成泉群，并汇聚成泉集河流入绿洲。

试以河西走廊为例（表7），河流及渠系入渗，约占地下水总补给量的90%左右；因此山区河流进入盆地以后，除蒸发消耗外，实际上几乎全部转化为地下水。如果对山区河流在山口加以拦截，或上游河水利用率不断提高，都会引起山前平原地下水补给量的减少，其结果必然导致水资源的重新分配，使区域性地下水位下降和溢出带泉流量的大量削减，从而又影响到下一盆地的补给来源。

表7　1977年河西走廊地下水均衡表

补给量/$10^8m^3\cdot a^{-1}$				排泄量/$10^8m^3\cdot a^{-1}$			
河床入渗	渠系入渗	地下径流	降水入渗	泉　水	地下径流	开　采	蒸发蒸腾
22.54	22.00	2.64	2.82	22.32	0.30	8.65	18.73
45.08%	44%	5.28%	5.64%	44.64%	0.6%	17.3%	37.46%

河西走廊自50年代以来，由于地表水利用率的不断提高，地下水的总补给量由原来的65×$10^8m^3/a$，减少到80年代的50×$10^8m^3/a$，共削减约25%。其中石羊河流域由于河水利用率提高到60%以上，地下水约削减40%，使泉水灌区减少77%，迫使原有的泉灌区改为井灌区，而流入民勤盆地的地表径流量，由原来的4×$10^8m^3/a$减为2×$10^8m^3/a$，严重影响了民勤地区的农业生产。所以河流、泉水与地下水，上游与下游，都必须通盘规划，统一调配，合理分配水资源，建立一个最优化的统一的联合开发系统，达到新的平衡。

南方的岩溶水以西南地区最为发达，以广西、云南、贵州、四川省区为例，岩溶水分别占地下水资源的50%～60%（表8）。特别是地下暗河广泛分布，流量很大。如广西中部15×10^4km^2内，共有暗河353条，枯季流量达158×$10^8m^3/a$（表9）。地下河流量季节变化很大，如云南开远县南同地下河，枯季流量为0.2m^3/s，而雨季最大流量可达20.2m^3/s（1959），相差20～100倍。各地区地下径流模数，也由于气候及地质、地貌条件的不同而存在较大的差异。

表8　西南四省区岩溶水资源统计表

省　别	岩溶水资源 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	地下水资源 $10^8m^3\cdot a^{-1}$	溶岩水占地下水比例/%
广　西	484.03	776.52	62.33
云　南	325.15	742.74	43.78
贵　州	167.22	229.07	73.22
四　川	293.63	630.10	46.60

表9　西南部分地区暗河统计表

地　区	面积/km^2	暗河数量/条	枯季流量/$m^2\cdot s^{-1}$
黔　北	80000	607	192
湘　西	138000	1054	252
桂　中	150000	353	158

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

北方地区岩溶水虽然仅占全国岩溶水的 9.4%，但分布地区比较集中，特别是山西高原与山东沂蒙山区，寒武-奥陶系岩溶水极为发育，其主要特点是泉的流量大，而流量动态变化比较稳定。例如山西及太行山地区，据不完全统计，流量大于 0.5m³/s 的岩溶泉就有 49 个，大于 1m³/s 的岩溶泉达 30 多个。其中著名的娘子关泉，流量可达 9～16m³/s。如此巨大的流量，在南方也极少见，所以岩溶水的开发利用，在北方也占有重要地位。

三、地下水资源的开发利用

建国以来，由于普遍进行了水文地质普查，基本查明了地下水的分布规律，使我国地下水资源，得以有计划的开发利用，对促进工农业的发展和城市建设，发挥了重要作用。特别是促进农业灌溉方面，对抗旱保收，提高粮食产量，取得了显著效益。

根据全国地下水开采量的统计，总开采量为 $746\times10^8m^3/a$，约占天然资源的 11.6%。其中平原区占 76%，山区占 24%。按区域划分，北方占 85%，南方占 15%（表 10）。北方平原地区占全国开采量的 72%，而南方仅占 3.5%。由此可见，全国地下水的开采量，以北方平原占主要地位。其次是岩溶水，不论北方或南方，其开采量均超过总开采量的 10%，而裂隙水仅占岩溶水开采量的 10%。

表 10　全国地下水开采量分类统计表

	地　区	平原孔隙水	裂隙水	岩溶水	总　计
北方	开采量/$10^8m^3\cdot a^{-1}$	540.35	5.51	94.63	640.49
	占全国总开采量/%	72.35	7.39	13.44	85.79
南方	开采量/$10^8m^3\cdot a^{-1}$	26.36	12.27	79.42	105.78
	占全国总开采量/%	3.53	1.64	10.66	14.19
全国合计/$10^8m^3\cdot a^{-1}$		566.74	17.78	179.56	746.27
占全国总开采量/%		75.94	2.38	24.06	100

我国北方地区，由于气候干燥，降水不足，解放前经常受到干旱的威胁，粮食不能自给。50 年代经过水文地质普查以后，证实华北平原、松辽平原、河套平原、河西走廊等主要农业区，地下水资源丰富。自 60 年代起，在这些地区就有计划地把发展井灌作为主要水利化方向。据统计北方 17 省、市地下水用于农业灌溉，年开采量达 $400\times10^8m^3$ 以上，井灌面积 1.7×10^8 亩。其中华北平原的年开采量就达 $280\times10^8m^3$，井灌面积 1.1×10^8 亩，超过了地表水的灌溉面积。例如河北平原近 30 年来，已打农灌井 140 多万眼，年开采量约 $100\times10^8m^3$，井灌面积 3000 多万亩，占耕地面积的 1/3 以上。因而多次在遇到严重干旱的情况下，农业生产仍然得到丰收。

西北干旱地区，如前所述，地下水依靠山区河流的补给，在山前平原形成富集带，地下水资源相对比较丰富，特别在绿洲地区，农田灌溉主要依靠泉灌与井灌。但目前西北地下水的开采程度还比较低，如河西走廊，除石羊河流域地下水的开采量已出现严重超采现象以外，黑河流域及疏勒河流域地下水的开采量均不到补给量的 20%。新疆及柴达木盆地，地下水的开采量也比较低，仅在局部地区开发程度较高。西北内陆盆地严重缺水，而地下水开发程度较低，其主要原因之一，是有关部门往往偏重地表水的开发，尽量提高地表水的引用率，而

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

忽视地下水的合理利用。这是一个值得探讨的有关西北水资源开发的战略问题与方针政策问题。

根据西北水资源的特点，优先充分开发利用地下水，具有以下有利条件：①能就地开采，投资少，见效快，经济便利；②无蒸发损失；③利用地表水与地下水的转化关系，可提高水资源的重复引用率；④有利于环境生态平衡。相反，如无节制地提高地表水的引用率，不仅在经济上投资大、见效慢，而且引水距离远，渗漏损失及蒸发损失大，防渗工程艰巨，还会导致泉流量削减，造成泉灌系统的破坏，并且不利于环境生态平衡，容易造成盐渍化、沙漠化等恶果。西北新构造运动强烈，如祁连山、天山均属地震活动带，不利于在山口修建水利工程。因此今后西北干旱地区的水利化方向，如何根据水资源特点，权衡得失，因地制宜，探索水资源开发的最优化方案，是当前亟待解决的一个重要课题。

南方部分缺水地区，如雷州半岛在50年代就已经发现是一个构造良好，主要由第三系、第四系组成的自流盆地，地下水资源十分丰富。从60年代起就大力发展井灌，现已灌溉耕地40×10^4亩。四川红色盆地也是南方严重缺水地区之一，经过多年来的调查研究，已有40多个县在红层风化裂隙带开发利用浅部潜水，灌溉土地68×10^4亩，同时也解决了当地人畜饮用水问题。

岩溶水已成为农业或城市和工业供水的重要水源之一，不论是南方或北方，都普遍得到开发利用。如太原、济南、淄博、大连、宝坻、淮北、昆明、广州等城市，都不同程度地利用岩溶水作为供水水源。山西及太行山地区的许多岩溶大泉，大部分被利用作为灌灌水源。由于这类大泉流量大而且比较稳定，也适宜作为工业用水。而上述地区煤炭资源丰富，能否建立能源基地，主要决定于水源。如何权衡轻重，合理解决农业用水与工业用水的矛盾，是该地区一个值得研究的重要问题。

西南地区的许多暗河，有美好的开发前景。但目前暗河发育地区也是严重缺水地区，人民生活贫困。要改变这类地区的落后面貌，开发利用暗河资源是一条重要途径。有些地方，已根据不同情况，采取了各种不同的工程措施。如修建引水工程、地下水库、“天窗”扬水工程以及利用水头修建小型发电站等，对解决当地的生活用水和部分耕地的灌溉水源，发挥了重要作用。

随着工业的发展和城市人口的增加，地下水在工业和城市供水中，日益显得重要。据不完全统计，全国181个大、中城市中，有61个城市主要采用地下水。有40个城市为地表水、地下水兼用。华北27个主要城市中，总用水量为$782\times10^4m^3$，其中地下水占$686\times10^4m^3$，为总用水量的87%。北京市地下水的年开采量达$25\times10^8m^3$（包括农业用水），占全市总用水量的60%。辽宁省下辽河平原为我国主要工业区，分布有沈阳、辽阳、鞍山等重要工业城市，工业用地下水达$8.3\times10^8m^3/a$。其它如西安、太原、石家庄等城市，地下水的开采量达$100\times10^4m^3/d$左右。南方由于地表水污染，许多大中城市也纷纷改用地下水。例如江苏省的南京、常州、徐州等10个城市，地下水年开采量已达$4.5\times10^8m^3$。

以上只是列举若干实例，阐明地下水的开发利用，对促进工农业发展所取得的重要成就。

另一方面，随着城市人口的增加和工农业的发展，需水量大幅度增长，有些城市因缺乏合理规划，已出现由于超量开采造成水源紧张或水源枯竭。同时由于大量工业废水不合理的排放，以及农田施用农药化肥等原因，使地下水遭到污染，不仅影响人民健康，而且使原来已经紧张的水源更趋紧张，成为环境保护亟待解决的一个重要问题。滨海平原的若干城市，如

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

上海、天津等，地下水的大量开采还导致地面沉降等公害，给国民经济带来严重损失。综上所述，地下水的开发利用，如何全面规划、合理利用、加强管理和保护地下水资源，已成为当前急需解决的一个重要课题。

四、结　论

(1) 我国北方广大的平原地区，储存较为丰富的地下水，目前除黄淮海平原开发程度较高外，其它地区，特别是西北干旱地区，开发程度还比较低，具有较好的开发前景。

(2) 根据华北平原地下水位浅、蒸发作用强与地下水以降水入渗补给为主的特点，合理控制地下水位，减少无效蒸发，加强浅层水的开发利用，不仅可扩大水资源的利用，又能起到防涝治盐的效果。

(3) 西北内陆盆地，山前平原地下水资源丰富。根据地表水、地下水多次重复转化的特点，水资源的开发利用，应以地下水为主，地表水与地下水互相调济，因地制宜，综合考虑，统一规划。

(4) 我国岩溶水分布很广，不论在农业灌溉或城市供水方面，都具有特殊重要意义。特别是西南地区广泛分布的地下暗河，具有极好的开发前景。

(5) 城市地区地下水的大量开采，已经出现过量开采、水质污染、地面沉降、海水入侵等环境水文地质问题，因此必须加强水资源的保护与管理，并积极采取人工补给等措施，扩大水资源及其利用效率。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

城市水资源问题与对策研究

一、引　言

现代城市的主要特点是：人口高度集中；工矿业高度集中。因此城市的形成与发展，必须具备一定的自然资源条件，如农业资源、矿产资源、能源资源及水资源，其中尤以水资源最为重要。

自本世纪以来，由于工业的发展，城市人口迅速增长。20年代全球城市人口仅占总人口的10%，到50年代增加到28%，而80年代已增到41%。据预测到2000年，城市人口将达50%。而发达国家，如美国城市人口已占总人口的74%，苏联占65%。我国基本上还是一个农业国家，城市人口仅占总人口的20%左右。

建国以来，从50～80年代，我国城市人口已由0.60亿增加到2.2亿，城市用水由6.3亿m^3增加到64亿m^3（1985年）。10年来我国已由180个城市增加到400个左右。据城建部门预测，到2000年将增加到640个城市，城市人口将增加到3.0～3.5亿，城市年用水量将由目前的120亿m^3增加到170亿m^3，工业年用水量将由450亿m^3增加到700亿m^3。因此，我国水资源能否满足今后城市人口的增长与工业发展的需要，是摆在我们面前的一个严峻问题。

解放前大多数城市都以地表水作为主要供水水源，但目前地下水日益显得重要，成为主要水源之一，特别在干旱半干旱地区，更居首要地位。根据1980年的粗略统计，全国181个城市中，约有60多个城市以地下水作为主要供水水源，而华北27个城市总用水量7820万m^3，地下水约占87%。过去南方城市主要利用地表水，但近一二十年，由于地表水污染日益严重，工业需水量迅速增长，地下水也逐渐成为城市供水的重要水源。如江苏省的南京、徐州、常州、无锡等10大城市，地下水的年开采量已超过4.5亿m^3。由此可见，如何合理开发利用水资源，对今后缓解城市水资源日益严重的供需矛盾，具有重要意义。

二、城市水资源的合理开发与统一规划

如上所述，城市的发展规模，必须与水资源条件相适应。即城市人口的增长，工业发展规模、工业结构及工业布局等，都要根据水资源情况，作出全面规划。另一方面，对城市水资源的开发利用，也需要结合城市规划，通盘安排。特别对地表水与地下水，局部地区与相邻地区，上游地区与下游地区，以及城市用水与工农业用水等，都要作为一个整体，通过系统分析，全面考虑，合理调配。现分述如下：

1. 关于城市水资源与工业布局

城市水资源供需矛盾的日益尖锐化，虽然存在许多复杂因素，但其主要原因是工业用水的迅速增长。据城建部门资料，1987年全国城市供水总能力为11363.6万m^3/d，全年供水量为286.38亿m^3，其中工业用水占72.08%，生活及市政用水仅占27.92%。由此可见，城市

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

水资源的供需失调，主要是工业的增长与水资源条件不相适应造成的。国外资料表明，工业化程度愈高，工业用水量所占的比重也愈大，如英国与德国，工业用水量均占全国总用水量的70%以上。

我国北方大多数重要城市均属工业城市，工业用水一般约占城市用水的50%～80%以上，而且绝大多数均以地下水作为主要供水水源。由于城市工业过度集中，需水量不断增长，地下水的开采强度远远超出允许范围，造成许多城市地下水过量开采，出现水资源日趋衰竭的现象。北方多数城市都分布在山前冲积扇，地下水较为丰富，富水带的补给模数一般为20～50万 $m^3/km^2 \cdot a$；然而许多城市如北京、沈阳、石家庄、济南等，由于工业过度集中，开采强度过大，其开采模数均已超过100万 $m^3/km^2 \cdot a$，造成补采失调，地下水位逐年持续下降，导致部分地区含水层疏干的严重局面。北京城区的工业占全市的80%，人口占60%以上，而北京7个主要供水水源地，都集中围绕在城区四周的近郊区，年开采量达8～10亿 m^3，而天然资源仅年均6亿 m^3，使年亏损达2亿 m^3 左右；年复一年，水源枯竭的情况也越来越严重。近10年来，北京开辟了位处潮白河冲积扇的水源八厂与利用地表水（密云水库）建立的水源九厂（已完成一期工程），扩大了供水水源，同时控制了近郊区各水源地的开采量，取得了明显效果，使市区下降漏斗的发展有所缓解，地下水位有所恢复。

由此可见，为了防止地下水过量开采，一方面要加强管理，合理控制开采量；一方面要开辟新水源地，来弥补由于压缩开采所削减的水量。郑州市过去地下水的过量开采较为严重，但合理控制开采后，区域下降漏斗逐渐恢复，而关键问题是要解决好新的补充水源。北方许多城市，城区工业过度集中，而郊区则工业很少，面且在工业结构上，耗水量大的电力、化工、冶金和造纸等行业比重很大，与当地水资源条件不相适应。因此，除应考虑对城区工业进行合理调整外，今后主要应根据水资源条件，建立卫星城市，向外围地区发展，以减轻城区供水的压力。对耗水量大的工业，要根据就水建厂的原则，充分利用当地的水资源。对水资源条件差的地区，应向耗水量小的工业结构发展。

2. 城市水资源的合理规划

要合理开发利用城市水资源，必须首先全而查清水资源，在此基础上，进行综合考虑，统一规划。过去往往由于局部地区出现地下水过量开采，就对全区地下水加以否定，主要原因是对全区的水资源缺乏全面的了解。北京的实践说明，要解决大城市的供水问题，必须从较大范围内，建立分散型的供水系统，避免水源地过度密集，同时凡有地表水可利用的地区，就应尽可能与地下水建立联合开发系统。

不少城市通过实际工作，都说明尽管在市近郊区出现地下水过量开采，但在外围地区仍可找到新水源地。如近年来沈阳在辽河冲积扇就查明年储量达100万 m^3 的新水源地；南京在长江岸边发现年储量达50万 m^3 的新水源地；太原市发现了东山水源地；西安市随着城市发展，经过深入工作，地下水资源不断扩大，基本上满足了日益增长的供水需要。乌鲁木齐市主要依靠近郊区的雁窝水源地与乌拉泊水库作为主要供水水源，近年来经过详细调查，拟在外围地区分别建立柴窝堡及西山农场两处的地下水水源地，城市供水问题，可望基本得到解决。

从大区域分析，如华北的京、津、唐地区，东北的下辽河地区，苏、鲁、皖之间的济、徐、淮地区，华东的长江三角洲地区等，都是工业城市密集的地区，水资源开发程度高，甚至互相发生干扰。例如长江三角洲地区，上海、苏州、无锡、常州等城市，由于地下水的大量开

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

采，已形成面积达 7000km² 的区域漏斗。但通过近年来的详细工作，说明上述地区的地下水资源仍有较大潜力。如沈阳以北的辽河冲积扇，北京的东北郊，唐山的滦河平原，江苏的太仓、太兴地区等，相对来说，水资源开发程度较低，均有较好的开发前景。济、徐、淮地区岩溶水资源丰富，经调查确定，有开发前景的水源地共约 68 处，其中大于 10 万 m^3/d 的就达 12 处。所以如何在地域上，根据水资源条件统一规划，对工业进行合理布局和合理调整，建立各有关城市之间水资源的联合管理系统，十分重要。

3. 处理好城市用水与工农业用水的矛盾

城市水资源的合理分配与合理规划，既要考虑经济效益，又要考虑社会效益与环境效益，在很多情况下，往往要把社会效益或环境效益放在第一位。例如当城市生活用水与工业用水发生矛盾时，虽然工业用水的经济效益高，但在原则上一般都首先考虑保证城市居民的生活用水。可是不少实例说明，由于更多考虑经济效益上的原因，往往是生活用水不得不向工业用水让路。天津市在引滦前长期饮用咸水，而水质好的地下水，则主要作为工业用水。1980 年前后在宝坻为化纤厂建立的水源地（地下水），可产水 10 万 m^3/d 左右，水质极佳，如果作为天津市生活用水，至少可解决 50 万人口的饮水问题。但由于首先从经济效益出发，不得不保证工业用水而牺牲社会效益。

山西有许多喀斯特大泉，水质良好，流量稳定，每秒可达数立方米以上，是建立能源基地理想的供水水源。但多数大泉，已作为农业灌溉之用，这就需要对泉灌区进行调查研究，如果能利用当地地下水，全部或部分以井代渠，实行井、渠结合，就能工农业兼顾，解决电站的供水问题。不过改泉灌为井灌，就涉及到投资问题。如能从全局考虑，工业部门补偿以渠改井所需的投资，矛盾就较易得到解决。

三、水资源开发与城市环境

1. 水质污染及其防治

当前在城市供水十分紧缺的情况下，水质污染与水质恶化的情况，仍有不断发展的趋势，造成水资源的破坏，更加剧了城市供水的紧张局面。目前我国城市污水与工业废水的处理率还很低，这是造成水质污染的主要原因。例如 1984 年京津两市的污水排放量达 380 万 m^3/d，而处理率仅为 14%。据 1985 年统计，南方 12 个省市的城市供水，全年取水量 243 亿 m^3，其中 80%受到污染。北京、哈尔滨、沈阳、邯郸等城市因水质污染，许多水井报废，经济损失上亿元。目前各城市地下水污染的面积和污染程度发展很快，污染超标的面积随时间不断扩大。如果不采取有效措施，将对城市水资源造成严重威胁。北京目前每天污水的排放量就达 $200\times10^4m^3$ 以上，正在筹建中的高碑店污水处理厂，设计污水处理能力为 $100\times10^4m^3/d$，约占污水总排放量的 50%。第一期工程为日处理 $50\times10^4m^3$，如果完全实现，那么相当每天增加 $100\times10^4m^3$ 的供水能力。据预测北京到 2000 年的污水放排量，将由目前的年 $9.74\times10^8m^3$ 增加到 $16\times10^8m^3$，如果其中 60%进行处理，使废水转变为再生的可利用资源，全市就可再增加用水量 $10\times10^8m^3$ 左右，并可作为地下水库的重要补给来源之一。这一数字约相当北京总水资源的五分之一，可见污水净化再利用，对扩大城市水资源具有何等重要的地位。

在城市水资源污染问题方面，当前除受工业废水与生活污水的影响外，还有固体废物的污染问题。例如城市垃圾任意堆放的情况十分普遍，成为地表水、地下水的重要污染源之一。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

兰州市为扩大城市面积，利用垃圾在黄河漫滩填土筑地，使地表水、地下水都遭到难以根治的后患。兰州东盆地雁滩水源地产水 6 万 m^3/d，已因地下水水质恶化而被迫废弃。西盆地的马滩水源地也受到严重威胁。长春市把大量生活垃圾与工业废渣投入伊通河谷，而伊通河冲积层正是作为长春市供水的主要含水层。目前北京也处于垃圾山的包围之中，每年堆放城市四周的垃圾达 600 万 m^3 以上，占地 9300ha，而未采取任何环保措施。

国外大多数城市，对固体废弃物主要采取地质处置的办法，即选择地质条件有利地段，进行人工分层填埋，并采取坑顶封闭和坑底铺垫等防渗措施，来防止固体废物造成的污染。我国城市固体废弃物，仍处于无计划的露天堆放状态，危害极大。为此，迫切需要尽快开展城市固体废物的调查研究，以便对现有堆放场所进行合理调整，并进行人工填埋场的选址勘察工作，尽快建立人工控制和实行科学管理的固体废物储存库，以防止水体受固体废物的污染。

2. 地下水开采对环境的影响

一般城市经常出现的各类环境地质问题，往往是由于受到水资源开发的影响。例如由于地下水的过量开采，造成北京部分地区含水层疏干。上海、天津等城市出现的地面沉降，大连、莱州等滨海城市出现的海水入侵，广州、武汉等城市出现的岩溶塌陷，西安出现的地裂缝，以及许多城市出现的水质恶化与硬度上升，都与地下水的大量开采有关，即所谓水资源开发的负效应。

由于人类活动对地下水造成的各种影响，使地下水的调查研究与水资源评价日益复杂化。如何运用系统论和系统分析方法等现代科学技术，建立城市水资源的管理模型，优化开采方案，已成为国际上共同关心的一个重要课题。我国不少城市如北京、西安、石家庄、济南、济宁等，都进行了地下水管理模型的研究，其中也包括水量、水质的联合模型。上海市结合地面沉降问题，曾建立开采量、回灌量、沉降量与地下水位的相关模型，近年来在比利时专家的合作下，建立了以三维流为基础的水流-沉降模型，并通过数值模拟预测开采量与回灌量不同比值下可能发生的沉降量。

目前存在的主要问题，是管理模型的研究，尚停留在理论探索阶段，或局限于水动力模型的范畴，与实际应用，还有较大距离。主要原因是管理模型的建立，不仅要考虑地下水的水质、水量和由于开发可能产生的各种环境效应；而且还要与地表水系统、社会经济系统、信息系统等紧密联系起来。所以这是一项非常复杂的系统工程，需要搜集大量有关水资源、经济、技术、社会、人口、工农业、法制、生态环境等多方面的数据，运用电算技术，建立系统模型，实行综合化、模型化、最优化，即多目标优化，以寻求问题的最优解。最近京、津地区以及下辽河平原沈阳、辽阳、鞍山等城市所进行的地下水管理模型的研究，正朝着这个方向，为建立科学的水资源控制管理系统而努力。这是实行城市水资源合理开发利用和科学管理的重要步骤，也是解决城市水资源紧缺的正确方向。

目前国内外把在人类活动影响下，如何运用现代科学技术，建立水资源的管理模型、优化最合理的开采方案，看作是一项十分重要的课题。在一次国际学术会议上，台湾曹雨松教授所介绍的对云林盆地水资源的研究，具有较大的代表性。云林盆地是台湾主要工农业地区之一，以开发利用地下水为主，分布深井达 6508 眼（不包括浅井）。由于过量开采，已造成水位持续下降（部分地区已下降到海平面以下），水井涌水量日趋衰竭，滨海地区出现海水入侵，水质恶化。有些地区造成严重的地面沉降，最大沉降量达 1.5m 以上。水质污染问题也很严重，并产生一种致癌的黑脚病。曹教授根据 500 多眼试验井的实际数据，运用有限元法建

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

立数学模型，并根据不同自然条件与开采情况，针对存在的不同病害，把盆地划分为 6 个区，分别进行了一系列的数学模拟，在此基础上提出了最优化的开采方案。根据这一方案，对原有井网进行合理调整，不仅总开采量未减少，而且上述各类病害，还得到不同程度的减轻或消除。

3. 水资源开发与环境生态

城市的不断扩大，以及与城市建设有关的各种人类活动，如由于森林、草地等自然环境的破坏，对水资源所造成的严重影响，日益引起有关方面的关注。日本防止灾害研究中心，曾对城市化程度与径流变化之间的关系，进行了深入研究。根据 1958～1977 年将近 20 年的观测资料，对 23 个盆地（包括城市化或未城市化的盆地）进行详细的分析对比，证明城市化程度越高，渗透性越强的地区，径流率的变化也越显著。径流量的增加反映了降水损失与地下水补给量的减少，因此城市化程度越高，地下水资源的损失也越大，这是今后值得我们研究的重要课题之一。

水库建设对环境生态造成的不利影响也值得重视。青海格尔木市在河流出山山口修建了一座水库，由于未考虑坝基与绕坝渗漏对下游地区的影响，水库修建后因水位抬高，使山前平原的地下水位从 1978～1983 年上升 6.8m 之多，使冲积扇前缘的泉水溢出带后退 1～3km，因而导致位处冲积扇前缘的格尔木市市区发生沼泽化，使城区建筑遭到严重破坏。

西北内陆盆地的山前平原都具有共同的特点，即平原区降水量极少，山区河流的径流量基本代表全流域的水资源。河西走廊的石羊河流域，由于上游修建水库，渠系衬砌，河水利用率提高到 60%以上，导致山前灌区用水量增加 93%，戈壁带潜水位下降 10～20m，泉流量削减 60%，泉水灌区减少了 77%，迫使原有的泉水灌区改建为井灌区，而流入下游民勤地区的地表径流量由原来的 4～6 亿 m^3/a，减为 2 亿 m^3/a 左右，严重影响民勤地区的城市用水与农业生产。在超量开采地下水情况下，民勤地区水位持续下降，水泵三度更换，并使北部湖区草场退化，沙枣等植物大量死亡，沙漠内侵 20m/a，已经造成严重不良后果。

4. 水资源开发与旅游资源的保护

许多供旅游观光的风景名胜，都是与水分不开的。如济南著名的趵突泉，桂林的漓江、昆明的翠湖等，风景奇妙优美，已闻名全世界。但由于水资源的开发，往往使这些著名的风景区遭到严重损害，趵突泉就由于济南城区地下水的过量开采，一度趋于消失；太原著名的风景区晋祠，也主要以晋祠泉著称，由于同样的原因，泉流量日渐衰减，使大好风光为之减色。敦煌附近被沙丘围绕的月牙湖别具特色，真如沙漠中的一块玉璧，是去敦煌旅游者必到之地，曾经一度趋于干涸。昆明城内风景如画的翠湖，因郊区新建工业大量开采地下水，导致水位下降 1.3m，使湖水也濒于干涸，经采取各种治理措施才逐渐得到恢复。

四、关于开源节流的几项重要措施

开源节流，建立节水型的社会生产体系，是缓解城市水资源紧缺不可缺少的重要措施，现分述如下：

1. 开展地下水资源的人工补给

根据国外经验，采取地表水、地下水联合开发，相互调剂，利用多余洪水对地下水进行人工调蓄，是扩大水资源和解决地下水过量开采的有效途径。发达国家在城市取水工程中，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

20%～40%的地下水依靠人工调蓄补给。如荷兰阿姆斯特丹的滨海沙丘人工补给设施，年灌入量达4000万m^3，解决了枯水季节的供水不足，成为该市主要供水水源之一。英国伦敦采用每年5个月回灌，7个月抽用，和4年回灌，1年抽用的循环体制，对调节水源起到了重要作用。据国外报道，2000年世界水平衡预测，对需要控制的不稳定洪水流量，其中60%左右将利用地下库容进行调蓄。

人工补给不仅能解决地下水过量开采问题，而且还有改良水质、排水回收利用、废水处理、阻止海水入侵、防止地面沉降、控制地震等重大技术用途。开发地下水库还具有占用土地少、蒸发消耗小、调蓄能力强、引灌工程简便、工程周期短和耗资小、效益高等优点。根据华北降水年际变化大的特点，拦蓄降水和地表弃水，建立地下水库，实行以丰补歉，能最大限度地对水资源进行多年调节，增大当地径流利用系数，提高城市供水的保证率。

近年来北京市曾在潮白河牛栏山、永定河、石景山、丰台以及大兴天堂河流域，进行了人工调蓄的试验研究，取得良好的效果。如八角村砂石坑的回灌量可达259万m^3/a，利用潮白河砂厂水库排洪量拦蓄引灌，每日引蓄量可达19.55万m^3。本区每年平均输入水量总计117.5亿m^3，而输出水量达70亿m^3，占输入水量的60%；每年汛期出境水量就达10亿m^3以上，通过调节控制，至少相当一部分排洪量可补给地下水。北京市西郊由于过量开采腾出的库容就达13亿m^3，不用修建任何地下工程，就能建成调蓄库容8亿m^3的大型地下水库。

北方许多城市，水文地质条件都与北京相类似，属山前平原类型，或称冲积扇类型，具有含水层厚度大、颗粒粗、与地表水直接发生联系等特点，因此具备良好的地下调蓄条件。今后凡属这种类型的城市，均可开展试验。采取地表水、地下水联合调蓄的方法，作为解决水源不足的一项重要措施。

2. 提高水资源的利用效率

充分挖掘水资源潜力，并采取先进的工艺流程，提高工业用水的重复利用率和降低工业用水定额，是缓解城市供水紧张的一项重要措施，也是建立节水型社会生产体系的重要组成部分。我国工业用水60%～70%是冷却用水，对水质影响不大，完全具备重复利用的条件，但目前我国重复利用率还很低。70年代发达国家的重复利用率已经达到60%～70%。近年来一些先进的国家在钢铁、化工、造纸等工业上，水的重复利用率分别达到98%，92%，85%。我国各地情况很不平衡，除上海、北京、大连等少数城市重复利用率可达70%～80%左右外，其它多数城市还停留在20%～50%，因此有很大潜力。近年来我国不少开采地下水的城市，实行空调冷却用水回灌再利用，在水价政策上，对回灌用水采取不收水费的鼓励措施，取得良好效果。

由于工艺技术落后，在工业耗水量方面，我国与国外先进水平有很大差距。如国外钢耗水量为4～10m^3/t，而国内则达30～80m^3/t，火电厂国外用水为3l/kW，而国内用水为10L/kW，造纸工业国外为50～200m^3/t，而国内为300～500m^3/t。如果狠抓技术进步和改进用水工艺，耗水量必然能大大减低。由此可知，需水量、用水量与实际耗水量之间是有区别的。美国1975年的实际耗水量为4463亿m^3，而2000年预测为4228亿m^3，耗水量不仅没有增加，而是有所减少，主要原因并非用水量减少，而是水资源的利用效率提高了。因此我们在制订长远规划和分析水资源供需平衡时，一定要把这一因素考虑进去，否则就会作出错误的结论。

3. 废水净化再利用，实行废水资源化

据城建部门统计，全国城市污水日排放量已达6822万m^3，但处理污水能力很低。如华北

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

地区 1985 年全区污水排放量为 36.9 亿 m^3，其中 80%未经处理直接排入河流、湖泊，是造成水质污染的主要根源。根据天津、太原污水处理的经验，每吨的处理费用仅为 1.5 元左右，运行成本不足 0.2 元，远比建设新水源地的投资要低。所以废水净化再利用，既能缓解城市用水的供求矛盾，又可防止污染，保护生态环境，具有明显的社会、经济与生态环境效益。

国外对城市污水的处理和管理十分重视，即未经净化处理前严格禁止任意排放，既为防止污染，又可净化后再利用。实行污水资源化，并可回灌地下，以补充城市水资源不足。如英国沿泰晤士河 472 座污水处理厂，日处理能力 360 万 m^3，其中大部分储入地下水库，加以重复利用。美国洛杉矶奥芝日处理污水 11.4 万 m^3，也大部分注入地下。前苏联 715 个企业废水净化总能力 500 万 m^3/a，其中 400 万 m^3 投入循环系统。据预测北京 2000 年的污水排放量，将由目前的 9.74 亿 m^3/a 增加到 16 亿 m^3/a，如果其中 60%进行处理，使废水转变为再生的可利用资源，全市就可再增加用水量 10 亿 m^3 左右，并可作为地下水库的重要补给来源之一。这一数字相当北京总水资源的 1/5，可见污水净化再利用，对扩大城市资源具有何等重要的地位。

4. 充分利用矿坑排水，实行排、供结合

目前沿太行山麓就有不少煤田，由于大水矿床疏干问题得不到解决而不能开发。如果矿山排水能与当地城市供水结合起来，就能一举两得。据估算这一地区的矿坑排水量，每年可达 5 亿 m^3 左右，如能充分利用，那么对缓解城市供水紧张就可以发挥重要作用。

现在有些城市如河南的平顶山市与焦作市，在实行矿山排、供结合方面，都已取得较好效果。如焦作市经过详细工作，已批准 3～5m^3/s 的地下水资源，可作为城市或电站供水之用。由此可见，如果处理得当，采取超前疏干等措施，不仅有利于解决城市或工业供水水源，也有利于解决矿坑水患。所以大水矿床实行排、供结合，是解决某些城市水资源紧缺的重要措施之一。

五、结　论

（1）城市规划必须充分考虑水资源条件，即城市人口的增长或工业发展，都必须与水资源条件相适应。华北地区地下水资源比较丰富，对城市及工业供水具有特别重要意义。除应注意合理利用外，还必须与地表水联合开发，统一规划。合理处理好生活用水与工业用水或工农业用水的矛盾，加强水资源的保护，实行科学管理。

（2）为了防止地下水超量开采，一方面要合理控制开采量，一方面对大城市要在全面查明水资源的基础上，在较大范围内建立分散型供水系统，避免水源地在城市近郊区过度集中，造成开采强度过大而使水源枯竭的局面。城区工业过度密集，工业用水所占比重过大，同样是造成地下水超量开采的重要原因。因此除合理调整改造城区的工业结构与工业布局外，必须向外围地区发展，建立卫星城市，发展郊区工业，减轻城市供水压力，促进城乡工业一体化。

（3）根据华北降水年际变化大的特点，拦蓄降水和地表弃水，建立地下水库，实行以丰补歉，能最大限度地对水资源进行多年调节，增大当地径流利用系数，提高城市供水的保证率，并能起到改良水质的作用。开发地下水库具有占用土地少、蒸发消耗小、调蓄能力强、引灌工程简便、工程周期短、耗资小、效益高等优点。

（4）加强水资源的保护，防止水质污染。首先要严格管理城市污水的合理排放，积极开展

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

污水净化处理再利用，实行污水资源化。这不仅可防止水质污染，也是扩大水资源的重要途径。当前还要特别重视固体废物造成的环境污染，应早日在各重要城市，开展固体废物处理的环境地质调查，进行废物库址的地质勘察，实行城市垃圾的卫生填埋。

（5）充分挖掘水资源潜力，提高水资源的利用效率，包括采取各种技术措施，提高重复利用率，降低工业用水定额，实行废水净化再利用，节约生活用水，严格防止浪费，逐步建立节水型的社会生产体系。此外，还要加强水资源合理开发利用的科学研究，运用系统工程，在综合考虑城市水资源系统与社会经济系统的基础上，提出最优化开采方案，通过管理模型建立科学的水资源控制管理系统。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

农业水资源与可持续发展

一、农业水资源的概略分析

水利是农业的命脉，也是农业发展的主要制约因素。我国是一个12亿人口的大国，年产粮食49250万t(1997)，居世界首位，基本达到粮食自足；我国也是一个水资源大国，据1980年的统计数据，总用水量4440亿m^3，目前已超过5000亿m^3，是世界上用水量最大的一个国家，农业灌溉用水与农业灌溉面积，均居全球前列。没有水就没有粮食，由此可见中国是一个水资源比较丰富的国家，否则就不可能生产出养活12亿人口所需要的粮食。

我国秦岭以南，降水大于1000mm，河网发育，年人均水量达4170m^3，完全满足农业灌溉的需要。主要矛盾是人多地少，洪涝灾害严重。华北地区由于气候条件限制，水资源相对比较贫乏，人均水量938m^3，亩均水量454m^3，其中海滦河流域人均水量仅430m^3，亩均水量251m^3，是北方缺水最严重的地区。东北水资源条件较为优越，人均水量可达1680m^3，亩均546m^3，地表水、地下水均较丰富。实际上除部分高平原地区较为缺水外，广大平原地区主要是怕涝不怕旱，大片沼泽疏干问题也较突出。据联合国有关资料表明，对水资源需求来说，在人均水量1000m^3左右的地区，并不影响现代化建设对水的需求。因此我国北方除部分地区外，其它大部分地区，在总体上还不能称作严重缺水地区（表1）。

表1　不同地区人均亩均水量对比表

地　区	人均水量/$m^3 \cdot a^{-1}$	亩均水量/$m^3 \cdot a^{-1}$
南方	4，170	4，134
西南	38，431	21，783
华北（黄淮海）	732	447
北方	938	454
海滦河流域	430	251
东北	1，680	546
黄土高原*	300	＜250
西北内陆地区	5，191	1，590

*黄土高原系估算。

位处华北半干旱气候带与西北典型干旱气候带之间的黄土高原，面积约58万km^2，地形强烈切割，相对高差200～500m，水土流失严重，降水年平均300～500mm，六盘山以西均低于400mm，常以暴雨形式出现，对作物的有效降水率很低。黄河虽流经本区，但大部分形成峡谷，难以利用，地下水也只在部分地区分布。黄河支流的年径流总量185亿m^3，估计人均水量约300m^3左右，其中陇中地区不足250m^3，宁南地区350m^3，晋南、陕北部分地区可达750m^3。所以黄土高原是我国严重缺水地区之一。

我国西北贺兰山以西，是典型的干旱戈壁沙漠地区，如准噶尔、塔里木、柴达木以及河西走廊等内陆盆地，降水小于100mm，一向被认为是严重缺水地区。但实际上由于得到盆地

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

四周广大高山地区降水与冰雪资源的补给，形成强大径流，流入山前平原，水资源十分丰富。由于水多人少，据统计人均水量达5191m³，超过南方地区，亩均水量1590m³，远远超过华北地区。塔里木盆地的总水资源量相当于一条黄河的总流量。据统计西北地区人均用水量高达2350m³，居世界首位，主要用于灌溉，实际上浪费十分惊人。总之，应当改变过去长期以来认为西北干旱区严重缺水的错误概念。

根据以上分析，我国除去广大无人居住的高山地带或荒漠地区外，真正严重缺水的农业地区只有两大片，一片是海滦河流域，实际上局限于河北省的东南部，即黑龙港地区；另一片就是黄土高原。但两片自然条件差异很大，存在的问题也互不相同。我国南方虽一般不存在缺水问题，但西南云贵高原（包括部分湘桂地区）碳酸盐岩广泛分布，岩溶发育，降水或地表河流大部分渗入地下，形成地下暗河水系，而地表缺水十分严重。

我国水资源总量为2.8万亿m³，仅次于巴西、俄国（前苏联）、加拿大、美国、印尼而居世界第六位；但因人口众多，人均水量2670m³（1979年统计数字），约为全球人均的1/4，因此长期以来被认为属于严重缺水的贫水国家。但以上5个富水国家，其年径流总量（18.8万亿m³）已占全球总径流总量（46.8万亿m³）的42%；而其总人口（7.78亿）仅占全球总人口的18%，如按人均水量计算可达2.4万m³。实际上这些国家如加拿大或前苏联，很大一部分河流处于无人地区，全部流入北冰洋不能利用，可以称之为无效资源。因此在此基础上所计算出的全球人均占有水量，实际上包括很大一部分无效资源，并无实际意义。例如中国、印度、日本等亚洲主要国家，人均水量均远远低于全球人均占有量。在欧洲国家中，除北欧几个国家外，多数国家人均水量均在1000～3000m³之间，如英国、德国、意大利、葡萄牙、捷克、匈牙利、保加利亚等，基本上与中国人均水量相接近。如果按各国人均用水量进行统计，据联合国1975年的统计数字，多数国家均介于200m³～600m³之间，与中国人均用水量452m³相当，只有少数用水较多的国家，人均用水量达到500m³～1000m³之间；但除美国与加拿大以外，没有一个国家超过1000m³的。

由此可见，我国与多数欧亚国家相比，不论是水资源总量、人均占有量或人均用水量，均不能列入严重缺水的贫水国家。特别是我国国土辽阔，地区差异很大，更不宜笼统地说中国是一个严重缺水的国家，相反还应看到我国水资源的许多优势。例如黄河、长江等大江大河，由于中、下游广大平原都是我国主要农田分布地区，水资源得以充分利用，使我国成为世界用水量最多，灌溉面积最大的国家，也是世界粮食生产量最大的国家。华北地区虽降水较少，但地下水资源丰富，由于井渠相结合，保证农业生产连年丰收。西北广大内陆干旱地区，得到盆地四周高山降水与冰雪资源的补给，人均水量高达5000m³以上，超过南方地区；亩均水量也远远高于华北，成为我国主要棉花基地与商品粮基地之一。我国西南水资源总量达8268亿m³，约近全国总径流量的1/3，但目前实际利用量仅660亿m³。特别是滇西地区的红河、怒江、澜沧江三条河流，其总径流量就达1281.2亿m³，基本上是尚未开发的处女地，在国境外全部流入大海，是我国最重要的潜在水资源，也是下世纪内最重要的后备水资源。

综上所述，对水资源的评价，不能简单地以全球人均水量或全国人均水量作为衡量的标准。由于水资源的贫富基本上是一个相对概念，因此主要决定于资源量与需水量之间的相互关系，而且前者主要以可利用资源作为评价对象，后者必须符合经济合理、有益环境和高效用水的基本原则。根据上述有关各国实际人均水量与人均用水量相互关系的综合分析，可以对水资源量初步划分以下4个等级：（1）水资源丰富，人均水量＞3000m³；（2）水资源中等，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

人均水量1000m³～3000m³，基本满足一般供水需求；（3）水资源不足，人均水量500m³～1000m³；（4）水资源贫乏，人均水量<500m³。因此，对于水资源量的评价，除根据人均水量以外，必须充分考虑水资源的可利用条件，即可利用水资源与国民经济规划对水资源需求量之间的平衡关系，做到国民经济的发展必须与资源、人口、环境相协调。

二、农业水资源的区域特征与合理利用

我国国土辽阔，各地区自然条件差异很大，水资源的开发利用途径也随地而异，互不相同。南方降水充沛，河网密布，农业灌溉以依靠降水为主，河网渠系为辅。北方地区降水量小，地表水不足，但地下水相对较为丰富，对农业灌溉居有主导作用。黄土高原地表水、地下水均较贫乏，目前主要采取修建水窖，就地蓄聚雨洪，作为部分灌溉用水。西北干旱区主要利用山区河流来水，根据地表水、地下水相互转化的特点，目前以开发地表水为主，地下水为辅。

北方平原区地下水资源年均共约1500亿m³，占全国平原区地下水资源的78%，年开采量达438亿m³，灌溉农田2亿亩，约占全国灌溉耕地面积7亿亩的30%。其中华北地区年开采量达256亿m³，井灌面积约占灌溉面积的60%。例如黄淮海平原河川径流438.2亿m³，而地下水资源为419.4m³，两者十分接近。河北地下水的年开采量超过100亿m³，约占全省总用水量的72%；河南农业用水年均117亿m³，其中地下水约为70亿m³左右。所以黄淮海平原，是全球少数几个规模最大的井灌区之一。由于华北大部分地区基本实现机井化或井渠双保险，粮食连年丰收，达到自给有余，从而扭转了长期来“南粮北调”的被动局面。

目前华北地区存在的主要问题是，春旱较为严重，部分地区（主要在黑龙港流域）灌溉用水不足，深层水过量开采，地下水位持续下降；水库调节功能不强，地表水、地下水缺乏统一规划，不能相互调剂、联合调度。华北降水集中在夏季，春旱秋涝已成为自然规律，而且每十一、十二年可能发生一两次连旱年，形成旱灾，是华北农业生产的主要威胁。华北河流上游虽然修建了不少水库，但淤积严重，不能充分发挥多年调节作用。针对以上情况，许多地方加强地下水的人工调蓄，充分发挥地下水的调蓄功能，取得不少成功经验。

一种形式是汛前灌季充分开发地下水，有意识的降低地下水位，腾出地下库容，汛期进行蓄洪引渗，把洪涝水转化为地下水，以供第二年利用。另一种形式，是控制最优水位，夺取无效蒸发，扩大降水入渗；这不仅能增加补给，而且有利于消除旱、涝、盐等自然灾害。例如河南商邱地区，由于采取井灌、井排等措施，汛前地下水位控制在5～6m，汛后控制在3m左右，形成一个天然地下调节水库。据计算该地区可采资源由原41亿m³/a增加到64亿m³/a，可灌耕地由1650万亩扩大到2569万亩，粮食生产成倍增长。特别是大片盐渍化土地不治自愈，洪涝灾害也有所减轻或自然消除。据河北地理所对古河道带进行的研究，指出有20多处可利用古河道建立地下水库；水文地质研究所提出70多处可供人工调蓄的地点，粗略估计可调蓄地下水100亿m³左右，是今后缓解这一地区灌溉用水不足的一个重要途径。此外，华北平原分布微咸水近60亿m³，近年来在改造利用微咸水方面，也取得不少经验，具有较好的开发利用前景。

黄土高原是我国耕地面积分布较广，但水土流失严重，水资源严重不足的地区。过去曾修建大量中、小水库，但几年内就可全部淤满而失去蓄水的功效。根据朱显谟院士提出的黄

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

土高原采取“全部降水就地入渗拦蓄”的方针，近年来普遍修建大型水窖，就地蓄聚雨洪，取得较好效果；但只能解决人畜生活用水和春耕期间部分耕地点苗之用。因此凡有地下水分布的地区，均应尽可能开发利用地下水，以满足地方需要，主要包括：①河谷平原潜水或承压水；②局部断陷盆地内的第四系含水层；③塬区黄土含水层；④黄土覆盖下白垩系或第三系承压水；⑤隐伏的奥陶系岩溶水。从长远考虑，还应研究调水的可能性。近年来开发的景泰黄河提灌工程以及引大济秦工程等，收到一定效果；60 年代曾经勘查过的引洮方案，虽然工程困难较大，仍有进一步研究的必要。

西北干旱地区水资源的基本特征是：(1) 山区河川径流量，基本代表每条河流全流域的水资源总量，从上游到下游一般要流经 2～3 个盆地，形成一个完整的全流域水资源系统；(2) 地表水、地下水相互重复转化，形成一个不可分割的统一体。当前存在的主要问题是：①水资源利用缺乏全局观点，上、下游水资源分配极不合理，严重破坏上、下游水资源的天然平衡，也严重影响全流域的生态系统，使生态环境急剧恶化。②地表水、地下水缺乏统一规划，片面强调开发地表水，使原来作为主要灌溉水源的泉水资源受到严重破坏，也严重影响天然形成的水循环系统。③盲目开发新绿洲，使原来的灌溉系统受到严重破坏。④大水漫灌，水资源严重浪费，并导致大片耕地盐碱化。

针对上述问题，其主要对策是：①根据水资源总量，对上、中、下游各盆地，进行优化分配；②地表水、地下水应放在同等重要地位，充分利用两者转化关系，提高重复利用率，联合调度，统一规划；③严格限制建立地表水库，充分利用戈壁带天然地下水库的调蓄功能，保护泉水资源；④根据泉灌、渠灌与井灌相结合的原则，因地制宜，建立合理的灌溉系统，绿洲带以发展泉灌为主，井灌为辅，细土带以井灌、井排为主，井渠结合；⑤凡由于泉流量衰减，由泉灌改为井灌的地区，必须采取人工补给等措施，保证补给来源，防止地下水过量开采；⑥根据水资源的承载能力，在不影响自然绿洲的前提下，容许适当发展人工绿洲，但严格防止以牺牲下游绿洲耕地作为代价，在上游扩大耕地；⑦保护生态环境，保证绿洲外围地区为维持生态平衡所必需的耗水量；保护上游山区的森林植被，涵养水源，防止水土流失，增加枯水基流。⑧加强科学管理，建立高效节水农业。

我国农业灌溉用水长期沿习旧的灌溉制度，灌溉技术落后，用水浪费严重。现有灌溉用水有效利用率仅 30%～50%，干旱区地表渠系利用系数不足 0.4；年灌水定额可达 16537m^3/km^2，是全国平均的 1.4 倍，而宁夏高达 2.8 倍。北方灌区灌溉定额达 7500～12000m^3/km^2，高出作物实际需要 2～5 倍，东北和西北的一些灌区甚至超过 12000m^3/km^2，只低于印度居世界第二位。引黄灌区下游输水损失达 30%～50%，灌水利用率只有 40%左右，部分灌区毛灌定额超过 7500m^3/km^2，造成大面积土壤盐渍化。华北地区由于过量开采地下水，造成大面积地面沉降，加剧了洪涝灾害。南方水稻灌区同样存在水资源严重浪费现象，使大量水、肥流失，地下水位抬高，稻田冷浸，农业产量降低。

据统计全国每生产 1kg 粮食，要补充灌溉 1.23m^3 水，而加拿大、前苏联和美国分别为 0.07m^3 和 0.93m^3，相差 1.3～17.6 倍。据估算我国每年浪费的灌溉用水量，至少在 1000 亿 m^3 以上。如果通过节水灌溉，将灌溉用水利用率从目前的 30%～40%提高到发达国家的 70%～80%的水平，全国就可节约 50%以上的灌溉用水。1996 年水利部联合有关部委，全面启动了我国 300 个节水增产重点县和节水型井灌区的建设，总计完成的各类节水灌溉工程，控制面积 3500 万亩，年节水相当有效库容约 100 亿 m^3，即相当投资数百亿元修建有效库容 1 亿 m^3

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

的大型水库100座，可增产粮食190亿kg。由此可见，当前农业灌溉用水重点不是开源问题，而首先要防止浪费，加强节水意识，依靠科技进步，实行科学用水，建立高效节水农业。这不仅是解决灌溉用水“紧缺”的主要途径，而且也是促进农业增产和可持续发展的关键所在。

三、国内外农业水资源利用的比较

在全球农业大国中，美国和印度与中国的情况比较接近。前者属发达国家，后者是发展中国家，都具有较大的代表性。根据1980年的统计资料（表2），中国与印度农业人口在总人口中所占的比例都比较大，估计约在80%以上，而美国则低于20%。这也是发展中国家与发达国家之间的一个重要差别。中国与印度的农业用水量均在4000亿m^3左右，是世界上两个灌溉用水最多的国家。印度的耕地面积大于中国，而中国的灌溉面积略大于印度，但中国的粮食产量比印度大一倍，这说明中国农业水资源的利用效率高于印度。

表2 中、印、美三国农业水资源利用对比表（1980）

国名	农业人口/万人	引用水量/亿t	耕地面积/亿亩	灌溉面积/亿亩	粮食产量/亿t	人均产量/kg
中国	81904	4000	14.96	7.10	3.182	326
印度	43885	4412	24.83	5.86	1.448	209
美国	478	1752	28.03	3.68	2.700	1215

美国的耕地面积比中国大一倍，但中国农田的灌溉面积和农业用水量都比美国大一倍，而粮食产量仅略大于美国。这说明生产同样数量的粮食，中国要比美国将近多用一倍的水。换句话说，如果中国达到美国当时的农业生产水平，那么就可节约一半的灌溉用水；或者说如果利用现在的灌溉用水量，就可扩大一倍的灌溉面积，增产一倍以上的粮食。由此可见，只要依靠科技进步，不断提高农业水资源的利用效率，那么中国农业增产的潜力，是非常之大的。

以色列是世界上严重缺水而发展节水农业科技水平最高的国家，也是公认的水利用效率最高的国家。如果拿以色列与面积相接近的北京市相比，更容易看出两国之间在农业用水方面的巨大差距。据刘昌明、何希吾等编著的《中国水问题研究》一书中所提供的有关资料（表3），两地耕地面积基本相同，但北京水资源总量和农业用水量都比以色列大2.40倍。降水以及人均、地均拥有水量，均远较以色列为优越；可是农业生产总值却低于以色列，农业

表3 北京市与以色列农业水资源对比表

项　目	北京市	以色列	倍　比
土地面积/$\times10^4km^2$	1.68	2.03	0.83
人口/10^4人	966	440	2.20
耕地面积/10^4km^2	41.17	40	1.03
灌溉面积/10^4km^2	34.30	20	1.71
年均降水量/mm	596.0	350	1.70
水资源总量/10^8m^3	40.8	17	2.40
人均拥有水量/（m^3/人）	420.0	380	1.11
地均拥有水量/$m^3\cdot km^{-2}$	9600.0	3885	2.47
农业用水量/10^8m^3	28.71	12.00	2.39
农业生产总值/亿元	34.29	39.40	0.87
农业万元产值取水量/m^3	8373	3036	2.76

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

万元产值的取水量大于以色列 2.76 倍。按此比例，如果北京达到以色列同样的生产技术水平，其中包括各种农业措施，只需要 10 亿 m^3 水就可达到同样的农业生产总值，即大致相当原用水量的 1/3，可节约用水 18 亿 m^3。换句话说，如果农业用水量不变，那么农业生产总值应该由 34.29 亿元增加到 95.7 亿元。试想这是多么惊人的差距！

以上两个实例说明，如果我国达到美国当时农业生产的科学技术水平，就可以节约用水 50%；如果达到以色列的农业生产水平，那么就可以节约用水 2/3，可见我国农业水资源的潜力有多么大。由此说明，促进农业增产和实现水利化的道路，在近期内主要不是依靠扩大灌溉用水或等待远距离调水，而是依靠科技进步，加强节水意识和管理意识，提高利用效率，充分发掘水资源的潜力，建立高效节水农业，合理开发利用水资源，才是扩大农业增产的正确途径。

四、合理调整农业用水量与城市及工业用水量的比例关系

据 1980 年的统计资料，全国总供水量为 4440 亿 m^3，其中农业用水 3580 亿 m^3，城市及工业用水为 457 亿 m^3，分别占总用水量的 88.2%和 10.3%，生活用水仅占 1.5%。近 20 年来，城市建设和工业生产迅猛发展，例如从 1991 年到 1994 年，城市的数量，由 479 个增加到 612 个。据不完全统计，1990 年前后，全国总用水量已增至 5192 亿 m^3，农业、工业及生活用水，分别增加到 4160 亿 m^3（80%）、908 亿 m^3（17.5%）、124 亿 m^3（2.5%）。据水利部门预测，2000 年总用水量将增至 7096 亿 m^3，农业用水虽有所增加，但所占比例有所下降，而工业用水比例则有所上升（表 4）。

表 4　1980～2000 年用水量增长对比表

年	总用水量/10^8m^3	农业用水量/10^8m^3	%	工业用水量/10^8m^3	%	生活用水量/10^8m^3	%
1980	4440	3580	88.2	457	10.3	66	1.5
1990	5192	4160	80.0	908	17.5	124	2.5
2000 预测	7096	5575	78.5	1302	18.3	219	3.2

据 60 年代各国用水量的统计资料，大多数国家人均用水量介于 300～600m^3 之间，中国（458m^3）约居中流。多数工业国家，如英国、德国、波兰、捷克等工业用水量，均超过总用水量的 70%。法国、美国及前苏联都属工、农业均较发达的国家，工业用水量分别占 41.2%、48.6%及 36.00%，即大约在 30%与 50%之间。发展中国家如印度（0.8%）、墨西哥（9.2%）和中国（10.3%），均低于 10%。自 60 年代以来，发达国家工业用水量虽有所增长，但逐渐趋于稳定，甚至有所减少；而发展中国家，工业用水则急剧上升。据统计从 60 年代到 80 年代，全球城市及工业用水量，平均总用水量的比例已由 20.5%上升到 34.6%。

根据以上分析，由于我国人口众多，人均用水量宜保持在 500m^3 左右。农业用水浪费严重，节水潜力很大，今后不仅不应增加，相反应大幅度压缩。根据前节的分析，如果采取有效节水措施，那么节约 1000 亿 m^3 是不难达到的，大致相当目前灌溉总量的 25%。因此农业用水所占的百分比，在今后 10～20 年内，应逐步由 80%调整到 60%～70%，工业用水势将上升到 20%～30%，生活用水应上升到 5%左右。即三者之间，大致形成 75∶25∶5 的关系，是比较合理的。当然这种比例关系不是固定不变的，从长远角度看，在 2050 年前，农业用水

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

应由75%下降到60%左右，而工业用水将增加到30%左右，即形成60：30：10的比例，但总用水量应基本保持稳定，不宜大幅度增加。

由于上述比例关系的转变，必然造成工、农业用水供需矛盾的激化。按一般原则，在工业、农业与生活用水三者之间，首先保证生活用水，其次是经济效益较高的工业，最后才轮到农业。由于城市及工业用水，需要建立集中型、持续运转的供水系统，对水量、水质或水温均有严格要求；而农业用水主要属大面积分散性供水，具有季节性和间断性，对水质、水量要求不很严格。所以凡具备集中开采条件的水源地，应优先给予工业。工业扩大用水，除开辟新的水源外，很大程度上要依靠农业节水。所以如何协调好工、农业之间的供水关系，实行总体规划、统一调度，相互调剂，合理分配，是一项复杂的系统工程。

举例来说，山西有许多岩溶大泉，流量稳定，水质良好，是建立能源基地的理想水源。但多数大泉长期来就作为农业灌溉之用，而灌区内多半有地下水分布，如果把部分泉灌区就地改为井灌区，就有可能把多出的泉水作为工业用水。但这就需要首先做好老乡的思想工作，同时还要解决建设井灌工程的投资问题。沿太行山麓分布的许多城市，如石家庄、邯郸、保定等，主要依靠地下水作为供水水源，目前都不同程度地出现过量开采现象。当地河流上游建立的水库，主要作为农业灌溉之用，如果地表水、地下水建立联合开发系统，互相调剂，统一规划，就能缓解这些城市工业供水的紧缺局面。河套平原黄河灌区引用黄河河水近100亿m^3，至少浪费50%左右，而灌区内地下水丰富。据内蒙地矿局调查，仅后套平原如果实行井灌、井排与渠灌相结合，就可减少引黄灌溉用水20亿m^3，并有可能满足下游胜利油田工业用水的紧迫需要。密云水库与潘家口水库，原以农灌为主，近年来已提供京津两地作为重要补充水源，大大缓解了两地城市和工业供水的紧张局面。

五、结　论

（1）我国是一个农业大国，也是一个水资源大国，粮食产量与农业用水量均居全球前列，但灌溉用水浪费严重，有效利用率仅占30%～50%，因此当前农业灌溉问题，“开源”与“节流”应以“节流”为主，节流本身就是开源，通过节流作为缓解农业水资源“紧缺”的主要途径。

（2）我国国土辽阔，各地区自然条件差异很大。南方降水丰沛，河网密布，宏观上基本不存在农业缺水问题；北方受气候条件限制，虽然存在缺水或严重缺水地区，但不同地区之间的缺水程度，也存在很大差异。例如东北广大平原，地表水、地下水均较丰富，人均水量1680m^3，农业主要怕涝不怕旱。西北内陆盆地虽地处绝端的干旱气候带，但受到盆地四周高山降水及冰雪融水的补给，形成强大径流，因而盆地内水资源相对十分丰富，人均水量超过5000m^3，亩均水量达到1590m^3，均远远高于华北。所以北方真正严重缺水的农业地区只有两大片，一片是河北省东南部的黑龙港地区，人均水量430m^3，亩均水量251m^3，另一片是黄土高原，人均水量仅有300m^3左右。根据以上分析，如果笼统的说中国是一个严重缺水的贫水国家，显然是与实际情况不相符合。

（3）从全球范围来看，由于各个国家地处不同的纬度带，不论气候条件、国土面积或人口密度，都有很大差异，所以笼统的以全球的人均水量，作为衡量一个国家水资源的贫富，是不够恰当的。例如世界五个水资源量最大的国家，也是陆地面积最大的国家，其总径流量就

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

占全球总量的40%以上，而其人口不到总人口的20%；沿赤道带许多小国或岛国，人口很少，而降水十分丰沛，人均水量也很大。但全球大多数国家，主要集中在北纬20°～60°之间，包括亚洲、欧洲和北非的多数国家，其人均水量一般均在1000m³～3000m³之间，远远低于世界人均水量。由此说明用简单方法计算出世界人均水量，不仅缺乏代表性，也缺乏实际意义。如果按各国人均年用水量进行统计，多数国家介于200m³～800m³之间，只有极少数国家人均用水量超过1000m³。根据以上各国实际情况的分析，也足以说明在人均水量大于1000m³的国家，水资源一般能满足需求，只有在人均水量小于500m³的地区，才是缺水比较严重的地区。

（4）由于各地区水资源条件差异很大，存在的问题也互不相同。例如华北平原除需提高灌溉用水的利用效率外，还要加强地下水的人工调蓄，开发土壤水的调蓄功能，控制深层水的合理开采，开发微咸水的改造利用，以及加强地表水、地下水的统一调配等；西北地区主要问题是各流域上下游水资源的合理分配，地表水、地下水的综合开发；建立合理的灌溉系统，防止生态环境恶化；黄土高原除充分利用降水就地拦蓄雨洪外，凡有地下水分布的地区，要充分开发利用地下水。东北地区重点是高平原的缺水问题与低平原防治洪涝和沼泽疏干。南方地区重点解决西南岩溶高原暗河水系的开发利用，低平原冷浸田治理，以及滇西若干“干坝”的水资源开发等。因此，必须根据各地区的特定条件，针对存在的问题，因地制宜，采取不同的对策。

（5）70年代我国农业、工业和生活用水的比例关系分别为88.2%、10.3%、1.5%，其中农业用水占极大比重，而实际利用率很低。随着国民经济的飞速发展和人民生活水平的提高，工业与城市用水必然将急剧增长。据联合国统计资料，全球城市及工业用水，从60～80年代已由总用水量的20.5%上升到34.6%，而目前我国工业用水尚不到20%。因此，如果在不大幅度增加全国水资源总用水量的基础上，必须通过农业节水措施，逐步压缩农业用水量，来弥补城市和工业用水的不足；至少应在2010年前，把三者关系调整到75∶25∶5，并在不太长的时间内，进一步调整到60∶30∶10的比例关系。如何协调好农业用水与城市、工业用水之间的关系，是今后需要解决的一项艰巨任务。

（6）农业灌溉用水的严重浪费，在我国是一个十分普遍而又非常突出的问题；如果我国确实是一个严重缺水的国家，就不可能出现这样的浪费现象。长期以来，大水漫灌早已习以为常，要树立节水意识，并非轻而易举。除须大力宣传科学知识外，还要建立健全有关法规，采取经济措施等办法加以限制。通过对国外先进国家灌溉用水的分析对比，证明我国农业水资源的潜力很大；特别是与水资源十分贫乏的以色列相比，那么用水效率差距之大，更为惊人。因此必须把建立节水农业，作为一项战略措施，依靠科技进步，推广新技术、新方法，不断提高灌溉水的利用效率，改革旧的灌溉制度，加强科学管理，不仅是解决农业水资源的一条重要途径，也是保证农业增产和持续发展的主要出路。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

西北干旱区水资源的开发利用与生态环境

河西走廊水资源开发与生态环境

一、引　言

河西走廊位居甘肃西北部，地处典型的干旱戈壁沙漠地带。走廊南缘的祁连山脉，海拔达4000～6000m，冰雪资源丰富，山区降水与冰雪融水形成强大径流，流入山前平原。全区主要包括石羊河、黑河及疏勒河三大内陆水系，总径流量为79.58亿m^3，基本相当全区的总水资源。按耕地面积计算，亩均占有水资源658m^3，人均1590m^3，均远远高出华北地区。河西走廊为甘肃省的主要商品粮基地，农民人均收入超千元；境内矿产资源丰富，工业发达。不论农业或工业，均有美好的发展前景。水资源是干旱地区发展国民经济的主要制约因素，随着国民经济的迅速发展，对水资源的需求量不断增加。由于对水资源的开发利用缺乏统一规划与科学管理，浪费严重，生态系统受到破坏，生态环境日益恶化，已经对工农业生产与人民生活造成威胁。如何协调好国民经济持续发展与资源开发及生态环境之间的关系，实现良性循环，已是当务之急。

二、河西走廊水资源的基本特征

河西走廊水资源的形成条件与分布规律，在西北干旱地区具有典型意义，其基本特征主要包括以下诸方面：

（1）山区每条河流的地表径流量，基本代表其全流域的总水资源。由于整个走廊地区，除山区河流的流入量外，其它如降水等补给量甚少，因此山区地表径流量，基本相当或接近全区或每条河流全流域的总水资源。

（2）山区多年年均径流量，根据石羊河及黑河（干流）1956～1994年的水文站资料，出山口的多年年均径流量分别为15.70亿m^3与15.56亿m^3；自50年代以来，每10年的年均径流量，也都在15亿m^3上下，说明多年年均径流量相对比较稳定，但年际变化较大。

（3）地表水、地下水相互转化，形成一个不能分割的统一体。水循环系统在山前平原具有明显的水平分带性，按地貌条件可划分为：①戈壁带（地下水补给带），90%的山区径流入渗地下，形成地下水；巨厚的砂砾层，成为占有巨大空间的天然地下水库。②绿洲带（泉水溢出带），80%的地下水溢出地表成为泉集河，其中40%经灌溉入渗地下，成为可重复利用的“回归水”。③低平原盐土带（潜水蒸发排泄带），潜水由淡变咸，深部为淡承压水。全区水循

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

环系统可划分为两个子系统，即戈壁带—溢出带的潜水系统，与绿洲带—盐土带的承压水系统。

（4）每条河流自上游至下游，一般流经 2～3 个由岩石峡谷分隔而又相互联系的盆地，形成一个盆地系统。上、下游盆地水资源消耗量的总和，必须与这一水系的总水资源量相平衡。否则不仅将破坏区域水均衡，而且还将严重破坏生态系统平衡。

三、石羊河流域水资源开发对生态环境的影响

石羊河水系由多条河流组成，总水资源量为 16.93 亿 m^3/a，其中武威地区 11.44 亿 m^3/a，主要包括武威及民勤两个盆地。建国以来，在上游地区修建了许多水库，山区径流基本上全部被拦截，水循环系统发生了很大变化，对全区生态环境造成严重影响，现分述如下：

（1）泉水资源衰竭，由于山区河流被拦截，导致地下水补给逐年减少，泉流量严重衰减。从 1956～1978 年，泉流量由 8.63 亿 m^3/a 减至 2.12 亿 m^3/a，总递减率达 83.7%。到 80 年代，泉流量又急剧下降至 0.69 亿 m^3/a。近年来仅余 0.3 亿 m^3/a，实际上已接近涸竭；以致武威附近两百多条河流断流，溢出带附近的湖泊、沼泽全部消失。

（2）泉灌系统被井灌系统所替代，地下水严重超采，地下水位持续下降。绿洲地区历来以泉水作为主要灌溉水源，泉水涸竭以后，不得不发展井灌以替代泉灌；但地下水补给来源断绝，因此目前开采的地下水，实际上大部分是不宜动用的储存量。据估计年开采量达 4 亿 m^3 左右，约超采 3 亿 m^3 以上，水资源严重亏损，溢出带以南地区，地下水位累计下降 15～25m，部分达 40m 左右。

（3）开发新绿洲，水资源大量损耗。由于扩大耕地，建国以来在原天然绿洲的外围地区，大面积开发新绿洲，或称人工绿洲，其面积已超过 5000km^2，约为旧绿洲的 3 倍；而人工绿洲每平方公里的耗水量，约为天然绿洲的 3 倍。据统计 1981 年人工绿洲的耗水量已达 14.22 亿 m^3，接近全区的总水资源。换句话说，原进入天然绿洲的灌溉用水，基本上已全部通过水库引入新绿洲，不仅水资源总量并未增加，相反重复利用率由 77%减少到 42%，即灌溉回归水由 11.5 亿 m^3/a 减少到 5 亿 m^3/a，造成水资源的严重损失。

（4）下游民勤盆地来水量逐年减少，生态环境严重恶化。由于武威盆地水资源消耗量的逐年扩大，使下游民勤盆地的来水量，由 50 年代的 5.47 亿 m^3/a，到 90 年代急剧下降到 1.7 亿 m^3/a，导致下游地区生态环境日趋恶化，已面临崩溃的边缘，急待抢救，主要表现为：

①地下水位大幅度下降。上游来水量减少，使原河灌区被迫改为井灌区；但来水量减少，意味地下水补给量减少，大规模发展井灌，必然导致采补失调，使地下水位急剧下降。

②地下水补给减少，破坏原来的水盐均衡，导致水质急剧恶化，主要表现为矿化度升高。如从坝区到湖区，矿化度由原来的 2～4g/L，上升到 3～10g/L，在开采漏斗区更为显著。

③由于水质恶化，导致土壤盐渍化面积扩大。据统计自 70～80 年代，盐碱土面积由 20 万亩增加到 40 万亩，大部分弃耕沙化。同时由于来水量减少，使灌溉面积大量缩减，撩荒耕地达 38 万亩，约占耕地面积的 40%。

④河流断流，湖泊干涸，植被大片衰退死亡，沙漠化严重。原河床演变为流沙河，终端湖被流沙所淹没。由于地下水位下降，水质恶化，大片灌木林、沙棘林以及天然紫湾（白茨灌木）等衰败死亡，并被沙漠所替代，大片农田被流沙所吞没，沙漠面积日益扩大。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

据有关专家估计，石羊河流域由于水资源开发不合理，每年所造成的直接或间接经济损失，达到15560万元，并将逐年增长；而由于生态环境的严重恶化，对今后可能造成的各种危害，更是无法估量。

四、黑河流域水资源开发存在的主要问题

在三大水系中，以黑河水系水资源最为丰富，可利用水资源量31.29亿m^3，人均1809m^3，亩均702m^3；虽开发程度较高，但仍具有较大潜力。与石羊河的情况相类似，当前所存在的主要问题，是上、下游之间水资源分配不均的矛盾日益严重，直接影响甘肃与内蒙之间的关系。同时为扩大耕地，由张掖地区提出的修建鸳、梨联合水利工程方案，长期存在较大分歧，至今仍是争议问题。分述如下：

(1) 关于黑河中、上游与下游之间水资源分配的矛盾。黑河自鸳落峡出山后，经张掖、临泽等盆地，流入高台地区的正义峡，并经狼心山进入内蒙的额济纳旗，称为额济纳河，或称弱水，最终流入居延海。据黑河正义峡水文站的多年记录，自1944～1985年，年均径流量为12.2亿m^3，丰水年可达14～17亿m^3，枯水年也很少小于8亿m^3。从狼心山进入额济纳河的多年平均径流量为8.05亿m^3。但自80年代中期以来，由于中游地区国民经济的迅速发展，黑河下泄水量大幅度减少，特别是近5年平均流量下降到3.05亿m^3，1992年下降到1.83亿m^3，河水断流期长达200天左右。

由于中游地区来水量大幅度减少，下游终端湖东、西居延海及天鹅湖等均先后干涸，成为戈壁、盐漠。沙化、盐碱化的土地面积扩大到527万亩，约占全旗可利用土地面积的54%。地下水位持续下降，泉水枯竭，大批浅井干涸报废，水质严重恶化。约近600万亩的天然乔、灌木次生林枯萎消亡，荒漠化现象急剧漫延扩张，额济纳绿洲濒于消亡的危急关头。

水是维持荒漠绿洲生态系统的决定因素和基本条件。额旗绿洲生态环境严重恶化，主要由于黑河来水量锐减，水环境发生了重大变化，严重破坏这一地区的生态平衡。因此拯救绿洲最根本的办法，就是重新调整下游地区的流入量，实行上、下游水资源的合理调配。1992年水利部门和地矿部门就曾先后提出过要保证过正义峡的河川径流量9.5亿m^3/a，和过狼心山7亿m^3/a作为甘肃和内蒙水量分配的建议。这一分配方案基本保证了中游张掖地区工农业发展的需要，又使内蒙地区生态环境能有所改善，是一个比较合理的可行方案，但至今未能得到执行。

(2) 关于鸳、梨联合水利工程方案。鸳、梨工程主要是修建水库引水开发戈壁带荒滩，建设商品粮基地；计划控制水量13～15亿m^3，扩大灌溉面积60～80万亩。但据预测水库建成10年后，灌区北半部地下水位将下降4～6m，泉水流量消减1.79亿m^3；肃南明化地区河水调人后，将导致地下水位上升，土壤盐渍化加重。特别是进入正义峡的河川径流量将减少4.39亿m^3/a，而进人额旗的河水将下降至2.74亿m^3。因此这一方案将会重犯石羊河的错误，不仅大量损耗水资源，而且对维护下游生态环境十分不利。

另一种意见，提出以开发地下水为主的井灌工程方案，主要开发张掖盆地绿洲以下低平原的宜耕荒地，作为商品粮基地。所需工程投资仅为鸳、梨工程的一半，但经济效益则基本相同，而且具备以下优势：①工期短、收效快；②土壤条件相对较好，可减少耗水量，并有利于提高重复利用率；③减少潜水无效蒸发，有利于防治土壤盐渍化；④不受春旱影响；⑤

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

基本不影响对下游地区应保证的流入量。根据以上对比，以开发地下水为主的井灌工程方案，显然具有较大的优越性。

五、结　论

（1）每条河流的山区径流量，基本相当全流域的总水资源，因此上、中、下游，农业、工业及城市生活用水，必须统筹规划，合理分配。

（2）地表水、地下水是相互转化不可分割的一个整体，形成一个统一的水资源系统；必须统一规划、综合利用，扭转长期来单纯强化开发地表水的偏向；因地制宜，实行河灌、渠灌、泉灌、井灌相结合的合理的灌溉系统。

（3）建立新绿洲必须在充分保证老绿洲灌溉需要的基础上，根据水资源的承载能力，选择最优地区，适当发展新绿洲。

（4）河西走廊节水潜力很大，在开源、节流方面，应把树立节水意识，建立节水型农业，作为缓解水资源供需矛盾的主要措施。据粗略估计，如果实行限额灌溉、储水灌溉、推广高效节水技术（包括喷灌、微灌、覆盖等新技术），提高渠系利用系数，就有可能在全区节水 13.34 亿 m^3，相当新扩保灌面积 40 万亩左右，并能有效防止土壤盐渍化、沙漠化，缓和对地下水的超量开采，特别对维持全区的生态平衡，具有重要意义。关于“引大”等跨省、跨流域调水方案，工程艰巨、投资大、工期长，存在问题甚多，近期尚难实现，只能留作远期规划考虑。

（5）疏勒河流域水资源开发程度较低，已列为农业重点开发区；计划投资 30 亿元，移民 20 万人，开垦荒地 80 万亩，是一项规模宏大的土地开垦工程。为实现这一计划，必须依靠科技进步，认真总结石羊河和黑河的经验教训，加强调查研究，合理开发利用水资源，防止生态环境恶化。

（6）加强科学研究，实行科学管理；按流域成立有权威的、具有超脱地位的水资源管理机构，全面规划、统一管理；协调好部门之间、地区之间的水资源矛盾；建立完善的监测系统，监督水资源的合理开发利用，加强绿洲生态环境的维护与治理。

河西走廊水资源的形成条件与分布规律，及其在开发利用中所存在的严重问题，在西北干旱地区，具有典型意义。1995 年 8 月，中科院地学部组织了部分院士和有关专家，以石羊河及黑河流域作为重点，进行了实地考察，写有考察报告，名为“关于黑河、石羊河流域合理用水和拯救生态问题的建议”，已发表在 1996 年中国科学院院刊第 11 卷 1 期。本人参加了这次考察工作，本文是该报告的补充。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

新疆水资源及其合理开发利用

一、引　言

新疆地域辽阔，土地面积 166 万 km^2，占全国的六分之一，是全国面积最大的一个省区。本地区处于亚欧大陆腹地，与 8 个国家接壤，边境线 5600km，战略位置十分重要。全区总人口 1661 万，少数民族占 62%。天山山脉横亘中央，北部准噶尔盆地介于天山与阿尔泰山之间，南部塔里木盆地介于天山与昆仑山之间，被称为“三山夹两盆”。准噶尔盆地面积约 20 万 km^2，塔里木盆地面积约 53 万 km^2，塔格拉玛干沙漠位于盆地中部，面积约 33.7 万 km^2，是世界第二大沙漠。塔里木河长约 2100km，是我国最长的内陆河。

全区现有耕地 313 万公顷，人均占有耕地 2.87 亩，可利用荒地 1000 万公顷，可利用草场面积 4800 万公顷，在全国五大牧区中占第三位。矿产资源丰富，其中石油天然气远景储量 300 多亿 t，煤炭预测资源量 21900 亿 t，占全国的 40%。全疆地表水年径流量 793 亿 m^3，地下水天然资源 571.82 亿 m^3，总水资源为 878.76 亿 m^3，冰川储量占全国的 50%。新疆地广人稀，单位面积水量仅有 5.5 万 m^3/km^2，而人均占有量可达 5300m^3，远远超过北方地区。因此新疆的水资源，具有美好的开发前景。

二、新疆水资源的概略分析

新疆主要由准噶尔与塔里木两个内陆盆地组成，包括东部的吐鲁番盆地与哈密盆地。本区虽处典型的内陆干旱气候带，年降水量仅 50～100mm，蒸发作用极强；但盆地四周高山，降水量可达 400～600mm，个别地区可达 600～800mm，特别是昆仑山、天山等山脉，冰川十分发育，冰川覆盖面积达 25000km^2（表 1）。全区冰川融水年径流量达 187.74 亿 m^3，形成巨大

表 1　新疆冰川面积与冰川融水径流量

数值 \ 项目 / 地区	冰川面积/km^2						占新疆冰川总面积/%	冰川融水径流量/10^8m^3	占冰川总融水量/%	冰川融水补给比重/(%)
	阿尔泰山	天　山	昆仑山	喀喇昆仑山	帕米尔	合　计				
准噶尔盆地	3.91	2250.19				2254.10	8.8	16.89	9.0	13.5
伊犁河		2022.66				2022.66	7.9	26.41	14.1	13.7
塔里木盆地		4923.15	8872.22	4007.97	2992.85	20796.19	81.1	139.51	74.3	40.2
藏北内陆			76.33			76.33	0.3	0.40	0.2	
柴达木盆地			195.65			195.65	0.8	0.91	0.5	
额尔齐斯河	289.29					289.29	1.1	3.62	1.9	3.62
总　计	293.20	9196.00	9144.20	4007.97	2992.85	25634.22	100	187.74	100	

据冻土冰川研究所资料。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

的固体水库。其中塔里木盆地四周高山的冰川覆盖面积就达 20796.19km²，占新疆冰川总面积的 81.1%；冰川融水年径流量 139.5 亿 m³，占河川径流量的 40%，对本区水资源起到十分重要的调节作用。因此本区河川径流量虽年际变化较大，但多年平均径流量变化较小，基本保持稳定。

山区降水与冰川融水，以及山区排泄的地下水，汇聚成强大的地表径流。由于盆地内其它补给来源所占比重很小，所以流入盆地的山区河流总径流量，基本代表或接近盆地的总水资源。山区河流进入盆地以后，其中 80%左右通过戈壁带入渗地下，成为地下水。在戈壁带前缘地下水溢出地表，形成泉水溢出带，汇聚成泉集河流入绿洲。泉流量约占地下水补给量的 40%，成为绿洲耕地的主要灌溉水源。

根据新疆地矿局的资料（见表 2），全疆地表水总计为 793.11 亿 m³/a，地下水天然资源为 571.82 亿 m³/a，总水资源为 878.76 亿 m³/a，人均水量超过 5000m³。

表 2　新疆水资源量

盆　地	面积/km²	地表水资源/ $10^8m^3 \cdot a^{-1}$	地下水资源/ $10^8m^3 \cdot a^{-1}$	总水资源/ $10^8m^3 \cdot a^{-1}$
准噶尔盆地	450656	408.91（439.82）	272.09	452.29
塔里木盆地	1218433	384.20（445.00）	299.73	426.46
总　计	1669089	793.11（884.82）	571.82	878.76

表 2 中地表水资源栏内括弧中数字包括境外来水量；总水资源栏中的数字，已扣除地表水、地下水的重复量。由表可见，水资源量基本上可满足近期或远期农业灌溉与城市及工业用水的需要，具有较好的开发前景。应当指出，准噶尔盆地与塔里木盆地的水资源量虽然比较接近，但实际上前者包括两条流出国外的河流，即阿尔泰地区的额尔济斯河（100 亿 m³/a）与伊犁盆地的伊犁河（160 亿 m³/a），如果这两条河流的流量不计，那么准噶尔盆地地表水资源实际上仅为 148.9 亿 m³/a。

综上所述，新疆虽属典型的戈壁沙漠地区，但水资源丰富，人均水量可达 5000m³/a 以上，远远超过一般地区。两个盆地总的规律是，西部地区水资源条件较东部为好，如伊犁、阿勒泰、阿克苏和喀什四个地区就占有全疆总水量的三分之二。山前带水资源最丰富，向盆地中心逐渐减弱；例如天山南北麓地下水资源即达 207 亿 m³/a，占平原地下水总资源的 52%。

新疆自解放以来，水利建设以开发地表水为重点，已修建大、中、小水库 483 座，年蓄水 37 亿 m3，各级渠道总长 15km，引水量 460 亿 m³，96%用于农田灌溉，城镇及工矿用水仅 16 亿 m³，占 3%左右。对开发利用地下水尚未引起足够重视，到 1986 年为止，井灌面积仅 413 万亩（纯井灌面积 200 万亩），主要分布在天山北麓，年开采地下水 20～25 亿 m³，仅占地下水总资源的 10%～20%，可见地下水的开发程度还很低。吐鲁番盆地和哈密盆地的坎儿井，至今仍是该地区的重要灌溉水源，总流量约 26.6m³/s，灌溉面积 56 万亩。近年来在北疆农灌区，已建成十多个井群水源地，拥有机井 467 眼，流量 29.3m³/s，年开采量 4.8 亿 m³，平均每眼井年产 10 万 m³，最大单井涌水量可达 200 万 m³/a，取得良好效果。

当前水资源的开发利用，主要存在以下问题：

（1）地表水、地下水的开发，缺乏统一规划。水利部门重点以建设地表水利工程为主，忽

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

视对地下水资源的合理利用。水资源缺乏合理调配，上游大量引水，造成下游水资源不足。只顾提高地表水的利用效率，很少考虑由于地下水补给减少，导致泉流量衰减，生态环境恶化，造成人力、物力、财力的极大损失。

（2）水资源利用效率低，浪费严重。全疆耕地面积5000万亩，灌溉定额每亩高达800m³以上，塔里木盆地普遍超过1000m³，造成水资源的严重浪费。目前北疆比较先进的灌区，每亩仅需500m³左右，如果南疆把过高的灌溉定额降低到680m³左右，每年就可节约水量约130多亿m³。此外，由于修建水库、渠道等水利工程，水面蒸发损失极大。全疆年平均降水总量为2429亿m³/a，流出境外237亿m³/a，其它将近50%，消耗于无效蒸发，包括水面蒸发与潜水蒸发。

（3）由于大水漫灌，造成地下水位大幅度抬高，导致土壤大面积盐碱化。目前次生盐碱化耕地共达1500万亩，占全疆耕地面积的35%。由于盐碱化弃耕的土地超过1000万亩。此外，大量修建水库和缺乏管理，使河流流程缩短，河床断流、湖泊萎缩、水质恶化，植被枯萎、草场退化、沙漠扩大，生态环境严重恶化。如塔里木河年径流量50亿m³，由于上游截流引水，中游流量已不到10亿m³/a，造成下游300km的“绿色长廊”频于消失。罗布泊湖完全干枯。北疆面积550km²的玛纳斯湖也完全干枯。30年来沙漠面积扩大了3.4万km²。

（4）地下水开发布局不合理，井灌效益差。井灌区缺乏合理规划，布井过密，或盲目布井，增井不增水，灌溉效益低。个别地区出现过量开采（如泰格拉达水源地），水头下降，提水设备不断更迭。自流开采区缺乏管理、保护、大量自流水流失。成井工艺差，平均每年10%以上的机井报废。

三、塔里木盆地的水资源及其合理利用

塔里木地处典型的干旱地区，是我国最大的内陆盆地。塔里木盆地及周边山区地跨五个地州，行政区面积104.83万km²，耕地面积1994.66万亩，人口721.45万，工农业总产值55.94亿元。水资源是干旱地区社会经济发展的主要制约因素，塔里木盆地水资源条件较为优越，潜力较大，对发展工、农业十分有利。据新疆地矿厅资料，全区年均降水总量1040亿m³/a，其中山区约占86%；河川年均总径流量384亿m³/a，地下水年均天然资源总计300亿m³/a，全区总水资源为426亿m³/a，相当一条黄河的年均总径流量。其中高山冰雪融水约占总水资源的40%，对地表径流起到十分重要的调节作用。据概略统计，目前人均拥有量为5160m³，亩均水量约2000m³左右，远远超过华北地区（华北人均水量938m³、亩均水量454m³）。

塔里木盆地地表水资源，主要集中在6条大河（表3），其径流量共达338亿m³/a，约占全区总径流量的80%左右。由于地下水主要受山区河流（包括渠系）补给，所以山区河流的径流量愈大，下游平原区的地下水资源也愈丰富。

例如上述6条大河的平原区，地下水资源总计为223.06亿m3/a，占盆地地下水总资源299.73m³/a的75%，因此上述河流的冲积扇前缘，均具建立大型工业水源地的条件。由山岳带至沙漠带之间的山前平原带，可划分为：戈壁带、绿洲带及盐土带三个带。山前戈壁带由巨厚的卵砾石层组成，潜水位埋藏较深（50～200m），开采比较困难。戈壁带前缘，水位逐渐变浅，是最有利的开采地段，单井涌水量可达3000～5000m³/a。但这一地段大量开采，显然会导致下游溢出带泉流量的削减，必须统一考虑。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3　塔里木盆地水资源概略表

河流名称	面积 km^2	地表水资源 $10^8m^3 \cdot a^{-1}$	地下水资源 $10^8m^3 \cdot a^{-1}$	总水资源 $10^8m^3 \cdot a^{-1}$
开都河流域	12693	39.5	27.11	43.65
渭干河流域	20217	34.60	33.11	41.75
阿克苏河流域	24112	43.40 (91.40)	54.87	49.75
喀什河流域	34863	45.30 (50.90)	39.73	51.39
叶尔羌河流域	22105	67.90 (75.10)	47.99	72.29
和田河流域	8132	46.50	20.25	47.99
其　它	1096311	107	76.67	119.64
总　计	1218433	384.20 (445.00)	299.73	426.46

绿洲泉水溢出带以下，地下水由潜水过渡到承压水，由单层含水层过渡到多层含水层，单井涌水量可达 1000～3000m^3/a，水质良好，也是有利开采地段。绿洲带至盐土带之间，含水层富水性由强变弱，单井涌水量 100～1000m^3/d，水质由淡水过渡到微咸水，但一般深部承压水水质较好。

盆地中央的沙漠地区，第四纪河湖相沉积厚达 500～1000m。沙漠覆盖下含水层以咸水、微咸水为主。沙漠边缘的部分地区，分布有沙丘覆盖的自山前延伸来的冲洪积层（如盆地西南部），含淡水或微咸水。伸入沙漠腹地的现代河床或被沙丘覆盖的古河道或古洪积扇，有淡水层分布，淡水带宽度一般为 500～1000m，是沙漠地区寻找淡水的主要方向。此外，沙丘内有点状分布，主要由凝结水构成的淡水透镜体。

干旱地区水资源的特点，是地表水、地下水相互转化，形成一个统一的整体。山区河流进入平原以后，50%～80%的地表水渗入地下，转化为地下水；在戈壁带巨厚的砾、卵石层中，构成一个巨大的天然地下水库。在戈壁带前缘，大部分地下水溢出地表，形成泉群，是绿洲带的主要灌溉水源。长期以来，一些地区由于执行以开发地表水为主的水利化方针，在上游地区修建大量水库，造成地下水补给量逐年减少，地下水位下降，泉水衰竭，上、下游河流流量的天然平衡受到破坏，最后导致生态环境恶化，对此不能不引起警惕。

因此，不论农业用水或工业用水，地表水和地下水都必须统一规划，相互调剂，综合利用。对城市和工业用水来说，开发利用地下水具有水质好、水温低、水量稳定、调节功能强、不易污染、开发投资少、工期短等优点。许多新兴城市，地下水资源均具有较好的开发前景，可以作为城市和工业用水的主要供水水源。对于建立小型水源地，一般只需根据普查资料，进行简单的勘查、试验工作；但对建立大、中型水源地，都必须通过正规的勘探工作，合理布置生产井网，井应注意防止工业用水与农业用水的矛盾，以及修建各类水利工程对地下水资源可能造成的不利影响。每条河流从上游到下游，一般要流经两三个相互连通的盆地，每个盆地都有绿洲分布，形成一个统一的水资源系统，依靠河流维持全流域的生态平衡。例如孔雀河流经库尔勒、普惠、尉黎等盆地，渭干河流经拜城、新和、沙雅等盆地，叶尔羌河流经叶城、泽普、莎东等盆地。如果上游盆地利用水工建筑物，为发展本地区经济而大量消耗水资源，就必然会影响下游盆地的河流流入量，并直接影响下游地区的工农业生产，甚至破坏生态平衡，使生态环境严重恶化。新疆最大的塔里木河，年均径流量达 49.8 亿 m^3/a，由于上游大量引灌，到中游仅余9.5 亿 m^3/a，减少 81%，使下游河流断流，地下水位大幅度下降，水

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

质恶化，胡杨林、红柳林大片死亡，草场覆灭，农田弃耕，原来长达 300km 的“绿色长廊”，大部分沦为荒漠。为了国民经济的持续和稳定发展，必须实行上、下游之间水资源的合理分配与科学管理。因此如何协调好水资源开发与维护生态环境和国民经济可持续发展的关系，已成为当前科学工作者的一项重要任务。

四、关于塔里木油田开发与水资源

盆地内水资源条件虽然较为优越，但地区差异较大，水质变化复杂。广阔的山前平原，水资源条件具有明显的分带性。环绕盆地的许多重要城市，如库尔勒、轮台、库车、阿克苏、喀什、叶城、和田等，都位处河流的中、上游，地表水、地下水都十分丰沛，具备建立大、中型水源地的条件，是今后发展石化工业，建设石化基地的理想地点。但河流中、下游地区，水资源条件相对较差，水质变坏；进入沙漠地区，地表水基本消失，而地下水以咸水、微咸水为主，只有局部地区分布淡水。大部分油田都分布在沙漠地区，所以如何解决油田分布地区的勘探用水与生活用水，是当前急待攻克的一个重要难题。

塔里木盆地经过近十年来的石油勘探大会战，已探明 19 个油气田，发现 26 个工业性含油气构造，大部分分布在沙漠地区；石油远景储量超过 100 亿吨，1996 年已达到 400 万吨的生产能力，使号称“死亡之海”的塔克拉玛干大沙漠，成为“希望之海”，但油田勘探用水与生活用水急待解决。1996 年横穿大沙漠的沙漠公路落成运行，揭开了大沙漠的奥秘。过去认为沙漠内是一个无水禁区，但 1996 年 5 月在盆地中心的塔中油田，完成了 KT1 号水井，孔深 653m，含水层厚达数百米，水质由浅部到深部有由咸逐渐变淡的趋势，在 425～528m 段发现矿化度 2.27g/L 的含水层，涌水量达 600m³/d，完全改变了长期以来认为沙漠地区找水无望的错误观念。

目前初步了解到塔里木盆地是处于天山、昆仑山和阿尔金山之间的一个巨大的第四纪坳陷，盆地内存在不少近雁行排列的并伴随断裂的第三系背斜隆起，使完整的盆地分割成若干小盆地，形成盆地系统，含水层结构主要受新构造控制。由于盆地腹部研究程度较低，对盆地构造与含水层的分布尚未完全掌握，又因地表全部被沙漠覆盖，工作难度很大。因此要取得突破，必须加强科学研究，充分应用新理论、新技术、新方法；例如地下水流系统理论与系统分析的方法，特别是应用遥感技术，在沙漠地区具有特殊重要意义。举凡古河道带、古冲洪积扇，以及各种新构造现象，在遥感图象上均清晰可辨，是寻找浅部淡水层的重要标志。深入研究第四纪盆地结构和岩相古地理，以查明深部含水层的分布规律与水质在水平方向和垂向上的变化，十分重要。因此需要配合一定的物探、钻探工作量。要在充分分析研究已有资料的基础上，结合油田的分布，全面部署具有代表性的勘探剖面和全区的勘探网。

五、关于水资源与发展农业

为发展农业，建设商品粮、棉基地，当前主要存在以下三方面问题：①春旱缺水问题，②土壤盐渍化治理，③宜垦荒地的开发问题。塔里木盆地约有 1000 多万亩的耕地不同程度的受到春旱的威胁，严重影响农作物增产。由于地表径流季度变化和年际变化较大，而农田灌溉单纯依靠引用地表水，是造成春旱的主要原因。所以解决春旱的主要途径，是地表水、地下

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

水综合利用，实行井、渠相结合，即旱季以井灌为主，非旱季以渠灌为主，两者互相调剂。地矿厅水文三队在叶城地区与地方水利部门合作，建立井、渠相结合的农田水利工程，方向正确，值得总结经验，树立样板，加以推广。

在全部耕地中，1/3 以上的耕地发生次生盐渍化，其中相当大的一部分土地弃耕。大水漫灌和缺乏排水措施，是造成土壤盐渍化的主要原因；实行井灌、井排，井、渠结合，合理控制地下水位，是治理土壤盐渍化的主要途径。如水文三队在巴楮陶县开展的盐渍化治理，效果明显，应认真进行总结。

塔里木盆地宜垦荒地资源十分丰富，关键问题是水资源条件。大部分荒地位处河流的中、下游，地势低洼，排水困难，一般应以开采地下水，实行井灌为主，有利于防止土壤盐渍化。地矿部门应根据荒地的分布和水资源条件，按照先易后难的原则，协助地方制订荒地开垦规划，并配合农垦部门开展水文地质勘查，承包打井工程。地矿部门可与地方部门合作，承担勘探成井任务，通过探、采结合，进行荒地开发。水文二队在呼图壁地区与当地农校合作，双方联合投资，计划近期开垦荒地 6000 亩；1996 年成井两眼，已成功开垦荒地 2000 亩，取得明显的经济效益。今后不论哪类工程，均可采取各种不同合作的形式，由地矿部门承包地下水勘查、开发任务，适应市场经济的需要。

农村贫困地区，多半是严重缺水或水质不良、地方病较为严重的地区。例如最常见的高氟病、克山病、地甲病等地方病，都与水质有关，严重影响人体健康。为改善农村饮用水条件，有计划地在贫困缺水地区，开展找水和防病改水工作，达到扶贫、脱贫的目的，是地矿部门不容推卸的职责。根据此次考察所见，农村饮用水主要存在以下三方面的问题：①春旱期间河、渠断流，利用涝坝水作为饮用水源，水质严重污染；②咸水、苦水分布地区，缺乏淡水；③主要是软水、高氟水、低碘水等水质不良地区，地方病严重，需要改水、换水。

第一种情况较易解决，只要有地下水，就可打井用井水替代涝坝水。第二第三两种情况，往往是浅层地下水水质不好，而又缺乏地表水，需要找水质好的深层淡水，解决难度较大，需要做好前期的调查研究工作，包括投入必要的勘探工作量。和田地区为解决农村饮用水问题，由中央、地方、群众多渠道筹集资金，大力开发地下水，取得较好经验，实现自来水传输到户，受到群众赞扬。但在一些地区也存在前期地质勘查工作不够，出现盲目打井等情况，造成不必要的经济损失。地矿部门应与地方政府密切合作，根据水资源条件，制定切实可行的勘查、开发计划；地矿部门承担地勘投资，探采结合，并承包成井任务，由地方政府与当地群众承担成井费用。对贫困地区，此类工作具有扶贫、济贫的性质，除政府资助外，也可从国家扶贫基金中，抽调一部分投资。

六、结论与建议

新疆水资源丰富，塔里木盆地水资源条件更为优越；基本上可满足近期或远期农业灌溉与城市及工业用水的需要，具有较好的开发前景。许多位居大河流冲积扇前缘的城市，都具备建立大型地下水水源地的条件，对今后城市发展或建立工业基地都十分有利。盆地中央沙漠地区，大部分属咸水或严重缺水地区，今后要解决油田供水，难度较大，需要进一步工作。当前主要矛盾是水资源的开发利用缺乏统一规划，水资源严重浪费，生态环境不断恶化，是急待解决的重大问题。针对上述问题，今后建议按流域实行统一规划、科学管理，通过模拟

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

优化等模型研究，实行上、中、下游水资源的合理分配；地表水、地下水综合开发，联合经营，充分发挥各自的优势，相互调剂，互补短缺，防止由于水资源开发，造成生态环境恶化。强化节水意识，防止浪费，建立节水型社会，最大限度地提高水的有效利用率；特别是建立高效节水农业，以最少的用水量，满足社会经济发展的最大需求。强化环境意识与管理意识，加强水资源的保护与科学管理，依靠科技进步，使资源开发，社会经济与生态环境，得到协调发展。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

西北干旱区水资源与第四纪盆地系统

一、引　言

我国西北广大地域，均属典型的干旱戈壁沙漠地带，主要包括准噶尔、塔里木、柴达木和河西走廊等内陆盆地；年降水量仅 50～200mm，而蒸发量可达 2000～3500mm。但盆地周边的高山地带，如祁连山、天山、昆仑山等，年降水量可达 400～800mm，冰川分布甚广，冰雪资源丰富，形成强大的地表径流，自山区流入盆地。上述巨型中、新生代盆地具有类似的地质背景和发展历史，均属由深大断裂控制的、介于古老地槽褶皱带之间的中间地块拗陷，第四纪盆地主要是在第三纪盆地的基础上发展而成。

西北干旱区第四纪盆地一般可分为前山带山间断拗盆地和山前断拗盆地两大类，前者规模较小，后者规模较大，居主导地位。盆地构造形式大部分为单斜式不对称盆地，又可划分为单列型单斜式盆地和多列型单斜式盆地，包括部分地下隐伏盆地。盆地构造主要受区域深大断裂和新构造作用控制，具有明显的方向性和规律性。每条河流一般要流经 2～3 个盆地，形成由盆地系统构成的一个统一的水文系统。全流域的水循环系统和水资源系统，均受盆地系统的制约。因此，研究干旱区第四纪盆地系统，对合理开发利用水资源具有重要意义。

二、第四纪地质特征

上述巨型的受深大断裂控制的继承性中、新生代盆地，自第三纪以来，在盆地周边的地槽褶皱带，沿深大断裂强烈隆起形成块断山脉；而在盆地一侧，则相对沿断裂带强烈沉陷，形成山前槽状单斜式断拗构造，堆积深厚的磨拉相建造。地槽褶皱带主要由下古生界变质岩系构成，在地形上形成高山，而中生界及第三纪地层经挤压、褶曲形成山前中、低山带，第三纪红层常沿盆地边缘俯冲在第四系之上，两者形成显著的断层接触。

前人对西北地区第四纪地层已有比较深入的研究，在地层划分上基本取得比较统一的意见，只是由于地区不同，采用的名称有所差异。如果以河西走廊为代表，第四系主要划分为：底部玉门组又称“玉门砾岩”（早更新世），同一时期的地层在新疆称西域组，主要由深灰色或黑灰色厚层至块状的砾岩及砂砾岩所组成，所含卵、砾石多具棱角状，分选性差，被认为系冰川、冰水相沉积，不整合在上新统疏勒河组（上新世的沉积在新疆称独山子组）之上，两者也常呈断层接触。玉门砾岩多半出露在盆地边缘，厚度约 300～600m，新疆可达千米以上。地层已强烈倾斜，并常伴有断层，有时覆盖在第三系背斜之上，形成拱曲现象，或形成不完整的穹状构造。在玉门老君庙剖面中，可见玉门砾岩尚可划分上下两部分，两者之间存在层间不整合面。

下酒泉组或称“酒泉砾石”（中更新世），这个时期的地层在新疆称准噶尔组或大西沟组，主要为黄灰色半胶结的砂砾层，层理清晰，属冰水相或冲-洪积相沉积，厚度约 100～500m，为本区主要含水层。常出露在盆地边缘下切河谷的两侧，与玉门砾岩及上覆上酒泉组均形成不

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

整合接触。疏勒河组常形成高角度的逆断层，俯冲在下酒泉组之上。下酒泉组常具原生的倾角，也常出现小断层或层间不整合面。

上酒泉组（晚更新世），在新疆这个时期的地层称“戈壁砾石”，为黄灰色或深灰色砾石层，厚度约 10～50m，不整合覆盖在下酒泉组或其它所有地层之上，形成广阔的山前戈壁平原。全新统主要包括冲积、湖积和风积沙丘等沉积物，盐湖及盐类沉积甚为普遍。

除上述第四纪盆地堆积外，在中、低山带广泛分布冰川堆积，形成 3～5 个高阶地。在祁连山地区划分为三岔口、东沟、冷龙岭、酒泉及玉门等 5 个冰期，在新疆天山地区划分为望峰、天池、前峡、乌鲁木齐和大南沟 5 个冰期，可与我国东部地区划分的大理、庐山、大姑、鄱阳、红崖等 5 个冰期相对比。在新疆准噶尔南部平原莫索湾地区所见深约 250m 的第四系剖面，反映 4～5 个沉积旋回，可划分出 4 个以砂砾层为主的含水组，其堆积时期或能与 4 个间冰期相对应。

西北地区第四纪地质的一个重要特征，表现为十分强烈的新构造运动。不仅第三纪晚期由于喜马拉雅运动造成第三系的强烈褶曲和断裂，而且延续至第四纪仍然继续发展。所有新构造活动均具有明显的继承性，尤其在盆地边缘地段最为强烈，而向盆地中心则逐渐减弱。所有第四纪的断裂、拱曲、隆起，以及不整合现象等，均主要出现在盆地边缘。上述玉门组、下酒泉组及上酒泉组之间的不整合接触，向盆地中心逐渐过渡到假整合或整合关系，而且上第三系与玉门砾岩之间，同样逐渐演变为近似连续沉积的关系。

三、第四纪盆地的构造模式与盆地系统

上述巨大的中、新生代盆地，在性质上均属位处地槽褶皱带之间在华力西运动以后形成的中间地块拗陷。盆地基底主要由结晶岩系组成，可能包括部分非变质的晚古生代地层，基底相对比较稳定。盆地边界主要受一组与山脉走向一致的 NWW-SEE 向深大断裂的控制，称为西域构造体系。这些深大断裂随着地槽褶皱带的形成和演变同时伴生，曾经历多次地壳运动，长期处于活动状态。

在盆地形成过程中，地槽褶皱带不断沿深大断裂隆起，如祁连山、昆仑山、天山、阿尔金山等，形成巨大的断块山脉，而在盆地内则堆积厚达数千米的陆相中、新生代地层。第三纪末，由于强烈的喜马拉雅运动，中、新生代地层在山前断拗带褶曲隆起，形成拗陷褶皱带，在地形上形成中低山组成的前山带；盆地中央也开始隆起，并有断、褶现象发生。从第四纪开始，在地槽褶皱带与山前拗陷褶皱带之间，产生第四纪山间断拗盆地，如祁连山中的昌马盆地，天山中的柴窝堡盆地，以及南疆的拜城盆地等。在前山带的前缘，受另一深大断裂控制而形成的第四纪山前断拗带，在近山地带构成深槽，向盆地中央逐渐变薄面尖灭，形成单斜式不对称拗陷盆地，在地形上形成广阔的、以戈壁景观为主的冲-洪积扇状平原。

由此可知，西北地区具有继承性的大型中、新生代盆地，主要受两条平行的深大断裂控制。一条是地槽褶皱带与山前拗陷褶皱带的分界线，也是中、新生代盆地的边界；另一条是山前拗陷褶皱带与第四纪山前断拗带的分界，也是第四纪断拗盆地的边界。由于长期受到近南北方向的强大压应力，大部分断裂属高角度逆冲断层性质，局部地区也出现逆掩断层。特别由于自南向北的推动力占有主导地位，造成盆地两侧的不对称现象。除上述主断裂以外，在强大压应力影响下，还产生一系列与主断裂相平行的次一级断层群，特别在山前带最为发育，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

形成在平原内由白垩系或第三系因断、褶作用而构成的低山带。在上述压应力影响下，还同时产生一组 NNW-SSE 向的断裂带，被称为河西构造体系。因此中、新生代盆地的骨架，以及在此基础上发展而成的第四纪盆地，主要就是上述西域构造体系与河西构造体系两组断裂相互切割的结果。上述强大的压应力及其所产生的水平运动和垂向运动，被认为是印度板块向北推动与欧亚板块相撞的结果。

河西走廊被认为是北祁连地槽褶皱带与阿拉善隆起区之间的过渡带，中、新生界沉积厚达 2000～6000m 左右；南深北浅，呈现地槽边缘山前拗陷的特征。第四纪山前断拗带被走廊中央断块山（龙首山、合黎山）所分割，形成南北两排南深北浅的第四纪不对称盆地。新构造运动在祁连山北麓前山带十分强烈，但向北逐渐衰减。第四纪山前断拗盆地，一般可划分为单列型和多列型两种类型。单列型为单一的单斜式不对称盆地，一般规模较大，南侧形成深槽，向北逐渐演变为平缓的斜坡，边界断层十分强烈，而北侧边界反方向的冲断层不太发育，有时第四系沉积逐渐尖灭。多列型单斜式盆地，为多排平行的单斜式盆地。例如河西走廊被中央块断山脉分割成南北两个断拗系统，不论南盆地或北盆地，均可被次一级的平行断裂所分割，因此有时可形成 3～4 排平行的同具一个方向的单斜式盆地。其中，走廊东部石羊河流域被分割为武威盆地和民勤盆地，或称南盆地和北盆地；走廊中部黑河流域自南向北分割为张掖盆地、临泽-高台盆地，以及黑河下游的额济纳盆地；走廊西部酒泉地区被分割成 3 排单斜式盆地，安西、敦煌地区被 NEE-SWW 方向的三危山分割成南北两个单斜式盆地。

值得注意的是，双列型单斜式盆地有时可演变为单列型盆地。例如酒泉地区被文殊山第三系背斜隆起分割成南北两个盆地。但文殊山背斜向东延展不远就倾没地下，使南北两个盆地合而为一。不过，与文殊山背斜相伴生的断裂带实际上仍然在地下延展，造成地面看不见的隐伏盆地。在文殊山西侧嘉峪关以北地段，可见由于断裂作用形成的翘起现象，成为半隐伏的地下盆地。上述现象在河西走廊较为普遍，在准噶尔等其它地区也能遇到。此类隐伏断层应用遥感图像进行识别，效果甚好。近东西向的断裂常被 NNW-SSE 或 NNE-SSW 向的断裂所切割，如酒泉盆地被分割为东盆地和西盆地。有时东西向之间被隐伏的第三系背斜隆起所分割，形成地下分水岭，分割为多个隐伏的地下水盆地。

准噶尔盆地和柴达木盆地都与河西走廊有相似之处。天山或昆仑山的第四纪山前断拗带，均以朝北的巨型单列型单斜式不对称盆地为主。例如准噶尔的乌鲁木齐地区，即为介于天山与阿尔泰山之间的一个巨型单斜式不对称盆地；天山前山褶皱带所形成的第四纪山间单斜式断拗盆地（如柴窝堡盆地）也十分发育。在石河子和奎屯一带的山前平原，可见雁行排列的第三系背斜隆起形成的低山带，使山前平原被分割成两个或多个隐伏的单斜式断拗盆地。但准噶尔北部即阿尔泰山南麓，主要为中、新生界隆起形成的低山丘陵，仅有属于前山褶皱带形成的小型第四纪单斜式山间盆地分布。柴达木第四纪盆地构造与准噶尔盆地较为接近。昆仑山前形成强烈的第四纪巨型单斜式断拗盆地，其前端往往出现中、晚更新世以来由于拗陷作用形成的湖泊，如达布逊湖。盆地北部形成中、新生界的隆起带，仅在阿尔金山的前山褶皱带断续分布小型的第四纪山间盆地，如大柴旦、小柴旦、马海和冷湖等。

塔里木盆地与上述各盆地有所不同，主要是位于昆仑山（包括阿尔金山）与天山两个强烈活动带之间，盆地规模巨大，基底相对较为稳定，地表大面积被沙漠覆盖，因此，对盆地中部的第四系结构了解较少。在塔克拉玛干沙漠西部的中间地段，分布一条近东西向的第三系背斜断褶隆起带（古董山），但延展到和田河即中断，不过这条控制隆起带的断层线，从地

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

形上看可能延展到克里雅河，因此盆地西部可能被这条隆起带分割成两个第四纪单斜式盆地。盆地中部据塔中油田最新的钻探资料，第四系砂层与亚粘土互层厚达300m以上，似为河流相沉积，因此古塔里木河可能是从盆地中央直接向东流入罗布泊。但由于第四纪以来昆仑山的强烈上升使古塔里木河逐渐向北迁移，特别是全新世以来塔里木河古河道向北迁徙十分明显。大沙漠东部从地形分析，存在一个圆丘状隆起，使车尔臣河在且末突然由向北转而向东，并环绕这一隆起与塔里木河的尾端流入同一个终端湖。这一隆起，可能形成地下水的分水岭，把盆地东部地下径流分割成南北两个流场。从总体上看，塔里木第四纪盆地是由南北两个在构造形式上接近对称的巨型单向断拗盆地联合组成，但中央隆起部位并未导致两者分割，而是使两者互相连接而形成一个统一体，即两侧均由冲-洪积层演变为冲积层，成为塔里木河的古河床。但盆地构造由于昆仑山与天山升降运动的强度有所差异，所以两侧断拗的程度和规模是不平衡的。

关于一般山间盆地，新构造运动均较强烈。盆地构造由于应力作用的不同，构造形式比较复杂多样。大致可分为3类：①单斜式不对称盆地，如柴窝堡西盆地；②中央隆起，两侧为对称的单斜式盆地，如天山大坂城；③中央拗陷，两侧为对称的单斜或多列型单斜式盆地，如塔城盆地。不论哪种类型，南侧一方新构造作用的强度均较北侧为大。

四、水资源与第四纪盆地系统

西北干旱地区水资源的分布，很大程度上受第四纪地质和新构造的控制。由于第四纪以来祁连山、天山、昆仑山等地槽褶皱带的强烈隆起，形成海拔4000～6000m的高山带，不仅冰雪资源丰富，降水也随高度增加而增加，形成强大的地表径流。因此，升降运动愈强烈的地段，水资源也相对较为丰沛，而且山前第四纪盆地的拗陷幅度和盆地规模也与新构造的强度成正比。

上述干旱地区的几个大型内陆盆地，其水资源普遍具有以下特征：

(1)山区地表径流量基本相当于山前盆地或几个盆地联合组成的盆地系统的总水资源。例如河西走廊山区的河川径流量约占全区总水资源的93%，反映平原地区降水等其它补给来源微不足道。根据多年水文资料记录，山区地表径流量由于得到冰雪资源的调节，自50年代以来多年平均流量基本保持稳定，但季节性变化和年际变化较大。

(2) 每一盆地水资源的分布和水文地质特征主要受第四纪地质条件的控制。第四纪堆积呈明显的分带性，在山前槽状断拗带堆积巨厚的洪积相卵、砾石层，形成山前扇状倾斜平原或称戈壁平原；洪积相粗颗粒沉积逐渐过渡到砂砾与亚砂土互层组成的冲-洪积或冲积层，形成地势平缓的冲积平原，由于该地段是主要耕地所在，或称绿洲平原；盆地基底由深槽逐渐变为平缓的斜坡，第四系也由厚变薄，冲积层逐渐过渡到冲-湖积或湖积相细颗粒堆积，形成以盐土为主的低平原，或称细土平原，第四系逐渐尖灭，或与第三系成断层接触。水文地质条件也相应呈现水平分带规律：戈壁带（地下水补给带）→绿洲带（地下水溢出带，形成泉集河）→低平原细土带（地下径流带）→低平原盐土带（蒸发排泄带）。地下水潜水位由深到浅，含水层由单层演变为多层，由潜水演变为潜水和承压水，富水性由强到弱，水质由淡水演变为微咸水或咸水。

(3) 地表水与地下水在盆地内相互重复转化。在天然状态下，自山区流入盆地的地表径

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

流，其中80%～90%在流经山前戈壁带时渗入地下，转化为地下水；在戈壁带前缘，60%～80%的地下水溢出地表，形成泉集河流入绿洲，成为绿洲的主要灌溉水源，另一部分形成地下径流流入低平原，并通过潜水蒸发排泄。在绿洲的灌溉用水一部分回渗地下，形成回归水，可重复利用。

（4）每条河流自上游至下游一般要流经2～3个相互连通，但被岩石峡谷分割的盆地，形成一个完整的水文系统，或称盆地系统。上游盆地的河流流入量经人为消耗以后，其剩余部分流入下游盆地，并重复由戈壁带→绿洲带→低平原带，最后流入终端湖，形成上、中、下游各盆地共同组成的水循环系统[2]。

（5）上、中、下游3个盆地由于新构造运动的差异性，其强度由强到弱，因此，盆地结构和水文地质特征也显著不同。上游盆地有时属山间盆地，新构造作用最强，山前戈壁带相对很宽，倾斜度很大，潜水位埋藏深；绿洲带相对很窄，地下水几乎全部在戈壁带溢出地表，转化为地表径流。中游盆地新构造作用较强，一般属山前断拗带所形成的主盆地，戈壁带、绿洲带及低平原带分布较宽，盆地规模较大，常被第三系断褶带分割成次一级盆地，或被隐伏断裂割切成隐伏盆地。山区河流90%左右渗入地下，绝大部分在戈壁带前缘溢出地表，形成泉集河。下游盆地新构造作用较弱，洪积扇发育较差，扇前溢出带泉流量相对较小，绿洲带的范围也相应较小；盐土平原则分布甚广，河流或地下径流最后流入封闭性的终端湖，成为全流域的主要排泄带。许多地区盐土平原形成地面粗糙不平的盐壳，或过渡到沙漠带。

综上的述，以河流为主导串联构成的盆地系统和水文系统[2]，其相互关系可用以下框图（图1）来表示。

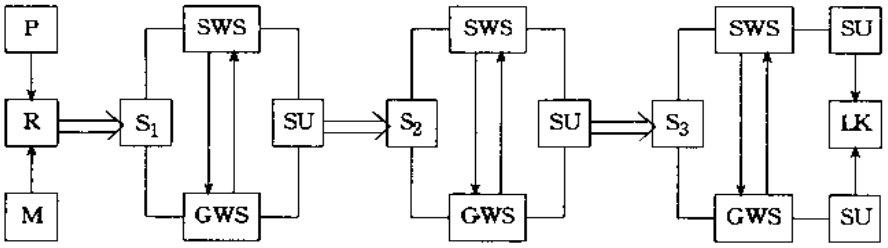


图1　上、中、下游盆地水文系统示意框图

P—降水；R—山区地表径流；M—冰雪融水；S_1，S_2，S_3—各盆地河流流入量；SWS—地表水系统；GWS—地下水系统；SU—余水量；LK—湖泊排泄量

根据上、中、下游各盆地水循环系统的差异，可用以下最简单的水均衡方程来表示

上游盆地　$W_1=G_1=SP_1$　　（1）

中游盆地　$W_2=G_2+S_2=SP_2+Z_2+E_2$　　（2）

下游盆地　$W_3=G_3+S_3=Z_3+E_3$　　（3）

式中　W_1，W_2，W_3——各盆地河流流入量（相当各盆地的水资源量）；

G_1，G_2，G_3——各盆地河流入渗补给量（相当各盆地地下水资源量）；

SP_1，SP_2——各盆地溢出带泉流量；

Z_2，Z_3——各盆地蒸发消耗量（包括地表水及潜水蒸发）；

E_2，E_3——各盆地水资源开发利用消耗量；

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

S_2，S_3 ——地表径流量。

上述由盆地系统构成的水文系统，实际上也代表一个水资源系统，其相互关系可用以下最简单的数学公式来表示

$$W_t=R=W_1+W_2+W_3 \tag{4}$$

$$W_1=W_t-(W_2+W_3) \tag{5}$$

$$W_2=W_t-(W_1+W_3) \tag{6}$$

$$W_3=W_t-(W_1+W_2) \tag{7}$$

式中 W ——全流域总水资源；

R ——山区河川径流量；

W_1，W_2，W_3 ——各盆地水资源量。

以上只是用最简单的方式来表达每个流域在天然状态下反映水文系统或水资源系统的一个概念模型。虽然实际情况要复杂得多，但可以看出，西北干旱区新构造运动，对第四纪盆地的水文系统和水资源的控制作用，及其对水资源的合理开发利用具有何等重要的意义。

五、结 语

西北干旱区水资源的分布，很大程度上受第四纪盆地的盆地构造和盆地系统的控制。盆地构造又主要受新构造作用的制约，由于新构造运动的差异性，导致盆地结构所出现的各种不同的构造模式直接影响水文系统和水循环系统的运行机制。因此，进一步深入研究第四纪盆地构造和盆地系统，对合理开发利用干旱区水资源具有重要意义。

干旱区水资源的重要特征之一是，山区河川径流量基本代表全流域的总水资源；由河流串联而形成的盆地系统，也是一个统一的水资源系统。因此，上、中、下游之间和农业、工业及城市生活用水，必须实行水资源的合理分配和科学管理，协调好水资源开发与生态环境和国民经济持续发展之间的关系，防止生态环境恶化。地表水与地下水是相互转化、不可分割的一个整体，必须充分利用两者相互转化的特点，统一规划，联合调度，综合开发，合理利用。农业灌溉用水实行泉灌、河灌、渠灌、井灌相结合的方针，因地制宜，建立合理的灌溉系统。严格控制修建地表水库，充分利用山前戈壁带天然地下水库的调节作用。

西北广阔的巨型内陆盆地虽属典型的干旱、沙漠地区，但盆地周边高山地带降水和冰雪资源丰沛，全部转化为地表径流进入盆地。如河西走廊水资源人均可达 1 590m³，亩均 658m³，新疆人均可达 6 000m³，均远远超出华北地区。因此，当前不存在水资源紧缺的问题，相反具有巨大的节水潜力。应把树立节水意识，建立高效节水型农业，提高水资源的利用率作为缓解水资源供需矛盾的主要措施。

西北干旱地区是生态环境严重脆弱地区，水是维护荒漠绿洲生态系统的决定因素和基本条件。但长期以来，水资源的开发利用未能充分考虑干旱地区水资源的特点和自然界的客观规律，严重影响这一地区的生态平衡，使水环境严重恶化，造成泉水枯竭、河流断流、湖泊干涸、水位下降、水质恶化、植被死亡、绿洲萎缩、耕地撂荒，生态环境严重恶化，已成为西北大片土地急剧沙漠化、荒漠化的主要原因。因此，如何采取紧急措施，协调好水资源开发与环境及国民经济可持续发展之间的关系，已是摆在科学工作者面前的一项紧迫任务。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

沿海地区海平面上升与地质环境

关于海平面上升及其环境效应

一、引　言

我国海岸线长达 18000 多 km，是全球海岸线最长的国家之一。整个海岸线大体以杭州湾为分界，北方以沉降带形成的平原海岸为主，如辽河、滦河、海河、黄河等三角洲平原，交错分布山地丘陵海岸；南方则以隆起带形成的山地丘陵海岸为主，岸线曲折，岸内海湾成为泥沙堆积场所，同时也分布诸如闽江、珠江等大河形成的三角洲平原海岸。

沿海地区交通方便，人口稠密，全国 70%以上的大中城市和 55%的国民生产总值集中在这里，是我国社会经济最发达地区。特别是实行改革、开放以来，工农业生产和交通运输、旅游等各项事业都得到空前发展，许多新、老城市相继被确定为特区或开放城市，使沿海地区成为带动全国经济发展的基地。

我国沿海地质环境复杂多变。近年来随着沿海经济的迅速发展和海洋资源的大规模开发，地质环境遭到日益严重的破坏。在自然条件和人类活动的综合作用下，各类地质灾害频繁发生；特别是由于温室效应引起的海平面上升，将会给沿海地区的自然环境演变和社会经济发展带来一系列不利影响，成为沿海地区实现可持续发展战略所面临的一个重大环境问题，倍受国内外有关各方的关注。因此加强研究海平面上升的主导因素、发展趋势及其对生态环境的影响，以及应采取的相应对策，已是当前一项不容忽视的重大课题。

二、海平面上升的原因分析与趋势预测

海平面的升降现象，实质上是第四纪以来，特别是全新世以来，海侵活动与地壳升降活动相互作用的结果，即海面升降与陆地升降的综合反映。因此海平面的升降活动，应该说属于自然界的一种正常的地质现象[1]。

第四纪以来，由于古气候的冷暖演变（主要反映在冰川活动，如冰期与间冰期的交迭出现），相对应地多次发生海进、海退现象，反映了海平面的多次升降活动。关于最近 18000 年以来，即最近一次大冰期以来的海平面变化，过去曾有许多争议，但有两个阶段较为明确，即 18000～6000 年，海平面持续上升，恢复冰期以前的情况；距今 6000 年到现在，海平面基本稳定。在此期间，海平面主要受地方性因素的控制，如新构造运动、地面沉降、地壳均衡上升、沉积物输入海洋的变化等。我国全新世海平面变化的主要结论是：6000 年以前海面迅速

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

上升，6000～5000 年达到海面最高阶段，5000 年以来，海面仅有多次小的波动，从相对稳定到逐渐退落[2]。

近百年来，由于工业的发展导致大气 CO_2 等气体浓度的增高，造成“温室效应”，并导致地球暖化，气温明显上升，极地冰雪融化，发生全球性海平面的上升。有些学者通过模拟研究，认为如果 CO_2 排放量增加一倍，全球平均温度将会增加 2～4℃。如果按照现在 CO_2 的排放速度，50 年后全球温度将升高 1.5～4.5℃，海平面将上升 20～140cm。据英国气象局模拟研究结果，未来 70 年里，地球气温将上升 1.5℃，海平面将上升 0.6m。有的学者认为全球变暖具有突变性质，经模拟在未来 30 年内将增高 5℃。还有的学者如 H. A Viles 预测海平面将上升 1.40～2.17m。另一学者默塞尔预测上升 5m 左右[3]。由于各家观点或出发点不同，预测结果所存在的差异比较大，其不确定性也很大。最近国际上对下世纪全球海平面上升值的估计，一般采用低值、即 50cm (IGBP) 或 60m (VNESCO)。据权威性的国际气象组织 IPCC1990 年所拟方案，2100 年全球海平面上升值最高估计为 110cm，最低估计为 31cm，最佳估计为 66cm。据最佳估计按时段计算，全球海平面上升值在 2030 年为 18cm，2070 年为 44cm，2100 年为 66cm，即全球海平面平均上升率 1990～2330 年为 4.5mm/a，2031～2070 年为 6.5mm/a，2071～2100 年为 7.3mm/a[2]。1995 年 12 月在罗马召开的联合国气候变化专业委员会第 11 届全球会议上，来自 120 多个国家的近 200 名代表经过讨论后，通过了一份《1995 年全球气候变化科学评估报告》。报告指出：由于人类活动的影响，特别是大量使用煤、石油等化石燃料，造成二氧化碳、甲烷和氮氧化合物等“温室气体”增加，全球气温自上世纪末以来已增加 0.3～0.6℃。由于冰川融化和海水受热膨胀，海平面已经上升 10～25cm。如果对“温室气体”的排放不加控制，那么下个世纪将成为全球变暖速度最快的一个世纪，到 2100 年各地气温将再升高 1～3.5℃，平均将升高 2℃左右，海平面将再升高 15～90cm，全球平均为 50cm 左右。全球气候变暖还将导致森林面积缩小，荒漠化地区扩大等结果，影响人类社会经济发展。

以上所列数据，主要是在分析温室效应的基础上，对全球海平面上升所作出的估计。所以上述海平面的变化，是指绝对海平面而言，即未考虑地区差异，也未考虑人为作用的影响。每一地区实际海平面的变化，应该是全球海平面上升值，加上当地陆地上升或下降值之和，称为相对海平面。例如我国平原海岸不仅存在构造沉降，还有由于过量开采地下水所造成的地面沉降，其相对变化幅度，远远大于绝对海平面的上升幅度。所以联合国教科文组织指出：研究海平面的变化，必须包括海面和陆面的变化，即进行相对海平面的研究，因为它在评估海平面上升对人类社会的影响，比理论海平面更具实际意义[2]。

由此可知，影响海平面变化的因素十分复杂。除因气候暖化、极地冰雪融解，造成水体体积增大外，海洋水温每增加 0.1℃，海平面由于水体膨胀即可上升 8cm。此外，海洋环流、陆地河流、泥沙入海量、气候变化（包括气压、风场等）、太阳黑子活动、火山活动、大气环流以及洋盆由于板块活动引起的容积变化，都能对海平面的变化造成不同程度的影响[4]。陆地陆面的变化，主要包括天然的地壳构造下沉（第四纪沉降运动）与人类活动，如过量开采地下水或开采石油等原因造成的地面沉降等（图 1）。

全球大多数地区海平面相对上升幅度都不同程度受到陆地升降的影响。河北平原中、上更新世以来，共沉积四层海相沉积层，按其埋藏深度计算，下沉率平均约 1.0～1.3mm/a，根据有关资料，广州地区构造沉降量为 2～6mm/a，天津地区的构造沉降量为 1.7～2.3mm/a，成为计算海平面相对上升幅度的一个重要叠加值。上海天文台佘山基线观测站，近 7 年来与

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

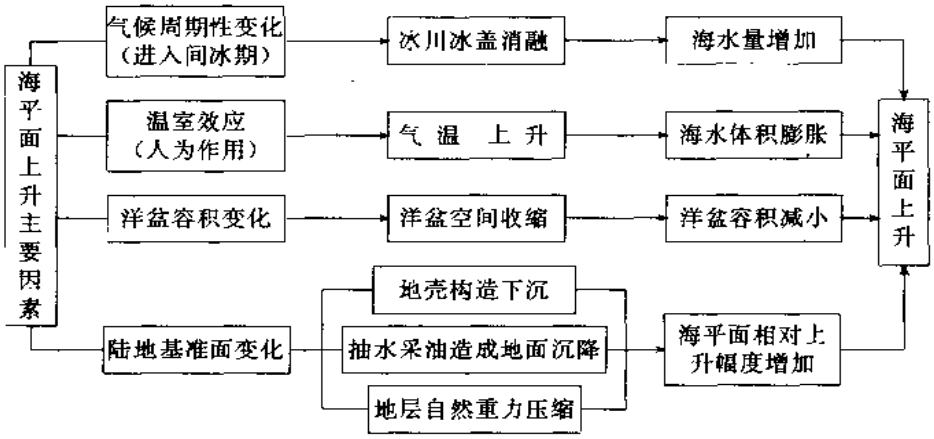


图1 海平面上升的影响因素及其形成机制框图

国际合作联测，发现该站地壳正以 1mm/a 的速率呈现下沉趋势。若从 1990 年算起，在 2010、2030 和 2050 年对上海地区的地壳作下沉趋势的预测，估计分别为 2cm、4cm 和 6cm。他们采用小波函数分析法建立了海平面变化的模型，并用跳步时间序列模型进行了预测，获得了上海海平面未来上升的趋势。从 1990 年算起，在 2010、2030 和 2050 年代的平均预测估计，分别为 4cm、6cm 和 9cm，而相对海平面上升量，分别为 18cm、30cm 和 40cm。若考虑到“年际”和“10 年”尺度的起伏变化，海平面上升的最大可能估计，分别为 15cm、18cm 和 22cm；而地面相对海平面的变化，分别为 29cm、42cm 和 53cm。

上海、天津等城市，由于过量开采地下水所造成的地面沉降，其最大累积沉降量均达到 260cm 左右，成为评估相对海平面上升幅度的一个主导因素。例如天津市区如果地面沉降率控制在 6mm/a 左右，预计到 2050 年相对海平面上升的幅度为 50～60cm。如果年沉降率只能控制在 10mm/a 左右，那么到 2050 年相对海平面上升幅度可能达到 80～90cm。1992 年中科院地学部组织考察组，对沿海地区海平面上升问题进行了专门考察，并根据国内外有关资料的综合分析，对我国沿海三大三角洲地区，到 2050 年海平面可能达到的上升幅度，作出如下初步的综合评估[5]：珠江三角洲地区海平面上升幅度为 50～60cm；长江三角洲地区，海平面上升幅度为 60～80cm；天津地区海平面上升幅度为 70～90cm。根据上述估算，从全国范围来看，海平面上升幅度大致在 0.5～1m 之间。但由于非确定性因素太多，在目前还很难作出更精确的预测。例如 CO_2 的排放量或城市地下水的开采量，都很难实行人工控制，而这些因素都直接或间接影响海平面的上升幅度。尽管如此，以上几种不同的估算结果，基本上都比较接近，而且可能还是属于比较保守的看法。任美锷[2]所列出的黄河、长江及珠江三角洲过去 30 年的相对海平面上升值和 2050 年最可能的相对海平面上升值（表 1），具有较大的参考价值。其中现代黄河三角洲与珠江三角洲的地面沉降率主要为构造沉降值；长江三角洲与老黄河三角洲的地面沉降率则包括构造沉降及抽取地下水造成的地面沉降等人为因素。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 1　老黄河三角洲、现代黄河三角洲、长江三角洲和珠江三角洲相对海平面上升率

1956～1985 年					2050 年（1991～2050 累计）				
地　区	理论海平面上升率 mm·a^{-1}	地　面沉降率 mm·a^{-1}	相对海平面上升率 mm·a^{-1}	海平面上升估计值 mm	地　区	理论海平面上升率 mm·a^{-1}	地　面沉降率 mm·a^{-1}	相对海平面上升率 mm·a^{-1}	海平面上升估计值 mm
老黄河三角洲	1.5	23	24.5		老黄河三角洲	3.3～5	10	13.3～15	70～90
现代黄河三角洲	1.5	3～4	4.5～5.5		现代黄河三角洲	3.3～5	3～4	6.3～9	40～55
长　江三角洲	1.5	5～10	6.5～11.5		长　江三角洲	3.3～5	3～5	6.3～10	50～70
珠　江三角洲	1.5	1～1.5	2.5～3.0		珠　江三角洲	3.3～5	1～1.5	4.3～6.5	40～60

三、海平面上升对沿海地区地质环境的影响

地球表面的自然环境，是人类赖以生存和发展的物质条件，即客观的物质世界或自然界。它主要包括地质环境、气候环境、土地环境、水环境和生态环境，形成一个统一的相互联系、相互依赖又相互制约、相互作用的完整体系。地质环境是自然环境系统中，影响人类生存与发展最重要的一个组成部分，即人类生活与活动的场所。地质环境是由地壳组成的物质、地质结构和动力作用共同组成的一个复杂系统[3]，主要包括地层、岩石、地质构造和地貌、地质资源等子系统。上述各子系统是确定岩石或土层的物理力学性质、地基或坡面的稳定性、含水体的分布和储水性能、地震与火山活动、地壳升降运动以及成矿作用等的基础条件，并主要反映在水文地质、工程地质环境与成矿环境等方面。地质资源除金属、非金属、石油、天然气等矿产资源外，还包括水资源、矿水资源、地热资源、建材资源以及旅游资源等，是属于自然资源中的重要组成部分。

沿海地区的环境地质特征，主要表现为：平原海岸海陆交叠相淤泥质软土普遍分布，对建筑地基不利；岩石风化壳发育，风化带的厚度可达 10～50m，是造成山坡坍塌、水土流失等地质灾害的主要原因；碳酸盐岩分布甚广，岩溶发育，岩溶塌陷、矿坑突水等地质灾害十分普遍；升降运动是控制海岸淤积或海岸侵蚀的主导因素，上升海岸受海浪、海潮的强烈冲涮，出现明显的蚀退现象；河口三角洲沉降平原，海岸不断淤涨扩大，如黄河三角洲以 2～3km/a 的速度向前伸展；平原海岸经常受到风暴潮及洪涝灾害的威胁；区域稳定性主要受活动断裂的控制，许多沿海城市存在地震活动；地下水咸淡交错、水质复杂，许多城市由于超量开采地下水造成海水入侵或地面沉降；矿水、热水同样出现严重超采现象；沿海石油、天然气、盐田资源等的开发导致水质污染；开山填海或大量开采石材，严重破坏沿海地区的生态环境。

如上所述，地质环境与自然环境相互作用，又受人类活动的影响，通过人类的各种活动，与社会经济系统发生紧密联系。所以人类所处的环境，可分为自然环境与社会环境两大类。人类通过科学技术，可以改善自然环境，同时也可破坏自然环境，对人类造成灾害。例如由于工业的发展，大量燃烧石油、煤炭，使大气层中 CO_2 等气体浓度增高，形成全球性“温室效应”，影响气候环境。气候变暖又导致极地冰盖融解、海平面上升，对沿海地区造成威胁。海

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

平面上升除气候因素外，可能同时存在地壳构造下沉与地面沉降的人为叠加等因素。由此可见，地质环境变化在天然因素与人为作用的交叉影响下，是多么错综复杂。

社会经济系统或称人工系统，主要包括城市系统、乡镇系统、工业系统、农业系统及交通运输系统等。沿海地区由于国民经济的迅速发展，新兴城镇不断扩大，城市人口日益增长，工业厂矿或乡镇企业如雨后春笋，交通运输业如铁路、公路、机场、海港、码头等建设日新月异。人类活动的加剧，使各类地质灾害频繁发生，地质环境问题日益突出，引起各方关注。如由于各类工程建设造成的滑坡、崩塌、地基沉陷、矿坑突水、坑道塌落等地质灾害；由于水资源过量开采造成的地面沉降、岩溶塌陷、地裂缝、海水入侵、水质恶化、名泉涸竭等现象；由于农业活动造成的农药化肥对土壤、水体的污染、山坡植被破坏导致水土流失，围海、围湖造成河道、港口淤积，洪涝灾害加剧，由于三废的不合理排放，造成环境污染，等等。

近 10 年来，由于温室效应引发的海平面上升，又成为全球性重大环境问题之一，使沿海地区原已存在的复杂的环境地质问题进一步激化，对人民生活和经济发展造成严重威胁。海平面上升对地质环境的影响，主要包括以下五方面（图 2）。

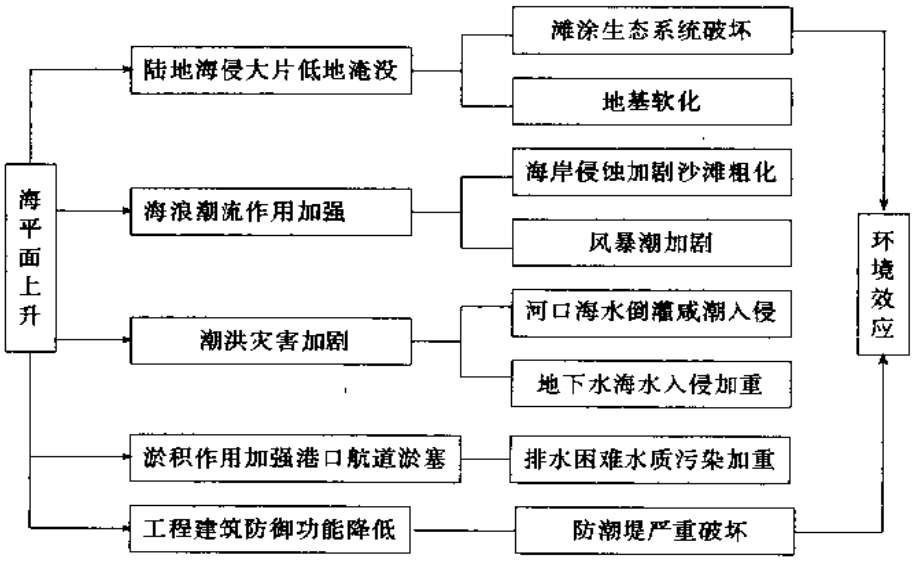


图 2　海平面上升环境效应框图

1. 陆地海侵、大片低地淹没

海平面上升首先使沿海大片低洼地区被淹没。据估计[6]，海平面上升 100cm，长江三角洲海拔 2m 以下的 1500km² 低洼地将受严重影响或淹没；珠江三角洲估算海平面上升 70cm，海拔低于 0.4m 的低地 1500km² 将全部淹没；渤海湾西岸海平面上升 30cm，估算淹没损失面积将达 10000km²，天津市被淹地区将占全市面积的 44%。我国沿海滩涂面积五千多万亩，海平面上升，滩涂地带首当其冲；海平面上升 0.5m，潮滩将损失 24%～34%，如上升 1m 损失 44%～56%，使低潮滩转化成潮下滩，生态环境恶化，生态方面的损失将比潮滩面积减小更为严重。大片低地受海水浸没会导致地下水水位上升，水质变咸，地基软化，对沿海地区建筑物造成威胁。北方地区会导致土壤盐渍化加重。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

2. 海浪潮流作用加强、风暴潮加剧

海平面上升使水深和潮差加大，海浪和潮流作用随之加强。据计算，潮位上升 1cm，潮差将增加 0.34～0.69cm；水深增加一倍，海浪作用强度增加 5.6 倍，结果必然使沉积物变粗，高潮滩变窄。北戴河等海滨游览胜地，已出现沙滩沙粒粗化现象，影响旅游事业的发展。我国沿海海岸侵蚀作用呈明显加剧发展趋势，据长江三角洲海岸对侵蚀速率的实测结果，与应用 Bruun 定律计算的海平面上升引起的海岸侵蚀速率对比，认为海平面上升是导致区域海岸蚀退的重要因素之一。其影响将随上升幅度的增加而增大。如果海平面上升 60cm，其比重将上升到 35%～40%。海平面上升，风暴潮的强度和频率都会随之增加。近几十年来，我国沿海风暴潮灾呈明显的增加趋势，所造成的损失也随之逐年增加。据统计，50～60 年代平均每年损失 1 亿元，70 年代上升到 2～4 亿元，80 年代 3～5 亿元，而 1989 年一年就损失 5 亿元。1992 年 9 月 1 日黄河三角洲东营沿海地区遇到的特大风暴潮，使胜利油田两千多口油井被淹停产，造成经济上的严重损失。据估算，渤海湾西岸相对海平面上升 90cm，将导致现状百年一遇风暴潮变为 20 年一遇；而在长江口或珠江口岸段，相对海平面上升 50cm，将使现状百年一遇的风暴潮变为 10 年一遇。

3. 潮洪灾害加剧、咸潮入侵

海平面上升使闸下潮位抬升，潮流顶托作用加强，导致沿海涵闸排水能力下降，从而使沿海低洼地洪涝灾害加重。海平面上升并使河口海水倒灌，咸潮入侵。据预测，上海海平面上升 50cm 时，长江口沿江河水的含盐量，全年将有 2000 小时超过饮用水标准。咸水入侵的距离，在枯季将比现状增加 6.5km，因而将严重威胁宝钢水库和陈行水库两个重要水源地。珠江三角洲据计算海平面上升 40～100cm，各海区 0.3‰等盐度线入侵距离，将普遍增加 3km 左右。河口海水入侵地段以及潮洪泛滥地区，同时会导致地下水咸化，使水质变坏。北方许多沿海城市如大连、秦皇岛、莱州市等，由于过量开采地下水而导致海水入侵，严重破坏了淡水资源。海平面上升将会增进海水入侵速度，扩大入侵范围，加重所造成的灾害。

4. 河口淤积作用加强

海平面上升使河流侵蚀基准面抬高，加强了河流下游的淤积作用，使河床相应抬高，不仅增加洪涝灾害的危险，而且造成河道淤塞，严重影响航道、海港的正常运行。黄埔至虎门航道，年均淤积量达 20 万 m^3，而海平面上升将使河道淤积更趋严重。上海吴淞口宽约 40km 的拦门沙，水深仅 6m 左右，每年清淤量达 2000 万 m^3，严重影响通航能力。据预测，如果海平面上升 0.5m，拦门沙可能内移 1km，其危害程度也将更为扩大。河道淤塞导致河道水位抬高，在潮流顶托的双重影响下，河流自排时间缩短，排水速度减缓，不仅洪涝威胁加大，而且由于排水不畅使城镇污水排放困难，甚至倒灌，造成河网内水域污染扩大、加重，使供水水质恶化，直接威胁供水水源地。

5. 工程建筑防御功能降低

海平面上升直接使沿海许多防御工程以及其它各种建筑物的防卫功能大大降低。例如由于海平面上升，使原来修建的堤围及海堤的设计标准降级，急需重新调整设计，加强防御能力，以避免不必要的损失。例如上海外滩为保证安全，防洪墙高程按千年一遇标准修建，但相对海平面如上升 0.5m，则堤防标准将降为百年一遇，抗灾能力将显著降低。上海老港区码头标高都在 5.8m 左右，海平面上升会造成受风暴潮淹没次数的增加，受淹港区扩大，港区功能将逐渐衰退，愈来愈不能适应上海经济发展的需要。海平面上升使桥闸净空减小，将严重

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

影响河流运行通道的功能。有些深水港由于淤积影响而减低了水深，不能发挥深水港的作用。山东东营附近海岸，由于海堤修建标准较低，在1992年的一次特大风暴潮中被冲毁，使胜利油田全部淹没。天津海河挡潮闸建闸30多年来，已累计沉降1.05m，闸门高度已失去挡潮功能。150km海堤标高在4.0～5.5m之间，只达到10～20年一遇的防御标准，显然缺乏抗灾能力。塘沽老码头标高已较原设计标准降低0.5～0.8m，已降到历史最高潮位以下1m左右，1992年的风暴潮造成重大损失。目前沿海地区在一片大好形势下，许多新的公路、铁路、海港、码头、机场、厂矿，以及城市建筑等，正在规划设计或正在兴建之中，如果不考虑海平面上升因素，提高设计标准，那么其后果将是不堪设想的。

四、结　论

引起海平面上升的原因十分复杂，其中由于工业发展而产生的大量CO_2等“温室气体”，是造成温室效应并导致气候暖化、引发海平面上升的主导因素。沿海三角洲平原由于地质作用造成的地壳下沉与人为作用，即地下水开采所造成的地面沉降，使海平面上升问题更加复杂化。特别是人为作用造成的地面沉降，其下降幅度远远大于海平面的上升率，成为相对海平面上升幅度中的主要因素。因此预测相对海平面的上升变化，比评估理论每平面的上升值更具现实意义。

现阶段要控制全球各种温室气体的排放，还存在很大困难，但要控制局部地区如沿海城市的地面沉降，则相对较易办到。因此加强沿海城市地面沉降的防治，对减轻海平面上升所造成的灾害，具有重要现实意义。目前沿海地区在自然环境剧烈演变与人类经济活动日益加强的双重影响下，已出现地质环境日益恶化、地质灾害日趋严重的不利趋势，特别是海平面上升问题，使上述现象更趋激化。为了国民经济可持续发展，如何应用现代科学技术，协调好经济发展与生态环境之间的关系，减轻海平面上升所造成的危害，使其向良性循环发展，已成为地质工作者当前一项迫切任务。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

关于海平面上升与控制城市地面沉降

一、海平面上升与地面沉降

近百年来，气候变暖，全球海平面显著上升，其上升速率为每年1～2mm。验潮站资料表明，近几十年来海平面年平均上升速度约为1.5mm/a，与全球平均上升速度相接近。但各地区相对海平面升降幅度和速率却有很大差异，地面沉降往往在相对海平面上升中占重要地位，有的甚至占主导地位。所以研究沿海地区地面沉降问题，对评估和预测区域相对海平面上升值，具有特殊重要意义。

为了减轻沿海城市相对海平面上升可能造成的灾害，控制地面沉降是必须采取的一项重大措施。要控制地面沉降，就必须控制开采地下水，这就涉及到整个地区水资源的合理开发利用问题。上海、天津两市的地面沉降最为突出。本文将以上海、天津两市的地面沉降问题为重点，探讨水资源的合理开发利用与有关对策。

二、上海地面沉降对相对海平面上升率的影响

地面沉降是沿海地区由于超量开采地下水所引起，上海的地面沉降在全国具有代表性，同时也是该地相对海平面上升的主要组成部分。上海市从1949年至1963年，随着城市发展，地下水的年开采量，由0.90亿m^3/a增加到2亿m^3/a，地下水位下降至标高－30m，地面年沉降量从3.5cm增加到11.0cm，最大累积沉降量达263cm。上海市平均海拔约为1.8～3.5m，最低处只0.91m，市中心地面平均标高，已低于苏州河口平均潮位2.12m。自60年代以来，由于采取了压缩用水、调整开采层和人工回灌等综合措施，市区地面沉降基本得到控制，但郊区年均沉降量仍达1～2cm。1962年8月防汛墙决口，半个市区被淹，据不完全统计，直接经济损失就达5亿元。

上海市环境地质站，根据1956～1983年黄浦江沿岸不同阶段的沉降变化（表1），采用

表1　黄浦江沿岸不同阶段的沉降变化

位置	各阶段年沉降速率/mm·a^{-1}							
	1956～1961		1961～1965		1965～1976		1976～1983	
	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大
内岸	69.1	151.8	58.3	99.3	2.5	9.9	5.3	13.6
外岸	79.1	154.2	61.3	123	1.3	13.3	4.6	9.6

趋势外推方法，对黄浦江两岸地面到2000、2080、2180年的沉降值，分别进行了预测（表2）。以上对地面沉降的预测，主要是以下列三条原则为基础的：①地下水的采灌量保持目前的水平；②以1976～1983年间的年平均沉降速率及最大年沉降速率为依据；③对1900年后至2000、2080、2180年各阶段的土层残余变形量，均按20%递减计算[1]。所以如果地面沉降

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

得不到控制，那么沉降量必然就会相应的增加，海平面的相对上升幅度，也将随沉降量的增加而增加。

表 2　黄浦江沿岸地面沉降的预测结果

位置	地面沉降预测值/mm					
	2000		2080		2180	
	年平均	阶段累计	年平均	阶段累计	年平均	阶段累计
内岸	4.5	90.1	3.8	306.0	3.2	323.0
外岸	3.9	78.2	3.3	265.2	2.8	280.5

三、上海水资源的基本情况与合理利用

1. 上海水资源的基本情况

上海市位处黄浦江滨，境内河网密布，水资源十分丰富。地表水主要包括三个组成部分：①当地径流量，多年平均为 18.6 亿 m^3/a；②太湖流域来水量，多年平均为 100.2 亿 m^3/a；③潮水量，多年平均为 474.7 亿 m^3/a。以上总计 593.5 亿 m^3/a（表 3）。

表 3　上海地表水资源表（单位：$10^8 m^3/a$）

水资源 / 保证率及多年平均	水资源总量	本地径流量	上游来水量	潮水量
20%（偏丰年）	657.2	25.7	128.3	503.2
50%（平水年）	588.1	17.2	96.2	474.7
75%（偏枯年）	538.1	11.9	75.2	451.0
95%（枯水年）	478.9	6.3	50.1	422.5
多年平均	593.5	18.6	100.2	474.7

据 1873～1981 年资料。

地下水主要包括潜水与承压水两部分。潜水的天然资源为 17 亿 m^3/a，以淡水为主，滨海地区分布微咸水。潜水的开采资源为 6.9 亿 m^3/a，其中淡水为 4.5 亿 m^3/a。除第 1 层潜水含水层外，第 2、3、4、5 四层含水层均为承压水，总开采资源为 5.71 亿 m^3/a，其中淡水为年均 2.07 亿 m^3/a，占总开采资源的 31%，微咸水 1.21 亿 m^3/a（21.1%），半咸水 2.43 亿 m^3/a（42.6%）。以上潮水与承压水的可利用淡水资源，分别为 4.5 亿 m^3/a 与 2.07 亿 m^3/a，总计数淡水资源共为 6.57 亿 m^3/a[2]。

表 4　上海承压地下水开采资源情况表（单位：$10^8 m^3/a$）

含水层	淡水	微咸水	半咸-咸水	总　计
Ⅰ	0.43	0.84	1.37	2.64
Ⅱ	0.47	0.18	1.00	1.65
Ⅳ	0.96	0.66	0.05	1.07
Ⅴ	0.21	0.13	0.01	0.35
总计	2.07	1.21	2.43	5.71

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

由此可见，地表水的总资源为593.5亿 m^3/a，而地下淡水资源仅为6.57亿 m^3/a，两者相差悬殊；因此上海市应以开发地表水作为主要供水水源，是理所当然的。目前工业用水为42.08亿 m^3/a，其中地下水为1.13亿 m^3/a。农业用水28.76亿 m^3/a；生活用水4.97亿 m^3/a，其中市区占3.49亿 m^3/a，均以利用地表水为主。以上总计75.81亿 m^3/a，其中工业用水占56%，可见工业用水在全部用水量中占主导地位（表5）。

表5　上海工、农业及生活用水一览表（单位：$10^6m^3/a$）

工业用水		农业用水	生活用水	
地表水	地下水	地表水	市　区	乡　镇
49.95	1.13	28.76	3.49	1.48
42.08			4.97	
56%		38%	6%	

上海2000年工业、农业及生活用的需水量，根据工业与城市发展规划进行的预测，分别为63.05、52.28及9.16亿 m^3/a，总计为124.49亿 m^3/a。从上海水资源条件看，是应该可以满足上述预测的需水的。

既然上海市水资源十分丰富，而且能满足2000年国民经济规划需要，那么为什么又会出现水资源紧张的现象呢？甚至上海已被列为我国严重缺水城市之一。这主要有两个方面的原因，一是地表水严重污染，对水资源造成巨大破坏；二是工业过度集中，随着工业的发展，需水量不断增长，地下水过量开采，导致地面沉降。

2. 关于上海地表水的污染问题

由于上海历来以黄浦江作为主要供水水源，全市自备水厂综合能力约500万 m^3，绝大部分的工业用水、生活饮用水仅占10万 m^3/d 左右。但自60年代以来，一方面自黄浦江取水，而一方面又向黄浦江大量排污，每天排入的工业废水与生活污水达1000万 m^3 以上，其中80%～90%未经处理，直接排入太湖流域的河道，其水质普遍降到三级以下。据1987年资料，黄浦江全长113.4km，其中水质不合格江段就达45.9km，水质污染日趋严重。近年来黄浦江黑臭期（污染指标>5）已达138～229天，在58条支流中，53条受到不同程度的污染，7条全年黑臭。据1984年的统计资料，在排入的废水中，可称五毒（酚、氰、铬、砷、汞）具全，对人体危害甚大（表6）。在黄浦江中测出的有机污染达218种，其中经常出现的59种，属于致癌、致畸，并超标的约51种。某水厂自来水通过Ames试验表明，致突变阳性率达79.2%，上海癌症发病率和死亡率均出现迅速上升的趋势，发病率之高，已占全国首位，显然是与饮用水的水质不良密切相关的。

表6　上海废水有毒物质排放量统计表（单位：t/a）

酚	氰化物	砷	汞	六价铬	石油类	硫化物	排放去向
308.31	99.99	5.52	0.034	79.40	3 898.33	1 423.64	苏州河 黄浦江 长　江

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

由于黄浦江水严重污染，对上海市的正常供水造成巨大威胁，近年来不得不改自黄浦江上游引水，虽水质有所改善，但仍存在污染问题需要解决。目前还考虑太浦河的引水工程，并正在徐六泾附近建立长江水源地。但徐六泾上游约 30km 的南通市，每年排入长江口的工业废水达 4.23 亿 m^3，相当每天 115.34 万 m^3，如果排污问题得不到解决，那么仍然会对长江水源地造成严重不利影响。

3. 解决饮用水问题的主要途径——分质供水

由于地表水的严重污染，使饮用水源受到威胁，而且也影响到部分地区的潜水及浅部承压水受到污染。但一般说，地下水的水质是比较好的，特别是第Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ各层，基本上还未受到污染的影响。过去农民主要以地表水作为饮用水源，现在已普遍实行“改水”，至少已有一半以上的地区改用地下水。而城区市民的饮用水，却仍然是用受过污染的地表水，形成“机器吃好水，市民吃坏水”的怪现象。究其原因，这主要是历史条件造成的，过去黄浦江水不存在严重的污染问题，作为供水水源是理所当然的；而工业用水历来开采地下水，则主要是取其能源，作为冷却降温之用[2]。现在情况发生了很大变化，那么上述的不正常状态，是否可以得到纠正呢？答案是肯定的。

要扭转上述情况，在市区同样要采取改水的措施，即饮用水改地表水为地下水，并采取分质供水、分散供水和按不同用途供水的相应措施。巴黎早在 19 世纪末，就建成饮用水和非饮用水的双重供水系统，优质优用；日本的大城市多数建有生活用水、工业用水及杂用水的分质供水系统。上海地下淡水的可采资源为 6.57 亿 m^3/a，承压水 2.07m^3/a；全市地下水开采量，据 1988 年统计为 2.98 亿 m^3/a。其中潜水约 1.80 亿 m^3/a，主要为农村生活用水，承压水 1.13 亿 m^3/a，其中市区 0.13 亿 m^3/a，主要用于工业生产空调、冷却；效区 1.05 亿 m^3，用于工业及生活用水。所以潜水和承压水还分别有 2.70 亿 m^3/a 和 0.94 亿 m^3/a 的潜力可供利用（表 7），总计为 3.64 亿 m^3/a。如果每人每日饮用水按 19 公升计，那么上海的地下水，完全可满足全市市民需要（表 8）。其中市区所需饮用水仅为 4 924 万 m^3/a，因此开采水质较好的承压水，就能满足市民饮用水的需要[2]。

采取分质供水的主要困难，是需要两套输水管道系统，这在短时期内是很难实现的，特别在地下管网密布的市区更为困难。考虑到黄浦江的污染问题，决非短期内可以得到完全治理，所以为了早日解决喝好水的问题，只有采取一种过渡时期的办法，即凡新开发区，在规划阶段就要考虑设计双重输水管网，实行分质供水，优质优用；而在旧市区可先采取分散供应的办法，即建立专门供应优质水的供水站，形成供水网点系统。在条件许可的地区，也建若干供水管道。例如在一个里弄内，可建若干个供水点，使市区居民最大限度地普遍饮用到卫生保健优质地下水。沪西中山公园附近，上海化工研究院所开发的一口地下岩溶优质矿泉井，不仅供应本院职工，而且还供应附近的一些宾馆以及华东师范大学的部分职工，作为饮用水，就是一个实例。

表 7　上海地下淡水资源现状统计表（单位：$10^8 m^3/a$）

类　型	潜　水	承压水	总　计
淡水可采资源	4.50	2.07	6.57
淡水开采量	1.80	1.13	2.98
潜在开采量	2.70	0.94	3.64

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 8　上海市居民饮用水需水量统计表

人口/万人	全　市	市　区	流　动	总　计
	1 250	710	200	1 450
需水量/$10^4 m^3 a^{-1}$	8 669	4 924	1 387	10 056

注：每人按每日饮用水 19 升计。

设置售水网点，既要考虑居民的分布情况，又要考虑水文地质条件，选择地下淡水水质、水量较好的地段，合理布井，例如防止在地面沉降警戒线以内布井。逐步削减地下水工业用水指标，转化为饮用水指标，只要在空间、时间上作合理分布，就既能满足优质饮用水的需要，又可有利于上海地面沉降的控制。

4. 关于浦东地区的地面沉降与水资源问题

浦东新开发区面积 350km^2，规划 10 年内要建成 120km^2 的城市化地区，近年来经济发展非常迅速，水资源不足已成为高速度发展中的突出矛盾。当前最为严重的，是由于过量开采地下水所造成的地面沉降，从 1965～1990 年，累计沉积量已达 80～200mm，其中高桥化工区已达 300mm，年平均沉降量为 11.5mm/a[4]。当上海市区经过多年苦心钻研，奋力治理，使地面沉降基本得到控制之际，而浦东地区又重蹈复辙，不能不令人惊叹！

上海地质矿产局根据多年地下水监测数据，计算了浦东地下水，在不影响地面沉降前提下的允许开采量。其中第Ⅰ～Ⅲ含水层淡承压水的可采资源为 500 万 m^3/a，而第Ⅳ～Ⅴ承压含水层为 5 000 万 m^3/a，共计 5 5000 万 m^3/a。如果进行合理开采，最低水位控制在－40m，则 30 年内土层垂向变形量约为 70.25mm，平均年沉降量可小于 2.4mm/a。应该指出的是，第Ⅰ～Ⅲ含水层根据 1990 年的统计，其实际开采量已达 786 万 m^3/a，远远超过了允许开采量；而第Ⅰ～Ⅱ含水岩组，是上海最敏感的压缩层，所以浦东地区所出现的严重地面沉降，显然是由于第Ⅰ～Ⅲ含水层的超量开采所造成（表 9）。因此必须采取紧急措施，强制压缩开采量，加以严格控制，以防止继续恶化。目前第Ⅳ～Ⅴ含水层的开采量为 2 204.00 万 m^3/a，虽尚有潜力，但值得注意的是第Ⅳ～Ⅴ层承压水，均为十分珍贵的优质矿泉水，含锶（0.243～0.371mg/L）及偏硅酸（41.4～49.9mg/L）等微量元素，其含量已达到天然矿泉水标准，命名为含偏硅酸氯化钠型中温淡饮用天然矿泉水，现已制成瓶装，投放市场。十分遗憾的是，如此珍贵的地下水，目前开采量的 60%以上，被一般工业作为冷却用水所消耗，第Ⅰ～Ⅲ含水层的优质地下水，同样主要作为工业生产用水。在当前地表水体受到严重污染的情况下，如此利用优质地下水资源，是非常不合理的，必须尽快加以纠正。

表 9　浦东地区地下水开采现状表（单位：$10^4 m^3/a$）

含水层	可采资源量	实际开采量	结　余
第Ⅰ～Ⅲ含水层	500.00	786.00	－286.00
第Ⅳ～Ⅴ含水层	5 000.00	2 204.00	＋2 796.00
总　计	5 500.00	2 990.00	－286＋2 796

根据新区总体规划，远景预估总需水量为 120 万 m^3/d（4.4 亿 m^3/a），而地下水总资源尚不足 15 万 m^3/d，显而易见浦东供水主要需依靠地表水解决。但地下水资源如果作为饮用水则绰绰有余，按新区至 2000 年末规划人口为 240 万，那么按地下水 15 万 m^3/d 计算，平均每人

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

可分 50～60L 的优质饮用水[4]。由此可见，浦东地区必须与上海市区一样，大力开发地表水资源，采取分质供水的方针，即以地下水作为主要饮用水，而以地表水作为生产用水与一般生活用水，特别对深层（Ⅳ～Ⅴ层）优质矿泉水，必须严加控制，不准随便开发。在水价政策上生活用水与生产用水应有所区别，地表水与地下水应有所区别，优质浅层地下水与深层矿泉水应有所区别。作为工业用水的地下水应逐步减少而转变为饮用水源，对深层矿泉水应迅速采取严格的保护措施。

5. 关于浦东的供水方案

综上所述，解决浦东的供水问题，从长远考虑，必须以地表水为主，地下水为辅；统一规划，综合开发。地表水主要有两个来源，一是从黄浦江上游引水，主要解决浦东南部地区供水；一是从长江引水，建立旁岸水库，主要解决北部地区供水。地表水、地下水必须实行优质优用，分质供水；地下水以作饮用水为主，严格管理，防止地面沉降；地表水作为工农业用水及一般生活用水，严格控制废水排放，加强污水处理，提高利用效率，建立节水型生产体系。

关于建立旁岸水库，或称滩边水库，已在宝山附近取得成功经验，例如已经建成的宝钢水库与陈行水库，前者每天供水 15 万 m^3，后者库容 830 万 m^3，冬季供水 80 万 m^3/d，夏季可达 130 万 m^3/d。以上两个水库均在浦西，所以要引用陈行水库的水，需要跨越黄浦江，困难较大。目前正在高桥新开发区的凌桥，建立日供水能力为 20 万 m^3/d 的凌桥水厂。华东师范大学陈吉余教授，提出在长兴岛和崇明岛长江北支建立滩边水库的新方案。但河口地带建立滩边水库，会经常受到海潮咸水入侵的威胁。1979 年由于特枯水年，咸潮向上伸展至常熟附近，距河口 170 多 km，整个崇明岛被咸水包围约 5 个月之久。特别是海平面上升，其威胁性就更大。据计算海平面如上升 50cm 时，吴淞口附近江水的氯度，枯水年将有 2 000 小时超过生活用水标准（$>250\times10^{-6}$）[6]。三峡大坝以及南水北调等工程，如果修建以后，长江径流量减少，水位降低，那么咸潮入侵的威胁也就更为严重，成为修建旁岸水库需要研究解决的一个突出问题。

四、天津控制地面沉降与水资源的合理利用

1. 天津地面沉降的基本情况

天津市是沿海地区发生严重地面沉降的城市之一，与上海颇多相似之处。天津市从 1959 年到 1988 年，地面累积沉降量约 135.6cm，最大累积沉降量为 262.8cm，沉降面积已达 7300km^2以上，使天津地面标高半数以上降到 1～3m，少数地区已处于海平面高程以下，造成市区排水极端困难。1977 年 7 月因暴雨积水，直接经济损失达 2 亿元；1985 年 8 月两次强潮上岸，水深 1.2m，受灾面积 5.9km^2，造成严重损失。80 年代引滦工程完成以后，由于压缩地下水开采量和采取人工回灌等综合治理措施，地面沉降率从 1985 年的 86mm/a，下降至 1989 年的 18mm/a，逐渐趋向稳定①。

天津市地表水资源平均为 32.57 亿 m^3/a，当保证率 75%时为 11.87 亿 m^3/a；1984 年引滦入津工程通水以后，年引水量约 10 亿 m^3/a 左右。根据天津地质矿产局提供的材料，地下

① 许树国，1990，天津市控制地面沉降工作存在的几个问题，全国地质灾害地面形变学术讨论会论文集。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

水天然资源 14.86 亿 m^3/a；可采资源约 7～8 亿 m^3/a，包括微咸水为 9.8 亿 m^3/a。据统计 1984 年前全市地下水开采量达 10 亿 m^3/a 左右，到 1991 年年均开采量降为 7.6 亿 m^3/a，其中农业用水占 80%以上，但农业区地下水基本保持正平衡状态，而市区及近郊工业区则严重超采（表 10），是导致地面沉降的主要原因。由于市区及近郊工业区地下长期集中开采，开采量持续增长，形成三个明显的沉降中心，即市区、塘沽区和汉沽区。从 1959 年至 1991 年的最大累计沉降量，分别达 2.7m、2.9m、2.8m。以市区为中心的 460km^2 内，1985 年的开采量为 0.97 亿 m^3/a，开采模数为 24.25 万 m^3/km^2。自 1959～1981 年，地下水位年平均下降速率为 2.628m/a，漏斗中心水位埋深超过 70m。市区累计沉降量大于 1.5m 的面积，由 1978 年的 3km^2 扩大到 142km^2，大于 2.5m 的面积，从 1977 年开始基本稳定于 2.6km^2 左右[7]。

表 10　市区及近郊区地下水开采现状表（1977～1991）

地　区	面积 km^2	地下水平均可采量 $10^4m^3a^{-1}$	资源模数 $10^4m^3km^{-2}$	1977～1991 年平均开采量/$10^4m^3a^{-1}$	开采强度 $10^4m^3km^{-2}a^{-1}$
市　区	153	538.3	3.99	9076.2	59.32
塘　沽	683	1 888.0	2.76	3 523.6	5.16
汉　沽	362	1 039.0	2.87	3 406.7	9.41
大　港	935	2 587.0	2.77	2 559.6	2.74
津　南	416	1 273.4	3.06	4 047.4	9.71

塘沽地区地下水开采量，1981 年为 0.64 亿 m^3，开采强度为 37.63 亿 m^3/km^2a，漏斗中心水位埋深 68m，1977～1981 年年均下降速率 3.6m/a。从 1959～1985 年累计沉降量达 2.45m，至 1991 年累积达 2.9m。塘沽碱厂 1980 年一年沉降量即达 231mm，同年塘沽地区沉降量超过 200mm 的范围已达 5km^2，地面标高已低于海平面。汉沽地区 1957～1980 年累计沉降量大于 500mm 的沉降范围已超过 50km^2，至 1985 年最大累计沉降量已达 2.13m，地面标高基本与平均海平面持平。新的沉降区正在军粮城、咸水沽以及大港等地区发育。

2. 天津地面沉降的治理

就市区及近郊区而言，从 70 年代至 80 年代，年均沉降量及沉降速率均有显著减少（表 11），1984 年市建委制订了《天津市控制地面沉降规划》，主要措施是压缩地下水开采量，调整开采层位，实行人工回灌。为此建立了垂直二维流与地面沉降的耦合模型，地壳垂直运动速率模型，地下水开采量、水位与沉降速率的回归数学模型和地下水流准三维模型与沉降速率的耦合模型等，作为制定治理措施的科学依据。

表 11　1970～1985 年天津市区及近郊区年均沉降量与沉降速率表

时　间	年均沉降/mm·a^{-1}	最大沉降速率/mm·a^{-1}	年均地下水开采量/$10^8m^3a^{-1}$
70 年代	79.3	159（1975 年）	1.073（最大 1.2）
1980～1984	32.2	119（1981 年）	1.107（最大 1.26）
1985		86	

1986 年开始执行第一期三年计划，1991 年基本完成第二期三年计划，1993 年是第三期计划的第二年。第一期的目标，是将年平均沉降速率控制在 30mm/a 左右，第二期计划目标，是市内外环线的平均沉降速率控制在 15mm/a，塘沽区为 20mm/a。6 年来在市区及近郊区共停

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

井 630 多眼，人工回灌量由 1986 年的 72 万 m^3 增加到 1991 年的 163.8 万 m^3，总计近 700 万 m^3。地下水的开采量由 1985 年的 9 662 万 m^3，减少到 1991 年的 4 913 万 m^3，压缩地下水开采量 4 770 万 m^3（表 12），已低于这一地区的可采资源 5 788 万 m^3/a。其结果是地下水位普遍回升，年均沉降率由 1985 年的 86mm/a 减缓到 17mm/a，降低 80.29%。塘沽区共停井 170 多眼，减少开采量 1 900 万 m^3，年均沉降率由 1985 年的 100mm/a 减缓到 24mm/a，降低 76%（表 13）。据统计在第一、第二两期的实施计划内，其净效益为 19.3～21.5 亿元，效益与投资之比为 10.2～11.0，可见获得十分显著的经济效益与环境效益。

表 12　1985～1991 年天津市区及近郊地下水开采情况变化表

年　份	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1991 比 1985 减少量或上升量
总开采量/10^4m^3	9 662	8 015	8 015	6 645	5 274	5 182	4 918	−4770
第二含水组开采量/10^4m^3	3 573	2 853	2 853	2 147	1 501	1 313	1 319	−2 355
第二含水组平均水位 m	43.9	43.7	30.01	34.4	29.6	27.98		+
人工回灌补给量/10^4m^3	87	72	77.6	81.6	134	157.5	163.8	−76.3

表 13　1985～1991 年沉降速率变化表（单位：mm/a）

年份 / 地区	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1985 与 1991 沉降速率差
市区近郊	86	62	43	24	10	15	17	69
外环线内（334km^2）	87	66	43	21	14	11	13	74
塘　沽	100	54	46	29	44	19	24	76

3. 天津海平面上升的趋势分析

按以上沉降趋势分析，如果对地面沉降继续进行严格控制，那么市区和塘沽、汉沽区的年沉降率，在近期内可能分别下降到 10mm/a 和 20mm/a；如果进一步努力，在 2000 年前争取分别下降到 6mm/a 与 10mm/a，那么今后 50 年的沉降量，将是 300mm 和 500mm 左右。但天津地区除因抽水造成的地面沉降外，还存在地壳构造下沉。按距今 8 000～9 000 年的第一海相层沉积厚度的计算，并根据 1930～1953 年在非抽水区水准点监测资料的分析，其年构造下降率均为 1.70mm/a，基本代表构造沉降的年沉降率。如果今后 50 年海平面自然上升值按 20～30cm 计算，那么海平面的相对升降值，将分别为 60～70 和 80～90cm。这是最保守、也是从最有利条件下的一种乐观估计。

4. 缓解工业用水的主要途径[8]

综上所述，地面沉降是影响相对海平面上升值的关键因素，而缓解地面沉降，不仅要采取压缩用水和人工回灌等治理措施，同时还要开源节流，重点解决好市区及近郊区的工业用水。解决工业用水的主要途径是：

（1）调整工业布局，防止工业过度集中，因水设厂，建立分散性供水系统。例如北部山区和山前平面，水资源条件较好，可作建立新厂厂址；利用荒漠大洼开辟水源地，任其自然沉降，建立地表水库，一举两得。

（2）地表水、地下水统一规划，按不同用途，分质供水，合理分配。天津市民引滦前长期饮用咸水，却把珍贵的地下淡水作为工业用水；70 年代在宝坻开发的化纤厂水源地，是优

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

质岩溶水，如果作为饮用水，就基本满足全市市民的需要。天津地表水包括淡水、微咸水，还有海水，地下水有潜水、浅承压水、深承压水、岩溶水、地下热水等等，如何合理、分质分用途供水，十分重要。应把饮用水放在第一位，保证把水质最好的水作为饮用水源。农业上充分开发利用潜水和微咸水。工业用水逐步减少开采地下水，但应大力发展冷源回灌，充分利用地层储能功能，同时充分利用海水。日本沿海工业的冷却用水，基本上以利用海水为主；天津现已年利用海水 14.4 亿 m^3，大港油田油井改用海水注水成功，均有较好的发展前景。

(3) 建立节水型社会生产体系，依靠科技进步，提高水的利用效率，降低工业用水定额；合理调节地表水、地下水；大力治理污染，实行污水资源化；按水质、水量和不同的水源、用途，区别对待，合理收费；必须提高地下水水价，运用水价政策，限制工业开采地下水，建立符合市场经济的收费制度。

(4) 加强科学研究，科学用水，加强水资源的管理与保护，特别是加强对深层承压水、热水和矿泉水开采的控制与保护。

五、结　论

(1) 我国沿海不少城市，由于国民经济的迅速发展，都存在因过量开发地下水造成的地面沉降，其中尤以上海、天津两地最为突出，其危害也最为严重。两地地面沉降的年沉降率，均远远超过海平面的年均绝对上升率，成为影响相对海平面上升幅度的主导因素。因此控制地面沉降，对缓解和减轻由于相对海平面上升所造成的危害，具有特殊重要意义。

(2) 上海、天津两市，由于采取了压缩用水、人工回灌、调整开采层次等综合治理措施，均已初见成效，市区地面沉降得到基本控制。但近郊区，特别是新开发区，如上海的浦东，天津的塘沽、汉沽，地面沉降仍有相当的数值，甚至有加剧的趋势，必须采取紧急措施，防止进一步恶化。

(3) 要根治地面沉降，必须首先彻底解决工业用水问题。不论上海或天津，为解决工业用水，都应合理调整工业布局，因水设厂，建立分散型供水系统，避免工业过度集中。地表水、地下水统一规划，以地表水为主，地下水为辅，按不同水质、不同用途，分质供水，合理调配。大力发展冷源回灌，提高利用效率，加强污水治理，开发海水资源，制订合理的水价政策，建立节水型社会生产体系。上海地表水污染严重，必须逐步减少工业用地下水，把地下水作为主要饮用水源，以保证人体健康。在新开发区应考虑建立双重供水管道系统，把饮用水与非饮用水划分开来，实行分质供水。旧市区目前修建双重管道困难很大，可先采取建立分散的饮用水供水站网，解决市民获得优质卫生饮用水。浦东地区Ⅳ～Ⅴ两层承压水，均属珍贵的优质矿泉水，必须控制开采，严格保护。

(4) 建立健全监测系统和数据库系统，分析研究自然环境与社会经济系统交叉影响下，如何进一步建立相应的水资源管理模型，作为控制地面沉降和开展海平面上升预测的科学依据，及时提出预防措施，实行水资源的科学管理。

(5) 上海、天津两地控制地面沉降还存在较多问题，尚须作出更大努力。因此制订沿海国民经济规划或开展工业建设，特别是海港、码头、机场以及防潮堤等工程，都必须充分考虑相对海平面上升的影响。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

沿海地区地质环境与地质环境系统

一、沿海地区地质环境的基本特征

我国沿海和海域，地质环境复杂多变。近年来随着沿海经济的迅速发展和海洋资源的大规模开发，地质环境遭到日益严重的破坏。在自然条件和人类活动的综合作用下，各类地质灾害频繁发生。因此，当前保护沿海地区的地质环境，防治地质灾害，就显得十分重要。以下对我国沿海地区地质环境的基本特征与存在的主要环境地质问题，作一综述。

（1）平原海岸淤泥质软土发育。滨海平原海相淤泥质软土普遍分布，属软弱地基，对沿海城市建筑、工业基地、码头海港、铁路公路路基，以及机场等各类建筑物不利，是选线选址阶段就必须查明的主要环境地质问题。许多滨海城市，如上海、天津等，由于过量开采地下水，使软土层释水压缩而发生地面沉降，对国民经济和人民生活造成严重危害。

（2）岩石风化壳发育。隆起带基岩海岸以花岗岩、火山岩、变质岩等分布最广，风化作用强烈（包括北方地区），风化带的厚度可达 10～50m 左右，不仅对建筑基础不利，而且也是造成山坡坍滑、水土流失等地质灾害的主要原因。部分地段分布碳酸盐岩，岩溶化作用强烈，但岩溶水资源丰富，是大连、秦皇岛、广州等城市重要供水水源之一。不少地区由于过量开采地下水，造成岩溶塌陷，影响地面建筑物。矿区由于坑道排水，造成的塌陷更为严重。

（3）海岸侵蚀与河口淤积。我国沿海海岸极不稳定，一方面上升海岸由于海浪、海潮的强烈冲刷，出现明显的蚀退现象，造成岸坡崩塌或滑动，使海岸建筑以及土地资源或旅游资源等遭受破坏，并威胁港口、码头的安全；另一方面，滦河、黄河、长江、珠江等大河河口及邻近地区，海岸不断淤涨，如黄河三角洲每年以 2～3km 的速度向前伸展；同时在自然因素与人为作用双重影响下，一些港口和航道淤塞严重，影响海港与航道的正常运行。海岸侵蚀或河口淤积，都一定程度地受到地壳升降运动强弱的控制与影响。

（4）沿海城市三废污染严重。由于沿海地区人口密集，工业发达，三废污染十分突出；而且广大农村由于乡镇企业的发展，以及施用农药化肥和实行污灌等原因，污染情况也极严重。城市生活污水及工业废水的不合理排放，以及生活垃圾和工业废渣的缺乏科学管理，对地表水、地下水造成的污染，不仅危及人体健康，并影响河流、湖泊及海洋，使大量水生生物死亡，同时也破坏了淡水资源，使城市供水水源更趋紧张。大气污染不仅影响人体健康，而且形成全球性的“温室效应”，影响全球气候的变化。

（5）地下水咸淡交错、水质复杂。沿海平原由于第四纪以来受多次海侵的影响，大部分地区有咸水层分布。北方地区浅部以咸水层为主，有些地方淡水层埋藏很深；南方常见咸淡水层交错分布，咸淡水层中夹残留咸水透镜体（如宁波）。许多滨海城市如大连、秦皇岛、莱州、宁波、北海等，由于大量开采地下水，动水位降低到海平面以下，造成海水入侵或咸水入侵。河北黄骅等地区分布高氟地下水，不少居民中毒。有些沿海地区，可能由于地下水含腐殖酸较高，癌症发病率明显高于一般地区。例如江苏启东、上海、浙江、福建、广东等沿海地区，均为肝癌的高发地区，死亡率远远高于内地。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

（6）活动断裂与地震。东部沿海位处环太平洋地震带，活动断裂发育，许多滨海城市存在地震活动，影响区域地壳稳定性。例如海城、唐山等地，在70年代均发生过7级以上的破坏性强震。南方福州附近及广州、深圳一带，地震烈度达7～8度；渤海湾、黄海、东海海域，也曾多次发生6级以上地震。可见沿海地区的地震活动，是重大环境地质问题之一。

二、地质环境系统分析

地球表面的自然环境，是人类赖以生存和发展的物质条件，即客观的物质世界或自然界。它主要包括气候环境、地质环境、土地环境、水环境与生态环境，形成一个统一的相互联系、相互依赖，又相互制约、相互作用的完整体系（图1），即自然环境系统。

对于人类来说，地质环境是自然环境系统中影响人类生存与发展最重要的一个组成部分，因为它是人类生活与从事生产活动的主要场所。

另一方面，不能忽视人类各种活动对地质环境的影响，其能量甚至远远超过各种自然环

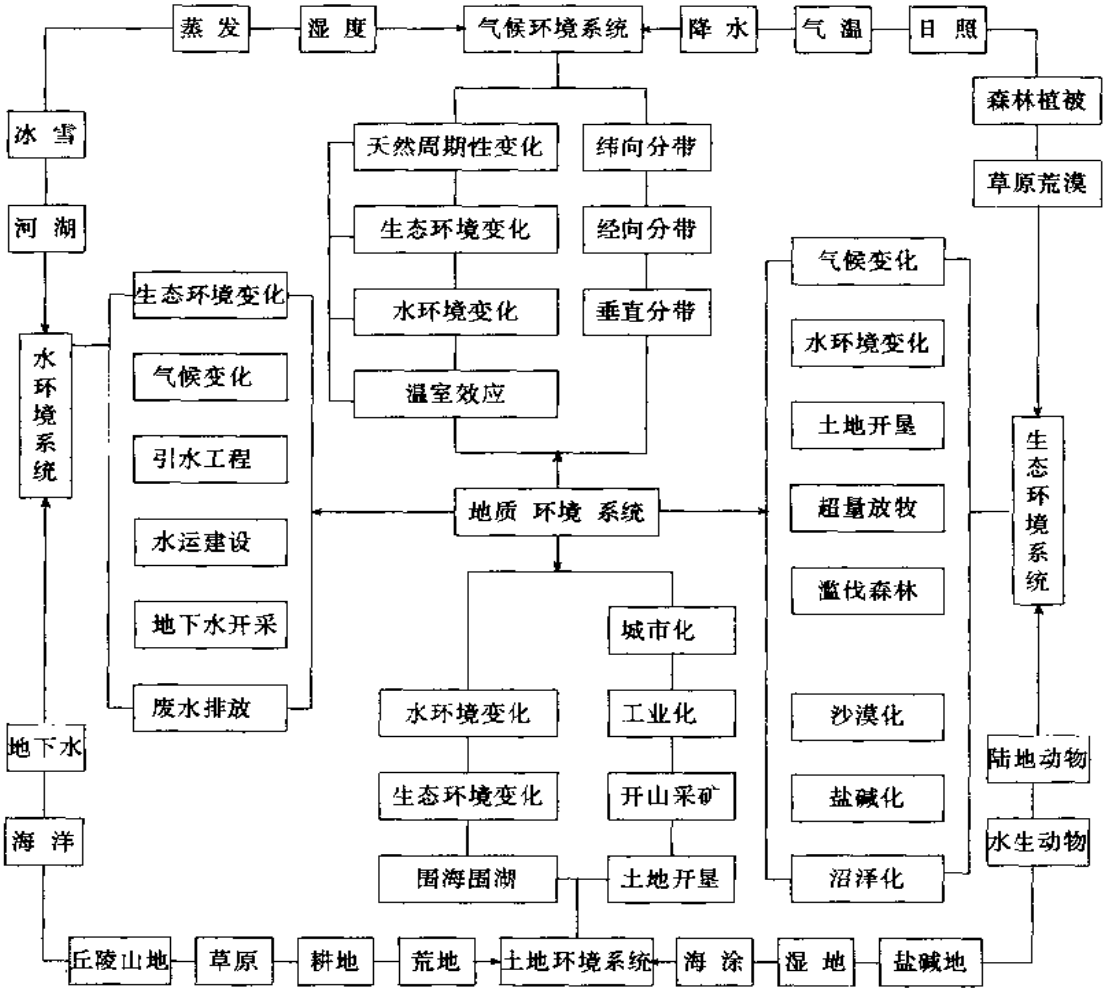


图1 自然环境系统框图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

境的影响。每个人都不能脱离社会而独立生活，人类创立的社会经济制度和上层建筑，就是社会经济环境，主要包括：城市环境、乡镇环境、工业环境、农业环境，以及交通运输环境等，形成一个相互紧密联系的社会经济环境系统。人类通过各种社会经济活动，如城市建设，发展乡镇企业，海港、机场、铁道、公路等工程建设，城市人口迁移，矿产资源或水资源开发，运河、渠道、水库、海塘等水利工程建设，围海、填海，三废排放等活动，都直接或间接影响地质环境与其它各种自然环境。所以人类处于两种环境之中，一种是自然环境，一种是社会经济环境。在自然环境中，地质环境既是自然环境系统中的一个组成部分，同时又受自然环境中的气候环境、生态环境、水环境、土地环境的影响而相互制约或相互作用。地质环境系统(图 2)通过各种地质作用，即物质和能量的交换作用，如侵蚀作用、剥蚀作用、溶蚀作用、风化作用、重力作用、淤积作用、地球化学作用、地应力作用等，与自然环境系统相互影响，持续不断地发生演进与变化，并在长期演化过程中，逐渐建立相对的平衡与稳定。人类依靠科技进步，可以改善或改造自然环境，使其更有利于社会经济的发展。相反，人类活动，特别是生产建设，如果不遵循自然界的客观规律，也会破坏自然环境，使社会经济和人类生活蒙受重大损害。

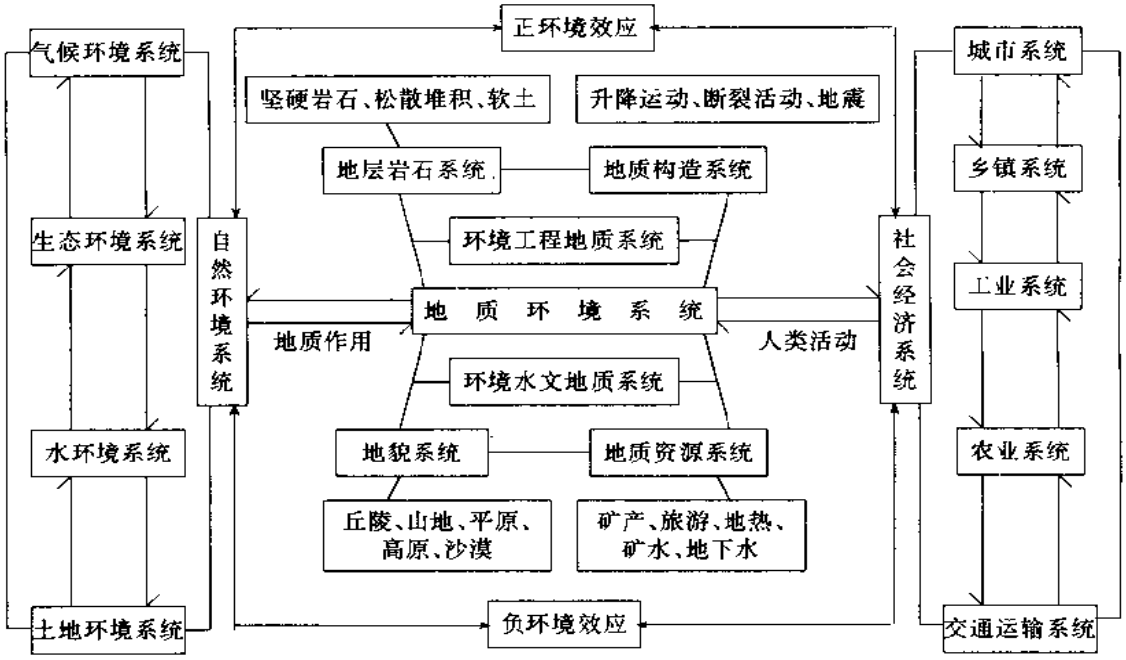


图 2　地质环境系统结构框图

沿海地区的地质环境既存在不利的一面，也存在有利的一面。不利的一面包括沿海三角洲平原，普遍分布海陆交迭相淤泥质软土，对建筑地基不利；岩石风化壳发育，风化带的厚度可达 10～50m，是造成山坡坍塌，水土流失等地质灾害的主要原因；碳酸盐岩分布甚广，岩溶塌陷、矿坑突水等地质灾害十分普遍；升降运动是控制海岸淤积或海岸侵蚀的主导因素，上升海岸受海浪、海潮的强烈冲涮，出现明显的蚀退现象，河口三角洲沉降平原，海岸不断淤涨扩大，如黄河三角洲每年以 2～3km 的速度向前伸展；平原海岸经常受到风暴潮及洪涝灾害的威胁；区域稳定性主要受活动断裂的控制，许多沿海城市存在地震活动，等等。以上这些环境地质问题，若事先采取各种防治措施，那么许多由人类活动造成的地质灾害或自然灾害，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

是可以避免的。这些不利方面可转化成有利的方面，如有的加固地基或合理选址；有的加强边坡防护，或改路堑为隧硐；有的大型建筑要采取防震措施，或躲开活动断裂带；有的水源地要加强管理，合理控制开采量，或调整工业布局与工业结构，等等。总之，要制定多种防治方案，进行分析对比，合理选择最佳防治方案，使可能遭受到的危害，降到最低。

然而，由于缺乏环境意识，片面追求经济效益而忽视环境负效应的现象仍然十分严重。特别是近几年以来，沿海地区国民经济高速度发展，许多新兴城镇不断扩大，城市人口急剧增加，工业厂矿或乡镇企业如雨后春笋，交通运输业如铁路、公路、机场、海港、码头等建设日新月异。人类活动的加剧，使各类地质灾害频繁发生，地质环境问题日益突出，引起各方关注。

综上所述，对人类社会起主导作用的地质环境，在自然环境与社会经济环境的双重影响下，通过人类活动，既可向良性循环发展，同时也可向恶性循环发展。研究和分析地质环境系统与自然环境系统和社会经济系统三者之间的错综复杂关系，其目的就是要使国民经济的发展与资源、环境相协调，纳入良性循环的轨道。如果把三者作为三个子系统，结合成为一个统一的整体，用一个简单的框图（图 3）正确反映三个子系统的基本要素，及其相互间错综复杂的关系，那么这个框图实际上代表一个简化的、综合的“人地系统”概念模型，可作为研究“人地系统”三个子系统之间相互关系与动力机制的可靠基础；也可为预测、预报环境演变的趋势，提供科学依据；并进一步建立管理模型，为保护和改善人类生态环境，促进国民经济发展，指出正确途径。

三、结 束 语

我国是全球海岸线最长的国家之一。沿海地区人口稠密，经济发达，全国 70%以上的大、中城市，都集中在沿海地区。特别是近年来由于温室效应引发海平面上升，将使沿海地区的地质环境更趋复杂；对今后沿海自然环境的演变，以及对社会经济的发展，都会带来严重影响，是一个值得关注的全球性大问题。

研究“人地系统”的宗旨，是研究和掌握地球环境的演变规律，应用现代科学技术，使地球环境的演化，更有利于人类社会的发展。“人地系统”的研究涉及面非常广泛，包括自然科学与社会科学的许多领域，它将成为自然科学与社会科学相互交叉的一个新的边缘学科。由于“人地系统”研究内容的高度复杂性，因此它代表一个开放型的复杂巨系统，其中包括许多可变性与非确定性因素，因而必须应用现代科学的新理论，新学科，如系统论、信息论、控制论，与相应的环境科学、系统科学、信息科学以及现代应用数学等为基础，来研究“人地系统”的层次结构、基本功能与动力机制。现代非线性科学的发展，给研究“人地系统”中许多非线性问题，提供了基本理论与研究方法，如耗散结构论、协同论、突变理论、分形理论及重化比群论等，对地学工作者来说，都是比较陌生的新领域，但有广阔的应用前景。

关于“人地系统”的研究，在我国还刚刚起步，目前尚未形成一个统一的概念或共同的涵义；因此存在各种不同的观点或各种不同的理解，是非常自然的。可以说“人地系统”的研究，目前尚处于摸索阶段。但“人地系统”研究对我国经济的可持续发展，显然十分重要，因此受到科学界的关注。本文只是对“人地系统”提出一个很粗略的框架，并探索了研究途径与研究方法，显然很不成熟，只能代表一种设想或一种观点；但对今后进一步深入开展“人地系统”的研究，可能会有所裨益。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

附图3 沿海地区人地系统框图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

地下水系统的基本理论及其应用

地下水系统的基本理论与研究范畴

一、引　言

当前，国际上都很重视地下水系统的研究，其主要原因是随着国民经济的迅速发展，各国普遍存在因大量开采地下水而造成过量开采以及一系列相应发生的环境负效应问题。因此不首先解决区域性水资源评价，就不能妥善解决局部地区的问题。研究地下水系统是解决区域地下水资源评价和建立最佳开采方案的可靠途径，只有在全面研究地下水系统的基础上，才有可能为实行模型化、最优化，建立正确的数学模型，并为建立管理模型创造条件。

地下水系统研究，主要应用系统工程的原理与方法，就是把一定范围内的地下水体，作为一个完整的系统，即地下水系统；按照系统论的思路，系统分析各有关的天然或人为因素，来设计和完成资源评价和提出合理的开采方案，使其达到预期的最佳结果。具体地说，就是从系统观点出发，对地下水系统，从整体上、全局上和在系统与外界环境的相互联系上，着重分析整体与部分之间、整体与外部环境之间的相互联系、相互作用与相互制约的关系，从而找到一个最佳的处理方案。其具体方法，就是在系统分析的基础上，运用数学模型来对系统的状态、各变量间的关系和发展趋势等，进行定量的描述。所以系统工程是以数学作为工具，以计算机为手段，以系统论、信息论和控制论作为它的理论基础。它的特点是整体性、综合性和模型化、最优化。

二、关于地下水系统的基本概念

目前，关于“地下水系统”还缺乏一个明确的定义；一些涉及“地下水系统”的有关名词或术语，也比较混乱，含义不清，因而对“地下水系统”至今尚未形成一个完整的、统一的概念。荷兰阿姆斯特丹自由大学教授英格伦博士认为“地下水系统”可以看作在时间和空间上具有四维性质、能量不断新陈代谢的有机整体，它可以从出生、成长、一直到衰老或消亡。它的主要特征表现在：①边界类型的模式；②容积；③结构；④阻力或势能转换能力；⑤流出系统；⑥相邻系统之间的联系；⑦水质类型和模式；⑧地下水系统的发展“历史”。

前苏联 H·B·鲍柯夫斯卡娅在“水文地质学概念的现状和预测问题”一文中指出：任何一个复杂系统可归纳为三个方面，①系统的组成；②系统的结构，它表征系统与周围介质的相互作用和系统内各要素的相互联系；③系统的作用、性质和发育历史。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

地下水圈呈现一个多组分的复杂系统，其特点表现为系统内各组分和其相邻的系统（大气圈、陆上水圈、生物圈、地幔层和宇宙）的组分之间的相互作用。地下水圈多组分的概念，是以运移条件和物质存在形式都不同的各系统组分之间的边界条件的存在为前提的。在此基础上进行着物质（水流和化学物质）和能量（热能、势能）的转换。

从系统分类方法的观点来看，地下水圈是一个处于等级从属关系的许多单元组成的复杂的动力学系统。水循环是决定地下水圈的作用和演化的主要机制，根据这一机制，可以在其范围内划出界线。在水循环各部分相互作用影响下发生演变，表现为水质水量的变化。水圈的演变是它各个部分长期作用的结果。

鲍柯夫斯卡娅提出了“水文地质系统”这一术语，作为水圈地下水部分的基本单位。它占有一定的三度空间体积，周围被具有自然特征的较高梯度的面所限制，这一界限为水文地质系统的数学研究创造了前提，即在一定边界条件下，为定量描述系统内物质流动提供了基础。水文地质系统的每一个单元，可能构造很复杂，并且实质上是次一级系统（亚系统）。通过对系统的研究，运用电算机模拟影响于系统的各类作用，就可建立模拟模型，再与优选法结合起来，就能制订控制系统的最佳方案。鲍氏提出的“水文地质系统”，在含义上和本质上与“地下水系统”并无明显差别，只是所采用的名词有所不同而已。

1984 年的莫斯科会议（第 27 届国际地质大会）上，法国 G·卡斯塔尼在分组会的报告中认为，正确的水资源评价必须从水资源保护、防止水资源枯竭、控制地下水污染和保护生态系统平衡出发，对地下水系统进行定量描述，主要包括六个基本内容：①非均质含水介质的空间分布特征；②补给量与排泄量随时间的变化；③包气带水与矿物溶解物质的运移和变化；④温度场的变化；⑤合理开发和管理地下水资源的经济指标，即开采资源的基本平衡；⑥建立水文地质概念模型，为进一步建立数学模型奠定基础。

卡斯塔尼指出，每一个地下水系统都具有一定的时空特征及其水动力系统，并有固定的平衡形式和一定的水资源类型。归纳起来，具有如下综合特征：①具有一定的连续的空间范围（流域、盆地、建造）；②地下水与空间介质的机械作用，包括水动力作用、水热作用和水生物作用；③水循环的连续性，表现为含水系统的时间状态，其连续性表现为脉冲-反应的双重性质。根据上述特征，地下水系统可划分为：①以流域为水资源均衡单位的地下水系统，它包括地表水、地下水及大气降水的均衡；②以水文地质盆地为水资源均衡单位，包括完全充满或未充满的盆地中的地下水，通常浅部含水层更有利于补给与开采；③深部含水介质中的地下水，通常不具备平衡的意义，一旦开采就不易恢复，如北非的深层地下水及巴黎盆地地下水。

水文地质概念模型是在地下水系统研究的基础上所建立的综合模型，主要反映边界条件、补给量、排泄量、潜水及承压水的水动力、水化学特征及其相应参数的空间分布与形成的全部结构。

美国地质调查所水资源处拉尔夫·C·海斯认为：“地下水系统”这一术语，指的是从潜水面到岩石裂隙带底面的这一部分地壳，是地下水赋存和运动的场所，由含水层（作为地下水运动的通道）和围闭层（阻碍地下水运动）所组成。有一些水文地质学家认为，地下水系统指的是具有某种性质的岩石集合体，它能自由地容纳水和运移水，并与其它不能自由容纳水和运移水的岩石相邻接。美国道济（Dooge，1967）认为地下水系统的定义是“任何真实的或抽象的结构、装置、方案或过程，在一定的时间内所反映的物质、能量、信息的输入和输

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

出及其演变关系”。

美国 R·C·希思（1982）按照地下水系统的五个特征将美国划分为 14 个区，这五个特征是：①系统的组成要素，包括含水层（承压和无压）、弱透水层、隔水层及其组合关系；②主要含水层含水空隙的性质，包括原生的与次生的；③主要含水层的岩性，包括可溶的与不可溶的；④主要含水层的贮水与导水性；⑤主要含水层的补排条件。

美国 S·多曼尼克（1972）认为，在地下水的研究中，无论是从科学研究、工业建设，还是资源管理的角度出发，都涉及到各自不同的地下水系统。根据所研究的问题和目的的不同，系统可大可小，可简单可复杂，从源到汇的两条平行流线直至整个水文循环，都可应用系统这一概念。多曼尼克还认为，研究问题应用系统概念，这是一种研究方法，其特点就是把所研究问题的各个有关方面联系起来，作为一个整体来对待，并对系统建立模型和运行模拟，以求得对问题有效而又合理的解决。

上面对地下水系统的各种解释，其中有的实际上接近含水层系统的概念；而含水层系统只是以含水层为基本单位的一组具有固定边界的、互有联系的、同一时代或不同时代的若干含水岩组。面地下水系统，是指在时空分布上具有共同水文地质特征与演变规律的一个独立单位，它可以包括若干次一级的亚系统或更低的单位。因此，一个含水层系统，可以由于水动力、水文地球物理、水文地球化学及水文地热等综合因素，而划分为若干个地下水系统，每个系统具有各自的水动力系统和水化学系统，彼此间互相联系又互相影响。其形状与范围可因内外动力作用和能量转化的影响而发生变化，所以它的边界，是自由可变的，即可以因水动力作用而发生收缩或扩大。由此可见，地下水系统与含水层系统在性质上是不同的，代表两个不同概念。

研究地下水系统不能脱离这一地区的水文系统，它是水文系统中的一个重要组成部分，所以地下水系统与地表水（包括降水径流）系统存在不可分割的关系。地下水系统实际上受地表水的输入系统与输出系统的控制，它的演变与发展过程，往往就是地下水系统与地表水系统互相转化演变的过程，其演变规律既受各种天然因素的影响，同时也受各种社会环境因素、特别是人类活动的干扰与影响。

由此可知，地下水系统是一个错综复杂，包括各种天然因素、人为因素所控制的，具有不同等级的互有联系又互相影响，在时空分布上具有四维性质和各自特征、不断运动演化的若干独立单元的统一体。所以只有运用系统分析的方法，才有可能把如此错综复杂、支离分散的认识，概括在一个完整的系统结构内。这一个统一结构，就是我们所称的地下水系统。

综上所述，地下水系统的基本概念，可以归纳为：①地下水系统是由若干具有一定独立性而又互相联系、互相影响的不同等级的亚系统或次亚系统所组成。②地下水系统是水文系统的一个组成部分，与降水和地表水系统存在密切联系，互相转化；地下水系统的演变，很大程度上受地表水输入与输出系统的控制。③每个地下水系统都具有各自的特征与演变规律，包括各自的含水层系统、水循环系统、水动力系统、水化学系统等。④含水层系统与地下水系统代表两种不同的概念，前者具有固定的边界，而后者的边界是自由可变的。⑤地下水系统的时空分布与演变规律，既受天然条件的控制，又受社会环境、特别是人类活动的影响而发生变化。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

三、关于地下水系统的研究范畴

关于地下水系统的研究，作者认为主要包括以下内容：①地下水系统的结构与分级；②水文系统研究；③水动力系统的研究；④水化学系统的研究；⑤边界性质与相邻系统间关系的研究；⑥反映地下水系统的水文地质图编图方法的研究。

地下水系统的结构与分级　作为大面积的区域性地下水系统，一般按某一流域或盆地（水文地质单元）确定其范围。每一个独立的地下水系统，又可根据补排条件、含水层结构、水动力或水化学特征，划分为若干亚系统。例如，把以海、滦河流域组成的河北平原看作一个完整的地下水系统，根据补排关系在原则上可按主要水系：如滦河、潮白河、永定河、漳河、滹沱河、滏阳河等河流，划分为若干互相联系的亚系统。在此基础上，根据含水层系统的结构，又可划分为浅层水系统、中层水系统与深层水系统。其中浅层水系统又可按单层结构、二元结构成多层结构，咸水层或淡水层，潜水或承压水，进行次一级的分类。如果从更完整的系统考虑，那么还应包括中、新生界以及在古生界与元古界的诸含水岩组在内。对于每一地区地下水系统的正确分级与分类，都必须首先全面掌握地下水系统的时空分布、水文地质特征与演变规律。为了研究地下水系统的形成过程与历史演变，对一定地区的地质发展史，岩相古地理的变迁，以及对古水文地质的研究，具有十分重要的意义。

水文系统　水文系统主要由三个部分组成，即输入系统、区域地下水系统、输出系统，所以实际包括了地下水的循环系统或补排系统。荷兰英格伦教授所编绘的“区域水文系统相关网络框架图”，基本上表示了三者之间互相交错的复杂关系。其中输入系统主要包括降水、外区流入或本区自产的地表水、外区流入的地下径流（包括淡水及咸水）等要素；地下水系统主要包括包气带、浅层水系统、中层水系统、深层水系统以及极深深层水系统；地表水输出系统主要包括天然排出的地表水系统和通过人工抽吸排水的地表水系统。以上三个系统的各个要素，都存在纵向与横向之间的相互转化关系，因此，研究它们转化演变的发展过程，并根据相互关系组成一个完整的网络结构，是建立区域性数学模型的重要基础。

水动力系统　水动力系统是研究地下水系统的边界及其发展演变的重要依据，也是划分地下水系统与研究相邻系统之间关系的重要依据。根据地下水的贮存、流态、流量和结构，地下水系统可划分为静态系统（流出量＝0）与动态系统（流出量＞0）两大类。动态系统又可划分为稳定系统（流出量为常数）与非稳定系统（流出量为变数）两类。非稳定系统按其性质又可划分为脉动的（平均流出量为常数）、扩张的（流出量增加）与收缩（流出量减少）等三类。水动力系统又可以划分为确定性系统与随机性系统；前者因果关系是基本了解的，而后者只有在确定其概率范围内确定其期望值。根据能量的交换关系，水动力系统还可划分为封闭系统与开放系统。前者又可划分为绝对封闭（孤立）系统与相对封闭系统。绝对封闭系统与外界完全无物质或能量的交换。开放系统与外界既有物质又有能量的交换。在开放系统中，物质能量的输入和输出达到平衡状态时，即为稳定系统，它只有空间变量而无时间变量。如果输入和输出不等，形成物质、能量的贮存或消耗，即为非稳定系统，因此它具有空间和时间两方面的变量。分析动力系统的性质及其分类，对了解地下水系统的演变规律十分重要。只有全面掌握系统内的水动力特征，才有可能合理选择水资源计算方法，根据不同情况，正确建立不同的数学模型。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

水质系统（或水化学系统） 水质与水量是研究地下水系统的两个主要方面，两者存在密切的联系，是评价地下水资源必须考虑的重要因素。每个地下水系统都具有各自的水化学特征与特定的演变规律，形成相应的水质系统。所以水质系统也是确定地下水系统的界限与进行分类和划分亚系统的重要依据之一。地下水水化学在时间和空间上的不断变化，主要受含水层的物质成分、迁移作用和交迭作用三个要素的控制，所以地下水自输入至输出的水质演变过程，主要反映在上述诸要素所形成的三个互相联系的亚系统上，即迁移系统、交迭系统与岩性系统。其中迁移系统又可划分为层流或紊流条件下的稳定流和非稳定流，以及对流、扩散流和弥散流等不同的流动模式。交迭系统包括各种物理的、化学的和生物的作用过程。含水层岩性系统包括各类渗透性能不同的土层或岩石。

水质系统的演变规律，可概括为以下程序：①输入；②通过系统的路径；③沿途遇到的各类物质成分；④水流滞留时间与流速的变化；⑤交迭作用的速率及临界值。根据水质系统的结构、迁移还可划为渐变的或突变的。一般情况下浅部水力交迭强烈，迁移作用取代了弥散作用和扩散作用，中部和深部流速向下逐渐减小，扩散流逐渐取代交迭迁移。深部是地下水的停滞部分，仅存在扩散迁移模式。地下水的流线在输入过程中常因以下情况而发生偏离现象：①含水层的不同成分形成“活泼”区或“惰性”区；②由于温度或热动力系统的异常造成密度流，流线偏离的强弱与密度差成正比；③受人为作用的影响，如人工补给或生产开采。总之，水质系统是物质成分、迁移、交迭三个亚系统的叠加综合组成，是地下水系统的一个组成部分。对一个水质系统的认识，仅了解已知的输入或输出部分是远远不够的，只有认识迁移、交迭、物质成分三个系统的相互关系与演变过程，才有可能对水质特征作出完整的描述，并对水质的演变作出预测。

地下水质污染的研究，也必须在分析地下水系统的基础上，根据污染水的水质、水温、密度和含水层的岩性（包括活动区与非活动区），以及地下水的流线系统，分析水质的迁移、交迭过程。只有在此基础上，才能查明污染物质的运移规律，为合理布置观测孔，正确确立取样深度提供科学依据，并为采取防治措施奠定基础。

边界类型与相邻系统间的关系 地下水系统的边界，主要决定于地质、水文地质条件，包括前述水文系统、水动力系统、水质系统等因素的控制。边界类型可划分为相对稳定的和自由可变的两大类；可变边界又可划分为收缩的和扩大的两种类型。由于边界具有可变性，因此相邻系统（包括亚系统）之间，可因互相干扰而使边界的范围或形状发生变异。输入系统、水动力系统以及水质系统的演变，往往是影响边界的主导因素，而人类活动往往是导致边界异化的主要原因。因此，对地下水系统的研究，不能不特别重视社会环境的影响：例如修建水库、运河，大规模城市建设或森林植被的破坏，不仅影响地区的环境生态系统，也直接或间接影响地下水系统。三废对地下水造成的水质污染，以及由于地下水的无控制开采，造成水位持续下降、海水入侵、水质恶化以及地面沉降等环境水文地质工程地质问题，都成为对地下水系统边界的干扰因素，这些因素对建立区域性的随机性模型，都是必须加以考虑的。

反映四维特征的水文地质图 在分析研究地下水系统的基础上，如何编制一张能反映地下水系统、具有四维特征的水文地质图，是当前有关地下水系统研究的重要课题之一。这张水文地质图不仅要反映地下水系统的基本结构及其时空分布，并且要反映相应的水文系统、含水层系统、水动力系统以及水质系统的主要特征与演变规律。因此，水文地质图的编图原则，应以渗透场、水化学场与水文地温场为基础，反映在三度空间中时空变化和地下水在流域内

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

水动力、水化学和水文地温的结构，包括边界条件、相邻系统间的交接关系以及各种社会环境因素，作为建立水文地质模型的基础。这就需要在编图内容与编图方法上进行全面的革新，不少国家目前正在朝着这方向进行深入的探索。

四、结束语

地下水系统研究的全过程，基本可归结为：查明水文地质条件——→建立水文地质模型或概念模型（即地下水系统赋存的环境）——→建立与地下水运动条件相适应的数学模型（进行参数研究和资源评价）——→因地制宜的制定地下水资源最优开发利用方案，建立管理模型。地下水系统的研究，不仅在理论上具有重要意义，而且在实际应用上，必将提高对复杂条件下进行地下水资源评价与开展动态预测的水平。在工作方法上，也将会导致新的改革，因此，地下水系统的研究，对水文地质科学的发展，将会产生十分深远的影响。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

地下水系统研究与概念模型

一、地下水系统的基本概念

地下水系统理论的基本观点，就是把一定范围内的地下水体，作为一个完整的系统，从整体上、全局上和在系统与外界环境的相互联系上，着重分析整体与部分之间，整体与局部环境之间的相互联系、相互作用与相互制约关系，并在系统分析的基础上，实行定量与模型化。为解决地下水资源评价和供水目的所进行的地下水系统研究，主要就是实行地下水系统模型化、最优化的全过程。具体来说，主要包括以下各个步骤：区域水文地质调查—建立地下水系统概念模型—在参数研究的基础上，建立与水动力条件相适应的数学模型—通过模拟在优化基础上建立管理模型--提出最佳开采方案。所以研究地下水系统的全过程，就是完成一项系统工程的全过程。

关于地下水系统的基本结构与主要特征，笔者曾归纳为：①地下水系统是在一定边界条件的限制下，由若干具有一定独立性，而又互相联系、互相影响的子系统或更次一级不同等级的系统所组成。②每个地下水系统具有统一的水循环系统、水动力系统、水化学系统，并具有各自的特征与演变规律；系统与系统之间，通过水流传输作用，进行复杂的物质和能量的转换。③地下水系统是水文系统的一个组成部分，与地表水系统有密切联系；地下水系统的演变，很大程度上受输入系统与输出系统的制约。④地下水系统的渗流场、水动力场或水化学场所发生的变异，很大程度上也受到含水体的介质系统或结构系统的影响与制约。⑤地下水系统的时空分布与演变规律，既受天然条件如地质环境、气候环境、水环境、生态环境等的控制，又受社会环境、特别是人类各种经济活动、工业化、城市化所造成的影响而发生变化。如上所述，地下水系统是一个错综复杂、包括各种天然因素、人为因素所控制的、具有不同等级的、互有联系又互相影响、在时空分布具有四维性质和各种功能、不断运动演化的若干独立单元的统一体。

近十多年来，国外在地下水系统研究基础上，进一步发展了地下水流系统（或译流动系统）的理论。早在 1963 年，托斯（Toth）就提出理想的二维均质各向同性的潜水盆地模型，即理论上的水流模型，反映不同水流系统之间的边界条件，把潜水盆地按水流系统的不同层次划为局部水流系统，中间水流系统和区域水流系统。地下水流系统实际上以研究由流线与等势线组成的流场为基础，分析研究水流系统的流网结构，作为划分系统边界的重要依据。英格伦（G、Englen）等在 80 年代进一步发展了地下水流理论，把赋存地下水的介质场、驱动地下水流的水势场、温度场和水化学场，看作是从源至汇由流面群构成的、具有时空演变的有机体，进一步提高了水流系统的重要性。按中国的俗话说，地下水流系统的研究就是搞清地下水水流的来龙去脉。

地下水流系统在三维空间，从补给区流向排泄区，可以穿越各种不同的含水层系统，所以地下水流系统与含水层系统是两个完全不同的概念；同一个含水层，由于补排条件不同，可

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

以分割成几个独立的局部的水流系统，或形成两个或三个不同等级的水流系统。如图 1 所示[2]，三个方框代表三个不相同地段，但相互连接的剖面，它们之间由于含水层的演变，形成三个不同结构的含水层系统。如果应用简单的地下水系统的概念，那么三个不同的含水层系统结构，如果各具独立的渗流场，就可代表三个简化的子系统。但从地下水流的观点分析，那么从框图中可以明显的区别出与托斯图中基本类似的三个不同等级的地下水流系统。由此可见，研究水流系统是划分地下水系统的基础。一个完整的地下水系统，可以包括几个同等级的水流系统，构成若干子系统，有时又可形成若干不同等级的水流系统，构成子系统。由此可说明，分析研究地下水流系统，具有特殊的重要意义，成为研究地下水系统不可分隔的一部分。

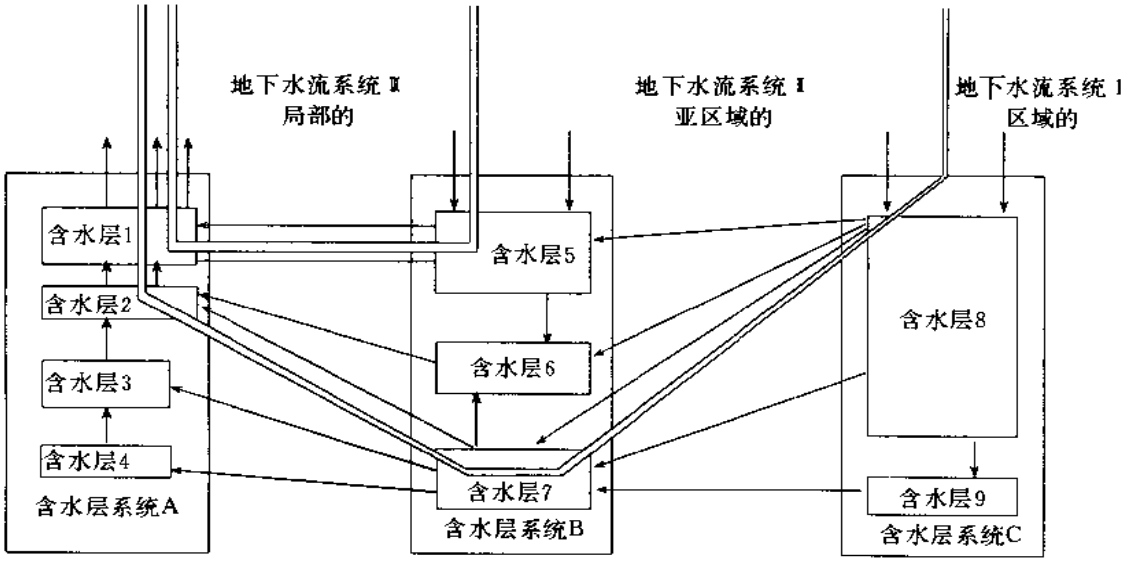


图1　地下水流系统结构分析图

二、概念模型的基本内容与表现方法

地下水系统概念模型，是建立数学模型或模拟模型的基础，所以衡量模型的好坏或模型的可靠程度，首先要看所提供的概念模型是否准确，即是否能比较真实地把复杂的客观事物的本质特征概括为理想的简化模型。模型是表现系统本质的一种形式，其中概念模型是实行地下水系统模型化的第一步，主要属结构性模型，一般采用图表的形式来表达。数学模型主要属功能性模型，主要用数学语言表达。

关于地下水系统的基本要素及其特征，英格伦曾归纳为：①边界类型模式；②系统的结构；③容积；④阻力或势能转换能力；⑤流出系统；⑥相邻系统间的联系；⑦水质类型和模式；⑧地下水系统的发展历史。以上列举的要素及特性，也就是概念模型要研究和表达的基本内容。法国 G、卡斯塔尼[3]曾提出概念模型需要综合反映以下四组基本资料：①水文地质建造特征，主要包括边界面、岩性、厚度、粒度或裂隙发育程度等；②地质边界和水动力边界

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

条件；③两个水动力参数．即导水系数与储水系数在空间的分布；④水位和流量系统的空间分布。以上 4 条与英格伦的 8 条其内容基本类同，但比较强调水文地质结构与基本参数。

由此可见，概念模型需要反映的内容很多，一般需要采用多种形式来表达。根据多年实践经验主要有：①概念模型平面图；②地下水系统相关网络框图；③水文地质剖面图，包括地下水流系统流网剖面等。以上三种形式是相辅相成的，平面图主要反映不同层次地下水系统的边界范围与边界性质．以及渗流场、水动力场、水化学场的分布及其主要特征与基本参数。网络框图重点反映地下水系统的内部结构与运行机制，及其与输入、输出系统之间的相互作用与相互关系。剖面图重点反映含水层的结构及其地质背景以及水流系统渗流场与水化学场在三维空间中的分布与相互交错关系。虽然以上几种表达形式是众所周知的，但在许多有关研究成果中，能够比较全面并较好表述概念模型的，并不多见。

G．卡斯塔尼所介绍的法国南部及北非地区两个概念模型图，是 80 年代初最早引入国内的两幅比较简单、具有典型意义的概念模型图，已成为我国编制概念模型图的基本模式（参阅《水文地质工程地质》1991 年第二期）。其内容主要反映了等水位线、水位边界、流量边界、补给边界、排泄边界、隔水边界、子系统边界、径流方向、导水系统等值线，以及输出量（用单位流量表示）等，基本包括了概念模型应反映的所有主要内容。

地下水系统相关网络框架图（图 2），是由荷兰英格伦教授首先创立的（1981），也可称

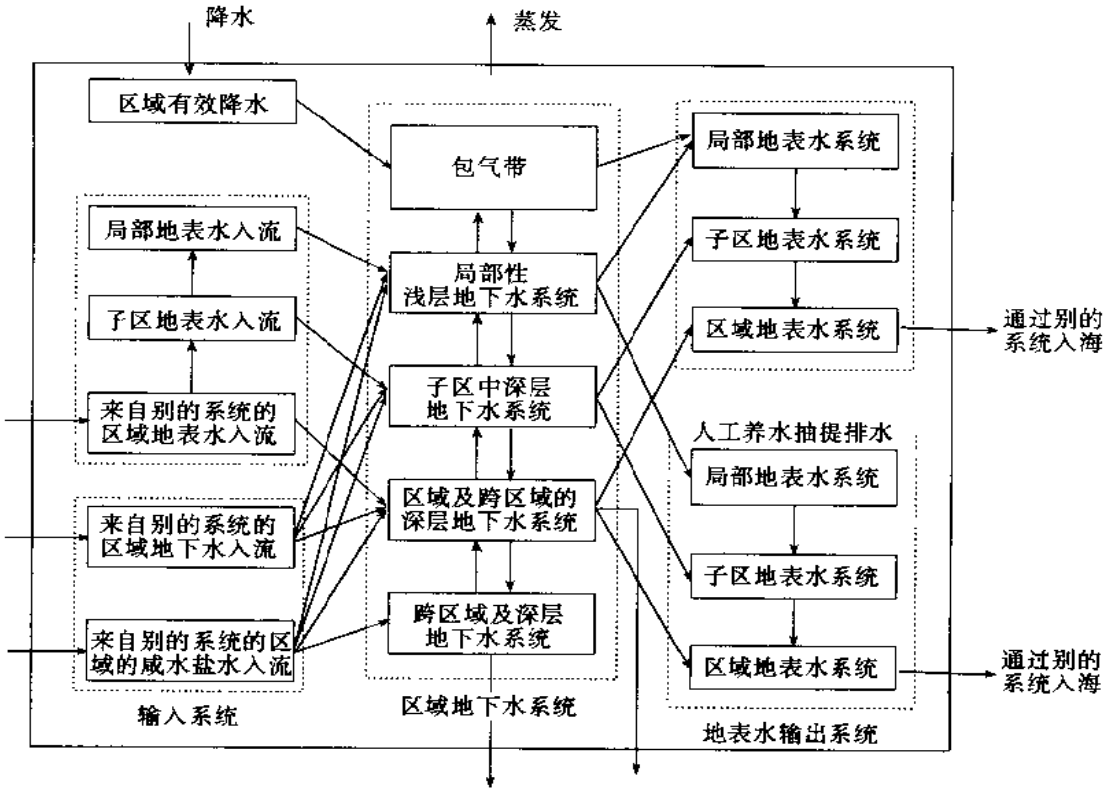


图2　地下水系统相关网络框架图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

网状关系模型，是表达概念模型的一种较好形式。英格伦根据这一模式，对荷兰西部的三个相邻地区，采用三个互相连接的框架，分别反映其含水层系统与降水及地表水系统之间的复杂关系，以及三个框架之间的相互关系。从图 3 可以看出，A 系统中含水层系统与外界关系

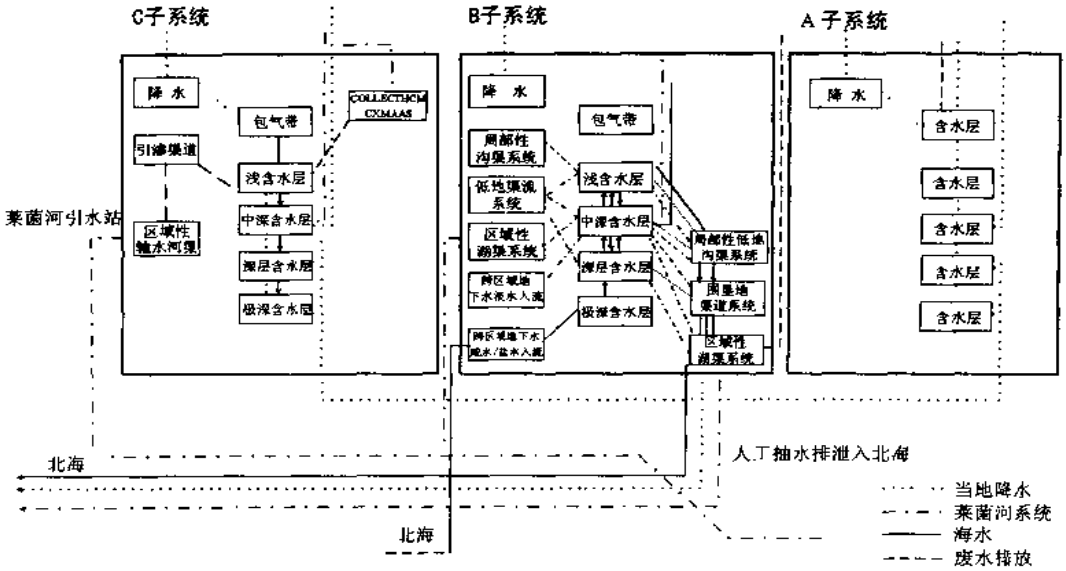


图 3

较为简单；而 B 系统中则与渠道系统或湖渠系统之间的补排关系，变得十分复杂；而 C 系统主要接受莱茵河水的人工补给，构成地下淡水水源地，即著名的滨海沙丘水源地，是荷兰首都阿姆斯特丹的主要供水水源。

与此相对应还绘制了西部水文地质剖面图，突出反映了淡水、微咸水、咸水及盐水的边界面，它们主要受不断扩大的人工引渗的淡水系统所控制。全区均属同一个统一的含水层系统，但咸淡水的分界面，与含水层形成一个相互交错穿插的不规则关系。由于三个地段的补给关系不同，可以看出形成了三个具有明显边界的独立的水流系统，组成整体系统中的三个子系统。淡水体的形成，与地表水湖水及河流的补给直接有关，所以淡水界面主要受不同流场的制约。其中 C 子系统则主要受人工渗流场的控制。

该剖面的主要特色，除反映含水层系统以外，同时反映了水化学场与渗流场的空间分布；并用不同的流线，反映不同的补给来源及其运移方向。剖面还表示了岩性变化、控制钻孔或生产井，以及导水系数与贮水系数等基本参数。实际上英格伦还编制了若干辅助性剖面，包括第四纪以来不同时期的水文地质剖面，反映地下水系统的历史演变。因此，通过上述大量工作，包括平面图、框图及剖面图等，比较全面地反映了这一地区地下水系统的四维特征，为进一步建立数学模型奠定基础。正如汤连生等在一篇讨论“整体拟合”的文章中指出的[4]，对系统的认识是建立模型的关键。只有对系统的结构逐步有了正确的认识，抓住了更多的系统本质上的特征，才能用抽象化的概念模型，逐渐取代实体原型，才有可能用已掌握的数学模型，对系统进行分析和预测。认识地下水系统结构和建立概念模型是一个渐进的、嵌套性的过程。在这一过程中，用定性、定量相结合的综合分析方法，研究地下水系统的渗流场、水

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

化学场等特征，为从总体上研究多维空间的地下水系统提供了可能。由于地下水系统的层次性和复杂性，拟合过程应是对系统整体性认识或辨识的过程。

三、概念模型研究的若干实例

我国自80年代以来，应用地下水系统的观点与研究方法，在建立概念模型方面已取得显著进展。这对实行地下水系统模型化和进行地下水资源的计算与预测起到很大推动作用。现列举平原地区、岩溶地区以及自流盆地研究地下水系统概念模型的若干实例，分述如下。

1. 平原地区地下水系统概念模型研究实例

长江下游地下水系统循环框图（图4），在南方平原地区具有代表性，比较真实地反映了

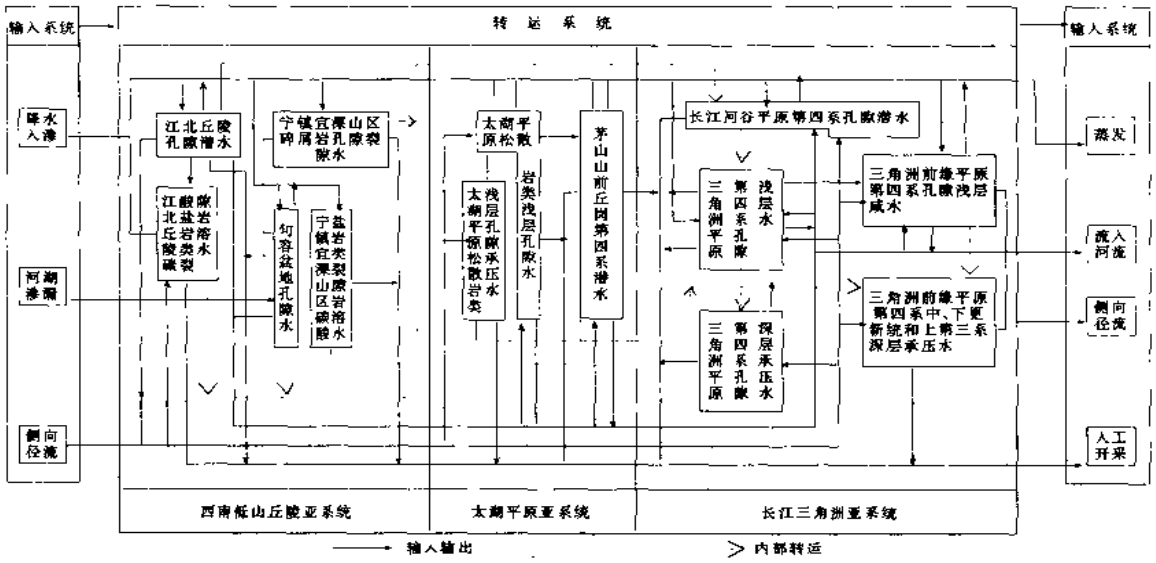


图4　长江下游地下水系统循环框图

这一地区地下水系统概念模型的基本轮廓[6]。该地区水文地质条件较为复杂，但属于一个统一的地下水系统。根据长江三角洲平原、太湖平原、以及西南低山丘陵区三个地段含水层系统的不同，以及水动力条件及其补排关系的明显差异，划分为三个亚系统。主要反映了第四系潜水与承压含水层的结构变化，不同介质含水体地下水相互转化关系，以及各亚系统之间的联系，及其输入、输出系统的相互交换作用。

东北松嫩平原地下水系统框图（图5），在北方地区具有代表性。全区划分为山前倾斜平原、中部低平原、东部高平原三个相互联系的亚系统，较好地反映了第四系、第三系、白垩系等不同时代含水层系统之间的复杂关系，以及各亚系统之间与输入、输出系统之间的复杂传输关系。

西北部干旱地区，如河西走廊及天山南北麓的山前平原，其主要特点是地表水与地下水相互多次重复转化。地下水系统与河流有密切关系，主要由上游至下游所流经的若干盆地组成一个整体；每个盆地形成一个子系统。整个流域既代表一个完整的河流系统，同时也是一个完整的地下水系统。笔者曾用框图的形式[7]，反映了西北内陆盆地地下水系统与地表水系统

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

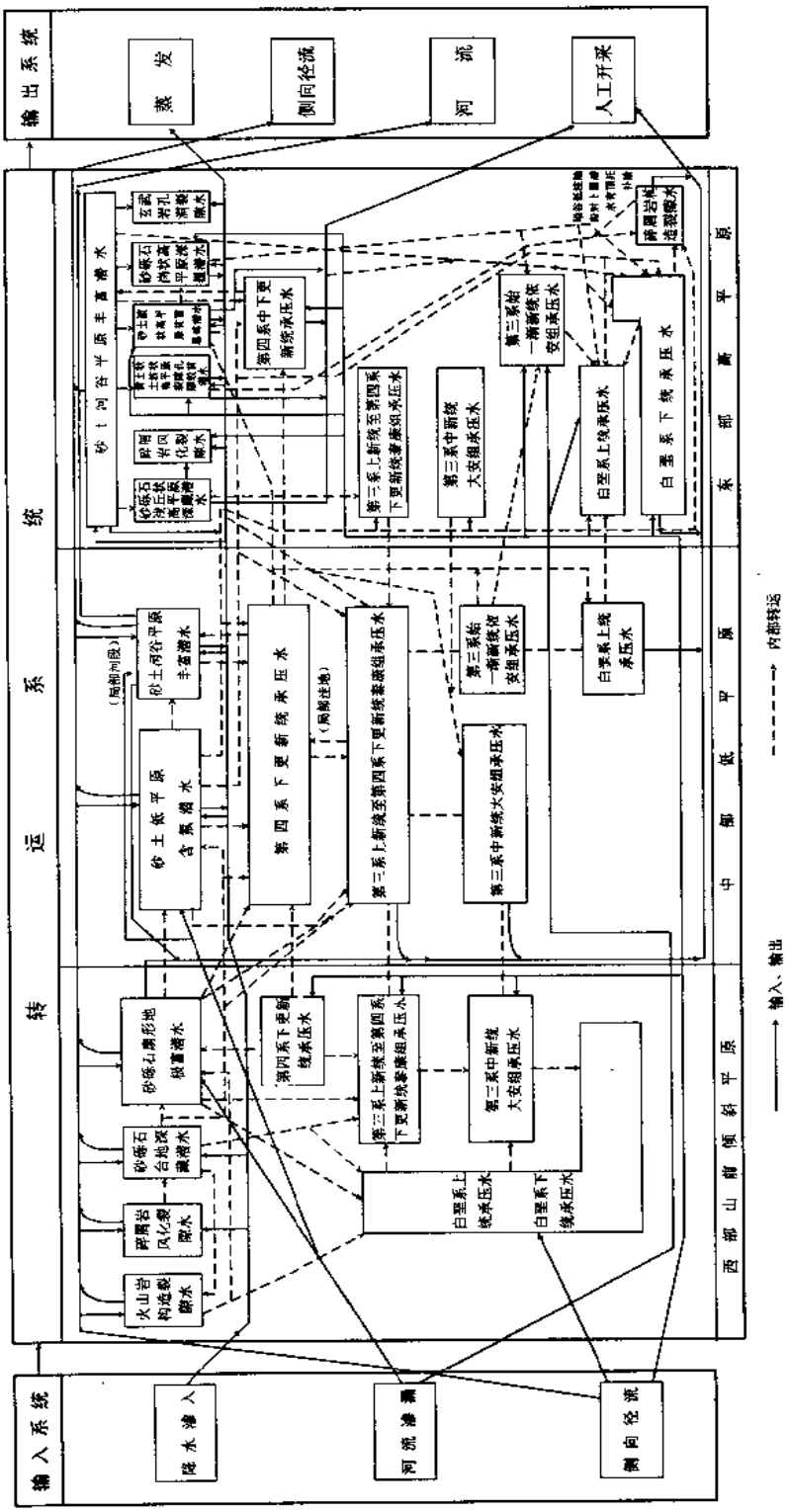


图 5　东北松嫩平原地下水系统框图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

的复杂转化关系，并根据渗流场的特点，划分了地下水系统的几种不同模式，体现了概念模型的基本轮廓。

2. 岩溶地区概念模型研究实例

地矿部岩溶地质所韩行瑞通过对北方岩溶水多年研究的结果，根据北方岩溶水系统的结构及其水流系统特征，概化为以下五种模式[8]：①裸露山区反倾单斜岩溶水系统（A 模式），如娘子关、辛安村等泉域系统；（2）裸露-覆盖山前断褶带岩溶水系统（B 模式），如柳林泉、邢台百泉、邯郸百泉等泉域系统；（3）裸露山区-断陷盆地岩溶水系统（C 模式），如太原盆地西山区及东山泉域系统；（4）滨海岩溶水系统（D 模式），如大连市；（5）丘陵-平原覆盖型岩溶水系统（E 模式），如天津宝坻及徐淮地区。以上五种模式，采用框图结合剖面的表示方法，基本代表北方五种不同类型岩溶水系统的概念模型。虽然框图的内容过于简略，剖面图也不够完善，但研究方向是正确的。岩溶地质研究所在桂林丫吉村所建立的试验场，对丫吉泉泉域岩溶水系统的动力场、水化学场、同位素场进行了深入研究，确定了泉域边界，对峰丛山区岩溶水系统划分为三个调蓄带，通过对各带管道流与扩散流转换关系的分析研究，应用水文学水箱模型的原理，建立了三层水箱组成的并联水箱物理概念模型，较好地反映了三个调蓄带裂隙流与管道流的相互转化过程及其调蓄功能。在上述概念模型的基础上，结合室内模拟，成功地建立了我国峰丛洼地区，包括包气带和饱和带岩溶水系统的调蓄数学模型。由于注意研究系统的内部结构，如水流的相互传递以及不同含水介质对径流的不同调蓄作用，使模型由“黑箱”性质发展为“灰箱”性质。

3. 白垩系自流盆地承压水系统概念模型研究实例

地跨陕、甘、宁、内蒙四省（区）的鄂尔多斯高原白垩系自流盆地，是我国面积最大、结构最完整、具有典型意义的地下水系统。在水文地质普查阶段，由于按国际图幅分幅进行，因而对盆地地下水系统缺乏整体认识。80 年代四省区地矿局联合开展了整个盆地地下水资源评价的研究[10]，建立了自流水盆地的概念模型，作为水资源计算的依据。通过对含水介质特征和承压含水层系统的水动力特征分析研究，及边界条件的概化和均衡验证，编制了地下水渗流剖面（图 6）和潜水、承压水补排模型剖面（图略）。根据地下水分水岭和渗流场的分布，把

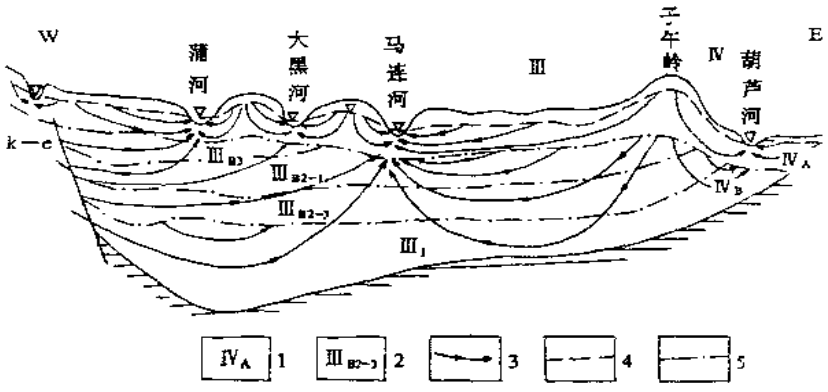


图 6　地下水渗流剖面

1 -计算区及潜水代号；2—计算区承压水含水岩组—含水岩段代号；3—流线；4—潜水位；5 -潜水及承压水岩组、段界线

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

盆地自流水系统分为四个子系统；并在此基础上，编制了全区的概念模型图（图 7）。图面除包括等水压线、导水系数等值线等内容外，较好地反映了各类边界条件。根据各子系统内部结构特征，编制了各子系统的相关网络框图（图 8）。因此，这是一个根据剖面图、框架图和平面图所建立的一个内容比较完整的自流水盆地概念模型，已在实际应用中取得较好效果。

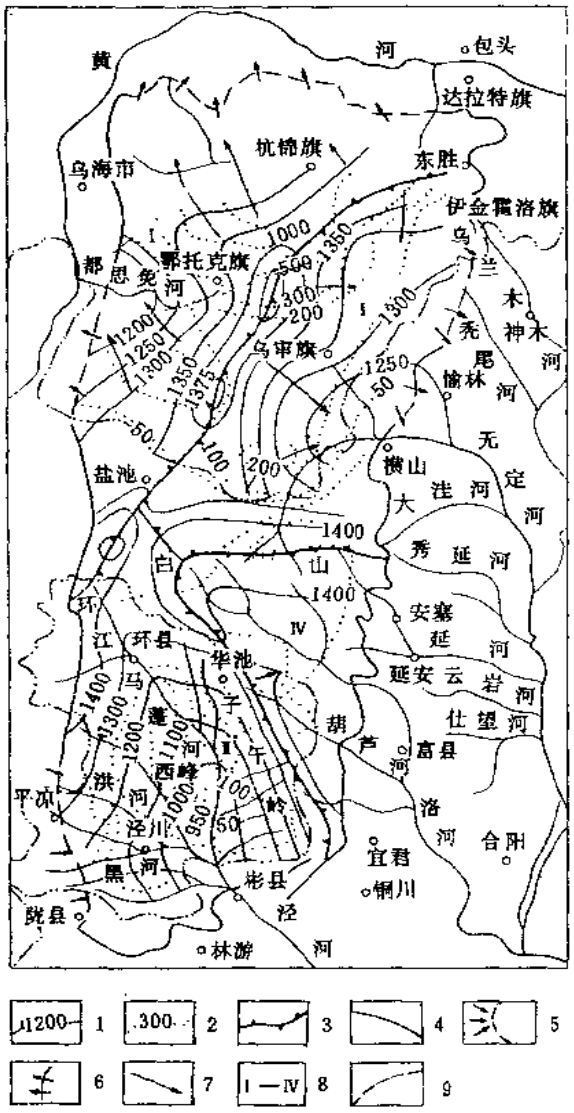


图 7　全区概念模型图

1—等水压线（第二含水层组）；2—等导水系数线（第二含水岩组）；3—水文地质分区界线（地下分水岭）；4—隔水边界；5—侧向补给边界；6—侧向排泄边界；7—径流主要方向；8—分区代号；9—工作区界线

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

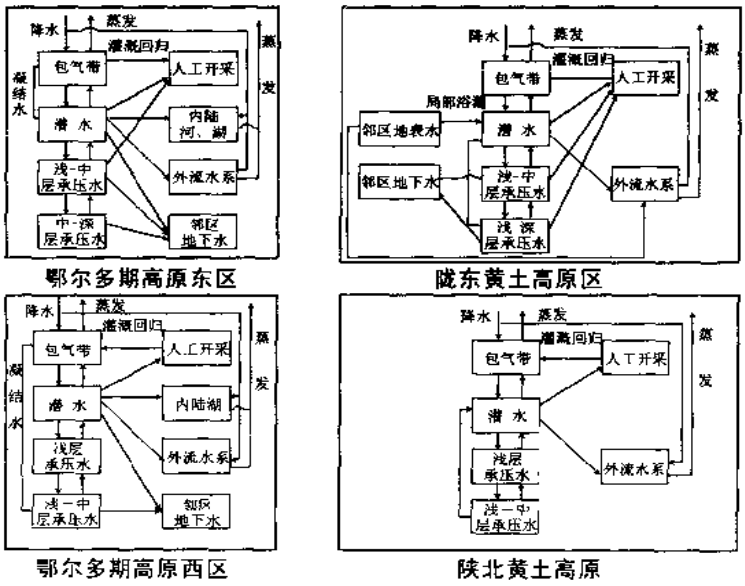


图 8　各子系统的相关网络框图

四、结 束 语

地下水系统概念模型是实行模型化的第一步，是建立数学模型的基础，所以概念模型是否符合实际，直接影响数学模型或模拟模型的可靠程度。表达概念模型除文字说明外，主要采用概念模型平面图、网状框架图及剖面图等三种形式，三者相辅相成；只有三者结合起来，才能比较完整的反映地下水系统在三维空间中的内部结构与演变规律。建立概念模型必须充分了解这一地区的区域水文地质条件，经野外调查、科学判断与深入的分析研究，才有可能把错综复杂的关系，比较准确地进行高度概括。我国对概念模型的研究，虽然已取得较大进展，但从全国来说，发展还很不平衡，特别还存在模型化过程中不重视概念模型的倾向，这对实现地下水系统模型化，是十分不利的。今后一方面需要提高认识，充分理解其重要性；另一方面仍需进一步探索，如何根据各种不同情况，在分析研究地下水系统的基础上，使概念模型能够更加接近实际。这一切有待今后继续努力。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

环境地质学与环境地质问题

环境地质工作的基本任务与最新发展

一、引　言

最近几届的国际地质大会一再强调，为解决当前许多环境问题，特别是全球性环境问题，地质学家应该为此作出积极贡献。许多国家的地质机构，已把工作重点从矿产勘查逐渐转移到环境地质的调查、研究方面。我国是一个拥有 12 亿人口的大国，但经济上仍属于发展中国家，在经济发展中所遇到的各种各样的环境地质问题，十分严重。据不完全统计，由于各种地质灾害造成的经济损失，每年可达 200 亿左右，其中与人类活动直接有关的经济损失，每年平均约 130 亿。尤其近几年以来，我国国民经济处于全面高速度发展时期，但又面临人口、资源、环境的长期制约。调整人类活动方式，促进经济发展与资源、环境相协调，是持续、高速、稳定发展的迫切需要。根据当前国民经济发展的要求，许多环境地质工作，迫切需要加快完成。如重点经济区区域环境地质的调查研究，大、中城市地质环境的调查研究，重大工程建设地质灾害的调查研究，干旱地区水资源开发与生态环境问题的调查研究，以及矿区环境地质问题的调查研究等。

除了上述地区性环境问题以外，还有全球变化引起的全球性环境地质问题，受到各国科学家的普遍关注。如温室效应引发的海平面上升，直接或间接对沿海地区人民的生活或工程建设，带来严重危害。全球性气候变化，可能对大陆水资源发生严重影响，特别是干旱地区的干旱化会促进荒漠化的发展，使生态环境急剧恶化。目前，全球变化研究及人类未来生存环境的预测，已是摆在我们面前的一个重大课题。我国在亚洲占有广阔的陆地与海域，对研究全球性变化，具有特殊的重要地位，应该对此作出应有的贡献。

二、环境地质工作的最新发展

我国近年来环境地质工作取得大量成果，内容十分广泛，概括起来主要包括 5 个方面：①区域环境地质的调查研究；②城市环境地质的调查研究；③重大工程建设地质灾害的调查研究；④水资源开发与生态环境的调查研究；⑤矿山环境地质的调查研究等。

1. 区域环境地质的调查研究

主要为国民经济规划服务，结合编图所进行的综合研究工作。根据目的与要求的不同，又大致划分为 5 大类：①编制全国性的图系或图集，如由地矿部中国水文地质工程地质勘查院

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

组织各省共同编制出版的《中国环境地质图系》、《中国分省地质灾害图集》，以及相当文字说明的专著《中国地质灾害》。地矿部地质环境管理司与国家计委国土规划司编辑出版的《全国国土综合开发重点地区水资源和地质环境评价》，比较系统地论述了我国17处重点经济区的地质环境概况与存在问题。中国环境地质图系由基础图组、地质资源图组、环境地质图组、环境地质评价图组共四个图组组成、包括18个图幅（已出版11幅图），比例尺1：600万。重点反映了滑坡、崩塌、泥石流、土壤侵蚀、岩溶塌陷、地面沉降、海水入侵、土地沙漠化、盐渍化、沼泽化、特殊土危害等主要地质灾害的类型特征、形成因素、分布现状和区域发展规律等，具有较高的科学性和实用性。②按省、市、自治区编制出版的图系或图集。如北京地矿局编制出版的《北京环境水文地质图集》，宁夏回族自治区地矿局编制出版的《宁夏回族自治区环境水文地质图集》以及辽宁省地矿局编制出版的《辽宁省环境地质图集》；③按流域编制的图系和相应的文字报告。如结合流域规划编制的长江流域环境地质图系与黄河流域环境地质图系。④按经济区编制的图系或图集和相应的文字报告，如东北经济区、华东经济区、京津唐地区环境地质图系。"八五"期间还完成了京津唐地区地质灾害减灾防治试验研究，地质灾害预测防治计算机辅助决策系统的研究，以及2000年地质-自然灾害系统发展趋势预测和对策研究，把研究重点集中在预测预防方面。⑤为特殊要求或专门目的所编制的区域性图系。如第二松花江及长江中下游环境背景值图系；北方岩溶图系；为开发滨海地带以及为建设三边防护林编制的图系；为北方能源基地建设以及为黄淮海平原综合治理所编制的图系。此外还有与环境水文地球化学有关的甘肃、内蒙、吉林、云南等省区的地方病图集、中国地方病与环境图集，等等。大多数图系或图集，除基础性图件外，还包括水资源图、区域稳定性评价图、地质灾害图、旅游资源图、以及其它有关环境质量评价、固体废物处理、土地利用、水土流失、河流或海岸变迁，以及反映地面沉降等地面变形的专门性图件。

2. 关于城市环境地质的调查研究

近年来全国主要城市特别是沿海开放城市，普遍开展了城市环境地质的调查研究。内容主要包括水资源枯竭、水质污染与水质恶化、海水入侵、地面沉降与岩溶塌陷，地基沉陷、生态环境恶化以及滑坡，泥石流等地质灾害。多数城市建立了监测系统，开展了环境质量的综合评价，编制了城市环境地质图系或图集。

在上述大量工作的基础上，地矿部地质环境管理司组织各省，编制出版了《中国主要城市水资源及环境地质问题研究》(1991)。该专著共分总论及分论两部分。总论部分除水资源内容外，系统分析了水污染的现状、成因与趋势预测，分别论述了我国城市存在的主要环境地质问题与整治对策。分论部分分别论述了77个大中城市的主要环境地质问题。为了配合浦东的开发，地矿部"八五"科技攻关项目中，开展了"上海浦东、厦门的环境地质研究"，建立了浦东地区准三维流地下水多层越流含水层系统的水流模型和地面沉降计算模型。

许多环境水文地质问题，都与地下水过量开采密切相关，而城市地下水过量开采，很大程度上与工业布局或工业结构不合理有关。因此如何在查清水资源的基础上，提出工业合理布局方案，不仅有利于缓解水资源供需矛盾，也有利于消除或减轻由水资源开发所造成的各种地质灾害。国际水文科学协会1988年出版的《水资源开发的负效应与水资源管理》一书(IAHS出版物172号)，系统地论述了与水资源开发有关的各类环境问题及其形成机制与防治措施。其中有关地下水部分，主要由中国专家编写，采用了中国的资料与中国的实例，在国际上得到较高评价。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

在城市建设中，地下工程日益增多。如北京、广州、上海等城市正在修建的地下铁道，上海已建成的浦江越江隧道，正在规划中的海口越海隧道，以及一般城市的地下市场或地下仓库等，都需进行水文地质、工程地质、环境地质条件的评价。随着城市建设的发展，今后各类地下工程在城市地质工作中将占重要地位。

近年来不少城市由于水资源开发，造成旅游资源的严重破坏。如济南著名的趵突泉、太原的晋祠泉，敦煌的月牙湖，以及昆明的翠湖的破坏，已引起广大群众的关注。因此城市旅游资源的保护，已成为城市环境地质工作中的一个重要课题。

各城市存在的问题各不相同，近年来对各类专门性问题的研究，取得不少新进展。上海地面沉降的研究与比利时专家合作，建立了以三维流模型为基础的水流-沉降模型。深圳地区运用数学模拟和物理模拟两种手段，通过对现代应力场的有限单元分析，对该地区的断层活动性与区域稳定性作出评价。若干城市污染机理与水质模型的研究，以及西安市、大同市地裂缝的研究、格尔木市浸没问题的研究等，也取得许多重要的新成果。

应当指出的是，目前对城市固体废物导致的水质污染，尚未给予足够的重视。国外近20年来，十分重视为防止固体废物污染（如城市垃圾）所进行的环境地质调查，包括有关固体废物地质处置的调查研究。先进国家对城市固体废物基本上都采取人工填埋和科学的地质处置方法，选择最适合的地质条件，建立卫生填埋场，最大限度地减少或消除固体废物对环境和水体的污染。可是我国对固体废物的处理，基本上还处在露天任意堆放的状态，危害极大。

根据报道，我国仅城市垃圾每年就达6000万吨，近400座城市中大多数已陷入垃圾重围。北京市就是一个典型实例，市区四周分布垃圾山4500多座，被称为“垃圾长城”，占地近1000公顷。兰州利用城市垃圾在黄河漫滩填土筑地，对地表水及地下水造成难以治理的祸害，而类似情况在各城市十分普遍。工业城市工业废渣的任意堆放更为严重，例如唐山市20多个煤矸石山和7个贮灰场，就占地8000余亩。西安、上海（浦东）等城市不久前完成了城市垃圾环境地质的调研工作，是国内目前所知少数有关治理城市垃圾的研究成果。由此可见，迫切需要尽快开展城市固体废物的环境地质调查，对现有的垃圾堆放场，提出治理措施，为建立科学的填埋场，进行选址勘察。此外，随着核工业与核电站的发展，防止放射性污染和开展核废料地质处置的调研工作，也刻不容缓。

3. 关于重大工程建设地质灾害的调查研究

近年来对已建或正在规划中的重大工程建设，如早已建成的宝成、成昆等铁路线，黄河上游刘家峡、龙羊峡等各大水电工程，以及正在施工中的三峡水库等，开展了以地质灾害问题为主的环境地质调查，取得不少重要成果。宝成、成昆等复杂山区铁路线，每年因遭受滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害，对铁路运营造成巨大损失。我国山区铁路约占全部铁路线的66%，每年由地质灾害造成的直接损失就达1.7亿元。今后有必要在原有工作基础上，选择重点危险地段，进一步进行深入研究。长江三峡库区，从50年代以来，至少进行过三次库区的环境地质调查（包括葛洲坝水库）。近年来先后发生鸡扒子及新滩等大滑坡，对航运造成严重威胁。其中新滩滑坡由于事先发出预报，大部分居民得以平安撤离。因此有计划、有步骤地建立监测网，开展监测工作与预测预报工作，已是当务之急。

自从三峡工程经中央批准，并从设计阶段进入施工阶段以来，在“七五”期间，地矿部门就参与开展了“库区迁建城市环境地质的研究”和“三峡库岸稳定性研究”，全面分析了各迁建城市的主要环境地质问题，为城市的合理规划，提供了重要依据，对库岸变形的形成机

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

制和大型滑坡体的稳定性，作出了初步预测与综合评价。“八五”期间又进一步开展“三峡工程地质与地震及长江开发重点地段环境地质问题研究”，先后完成“移民区平缓斜坡成因类型及其稳定性宏观判据”、“移民区不同地段地质环境开发模式与地质环境容量评价研究”、“移民区开发的地质环境质量损益经济评价”等重要研究成果，为移民区的合理开发，提供了科学依据。此外，还完成了库区重大崩塌滑坡监测预报及减灾对策的研究、重点地段重大环境地质研究、三峡名胜古迹旅游资源环境保护与开发研究，等等。这些研究成果不仅具有实际意义，而且其中许多内容，开拓了环境地质研究的新领域。

值得一提的是三峡链子崖危岩体与黄腊石大型滑坡区，这两处重大地质灾害点，经过多年来的详细勘查与长期监测，进一步开展了防灾治理工程，取得了成功经验。这是地勘队伍长期以来只搞地质勘察不搞防治工程施工设计的一个重要突破，为今后实行勘查、设计、施工、监测一体化，指出了正确途径，并为建立一个新的学科“地质工程学”奠定基础。除三峡工程以外，还进行了南水北调西线工程超前期环境工程地质的论证，黄河大柳树坝址环境工程地质的论证，以及黄河流域中上游能源基地环境地质问题演化趋势及防治对策研究等重大项目。这些研究成果，对上述重大工程项目的定夺，将起到重要作用。

4. 关于水资源开发与防治生态环境恶化

由于水资源开发不当而造成的生态环境恶化，在西北干旱地区最为突出，已严重影响农业生产与居民生活。以甘肃河西走廊为例，由于盲目修建水利工程，导致绿洲地区泉流量由32亿 m^3 减少至14亿 m^3，其中石羊河流域由年8亿 m^3 减少到接近完全消失，以致原有的泉灌系统，几乎遭到全面破坏。下游民勤地区，由于上游截流，补给来源减少，地下水位剧烈下降，造成大片植被死亡，草场退化，水质恶化，沙漠面积不断扩大。黑河下游额济纳旗由于来水量急剧消减，生态环境恶化更为严重。新疆塔里木河年径流量约50亿 m^3，近20年来由于上游截流引水，输往中游的已不到10亿 m^3，造成下游300公里的“绿色长廊”频于消失，30多万亩草场覆灭，5个农场约十余万亩耕地因沙化弃耕，罗布泊湖完全干涸。北疆面积达550km^2 的玛纳斯湖也全部干涸。全疆由于土壤次生盐渍化而弃耕的土地超过1000万亩，有些地区开垦的土地与弃耕面积相当，近30年来沙漠面积扩大了3.4万 km^2，使5000万亩土地或草原被沙化。造成生态环境严重恶化的主要原因，是没有充分考虑干旱地区地表水、地下水互相转化的特点，片面提高地表水的利用率，上下游缺乏通盘规划，以致严重破坏了天然的生态平衡。

由此可见，西北干旱地区水资源的调查研究，必须注意以下三点：①地表水与地下水必须作为一个整体，统一规划，综合利用；②深入研究上、中、下游水资源的合理开发与最优分配，加强各种方案的经济比较，重视对经济效益与社会效益的分析研究；③充分考虑水资源开发与生态环境的关系，防止生态环境恶化，把环境效益放在首要地位。

其它地区也普遍存在类似的问题。近年来所提出的许多跨流域调水方案，其中有关引水以后对生态环境可能发生的变化，是论证方案可行性的关键问题之一。例如华北地区的南水北调方案，东北地区的北水南调方案，都同样存在防止生态平衡破坏问题。目前国内类似的跨流域调水方案还很多，例如四川的西水东调方案，甘肃的引洮方案，河西走廊的引大通河方案，山西的引黄方案，以及新疆阿勒泰地区的北水南调方案等。这些方案是否能够成立，除要对全区水资源的供需平衡与线路的工程地质条件作出正确评价外，最重要的一点就是要分析论证引水以后，对生态环境可能造成的不利影响。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

5. 矿山环境地质问题的调查研究

我国矿产资源丰富，但矿山开发阶段，往往造成地形破坏，地面变形，水土流失，水质污染、滑坡、崩塌等地质灾害。如抚顺露天矿，因工作面滑坡使部分煤田长期无法开采。云南东川由于长期开采铜矿，造成大规模泥石流。湖北西部某磷矿发生大规模崩塌，整个办公大楼被掩埋，200 多人丧生。南方许多岩溶充水矿床，由于矿坑排水造成大面积塌陷，如湖南恩江矿区共发生塌陷 4324 处，广东凡口矿区共发生塌陷 1600 多处，使道路、房屋等建筑遭受严重损失。北方煤田发生坑道突水 800 多次，淹井 200 多次，损失 30 多亿元，死亡 1000 多人，使 2000 万吨煤层无法开采。近年来矿区环境地质工作日益引起重视，特别对岩溶充水矿床的环境地质问题，进行了深入研究，取得许多重要成果。如由地矿、煤炭、冶金三个部共同进行的研究课题《中国北方岩溶地下水资源及大水矿区岩溶水的预测、利用与管理的研究》、已经全部完成。

三、环境地质工作的今后任务

由地矿部门所制定的《全国地质灾害防治工作规划纲要》中明确指出，我国地质灾害种类繁多、危害甚大、涉及面广，只有在统一规划下，依靠各部门的通力协作，才能把地质灾害的勘察、监测、防治工作搞好。《纲要》提出，当前要密切结合国土开发整治和国民经济规划的需要，以大江大河、交通干线、重要城市、重大工程、重要经济区和国土综合开发区为重点，统筹规划，合理部署，分工协作。其主要战略目标为：①到本世纪末，基本查明我国地质灾害的分布规律与发育特征，在此基础上提出防治对策；②加强对地质环境的监测，逐步建立和完善地质灾害监测站网及数据库系统，预测地质环境的可能变化；③系统总结我国地质灾害的类型、形成与发展规律，提出协调人类活动与地质环境的措施。

近 10 年来，我国环境地质工作虽然取得了显著成绩，并正在进一步扩大和深入，但目前主要的薄弱环节，是全国的监测系统还很不健全。《纲要》指出，地质矿产部门负有全国地质环境监测、评价和监督管理的职能，应承担对地质灾害工作组织协调的职责。各省（自治区、市）地矿部门，也应承担同样的职能与组织协调的职责。但目前由于地矿部门监测系统尚不健全，实际上还难以实行监督管理和组织协调的职责。

远在 1958 年，地矿部门通过在包头召开的全国地下水动态观测工作会议，就开始在各省（自治区、市）建立长期观测站，开展地下水动态观测工作。但长期来几起几落，进展缓慢。直到近 10 年来，大部分省（自治区、市）在原有基础上，先后建立了环境水文地质总站，动态监测工作又有新发展，重点是开展主要城市有关地下水过量开采、水质污染等方面的监测工作，和进行水资源评价与地下水环境质量评价的研究；个别城市如上海、天津等开展了地面沉降的监测工作，西安市开展了地裂缝的监测工作。但区域性的监测网尚未建立，有关重大地质灾害的监测工作，尚未有计划的开展。因此必须尽快制定一个建立和健全全国地质环境监测系统的全面规划。

根据前面提到的环境地质工作的 5 个方面，我想关于建立健全全国地质环境的监测系统，也应从以下 5 方面着手。

（1）建立各省（自治区、市）区域性监测网。当前要以重要经济区或国土综合开发区为重点，如京、津、唐地区，下辽河工业区，长江三角洲地区等，尽快建立、健全区域性监测

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

网。有些经济区是跨省区的，如哈长（哈尔滨、长春）经济区，就要建立两省联合的监测网。在各省（自治区、市）区域性监测网的基础上，地矿部应结合兄弟部门的各类监测网，组织建立全国性的地质环境监测系统。

（2）建立、健全重要城市的地质环境监测网。目前大部分省一级的或百万人口以上城市，基本上都已建立监测站，开展地下水的监测工作。今后应重点为水资源的管理与保护、地面沉降、海水人侵等专门问题的防治以及合理调整地下水开采方案服务。加强对名泉等旅游资源的监测、保护工作。逐步向环境地质问题比较严重的中等城市扩大工作范围。开展与城市安全有关的其它各种地质灾害的监测工作。例如兰州市对城市有严重威胁的黄土滑坡、泥石流沟、以及由于地下水位上升造成的黄土湿陷等问题，组织开展监测工作。目前城建、水利、卫生、环保等部门，也都在各大城市开展类似的监测工作。地矿部门应负责进行组织协调、统筹规划、分工协作，建立统一的监测系统。

（3）开展重大工程建设地质灾害的监测工作。例如地质灾害比较严重的山区铁路线，黄河、长江等大河、大江枢纽性的水电工程，以及诸如核电站等重要能源基地，都要有计划的建立监测网。这类监测工作宜以生产部门为主，地矿部门为辅，建立联合的监测系统，并纳入全国的监测系统。例如长江中上游，地矿部门可重点承担三峡地段的监测工作；地质灾害严重的宝成线，可由铁道部门建立全线的监测网，地矿部门可承担某些重点地段的监测工作。

（4）开展为防止生态环境恶化所进行的监测工作。重点为农灌区水资源的合理开发和旱、涝、盐、沙等自然灾害的综合治理和防止盐渍化、沙漠化扩大，建立监测网，为促进农业生产服务。当前应以黄淮海平原、内蒙、宁夏黄灌区，以及西北农垦区等为重点，以水利、农业部门为主建立监测网。地矿部门应配合有关部门，选择典型地区，开展监测研究工作。

（5）开展重大矿山地质环境的监测工作。过去地矿部门仅在勘探阶段进行矿区的水文地质工程地质工作，而很少在开采阶段继续进行环境地质调查。原则上在开采阶段的矿区监测工作，应主要由有关的矿业部门，如煤炭、冶金等部门负责；但地质部门也应选择地质灾害严重的重点矿区，开展监测工作，研究预测方法与治理措施。当前应以南方岩溶大水金属矿床与北方岩溶大水煤田为重点，按矿区建立监测网。

四、结 束 语

综上所述，今后环境地质工作的任务十分艰巨，必须加强科学研究，认真总结经验，引进国外先进技术，不断提高理论水平。当前应把重点放在城市环境地质工作方面，加强监测工作与水资源的管理。目前多数城市水资源紧张，主要与工业用水过多有关，应分析研究城市工业的合理布局与解决水源不足的各种途径。尽快开展城市固体废物处理的调查研究。组织编制新兴城市的环境地质图系。

进一步对各类专门性问题，如地面沉降、水质污染、地方病、滑坡、泥石流以及地裂缝等进行深人研究，包括治理措施的研究。加强建立监测系统，提高监测技术，开展预测预报。除水动态的监测任务外，还要开展有关各类地质灾害的监测工作，例如前已提到的三峡等重大工程的地质环境监测。有的城市如兰州的黄土滑坡与泥石流十分严重，也应尽快建立相应的监测系统。

地矿部门应以建立和完善区域性地质环境监测网，巩固和加强重要城市的监测系统，作

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

为当前主要任务。同时应积极对重大工程、重要农灌区，以及重要矿区等，配合有关部门，选择典型地段，开展监测工作，以便系统总结经验，改进工作方法，研究防治对策；并把各兄弟部门建立的监测网，纳入全国统一的监测系统。

目前技术先进国家，对大量监测数据已采取遥控办法，通过遥控系统，把所有信息输入到中央计算机，进行加工处理，自动制成图表加以贮存，以便进行科学管理。我国也亟需在建立各省（自治区、市）数据库的基础上，建立全国统一的数据库系统。今后应加强资料的分析研究，尽快开展预测、预报工作，对重大地质灾害问题及时提出治理措施。

现在国内开展地质环境监测工作的部门很多，虽然各部门监测的重点有所不同，但工作的重复现象仍很严重。因此亟需统一规划，搞好各部门间的分工协作；地矿部门理所当然应充分发挥监督管理和组织协调的职能作用，因此必须建立强有力的领导管理机构，并在经费方面得到充分的保证。

总之，今后环境地质的调查研究，要以促进人口、资源、环境三者之间的协调发展为宗旨。加强全球性环境变化预测与防治对策的研究，特别是海平面上升对沿海地区地质环境可能造成的影响，干旱地区气候变化，对水资源以及生态环境可能造成的影响等。大规模的经济建设，可能诱发各种地质灾害，仍是当前重大研究课题之一，如三峡、小浪底等特大工程，在施工期间以及完工以后，都可能出现难以预料的问题。应把研究重点放在趋势预测与治理措施等方面。三峡链子崖危岩与黄腊石滑坡的工程治理为发展“地质工程学”作出了良好开端。水污染仍是一个不可忽视的突出问题，酸雨的发展也日益严重，应把研究重点从污染机理转向趋势预测与控制管理，城市固体废弃物（包括核废料）的无害处理，也是防治污染不容忽视的一个重要方面。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

环境地质学的基本理论与研究领域

一、引　言

环境地质学，是地质科学中一门新兴的属于应用地质学范畴的一个分支学科。它是一门综合性很强，以研究人-地关系为主，介于地质科学与环境科学之间的一门边缘学科或综合性学科。根据国内外地质科学的发展趋势，与我国国民经济发展的需要，预计从90年代到下世纪初，将是环境地质学的一个重大发展时期。我国是一个拥有12亿人口的大国，经济状况和科学技术都相对比较落后。自改革开放以来，全国正处于高速度发展时期，但由于环境意识与管理意识薄弱，人类活动对地球表层系统的影响，及其可能引起的危害，已达到与自然变化相当的量级；在局部地区，甚至几倍于自然的变化。据不完全统计，由于各种地质灾害造成的经济损失，每年就达200亿元以上，其中大部分都与人类活动直接有关。如果包括对人体健康、生活环境与社会安宁等造成的影响，其危害就更无法估量。

如何处理和协调好人与资源、人与环境的关系，合理开发资源和保护改善环境，已成为我国的一项重要任务。基于地质环境在人口、资源、环境之间的基础性和具内在媒介的特点，因为环境地质学具有统一人口、资源、环境之间矛盾的部分功能，并起到协调人类社会与地质环境之间的平衡作用。所以环境地质学研究的主要目的，是研究人类或人类社会与其所处地质环境之间相互影响与相互作用的关系，并通过研究它们之间的内在联系与基本规律，达到合理利用、改造地质环境的目的。其基本任务，是应用地质科学与环境科学的基本原理和技术方法，研究岩石圈，特别是地球表面地质环境的变迁，对环境质量作出评价，预测环境变化趋势，提出防止和减轻地质灾害，保护和合理利用地质环境的措施。

我国地质环境复杂，有各种不同类型地区，如沿海三角洲平原、黄土高原、西北戈壁沙漠、西南岩溶高原、青藏高原，以及横断山脉的高山峡谷等，分别存在不同的环境地质问题，各具特色，在全球均具有典型意义。我国近20年来，在环境地质的调查研究方面，已取得大量重要成果，为今后工作奠定了良好基础．完全有条件和可能，创建具有中国特色的，并能进入国际前列的环境地质学。

二、环境地质学的基本理论

地质科学以研究岩石圈作为主要对象．环境地质学不仅要研究岩石圈，而且还要研究岩石圈与大气圈、水圈、生物圈的相互关系。在生物圈中，人具有主导地位。地质环境既受自然环境（主要包括气候环境、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，还需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，代表一个开放型的复杂巨系

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

统，必须应用现代科学的新理论、新学科，如系统论、信息论、控制论，与相应产生的系统科学、环境科学、信息科学、以及现代应用数学等为基础，建立新的理论体系。

环境地质学作为地质科学中一门新学科，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新的边缘科学。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基本理论，仍然是环境地质学的基本理论；其中特别是水文地质学与工程地质学的基本理论，如地下水的渗流理论与水文地球化学理论，动力地质学、土质学、土力学，以及岩体力学等的基本理论，更占主导地位。但要解决环境问题，地质科学的基本理论，还必须与环境科学中的基本理论，特别是环境质量的基本理论与环境趋势变化预测、控制与管理，以及有关监测系统的基本理论，相互溶合起来，形成新的理论基础。这就涉及到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，遥感、同位素等新技术，以及建立遥控监测系统、数据库系统、专家决策系统等手段，开展环境发展趋势的预测、预报。总之，环境地质科学是正在迅速发展中的一门新学科，需要在认真总结我国实际经验与吸取国外最新理论的基础上，创立具有我国特色的理论体系，逐渐形成一门完整的、系统的、独立的新学科。

三、地质环境与自然环境系统

对于人类来说，地质环境是自然环境系统中，影响人类生存与发展最重要的一个组成部分，因为它是人类生活与生产活动的主要场所。地质环境是由地壳组成的物质、地质结构和动力作用共同形成的一个复杂系统。主要包括地层、岩石、地质构造和地质资源等子系统。上述各子系统，是确定岩石或土层的物理力学性质，地基或坡面的稳定性，含水体的分布和储水性能，地震与火山活动，地壳升降运动，以及成矿作用等的基础条件；并主要反映在水文地质、工程地质环境与成矿环境等方面。地质资源除金属、非金属、石油天然气等矿产资源外，还包括水资源、矿水资源、地热资源、建材资源，以及旅游资源等，是属于自然资源的重要组成部分。

地质环境系统与自然环境系统，通过各种地质作用，即物质和能量的交换作用而互相影响，所以地质环境随着时间的推移，持续不断地发生演进与变化，并在长期演化过程中，逐渐建立相对的平衡与稳定。例如由于气候环境不同，对岩石造成不同程度的风化作用，直接影响岩石物理力学性质的变化；气候环境同样直接影响不同地区的水文地球化学特征。气候的纬度分带性既控制了生态系统，特别是森林植被分布的分带性，同时也控制了成壤作用、岩溶作用，以及地下水的分带性。在地貌条件控制下，高山或高原地区又反映明显的垂直分带规律。气候的季节性或多年周期性变化，也直接或间接影响水文地质、工程地质条件的周期变化。地壳上升运动能使侵蚀作用加剧，导致山坡发生崩塌、滑坡或泥石流等地质现象；相反，地壳的沉降运动促进河流淤积作用加强，如我国许多位处沉降带的三角洲平原，每年高速度地向海域伸展。西北内陆盆地由于强烈的相对升降运动，边缘高山地区降水及冰雪资源

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

丰富，形成强大的地表径流，在山前沉降带构成规模宏大的冲洪积平原，使地貌景观、水文地质工程地质条件及生态系统，都呈现明显的水平分带规律。受新构造运动控制的地震或火山活动，能使地貌或地质环境发生重大变化，给人类造成严重灾害。

四、地质环境与社会经济系统

地质环境系统通过人类各种活动，与社会经济系统发生紧密联系，并互相制约与互相影响。每个人都不能离开社会而独立生活，人类创立的社会经济制度和上层建筑的环境条件，就是社会经济环境。所以人类的环境，可分为自然环境与社会环境两大类。人类通过科学技术，可以改造和利用自然环境，同时也可破坏自然环境。例如人类由于工业生产，大量燃烧石油煤炭，使大气层中 CO_2 等气体浓度增高，形成全球性“温室效应”，影响气候环境。气候变暖又导致海平面上升，对沿海地区造成威胁。气温上升除上述人为因素外，可能同时存在自然因素，即气温的周期性变化。海平面上升除气候因素外，可能还同时存在地壳下沉的自然因素及与开采地下水造成地面沉降的人为叠加因素等。由此可见，地质环境变化在天然因素与人类作用的交叉影响下，是多么错综复杂。

现代科学技术的进步，大大推动了生产力发展，提高了人民生活水平。合理运用现代科学技术，按科学办事，这样不仅能促进生产，保护环境，还可以起到改善环境的作用。相反，如果违反自然界的客观规律，就会破坏自然环境，使国民经济建设与人民生活，遭受严重损失。

社会经济环境系统或称人工系统，主要包括：

（1）农业环境系统。人类应用现代科学技术，通过土地开垦、水利建设、施放农药化肥等人工措施，以发展农业生产。但往往由于乱垦、滥伐、滥牧或大水漫灌，损坏森林、植被，造成水土流失和土地沙漠化、盐渍化、沼泽化以及草场退化；或由于滥施农药化肥，造成土壤与水体严重污染，使自然环境和生态系统受到严重破坏。

（2）工业环境系统。随着工业的迅速发展，对人类环境的影响也最大；如果缺乏合理规划与科学管理，就会发生诸如三废污染、地基变形、水源枯竭、矿坑塌陷、坑道突水，以及崩塌、滑坡等地质环境恶化问题。

（3）城市乡镇环境系统。城乡规划或城市建设，都必须首先考虑水文地质环境与工程地质环境，保证足够的水源，防止三废污染，保证地面建筑以及各类地下工程的稳定与安全，有些城市应按地震烈度设防。滨海城市要特别注意防止由于开采地下水造成的地面沉降与海水入侵。

（4）交通运输系统。铁路、公路、航道、机场、海港等设施，必须根据环境地质条件，合理选线与合理确定码头或机场场址，保证路基、桥隧、机场、航道、码头等建筑物的安全与稳定，防止边坡变形、路基或码头沉降、航道淤塞，以及海浪、海潮冲刷等地质灾害。

由此可见，随着人口的剧增与国民经济的高速发展，以及科学技术的进步，人类对各类自然资源以前所未有的规模进行开发，既可使地质环境向良性循环发展，也可使地质环境恶化，造成各种地质灾害。所以环境地质学主要是研究地质环境系统与自然环境系统和社会环境系统相互之间的关系的一门科学（见图 1）。因此地质环境系统也可称为人-地系统，它既属于自然科学范畴，又包括社会科学的内容，同时又是环境科学的一个重要组成部分。综上所

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

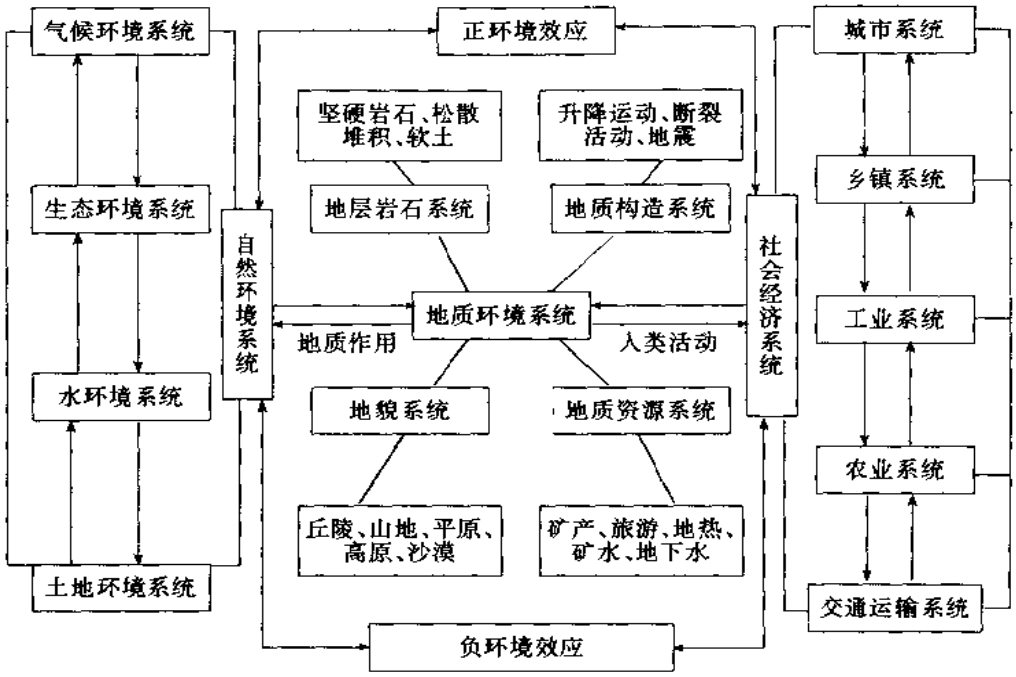


图1　地质环境系统结构框图

主要地质作用：侵蚀作用、剥蚀作用、溶蚀作用、淤积作用、风化作用、重力作用、地球化学作用、地应力作用
由人类活动造成的地质灾害：①主要由工程建设造成的：滑坡、崩塌、泥石流、地基沉陷、矿坑塌陷、坑道突水；②主要由水资源开发造成的：地面沉降、岩溶塌陷、地裂缝、海水入侵、水质恶化；③主要由农牧业活动造成的：沼泽化、盐渍化、沙漠化、草场退化、水土流失；④主要由三废造成的：大气、土壤与水体污染；⑤主要由围垦等原因造成的：洪涝灾害、河道港口淤积

述，环境地质学作为地质科学与环境科学之间的一门边缘学科，专门研究在天然条件与人为活动影响下，地质环境质量变化，对人类生活和生产的相互影响与相互制约的关系，并通过研究它们之间的内在联系与演变规律，应用现代科学技术，达到改造环境的目的，进而控制和消除有害物质作用，保护和合理利用地质环境，使其有利于人类生存和有利发展生产。

五、环境地质科学研究的广阔领域

现代科学的发展趋向，主要是向高度分化和高度综合两个趋势并进，这也是现代科技发展的重要特征之一。环境地质学就是一门高度综合性的科学。由于它的研究领域十分广阔，所以正向许多新的分支学科发展，形成一个环境地质科学体系。目前初具轮廓或正在发展中的分支科学，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地震工程地质学；⑥地震水文地质学；⑦城市环境地质学；⑧农业环境地质学；⑨矿山环境地质学；⑩历史环境地质学等。其中环境水文地质学，已有两本作为教材用的专著出版，并在有关院校建立了专门课程。环境水文地质学的迅速发展又进一步分化，向更低一级的分支学科发展，如区域环境水文地质学、污染水文地质学、医学水文地质学等正在逐渐形成。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、海水入浸、岩溶塌陷、固体废物处理等，都已在全球范围内逐渐形成新的专门学科。地面沉降、

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn