环境地球物理方法及其应用

——环境污染、灾害及地球物理场环境效应的监测与治理

崔森市　吴其斌　编著

30.2
13

地质出版社



ISBN 7-116-02499-9
9 787116 024991 >

ISBN 7-116-02499-9
P·1851 定价:25.00元

992236

环境地球物理方法及其应用

——环境污染、灾害及地球物理场环境效应的监测与治理

崔霖沛　吴其斌　编著

地质出版社

·北　京·

内 容 提 要

本书介绍了环境地球物理这一新学科的形成和发展、采用的方法和应用领域。目前，环境地球物理方法主要用于解决三个方面的问题：1. 地球物理场对环境和人体健康的影响；2. 环境污染的调查、监测和防治；3. 灾害的监测、预报和治理。本书对于从事环境保护、地球物理勘查及有关的科研和教学人员均有参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

环境地球物理方法及其应用——环境污染、灾害及地球物理场环境效应的监测与治理/崔霖沛，吴其斌编著. -北京：地质出版社，1997. 12
ISBN 7-116-02499-9

Ⅰ. 环… Ⅱ. ①崔… ②吴… Ⅲ. 环境监测-地球物理学-方法 Ⅳ. X830. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（97）第 26494 号

地质出版社出版发行
（100083 北京海淀区学院路 29 号）
责任编辑：陈军中 曹 玉
责任校对：田建茹

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销
开本：787×1092 1/16 印张：9. 25 字数：210000
1997 年 12 月北京第一版·1997 年 12 月北京第一次印刷
印数：1—1380 册 定价：25. 00 元
ISBN 7-116-02499-9/P·1851

序

应用地球物理学在矿产资源勘查领域，经过几十年的发展，取得了令人瞩目的成就。许多油田、天然气田、煤田和金属矿、非金属矿床的发现和扩大，都包含有地球物理勘探（物探）的贡献。今天，资源勘查已经离不开地球物理，有关的科学技术日臻完善和成熟。这主要是由于国家建设的强大需求，推动了大规模的勘查实践、不懈的探索和创新，特别是电子计算机和其他一些高新技术的引入和融合，使地球物理方法、仪器和数据处理解释技术不断改变面貌。与此同时，在环境保护和灾害防治领域，相比之下，应用地球物理学的发展比较滞后，除了个别领域（如地震预报）外，总的来说，应用范围不够广泛，投入工作量偏少，主导性工作尚待形成，地球物理可能产生的重要作用未被社会有关人士普遍认识。这种状况不仅我国存在，其他许多国家也存在，直到最近十年来才开始有较大转变。

西方一些发达国家，近年在环境方面的地球物理工作发展迅速、投入的资金显著增加，社会对解决环境问题的需求不断增长，需要解决的问题范围正在扩大、越来越多的地球物理学家从以服务于资源勘查为主转向到环境领域或二者并重。一些地球物理学者从八十年代初期就陆续著文呼吁应重视发展环境地球物理，指出环境领域是地球物理发展的新方向。此后，国际地球物理学术会议开始把环境地球物理列为专门课题。环境地球物理专著开始相继问世。也就是在这一时期，我国有关部门正在开展新一轮的“水工环”物探工作。一些学者专家或在专业会上发言呼吁，或著文章加以宣传，要求对环境领域的地球物理工作予以充分重视。其中，本书两位作者——崔霖沛和吴其斌同志，在介绍国内外有关环境地球物理的进展方面做了持续的、有影响的工作。1982 年地质矿产部召开物探工作会议，提出了扩大物探工作领域的重要方针。崔霖沛同志在 1983 年的“物探与化探”杂志上发表了“开辟物探方法应用的新领域”一文，将物探方法用于解决环境地质问题作为一个新领域加以介绍，其后，陆续发表有关文章，有些是崔、吴二同志合著的。文章所涉及的内容不断有所扩大和充实，学术观点也在发展。最近他们共同承担了中国勘查技术院下达的有关研究项目。本书可以说是他们多年有关工作的总结。

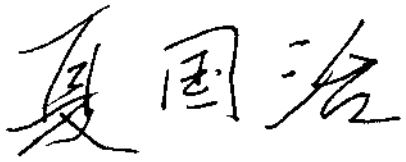
环境地球物理近些年来在我国逐渐受到较多的重视。中国地球物理学会成立了专门委员会，在年会和专题会上多次组织学术讨论。有些问题涉及到我国应用地球物理的发展方向。看来，我们既不能像过去长期那样，主要把应用地球物理的发展目标集中在资源勘查领域，也不能像当前有些发达国家的地学机构那样，主要致力于环境领域；而是要根据国情，既要继续更有效地开展能源和其他急缺矿产和水资源的勘查，开展工程勘察，又要积极开拓环境地球物理。因为，这是一个前景十分广阔的领域，而且用于资源勘查的许多方法技术较容易地可以移植过来，当然有些要加以改造和提高。

环境地球物理虽然在过去已经开展了一定的实际工作，但总体上当前还处在发展的初始阶段，需要更多的实践和探索，不断提高技术水平，扩大应用范围，提高质量和效益，扎扎实实地为国家的环境目标做出应有的贡献。在此基础上，通过百家争鸣，逐渐完善其学

CAE25111

科建设。

当前迫切需要从普及和提高两个方面多做努力，需要有更多的文章和专著发表。崔、吴二位同志的新作“环境地球物理方法及其应用”，从方法和应用两个方面的结合上，进行了比较系统的论述，并尽量注意了环境领域的特殊性。在目前有关著作比较缺少的情况下，我知道了本书即将出版，怀着喜悦的心情，写了以上这些话。



1997.10.15

前　言

80年代中期，环境地球物理开始形成一个单独的学科。随着世界人民环境保护意识的加强和环境保护工作的快速发展，环境地球物理的研究和应用正处在一个蓬勃兴起的阶段。地球物理方法在环境监测和治理中可以发挥重要作用，但过去由于学科和部门之间相互不了解，从事环境保护工作和从事地球物理勘查工作的人员都并不清楚地球物理方法在环境保护工作中可以发挥什么作用。本书试图在环保人员和地球物理人员之间架起一座桥梁，为环保人员增加一件得力的工具，为地球物理人员开辟一个新的工作领域。

大部分过去用于矿产勘查的地球物理方法同样可以用于环境勘察，但由于勘察对象的改变，具体的方法、技术指标和工作方式还是有所不同。有些任务是传统的地球物理方法无力完成的，所以近年来也发展起一些专用于环境和工程勘察的新方法。本书既介绍了用于环境勘察的老方法；也介绍了那些专门发展起来的新方法。通过大量的国内外实例，介绍了环境地球物理应用的领域。概括起来说，包括三大方面，即研究地球物理场的环境效应；环境污染的监测和防治；天然和人为灾害的监测和防治。最后还对环境地球物理的发展方向作了展望。用地球物理方法研究天然地震和全球变化也是环境地球物理的重要方面，但鉴于在这些方面已有许多专著，在本书中不再赘述。

本书第二章和第五章的第一节、第二节由吴其斌编写，其余部分由崔霖沛编写。由于作者水平有限，再加上环境地球物理发展很快，难以掌握全面情况，不当之处欢迎读者批评指正。

本书为中国地质矿产信息研究院“环境地球物理”调研项目的成果。本书形成的一些基本思路是与中国地球物理学会环境地球物理专业委员会的领导和多位委员的指导、启发是密不可分的。本书承蒙中国地球物理学会副理事长、地质矿产部原副部长夏国治先生在百忙中作序，作者在此表示衷心的感谢。在本书的准备编写和编写过程中，得到了地矿部高容中心孙文珂教授级高级工程师，地矿部科技司冯昭贤教授级高级工程师、高平高级工程师，中国地质勘查技术研究院刘士毅总工程师、宋宝春副总工程师、莫根生副总工程师，地矿部物化探研究所赵经祥副总工程师、陈德志高级工程师的关心和指导。中国地质矿产信息研究院工家枢副院长、吴传璧副院长、施俊法副研究员、刘树臣副研究员对本书的出版给予了支持和帮助。张尔平工程师清绘了所有的图件。作者一并致以由衷的感谢。

目　录

序

前言

第一章　总论……（1）

第一节　环境科学的形成与发展……（1）

第二节　我国环境状况及环境保护工作的目标……（2）

第三节　环境地球物理学的定义及其研究的内容……（4）

第四节　环境地球物理的历史、现状和作用……（6）

第二章　环境地球物理工作方法……（8）

第一节　概论……（8）

第二节　电法……（9）

第三节　地震、声波方法……（19）

第四节　放射性测量方法……（24）

第五节　重力测量……（27）

第六节　磁法……（29）

第七节　测井和井中物探……（30）

第八节　地球物理层析成像技术……（35）

第三章　地球物理场对环境的影响及其监测……（38）

第一节　天然放射场……（38）

第二节　天然电磁场……（59）

第三节　人工弹性波场……（63）

第四章　环境污染的监测和防治……（67）

第一节　放射性污染的监测与防护……（67）

第二节　地下水和地表水污染的监测与治理……（87）

第三节　地下固体废料污染的监测和治理……（97）

第四节　大气污染的监测……（104）

第五章　天然和人为灾害的监测和防治……（106）

第一节　滑坡调查和监测……（106）

第二节　岩溶、洞穴及其引起的地面陷落的调查……（111）

第三节　山崩的防治……（115）

第四节　地裂缝调查……（117）

第五节　泥石流的治理……（118）

第六节　土地盐碱化调查……（118）

第七节　沙漠化的治理……（119）

第八节　旱灾的治理……（121）

第九节　地面沉降的监测…… (121)
第十节　煤层自燃的监测…… (122)
第十一节　采矿过程有关灾害的监测与预防…… (123)
第六章　展望和结论…… (128)
参考文献…… (131)
与环境地球物理有关的英文缩写…… (136)

Contents

Preface

Prelude

1 Introduction …… (1)

1.1 Formation and Development of Environmental Sciences …… (1)

1.2 Environmental Status and Targets of Environmental Protection in China …… (2)

1.3 Definition and Contents of Environmental Geophysics …… (4)

1.4 History, Current Situation and Role of Environmental Geophysics …… (6)

2 Techniques of Environmental Geophysics …… (8)

2.1 General …… (8)

2.2 Electrical Methods …… (9)

2.3 Seismo-Acoustic Methods …… (19)

2.4 Radiometry …… (24)

2.5 Gravimetry …… (27)

2.6 Magnetics …… (29)

2.7 Logging and Borehole Geophysics …… (30)

2.8 Geophysical Tomographic Imaging …… (35)

3 Environmental Effects of Geophysical Fields and their Monitoring …… (38)

3.1 Natural Nuclear Radiation Field …… (38)

3.2 Natural Electromagnetic Field …… (59)

3.3 Artificial Elastic Wave Field …… (63)

4 Environmental Pollution Monitoring and Remediation …… (67)

4.1 Radioactive Contamination Monitoring and Remediation …… (67)

4.2 Ground and Surface Water Contamination Monitoring and Remediation …… (87)

4.3 Monitoring Contamination by Buried Solid Waste and Its Remediation …… (97)

4.4 Monitoring Atmospheric Pollution …… (104)

5 Monitoring Natural and Artificial Disasters and Their Remediation …… (106)

5.1 Landslide Investigation and Monitoring …… (106)

5.2 Investigation of Karst, Cavity and Their Related Surface Collapse …… (111)

5.3 Precautions against Rockfall …… (115)

5.4 Investigation of Geofractures …… (117)

5.5 Remediation of Mudflow …… (118)

5.6 Investigation of Land Salinization …… (118)

5.7 Remediation of Desertization …… (119)

5.8 Remediation of Drought …… (121)

5.9 Surface Subsidence Monitoring ····· (121)
5.10 Coal Spontaneous Combustion Monitoring ····· (122)
5.11 Monitoring Mining-Related Disasters and Remedial Measures ····· (123)
6 Prospects and Conclusions ····· (128)
References ····· (131)
Abbreviations Associated with Enviroumental Geophysics ····· (136)

第一章 总 论

环境科学所研究的环境是指人类赖以生存和发展的物质条件的总体，包括自然环境和社会环境。自然环境是直接或间接影响到人类的一切天然形成的物质及其能量的总和，迄今地球表层大都受到人类活动的影响，原生的自然环境已所剩无几。社会环境则指人类在自然环境的基础上，通过长期有意识的社会劳动所创造的人工环境。人类通过生产和消费活动，从自然界获取生存资源，又将经过改造和使用的自然物和废弃物还给自然界，从而参与了自然界的物质循环和能量变换过程。人工环境又可以划分为农业环境、工业环境、城市环境、交通运输环境等。《中华人民共和国环境保护法》对环境的概念作了如下的表述："本法所称环境，是指影响人类生存和发展的各种天然的和经过人工改造的自然因素的总体，包括大气、水、海洋、土地、矿藏、森林、草原、野生生物、自然遗迹、人文遗迹、自然保护区、风景名胜区、城市和乡村等。"

环境科学从广义上讲是研究人类周围环境因素及其与人类关系，以及环境质量和环境保护的科学；从狭义上讲，它主要研究由人类活动所引起的环境质量的变化，以及保护和改进环境质量问题。

环境科学的基本任务是，通过对"人类-环境"系统的分析和综合，研究其对立统一关系，并将其调控到最优化的运行状态。

环境科学运用自然科学和社会科学的有关理论、技术和方法来研究环境问题，形成与有关学科相互渗透、交叉的许多分支学科，是一门综合性很强的科学，包括环境地学、环境生物学、环境化学、环境物理学、环境工程学、环境管理学、环境经济学、环境法学等。

环境地学是以"人类-地球"系统为对象，研究它的发生和发展、组成和结构、调节和控制、改造和利用。它的任务是利用地学信息来解决人类由于利用天然或经过改造的环境因素所带来的矛盾，尽可能减少环境恶化或尽可能创造有利的环境条件。至于环境地球物理学则是环境地学的一个分支，或者说是环境科学与地球物理学之间的边缘学科。

第一节 环境科学的形成与发展[1]

随着人类社会的不断发展，人类的活动对自然环境的影响愈来愈大，这种影响一旦超过了自然环境自身恢复平衡的能力，就会使长期形成的动态平衡遭到破坏，甚至出现对人类有害的不可逆变化。在人类影响自然环境的各种因素中，人口增长和科学技术能力的增强是最根本的因素。目前世界人口已达 50 亿，预计 21 世纪的中期将突破 100 亿。要维持如此众多人口的生存和发展，如果更多地向自然索取，随之也会带来更多的资源破坏和环境污染问题。另一方面，随着科学技术的飞速进步，人类改造自然的能力愈强，自然环境

[1] 本节部分内容引自毛同夏、石宏仁等 1994 年编写的未公开出版的研究报告。

变化就愈快。据估计，目前发达国家人均每年消耗 20 t 地球物质，仅此一项就可以看出人类对自然的改造能力何等巨大。

世界经济从 50 年代起迅速发展，人口急剧增加，城市恶性膨胀。不少国家以对自然资源的掠夺性开发来支持经济发展，环境问题变得空前严重。从 60 年代起，发达国家的有识之士率先兴起了一场声势浩大的环境保护运动，其目标是防治污染、保护生态环境。这场运动促使有关国家先后立法，建立全国性环境保护机构并制定全国性的环境保护规划。结果，到 70 年代初，在许多自然和社会科学学科纷纷致力于解决环境问题的基础上，形成一门独立的又是多学科综合的环境科学。

80 年代开始的新一轮环境运动强调人口、资源、环境与经济的协调发展，这包括两层含义。一是在整体思想的指导下开展国土区域规划，在环境问题上不限于污染防治，而是综合考虑各种环境要素，目标主要是建立良性环境。二是强调环境问题的跨国性乃至全球性。环境问题成为国际社会关注的热点。在这样的背景下，1992 年 6 月，联合国在巴西召开了世界环境与发展首脑会议，这次大会制定了《21 世纪议程》，提出了在发展经济的过程中，保护全球环境的目标，第一次将发展与环境作为一个整体对待，可持续发展的战略思想得到了举世公认。

《中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书》指出："走可持续发展之路，是中国在未来和下一世纪发展的自身需要和必然选择。"

传统观念认为，发展只意味着经济增长。人们盲目追求产值，结果不仅造成经济发展的失衡，还造成资源浪费、环境污染、生态破坏等问题。当今的世界，已经进入了再不能片面提倡改造自然、而要全面协调自然、均衡发展的新阶段。

当前社会的生产和消费活动，一方面把资源变为人们所需要的各种产品，改善着人类的生存环境；另一方面由于科技水平的限制，又不能将其全部转化为有用产品，未被利用的那一部分便作为废料投入到环境中去，其中很大一部分成为环境污染物。地球上的资源和环境对污染物的承载能力都是有限的，过度地开发资源、过量地排放废物给环境造成的影响近 30 年比有史以来的任何时期都严重。

可持续发展战略是充分考虑到自然资源的长期供给能力和生态环境的再生能力。环境不但是许多自然资源的赋存场所，而且构成环境的要素，如水、土地、大气，本身就是人类生存和发展所必需的资源。因此，可以说环境是可持续发展的基础。可持续发展战略将保护生命支持系统、保持生物多样性和生态系统、保护自然资源的可持续利用作为重点。自然资源的可持续利用包括两个方面：对不可再生资源要从科技进步着手，提高资源利用率，减少开采量，寻求代用品的速度要快于资源枯竭的速度；对可再生资源，主要从保护入手，将开发利用速度保持在资源的再生速率之内，同时保护资源再生所依赖的生态系统。

第二节　我国环境状况及环境保护工作的目标

我国生态环境恶化问题早已受到国家有关部门的重视，也作出很大努力企图扭转这一局面。遗憾的是，全国生态环境恶化的趋势不仅未能扭转，反而进一步加重。例如，全国水土流失面积已从 50 年代的 150 万 km^2，增加到 90 年代初的 179 万 km^2。沙质荒漠化土地扩延的速度也从 60～70 年代每年约 1560km^2，增加到 80 年代每年约 2100km^2，草原退化、

物种减少也愈演愈烈。我国还是一个自然灾害多发的国家，由各种自然灾害造成的年直接经济损失据估计在300～500亿元左右，仅地质灾害每年带来的直接经济损失平均即达100亿元左右。

我国环境污染防治技术还比较落后，主要表现在工业生产的技术装备落后，管理水平低，使单位产品的能耗、物耗高。如我国每生产1 t纸耗水450 t，而发达国家才50～200 t；每生产1 t钢我国耗水90 t，而发达国家才40 t，最低者甚至到5 t。我国总能源消耗量与日本大致相同，但工业产值仅相当日本的1/4。资源、能源的过量消耗，必然带来单位产品产污量的增加。据统计，我国某些工业单位产品产污量高出发达国家几倍、甚至几十倍，工业三废（废水、废气、废渣）的综合利用率和治理率也很低。如1990年我国工业废水处理率为32.2%，城市污水的处理率仅为3.4%。全国工业固体废料（废渣）产生量1992年为6.2亿t（不包括乡镇企业），其中有害废料占10%左右。在产生的废渣总量中，储存量约2.7亿t，处置量约1.4亿t，排放总量2587万t，排入江河湖海的量1083万t。到1992年，废渣的历年累计堆放量约59亿t，占地5.4亿m^2（包括耕地约3700万m^2）。

应当看到，我国近年来在治理环境污染方面已取得很大成绩，如城市的煤烟型污染明显减轻、江河湖海内的重金属污染基本得到控制。与此同时也出现了一些新的问题，如大中城市、甚至小城镇的水源出现有机污染；大城市，特别是沿海大城市机动车尾气污染日益突出；沿岸和近海海洋环境油污染范围扩大，赤潮问题严重。

根据我国环境现状以及我国经济发展的战略总目标，国家环境保护局和国家计划委员会提出了中国2000年环境保护的总目标："环境污染基本得到控制，重点城市的环境质量有所提高，自然生态恶化的趋势有所减缓，逐步使环境与经济、社会的发展相协调，为实现生态系统良性循环，城市环境清洁、优美、安静的远景目标打下基础。"

在环境污染控制方面，到2000年，工业废水排放量控制在300亿t左右，工业废水处理率达到84%；城市污水集中处理率达到20%左右。二氧化硫排放量控制在2100～2300万t；烟尘排放量控制在1400万t；工业粉尘排放量控制在700万t以下；工业废气处理率达到90%；城市居民燃气气化率达到60%；集中供热面积达到4.7亿m^2。工业固体废物综合利用率达到45%～50%。交通干线噪声等效声级维持1990年水平，城市环境噪声达标率比1990年提高15～20个百分点。

在自然生态保护方面，到2000年，造林面积达到35.93万km^2，封山育林约8.98万km^2，全国森林覆盖率达到15%～16%。1991～2000年，新增治理水土流失面积32万km^2。到2000年，建设占用耕地控制在3.3万km^2左右，改造中低产田不少于33万km^2，生态农业推广面积达到6.5万km^2左右。全面划定的各类自然保护区面积达到70万km^2，约占国土面积的7%。

中国幅员辽阔，自然环境差异大，各地面临的突出环境问题不尽相同，但就全国总体而言，优先考虑的七个环境问题包括：(1) 水污染（以有机物污染为主）；(2) 城市大气污染（以总悬浮物和SO_2为主）；(3) 工业有毒、有害废渣和城市垃圾对大气、水和土地的污染；(4) 北方地表水资源相对贫乏，许多城市严重缺水；(5) 分布广泛而严重的水土流失；(6) 森林覆盖率低、天然林面积小，林木蓄积量相对较小，草原退化严重；(7) 原生环境面积缩小，物种资源减少。

我国是一个发展中的大国，环境问题十分复杂和严重，而经济和技术实力有限，因此

环境保护问题必须突出重点。从环境污染防治来看，80%以上的污染物排放于城市之中，因此防治城市污染无疑是环境保护工作的重点。中国目前有约600个城市，其中国家作为重点来抓的包括直辖市、省会等52个城市，它们的国民生产总值占全国的36.1%，工业废水排放量占全国的30.1%。在城市诸多环境问题中，水、气、渣、噪声污染最为突出，尤以水、气为甚。在工业污染中，重点抓住污染负荷分别占全国65%、75%和85%的3000、6000、9000家企业。从自然生态保护来看，工作的重点是生物资源的保护和合理开发，生物资源能否得到合理利用直接影响到土壤和水资源的保护，生物资源保护和合理开发重点是森林的保护和发展，草原的科学管理和经营。自然生态保护的另一个重点是生物多样性的保护，当前中国主要是通过建立各种类型的自然保护区来实现这一目标。

第三节　环境地球物理学的定义及其研究的内容

关于环境地球物理学，目前未见公认的严格定义。澳大利亚的R. J. Whiteley认为："环境地球物理学是有关寻找、圈定和监测任何成因的地下灾害的学科。"这里的任何成因是指既包括天然成因，也包括人工成因。原苏联地质部的K. И. Сычев则提出："环境地球物理学是研究地球物理场（重力场、地震波场、电磁场、核辐射场等）与天然环境的要素（首先是人）的关系的学科"。归纳前人提出的概念和国内外的研究、应用情况，笔者认为，环境地球物理学是利用地球物理学的理论和方法来研究地球物理场和地球物质的物理性质与人类生存环境（包括天然和人工环境）之间关系的学科。这种关系具有双重的含义，一方面地球物理场对人类的生存环境，对人体健康有着重要的影响；反过来人类的工程-经济活动又使地球物理场和地球物质的物理性质发生明显的变化。另一方面，由于人类所处的天然和人工环境的变化会导致地球物质物理性质和地球物理场的变化，所以人们可以利用地球物理方法来监测环境的变化并为制订环境保护措施提供依据。

据了解，环境保护部门所关心的环境问题主要归结为以下方面（表1--1）。

表1--1　环保部门关心的主要环境问题

介质污染	物质流污染	水 大气 固体废弃物 放射性物质
	能量流污染	贯穿（核）辐射 电磁辐射 噪声
资源破坏 （生态环境恶化）	森林减少 草原退化 植被破坏 物种减少 湿地消失 土地盐碱化 土地沙漠化 水土流失 土壤肥力下降 其它（如地质灾害等）	

由表1—1不难看出，这里的能量流污染实际上指的是天然和人工地球物理场对环境的影响，物质流的污染使水、大气、土壤、岩石的物理性质发生变化，因而可以用地球物理方法进行探测。在生态环境恶化的监测方面，遥感技术已经得到广泛应用，其中有些问题的监测和治理，也可以采用地球物理方法。因此可以认为，环境地球物理的研究和应用大体归结为以下三个方面：（1）研究地球物理场对人类生存环境和人体健康的影响；（2）用地球物理方法监测环境污染（包括水、固体废弃物、大气和放射性物质的污染）及其治理过程；（3）用地球物理方法对生态环境恶化和灾害进行监测、预报和治理。

环境地球物理工作按其规模和范围又可分为区域调查和场地调查两大类。区域环境地球物理调查主要是进行全国性或大区性的环境评价，为国民经济的总体布局及生态环境恶化和环境污染的总体治理方案提供依据。场地调查则为解决具体地区、厂矿企业、工程项目等的环境问题服务。

有的区域性环境地球物理调查目的和方法都是单一的，如原苏联开展的全国城镇放射生态调查，目的是了解区域放射性污染状况，方法是航空和地面γ能谱测量。但大多数区域性环境调查，都是多学科的，包括环境地球物理在内，其目的也往往是综合性的。例如，所有环境地质调查的基础是环境地质填图，它是一项涉及全部国土的系统性工作，分为小比例尺（1∶100万～1∶50万）——用于查明地质环境的总况和动态，中比例尺（1∶20万）——用于对比研究重要地区地质环境在几十年过程中的变化，大比例尺（1∶5万或更大）——用于详细研究中心工业区和大城市的生态地质环境。这类填图的目的是长期预测地质环境的变化及其对生态环境的危害程度，以便实现对地区的合理开发、规划人类经济活动的远景和保护人体健康。环境地质填图是新的研究方向，在环境地质图上要能够反映出地质环境与人类经济活动的相互关系，一方面反映出人类活动对地质、地球物理、地球化学和水文地质状况产生的不良后果；另一方面反映出地球物理场的变化和地质作用对人类及其劳动产品造成的负面影响。

通过环境地质填图，编制的图件包括如下内容：（1）地质环境组合及其系统描述，包括稳定性评价、自净和复原能力，列举危及生态环境的因素；（2）天然和人工环境的变化及其特征；（3）人工作用源；（4）天然和人工地球物理、地球化学异常，污染水体，大气污染物排放点，受到地质和水文、气象作用影响的危险地段，断层等；（5）天然遗迹，值得保护的目标和地区，矿泉疗养资源等。

环境地质填图采用一套包括地球物理方法在内的综合调查方法。在原苏联1∶20万～1∶10万和1∶5万～1∶2.5万地质环境调查和制图的要求中对所使用的地球物理方法及其解决的问题做了明确的规定。

场地环境地球物理调查指的是为解决具体场地的环境问题而开展的数据采集、解释和模拟的综合工作。在环境治理工作开始之后，场地调查工作仍然不会停止，因为需要进一步监测和了解治理过程的进展。不论场地指的是加油站、垃圾场、有毒有害废料堆积场或任何需要解决环境问题的场地，只要探测的目标与背景具有明显不同的地球物理特征，地球物理方法都可以作为一种遥测手段，获得场地调查所需的信息。

第四节　环境地球物理的历史、现状和作用

早在70年代，国外便已出现报道环境地球物理工作的文献，只是当时工作量较小，尚未形成独立的分支学科。1985年美国勘查地球物理学家协会（SEG）在统计年度工作量时，第一次把环境地球物理作为一个单独科目划分出来。因此，可以把1985年看作是环境地球物理的奠基年。1988年美国的S. H. Ward教授在犹他大学率先开设了环境地球物理课程，1990年由他主编的三卷本《土工和环境地球物理》出版，被加拿大滑铁卢大学的J. P. Greenhouse教授称为是里程碑式的著作。此外，从1988年起美国每年召开一次“地球物理用于工程和环境问题讨论会”（SAGEEP），并在1992年年会上宣布成立“环境和工程地球物理协会”（EEGS）。1993年秋SEG成立了“近地表地球物理委员会”（NSG），其活动范围既包括水文、工程、环境，又包括固体矿产地球物理。同年，在瑞士洛桑召开了国际性的“地球物理与环境”会议。

环境地球物理总的来说，目前处于一种初创的艰难时期，但前景是乐观的。由于世界许多国家对环境保护的重视，环境行业逐步发展，今后还会有更大的发展。美国科罗拉多矿业学院的P. Romig教授从大专院校学生就业的角度说明了环境地学的发展，他指出过去10年中，北美地区地学专业总入学率降低1/3，但从毕业生的就业分布来看，1992年46%进入环境行业，12%进入石油业，9%从事教学，33%继续读研究生；1993年这一趋势仍在继续，毕业生有61%投身环境工作，只有8%在石油界就业。再从SAGEEP的参加人数来看，1988年的首次会议有100多人参加，到1995年发展到600人左右。环境地球物理今后发展的潜力很大，例如美国能源部接到指示，要在2019年前清理其9000个污染严重的场地，并专门成立了“环境恢复和废料管理办公室”（ERWM），后者1993年的预算占了能源部总预算的1/3。20年的场地清理总费用达1500亿美元，其中约1/4用于遥测性场地调查。ERWM人士已认识到，当地下不均匀时，仅靠按网格打钻来探测污染物不能满足要求，还要有遥测污染物和岩性变化的方法，否则会漏掉污染源。目前的问题在于，地球物理的作用尚未能被许多制定环境保护法规的官员、场地负责人和更高层决策人士了解。在北美出现的另一问题是，大量环境地球物理工作是由不具备地球物理专业资格和经验的人员完成的。同时美国环保署也认识到并非所有的地球物理方法都适合于研究废料堆放场地——美国的一项主要环境问题，为了保证地球物理数据的质量、使工作规范化，环保署试图确定哪些方法是有效的。出于类似的考虑，美国地质调查所，为了帮助非地球物理人员将地球物理方法用于有害废料场地研究，专门设计了指南性的软件。

我国的环境地球物理工作兴起于80年代中期，工作量较少，也比较分散。与西方的环境地球物理热点在固体废弃物探测和地下水污染监测不同，我国的环境地球物理工作偏重于地质灾害的监测方面。中国地球物理学会在1993年2月成立了环境地球物理专业委员会。

在解决环境问题时，地球物理方法具有独特的优点，是其它方法无法替代的。与传统的打钻取样分析的方法相比，它能从地面遥测地下介质特性的三维变化，所以它的效率较高、成本较低，此外，它的探测范围比钻孔的直径要大得多，因此更具有代表性。钻孔不可能布得太密，尤其在研究地下液态污染物时，要尽可能少打钻孔，以免造成层间的交叉

污染。利用地球物理方法可以在很大程度上减少钻探的工作量，降低调查的成本，缩短调查的周期。

表 1 2 对一个应用实例的成本-效益分析表明，使用地球物理方法减少钻探-取样工作量，使工作的总成本降低了 73%，其中 A 项中列出的为计划数字，B 项列出的为实际费用。

表 1 -3 列出打 1 m 钻孔的费用可以完成多少地球物理测量工作量。

表 1 2 在一个面积 30000 m² 的埋藏有害废料场地上进行环境调查时使用和不使用地球物理方法成本的对比

A. 不使用地球物理方法的调查成本	
330 个冲击浅孔，深 6 m，网度 6m×6m，每米成本 20 美元	39600 美元
18 个取芯钻孔，深 25 m，网度 25m×25m，每米成本 150 美元	67500 美元
总计	107100 美元
B. 使用地球物理方法的调查成本	
磁测，1200 点，网度 5m×5m，每点成本 3 美元	3600 美元
电剖面，300 点，网度 10m×10m，每点成本 3 美元	900 美元
电测深，48 点，L=100m，每测深点成本 120 美元	5760 美元
地震折射，500 测线米，每米成本 8 美元	4000 美元
冲击浅孔，30 个，深 6m，每米成本 20 美元	3600 美元
取芯钻孔，3 个，深 25m，每米成本 150 美元	11250 美元
总计	29110 美元

表 1-3 用打 1 m 钻孔的费用可完成的地球物理测量工作量

地球物理方法	点 数	测线米	面积①/m²
磁测	40～250	100～300	200～450
电剖面法	50～100	100～250	200～400
电测深法	2～4	10～30	20～100
激发极化法	1～4	20～30	50～100
自然电场法	25～75	100～300	200～500
电磁填图、甚低频、瞬变电磁	50～100	100～250	200～600
地质雷达	连续	100～150	50～70
地震折射法	1～3	30～50	50～80
地震反射法	1～0.3	12～15	30～50

①根据不同的点距计算。

第二章　环境地球物理工作方法

第一节　概　　论

勘查地球物理方法（简称物探）是本世纪初发展起来的一种勘查方法，它通过观测和研究各种地球物理场的变化来解决各种各样的地质问题。物探方法最初用于金属与非金属、石油与天然气、煤田等矿产资源的勘查，并逐步发展形成了金属物探、石油物探和煤田物探。在过去的数十年中，它们为矿产资源的勘查作出了巨大的贡献。

近20年来，经济建设的迅猛发展，极大地促进了物探方法在水文地质、工程地质和环境地质等方面的应用，并且发挥着越来越重要的作用。在水文、工程和环境调查中应用的物探方法统称为水工环物探，而用于解决各类环境调查与监测问题的物探方法叫做环境物探方法。就方法本身而言，环境物探与水工物探之间无明显的区别，而且很多方法都是通用的，它们即可以用于环境调查，又可以解决水文和工程地质问题，所以，一般情况下，国内外研究人员把水工环物探方法列入同一范畴。

以往用于能源和矿产勘查的绝大多数物探方法，如电阻率法、激发极化法、电磁法、自然电场法、地震方法、放射性方法、磁法、重力、测井和井中物探等，在不同程度上均可用于环境勘察工作。然而，鉴于勘查对象与应用环境的明显变化，环境物探与金属物探、石油物探相比，具有其自身的特点如下。

（1）由于矿产勘查与环境调查的驱动力不同，前者是获得经济效益，而后者是保障人身安全和健康，故对它们的要求是不尽相同的，实际上对环境物探的要求要高得多。例如，在一个地区进行矿产勘查时，即使不能找到全部矿藏，只发现其中的一部分，其成绩也是很可观的；而在寻找埋藏的有毒废料容器时，如果只发现了其中的一半，而另一半被漏掉，那么后果会是严重的，此项调查只能认为是失败的。

（2）环境物探所涉及的方法技术问题以解决地表下浅层问题居多，它所要求的探测深度一般为几米至几十米，而要求达到的垂向和横向分辨率却相当高，有时要求达到厘米级。例如，探测地下埋藏的有毒废料容器和未爆炸的炸弹等。

（3）因为要解决的环境问题较多地集中在工业中心和大城市，所以作业时往往受到人为噪音的干扰，如地下管道（线）、电缆线、高压线、铁路等引起的磁干扰、电磁干扰、工业交通振动的干扰，因此需要采取相应的有效措施压制各种干扰。另外，环境调查中野外作业空间（范围）通常较小，这就要求物探方法具有抗干扰性和灵活性。

（4）环境调查的任务往往要求开展不同时间的动态地球物理测量，例如监测污染流随时间的扩展，了解治理过程中的进展及其效果，监测灾害的发展以及预测其发生的时间等，有时甚至要求建立长期的监测站网。

（5）环境调查所涉及的问题各式各样，要求所获得的信息不仅包括地下探测目标的形

态特征，而且还要求了解其力学和结构性质。例如，进行地下水污染调查时需要了解岩石（土）的孔隙度，灾害调查时需要查明岩体的稳定性等等。

以上情况表明，尽管环境调查中采用的物探方法大多数仍然是在矿产勘查中采用的传统方法，但在具体的工作方法和技术上还是有很大差别，尤其是有些任务是传统物探方法无力完成的。近10年来发展起一些独具特色的、专用于环境和工程勘察的新方法，如地震面波法、高密度电阻率法、地质雷达、天然声辐射测量和天然电磁辐射测量等等。

为适应浅层勘察、提高分辨率和抗干扰能力以及某些特殊需求，一些环境物探方法在仪器设计、数据采集和处理方面也作了改进，并研制和开发出某些专用的仪器设备。如加拿大Scintrex公司1993年推出的ENVI-MAG质子磁力仪以及美国Geometrics公司1995年研制的G-858铯光泵磁力仪，主要用于解决环境和工程问题。同时，仪器设备的自动化、智能化和轻便化以及数据采集、记录、存储、处理、解释和显示等的一体化大大提高了工作效率。

与金属物探、石油物探一样，环境物探方法的使用也必须具备一定的地质和地球物理前提，也同样存在着多解性的问题。因此，在方法的选择上，应根据任务和条件的不同，选用不同的方法和方法组合，强调综合原则，通过各种物探方法与地质、化探等的有机结合，使地质解释更符合实际，从而提高物探方法的应用效果。同时，还必须考虑方法的有效性、使用的简便性和成本。有些传统的方法，如直流电阻率法、电磁法、自电法、放射性方法，由于使用简单、成本低且具有一定的效果，因此往往得到较多的应用。

以下各节就环境物探的不同方法（电法、地震-声波法、放射性测量法、重力、磁法、测井和井中物探）进行论述。对于同一种方法，当应用于不同领域时，其方法原理虽然相同，但由于工作目的和探测对象的不同，在工作方式上往往有较大的差异，并形成各自的特点。因此，在论述各种方法时，以方法在环境领域中的应用为出发点，对其原理、工作方法、资料处理和解释以及可能的应用作一概略的介绍。另外，对某些方法的新仪器也相应作了简介。

80年代在地球科学领域内发展起来的地球物理层析成像技术正在逐步成为水工环浅层地质调查的有力手段。利用地震波传播速度和衰减系数作为参数的地震层析成像和利用电磁波及电阻率的两种层析成像已用于解决浅层地质问题。在本章最后概述了这一新兴的技术。

第二节　电　　法

电法是利用岩土介质的各种电性差异，通过观测和研究人工建立的或天然存在的电磁场空间和时间分布规律，以勘查地质目标和解决地质问题的一类勘查方法。它也是勘查地球物理方法中方法种类最多、应用面最广和适应性较强的一类方法。同样，在环境地球物理方法中，电法也是使用频率最高、应用面最广和解决问题较好的方法。

在本节中，我们将介绍电阻率法、激发极化法、电磁法、地质雷达和天然电磁辐射测量等方法。

一、电阻率法

电阻率法作为一种传统的物探方法，在解决环境地质问题领域中仍可发挥重要作用。传

统上用于矿产勘查的电阻率法，其基本原理、野外工作方法技术、资料处理和解释也完全适用于环境勘察。

表 2—1 给出了环境勘察中一些常见介质和岩石的电阻率及其变化范围，它是根据欧洲和美国的调查结果归纳出来的。

表 2—1 不同岩石和介质电阻率的变化范围

岩石类型	电阻率/（Ω·m）	介质类型	电阻率/（Ω·m）
肥粘土、泥灰岩	3～30	民用垃圾	12～30
瘦粘土、泥灰岩	10～40	倾倒的废石和土壤	200～350
粘土、砂质土、粉砂岩	25～150	工业淤泥	40～200
含粘土的砂	50～300	废金属	1～12
砂、砾石（湿）	200～400	碎玻璃和瓷器	100～550
砂、砾石（干）	800～5000	砂铸模	400～1600
碎石（干）	1000～3000	废纸（湿）	70～180
灰岩，石膏	500～3500	被污染的民用垃圾堆	1～10
砂岩	300～3000	焦油	300～1200
盐层和盐丘	＞10000	使用过的油	150～700
花岗岩	2000～10000	使用过的漆和涂料	200～1000
片麻岩	400～6000	服装清洗剂	30～200

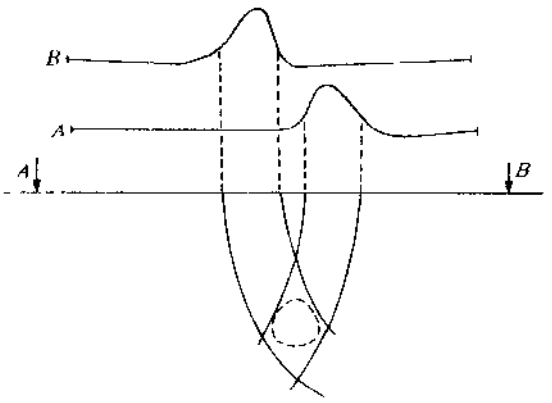


图 2—1 Bristow 排列探测洞穴的相交弧解释法
带箭头的 A、B 为供电电极

电阻率法中往往使用多种电极排列方式，主要包括施伦贝尔热（对称四极）、温纳、偶极-偶极和单级-偶极（Bristow 排列）等，各种排列有其优缺点。这里值得指出的是，Bristow 排列是 C. M. Bristow 1966 年提出的专门探测地下洞穴的一种排列方式。它采用单极-偶极排列，将一供电电极置于无穷远处（实际上距测量电极极距 5～10 倍即可形成近似的单极电流源），通过一种简单的相交弧法解释异常。其原理是：除均匀介质外，高阻或低阻异常体位于与其异常曲线有关的以电流源为圆心的圆弧上，对于穿过异常体的两条剖面，异常源位于相应圆弧交点构成的区域（图 2—1）。据此可探测到地下洞穴并大致圈出其空间位置。有关研究表明，Bristow 排列是电阻率法中探测灵敏度较高的一种排列。

电阻率法一般可分为二种类型，一是电剖面法，采用固定的电极距并使电极装置沿剖面移动，这样便可观测到一定深度范围内视电阻率沿剖面的变化，从而研究地电断面电性

的横向变化；二是电测深法，它是在同一测点上逐次扩大电极距，观测垂向上由浅到深的视电阻率的变化情况，从而研究地表某点下方电性的垂向变化。技术细节这里不作详细介绍。

为满足水工环地质调查的实际需求，提高传统电阻率法的探测能力，从80年代起国内外相继研制和开发了高密度电阻率探测系统。该系统包括数据采集和资料处理两部分。现场测量时只需将全部电极设置在一定间隔的测点上，测点密度远较常规电阻率法大，一般为1～10 m。然后用多芯电缆将其连接到程控式多路电极转换开关上，电极转换开关是一种由微电机控制的电极自动换接装置，它可以根据需要自动进行电极装置形式、极距及测点的转换。测量信号用电极转换开关送入微机工程电测仪，并将测量结果依次存入随机存储器。将数据回放并送入微机便可按给定程序对原始资料进行处理。

高密度电阻率法一般采用三电位电极系。它可以获得三种常用电极装置（温纳、偶级-偶极和微分）的视电阻率参数，以绘制电阻率等级（或等值线）断面图以及不同极距的剖面图。当将三种电极排列的测量结果作某种组合时，还可获得视电阻率异常的几种比值断面图。两种类型的断面图都以某种方式反映了地电断面的结构和分布特征。

目前，国内外已推出多种高密度电测系统，如日本OYO公司最先研制的McOHM-21型电阻率测量系统，它通过三个电极电缆系统，可控制750个电极的排列。加拿大Scintrex公司和瑞典ABEM公司分别推出了MRT/Geopulse和MULTIMAC系统。地矿部机电研究所推出的MIR-IC/MIS微机控制多电极电阻率探测系统，能控制60个或更多电极的排列，进行多种装置的二维电阻率剖面测量。

由于高密度电阻率法可以实现数据的快速采集和微机处理，并且能有效地进行多种电极排列方式的参数测定，改变了传统电阻率法的工作模式，提高了工作效率，获得较丰富的地电断面信息，使电阻率法的自动化和智能化程度大大向前迈进了一步，从而更适合于场地环境调查的需求。

二、激发极化法

激发极化法主要用于金属矿普查、勘探以及寻找地下水。该方法由于不受地形起伏和围岩电性不均匀的影响，因此在丘陵地区或山区找矿和找水备受重视。在环境应用领域，该方法不及电阻率法和电磁法那么应用广泛。

激发极化法在环境勘察中可用来确定有害废物与未污染土壤之间的界面，在垃圾场内寻找某些极化物质的堆积，以及区分具有相同电阻率的地下盐水和粘土等。

近年来，国外一些学者试图用谱激发极化法来研究与环境有关的问题。例如，德国地球物理与气象研究所的研究人员利用谱激发极化法来确定地层的孔隙度和渗透系数。就地下水污染的危害而言，其污染范围和程度在很大程度上取决于岩层的透水性，因为透水性控制着地下水的流动。因此，岩层的透水系数被认为是最重要的岩石参数之一。到目前为止，透水系数只能通过抽水试验或者采样后进行实验室分析求得，这些方法既费时又耗资，并且测量结果局限在少数几个地方。

为了寻找确定岩石渗透系数的快速而有效的方法，研究人员从谱激发极化测量的机理出发，探讨实测结果与岩层透水性之间的内在关系。通过岩石物理研究，推导出了岩层的电性与渗透性之间的相互关系，并且给出了由谱激发极化测量来确定渗透系数的算法。用钻孔谱激电测量对该算法进行了检验，并且还与实验室分析结果进行了对比。这一算法同

适用于地表复电阻率测深，只是精度稍差一些。这样一来，利用频谱激电法（从钻孔的高分辨率测量到地表的大比例尺测深）能够快速和有效地确定出岩层的渗透系数。此外，根据岩石物理的研究结果，实测电导率虚部对岩层内固相和液相界面的变化反应敏感，因此，在某些条件下，这一参数可用来指示污染的存在。

总的来看，激发极化法在环境勘察中的应用相对较少，人们目前对环境污染介质的激发极化效应的机理尚不是很清楚。

三、电磁法

电磁法的种类很多，从场源形式上可以分为人工场源及天然场源两种，其中人工场源又可分为连续波场、辐射场和瞬变脉冲场。连续波场是向大地发射连续的电磁场，在发射的同时，观测场的空间分布，也可以改变发射频率，从而研究异常场随频率的变化。这种形式的电磁法称为频率域电磁法，其工作频率一般低于 10^5 Hz。当电磁场的频率超过 10^5 Hz 时，电磁场以波动形式传播，这种情况下，主要利用岩、矿石对电磁波的反射、透射及吸收特性来研究有关的地质问题，这种形式的电磁法称为辐射场法，主要包括地质雷达等。瞬变脉冲场是向大地发射不同形式的脉冲电磁场，在脉冲的间歇时间观测电磁场随时间的衰减，从而解决有关的地质问题，这种方法被称为时间域电磁法。甚低频法是一种利用长波电台作为场源的被动人工源方法。

天然场源包括大地电磁法（MT）和音频大地电磁法（AMT），前者是观测与太阳辐射有关的超低频天然大地电磁场（频率范围 $n\times10^{-4}\sim n\times10^{2}$ Hz），后者主要观测由于雷电作用产生的音频（$n\times10^{-1}\sim n\times10^{3}$ Hz）大地电磁场。在 AMT 的观测方式的基础上，通过观测人工供电产生的音频电磁场，发展形成了可控源音频大地电磁法（CSAMT）。

此外，有关的研究结果表明，岩石在受到破坏时会产生电磁辐射，其强度与岩石的破坏程度有关。因此，通过天然电磁辐射测量有可能直接监测岩石破坏的过程。

在上述方法中，频率域电磁法、时间域电磁法、地质雷达和甚低频法在环境地质调查中已得到广泛的应用；天然电磁辐射测量仍处于实验研究阶段，技术尚不成熟；大地电磁法和音频大地电磁法目前在环境调查中则应用很少。在电磁法这一段中将对频率域电磁法、时间域电磁法、甚低频法作一简单的介绍。地质雷达和天然电磁辐射测量将在下文中专门论述。

1. 频率域电磁法

环境地质调查中最常用的频率域电磁法是水平线圈法，它是水平共面线圈的一种电磁剖面法。国外称之为 Slingram 法。图 2—2 示出了该方法的基本原理。将交变电流送入发射线圈，在其周围空间便建立了一次交变场。当地下有良导地质体存在时，在该地质体中会产生感应电流（又称涡流），导体中的交变涡流又将在其周围空间形成二次场。在距发射线圈一定距离的地方设置接收线圈，它将同时接收一次场和二次场，通过观测和分析剖面上各点磁场的变化规律便可发现地下良导体的存在和分布。

测量时，一般使线圈的间距保持固定（50～250 m 之间），沿剖面进行同线测量。测量参数为总场（即一次场和二次场的矢量和）的实虚分量，一般用一次磁场规一化的方法测量实、虚分量百分数。

电磁法的勘探深度与地下介质的电阻率以及频率的高低有着密切的关系。当地下介质的电阻率值一定时，选用不同的频率可达到不同的勘探深度。降低频率可加大探测深度，但

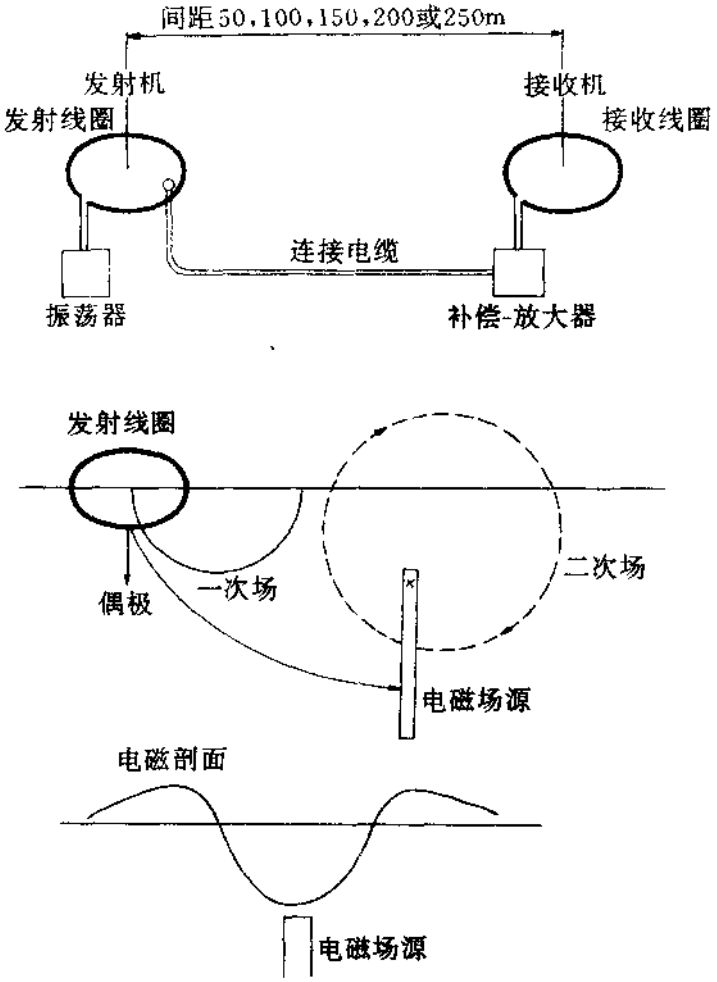


图 2　2　水平线图法（Slingram）的基本原理图

同时也会造成发射装置过于笨重。对于轻便型的移动式测量仪器而言，这是不可取的。因此，大多数仪器的工作频率不低于 100 Hz。一般选用 800～7000 Hz 间的若干个频率，这样在野外条件下可以达到适中的探测深度。

发射-接收线圈间距的选择亦很重要。当间距很小时，由于接收点处一次场大，故相对于它的二次场百分异常小。随着发射-接收间距增加，二次场相对增强，故百分异常增大。但发射-接收距太大时，异常变得复杂，且异常值变小，范围变宽。

频率域电磁测量特别适合于填绘电性横向分布不均匀的地质目标，主要包括废石堆、陡倾斜构造（如断层、裂隙带）和污染的地下水等等。

2. 时间域电磁法

时间域电磁法（TEM）是利用不接地回线或磁偶极子发射周期性的脉冲磁场（一次场），在一次场消失后的一段时间内，用不接地回线或接地电极观测由地下导体产生的二次

涡流场。该方法已在矿产勘查中广泛应用，近年来其应用范围已渗透到工程与环境勘察等诸多领域。

在时间域电磁法中，发射场源采用具有周期性的脉冲序列，如矩形、梯形、半正弦波和三角形波等。其野外工作方法有多个变种，施工布置方法也有很大的差别。一般而言，可将其工作装置分为四类：(1) 剖面测量装置；(2) 测深测量装置；(3) 井中装置和 (4) 航空装置。

剖面测量装置如图 2-3 所示。图 (a)、(b)、(c) 三种装置在进行剖面测量时，接收回线 R_r 与发射回线 T_x 相对位置不变而测线移动观测。大定源装置 T_x 不动，接收回线沿测线移动观测。大定源和中心回线装置可进行 x、y、z 三分量测量。测深装置如图 2—4 所示。中心回线的接收回线位于发射回线中心，其它三种装置的偶极距 (r) 一般大致等于探测目标的深度。对电偶源和磁偶源装置来说，脉冲的发射和接收很类似于地震法中的放炮和检波。尽管瞬变电磁场与地震波场存在很大的差异，但他们的相似之处却为瞬变电磁法引进成熟的地震数据采集、处理和解释方法提供了可能。

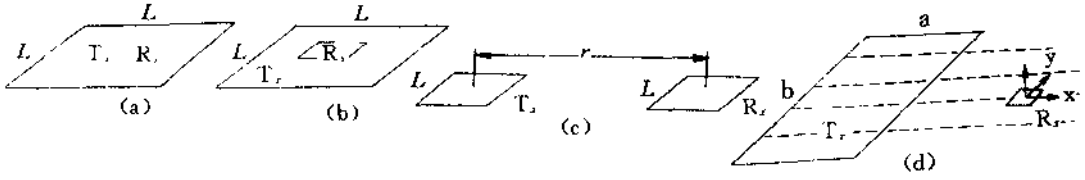


图 2-3 TEM 剖面测量装置

(a) 重叠（共圈）回线装置；(b) 中心回线装置；(c) 偶极装置；(d) 大定源装置

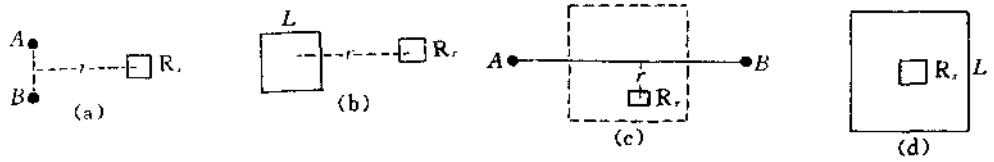


图 2—4 TEM 测深装置

(a) 电偶源；(b) 磁偶源；(c) 线源；(d) 中心回线

西方国家目前有四种专用瞬变电磁系统，即加拿大的 PROTEM 系统、PEM 系统、UTEM 系统和澳大利亚的 SIROTEM 系统。近年来，随着电法仪器的集成化和一体化，各种多功能电测系统（如加拿大的 V-5 和美国的 GDP-32）也具有测量瞬变电磁场的功能。我国也已研制和生产瞬变电磁仪，如地矿部物化探研究所的 WDC 系列、中南工业大学的 SD 系列等。

不同的仪器系统采集的数据有所不同，一般可分为三类：(1) 用感应电压与发射脉冲电流归一化参数，即仪器读数为 $V(t)/I$，单位为 $\mu V/A$，如 SD-1 系统；(2) 以感应电压与一次场感应电压的比值为参数，即仪器读数为 $V(t)/V_1\times 100\%$，如 PEM 系统；(3) 归一到某个放大倍数，如 EM-47、EM-57 系列，仪器读数为 $M=V(t)\cdot G\cdot 2^N$，这里 $V(t)$ 为接收线圈电压；G 为前置放大器放大倍数；2^N 为仪器公用通道放大倍数。

经处理后的资料可形成视电阻率曲线和视电阻率拟断面等值线图，以此来分析和解释地电特征。另外，还可作一维正反演、自动拟合实测曲线。

时间域电磁法与频率域电磁法相比，具有如下特点：(1) 断电后观测纯二次场，增强电性分辨能力；(2) 通过多次脉冲激发、场的重复测量叠加等技术，提高信噪比和观测精度；(3) 一般只测量磁场分量，因而受地表电性不均匀影响小；(4) 理论计算和数字模拟较复杂，且仪器性能要求较高。

时间域电磁法已成功地用于填绘含水层中卤水的分布范围，确定海岸带的淡水-盐水界面等。

3. 甚低频法

甚低频（VLF）是一种被动源电磁方法，它利用分散在全球各地数十个频率为 15～25 kHz 的长波电台作为场源，通过在地表、空中和地下探测场的参数变化，从而达到矿产勘查、水资源勘查和环境勘查的目的。这些长波电台是为远方的潜艇导航及通信而建立的，功率一般比较强大（$n\times10^2$～$n\times10^3$ kW），信号稳定。表 2—2 为分布在全球的一些 VLF 台站。

表 2—2 VLF 台站

台站名	地　点	频率（kHz）	功率/（kW）	备　注
FUO	法国波尔多	15.1	500	
GBR	英国接格比	16.0	750	
IVC	意大利塔沃拉腊	20.3	500	
UMS	俄国莫斯科	17.1	1000	我国西北地区可利用
NAA	美国缅因州卡特勒	17.8	1000	
NLK	美国西雅图	18.6	300	
NWC	澳大利亚西北角	22.3	1000	我国境内可利用
NDT	日本爱知县	17.4	500	我国境内可利用

由于 VLF 法无需发射设备，因此装置非常轻便，工作效率高，成本甚低。当然，该方法也存在着缺点，最明显的是探测深度不大。在电阻率小于 30Ω·m 的含粘土地层中，探测深度仅能达 15m。此外，它受地形和 VLF 场强度的日变影响。

甚低频电台发射的电磁波，在远离电台地区可视为典型的平面波。由于发射天线是垂直的，故其磁场分量为水平、且垂直于波的前进方向。当地下存在走向与电磁波前进方向一致的良导地质体时，由于一次磁场垂直于地质体走向，将在其中感应出最大的涡旋电流及相应的二次磁场。

VLF 电磁法的测量参数有：总场的振幅和倾角、电场水平分量 E_x、磁场的垂直分量 B_z 和水平分量 B_y、极化椭圆倾角 D 等。根据 B 和 E 可计算出视电阻率。野外作业时，先将接收机校准于所选电台的频率，使接收机线圈面沿垂直轴转动，当接收的信号最大时，线圈面所指的方向即为电台方向。然后照准该方向（即以该方向为水平轴）进行观测。

由于 VLF 频率很高，故原始数据中包含较大的噪音，同时也受地形、VLF 场日变和短周期变化以及其它因素的影响。因此，须对 VLF 数据作一些必要的处理，其中包括地形改正、日变校正和 Fraser 滤波等。甚低频法的资料解释主要是定性地确定出低阻体（如断裂

带、岩溶发育带、埋藏的有害废料等）的位置。

目前生产的甚低频电磁仪往往与磁力仪合为一体，使 VLF 和磁测同时进行。

四、地质雷达

地质雷达，也称探地雷达（Ground Penetrating Radar，简称 GPR），是利用高频电磁波束的反射来探测地下目标的一种高分辨率电磁方法。80 年代以来，随着电子技术的飞速发展，地质雷达在技术装备上有了突破性的进展，它不仅具有很强的抗干扰性、极高的采样率，而且由于数据处理技术的高度发展，它表现出极高的分辨率和很强的探测能力。由此推动了探测技术的发展，同时又大大扩展了方法的应用领域。目前，地质雷达的应用已拓展到矿产勘查、地基调查、矿山开采以及环境、考古探测等诸多领域。

1. 方法原理

地质雷达是利用宽带短脉冲（脉冲宽为数纳秒甚至更小）形式的高频电磁波（主频为数十兆赫至上千兆赫）束在界面上的反射来探测有关的目的物。图 2—5 为地质雷达探测原理图。发射天线和接收天线紧靠地面，由发射机发射的短脉冲电磁波经发射天线（T）辐射传入大地，电磁波在地下传播过程中遇到介质的电性分界面后便被反射或折射，反射回地面并被接收天线（R）所接收。脉冲波传播时间（或称走时）为：

$$t = \sqrt{4Z^2 + X^2}/v$$

当地下介质中的波速 v（m/ns）为已知时，可根据精确测得的走时 t（单位 ns），由上式求出反射物的深度（m）。

波的双程走时由反射脉冲相对于发射脉冲的延时进行测定。反射脉冲波形由重复间隔发射（重复率 20～100 kHz）的电路，按采样定律等间隔地采集叠加后获得。考虑到高频波的随机干扰性质，由地下返回的反射脉冲系列均经过多次叠加（叠加次数从几十到数千）。这样，若地面的发射和接收天线沿测线以等间隔移动时，即可在纵坐标为双程走时 t（ns）、横坐标为距离 x（m）的地质雷达屏幕上描绘出仅仅由反射体深度所决定的“时距”波形道轨迹图（图 2—6）。与此同时，地质雷达以数字形式记下每一道波形的数据，它们经过数字处理之后，可由仪器绘成图或打印输出。

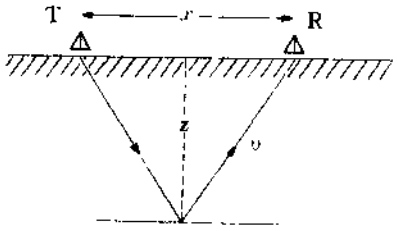


图 2—5　地质雷达探测原理

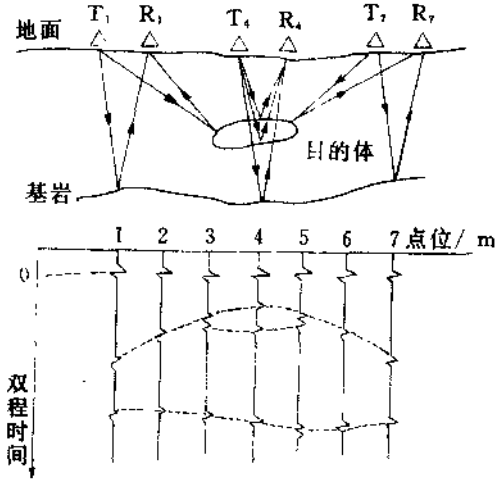


图 2—6　地质雷达剖面记录示意图

反射脉冲波形的明显程度，是地质雷达图像地质解释的重要依据。它决定于发射脉冲波的能量、波在地质界面上的反射特性以及波在地下介质中行进时的衰减条件。发射脉冲的幅度，一般在100～200V或更大范围，这是受高频窄脉冲电路的限制的。反射特征则主要取决于反射界面波的反射系数和所穿过介质波的吸收程度。有关计算表明，决定波反射的主要物性是介质的相对介电常数和电导率。显然，反射界面两侧物性参数差别大，反射波的能量也就强。另外，电磁波在地下介质中的传播速度，也与介质的物性有关。

表2--3列出了地质雷达测量中一些常见岩土介质的参数值。

表2--3　一些常见岩土介质的参数值

介　质	电导率/（$S \cdot m^{-1}$）	相对介电常数	传播速度/（$cm \cdot s^{-1}$）	衰减系数/（$dB \cdot m^{-1}$）
空气	0	1	30	0
纯水	10^{-4}～3×10^{-2}	81	3.3～3.4	0.1
海水	1～10	81	3.3～3.4	1000
冰		3.2	17	0.01
干砂	10^{-7}～10^{-3}	4～6	15	0.01
湿砂	10^{-4}～10^{-2}	25～30	6	0.03～0.3
粘土	10^{-1}～1	5～40	4.7～13	1～300
泥炭		60～80	3.4～3.9	0.3
土壤	1.1×10^{-4}～5.0×10^{-2}	2.6～15	13～17	20～30
灰岩（干）	10^{-9}	7	11	0.4～1.0
灰岩（湿）	2.5×10^{-2}	8		0.4～1.0
花岗岩（干）	10^{-8}	5	15	0.01～1
花岗岩（湿）	10^{-3}	7	10	0.01～1
肥土		15	7.8	
混凝土		6.4	12	
沥青		3～5	12～18	

地质雷达的探测深度是考虑其应用的一个重要前提条件。由于它利用了高频电磁波，故探测深度与其它物探方法相比要浅，一般为几米至数十米，但分辨率却要高得多，有时可达到厘米级。探测深度主要受地表电阻率和发射脉冲频率等因素的制约。地表电阻率决定了雷达波的衰减，因而决定了其探测深度。一般来说，地质雷达不适用于地表电阻率小于100Ω·m地区的探测，即存在粘土、地下咸水和粉砂质地层的环境。另外，探测深度还与脉冲的频率有关，频率越低，穿透能力越大。对于中心频率为100M Hz的电磁波，在含水少的坚硬岩石中可以探测到50 m深的目的体，而在地下水含量多的岩石或含水土壤中，探测深度往往仅十余米。表2--4列出了不同地质介质中的探测深度。

表2--4　地质雷达在不同地质介质中的探测深度

地　质　介　质	探　测　深　度/m
极地冰	＞4000
干岩盐	＞2000
温带冰	600
花岗岩	300
干砂	＞60
破碎花岗岩	30
湿粘土	＜2
盐水	＜1

2. 野外测量方式

地质雷达现场测量时，通常采用两种方式：剖面法和宽角法。

剖面法测量方式是发射天线（T）和接收天线（R）以固定间距沿测线同步移动进行观测的一种测量方式。其记录是一张时间剖面图，这种记录能准确地反映测线下方地下各个反射面的起伏变化。有时为了探测深部界面，需要提高信噪比，可采用类似地震中的多次覆盖技术，应用不同天线距的发射-接收天线对在同一测线进行重复测量，然后把所得的测量记录中测点位置相同（共深点）的记录进行叠加，能增大所得记录对地下介质的分辨能力。

宽角测量方式是发射天线固定在地表某点，接收天线沿地表逐点移动，此时的记录是电磁波通过地下各不同层的传播时间，从而反映了不同层介质的速度分布。

3. 地质雷达仪器

目前已推出的商用地质雷达系统有：美国地球物理探测设备公司（GSSI）的 SIR 系列、加拿大探头与软件公司（SSI）的 Pulse EKKO 系列、日本应用地质株式会社（OYO）的 Geo-radar 系列和瑞典地质公司（SGAB）的 RAMAC 钻孔雷达系统等。其中美国 GSSI 公司的 SIR 系列和加拿大 SSI 公司的 Pulse EKKO 系列是当前最流行的产品。

我国曾开展过地质雷达的研制工作，但未能形成商品化的实用产品。目前国内投入野外生产的地质雷达主要是美国的 SIR 系列和加拿大的 EKKO 系列。

4. 数据处理与解释

地质雷达数据处理的目的是为了压制随机的和规则的干扰，以尽可能高的分辨率在图像剖面上显示反射波，提取反射波的各种有用的参数（包括电磁波速度、振幅和波形等）来帮助解释。由于雷达波与地震波理论的相似性以及它们采集数据的方式的类同，目前地质雷达数据处理方法主要是移植地震数据处理方法，主要包括时间域和频率域的高低通滤波、带通滤波、偏移绕射处理、反褶积、图像增强等。

地质雷达数据的地质解释通常是在数据处理后所得的图像剖面中，根据反射波组的波形与强度特征，通过同相轴的追踪，确定反射波组的地质含义，建立地质-地球物理解释剖面。近年来，研究人员在这方面作了大量的研究，提出了一些有效的方法，如正演数值和物理模拟。

地质雷达采用高频带和高速采样技术，其探测分辨率大大高于其它物探方法，从而极大地提高了人们对近地表特征的探测能力。实践表明，地质雷达可用于浅部地层划分、土壤填图以及潜水面、岩溶洞穴、断裂破碎带、地下废物和埋藏物的探测等。它已成为工程与环境勘察中不可缺少的新技术。

五、天然电磁辐射测量

有关的研究表明，岩石（体）在受力而发生变形、形成裂隙等的破坏过程中会产生电磁辐射，辐射的强度与岩石（体）破坏的程度有关。天然电磁辐射测量就是以该物理现象为基础通过电磁辐射测量系统对岩石进行监测，有可能直接监测岩石的破坏程度，从而对滑坡、山崩等地质灾害进行预测。

关于天然电磁辐射现象的机理，已提出了几种解释模型。较为公认的是带电裂隙模型。在裂隙发育和扩展时相对的裂面上存在着极性相反的电荷，其面密度可达 $10^{-4}\sim10^{-3}$C/

m^2，大量的电荷可能从裂面上产生辐射，该模型是这样解释岩石产生电磁辐射的。

岩石在破坏过程中产生的电磁辐射强度（即辐射脉冲的幅度）、频率（单位时间内电磁辐射脉冲的数目）和能量与裂隙中裂面上的电荷密度及其在空间上的变化有关，实际上它与岩石的破裂状况、裂隙构造的规模、发育速率以及破碎岩石的结构和组分有关。

天然电磁辐射脉冲的计数率可采用辐射仪配以磁天线进行测量。将天线接收到的信号通过倍增管放大，再接到宽频带放大器。用脉冲计数器和磁记录器进行记录并使用一种特殊的装置来压制噪声，使信号得以筛选，提取出有用信号。

从目前的资料来看，天然电磁辐射测量大都处于实验室实验和研究阶段，实际测量的资料还很少，这一技术尚未完全开发。然而，现有的研究表明，它可能发展成为一种成熟的方法。其潜在应用包括对岩体、地下矿山的地质情况进行监测，从而为滑坡、山崩、岩爆等地质灾害的预报提供新的信息。

第三节　地震、声波方法

地震勘探方法最初用于油气田勘查，目前仍是这一领域的主导方法。本世纪 50 年代，为满足工程勘察的需求，研究和开发了以折射波法为主的浅层地震勘探方法，这一方法迄今仍在广泛应用。60～70 年代，一些发达国家开展了浅层反射波法的研究。到了 80 年代，浅层反射波法已步入实用阶段。近十年来，国内外许多研究人员加强了对地震面波法的研究，目前该方法已发展成了一种颇具特色的浅层地震勘探方法。80 年代以来，随着环境问题愈来愈多地引起人们的重视，上述三种浅层地震勘探方法除仍广泛用于工程勘察外，也逐渐被“移植”到环境应用领域，解决各种各样的环境问题。

近 10 年来，声波测量已成为研究岩体性质和完整性程度的一种有效方法，它在工程和环境检测、灾害调查中得到广泛使用。本节扼要地介绍浅层折射波法、浅层反射波法、面波法和天然声辐射测量。

一、浅层折射波法

地震波在传播过程中，当遇到波速不同的分界面，且其界面以下的速度大于界面以上的速度时，便会产生沿界面传播的滑行波，滑行波又不断地在上覆介质中产生折射波。折射波法的一个前提条件是地震射线以临界角入射至界面上。

折射波法常用的观测系统有相遇时距曲线系统（在测线两端放炮观测折射波）和追逐时距曲线观测系统（在同一排列上接收同侧不同炮点激发的折射波）。利用相遇曲线的互换点和追逐曲线的平行性的特点，可识别同一界面的波组和对波组进行连续追踪。

折射波法数据的处理和解释分为以下几步，首先判别是否需对原始记录作预处理，如果地震记录中初至区干扰波较强而有效波相对较弱时，则应在预处理中通过滤波、切除或均衡等方法压制干扰波，以保证有效折射波的识别和正确地拾取初至时间。若地震记录中干扰小，初至折射波很清晰，则不必作预处理。其次，通过对波的对比分析，从中识别并提取出有效波的初至时间并绘制相应的时距曲线。第三，根据所研究地质对象的形态特征，选择不同的解释方法。当折射界面为水平或倾斜界面时，可选用常规的解释方法，如 t_0 法、哈里斯法、时间场法等等；对于一些特殊形态的地质对象，则应选用相应的复杂方法进行解释。

折射波法常用来探测覆盖层厚度、基岩面起伏、地下水通道、污染羽流路径等。此外，它还可用于确定有害废物的范围和厚度。当然，该方法也存在弱点，如分辨率较低，探测精度不是太高。目前，它仍然是工程与环境勘测中广泛使用的方法之一。

二、浅层反射波法

地震波在地下传播过程中遇到不同介质的分界面时，在界面上将产生波的反射和透射。通过震源向地下发送地震波，径向传播的地震波在遇到波阻抗（即地震波速度与岩石密度之积）界面后被反射，反射波传播到地表被检波器所接收。利用反射波来解决地质问题的方法称反射波法。

在浅层反射波数据采集中，最常用的两种观测系统是单次覆盖观测系统和多次覆盖观测系统。多次覆盖观测系统是共反射点（CRP）或共深点（CDP）多次叠加的简称，它是把不同点激发、不同接收点接收到的来自同一反射点的地震记录进行叠加，这样可以压制多次波和各种随机的干扰波，从而大大提高了信噪比和地震剖面的质量，并且可以提取速度等重要参数。该观测系统是目前反射法中使用最广泛的观测系统。

为了得到浅层的反射信号，目前的浅震仪一般都具有很高的采样率（25 μs～4 ms），震源也具有较高的频率（1～4000 Hz）。

浅层地震反射波资料处理是为了消除各种干扰波，得到可靠的反射波地震剖面。处理内容主要包括：（1）切除（即切除掉记录中干扰严重或无意义的记录，或者工作不正常的地震道）；（2）静校正（对地形起伏和表层速度变化引起之时差的校正）；（3）频谱滤波（压制干扰波、突出有效波）；（4）抽道集（CDP 选排）、动校正、水平叠加（CDP 叠加）；（5）速度分析；（6）偏移；（7）时深转换等等。浅层反射波资料处理已成为浅层反射波法不可缺少的重要部分，并且随着理论的发展，一些新的方法正在出现。

经过上述数据处理之后，得到的主要成果资料是作了水平叠加（或偏移）的时间剖面，它是反射波法进行地质解释的基础。在一般情况下，通过时间剖面上波的对比和识别，可以确定反射层的构造形态、接触关系以及断层分布等情况。但是，这种地质解释的准确程度往往受多种因素的影响，如数据采集的质量、数据处理中方法与参数的选择等等。

反射波法已在各种环境问题中得到成功的应用，如探测地下溶洞（空洞）、地面沉陷的调查、地基调查、断层以及各种污染物（地下水、固体废料等）的探测等等。随着技术的发展，反射波法已成为一种具有较高分辨率的探测手段，预计它在环境调查领域将发挥更大的作用。

三、面波法

地震面波法是近 10 年来发展起来的一种新的浅层地震勘探方法，与传统地震勘探方法的差别在于，它不是利用纵波和横波，而是利用以前视为干扰的面波，目前主要是瑞雷波。瑞雷波沿地表面传播，质点作椭圆运动，其振幅随深度的增加而按指数规律减小。它具有频散特性，即其传播的相速度随频率而改变，这种频散特性可以用来反映地下构造的特征。瑞雷波速度比纵波速度低，因而具有更高的分辨率。它分辨浅部层位的能力强，当用于检查路面质量时，能以几厘米的深度区间进行逐层检查。瑞雷波速度还可转化为横波速度，而横波速度与岩土的力学性质密切相关。

1. 基本原理

当在地表用脉冲源竖向激震时，一般会产生直达纵波、折射纵波、反射纵波、瑞雷波

以及转换波等扰动。理论分析和实验表明，在距震源一定的距离上，瑞雷波能量最强。瑞雷波是一种沿地表传播的波，其传播的波阵面为一个圆柱体，传播深度约为一个波长，因此同一波长的瑞雷波传播特性反映了地质体水平方向的变化情况，不同波长的瑞雷波传播特征则反映了不同深度地质体的变化情况。

设地面有 A、B 两观测点，相距 Δ，经傅里叶变换可推导出瑞雷波传播速度 v_R 与频率和相位差 Φ 的关系为

$$v_R = 2\pi f\Delta/\Phi$$

在同一测点对一系列频率采取相应的 v_R 值就可以得出一条 v_R-f 曲线，即所谓的频散曲线。由

$$\lambda_R = v_R/f$$

可将 v_R-f 曲线转换为 v_R-λ_R 曲线，v_R-λ_R 曲线的变化规律就反映了该点介质随深度的变化规律。沿测线不同点的 v_R-λ_R 曲线则反映了介质沿剖面方向上的变化特征。

根据弹性波理论，瑞雷波的能量主要集中在介质的自由表面附近，其深度差不多在一个波长范围内。由半波长理论可知，所测量的瑞雷波的平均速度 v_R 可以认为是取决于 1/2 波长深度处介质的平均弹性性质，即勘探深度 H 是

$$H = \lambda_R/2 = v_R/2f$$

在实际工作中，f 是已知的，因此只要测得 v_R 值，就可以计算出该速度反映多大深度以内的平均传播速度。从上式还可看出，频率 f 越高勘探深度越小，降低频率，勘探深度增大。当频率由高向低变化时，分别测出各个频率条件下的 v_R 值，就实现了由浅向深的勘探。

瑞雷波的工作方法主要包括两个方面，一是激发和采集瑞雷波的信号；另一方面是从已采集的数据中，经过处理得出各种频率面波相对应的速度 v_R 和波长 λ_R，并绘制其离散分布曲线，进而通过反演得出有关表层岩土分层的地质解释。

瑞雷波的激发有两种方式，即瞬态法和稳定法，目前主要应用瞬态法。

瞬态法数据采集系统的排列如图 2—7 所示。选定测点之后，将检波器 1 和 2 分别置于测点 0 两侧的对称位置上。脉冲式锤击震源设在两个检波器的延长线上，与近检波器的距离 x 一般和两个检波器之间的距离相等。当完成一次激发后，将震源移至另一侧的对称位置进行激发。检波距通常以观测点为中心成倍数递增，例如，1m、2m、4m……等。随着检波距和偏移距的增大，探测深度也随之增大，因此要求震源的能量亦相应地增加，以保证产生足够的能量和降低频率的地震波来增大瑞雷波的穿透深度。

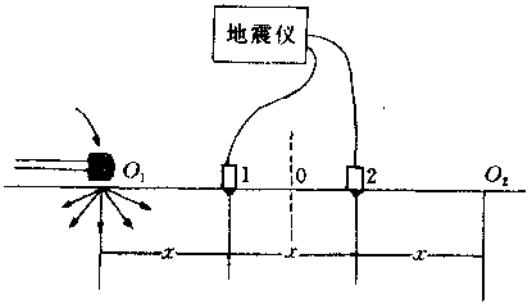


图 2—7　瑞雷面波法工作排列示意图

资料处理和解释主要包括，对面波的识别和提取；作频谱分析，对各道分别作功率谱和相位谱；作相关分析和计算相位差，并求出各种频散情况下的面波速度 v_R 和波长 λ_R；绘制离散分布曲线，对其进行反演解释等。

瑞雷面波法适用于浅层调查，具有分辨率高的特点，可广泛用于研究浅部地层的分层结构，评价地基的处理效果。它比传统的土工试验方法效率高、成本低（其费用仅为触探

法和静荷载法的 1/3 至 1/10），代表性好，可做到无损检测。此外它还可用来探测地下洞穴和掩埋物，并且受场地环境影响甚小。

四．天然声辐射测量

声波测量是通过探测声波在岩土内的传播特征来研究岩土性质和完整性的一种物探方法。与地震法相类似，声波测量也是以弹性波理论为基础的。两者的主要区别在于工作频率范围不同，声波测量的信号频率大大高于地震波的频率（通常可达 $n\times10^3$～$n\times10^5$ Hz），因此有较高的分辨率。但另一方面，因声波频率较高，衰减较快、因此传播距离较小，一般只适用于在小范围内对岩体等地质对象进行较详细的研究。它目前已成为工程与环境勘察（监测）中主要的手段之一。

声波测量可分为主动式和被动式两种工作方法。主动式测量的声波是由声波仪的发射系统或锤击等声源激发的；而被动式测量的声波则是由于岩体受到自然力或其它作用力时，在变形或破坏过程中由它自身产生的。这两种方法的应用范围不尽相同、主动式测量在工程应用中居多，而被动式测量则主要用于监测岩爆、滑坡、山崩、塌陷等自然灾害。我们这里仅介绍被动式声波测量（亦称天然声辐射测量）。

1. 基本原理

岩体在产生变形或裂隙时，其内部聚积的能量被释放出来，这些被释放能量的一部分以弹性波的形式传播，这种现象称为声发射（辐射）。声辐射是一种普遍的物理现象，但一般情况下强度较弱，需要借助灵敏的电子仪器方能检测出来。

声辐射的基本参数主要包括：声辐射脉冲幅度、持续时间、波至时间、声辐射率（单位时间内声辐射事件数）和能量超过一定阈值的声辐射脉冲数。这些参数在一定程度上反映了岩体的状况，可作为预测岩体破坏的一种准则。

在岩爆、滑坡、山崩、塌陷等灾害发生前，由于岩体内微裂隙的产生而释放出应变能，这种应变能随着裂隙的增多、扩张、相连成群而增大，因而声辐射的声学特征在灾害事件发生前的稳定阶段和非稳定阶段有着明显的变化，利用声辐射测量仪对岩体进行监测，就能预报这些灾害。

2. 声辐射监测系统

声辐射监测系统主要由接收机、接收传感器（检波器）、数据记录和处理用的微机组成。随着计算机技术的发展，目前的测量系统不仅能够连续地记录、存储信号和数据，而且还能够识别到达波的类型，以及确定声源的位置。

加拿大过去用于采矿岩爆监测的声波测量系统是 MP250。该数据采集系统主要通过阈值和时间窗检测初至时间和确定事件。典型的 MP250 系统有 32～64 个通道。对于大区域的监测可采用更多通道的系统或多个系统。传感器（探头）设置在监测区，间距 60～100 m，大多放在浅孔内。该系统性能可靠，在加拿大 10 多年的应用中几乎没有发生由系统本身引起的故障，但是它不能识别到达波类型。

加拿大矿物与能源技术中心在波型识别理论的基础上，开发了更完善的监测系统 ADASLS。该系统能自动分析数据，进行计算机编码和声源定位。该系统具有两个显著的特点，一是能识别到达波的类型，即纵波、横波和干扰波（噪音）；二是能计算出确定的声源位置，从而便于作可靠性分析。在加拿大和美国一些有岩爆危险的矿山安装并广泛检验了 ADASLS 系统。结果表明，该系统能够准确地预测出岩爆可能发生的地点。

3. 工作方法

天然声辐射测量的现场工作，应根据测试的目的和要求，合理地布置传感器，选择监测的参数和工作方法。

监测的参数包括：(1) 总事件数——单位时间内声辐射事件的累积数，它是岩体出现微观或宏观破裂（或破坏）的重要标志；(2) 大事件数（或频度）——单位时间内所记录的能量超过一定阈值的声辐射次数，大事件数占总事件的比例预示岩体内部变形、破坏的趋势；(3) 能量率——单位时间内岩体声辐射能量的相对累计，是岩体破裂及裂缝尺寸变化程度的重要标志，综合概括了事件频度，事件振幅变化的总趋势。

探头的布置应选择有代表性的地段，一般布置在观测孔内。观测孔一般布置在岩性均匀、无局部节理、裂隙的地方，以避免介质不均匀对声波的干扰。图 2—8 是在矿山坑道布置探头的示意图。

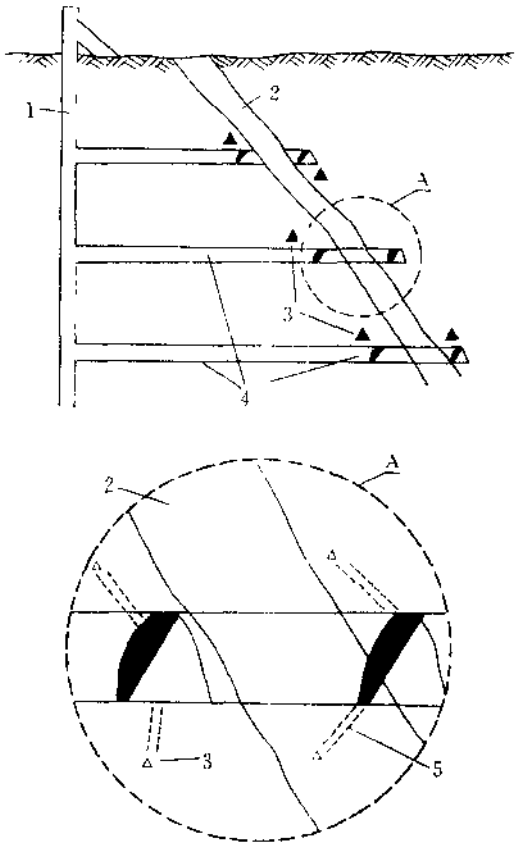


图 2—8 矿山坑道与探头布置的示意图

1—提升井；2—矿体；3—探头；4—坑道；5 观测孔

4. 数据分析技术与解释

声辐射监测系统记录到的到达波含有各种成分，除纵波外还有横波及噪音。近年来，在数据分析中采用了波型识别理论，据此能识别出到达波的类型（纵波、横波及噪音），从而提取了更多的有用信息。有关的实验表明，利用模式识别方法可识别声辐射源，判断声波特征和性质。

资料的解释一般是利用监测参数来判断（或预测）灾害事件的发生或评价所研究地质对象的性质。一般来说，岩体受力而发生变形或裂隙时可大致分为两个阶段——稳定阶段和非稳定阶段。在稳定阶段，声波能量较小，声波脉冲发生的时间间隔也基本不变，因而所监测的参数数值较小并且比较稳定，变化不大。一旦产生了破坏源，即进入非稳定阶段，能量急剧增大（大一个数量级以上），脉冲时间间隔明显变小，监测参数的数值突然增大。然而，在事件发生之前可能会出现一段“平静”期，这时参数一般较小。所以，基于参数的变化特征可以对未来发生的事件作出预测（或解释）。

天然声辐射测量目前主要在采矿工业中用于监测和预报各种金属矿、煤矿及隧道工程中的岩爆等灾害，还可在岩土工程中用来监测滑坡、山崩、塌陷等灾害，评价边坡的稳定性，此外，它还可能用来评价土壤和岩石灌浆工程的结果、寻找大坝等泄漏源以及用于实验室内对岩石各种力学状态的研究。

第四节　放射性测量方法

放射性测量是利用岩石中天然放射性元素含量及种类差异，以及在人工放射源激发下岩石辐射特征的不同，寻找矿产资源以及解决水文、工程和环境问题的一类物探方法。

与其它物探方法相比，放射性测量方法的主要特点是：仪器轻便，方法简单，容易掌握；测量灵活、工效高，成本低；受地形的影响较小，能在浮土覆盖薄的地区工作；不受电磁干扰，不受振动及噪声影响。可在城镇、工厂、山区等不同地方完成不同测量任务。

放射性测量方法在普查勘探铀矿床、测定样品的地质年代等工作中发挥了重要的作用。随着技术的发展，它在环境监测和灾害调查中也得到了应用，如环境放射性监测及滑坡、溶洞、断层活动带的研究等。

放射性测量方法按放射源不同可分为两大类：一类是天然放射性方法，主要有γ测量法、α测量法等；另一类是人工放射性方法，主要有X射线荧光法、中子法等。我们这里扼要地介绍与环境调查关系较为密切的方法，其中包括γ测量、氡气测量和X射线荧光测量。

一、γ测量法

γ测量法是利用辐射仪或能谱仪测量地表岩石或覆盖层中放射性核素产生的γ射线，根据射线能量的不同判别不同的放射性元素，而根据活度的不同确定元素的含量。γ测量可分为航空γ测量、汽车γ测量、地面（步行）γ测量和γ测井，其物理基础都是相同的，这里仅介绍地面γ测量。根据所记录的γ射线能量范围的不同，γ测量可分为γ总量测量和γ能谱测量。γ总量测量简称γ测量，它探测的是超过某一能量阈的铀、钍、钾等的γ射线的总活度。γ能谱测量记录的是特征谱段的γ射线，可区分出铀、钍、钾等天然放射性元素和铯-137、铯-134、钴-60等人工放射性同位素的γ辐射，故能解决较多的环境问题。

1. γ总量测量

γ总量测量常用的仪器是γ闪烁辐射仪，它的主要部分是闪烁计数器。闪烁体被入射的γ射线照射时会产生光子，光子经光电倍增管转换后，成为电信号输出，由此可记录γ射线的活度。这种仪器轻便，成本低，常用于野外踏勘性工作。如加拿大Exploranium公司的GR-110G型γ辐射仪重1.5 kg，有两种阈值可选，用两节1号电池供电，4位液晶显示。

γ辐射仪测到的γ射线是测点附近岩石、土壤的γ辐射、宇宙射线的贡献以及仪器本身的辐射及其它因素的贡献三项之和，其中后两项为γ辐射仪自然底数（或称本底）。要定期测定仪器的自然底数，以便求出与岩石、土壤有关的γ辐射。

岩石中正常含量的放射性核素所产生的γ射线活度称为正常底数或背景值，各种岩石有不同的正常底数，可以按统计方法求取，作为正常场值。

γ测量的数据，可以整理成剖面图、平面图和等值线图等。

2. γ能谱测量

γ能谱测量是在γ总量测量基础上发展起来的，它可以测定铀、钍、钾和人工放射性同位素的含量。

γ能谱测量的基本原理是，不同放射性核素辐射出的γ射线能量是不同的，铀系、钍系、钾-40和人工放射性同位素的γ射线能谱存在着一定的差异，利用这种差异选择几个合适的谱段作能谱测量，就能推算出介质中的铀、钍、钾和其它放射性同位素的含量。

为了推算出岩石中 U、Th、K 的含量，通常选择三个能谱段，即

第一道：1.3～1.6 MeV。

第二道：1.6～2.0 MeV。

第三道：2.0～2.9 MeV。

每一个测量道的谱段范围叫做道宽。由于第一道对应^{40}K 的 γ 射线能谱，第二道、第三道则分别主要反映铀系中的^{214}Bi 和钍系中的^{208}Tl 的贡献，故常把第一、二、三道分别叫做钾道、铀道和钍道。但是，需指出的是，钾道既记录了^{40}K 的贡献，又包含有铀、钍的贡献。同样，铀道中也包含钍的贡献。当进行环境测量时往往增设^{137}Cs、^{134}Cs、^{60}Co 等道。

在地面 γ 能谱仪中，成都理工学院研制的 CD-3 能谱仪功能较为完善，它能够使伽马能谱测量工作的数据采集、存储、处理和资料解释在野外现场及时完成，大大提高了工作效率。

γ 能谱测量可以得到 γ 射线的总计数（Σ）、铀、钍、钾含量（U、Th、K）和它们的比值（U/Th、U/K、Th/K）等数据，是一种多参数、高效率的放射性测量方法。它不仅可用于铀矿勘探、地质填图、寻找各种非放射性矿产，而且可以进行环境的放射性监测。

二、氡气测量

氡气测量是指通过测量氡及其衰变子体产生的 α 粒子的数量来寻找铀矿、地下水及解决环境问题的一类放射性测量方法。

自然界有三个天然放射性系列：铀镭系、钍系和锕铀系，它们各有一个原子序数为 86 的气态元素，即铀镭系的$^{222}_{86}$Rn、钍系的$^{220}_{86}$Rn 和锕铀系的$^{219}_{86}$Rn，这三种同位素的半衰期见表 2—5。

表 2—5　氡同位素的半衰期

同位素名称	$^{222}_{86}$Rn	$^{220}_{86}$Rn	$^{219}_{86}$Rn
半衰期	3.825 d	55.6 s	3.96 s
所属系列	铀镭系	钍系	锕铀系

由表可见，$^{222}_{86}$Rn 的半衰期较长，其运移的距离最远，能够从地下几十米甚至数百米运移到地表，使 Rn 在土壤中富集。$^{220}_{86}$Rn 的半衰期很短，运移的距离有限，只能在钍矿床或钍含量增高地段附近形成异常。有关的研究表明，在有利的条件下，$^{220}_{86}$Rn 的扩散距离只能离开矿层面十几厘米。$^{219}_{86}$Rn 的半衰期更短，扩散距离更短，其所属锕铀系元素与铀镭系相比，在自然界中含量甚微。因而，在野外工作中，实际上只测$^{222}_{86}$Rn 和$^{220}_{86}$Rn 的浓度。氡同位素具有放射性，它们在形成过程及其子体产生过程中都会发生 α 衰变，产生 α 粒子。因此，氡同位素及其衰变产物的 α 辐射是氡气测量的主要物理基础。

氡的迁移距离不仅与其半衰期的长短有关，而且还与岩石和土壤结构（孔隙、裂隙、毛细管等）及温度、湿度、压力等因素有关。一般来说，氡的迁移能力很强，除扩散现象外，随地下气流和地下水的迁移是更为重要的因素。岩石破碎、孔隙度增大、地温增高、气压降低等都促使氡气由地下向地表迁移。同时，在构造带中由于镭（氡的衰变母体）的存在，镭极易溶于水，随着地下水的垂向搬运在地表富集，形成氡异常，水的垂向搬运加快了氡

氡由地下向地表迁移的速度，以致于在地表可以探测到几十米甚至数百米深构造的存在。岩石破碎带、裂隙、断层、岩溶、滑坡体等都是氡迁移的良好通道，这样就会在地表形成氡异常。根据对氡异常的研究和解释，就能够对断层、滑坡、溶洞等地质灾害进行勘察和监测。

氡气本身也能形成地质灾害。有关的研究已证实，氡是导致肺癌的一个重要因素，这主要是因患者在有较高浓度氡的建筑物内长期生活引起的。

氡气测量的方法很多，可分为瞬时法和累积法两类。瞬时法包括电离室和闪烁室测量以及活性炭吸附微分测量，累积法近年来发展较快，常用的方法有α径迹测量、Po-210法、活性炭法、热释光法、α卡法、α杯法等等。瞬时测量方法的速度快，而累积法的灵敏度和精度要高。由于这类方法较多，我们只对水文、工程和环境调查中用得较多的α径迹测量和α卡测量方法作一概要的介绍。

1. α径迹测量

当α粒子射入绝缘体时，在其路径上因辐射损伤会产生细微的痕迹，称为潜迹（仅几纳米）。潜迹只有用电子显微镜才能看到。若把这种受过辐射损伤的材料浸泡在强酸或强碱里，潜迹便会蚀刻扩大，当其直径为微米量级时，用一般光学显微镜即可观察到辐射粒子的径迹。能产生径迹的绝缘固体材料称为固体径迹探测器。α径迹测量就是利用固体径迹探测器探测径迹的氡气测量方法。

开展α径迹测量时，将探测器置于探杯内，杯底朝天埋在小坑中，岩石土壤中的氡通过扩散、对流、抽吸以及地下水渗滤等复杂作用，沿裂隙、破碎带逸出地表，并进入探杯，就在探测器（常用醋酸纤维和硝酸纤维薄膜）上留下了氡及其各代衰变子体发射的α粒子形成的潜迹。经20天后取出杯中的探测器，用NaOH或KOH溶液进行蚀刻，再用光学显微镜进行观察、辨认和计算蚀刻后显现的径迹的密度，即1 mm^2的径迹数目。

在工作地区取得大量α径迹数据后，可利用统计方法确定出该地区的径迹底数，并据此划分出正常场、偏高场、高场和异常场。

2. α卡法

α卡法是一种短期累积测氡的方法。α卡是用对氡的衰变子体（$^{218}_{84}Po$和$^{214}_{84}Po$等）具有强吸附力的材料（聚酯镀铝薄膜或自身带静电的材料）制成的卡片，埋于土壤中，使其聚集氡的子体，一定时间后取出卡片，立即用α辐射仪测量卡片上的α辐射，借此测定氡的浓度。由于测量的是卡片上收集的放射性核素辐射出的α射线，所以把卡片叫做α卡，有关的方法就叫α卡法。如果把卡片做成杯状，则叫α杯法，其工作原理与α卡法相同。

三、X荧光测量

X射线荧光测量是一种人工放射性方法，可用来测定介质所含元素的种类和含量。其工作原理是：利用人工放射性同位素放出的X射线去激活岩石矿物或土壤中的待测元素，使之产生特征X射线。由于不同原子序数的元素放出的特征X射线能量不同，因而可以根据其能量峰来区分不同的元素，根据其强度来确定元素含量，并且可实现一次多元素测量。

国际上先进的仪器有两种，一种是采用正比计数管的多道便携式X荧光仪，另一种是用液氮冷却的半导体探测器多道X荧光仪。国内亦生产此类仪器，如重庆地质仪器厂的HYX-3微机X射线荧光仪。

在选定仪器的类型后，针对所探测的元素，选择适宜的放射性同位素作激发源。若测

中等原子序数的元素，可选用^{238}Pu源；若测高原子序数的元素，可选用^{241}Am源。当使用带平衡滤光片的X射线荧光仪时，若测某种元素必须事先测出待测元素的特征X射线谱线，根据该谱线确定“阈值”和“道宽”，则可记录待测元素的特征X射线强度或激发源所产生的散射射线强度。若被研究介质中待测元素的特征X射线强度高，其相应的含量也高。

在野外工作时，根据任务要求按一定比例尺作路线测量和面积测量。点距、线距按比例尺而定，在每个测点每次读数时间约为30 s。

由于X荧光方法可在现场测量，具有快速、工效高、成本低的特点，已用于矿点检查、追索矿体、对岩心、探槽及坑道进行编录等，近年来，它在环境监测等方面也得到应用。在美国的一些采矿区已有用X荧光法现场圈定Pb、Zn、Cd污染范围的实例。

第五节　重力测量

重力测量是通过野外观测，获得有关地质体或地质构造产生的重力异常，然后通过分析研究这些重力异常的变化规律，以达到解决有关地质问题的一种地球物理探测方法。重力测量在大地构造研究、矿产普查与勘探、地震预报等领域已普遍应用，但在土木工程、环境地质勘察等浅层探测方面的应用只是到了70年代以后出现高精度（微伽级）重力仪后才成为现实。本节着重介绍环境调查中常用的微重力测量。

一、基本理论和概念

地球上任何物体都受到地球重力的作用而产生加速度，称为重力加速度。重力加速度的大小随着时间和地点的不同而变化，这种变化与地球运动、地球形状、地球内部质量分布以及日月等天体的相互作用有关。重力测量实际上就是研究重力加速度的变化规律。在重力测量中，常把重力加速度称为重力，其单位在C.G.S.单位制中为$cm \cdot s^{-2}$，这个单位通常被称作伽（gal）。在国际单位制中，重力的单位为$m \cdot s^{-2}$，规定以$1\ m \cdot s^{-2}$的10^{-6}为国际通用重力单位（g. u.），即

$$1g.u. = 10^{-6}m \cdot s^{-2} = 10^{-4}gal = 10^{-1}mgal = 10^{2}\mu gal$$

在重力测量中，将地下密度不均匀体所引起的重力变化称为重力异常。野外重力测量是一种相对测量方法，即为某一点的重力值作为正常值，而以其它测点的重力值与之比较，得到的差值便为重力异常。

微重力测量是指测量的精度和测量探查的对象引起的重力效应是以微伽级的数值来量度的。微重力测量还包含有测量对象的规模和尺度与一般重力测量的对象相比是较微小的意思。

二、重力仪

重力仪是测量重力加速度相对变化值的一种测量仪器。按其弹性系统使用的材料来区分，普遍使用的重力仪主要有金属弹簧重力仪和石英弹簧重力仪。它们的工作原理基本相同，都是通过测定某种静力平衡系统在重力作用改变时产生的位移来确定重力的相对变化。它们测定的是测点与基点之间的重力差值，而不是某点的重力绝对值。

金属弹簧重力仪以美国Lacoste & Romberg重力仪公司生产的拉科斯重力仪（简称L & R）代表了此类产品的世界领先水平。它可分为两种类型：L & R-D型（勘探型）和L&R-G型（大地测量型）。这类仪器具分辨率和观测精度高、零漂极小等一系列优点，从而为世

界各国普遍采用。

石英弹簧重力仪则以加拿大 Scintrex 公司 1987 年推出的 CG-3 型自动重力仪为先进代表，它是以微处理机为基础，具有许多全新的特点，如高精度、高度自动化和智能化、野外作业极为便利等。

上述两种仪器是目前达到微伽级测量精度要求的仅有的两类仪器。据产品介绍，这两种仪器的分辨率均为 5×10^{-2}g.u.（5 微伽），观测精度为 0.1 g.u.（10 微伽）。英国地调所曾于 1991 年对 CG-3 和 L & R-G 型重力仪进行了野外测量试验，结果表明两种仪器的观测精度均优于 0.1 g.u.（10 微伽）。

三、野外工作方法

在微重力测量中，野外观测方法一般分为两类：(1) 剖面测量。剖面一般垂直于线性地质体（如断层、背斜、向斜或隐伏河道等）的假定走向。(2) 面积测量。主要探测地下地质体的大小、形态和分布。无论是剖面测量还是面积测量，重力测点位置和相对高程必须用测地方法来确定，以便作各项改正。为了保证各项改正的误差低于规定的要求，点位测量和相对高程测量的误差分别应小于 1 m 和 0.3 m。

开展微重力测量时应设立基点。在基点应作多次测量，其结果可用来对重力随时间的变化以及仪器本身的零漂进行改正。此外，还要精确地测定出中间层的密度以便作中间层改正。在操作技术上，仪器底盘的放置、调平，测定高程等方面都应该按严格的要求和规定执行。

在以地面沉降监测为目的重力观测中，要布设长期的重力监测网，进行定期重复观测，并与绝对重力点联测。

四、资料整理和解释

对于微重力观测得到的数据整理，除与常规重力观测数据整理（改正）相同的项目外，为确保达到微伽级的观测数据的质量要求，还需要进行近仪物体影响的改正和一定范围内建筑物影响的改正。这几方面的改正在常规重力观测数据整理中一般是不需要的。至于与常规观测数据改正相同的一些改正项，要求也不尽相同。对微重力测量数据而言，要求测点高程、中间层密度值和地形改正时使用的岩石密度都要精确地测定。

微重力观测数据改正主要包括：(1) 重力随时间变化的改正，重力随时间变化包括固体潮和仪器零漂的影响；(2) 正常重力改正，消除由于测点所处纬度不同而引起的重力变化；(3) 中间层改正，消除测点到基准面（基点所在的水平面）之间的物质对实测重力值的影响；(4) 高度改正，消除测点相对基准面的高程对实测重力值的影响；(5) 地形改正，消除测点周围地形起伏对测点重力的影响。微重力测量要求准确地确定出距测点 50 m 以内的地形改正值；(6) 近仪物体改正，这是微重力测量数据整理中的一项特殊内容。近仪物体一般指的是靠近重力仪的，具有一定质量的物体，如地面人工建筑物、仪器观测台等。它们对每个测点会产生不同的引力效应，其数值可达几微伽至几十微伽。改正的方法是：一般将人工建筑物视为规则形状的几何体（如圆柱体、长方体等）或几种类型规则几何体的组合，通过野外测量测出它们的坐标位置、几何形状和密度，然后计算出这些规则形体引起的重力值，便可作近仪物体的改正。

经上述数据整理后，可以求得各测点相对于基点的重力值，由此可绘成剖面图或平面图，称为布格重力异常图，它们反映了测区近地表物质的密度分布。

重力异常的数据处理主要包括：异常的平滑和划分、位场转换等。异常的解释包括定性解释和定量解释，前者主要是判断异常特征与地质体的关系，后者则是根据异常特征计算出探测目标的埋深、产状等要素。

微重力测量作为一种精细的浅层探测技术，已在土木工程和环境勘察中得到应用，它可以探测近地表溶洞、洞穴、废矿山巷道以及规模较小的断裂、断层等地质构造；在水库、矿山巷道可以用微重力动态监测因岩层受力变化而可能诱发的岩爆；它还可用于地面沉陷的监测。然而，由于方法本身的局限性，如受各种干扰因素的影响强烈，测量成本较高，野外作业复杂以及在环境应用中探测目标重力异常微弱等，在一定程度上限制了该方法的应用。

第六节　磁　　法

磁法是利用地下岩矿石或岩土介质之间的磁性差异所引起的磁场变化（磁异常）来寻找有用矿产资源，查明地下地质构造和解决其它地质问题的一种探测方法。过去磁法大多用于研究大地构造和寻找磁性矿体。随着国民经济和社会发展的需要，近年来它已在工程和环境方面得到应用。

一、基本理论和概念

实测磁场总是由正常磁场和磁异常两部分组成。其中正常磁场又由地磁场的偶极子场和非偶子场（大陆磁场）组成。磁异常是由地下岩矿体、地质构造、磁性填土和各种掩埋的磁性体等受地磁场磁化后，在其周围空间形成并叠加在地磁场上的次生磁场，它是磁法研究的主要对象。

传统的地面磁测主要测量磁场的垂直分量，使用的是机械式磁力仪和磁通门磁力仪。80年代以来，这两种类型的磁力仪已逐渐淘汰。目前，国内外大多使用质子磁力仪和光泵磁力仪。质子磁力仪和光泵磁力仪测量地磁场总矢量（或称总场）及其梯度。

地下介质之间的磁性差异是磁法测量的物性前提。磁性一般由磁化率和磁化强度表示。磁化强度包括感应磁化强度和剩余磁化强度。感应磁化强度表示各种岩石或介质在现代地磁场的磁化作用下所具有的磁性，它与现代地磁场强度、作用方向以及岩石或介质的磁化率有关。剩余磁化强度表示各种岩石或介质在地质历史条件下被古地磁场磁化所保留下来的磁性，它基本上不受现代磁场的影响而保持着其固有的数值和方向。在环境勘察中，一般不考虑剩余磁化强度，但在考古调查中，探测目标的剩磁不能忽视。

二、磁力仪

磁力仪作为磁法测量的主要设备，近年来随着微电子技术的进步有了很大的进展。早期使用的机械式磁力仪、磁通门磁力仪基本已被淘汰，取而代之的是质子磁力仪和光泵磁力仪。

近年来，加拿大、美国和澳大利亚等国相继研制出了一些新产品。

加拿大 Scintrex 公司 1993 年推出了新型 ENVI MAG 质子磁力仪。这是一种轻便型（WALKMAG）仪器（野外作业总重量 5.5 kg），主要用于环境、工程勘察。其灵敏度 0.1 nT，步行测量每秒采样两次。液晶显示屏直接显示所测数据。1994 年，该公司又研制出了 SMARTMAG 光泵磁力仪，其灵敏度 0.01 nT、采样率 1、2、5、10 次/秒任选，可通过图

形、数字和声音实时显示。

美国硅谷的Geometrics公司1995年研制的G 858型光泵磁力仪，具有稳定、灵敏度高（0.01～0.05 nT）、多种方式显示、野外作业方便等特点。澳大利亚推出一种微机控制TM-1型铯光泵磁力仪系统，灵敏度0.01 nT，采样率100次/秒，采样间距最密可达0.05 m，可用步行和车载方式测量。

总之，近年来研制的磁力仪具有如下特点：（1）既能测量总场，又能作梯度测量，从而增大了信息量，有助于提高分辨率；（2）数据输出方式体现了多样化，能以数字、图形（曲线）和声音多种方式输出，便于测量人员现场进行数据处理、模拟和解释；（3）配置了GPS（全球卫星定位）系统，从而实现了磁测和测地工作同时进行。

三、野外工作方法

在环境勘察中一般采用高精度磁测和磁梯度测量方法。测网的密度主要取决于所探测的目标。由于磁力仪比较轻便，野外一人或二人便可作业，在测网上逐点进行测量。在测区附近必须设立基点观测站，其作用是将测区内的观测结果换算到统一的水平。另外还应该设立日变观测站，以便消除地磁场短周期扰动的影响。基点和日变观测站应该选择在人文噪音小的地方。

磁测取得的数据须进行整理，以求出磁性体在各测点产生的磁异常值。一般来说，只要算出测点相对基点的磁场增量就可以认为是测点的异常值。另外，还要对计算结果进行日变改正。由于高精度磁测仪器无零点漂移和温度的影响，故无需作温度改正和零点改正。考虑到环境勘察中所调查的范围不是太大，一般不进行纬度改正。

四、磁测数据的处理与解释

在环境勘察中获得的磁测数据的处理与解释方法与矿产勘查中数据处理与解释方法基本相同。数据处理大体上可分为滤除干扰的一般处理和提取信息的专项处理两类。一般处理的目的在于滤除干扰，得到能客观反映磁场面貌特征的基础图件。专项处理目的在于尽可能多地提取有效信息，或改变异常形式，使其更便于解释以及与地质等综合信息的对比分析。

专项处理方法大致分成三类：（1）位场转换处理方法，如化极处理、磁重转换等；（2）突出“平缓场”弱变化的处理方法，如自适应滤波、互相关滤波等；（3）划分区域场与突出局部异常的方法，如上、下延拓、求导与积分、匹配滤波等。需指出的是，上述处理方法的应用应根据实际情况进行取舍。

磁异常的解释与重力异常的解释相似，但同样形状物体的磁异常比重力异常要复杂，因为磁异常形态取决于诸多因素，如物体的几何形态、物体所处位置上的地磁场方向、组成物体岩土的磁化方向、相对于物体轴向的测线方位等等。因此，在解释磁异常时，要特别注意分析磁异常的平面特征和剖面特征。磁异常反演可以采用比较成熟的一些反演方法，如特征点法、切线法、梯度积分法、矢量解释法、线性反演法等等。

第七节　测井和井中物探

测井和井中物探方法是指在钻孔中进行测量的两种方法，前者是以测量井壁岩石的物理参数和钻孔状况参数来研究地质问题的，如划分岩性和地层，确定孔隙度，探测破碎带

等；后者则以钻孔为媒介来探查钻孔周围、钻孔之间、钻孔与地面之间的地质目标，如裂隙、构造、洞穴等等。测井和井中物探作为石油勘探和金属矿产勘探的一种手段，已有几十年的历史，目前已成为石油勘探和开发中的一个不可缺少的工作环节。随着水文、工程和环境地质勘察任务的日益增多，以及对某些特殊勘察任务（如有害废料处理场的选址等）提出的高要求，一些常规的测井和井中物探方法已用于这一领域，其中包括电阻率测井、自然电位测井、放射性测井、声波测井、井中无线电波透视和钻孔地质雷达等。

就测井和井中物探方法在环境勘察中的应用状况而言，它们不如地面物探方法那么广泛地被使用。这一方面是受钻孔的限制，另一方面还取决于地质环境以及钻孔测量的条件等因素。以下扼要地介绍一些主要的测井和井中物探方法。

一、电阻率法测井

电阻率法测井是以研究介质导电性为物理基础的一组测井方法，其中包括视电阻率测井、感应测井、侧向测井等。电阻率法测井的主要目的是根据电阻率曲线划分岩层、确定其厚度、定量地确定岩层的电阻率和视孔隙度等。

岩石电阻率的大小受许多因素的影响，如矿物成分、孔隙度、孔隙中流体的盐度、温度等。导电矿物，如石墨、硫化物，对电阻率有较大的影响，而粘土矿物的存在也会降低岩层的电阻率。

在视电阻率测井野外装备中，包括产生电场的供电部分和测量电场的测量部分。供电电流由 A、B 电极供入地层，电场在岩层中的分布受不同岩层的电阻率所控制。当岩层电阻率变化时，由供电电极 A、B 在测量电极 M、N 处所形成的电场也必然发生变化。因此，根据电场的变化可推断出岩层电阻率的变化。

测井时，放入井中的几个电极（A、M、N 或 A、B、M）组成电极系，电极系通过电缆与地面电源和记录仪器相连接。当电极系在钻井内移动时（通常是在提升的过程中测量）就可以记录出连续的视电阻率测井曲线。视电阻率法测井一般只能在充有液体的未下套管井中进行测量，这一条件在很大程度上使它在监测污染物运移等应用中受到限制，因为大多数监测井均是在固结性很差的沉积层中打的，往往下有套管。

二、自然电位测井

在未向井中供电的情况下，可以观测到位于井中的电极与地面电极之间存在着电位差，这就是自然电位。在井中观测自然电位，并根据自然电位曲线研究钻孔地质剖面的方法，称之为自然电位测井。

在矿产勘查中，自然电位测量已广泛地用于圈定硫化物和石墨导体。自然电位是由导体内的电化学反应引起的。在沉积环境中，自然电位可能是由流体的流动（电滤作用）、温度变化（热电）、化学成分变化，岩层流体中电解质浓度的变化以及多孔岩层、泥质含量等因素引起的。因此，自然电位测井主要用来划分岩性、圈出岩层中多孔的渗透层、确定地层水电阻率、估计泥质含量和研究流体的运动。

三、声波测井

声波测井是利用声波在钻井中传播的各种参数来研究钻井剖面。由于声波测井仪发射的声波频率（一般选在 20 kHz 左右）往往都大于音频，故又称之为超声测井。

声波测井的方法较多，在工程、环境地质勘察中应用最多的是声速测井。声速测井仪器目前有单发射双接收式（一发二收）和井眼补偿式（二发四收）两种。

在进行声波测井时，将装有声波发射器T和接收器R_1、R_2的井中探测部分放入注有井液的钻孔中。T与地面上的脉冲信号源相连，R_1和R_2则与电子线路构成的记录装置相连。发射器以脉冲形式发出声波，而到达接收器的，有经地层滑行又折射回泥浆中的折射波，有直接在泥浆中传播的直达波以及井壁的反射波，而声波测井的测量对象是经过地层滑行的折射波。

声波测井可用来确定地层的孔隙度、划分岩性和地层对比以及用纵、横波速度测井资料计算岩石弹性模量。

除声速测井外，声波测井的方法还有声幅测井和超声电视测井。声幅测井是测量声波振幅，并根据其衰减特性来研究岩石结构及孔隙中流体性质的方法。超声电视测井是一种能直接观测井壁情况的方法。其换能器能随着深度的变化对井壁作螺旋状的连续声波扫描，即不停地向井壁发射声波脉冲，并不断地接收由井壁反射回来的反射波。由此可得到反映整个井身面貌的图像记录，对确定井中的裂隙和破碎带等有较好的效果。

四、放射性测井

放射性测井是在井中测量岩石和孔隙流体的核物理性质（如物质的天然放射性、人工核反应等）的一类测井方法。与其它测井方法相比，它们具有两个重要特点：一是由于放射性核素的衰变不受温度、压力、电磁场等的影响，因此可以更直接地研究岩石的核物理性质并确定元素组分。二是放射性测井使用的γ射线及中子流具有较强的穿透能力，因此它们在裸眼井或套管井、充水的井或充泥浆的井中都能进行测量。

下面介绍几种在环境调查中常用的放射性测井方法。

1. 自然γ测井

自然γ测井是沿井身研究岩层天然放射性的方法。其测量原理为：在井下装置中装有γ探测器，它将接收到的γ射线转变成电脉冲，经电子线路放大、整形后，通过电缆传送回地面。地面仪器中设有计数率测量线路，将电脉冲变换为与脉冲计数率成正比的直流电压，最后作出γ测井曲线。

沿钻孔剖面测得的γ曲线反映了井内各岩层放射性元素U、Th和^{40}K含量变化而引起的天然放射性活度的变化。对于沉积岩而言，主要的天然γ辐射源是粘土矿物（如伊利石和钾长石）中的^{40}K。因此，γ测井曲线上γ射线的强弱（以脉冲/分表示，在仪器经过标定后以μA/kg为单位）直接反映了岩层中泥质含量的多少。在火山岩和变质岩中，K、U和Th对γ辐射的贡献近于相等。

由于不同类型的岩石含有不等量的放射性矿物。因此，在水文、工程和环境调查中，自然γ测井可以划分岩性，进行地层对比，确定岩石中泥质含量及渗透性等。当利用不同能量的γ射线峰分别测定铀、钍、钾含量时，这种测井方法就称为自然γ能谱测井。

2. 密度γ-γ测井

散射γ-γ测井是在钻孔中用人工γ射线源照射岩层，然后用γ探测器记录被岩石中的电子所散射的γ射线。散射γ射线的强度与岩石密度有关，故这种γ-γ测井又称为密度测井。

组成造岩矿物的元素大多是原子序数较小的轻元素，它们与中等能量的γ射线相互作用，发生康普顿散射。散射几率取决于物质中电子的密度，而电子密度又与岩石密度成正比。当用γ源照射井壁时，被照射岩石的密度愈大，康普顿散射的几率也愈大，表明原子

壳层吸收γ射线多，因而散射的γ射线弱。反之，岩石密度愈小，散射的γ射线愈强。因此，在γ-γ测井曲线上，对应于低值部分的是密度大的岩层，而对应于高值部分的是密度小的岩层。

进行密度γ-γ测井时，把保持一定距离的γ射线源和探测器一起放入井中。γ射线源连续地向岩层发射出γ射线，而探测器接收经过与物质相互作用后到达探测器的散射γ射线。

密度γ-γ测井曲线受多种因素的影响，并且与地质环境有关。在沉积环境中，它可用来划分岩层、确定岩层的孔隙度。然而，在火山岩和变质岩中，曲线难以解释，因为岩石的密度变化较大。

3. 中子测井

中子测井是利用中子和物质相互作用产生的各种效应来研究钻井剖面中岩石性质的测井方法。根据探测器所记录的物理量不同，中子测井可以分为中子-伽马测井和中子-中子测井两类。

进行中子测井时，把装有中子源和探测器的下井仪器由电缆放入井中。从中子源发出的高能中子射入井内和岩层中，高能中子与物质的原子核可能发生下列作用而减弱为低能中子和被原子核吸收（也称俘获）：(1) 非弹性散射；(2) 弹性散射；(3) 中子被原子俘获，引起核反应。因此，探测器记录的低能中子数量，或原子核俘获中子后放出的γ射线的强度，是和地层的减速性质和吸收性质有关。因为氢是最特殊的减速物质，所以中子测井结果将反映地层的含氢量。在含水的地层中，孔隙被水充满，故中子测井可能反映岩层孔隙度的大小。由于氯能俘获中子，所以中子测井也可以反映地下氯化物的污染。

五、无线电波透视法

无线电波透视法是利用探测目标与周围介质之间的高频电性差异来研究、确定目标位置、形态、大小及物性参数的一种井中物探方法。

无线电波透视法使用的是频率较高（一般为一百千赫至几十兆赫）且具有一定能量的电磁波。它可以在真空及各种介质中传播，但不同的介质对其吸收的程度也不一样。真空不吸收电磁波，高阻岩石对电磁波的吸收较弱，低阻矿体或充水溶洞对电磁波的吸收较强。无线电波透视法就是通过研究钻孔或坑道间电磁波被介质吸收的情况来寻找、圈定各种目标。

无线电波透视法工作时，将发射机及其天线放置在一个钻孔（或坑道的巷道）中，接收机及其接收天线放置在另一个钻孔(或巷道)中。工作频率一般可在100 kHz～n×10 MHz之间。测量时不断移动接收机（或包括发射机）。当钻孔（或巷道）间有良导体存在时，电磁波被强烈吸收，因而在接收机所处的相应井段便出现场强曲线的低值异常（或者称为"阴影"）。根据收、发仪器间相对位置以及异常出现部位便可推断两钻孔（或巷道）之间的介质情况，确定其间是否有溶洞、裂隙等目标。

井中无线电波透视法的观测方式有同步法和定点法两种。同步法是将发射机和接收机分别下到两个井孔中，然后同步地上下移动进行观测。如果发射机和接收机保持同一高度，同步测量就称为水平同步法。如果发射机和接收机处于不同高度同步测量就称高差同步，高差的大小一般视井间距、井深及岩层产状而定。定点法测量一般是将发射机固定于井孔中某预选位置，然后将接收机置于另一井孔进行移动测量。实际工作中，一般先用同步法了解井间地质体的大致位置，继而再利用定点法进一步确定异常体的边界和轮廓。

在无线电波透视法中，频率的选择十分重要，它直接影响透视的距离和对异常的分辨能力。一般来说，频率高、波长短、对异常体的分辨能力强，但随之而来的是吸收增强、透距变短。反之，频率低、波长长，吸收弱，透距变大，更适合研究较大范围内地质体的变化，但对异常体的分辨能力也降低。

无线电波透视法接收机所获得的记录是以微伏数所表示的电场值，经整理可以绘制实测场强 E 沿剖面的变化，作图时以纵坐标表示井深，横坐标采用对数比例尺表示场强 E。

井中无线电波透视法最常用的解释方法是交会法，即首先根据经过井斜校正的井孔剖面，按一定的比例尺绘制包括井孔在内的断面图，利用水平同步、高差同步或定点法的资料，在断面图上由各发射点分别向接收井孔的各异常边界引直线，从这些直线交会的结果，可获得一个阴影区，见图 2-9。这个公共的阴影区的空间位置、形状、规模等基本上反映了低阻异常体的范围和轮廓。

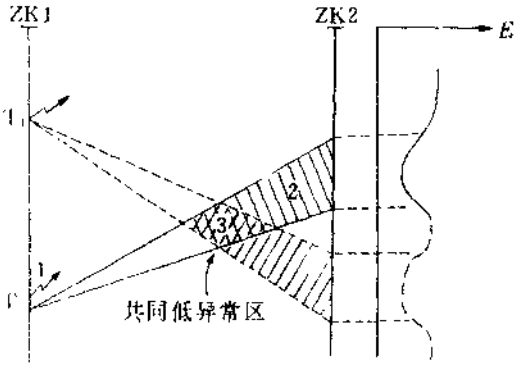


图 2-9　交会法原理示意图

1—发射点；2—阴影区；3—共同阴影区

在水文、工程和环境地质勘察中，利用无线电波透视法可以研究溶洞、地下暗河、断裂破碎带的存在与分布。

六、钻孔地质雷达测量

钻孔地质雷达是在地面地质雷达的基础上于 80 年代中后期开发出来的一种新的井中物探方法。其基本原理与地面雷达的原理相同。

80 年代中期，美国地调所研制出了单孔短脉冲雷达系统和双孔电磁短脉冲转发器系统。后者的特色之一是，位于接收孔中的脉冲转发器可以把接收到的脉冲波放大、并反转发射，让位于发射孔中的发射机又接收信号。此后，研制人员又将单、双孔雷达系统升级为微机控制，可以就地实现采集、静校正和数字记录。

80 年代中后期，瑞典国家地质公司和 ABEM AB 公司共同开发了 RAMAC 钻孔雷达系统。该系统既可用于单孔、双孔，也可作井-地测量，既可在干井中测量，也可在充水的井中测量。系统的数据采集由微机控制，双井资料可作层析成像分析。在花岗岩地区，井间透距达 150 m。据报道，在单井测量中曾探测出钻孔周围 50～100 m 范围内仅几分米宽的断裂。

此外，日本 OYO 公司、英国等也开展了钻孔地质雷达的研究并研制出相应的系统。

各种钻孔雷达系统的测量方法大体上是相同的。以 RAMAC 为例，其主要方法有：(1) 单孔反射测量，主要用于探测地下裂缝、孔洞、岩脉和其它反射目标。测量方法是，将发射机和接收机置于孔中，它们之间用玻璃纤维杆隔开。测量间距根据实际情况调节。发射机向钻孔周围各个方向发射脉冲，脉冲通过岩层传播，遇到裂隙、孔洞或其它岩性变化特征时产生反射波，被接收机接收，接收到的信号通过光纤电缆被传送到地面控制器。(2) 跨孔测量（或井-井测量），主要是作跨孔层析成像测量，以提供两钻孔之间岩性、构造和断裂等方面的信息。(3) 隧道与钻孔间的反射测量，将接收机置于隧道的钻孔中，而发

射机沿隧道逐点移动。这种测量方式可获得隧道掘进前方的地质情况，可以有效地探测出隧道前方的岩墙、剪切带或地层软弱带等。(4) 垂直雷达剖面测量。测量时发射机置于地面，接收机放入钻孔。改变发射机在地面的位置可测得不同剖面。用这种测量方法可探测到废弃的坑道等。

钻孔地质雷达以其分辨率高、探测效果明显为特点，使之在水文、工程和环境地质、矿山地质等众多领域获得了应用，如地下洞穴探测、岩溶和地下水调查、地下厂房、地下隧道及废弃老矿山巷道的探测，地下废料的探测与监测等。

第八节　地球物理层析成像技术

70年代初计算机层析成像技术（Computerized Tomography，简称CT）的问世在医学上引起了一场革命，产生了巨大而又深远的影响。随着该技术的不断发展和完善，它已被广泛用于其它学科和领域，如射电天文学、地球物理学等。

70年代中期，地球物理学家将CT技术用于地球物理的试验研究，在此后短短20年时间中取得了许多成果并逐渐形成了一门地学层析成像技术(Geotomography，简称GT)。GT技术是地球物理学与层析成像技术相结合的产物，它是利用地震波或电磁波在地下介质中的传播特性，通过反演算法来重建地下介质的分布图像。目前，GT技术已广泛用于地球物理学的多个研究领域，从地球科学研究中地球内部精细结构的探测，石油勘探开发中岩性圈闭的寻找，金属矿勘探中深部盲矿的勘查，到工程、灾害和环境地质中查明地下构造、裂隙等的分布规律，它已发展成为研究地下精细结构的一种有效手段。本节扼要地介绍用于近地表（浅层）地球物理勘查的层析成像技术。

一、基本原理

层析成像技术是根据对物体外部获取的某种物理量的测定值（或称投影）进行处理以重建物体内部图像的一种技术。所谓层析成像，是对物体进行逐层剖析成像，相当于把物体切成片，用波去穿透物体，让波带出关于物体内部的信息，通过对这些信息的处理来重建物体的内部图像。

从物体内部图像重建的角度看，一张物体切片的图像是两个空间变量（x，y）的函数，称为图像函数，记为$f(x, y)$。用不同方向的入射波穿过物体，观测到的波场信息至少是入射波方向θ和观测点位置ρ两个变量的函数，称为投影函数，可记为$u(\rho, \theta)$。1917年奥地利数学家Radon证明，已知所有入射角的投影函数$u(\rho, \theta)$可以恢复唯一的图像函数$f(x, y)$，人们称之为Radon变换，它成为层析成像的理论基础。

从物理角度来看，各种波动（地震波、电磁波等）在时间和空间上都是连续的。当它们在介质中传播时，由于介质物性上的差异（如密度、速度、介电常数、电导率等）使得它们的传播速度的大小及方向发生变化，能量吸收也因介质而异。因此，当波穿过某一物体时，必定会把物体内部的物性参数的信息携带到物体外部来，只要在物体外部测得波穿过物体后的有关参数（即投影函数），通过适当的反演方法便可重建物体内部图像。

因此，从本质而言，层析成像属于反演问题，因为它是通过参数的观测结果来求解参数的空间分布。一般来说，层析成像方法适用于能以数据形式获得某种参数（例如地震波传播时间或电磁波衰减等）的条件，但入射波必须穿透物体并且参数的变化应该能测得出

来。

二、数据采集

在地球物理层析成像中，一般都是将待成像的区域划分为许多单元组成的网格，单元被称为“像元”。假定每个像元为常数，它代表了图像函数 $f(x, y)$。像元的大小取决于诸多因素，如震源和接收器的间距等。由发射源发射出的具有一定方向性的射束被称为“射线”，射线穿过成像区域到达接收点。接收器记录到变化了的信号，该信号代表了 $f(x, y)$ 沿射线路径的积分。待成像平面被许多交叉离散的射线穿过。

为了获得多方向的射线覆盖，数据采集常用以下三种方法。

(1) 在某一特定方向上产生一系列平行的、非重叠射线（形成投影），然后以均匀的步长旋转，得到不同角度的一系列投影（图 2—10），称之为“平行串排列”。

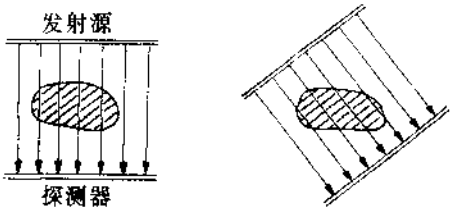


图 2—10　平行束发射-接收排列

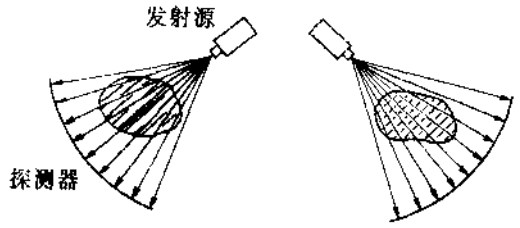


图 2—11　扇形束发射-接收排列

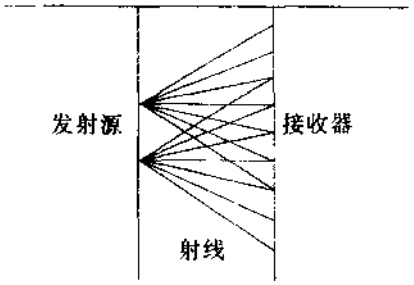


图 2—12　跨孔发射-接收排列

(2) 在区域的一侧使用单一的点发射源，而在另一侧将探测器沿直线或弧线排列，按 (1) 方式将固定的发射-接收装置绕物体转动（扇形束排列，图 2—11）。

(3) 在物体的一侧布设线性发射源排列，而在另一侧沿平行发射源排列布设接收器排列。这实际上是跨孔排列（图 2—12），它是数据采集方法中最典型的一种。

三、地球物理层析成像方式

目前，地球物理层析成像包括地震层析成像、雷达层析成像和电阻率层析成像三种方式，其中以地震层析成像使用最为广泛。表 2—6 将三种成像方式作了简单的对比。

从表 2—6 可见，地震层析成像和雷达层析成像是以波动现象为基础的，而电阻率层析成像则利用了电位这一物理参数，两者有较大的差别。地震波和雷达波层析成像的投影数据反映了沿射线路径的物性值（速度和衰减系数等）分布，而电阻率层析成像的数据却反映了发射、接收电极周围较大范围的电阻率分布。

与地震层析成像相比，雷达层析成像发展相对缓慢，应用也少得多，其主要原因是雷达波的波长很短，其衰减比地震波大得多。另外，在下有金属套管的钻孔中或有支护的地方，电磁波受屏蔽的影响甚大，在低电阻的岩层中电磁波衰减很快，透距显著减小。因此，

表 2—6　三种地球物理层析成像方式的对比

成像方式	地震层析成像		雷达层析成像	电阻率层析成像
物理现象	地震波		电磁波	直流电场
测定量	直达波	振幅	反射与绕射	电位
重建图像	速度分布	衰减系数分布	反射体与绕射体的分布	电阻率分布

总的来看，地震层析成像已发展成为较成熟、应用广泛的方法，而雷达层析成像和电阻率层析成像尚处于试验研究阶段。

四、成像方法

对地震层析成像和雷达层析成像而言，其层析成像方法大致可分为两种类型：一种是基于射线理论的图像重建技术，在数学上也就是由一个函数的线积分反求这个函数的问题，它可以化为相似的代数方程组。走时反演成像和振幅反演成像均属这种方法。当射线为直线时，这类方法比较成熟。但是，在实际应用中，由于客观条件的限制，经常会遇到数据不全的问题。另外，当必须考虑射线弯曲的情况时，理论上还有不少困难。另一种是基于波动方程反演的散射（或衍射）层析成像方法。在数学上它属于解偏微分方程反问题。波场成像属此类方法。当地震波波长与被测物体的特征尺寸属于同一数量级时，射线理论就不适用。散射层析成像在理论上还比较粗糙，方法也不成熟。

走时反演成像方法是目前使用较为成熟的方法，主要包括反投影法（BPT）、代数重建法（ART）、联合迭代重建法（SIRT）、共扼梯度最小二乘法（CGLS）和正交分解最小二乘法（LSQR）等。在工程、环境调查中，通常在现场需要对数据进行处理和解释，故一般选用较为简单的成像方法，使之在个人计算机上便能快速实行。

对于电阻率层析成像来说，其成像方法与利用波动现象的成像方法有较大的区别。由于电阻率层析成像的测量数据反映了较大范围的电阻率分布，受较大范围内电性不均匀的影响，因而在成像时应考虑成像区的外部构造及相邻区地形的影响等。

五、在工程和环境调查中的应用

地球物理层析成像方法作为一种新技术，近十多年来已在工程和环境调查中得到了应用。例如，地震层析成像比较适合于工程建筑物场地的调查（如大坝、地下工程、核废料处理场地的选址），评价和监测建筑物结构及地下建筑周围岩体的完整程度，探测地下溶洞、裂隙等。电阻率层析成像已试验性地用于监测地下水污染的情况，研究破碎带及断层这样的地下构造。从应用的现状来看，地震层析成像技术的发展已较为实用，应用范围也很广。随着该技术理论研究的进一步深入，观测方法的改进，以及数据处理和成像方法的完善，它将发挥更大的作用。

第三章　地球物理场对环境的影响及其监测

第一节　天然放射场

地球近地表环境的天然放射场主要是由岩石圈、水圈和大气圈的各种天然放射性同位素引起的。按其形成和积累的条件，天然放射性元素可以分为四类。

（1）长寿命放射性重元素，是在地球发育的初期形成的，即三个放射性系列的母元素$^{238}_{92}U$、$^{235}_{92}U$和$^{232}_{90}Th$。

（2）短寿命放射性元素，是$^{238}_{92}U$、$^{235}_{92}U$以及$^{232}_{90}Th$的子产物，其中对研究天然放射场最有意义的是Ra和Rn。

（3）长寿命不成系列的放射性同位素，如$^{40}_{19}K$、$^{87}_{37}Rb$、$^{147}_{62}Sm$等，也是在地球发育的初期形成的，在这类元素中只有$^{40}_{19}K$对天然放射场作出可观的贡献。

（4）由于宇宙射线的粒子与地球物质的原子核相互作用而在大气圈、水圈和岩石圈中产生的放射性同位素，以轻元素和短寿命元素为主，如^{14}C。

地壳岩石的绝大部分α、β和γ辐射与三个放射系列和钾的放射性衰变有关。

一、人体所接受的辐射剂量主要来自氡

根据美国辐射防护和测量委员会的统计，居民每年所接受的辐射剂量当量有82%来自天然源（其中氡占55%，宇宙射线占8%，岩石和土壤占8%，人体自身的辐射占11%，合计82%），其余18%来自人工源（医用辐射占15%，其它占3%）。由此可见，从总体而言，人体所接受的天然辐射剂量当量中氡的辐射剂量当量约占2/3，构成了对人体最大的辐射威胁。

氡是唯一的气体放射性元素，易于吸入人体，氡及其子体对人体的长期辐射作用能引起癌症，尤其是肺癌。根据美国环境保护署（EPA）1986年所作的推算，当室内氡活度浓度为74Bq/m³[1]时，每千人中有7～30人死于肺癌；氡浓度为148 Bq/m³时，每千人中有15～50人死于肺癌；370 Bq/m³时，每千人中有30～120人死于肺癌；740 Bq/m³时，每千人中有60～210人死于肺癌。值得注意的是，由氡导致的肺癌大多数是由接近或略高于正常水平的氡浓度引发的，因为大多数居民正是生活在这种环境中。

过去人们曾经认为，室内氡气浓度偏高是由于房屋建在铀矿区附近或者无意中采用了富含铀的建筑材料。但后来的调查表明，氡浓度偏高的建筑物分布范围要广泛得多，远远不是只在铀矿区附近。例如，根据美国一些地区对室内氡活度浓度所作的抽样调查，有12%的房屋超过美国环境保护署提出的148 Bq/m³（4 pCi/L）的限值（该署认为氡浓度超过此值的房屋都应当采取治理措施）。其他一些国家的室内氡浓度抽样调查结果见表3—1。

[1] 1 pCi/L=37 Bq/m³，参看表3—2。

表 3—1　一些国家室内氡活度浓度抽样调查的结果

国　名	测量数目	最高读数/（Bq/m³）	超过 118 Bq/m³ 的百分比
加拿大	>16	1258	21
瑞　士	634	26973	62
挪　威	293	10656	58
意大利	67	2220	28
瑞　典	47072	42180	81

二、氡与人体健康的关系

为了便于说明氡对人体健康的危害，首先简要介绍一下与此有关的一些辐射计量单位以及它们之间的换算，见表 3—2。

表 3—2　辐射计量单位及其换算系数

参数	单位名称及符号	定　义	换　算
放射性活度 A	贝可（勒尔），Bq	每秒衰变一次的放射性活度	1 Ci＝3.7×10¹⁰ Bq
	居里，Ci，非 SI 制	1 克镭的放射性活度（相当于每秒衰变 3.7×10¹⁰ 次）	
	皮居里，p Ci，非 SI 制	居里的派生单位	1 pCi＝3.7×10⁻² Bq
吸收剂量 D	戈（瑞），Gy	每千克质量的物质吸收 1 焦耳的辐射能量（J/kg）	1 Gy＝100 rad
	拉德，rad，非 SI 制	每克质量的物质吸收 100 尔格的辐射能量（100 erg/g）	1 rad＝0.01 Gy
剂量当量 H	希（沃特），Sv	吸收剂量 1 戈（瑞）对生物机体所造成的损害，1 Sv＝1 Gy×Q×M，Y、X、β 射线的品质因素 Q 定为 1，而 α 射线的 Q 定为 10，M 为修正因数	1 Sv＝100 rem
	雷姆，rem，非 SI 制	吸收剂量 1 拉德对生物机体所造成的损害，1 rem＝1 rad×Q×M	1 rem＝0.01 Sv＝1/6 WL
潜在 α 辐射能量浓度	工作水平，WL	单位体积空气潜在的 α 辐射总能量，1 WL＝1.3×10⁵ MeV/L	1 WL＝6 rem＝0.06 Sv
照射量 X	工作水平月，WLM	1 WLM 相当于 1 WL 照射 170 h	

放射性活度的国际单位制（SI）单位为贝可勒尔，简称贝可（Bq）。放射性活度指的是放射性物质在单位时间内衰变的原子数，贝可为每秒衰变一次。居里是非国际单位制单位，1 居里（Ci）为每秒衰变 3.7×10¹⁰次，也就是 1 g 镭的放射性活度。在氡的环境调查中，美国等国家较常用的表示氡气活度浓度的单位为 p Ci/L（皮居里/升），皮居里是居里的派生单位，等于 10^{-12} Ci，这不是我国法定计量单位。国际单位制氡的活度浓度用 Bq/m³ 或 Bq/L 来表示，1 p Ci/L＝37 Bq/m³。

吸收剂量单位。电离辐射通过物质时，单位质量的物质所吸收的辐射能量称为吸收剂量。辐射对生物机体的危害程度与该机体吸收的辐射能量密切相关。吸收剂量的 SI 单位为戈（瑞）（Gy），1 戈（瑞）表示 1 千克物质所吸收的辐射能量为 1 焦耳。非国际单位制吸收剂量单位为拉德（rad），1 拉德表示 1 克物质所吸收的辐射能量为 100 尔格，100 rad＝1 Gy。

剂量当量单位。在相同的吸收剂量条件下，由于射线性质和照射条件的不同，各种射

线对机体的危害程度也不同。例如在相等的吸收剂量情况下，α射线对机体的危害程度比γ射线大10倍，这个倍数称为品质因数（Q）。γ射线，X射线和β射线的Q都被定为1，而α射线的Q=10。此外，同一种射线，由于吸收剂量的空间分布不同（例如全身照射还是局部照射，受照射组织的种类等）、时间分布不同（如照射的间断时间和频率等）以及其它照射物理条件的不同，也会给机体带来不同程度的危害，由此又引入了修正因数（M）的概念。剂量当量H是吸收剂量D与品质因数Q和修正因数M的乘积，即

$$H = D \times Q \times M \tag{3.1}$$

Q和M是量纲1的，所以剂量当量与吸收剂量具有相同的量纲。剂量当量的国际单位制单位为希（沃特），简称希（Sv）

$$1\ \mathrm{Sv} = 1\ \mathrm{Gy} \times Q \times M \tag{3.2}$$

传统上使用的非国际制剂量当量单位为雷姆(rem)，1雷姆等于百分之一希(沃特)。

按照我国放射卫生防护标准GB4792-84的规定，在长期持续受到辐射的情况下，公众中个人一生中每年的全身照射剂量当量限值应不高于1 m Sv。

潜在α辐射能量浓度单位。鉴于氡的子体的α辐射可对人体健康造成最大的危害，于是又产生了空气中氡衰变产物允许污染水平的概念，并因此而提出工作水平（WL）的单位，它是用单位体积空气中潜在的α辐射的总能量来表示，1 WL=1.3×10⁵ MeV/L。这相当于空气中所含有的每种短寿命氡子体的放射性活度浓度约为3700 Bq/m³（100 p Ci/L）。

照射量单位。$X=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}m}$，dQ是当核辐射在质量dm的某一体积内的空气中释放出来的全部电子被完全阻止于空气中时，在空气中所形成的一种符号的离子总电荷的绝对值，单位符号C/kg。在衡量氡及其子体对健康的危害时，常用的照射量单位为工作水平月（WLM），即人在1 WL的空气中停留一个工作月（170 h）。

氡有三种天然同位素，它们分别属于$^{238}_{92}$U、$^{232}_{90}$Th和$^{235}_{92}$U三个放射系列：

$$^{238}_{92}\mathrm{U}\cdots\cdots\rightarrow{}^{226}_{88}\mathrm{Ra}\rightarrow{}^{222}_{86}\mathrm{Rn}\rightarrow\cdots$$

$$^{232}_{90}\mathrm{Th}\cdots\cdots\rightarrow{}^{224}_{88}\mathrm{Ra}\rightarrow{}^{220}_{86}\mathrm{Rn}\rightarrow\cdots$$

$$^{235}_{92}\mathrm{U}\cdots\cdots\rightarrow{}^{223}_{88}\mathrm{Ra}\rightarrow{}^{219}_{86}\mathrm{Rn}\rightarrow\cdots$$

由于$^{220}_{86}$Rn和$^{219}_{86}$Rn的半衰期分别只有54.5 s和3.92 s，它们在被吸入人体之前绝大部分已衰变完毕，所以在研究氡对人体的危害时，最值得注意的是$^{222}_{86}$Rn，它的半衰期为3.82天。

氡被吸入人体后通常大部分被呼出，但总有一些留在体内，留下来的氡在体内继续衰变，形成子体，而子体不再是气体，而是固体，这些子体能直接附着在肺壁和其它组织上。另一方面，在体外空气中形成的氡子体能吸附在空气中尘埃颗粒的表面上，这种受到污染的尘埃同样易于吸入肺中并在那里沉淀下来。这种内照射由于就在人体内，无法防护，所以更容易对身体造成损伤。

氡本身及其部分衰变产物是α辐射体，α粒子是一种带电重粒子，比X射线、γ射线和β射线对人体组织造成的损害要大得多。α射线的电离本领较大，在1 μm的组织内就能产生2000至6000对离子。α粒子的能量愈大，对人体的破坏性也愈大。

α射线引起的生物效应，主要是使机体分子产生电离、激发，破坏机体的正常机能。关于产生损害的机制，有“间接作用”和“直接作用”两种理论。间接作用理论认为，辐射

先使人体中的水产生电离，然后电离产物再对机体的分子产生破坏作用。水约占成年人体重的70%，α辐射使水分子发生电离与激发，产生了化学性质活泼的自由基[H]、[OH]以及HO_2、H_2O_2这样的强氧化剂，这些强氧化剂同人体组织发生作用，使体内许多大分子（如各种酶）发生氧化，破坏了这些大分子在正常新陈代谢中担负的功能。直接作用理论认为，电离辐射可直接使人体的某些大分子，如蛋白质、酵素、碳水化合物等的结构发生改组性破坏，从而失去活性，造成损害。

据认为，由氡引起的癌症其根源就在于氡及其子体衰变时所产生的α辐射，当α粒子通过机体时，会破坏或改变含有DNA（脱氧核糖核酸）的分子，而且人体无法加以恢复。DNA是人类染色体当中的一种物质，它储存着遗传信息，如果这些遗传分子受到损害，那么它们所携带的信息就会改变，这种改变对DNA所控制的细胞产生有害的影响，从而导致了癌细胞的生长。氡及其子体能够诱发肺癌已经通过实验得到证实，原苏联学者曾利用老鼠作低剂量照射，获得了第一例肺癌。

三、室内氡气的来源

据估算，在大多数情况下，室内氡主要来自地基的土壤或岩石，这一部分占到进入室内氡气的约90%；家庭用的井水所带来的氡约占8%～9%；而来自建筑材料的氡约占1%～2%。表3-3列出一套标准住房不同来源的氡气进入率，而所谓标准住房的建筑规格见表3-4。

在很多情况下，氡进入建筑物的主要通道是地基内的裂缝和孔隙，进入的数量受多种因素的影响，包括岩石或土壤中镭的含量、裂隙发育程度和孔隙度，建筑类型和气象条件

表3-3 标准住房不同来源的氡气进入率

氡气来源	氡气进入率（$Bq/m^3 \cdot h$）	
	计算平均值	通常范围
内部源		
建筑材料	6.4	1～20
水	0.1	0.001～100
天然气	0.3	0～1
外部源		
室外空气	6	0.1～20
房屋下面的地基		
扩散	1.7	0.1～200
对流	40	
总计	50	1～200

表3-4 标准房屋的建筑规格

体积	250 m^3
地板面积	100 m^2
外墙和天花板的面积	300 m^2
总表面积（包括内墙、家具等）	450 m^2
换气率	1 h^{-1}
地板和天花板厚度	0.2 m（水泥）
外墙厚度	0.2 m（砖）

等。氡气进入室内的机制有二。一是在压力作用下的气流，它是由热叠加作用和风施加在建筑物表面上的负荷形成的。墙壁内外的空气温度不同时，沿墙壁的压力差分随高度而变化，在取暖季节这就使房屋的地板和墙壁下部产生一种内向的压力。视风向之不同，风在不同方向的墙壁上也会引起压力的差异。第二种机制是扩散，扩散是以分子的形式进行的，氡在干燥的土壤中扩散的平均距离一般为 1 m

在地壳中形成的氡可以在地下水中聚集并成为室内氡的来源之一，尤其当氡在水中的活度浓度超过 37000 Bq/m³ 时更是如此。含水层的铀、镭含量可以相差很多，因此井水或泉水中的氡浓度会迥然不同。在美国，饮水的氡活度浓度一般低于 74000 Bq/m³，但在个别地方，如缅因州，一些井内氡活度浓度超过 3700000 Bq/m³。水中的氡进入室内空气是通过日常的家务活动，如淋浴、洗涤等，水的扰动加大了它同空气的接触面，增加了氡进入空气的机会，水的加温也会使更多的氡进入空气。按一般家庭用水的情况，含有 370000 Bq/m³ 氡的水会使室内氡活度浓度增高 37 Bq/m³。总的来说，公共供水系统会形成平均 1.0 Bq/m³ 的室内氡浓度，而私人供水系统会形成大约 20～40 Bq/m³ 的室内氡活度浓度。

由建筑材料产生的氡也会进入室内，因此而使室内氡浓度增高多少不但取决于建筑材料本身，而且取决于房屋的体积和通风状况，其变化范围据美国的统计是 0.11 到 1.11 Bq/m³。只有当建筑材料的镭含量和射气速率很高时，才会成为室内氡浓度升高的主要来源。例如，美国田纳西州 Knoxville 作为水泥原料的粉煤灰每千克每小时可释放近 0.015 Bq 的氡，而新墨西哥州 Albuquerque 生产的普通水泥每千克每小时可释放 0.045 Bq 的氡。瑞典普遍用作加气混凝土原料之一的明矾页岩会使房屋的氡浓度比用其它材料建成的房屋高 4 倍。

除以上各种因素外，室内氡浓度还同建筑物的设计特点、季节以及房间在建筑物内的位置等有关。例如，通风状况影响室内氡浓度，而通风状况又取决于建筑物的特点。一般情况下，独户孤立住房空气交换率为 0.5 至 1.5 ACH（1 ACH 为每小时室内空气全部换过一次），独户成片住房为 0.35～1.0 ACH，公寓为 0.3～0.9 ACH。

一般情况下，在多层建筑中，随着楼层的增加氡的浓度减小，地下室、一层和二层氡浓度减小最为明显。不过对高层建筑而言，在更高的楼层上情况就不一定如此。如果在地下室和高层之间有直接的通道（如电梯通道），就会改变氡浓度的梯度。有人曾经对一座 17 层和另一座 11 层的建筑物作了测定，所选择的房间结构相同、大小一样并且在同一面，说明在一层以上，随着楼层的增高，氡子体的放射性活度浓度并未明显减小。

季节对室内氡浓度亦有明显影响，表 3—5 给出不同季节、不同类型建筑物中不同楼层的氡浓度变化，数据测自美国纽约。

表 3—6 列出美国匹兹堡市的部分住房不同楼层和室外的氡气调查结果。

四、氡在地下的运移机制

氡的射气作用是由于 Ra 衰变成 Rn 时获得的反冲能量，具有反冲能量的氡原子离开其在岩石（或土壤）中产生衰变的初始位置，部分氡进入岩石的孔隙、毛细管和裂隙，这种从固态物质中释放出来的氡称为“游离氡”，而继续滞留在固态物质中的氡称为“结合氡”。游离氡的数量与同一时间间隔内形成的氡的总量之比称为射气系数（α）：

$$\alpha = \frac{A_f}{A_f + A_b} \tag{3.3}$$

式中 A_f 为游离氡数量；A_b 为结合氡数量。

表 3—5　室内氡活度浓度中值（单位：Bq m³）

房屋类型	季　节	地下室	第一层	第二层
非节能型	夏	55.5	18.5	29.6
	冬	48.8	18.5	18.1
	全年	51.8	18.5	18.5
	冬/夏	59.2	37.0	59.2
节能型无储热装置	夏	77.7	37.0	25.9
	冬	51.8	74.0	133.2
	全年	61.4	29.6	25.9
	冬/夏	65.9	74.0	188.7
节能型有储热装置	夏	114.7	74.0	74.0
	冬	118.4	103.6	107.3
	全年	148.0		
	冬/夏	37.0		

表 3　6　室内外氡活度浓度抽样调查结果（单位：Bq/m³）

测量地点	点　数	平均值	中　值	最大值	最小值
室内					
地下室	22	244.2	88.8	2146.0	22.2
一层	122	99.9	49.2	888.0	11.1
二层	29	92.5	40.7	888.0	7.4
室外					
公园	30	14.1	11.1	12.6	3.0
铺路面处	33	11.5	9.3	44.4	5.2

射气系数与岩石的结构特点（如风化和裂隙发育程度）、含水量、温度和其它因素有关。

在较大的深度上，氡的浓度与岩石中镭（或铀）含量之间有如下关系

$$Q_{Rn} = 2.7 \times 10^{-11} Q_{Ra} \rho\alpha/\eta = 9.19 \times 10^{-18} Q_U \rho\alpha/\eta \qquad (3.4)$$

式中 Q_{Rn} 为氡的活度浓度，Bq/cm³；Q_{Ra} 为镭的质量分数；Q_U 为铀镭处于平衡时的铀质量分数；ρ 为岩石密度，g/cm³；α 为射气系数，%；η 为岩石孔隙度，%。

从上式可以看出，氡的浓度不仅与镭（或铀）的含量有关，而且与岩石（或土壤）的密度、孔隙度和射气系数有关。如上所述，射气系数又与诸多因素有关。当铀镭之间处于不平衡状态时，氡的浓度还与平衡系数有关。

为了评价地表氡的析出量，提出了土壤发射率的概念，它是指地表单位面积析出的氡量，即通过地表的射气流密度。其测量方法是将氡的收集器埋入地表以下约 30～40 cm 深的土壤中，埋置一段时间，用下式计算土壤发射率 E：

$$E = \frac{Q_c \cdot V}{S \cdot T} \qquad (3.5)$$

式中，Q_c 为所测收集器中的氡浓度；V 为收集器的体积；S 为收集器的底面积；T 为埋置时间。土壤发射率既与土壤、岩石、地下水中镭的含量有关，也受介质射气系数、孔隙度、湿度以及土壤与大气之间对流等的影响。土壤氡的析出量是大气中氡的主要来源。

氡在地下以不同的方式运移：渗透、溶解、游离氡随水或穿过地下水迁移以及扩散。前

一种运移方式属于主动方式，最后一种属于被动方式。主动运移是以载体流的形式运动，它把周围空间一切能够移动的物质都带走，运动的方向取决于载体，而被带进载体流的其它物质的浓度分布不起主要作用。

在渗透过程中，氡以地下气流为载体，通过不同形态和成因类型的孔隙和裂缝形成的透气空间移动。在天然条件下，氡的运移往往是以几种方式同时进行的，例如氡在渗透过程中一旦与水接触，就会在其中溶解和扩散。在较大的充水孔隙和裂缝中，氡会随同气流通过水层或在水中以气泡的形式上浮，而这些过程又会伴随有氡的溶解和扩散。同时地下水的流动又导致其中所含气体的运移。地下水运动速度最快是在沉积岩上层水的自由交替带内。

所有方式的主动运移都伴随有气体的扩散，而扩散在没有主动运移的情况下照样进行。扩散是一种物质的原子或分子在浓度梯度的作用下在另一种物质的介质中运移的过程。扩散与主动运移的区别在于，扩散是原子或分子的运移，而主动运移是气流的整体运动。

扩散系数与一系列因素有关，其中主要是岩石的孔隙度、吸附性质、饱水程度和温度。

构造运动往往使有些地区产生断裂破碎，从而使岩石的渗透性增大，在断裂和裂隙带上常常可以观测到氡异常。这种异常除了由于渗透性增大使气流增强以外，还可能是由于氡的母元素——镭的次生富集。例如，断层或裂隙带会排泄地下水和地表水，使水中溶解的镭重新沉淀。如果断层带排泄含有腐植酸的地表水，部分胶体就会凝结并形成富含镭和氡的泥质物质。

其他一些动力地质现象也会造成氡的异常分布，例如在滑坡体内岩石的破碎和裂缝的增多，为地下氡的上升提供了通道，使氡在地表的浓度偏高，当然由于滑坡发展阶段的不同以及所处的构造、地动力环境不同，氡的浓度变化范围很大，在同一滑坡体的不同部位氡的浓度亦不相同。靠近滑坡轴部平均射气浓度比在滑坡的边缘部分高。奥地利和尼泊尔的一些室内氡高浓度区就是由于滑坡而形成的。调查还表明，一些岩溶系统上氡的浓度增高，如瑞士研究过的 44 个岩溶系统中有 18 个氡浓度大于 2960 Bq/m^3，其原因可能是氡通过溶洞和断层系统可以运移较大的距离。

因此，在评价一个地区形成氡气灾害的可能性时，不仅要注意铀的含量高低，而且要注意断层、裂隙带的有无以及滑坡、岩溶等发育的地区。

五、氡气灾害的区域评价方法及研究实例

前文已经提到，氡气灾害是一种分布广泛的灾害。如果在全国范围内普遍开展土壤氡气测量或者室内氡浓度监测，那将是一项成本很高、费时费力的工作，而且这样作也是没有必要的，这是因为氡气灾害的形成具有一定的地质前提。我们可以先对不同地区氡气灾害发生的可能性进行区域性的预测评价，划分出值得开展进一步调查的区域范围，最后再开展室内监测。

氡是镭的衰变产物，镭又是由铀经过一系列衰变而来的，因此究根求源，研究铀的区域分布，划分出那些铀含量偏高的地质单元是非常重要的。这里所谓偏高主要不是指达到矿化的程度，而是指铀含量达到克拉克值 2.5～10 倍的地区，如花岗岩、片麻岩、流纹-英安岩、炭质页岩、含磷层位等分布区，这类地区同样会形成氡气灾害，而且它们的范围比铀矿区要广阔得多。表 3-7 列出几种常见岩类的铀含量。

表 3 7 不同岩类的铀含量

岩 类	铀含量/10^{-6}	
	平均值	变化范围
超基性岩	0.003	
基性岩	1.0	0.2～1.0
中性岩	1.8	
花岗岩类	3.4	1.0～7.0
页岩	3.7	1.5～3.5
砂岩	0.5	0.2～0.6
碳酸盐岩	2.2	0.1～9.0
蒸发岩	0.1	

但只根据岩性进行预测是很不够的，以花岗岩类为例，其铀含量在不同地区甚至在同一地区的不同地点，变化很大。花岗岩类的铀含量还同其侵入年代有密切关系，在同一构造岩浆旋回中，年代愈近的含量愈高。所以，在花岗岩类分布区也不一定都形成氡气灾害，必须了解铀含量的分布才行。反之，一般认为含铀极低的岩性也会有铀的局部富集。

许多地区地面铀含量和氡浓度之间存在着正相关关系，但并非所有的地区都是如此，因为在自然界放射性元素及其子体间都可能存在放射性平衡受到破坏的问题。目前研究得较深入的是铀镭之间的平衡状况，与 1 t 铀处于平衡状态的镭量为 340 mg，但由于铀和镭的地球化学性质不同，在表生作用带铀镭往往处于不平衡状态。例如在强烈氧化环境中，低价铀氧化成高价铀而被溶解带走，而镭的溶解度小，往往被吸附而沉淀，于是就出现了镭富集而铀贫化的情况；反之，在强还原环境中镭被带走而铀富集。既然氡是镭的子体，这说明铀和氡之间的平衡也往往遭到破坏。

不过在用 γ 能谱测量确定铀的含量时，铀道所测的主要是^{214}Bi 的谱线，^{214}Bi 是铀系中最主要的 γ 辐射体，它的 γ 辐射能量占整个铀系核素 γ 辐射能量总和的 85%。因此，当用 γ 能谱测量确定铀含量时，实际上反映的主要是^{214}Bi 的含量，而^{214}Bi 是^{222}Rn 的衰变产物。

对氡气灾害进行区域性预测评价的最快速低廉的办法是利用航空 γ 能谱资料，假定^{214}Bi和^{222}Rn 处于平衡状态，而且氡的射气系数是恒定的。虽然这些假定并不总能成立，也就是说 γ 能谱测量的铀道异常（主要是^{214}Bi 异常）不一定对应有氡异常，但毕竟还是可以大大缩小靶区。

如前所述，断层、裂隙带、滑坡等的存在对氡浓度分布也会产生影响。在这些地区近地表铀或镭的含量不见得高，但氡作为气体却较容易从深部到达地表并显示异常。因此，地面检查工作不仅要布置在航空 γ 能谱测量圈出的铀异常区，而且要在根据地质-地球物理资料确定的断层、裂隙带、滑坡体上进行。

为了提出一套氡气灾害的区域评价方法，笔者曾在美国犹他大学研究所利用“全国铀矿资源评价计划”（NURE）的资料进行了研究。作为美国能源部 NURE 计划的一部分，美国本土几乎所有 1∶250000 图幅的航空放射性测量和航空磁测均已完成，其当初的目的是评价铀矿资源的数量和分布并确定对产铀有利的地区。

对我们的研究区——盐湖城地区而言，测量是用 SA315 B “Lama” 直升机完成的。采用 geoMetrics 公司的 GR-800 伽马能谱仪和 G-803 磁力仪。GR-800 是一种双 256 道系统，

NaI(Tl)晶体体积 37756 cm^3，它可以提供通过下视和上视晶体组合探测的 0.4 至 3.0 MeV 能量范围内的能谱数据。G-803 磁力仪的灵敏度为 0.25 nT。

盐湖城地区的测线方向为东西，线距 4.8 km，平均离地高度 122 m，实际对地飞行速度 113 km/h，数据取样间隔为 1 s。导航是采用目视方法完成的，将测线事先绘在 1∶24000 地形图上，同时用一台 35 mm 的航迹摄影机来记录航迹的实际位置，基准点编码系统与数字记录系统同步，所以能够作到使位置与数据一一对应。盐湖城地区的 NURE 数据记录到磁带上，eU 和 eTh 值以 10^{-6} 为单位，K 以 % 为单位。我们利用这些磁带作出 $w(U)(10^{-6})$、$w(Th)(10^{-6})$、$w(K)(\%)$、$w(U)/w(Th)$、$w(U)/w(K)$、$w(Th)/w(K)$、总计数(c/s)和磁场(nT)等值线图。

图 3-1 上给出盐湖城地区（北纬 40°30′～41°00′；西经 111°30′～112°00′）的地质略图，而同一地区的铀含量等值线图示于图 3—2，以便对比。将盐湖城地区选作试验区，是因为这里居住着犹他州人口的 40%，而且它是该州首府和工商业中心。

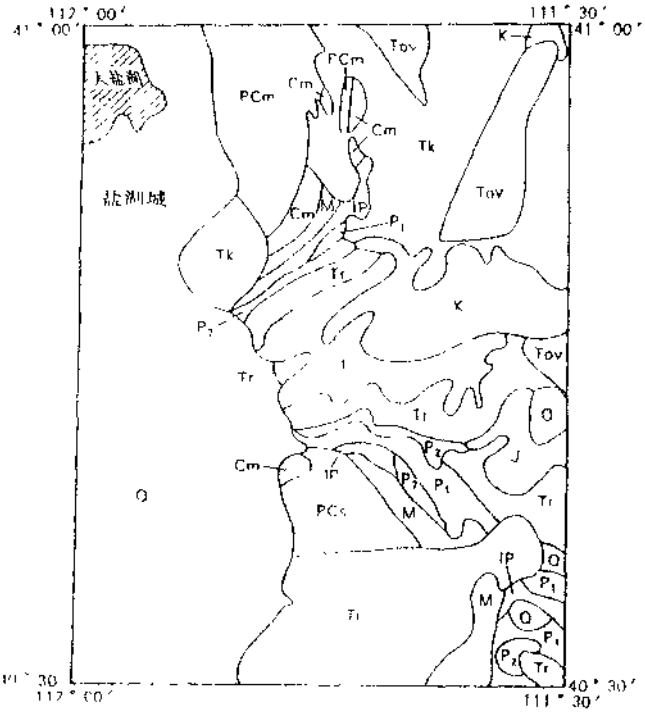


图 3—1 盐湖城地区地质略图

Q—第四系；Ti—第三纪花岗岩；Tov—第三纪火山岩；Tk—第三纪 Knight 砾岩；K—白垩系；J—侏罗系；Tr—三叠系，P_2—二叠系帕克城组；P_1—下二叠统；IP—宾夕法尼亚系（大体对应上石炭统）；M—密西西比系（大体对应下石炭统）；PCs—元古界；PCm—太古代片麻岩

（引自美国犹他州地质调查所编制的 1∶25 万犹他州地质图）

盐湖城地区包括落基山中段和盆岭区的各一部分。在研究区内落基山的中段称为沃萨奇岭，它位于本区东部，走向南北。沃萨奇岭以西，地形突然降低，形成盆岭区的一个宽广地堑。沃萨奇岭主要出露有前寒武纪结晶岩和古生代沉积岩。贯穿沃萨奇岭有小块新生代火成岩的露头散布。盆岭区的地堑内以第四纪的冲积和湖积物为主。

从图 3-2 上可以看出，在盐湖城地区有五个铀异常（或异常组）：

（1）1 号异常组位于本区南端，U 异常与 Th、K 异常相对应，它们是由第三纪花岗岩

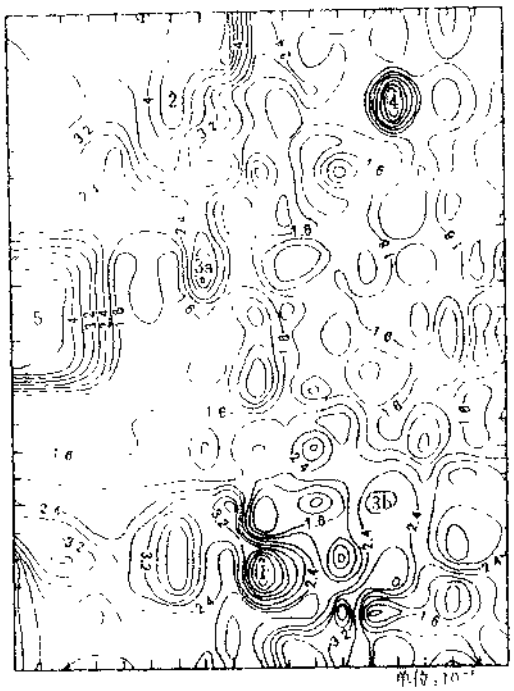


图 3-2 盐湖城地区铀含量等值线图
(对铀异常作了编号)

体(Ti)引起(盐湖城地区钍含量等值线图见图 3-3)。U 最高值 4.8×10^{-6},全区花岗岩平均 U 值 2.5×10^{-6}。

(2)异常 2 在本区西北角,U 异常亦伴随有 Th、K 异常(参看图 3-3),它是由前寒武纪片麻岩(PCm)引起。U 最高值 4.8×10^{-6},全区片麻岩 U 平均值为 3.3×10^{-6}。显然,该片麻岩源于酸性侵入岩。

(3)异常 3(a)和 3(b)具有 $w(U)/w(Th)$、$w(U)/w(K)$值高的特点,属于纯铀异常,它们是由含磷的二叠系帕克城组(P_2)引起的(参看图 3-4)。U 最高值分别为 3.6 和 2.8×10^{-6},而帕克城组的平均 U 含量为 1.9×10^{-6}。

(4)异常 4 位于本区东北部,U 异常伴随有 Th 和 K 异常,它落在古新世和始新世的 Knight 砾岩、砂岩和粉砂岩(Tk)内。这里 U 最高含量 4.4×10^{-6},而 Tk 沉积物的 U 平均含量为 1.6×10^{-6}。

(5)异常 5 在本区的西部边缘,该异常具有高的 $w(U)/w(Th)$,$w(U)/w(K)$比值,因此它也是纯铀异常。实际上它是由维特罗铀矿选矿厂及其尾矿引起的,最高 U 含量 4.4×10^{-6}。

为了验证这些异常的存在,在地面上圈定它们并检验氡的近地表浓度,利用 geoMetrics 公司的 GR-310 能谱仪和 EDA 公司的 RDA-200 射气仪作了地面检查。为了采集壤中氡样品,RDA-200 的取样器全长插入土壤中,用泵将壤中氡样品吸入射气仪的闪烁室。

对于 5 号异常未作地面检查,因为在航空放射性测量完成之后不久,该选矿厂及其尾矿即被清除。在异常 3(a)上也未作地面检查,因为它位于一个野生动物保护区内。作为替代,在异常 3(b)上作了检查。它同异常 3(a)一样,都是由含磷的帕克城组引起的。

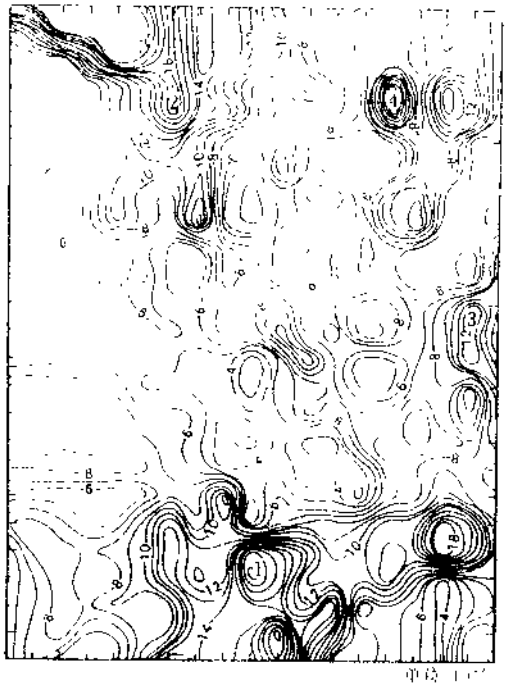


图 3－3　钍含量等值线图

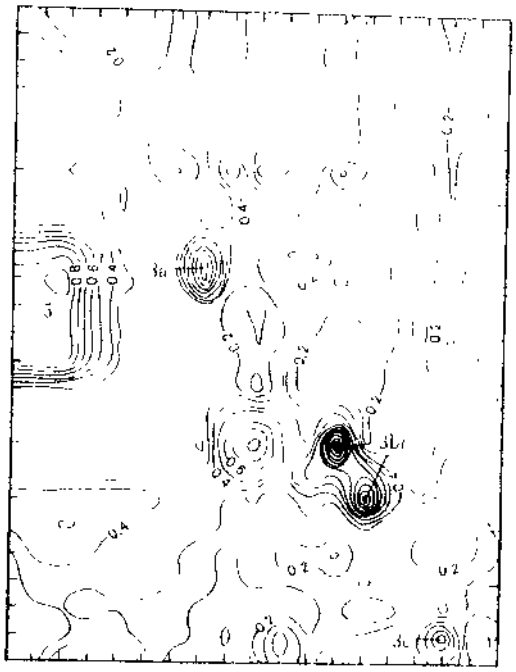


图 3－4　铀/钍比等值线图

表 3-8 盐湖城地区航空γ能谱测量U异常的地面检查结果

异常编号	岩石类型	$w(U)/10^{-6}$		$c(Rn)/(Bq \cdot m^{-3})$	
		平均	最高	平均	最高
1	Tt花岗岩	1.7	11.2	636.4	1628
2	PCm片麻岩	3.5	9.1	3816.4	33670
3(b)	含磷帕克城组	2.6	7.3	355.2	666
4	Tk砾岩、砂岩和粉砂岩	1.8	5.6	199.8	592

其它所有异常均在地面找到。地面检查（点距100 m）的结果显示于表3-8中。

除了航空γ能谱测量的铀异常外，还在沃萨奇断层的一段上作了地面伽马能谱和射气测量，穿过断层带作了两条剖面，基岩为第三纪花岗岩。在该地平均U含量为1.8×10^{-6}，最高含量为5.5×10^{-6}。平均氡活度浓度为532.8 Bq/m³，最高活度浓度为1110 Bq/m³。剖面测量结果表明，在断层带上氡的浓度大约为带外的两倍。但总的来说，在沃萨奇断层的这一段上，氡的浓度很低。

根据地面检查的结果，可以得出如下结论：

(1) 在盐湖城地区，前寒武纪片麻岩氡的浓度最高（见图3-5），它具有形成氡灾害的地质可能性，需要做更详细的野外和室内氡气调查。

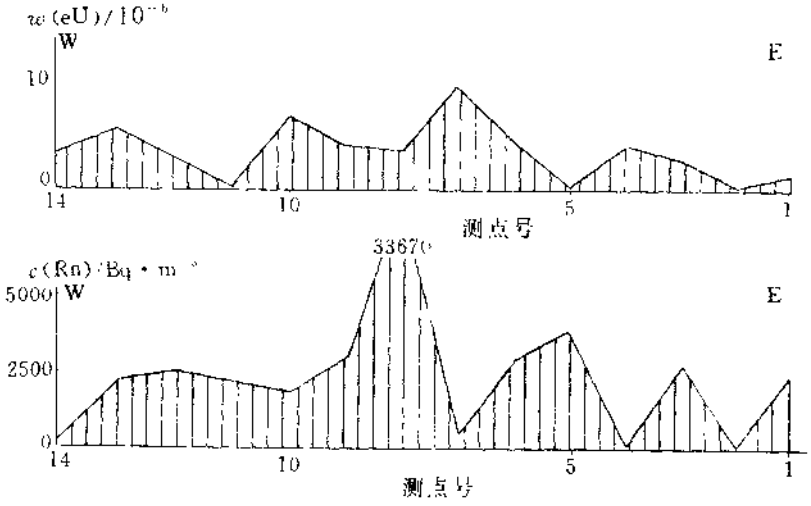


图3-5 异常2（PCm片麻岩）上之剖面2

点距为100 m

(2) 虽然第三纪花岗岩的U含量按地面检查的结果高于前寒武纪片麻岩，但其氡浓度却远低于片麻岩。这可能是由于片麻岩年代久远，风化和裂隙发育程度高于花岗岩的缘故。

(3) 虽然Tk沉积物能引起U、Th异常，二叠系帕克城组能引起纯铀异常，但它们的氡浓度很低。

(4) 在所测过的一段沃萨奇断层带上，氡的浓度很低。

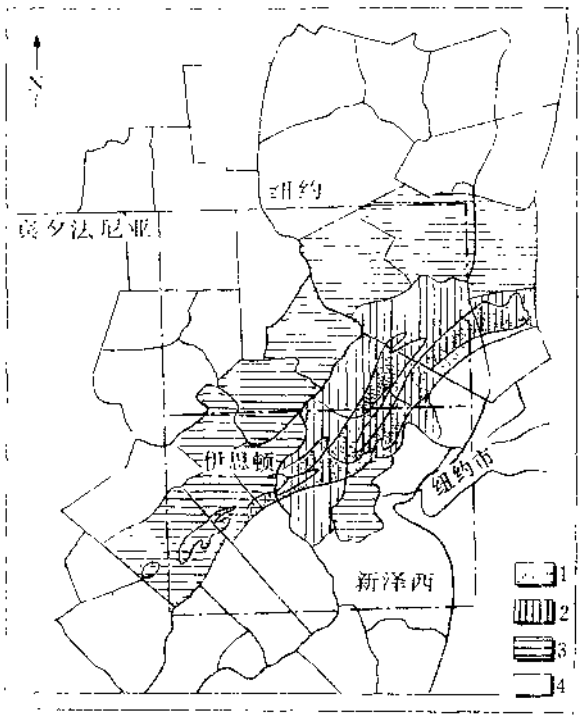


图 3—6　瑞丁普朗花岗片麻岩带位置图

1　花岗片麻岩带；2　瑞丁普朗（RP）组；3　边缘（F）组；4　对照（C）组。点划线标出了 NURE 航空伽马能谱测量的两个图幅，两个图幅的边界与图 3—8 的边界重合

概括起来，氡气灾害的区域评价步骤如下：

（1）利用航空 γ 能谱资料编制铀含量图，同时编制其它航空物探图件（如 $w(Th)$、$w(K)$、$w(U)/w(Th)$、$w(U)/w(K)$、$w(Th)/w(K)$、总计数、航磁、航电），以帮助进行地质解释。例如，航磁可圈定具有磁性的花岗岩，航电可发现良导含铀页岩等。

（2）从 U 含量图上挑选异常，并根据地质-地球物理资料选出断裂裂隙带、滑坡或岩溶发育地区，尤其是活动断层带，作为地面检查的靶区。

（3）在选定的靶区内同时开展地面 γ 能谱测量和土壤氡气测量，以确定氡浓度高的地区及其范围。

笔者还利用 NURE 计划的航空 γ 能谱测量资料，研究了地面铀、氡含量与居民肺癌死亡率之间的关系。研究区瑞丁普朗是美国东部一个大的前寒武纪花岗片麻岩带，北起纽约州的南部，通过新泽西州，南至宾夕法尼亚的瑞丁附近（图 3—6）。

瑞丁普朗地区下伏岩石为元古代火山岩和沉积岩，它们在格林维尔造山期（约 1.1 Ga 前）经历了变质作用、褶皱运动，在同一造山期还有不同组分的花岗岩侵入，部分地区在古生代又经历过变质作用和褶皱运动。花岗岩经变质成为花岗片麻岩，其中以石英长石花岗片麻岩为主。此外，还有角闪石片麻岩、黑云母片麻岩和夕线石片麻岩。部分石英长石片麻岩和黑云母片麻岩糜棱岩化。

根据在伊思顿附近所作的土壤氡气测量结果，氡的高浓度出现在石英长石片麻岩中，大部分室内氡浓度数据是在石英长石片麻岩和黑云母片麻岩上的房屋内采集的，土壤氡浓度与室内氡浓度呈正相关关系。根据本区伊思顿和博耶敦的资料，得出土壤中 U、Ra 质量活度的关系（图 3—7（a））及 Ra 质量活度与 Rn 活度浓度的关系（图 3—7（b））。对比图 3—7（a）、图 3—7（b）可以看出，土壤中的铀质量活度和氡活度浓度之间呈正相关关系。所以研究地面铀分布与居民肺癌死亡率的关系，实际上是反映了本区室内氡浓度与居民肺癌死亡率的关系。

Archer（1987）曾将肺癌死亡率与瑞丁普朗片麻岩带的分布联系起来。他把本地区的 33 个县分为三个组。第一组称为瑞丁普朗组，在该组的各县内花岗片麻岩露头超过全县面积的 1/4；第二组称为边缘组，包括所有位于第一组外侧、花岗片麻岩露头不足全县面积1/4 的地区；第三组称为对照组，位于第二组的外侧。

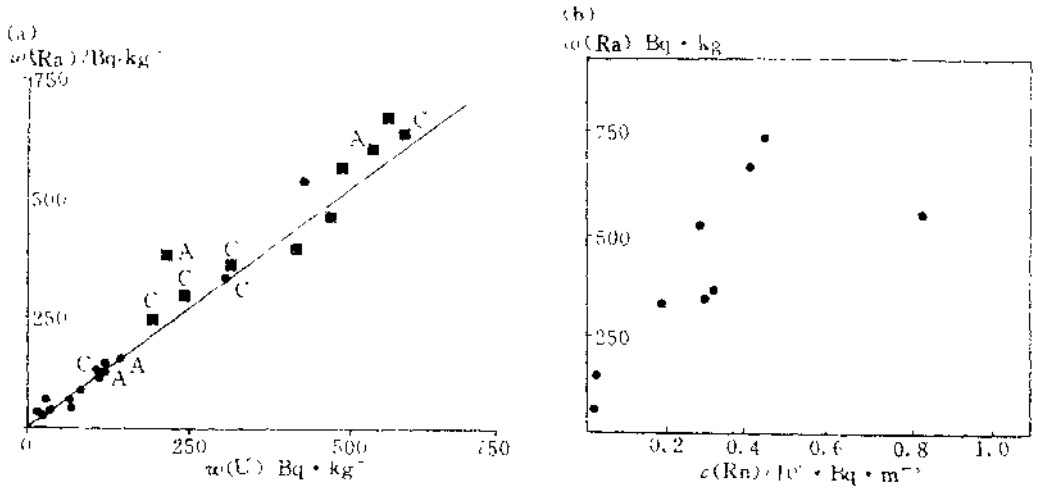


图 3-7

a-瑞丁普朗地区博耶敦和伊思顿土壤样品 U、Ra 质量活度的关系；

b-在土壤中 75 cm 深度上测得的镭质量活度与氡活度浓度的关系

●取自博耶敦的样品；■取自伊思顿的样品；A-取自上壤 A 层的样品；C—取自上壤 C 层的样品

表 3-9 列出了各组某些癌症死亡率和社会经济参数。癌症死亡率是按人口加权平均的 1950～1979 年的白人数字，包括男性和女性。由本表可以看出，从瑞丁普朗组到边缘组到对照组，癌症总死亡率和肺癌死亡率递减，而血癌、胃癌和骨癌则没有这样的规律性。

表 3-9 瑞丁普朗地区癌症死亡率及社会经济数据

癌症死亡率及社会经济数据	瑞丁普朗组 7 县	边缘组 9 县	对照组 17 县
癌症总死亡率	179.5±1.8	167.0±1.7	165.2±1.4
肺癌死亡率	31.32±0.80	27.49±0.69	23.91±0.54
白血病死亡率	7.25±0.29	6.79±0.26	6.80±0.22
胃癌死亡率	12.33±0.38	10.91±0.33	11.86±0.29
骨癌死亡率	1.10±0.11	1.00±0.10	1.13±0.09
年现金收入中值	$11499	$10638	$8913
超过 50000 人城市数	3	6	5
在 5000 人以上城镇居住人口比例	28.7%	26.0%	28.1%

注：癌症死亡率单位为每十万人年。

不过，肺癌死亡率往往还同其它一些因素有关。例如，随着社会经济地位的降低，肺癌死亡率增加。但是，这里肺癌死亡率最高的瑞丁普朗组年收入反而最高，显然它不是决定癌症死亡率的主要因素，它的影响已被其它更重要的因素所抵消。另外，城市居民一般比农村人口患癌症（包括肺癌）的几率高，但在这里的三个组中，20000 人以上的城市数和住在 5000 人以上城镇居民的比例大致相等，也就是说这一因素对肺癌死亡率的影响对三个组是一样的。

为了查明本区铀的分布，笔者选取了两个 NURE 图幅的航空 γ 能谱测量资料，它们覆盖了本区的主要部分（参看图 3-6），北面的一幅称为斯克兰顿（Scranton）幅，南面为纽瓦克（Newark）幅，每幅的面积为经度 2°×纬度 1°。

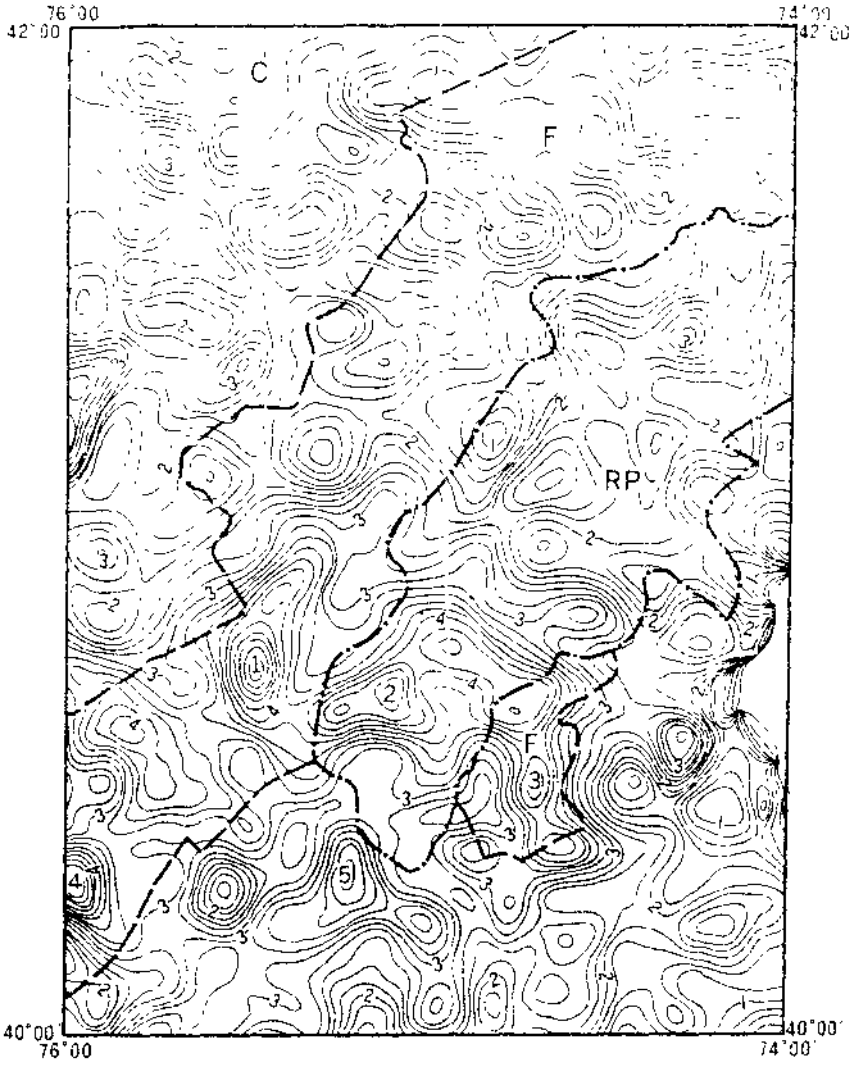


图 3—8　斯克兰顿和纽瓦克幅铀含量等值线图

单位为 10^{-6}（两幅图的位置见图 3－6）；RP—瑞丁普朗组；F—边缘组；
C－对照组；细线－铀含量等值线；粗点划线　RP 组边界；粗虚线　边缘组边界

这里，同盐湖城地区一样，航空 γ 能谱测量的测线也是东西向，线距 3 mile (4.8 km)，平均离地高度 400 ft (122 m)，取样间隔 1 s。将磁带上记录的经过校正的 U (10^{-6})、Th (10^{-6}) 和总计数 (c/s，即每秒计数) 输入以个人计算机为基础的 Erdas 图像处理系统中，绘出以不同颜色代表不同数值的等值线图。图 3—8 为斯克兰顿和纽瓦克两幅范围的铀含量等值线图，其范围为北纬 40°～42°，西经 74°～76°（原图为彩色等值线图，为出版方便改为单色并标出了等值线的数值）。在该图范围内铀的最高含量为 9.63×10^{-6}，钍的最高含量为 11.2×10^{-6}，总计数最高值为 2195 c/s。

为了利用上述已发表的瑞丁普朗地区的癌症死亡率统计数字与根据航空 γ 能谱测量资料求得的地面铀含量分布进行对比，笔者按照 Archer 将本区各县分为三组的划法，将铀含

量等值线图也分为三个部分（图 3-8）。由于铀含量等值线图的原图比例尺为 1∶250000，故利用美国地质调查所出版的 1∶250000 斯克兰顿和纽瓦克幅地形图，按照图 3-6 的分组界线，将三组之间的界线标在 1∶250000 地形图上，然后用数字转换器将这些界线的坐标转换为数字，输入 Erdas 系统，随之计算出三组范围内各自的铀含量、钍含量和伽马射线总计数的平均值，计算结果示于表 3-10。

表 3-10 分组的铀、钍含量和总计数率

分组	铀含量/10^{-6}		钍含量/10^{-6}		总计数/$(c \cdot s^{-1})$	
	平均值	标准离差	平均值	标准离差	平均值	标准离差
RP 组	2.41	0.82	4.67	1.01	1064	190
边缘组	2.17	1.07	4.91	1.71	1002	364
对照组	1.99	0.82	5.09	2.07	956	370

将表 3-9 的数字与相应各组的癌症死亡率加以对比，得出表 3-11。从表 3-11 可以看出，所研究地区居民的癌症总死亡率，尤其是肺癌死亡率，与铀的平均含量和伽马射线总计数的平均值呈正相关关系。鉴于从 RP 组到对照组铀的含量递减，而钍的含量增加，因此癌症死亡率与伽马射线总计数的正相关关系同样是反映了癌症死亡率与地面铀含量的正相关关系，而与钍含量无关。

表 3-11 癌症死亡率与铀、钍含量及伽马射线总计数的关系

癌症死亡率和伽马能谱参数	RP 组	边缘组	对照组
癌症总死亡率/（10 万人·年）	179.5	167.0	165.2
肺癌死亡率/（10 万人·年）	31.32	27.49	23.91
铀平均含量/10^{-6}	2.41	2.17	1.99
钍平均含量/10^{-6}	4.67	4.91	5.09
总计数/$(c \cdot s^{-1})$	1064	1002	956

六、氡的室内监测方法

建筑物内的氡浓度监测一般采用连续和积分两种方法。

1. 连续监测

为了了解氡及其子体浓度随时间的变化，采用连续取样和测量的方法。它可以测得氡及衰变产物的实时浓度，除平均浓度外，还可得到短时间的峰值浓度，并便于将浓度变化与其它参数（通风，过滤等）的变化加以对比。专门设计的监测器可以满足这些要求，只是这种仪器体积较大、更加复杂、成本较高，因此这类监测不适于大规模的调查，但在选定地区的少量建筑物中还是有必要进行的。

连续监测器有以下几种：(1) 瓶式监测器。包括一个闪烁瓶和与之接触的光电倍增管计数器组成，空气不断吸入并通过闪烁瓶，使计数器测出氡浓度的变化。(2) 自动双过滤监测器。在滤管的出入两端各有一个过滤器，将闪烁探测器置于输出端过滤器的前面。工作时不断用泵将空气抽过该滤管，输入端的过滤器将氡的衰变产物滤掉，而探测器对输出端过滤器上积累的放射性活度进行计数。(3) 扩散静电监测器，空气通过分子扩散进入仪

器的传感部分，以静电方式采集氡的衰变产物并由闪烁探测系统计数。(4) 只测氡的扩散监测器，此种监测器与上述三种的区别在于它只测氡而不测其衰变产物，其它三种则通过测氡的衰变产物间接测氡。含氡的空气扩散进入探测器空间，带电的氡衰变产物通过静电方式从探测器附近移开，因此测到的只是氡的放射性衰变形成的脉冲。(5) 氡衰变产物探测器，通过过滤器对空气自动取样 2～5 min，然后以事先确定的计数时间用 α 和 β 探测器测单个氡衰变产物的放射性活度。该仪器还可以计算出工作水平，所以又称为瞬时工作水平计 (IWLM)。

2. 积分取样

这种方法测得的是较长时间段（几天、一周乃至数月）的单一平均浓度值。从衡量对居民的健康危害的角度来看，用时间积分法测得的平均浓度是最重要的参数。取样持续时间取决于特定方法的灵敏度，采样既可以是被动式的，即通过扩散，不需要人工动力，又可以是主动式的，即借助人工动力。

积分取样器的优点是，比连续读数监测器结构简单、价格低廉，可以测出更低的浓度，样品可以事后在更方便的时间和地点进行分析。这种简单轻便的积分取样器适用于大规模的调查。其主要缺点则在于不能提供有关氡浓度短期变化的信息，至于长期变化的问题可以通过在不同季节测量若干天来解决。

美国环境测量实验室 (EML) 研制了一种积分测量仪器，它采用静电-热释光系统采集氡的第一个衰变产物 ^{218}Po，从而记录通过扩散进入监测器的氡所产生的辐射强度。其灵敏度约 1.1 Bq/m^3，测量时间为一周，该仪器可覆盖室内监测所需的浓度范围。

氡同其它气体一起可以被炭所吸附，这一特性已被用来开发一种实用的探测系统，其中的氡在炭层中逐渐积累，然后测量氡子体衰变产生的伽马射线强度，积分时间可达一周。

这种装置的优点之一是结构简单。例如，可在直径 7.6 cm，高 2.5 cm 的金属盒内放 1.5 cm 厚的炭层，盒顶上开有直径 1.9 cm 的孔并用细眼网盖住，这使氡得以扩散进入，而不会产生对流。加干燥剂可以去掉水蒸气。在探测器送往测量地点之前要先行烘烤并将孔用胶带封住。在测点上去掉胶带，使探测器暴露于空气中约一周，然后将胶带贴回原处，将探测器送回实验室计数。计数用 NaI 伽马射线探测系统进行，测量 ^{214}Pb 的 295keV 和 352keV 峰和 ^{214}Bi 的 609keV 峰。

另一种完全被动式的积分测量方法则是利用径迹探测器，它也适合大规模的调查，主要缺点是积分时间不足一个月时则灵敏度不够。在室内氡气调查中，积分时间以 3 个月或更长为宜。这种探测器体积很小，便于邮寄。其工作原理是当氡及其子体产生的 α 粒子轰击探测器时，在上面产生辐射损伤，使其化学键断裂形成潜迹。在实验室内，探测器上的辐射损伤能较快地与蚀刻剂发生反应，形成径迹，然后在显微镜下读出径迹的密度，再换算为氡的浓度。

目前国内外较常用的径迹探测器有 CR 39。工作时将 CR-39 固定在杯形容器的底部，杯口用滤膜封住，氡通过扩散可进入杯内，而氡的子体则被拒于杯外。采样结束后，取出 CR-39 装入密闭袋内回收到实验室，放入 NaOH 溶液中，蚀刻后取出洗净烘干。氡浓度的计算采用下式

$$Q = D/kT \tag{3.6}$$

式中 Q 为在采样期间氡的平均浓度，D 为径迹密度，k 为标定系数，T 为采样时间。

七、氡气灾害的治理和预防

上面已经提到，美国环境保护署认为，室内氡活度浓度超过 148 Bq/m³（4 pCi/L）就应当采取治理措施。俄罗斯则规定，新建房屋的氡活度浓度应小于 100 Bq/m³（2.7 pCi/L），现有房屋的氡活度浓度应小于 200 Bq/m³（5.4 pCi/L）。如果室内活度浓度无法降低到 400 Bq/m³（10.8 pCi/L）以下，则居民必须迁出。目前我国尚未制定有关室内氡浓度的国家标准，可先参照国外的标准。

对于原有居民区来说，一旦发现室内氡活度浓度超过行动值（即应当采取治理措施的值，如美国的 148 Bq/m³（4 pCi/L）），就应当采取措施使氡的浓度降下来。对于拟建的新居民区，要在设计之前进行氡气灾害调查，指导正确选区，以避免在新建筑物中出现氡浓度超标现象。

1. 治理措施

为了将超过行动值的室内氡浓度降低，可以采取几种相互联系的措施，将产生氡的物质从建筑物中移走；将氡气来源封闭，使之不能同室内空气接触；加强通风使室内外空气交流，降低室内氡浓度，利用某些物理化学处理方法，清除室内空气中的氡。

加强室内通风是降低室内氡浓度的一种办法。当室内氡浓度很高时，通风也不能使其降到行动值以下。在冬季通风会受到限制，采用人工通风成本也比较高。

由于大部氡来自房屋的下方，可以只对地下室或一层的房间加以隔离或通风，这样可以降低整个建筑物的氡浓度。为了将地下的氡源与房屋内部隔开，应当封闭地板中所有的裂缝，堵塞管道周围的空隙。例如，采用环氧树脂或其它密封剂。

如果这些措施仍然无济于事，只好采取更为昂贵的措施，就是对地基加以改造，将孔隙度高和（或）镭含量高的土壤换成镭含量低、壤中气流不易透过的另一种土。选择新回填土的重要条件就是它的扩散系数要尽可能小，同时又能适合建筑方面的要求。据报道，扩散系数为 5×10^{-2} cm²/s、镭含量低的新回填土，如果厚度达到 3 m，就可以使来自地下的氡气流降低 80%。各种粘土和粉砂的扩散系数变化范围为 0.004 cm²/s 至 0.06 cm²/s。如果完全不含有机物，扩散系数会更低，低到 0.001～0.02 cm²/s。若回填土的扩散系数为 0.005 cm²/s，则其厚度只要 15 cm，就会使来自地下的氡气流减少 80%。如果在地基下面和周围铺上 10 cm 厚的聚氨酯泡沫，那么对来自土壤中的氡将是更为有效的屏障。

当住房所用地下水的氡含量高时，应当打更深的井，以期发现新的、氡含量低的含水层，或者对现有的氡含量高的水进行处理。例如可以采用喷水的方法，加大水与空气的接触面，便于水中的气与空气进行交换，或者用粒状活性炭吸附水中的氡。在引入住房之前，将地下水先在蓄水池内较长时间停放，也是使氡逸散的好办法。

含磷石膏墙板、含明矾页岩和粉煤灰组分的混凝土、花岗岩以及由铀矿山附近的粘土烧制的砖瓦等都是氡的来源。建筑材料对室内氡浓度的贡献不仅取决于镭的含量，而且取决于建筑材料的含水量和密度、墙皮的情况等。

如果发现建筑材料对室内氡浓度有较大的影响，可以采取两种措施，一是将便于拆除的氡源材料，如含磷石膏墙板，予以拆除，而代之以其它材料；二是用不透气涂料对氡源材料加以密封。

此外，必要时还可以采用电子空气净化器和静电除尘器来降低空气中氡子体的浓度。

2. 预防措施

在对新的居民区进行建筑规划的阶段，应采取如下措施，以预防氡气灾害的发生。

正确选区。在新区，尤其是铀矿山附近地区，花岗岩类、黑色页岩、含磷地层等铀含量可能偏高的地区以及断层、裂隙带、滑坡、岩溶发育的地区，在规划前应利用已有的伽马能谱测量资料，必要时开展土壤氡气调查，以尽量使建筑物避开土壤氡浓度异常区。如由于其它考虑不能避开时，在设计和施工中必须增加防氡措施，如前面已介绍的地基换土、铺设聚氨酯泡沫隔离层等。

目前在美国制订建设规划时已开始把氡气灾害的因素考虑在内。例如，犹他州准备在大盐湖风景秀丽的羚羊岛（Antelope Island）上建立一套旅游设施，包括旅店、浴场和疗养院等。该岛前寒武纪花岗片麻岩大面积出露，有可能形成氡气灾害。因此，要求对全岛进行氡气灾害调查并选出适合建设旅游设施的地点。

羚羊岛位于大盐湖南部，大部出露岩石为前寒武纪结晶岩，其中以花岗片麻岩为主，还有片岩、混合岩等。该岛北部出露有寒武纪的沉积岩，岛的边缘部分则发育第四纪沉积物（图 3-9）。

犹他州地质调查所和犹他大学研究所对该岛进行了联合调查，其中包括地面地质填图和地面放射性测量（伽马能谱测量和土壤氡气测量），笔者负责其中的地面放射性测量工作。

地面伽马能谱测量和土壤氡气测量是按同一测网同时进行的。在岛上共做了 16 条剖面，14 条垂直于岛的长轴，线距 1 mile（1.6 km）；两条平行于岛的长轴，测点距离 250 m。伽马能谱测量采用 geoMetrics 公司的 GR-310 四道伽马能谱仪进行，土壤氡气测量采用 EDA 公司的 RDA-200 射气仪进行。全岛的氡气测量结果见图 3—10。对比图 3—9 和图 3—10 不难看出，土壤氡浓度异常全部出现在前寒武纪片麻岩出露区，最高浓度超过 14800 Bq/m³，而寒武纪沉积岩及第四系发育区氡的浓度都很低。

根据调查结果提出的建议是，为了避免出现室内氡气浓度超过行动值的可能性，旅游设施应建在岛北端寒武系与第四系发育区或岛东侧中部的第四系发育区。

供水系统的预防措施。居民区的供水如果来自地下水，必须事先对地下水的氡浓度进行测量，如用 RDA-200 射气仪与 RDU-200 脱气系统相配合可以测量水中的氡浓度。如地下水氡浓度较高而又别无选择时，在设计供水系统时，可采取上述的在蓄水池中放置一段时间以及用活性炭净化等措施。

对建筑材料的影响进行预测。对于准备施工的新建筑物来说，如果用被动法测氡，时间太长，影响交工日期，用主动法测氡又太不准确，因此在选购建材时就应当事先进行监测并对即将建成的房屋内由建材引起的氡及其子体的体积浓度进行预测。

为了进行这种预测，假定射气是由周围墙壁通过扩散作用而进入室内的。为了简化计算，利用球形界面的两层模型，把房屋当作是半径 R 的球体，而墙壁看作厚度 H 的球形层，该层内均匀分布氡的母体——镭。利用这一模型可求出室内无通风情况下的 Rn 体积浓度，计算按下式进行

$$c(\mathrm{Rn}) = q_{\mathrm{Ra}}\,\alpha\rho \cdot \left[\sqrt{\frac{\lambda}{D}\eta}R\right]/\eta \tag{3.7}$$

式中，q_{Ra}为 Ra 的质量活度，α 为射气系数，ρ 为建材密度，η 为孔隙度，λ 为 Rn 的蜕变常数，D 为扩散系数。

当 $D \leqslant 10^{-1}\ \mathrm{cm^2/s}$、$H > 10$ cm 时，(3.7) 式可简化为：

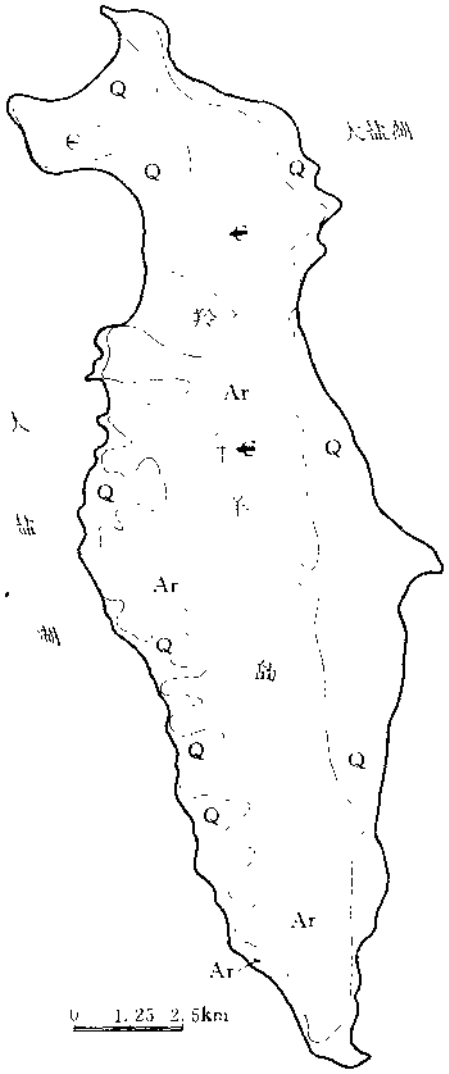


图 3—9 羚羊岛地质略图

Ar 前寒武纪结晶岩；∈—寒武纪沉积岩；

Q 第四纪沉积物

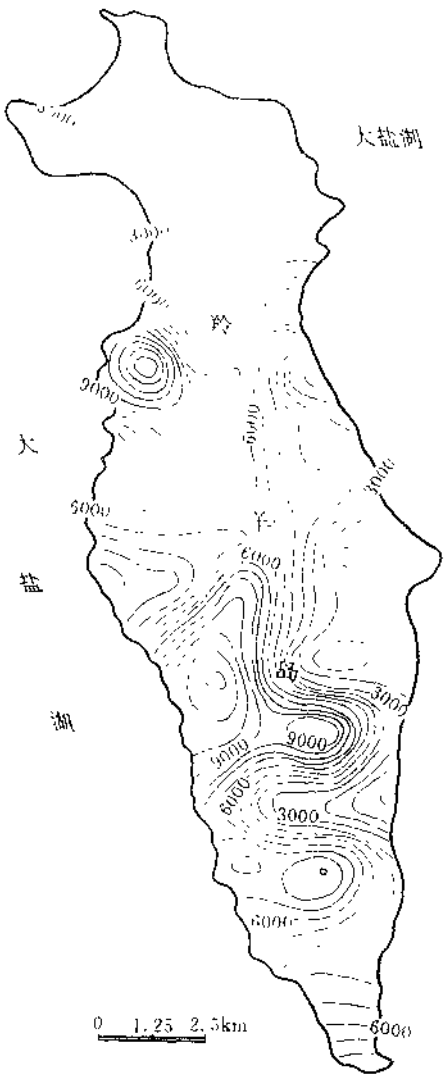


图 3—10 羚羊岛土壤氡活度浓度等值线图

等值线数字的单位为 Bq·m^{-3}，

等值线距 750 Bq·m^{-3}

$$c(\mathrm{Rn}) = q_{\mathrm{Ra}}\, a\rho H/(R\eta) \tag{3.8}$$

假定建材的平均密度 $\rho=2.5\times10^{3}$ kg/m^{3}，$\eta=0.1$，$q_{\mathrm{Ra}}=1.235\times10^{-3}$ Bq/g (1×10^{-6}平衡铀)，$R=1.5$ m，$H=0.15$ m 和 0.3 m，则计算的 Rn 体积浓度见表 3—12 和图 3—11。由表 3—12 可以看出，当墙壁薄时，大部分射气并未进入室内，在扩散系数大时尤其如此。随着墙壁加厚，Rn 体积浓度随$\sqrt{\frac{\eta}{D}}\cdot H$线性增长。

表 3-12 在半径 1.5 m 的室内 c（Rn）/α 值（单位 Bq/m³）

换气速度/s⁻¹	扩散系数 D/（cm²·s⁻¹）				
	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
墙厚 0.15 m					
0	598	2788	4261	3439	1359
2.78×10^{-6}	713	1570	1913	1491	586
2.78×10^{-7}	225	318	321	241	96
2.78×10^{-8}	34	35	34	32.6	10
墙厚 0.30 m					
0	2040	6939	8088	4267	1362
2.78×10^{-6}	1601	3566	3586	1850	587
2.78×10^{-7}	545	663	597	303	96
2.78×10^{-8}	72	73	64	32	10

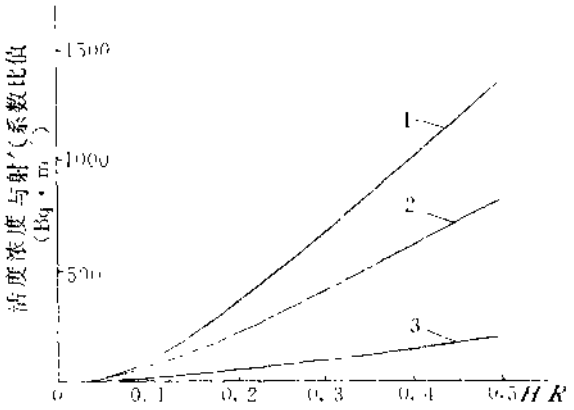


图 3-11 球形房屋模型氡体积浓度与墙壁厚度的关系

$\sqrt{\frac{\lambda\eta}{D}}R$—，墙壁材料含铀 1×10^{-5}。曲线 1—不通风；2—室内换气速度 100 h；3—换气速度 10 h

表 3-13 主要建筑材料的射气系数和扩散系数

建材种类	射气系数	扩散系数/（cm²·s⁻¹）
混凝土	0.1～0.	
砖	0.02～0.1	
石膏	0.03～0.2	
水泥	0.02～0.05	10^{-4}～10^{-3}
炉渣	0.002～0.02	

从上述可见，扩散系数 D 和射气系数 α 与预测的室内氡浓度有密切关系。疏松、风化和破碎的岩石 α 达 0.2～0.4，煤和炭质页岩 α 达 0.5～0.6。D 同岩石粒度有关，粒度愈小则 D 愈小，岩石破碎则导致 D 的加大。

有关建筑材料已有的 α 和 D 数据很少，列于表 3 -13 中。

通过以上预测，将不适于建房的建筑材料排除，以避免在新建房屋中出现氡浓度超标的现象。

第二节　天然电磁场

地球的电磁场是随时间变化的，它不仅对生物及人体健康产生重要的影响，而且对许多重要的人文设施也产生巨大的影响。

一、天然电磁场的环境效应

早在本世纪 20 年代，原苏联就曾经利用动物做过电磁场的生物效应研究，但由于早期试验采用的场强较大，其结果并不能说明天然电磁场背景变化对生物的影响。近年来的研究表明，在 0.07～10 V/m 的电场和 0.2～200 nT 磁场强度的作用下，即可观测到生物效应。这样的强度非常接近于超低频段上的天然电磁场强度。随着电磁生物学的发展，美国在 1978 年成立了生物电磁学会，随后欧洲也成立了同类学会，1980 年开始出版《生物电磁学》刊物。国际无线电科学联合会（URSI）也在这方面做了大量研究。

实验表明，当电磁场场强不变时，生物效应与频率的关系密切。在某些频率上效应特别明显，如 0.06 Hz，0.2 Hz，0.5～0.6 Hz，5～6 Hz，8～12 Hz；而且在不同频率上，电磁场引起的变化可正可负，这说明存在着若干频率窗口。

同时还发现，当电磁场频率固定时，随着场强的加大，生物效应不一定会增强，反而会减弱；也就是说，实际上存在着一些特定的场强（幅度）窗口。例如，Adey W. R. 指出，在 6～16 Hz 电磁场作用下，Ca 离子从脑部组织的外移，在 10 V/m 情况下比在 5 V/m 和 100 V/m 情况下都强。在研究家兔红血球中的肝糖含量变化时亦见到同样情况（图 3—12）。

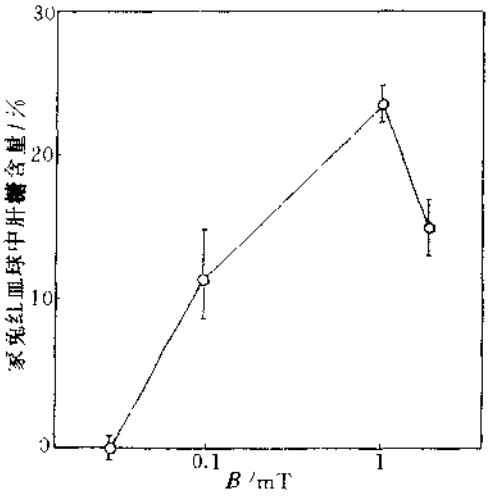


图 3 -12　在 8 Hz、0.02～2 mT 磁场作用下家兔红血球中肝糖含量（%）的变化
表明在频率固定时有最佳场强存在

由此看来，就电磁场的生物效应而言，一方面存在若干频率窗口；另一方面在每一频带内又有各自的最佳场强或若干场强窗口。即电磁场的生物效应与场的参数之间的相关关系是非线性的。

除此之外，在同样频率和场强的情况下，脉冲场的生物效应更强，高频（$n\times100$ MHz）电磁场如被超低频载波也会得到同样的效应。

生物效应的特点和强度还取决于电磁场作用时间的长短，有时 0.5～7 min 即

出现响应，有时则在若干次长达数小时的辐射后才会出现。不同动物对电磁场的灵敏程度不同，如鸽子比家兔和狗敏感。同种动物中灵敏程度亦有所不同，如老年和性未成熟者反应更为强烈。电磁场的生物效应不仅有负面的，也有正面的，如弱电磁场可用于减轻辐射的伤和治疗冻疮等。

莫斯科大学的昆虫教研室教授 B. E. 车尔内雪夫专门研究了地球电磁场变化对昆虫的影响。

野外观测和室内试验均表明昆虫的行为和活跃程度与磁暴有关。在室内试验中，变化的磁场是将磁铁装在用电动机带动的缓慢旋转的轴上形成的。在该项试验中甲虫的活动性提高了 20%～40%。在野外的实际观测中，除了连续观测磁场的变化外，还记录了对昆虫活动性有影响的气象因素，如空气温度、湿度、气压等。但是，将这些气象因素与磁场的变化相比较，可以看出地磁场的变化与昆虫行为的相关性最为明显（图 3--13）。

某些昆虫对磁场变化的灵敏性是由于在它们体内存在着微细的铁磁性晶体，例如在蜜蜂腹部的前半部已发现这类晶体。

总之，偏离的太阳活动性引起的周期性低频电磁场变化和地球磁场的无序变化引起多种甲虫和半翅目昆虫等的活跃化，导致它们趋光性的加强，以致使更多的虫体落入捕虫器，并使之饮食增量和出现明显的昼夜节奏。不同昆虫对地磁场变化的灵敏度和响应方式不同。

人类机体足以适应地磁场的长期变化，但磁暴期间产生的短周期突变，尤其是地磁场强度的突然下降对人体最为有害，使人们的生理和心理状况失常。在地面上，地磁场还受到近地表地质构造和人口密集区人文干扰的影响，这种干扰使地磁场的强度产生随空间和时间的变化，人文磁扰动对人体产生同样的影响。

近年来的研究表明，对人体健康有害的磁暴、氡暴和电暴现象很可能是三位一体的。已经发现在近地表大气中氡的浓度每月有几次突然增加，称为氡暴；并伴随有电暴，即大气中离子浓度的突然增加；结果使 30%的居民出现胸闷、心悸、偏头痛、失眠和焦虑等症状。已经有一种假说，认为太阳黑子的变化导致地球磁场的变化，而后者又导致磁致伸缩作用，从而使土壤孔隙中的氡被挤压进入大气。在实验室中压缩花岗岩标本时确实记录到氡逸出量的突增，实验还表明氡暴和电暴直接影响人体的大脑垂体-肾上腺系统，引起心血管和神经方面的症状。

天然电磁场不仅能直接影响人体健康，而且也对许多重要的、现代人类社会不可缺少的人文设施产生很大影响。在磁暴期间，在地球电离层的下部（50～90 km 高度）电离作用急剧增强，导致短波无线电通讯的中断。在地球 100～200 km 以上的大气层中，大气的温度和密度都有所提高，而这正是大多数人造卫星的飞行高度，于是导致卫星阻力的加大和轨道的改变，使它们从地面跟踪站的视野中消失。例如，在 1989 年 3 月的磁暴前夕，无线电通讯的中短波的频率范围为 12 MHz，而在磁暴期间它变窄到 1～3 MHz。也是在此次磁暴期间，全球定位系统中的四颗定位卫星数日"下落不明"，这是由于大气层的密度增长如此之快，以致使卫星轨道的改变幅度超出了预定的轨道特征改正范围。

地磁场对环境的另一大影响称为"感应风险"，就是随时间变化的地磁场在接地导体中引起的感应电流的影响。地球的磁场 B 由三部分组成

$$B = B_e + B_m + B_a \tag{3.9}$$

式中 B_e 为外磁场；B_m 为地球基本磁场；B_a 为异常场。地球基本磁场的变化，如长期变化、

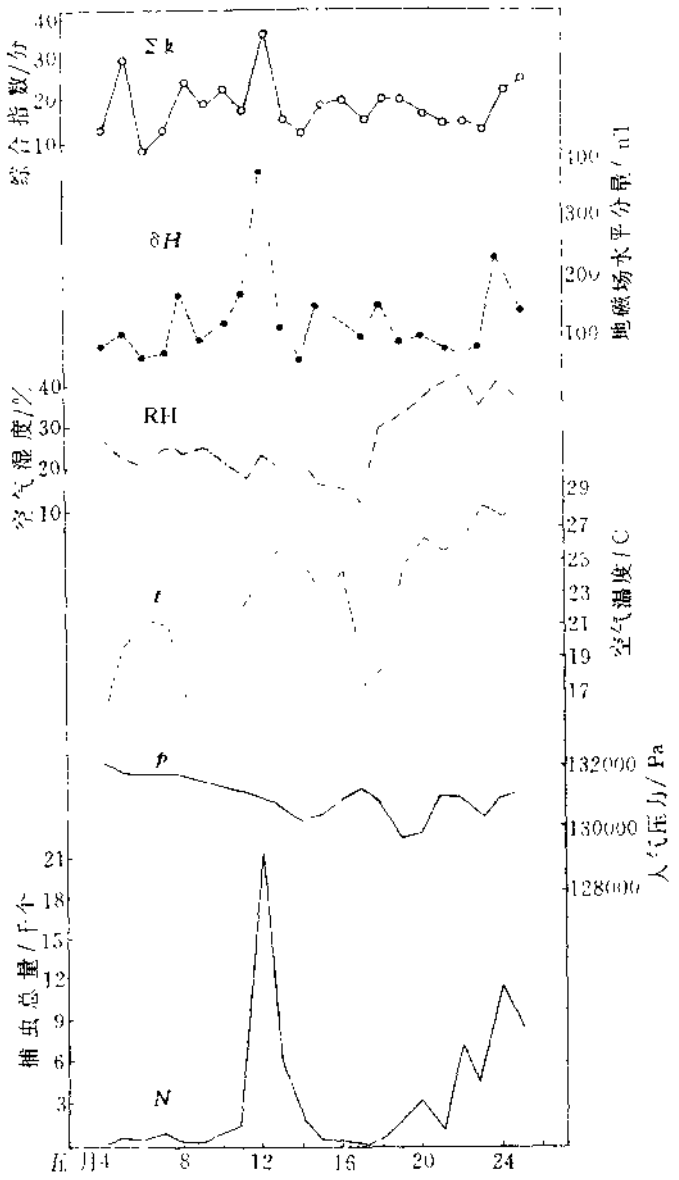


图 3- 13　在磁暴和气象因素的作用下落入捕虫器虫体数量的变化

（1959 年在土库曼斯坦观察的结果）

磁极游移和磁极反转的周期在 10^2～10^8 a、异常场的变化周期也很长，都不属于此处要讨论的范围。外磁场的基本来源是太阳，一部分太阳能到达地表，另一部分影响地球周围的空间，都能引起地表磁场的变化。鉴于其中频率大于 1 Hz 的地磁变化能量很低，而频率小于 10^{-4} Hz 的地磁变化引起的感应效应可以忽略，所以实际上感应风险所涉及的地磁场变化范围主要指 10^{0}～10^{-4} Hz。

由地磁场变化感应出的电流（以下简称感应电流，英文缩写为 GIC）能够使输电系统中的变压器饱和，导致作业的干扰，甚至使变压器烧毁，使金属管道（尤其是长距离管道）加速锈蚀，也会干扰电气化铁路和通讯电缆的正常运转。

感应电流的频率在 10^{-5}～10^{-4} Hz 之间，与工业电流（50～60 Hz）相比，近似于直流。输电线的两端通过变压器接地，如接地点之间有电位差，就会产生感应电流，这样变压器有半个周期电流和功率饱和，使变压器过热和电容器过载，进而使保护继电器发生故障，导致电力下降、波动，甚至中断。例如，1989 年 3 月 13 日的磁暴使加拿大魁北克水电电力系统的高压输电线路中产生巨大的感应电流，新增负荷达 9450 MW（有效负荷为 21350 MW），造成电力中断，影响了 600 多万用户达 9 h 之久。这次磁暴还引起瑞典 6 条输电线路的严重电力损耗，并使美国的一些州也发生电力中断。

金属管道，主要是输油气管道，一般是绝缘的，总有些受到损害的部位接地；泵站也是接地的。这样在管道和大地之间便形成回路，如果两个接地点的距离足够长，感应电流可达数百安，它可使管道的铁与地下水中的 H^+、OH^- 离子之间产生电化学作用，在阳极附近形成铁锈。在土壤的电解液中 1 A 电流在 1 a 内可以消耗 10 kg 铁。当接地面积小、电流密度大时则更为严重。为了防止管道的电解锈蚀，目前许多管道都人为地使之具有对地的负电位。其数值保持在 850 mV 不变，当此电位降低至 650 mV 的临界值以下时，便开始重新出现明显的锈蚀。根据加拿大一些石油公司的数据，在 1989 年那次磁暴的最初阶段，就开始记录到管道电位的突变、对地电位减小到临界值之下，甚至小到 100～200 mV。

二、地磁场感应电流的监测和计算方法

按照法拉第感应定律，地磁场的扰动在许多人文导体（输电线、管道、通讯电缆、电气化铁路系统等）中引起感应电流，总的来说这种感应电流对相应系统会造成重大的经济损失，因此对感应电流的研究是地球物理学中的一个重要实用领域。

在地磁扰动和磁暴较强的高纬度地区感应电流问题最为明显，但在较低纬度地区也同样存在。感应电流的强度在很大程度上还同电力网的几何形态有关，在“角点”上会达到较高的值。

芬兰在感应电流方面作过较多的研究，1991 至 1992 年期间曾执行过一项专门的“GIC”计划，其间在 400 kV 电力网上的五个地点测量过感应电流，在变压器的地线上进行 1 s 数字记录。此外，还在 Porvoo 一条高压线路的下面用磁力仪测量了感应电流。作为对照用的磁场值取自该地以西 40 km 远的 Nurmijarvi 地球物理观测台，两地磁场的差值被解释为由感应电流引起。据计算，这样得出的感应电流值误差为 10%～20%，因为在磁暴期间两处所测的地磁变化并不完全一致。

此项测量所得到的最大感应电流是 1991 年 3 月 24 日出现在 Rauma，其一分钟的平均值为 201 A，在同一次磁暴中，但并非同一时间，在 Pirttikoski 观测到的 10 s 平均值为 175 A。

对感应电流还进行了理论模型计算，根据不同地区的地电断面对感应电流做出统计预测，以预防磁暴期间可能出现的输电网事故。理论计算的第一步是根据地磁场的变化推算感应电场，第二步再推算在电力网中产生的感应电流。因此，计算感应电流的主要问题是确定电场，这是一个地球物理正演问题。所采用的最简单的模型是基于以下的假设：地磁变化场是以垂向平面波的形式传播，而大地被视为均匀半空间，即具有恒定的电导率 σ。这样就可以利用地磁台实测的磁场变化数据来确定水平电场。下面计算地面电场的公式中采用笛卡尔坐标，x 轴指北，y 轴指东，而 z 轴指下

$$E_x(t) = -\frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma}}\int_{-\infty}^{t}\frac{g_y(u)}{\sqrt{t-u}}\mathrm{d}u \tag{3.10}$$

$$E_y(t) = -\frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma}}\int_{-\infty}^{t}\frac{g_x(u)}{\sqrt{t-u}}\mathrm{d}u \tag{3.11}$$

式中假设大地磁导率等于真空的磁导率 μ_0，σ 为大地的电导率，g 是磁场的时间导数。

在利用上式时有两个问题，一是如何确定磁场的时间导数，我们仅仅知道某一时间段 Δ 中的平均值（例如 10 s 或 1 min）；二是在实际计算中 $-\infty$ 应当取多大的值。

作为一级近似，可以认为 1 min 或 10 s 的磁场平均值等于该时间段中点上的瞬时值，而相邻的瞬时值之间的磁场变化则认为是线性的。按照公式（3.10）、（3.11）积分是从负无穷大开始的，但在实际运算中则是从 $t-T$ 开始的，T 是一个有限值。在过去的计算中有人设 T 为 29 h，有的取 12 h，而在近期的计算中也有人只取数小时，甚至几十分钟。根据 A. Viljanen 等人的计算，当 T 取 12 h 时，计算误差小于 5%。

一旦求出地面电场，就可以计算电力网中的感应电流

$$I_{GIC} = aE_x + bE_y \tag{3.12}$$

式中 a 和 b 是每个变压器和电力线所特有的系数，与电力系统的电阻和几何形态有关。在芬兰，典型 a、b 值为 20～70 A·km/V（变压器）和 30～100 A·km/V（输电线）。

研究表明，上述简单模型假定大地电导率不变是有缺欠的，为了弥补这一不足，需要让大地电导率随地磁变化的幅度而改变。

第三节　人工弹性波场

天然地震所形成的天然弹性波场对人民的生命和财产带来巨大的损失，给环境造成重要的影响，但这个问题在我国有专门的地震部门去研究。因此，本书将只涉及人工弹性波场对环境的影响以及地球物理方法在监测人工弹性波场方面的作用。

一、人工弹性波场的环境效应

人工震源所产生的人工弹性波场，像天然弹性波场一样对人体产生明显的影响。为了模拟人体对振动频率的响应，有人曾经建立人体的电模型和机械模型，把人看作是电阻、电容电感的组合和弹簧-质量-阻尼系统。模拟结果表明，人体是一个低通滤波器，将机械振动中的高频成分滤掉，而让低频成分通过，该滤波器能通过从 0 到 $(LC)^{-0.5}$ Hz 的所有频率（L 为电感，C 为电容），而超过此限的频率则截止。

人体对机械振动频率响应的电-机械模拟结果表明，人对 2～10 Hz 的振动最为敏感，对 0.5～2 Hz 和 10～100 Hz 的响应中等，对此范围之外的振动敏感性差。人体不同部位的频率响应不同，例如胸-腹部的共振产生在 3～6 Hz、头-肩部的共振在 20～30 Hz，眼球的共振在 60～90 Hz。人体接收的振动能量超过一定值后开始引起不适（3 dB），明显的疲劳和降低工效（6 dB）。

人工弹性波场除了对人体产生影响外，还会对工程建筑的强度特征和完整性以及地基土承载能力产生负面影响，这种影响对于大规模重点工程和具有历史价值的建筑物尤其值得注意。

长期振动会引起土壤和建筑物结构的疲劳。根据莫斯科市的研究结果，地下铁道、地面交通和各种机械在红场附近的列宁图书馆地段引起 40～85 dB 的弹性波场，能量峰值的频率区间为 10～20 Hz、35～55 Hz、70～90 Hz、110～120 Hz，不同地段的频谱取决于振动源性质和作为弹性波滤波器的土壤的性质。虽然这里的平均振动水平尚未达到临界值（73 dB），但峰值已超过此限。影响土壤和建筑材料特性变化的主要因素不是振动幅度，而是正、负向负载的长年作用，即所谓振动积累效应。根据地震资料，在地下铁道沿线土壤密度降低，纵波波速小于 180～200 m/s（背景值 350～500 m/s），弹性模量也相应降低。主要由于地铁的影响，列宁图书馆的建筑状况也明显变坏，在保存最好的部分破坏程度指数 K 亦不低于 17%～20%（相当于墙壁完好性偏低并有裂缝存在），而在有些部分指数 K 高达 50%。

为了评价建筑物的破坏程度，可采用地震和超声波环形剖面测量。墙的破坏（裂隙发育）程度可用地震波和超声波波速的如下关系来评价

$$K = (v_u - v_s) \cdot 100/v_u \tag{3.13}$$

式中 K 为破坏程度指数，单位%；v_u 和 v_s 分别是超声波和地震波的速度。

二、人工弹性波影响的监测和防治

采矿中的爆炸作业对周围建筑物的影响最早引起人们的关心，早在本世纪 30 年代初美国矿业局就不得不开始研究这一课题并提出相应的准则，后来在估价其他类型人工振动的影响时也往往采用针对爆炸振动所制定的准则。为了试验的方便，美国矿业局在研究中最初将机械振动器与试验房屋连接起来，以后又利用试验性爆炸来评价对房屋造成的实际损害。

在早期的研究中曾利用介质质点加速度作为判断损害的标准。但后来发现，除非振动的类型单一而且频率的范围有限，否则加速度就不能代表损害的真实程度。由于质点加速度与人工振动频率的平方呈正比，频率的微小变化会造成加速度的较大变化。近年来，质点运动速度已代替加速度，成为损害程度的常用标志。即使质点速度标准也与频率有关，仍有必要将频率考虑在内。

通过对爆炸振动和损害程度数据的总结，美国矿业局得出结论，如果地下质点运动速度三个分量中任何一个的最大值能保持在低于 5.08 cm/s（即 2 in/s），就可以保证建筑物具有适当的安全系数。一般的房屋可以承受 13.716 cm/s 的质点运动速度，超过此限后才出现轻微的损坏。

受外来地下振动的作用，建筑物内通常产生两种反应，一是建筑物单个壁板或构件内的运动；二是建筑物作为一个整体的运动。当振动的频率等于单个壁板或构件的固有频率时，产生较大的弯曲应变；当振动垂直于壁板面时，后者可以承受较强的振动。建筑物的整体运动往往引起更大的破坏，比单纯的弯曲在墙壁和天花板会产生更强的剪切应变。因此，整体运动可能产生的破坏更大，当建筑物以等于或接近整体固有频率偏斜时，应变最强。

目前，美国限定建筑物所受振动的法规是由露天开采和复原执法办公室（OSMRE）制定的，该办公室具有对美国露天开采煤矿的司法权。所规定的限值留有较大的余地，以便实际上使所有的房屋都不会受到哪怕是较小的破坏。事实上大多数房屋能经得住比限值高得多的振动强度。不过，低频振动比高频振动破坏的可能性更大。许多构架式建筑物的整

体结构固有频率范围约为 4～12 Hz，取决于规模、形态、年代和相关因素。因此，这些建筑物对该频率范围内的地下振动反应更为强烈。下面列出美国 OSMRE 和矿业局所提出的建筑物振动标准。

(1) 1.905 cm/s (0.75 in/s)：OSMRE 规定的露天采矿作业低频 (4～12 Hz) 长期振动对建筑物作用的限值。

(2) 1.905～5.08 cm/s (0.75～2.0 in/s)：OSMRE 针对 12～30 Hz 频率范围的振动制定的限值，随频率的增加而递增。按矿业局的规定，这一限值是针对 15～40 Hz 频率范围的。

(3) 5.08 cm/s (2.0 in/s)：OSMRE 规定的露天开采作业产生的 30 Hz 或更高频率振动的限值，而按照矿业局的规定，本限值是针对 40 Hz 或更高频率振动的。该限值还广泛用于建筑工地和采石场的爆炸振动。

(4) 13.716 cm/s (5.4 in/s)：受采石场爆炸振动影响的一般房屋出现轻微损坏。

(5) 22.86 cm/s (9.0 in/s)：由于受建筑工地或采石场爆炸的影响，建筑物有 90%左右的或然率出现轻微破坏，某些房屋出现结构损坏。这与振动源、振动和房屋的特点有关。

(6) 50.8 cm/s (20 in/s)：对靠近的建筑工地爆炸来说，大多数房屋受轻微损坏，某些房屋的结构遭到破坏。对于低频振动来说，大多数房屋受到严重破坏。

除了采矿和建筑工程中的爆炸振动外，近年来勘探石油过程中在居民区开展的可控震源作业和建筑地基打桩作业的振动也已引起人们的注意，并出现了索赔纠纷。

例如，在美国洛杉矶盆地的一些人口稠密地区做地震勘探，在工作中同时启用 6 台可控震源，每台对地冲击力达 18160 kg，振动频率在 16 s 内由 4 Hz 扫描至 64 Hz，在质量不高的建筑物附近，频率范围缩小至 16～64 Hz，输出能量也相应降低。在工作中可控震源离建筑物最近时只有 3 m 左右，而一般在 250～300 m 外人们即有震感。为了预防地震勘探对建筑物的损坏以及正确处理沿线住户可能提出的申诉，采取了如下措施：测定震源引起的地面振动的强度、频率和衰减特性；在需要加大输出能量和避免建筑物受损之间进行权衡，选择最佳的工作参数；事先通报沿线住房有关工作计划、回答住户的问题，并提醒他们将不稳定的物体加固；实时全程监测地表振动，监测记录不仅可以及时指导工作的进行，而且可以留作振动强度的证据；对住户的意见和赔偿要求予以及时答复；着手制定具体标志，以区分时间和环境因素造成的损坏与可控震源所造成的损坏。目前在城区的地震勘探工作中，借用 OSMRE 和矿业局针对露天采矿制定的，以地面质点运动速度为基础的衡量建筑物损坏程度的标志。

我国浙江大学和浙江省物探队对打桩给周围建筑物造成的损害及其监测防治进行了研究。打桩时桩锤冲击桩垫和桩头，迫使桩贯入地基内，这时由落锤施加的外部能量即通过桩垫及桩头传至桩尖，并以弹性波传播的应变能形式消耗在周围土体中，其中大部分能量在桩尖上以反射能的方式释放，转化为体波和面波传到土体中。最早到达周围建筑物的是 P 波，其次是 S 波，但这两种波的能量仅占总波动能的 23%，最后到达周围建筑物的是面波，面波能量大，对建筑物的影响也大。随着桩入土深度的增加，打桩振动在地面的影响范围也加大。

打桩振动还有一个特点是打桩力往往连续施加，所以波动的传播也是连续的。一个工地几百根桩的振动可达百万次，这种具有一定振幅的波的多次叠加使应变能积累加大。

打桩振动的监测仪器是采用高灵敏度、信号增强的多道地震仪或磁带记录仪。拾震器

采用速度传感器和加速度传感器。所采用的打桩振害评价方法是先调查打桩场地的地质条件、打桩数、桩规格及周围建筑物的特性，再打试验桩作现场监测，以分析打桩引起的振动水平，然后采取合适的防振对策。在监测中最好对平面上不同射线位置布多个测点，并在土层不同深度上埋设传感器，以监测垂向和横向的变化；并在一定深度上埋设数个孔压盒以监测孔压。在建筑物的不同层面上也设置拾震器，用反应谱分析求出各层的位移。

至于打桩振害的防治方法，主要归结为三，一是开掘隔振沟；二是桩屏蔽减振；三是通过改进打桩技术来减振，如确定打桩场地平面内的合理施工顺序、控制打桩速率、取心植桩、“重桩轻击”、静压植桩等。

第四章　环境污染的监测和防治

人类活动对地球介质的污染大体上可以分为四类：水体（包括地表水和地下水）污染、大气污染、固体废弃物的污染和放射性物质的污染。由于这些污染会使介质的物理性质发生明显的变化，因而可以在不同程度上利用地球物理方法加以监测。对其中的某些污染而言，地球物理方法还可用以监测治理的过程和评价治理的效果或者为治理工程的设计提供依据。

第一节　放射性污染的监测与防护

一、放射性污染的来源及其监测方法

在当今的世界上核能的利用极为广泛。核电站会产生大量的放射性废料，核泄漏事故也时有发生。核武器试验形成放射性散落物。铀矿和一些有色、稀有、稀土、磷等矿产的开采和选冶导致大面积的放射性污染。放射性源在工业和医疗等许多方面有着广泛的用途，但由于管理不善，常被当作一般的废料而丢弃，例如北美在80年代就发生过30多起这样的事件。此外，煤及其燃烧产物、原油、建材、肥料等常常含有偏高的放射性元素含量，这些污染过去长期被人们忽视。

为了了解放射性污染的分布，原苏联曾开展过全国性的系统调查。原苏联《地质勘探》联合体从1982年开始对莫斯科进行放射性污染调查，1986年开始在圣彼得堡、基辅、托木斯克和其它一些城市从事放射性污染检查。1989年原苏联部长会议决定将这项工作纳入国家计划，并指定《地质勘探》联合体作为专业化的放射生态调查部门。

到90年代初俄罗斯从事此项工作的有10～20架航测飞机，15台专门制造的PCA-007型和“涅瓦”型汽车γ能谱测站，还有几十个步行γ详查分队。综合放射生态调查工作包括航空、汽车γ能谱测量、步行γ测量和用于分析多种放射性核素的地面取样。航空γ能谱测量比例尺1∶10000，飞行高度50～75 m，采用仪器为高灵敏度的CTK型能谱仪，探测器体积为30～50 L，可测γ总计数、铀、钍、钾、铯-137、铯-134，航空测量既能发现在该飞行高度超出γ背景值35.834～71.667 fA/kg（0.5～1 μR/h）的点状放射源，也能发现建筑材料中天然放射性元素含量偏高的面积性弱放射性异常。汽车γ能谱测量是用探测器体积为6～12 L的汽车能谱仪完成的，记录γ总计数、铀、钍、钾含量，定性测定一种人工同位素（通常是铯-137或钴60），以剖面或面积性方式进行工作。步行测量比例尺从1∶2000到1∶100。

所发现的放射性污染地段经过详细调查，确定出污染地段的范围和性质。在必要的情况下，为了确定辐射体的性质和污染的程度，要取样品做γ能谱测量和α及β测量。地段经详查之后交给地方权力机关，以便在卫生检疫部门、民防和堆放放射性废料的企业参加下消除污染，在消除污染过程中要进行追踪测量，而消除之后还要通过监测加以核实。

1992 年之前，原苏联已对 210 多个城市进行了放射生态调查，其中俄罗斯有 100 多个。仅在 1991 年，《地质勘探》联合体在 9100 km^2 面积上进行了 1∶10000 航空 γ 能谱测量，完成 33600 测线公里的汽车能谱测量以及 754 km^2 的 1∶2000 或更大比例尺的 γ 普查。1992～1995 年间，在俄罗斯计划完成 200 个城市、工业中心和公众休养区的放射性污染调查和治理工作，这意味着几乎所有超过 10000 人口的城镇都将包括在内。

在被调查的城市中已发现了 3000 多个放射性污染地段，俄罗斯约占 2000 个，其中 100 个地段的照射量率从零点几到 21.5 μA/kg（从几到 300 R/h）或更高。例如，在叶卡捷琳堡一所 5 层住宅的钢筋水泥梁中发现了 6.45 μA/kg（90 R/h）的放射源，在赤塔州克拉斯诺卡敏斯克市一所住宅的阳台上找到 4 μA/kg（56 R/h）的放射源，在莫斯科森林公园的休养区内发现了 4 个铯-137 污染地段，在其中一个地段的密室内发现了两个照射量率大于 21.5 μA/kg（300 R/h）的安瓿源。

我国在个别城市也作过系统的放射性污染调查，例如核工业航测遥感中心在石家庄市开展过此类工作，在该市北郊电厂附近发现异常地段，铀的含量大于 8×10^{-6}（最大值 11.8×10^{-6}），钍含量大于 27×10^{-6}（最大值 34.5×10^{-6}），为正常场的 3～5 倍，已构成放射性异常，面积约 1.5 km^2，经地面检查后发现是由电厂的煤灰池及散落于其四周的煤灰污染造成的。在其它一些工厂和居民区也出现放射性偏高区，经检查是由锅炉房旁堆积的煤灰煤渣、生活用煤的煤灰垃圾或含放射性物质的建材引起。

下面通过一些实例来介绍不同起因的放射性污染的监测方法。

1. 核事故污染的监测

核事故往往造成的污染范围很大，而且给人民生命和国民经济带来巨大的损失，引起全世界的关注。原苏联切尔诺贝利核电站的事故就是一个典型的例子。针对核事故的地球物理监测工作大体上可分为两大部分。一是在核事故发生后应当立即开始的大区域快速监测工作，及时了解逐日的污染扩散范围和方向并采取相应的防范对策。二是对所有核设施的长年监测工作，以便一旦发生事故时，能够了解原有的放射性背景以及追踪事故后污染逐步消除的过程。

在原苏联切尔诺贝利核电站于 1986 年 4 月 28 日发生事故后，该国在 527400 km^2 的面积上用 1∶100000、1∶200000、1∶500000 的比例尺完成了航空 γ 能谱测量。核泄漏形成的放射性散落物还被许多邻国的监测网探测到。瑞典国防研究所的监测网配备有大体积的地面空气取样装置，用于监测核试验，通过分析大气的放射性元素含量了解污染状况。斯德哥尔摩取样站首先发现了放射性异常，大气样品中的非天然放射性元素含量猛增。图 4-1 为计数时间 5 min 的 γ 能谱的一部分，其中 ^{132}I、^{131}I 和 ^{134}Cs 蜕变放出的 γ 射线很明显。^{134}Cs 极少见于核弹试验的散落物，故污染来自核试验的可能性很小。与瑞典气象研究所提供的气流轨迹对比，发现当时气流来自苏联的立陶宛、拉脱维亚、白俄罗斯、乌克兰一带。4 月 28 日下午瑞典空军飞机沿东部边界在波罗的海上空 300 m 采了样，在斯德哥尔摩东北发现一极大值，随之在不同高度采样，最大高度 12 km，发现从 4 km 以上放射性元素含量不再增加，这样就排除了污染来自重新进入大气的核动力卫星的可能性。

为了解核污染的区域分布，瑞典地质调查所动用了两架物探专用飞机，在 150 m 的高度上进行了航空伽马能谱测量，5 月 1～6 日的测量结果见图 4-2。在 Gavle 附近发现明显的高值。后几天的调查重点移向瑞典南部，以了解是否可以允许奶牛吃该地春天新生的牧

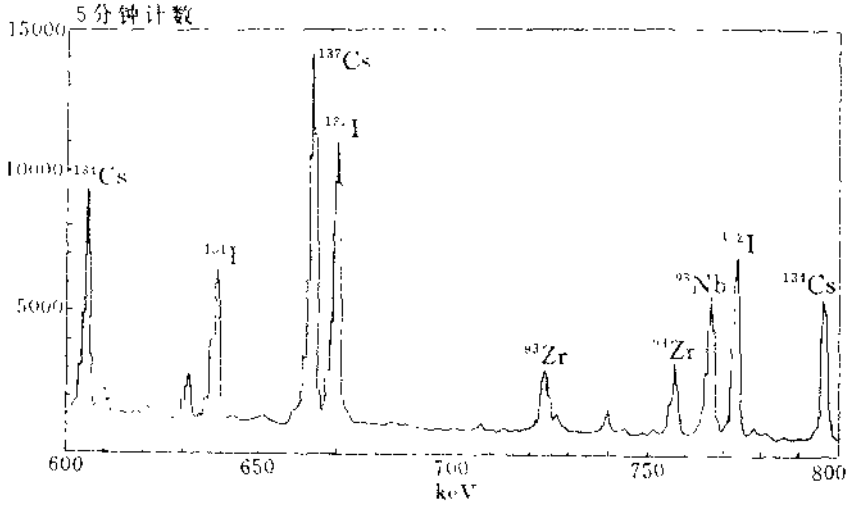


图 4·1　斯德哥尔摩取样站 1986 年 4 月 29 日玻璃纤维过滤器的伽马能谱

草。5 月 5 日至 8 日在瑞典其它地区用 100 km 线距的东西向测线覆盖，发现污染区不断向瑞典—挪威边界的方向扩大。从 5 月 9 日至 6 月 9 日整个瑞典用 50 km 线距的航空测量覆盖，在一些异常区测线加密到 2 km。

乌克兰科学院核子研究院对切尔诺贝利核电站地区从 60 年代初开始进行了长期监测，监测站位于基辅，监测参数包括 γ 射线背景水平、散落物的放射性活度以及土壤放射性污染水平。γ 射线背景水平用辐射仪测量，事故前的照射量率平均值为 716.67～860.00 fA/kg (10～12 μR/h)，1986 年 4 月 30 日为 358.34 pA/kg (5 mR/h)，随后几天该值变化较大，与放射性物质继续泄漏和天气条件有关，5 月 9 日出现第二个高峰，与反应堆的再次喷发有关。到 1986 年底该值降到 3.58 pA/kg (50 μR/h)，到公布监测结果前的 1992 年已回落到 1.15～1.29 pA/kg (16～18 μR/h)。放射性散落物是用 40×40 cm^2 的平底盘收集的，盘底铺有一层浸泡甘油的过滤纸，收集持续时间两星期，样品经灰化后测 β 射线强度 (mCi/km^2)。从 1963 至 1986 年该值呈下降趋势，事故后的最大值比事故前高出一个数量级 (该值可能偏低，因为收集物质在灰化时碘核素会蒸发)，1987 年该值明显下降，到结果公布前已与事故前无异。土壤放射性污染水平既取决于天然放射性元素，又取决人工放射性同位素，土壤样在 5 cm 深度上用方形取样器 (10×10 cm^2) 取样，样品加工后测 β 放射性总量和^{90}Sr 含量 (经化学分解)。土壤 β 放射性质量活度事故前平均为 550～740 Bq/kg (1.5×10^{-8}～2×10^{-8} Ci/kg)，1986 年上升至 29600 Bq/kg (8×10^{-7} Ci/kg)；^{90}Sr 质量活度事故前平均为 3.7～22.2 Bq/kg ((1～6) $\times10^{-10}$ Ci/kg)，事故后增长 10 倍。

另一个监测核事故污染的实例是追踪返回地面的核动力卫星。由于卫星在进入大气层后解体成多个碎片，因此监测工作要在预计降落轨道周围广阔地区内进行，主要依靠航空 γ 能谱测量，待发现异常后再进行地面检查。

加拿大国防部和美国能源部合作曾经在 1978 年初在加拿大西北地区追踪返回地面的原苏联核动力卫星 Kosmos 954。根据计算机预测的返回轨道划出一条长 800 km、宽 50 km

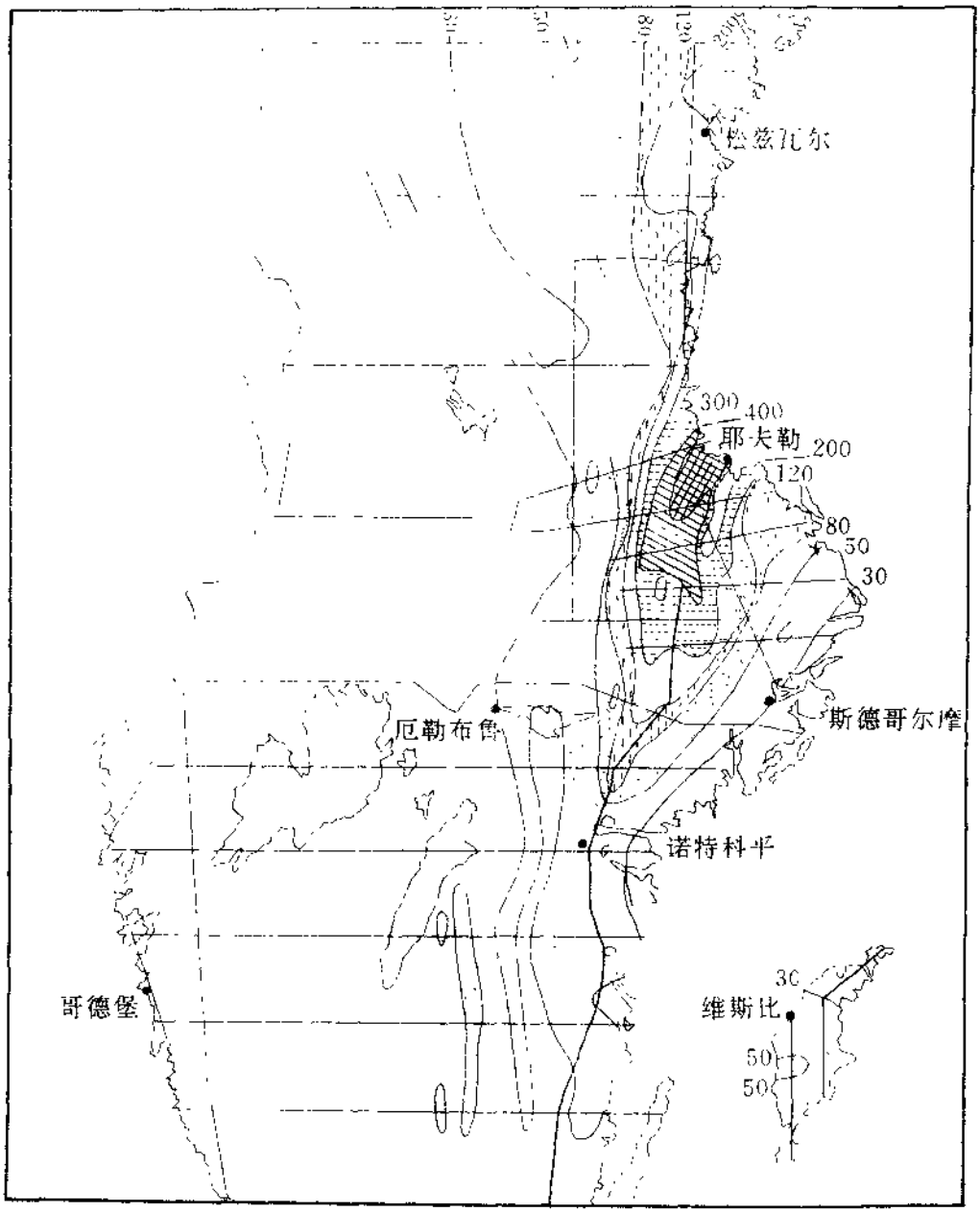


图 4-2　1986 年 5 月 1～6 日期间瑞典航空 γ 射线照射量率等值线图

照射量率单位为 μR/h（1 μR/h=71.667 fA·kg^{-1}）

的陨落带，由大奴湖东端至哈德逊湾附近的贝克尔湖，并先后将其划分为 14 段。为覆盖这广大的地区共动用 4 架 C-130 大力神飞机，以 1.853 km 的线距、500 m 的离地高度作了航空 γ 能谱测量。加拿大地质调查所的能谱系统首先在大奴湖东端冰上的一号地段探测到放射源，到 1 月 31 日对全区作了普查，发现所有放射性碎片落在一个 10 km 宽的带内，在该

带内又以 500 m 线距和 250 m 离地高度作了详查。鉴于大力神飞机的飞行高度不可能再进一步降低，还采用了一套直升飞机探测系统，在 9 号地段的冰上发现许多弱的放射源，它们都是在大力神的飞行高度上所不能发现的，后来对这些小片的分析表明它们是反应堆芯的一部分。接着，直升飞机系统又在沿大奴湖南岸一带发现了更多的放射性碎片（图 4-3），这些碎片随北风飘向预定轨道的南侧。到三月底又在大奴湖的冰上做了一次系统的直升飞机 γ 能谱测量，数据分析进一步证明反应堆芯在进入大气层后已全部解体。同年夏天，加拿大原子能监控管理局（AECB）做了进一步的监测和清理工作，以保证清除所有的有害物质，共回收约 3500 枚碎片，最远的在卫星轨道以南 480 km。

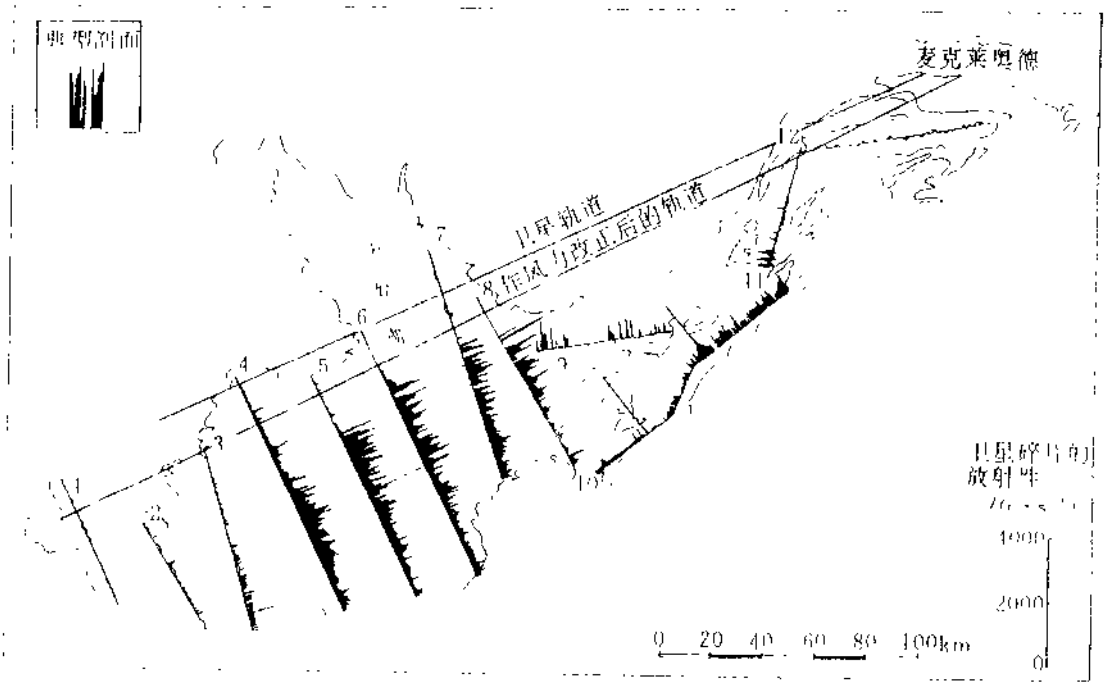


图 4—3　大奴湖地区由 Космос-954 卫星放射性碎片引起的 γ 射线总计数的分布

2. 矿山探采和选冶污染的监测

除了铀矿床外，许多有色金属、贵金属、稀有金属、稀土元素和磷矿床等也都伴生有大量放射性元素，对这些矿床的勘探、开采、选矿和冶炼都会导致放射性污染。为了清除这些污染、了解清除的效果，都需要进行监测。

在地质勘探阶段，矿床虽未交给工业部门开采，但在勘探过程中使用了水平巷道、竖井和浅井等工程，使矿区受到天然放射性元素的污染。在矿床开采过程中，矿石和废石的堆放与运输造成更大面积的污染，选冶过程中产生的尾矿和炉渣也是不可忽视的污染源。

在美国犹他州盐湖城的维特罗铀矿选矿厂附近曾开展航空放射性测量以评价放射性污染的范围和程度。1951 至 1964 年期间，维特罗公司在其位于盐湖城的选矿厂共选铀矿石 70 万 t，直到 1968 年还继续对少量钒矿石进行选矿。1961 年犹他州人首次对原子能委员

会允许用尾矿建房和筑路所引起的健康问题表示了关注。在盐湖城共用尾矿建成 90 多座建筑物。

尾矿堆的污染面积为 $4.7\times10^5\ m^2$，估计平均厚度 4 m，据推算，^{226}Ra 总量 5121×10^{12} Bq，平均质量活度为 17000 Bq/kg，年平均氡的发射率为 20.35 Bq/（$m^2\cdot s$），这就形成一个 9.62×10^6 Bq/s 的稳态氡源。

1979 至 1980 年美国能源部在盐湖谷作了航空放射性测量，以便划定尾矿场地范围，并指导地面调查。测量系统安装在 BO-105 直升机上，探测器由 20 个 NaI 晶体组成，每个体积 645.7 cm^3，航高 46 m，线距 76 m。通过在水面上飞行确定由飞机、宇宙射线、空中的氡子体构成的背景，然后从测量结果中减去背景。根据经验求出，在地面上方 1 m 高度上 1100 c/s=1 μR/h=71.667 fA/kg，据此将总计数换算为照射量率。由于选矿使得^{226}Ra 富集，故还将测量数据换算为镭的当量含量，Ra 的含量由^{214}Bi 窗口的计数计算。

根据测量数据绘出了照射量率等值线图（图 4—4a）和高于背景值的^{226}Ra 含量分布范围图（图 4—4b）。背景照射量率变化于 430～645 fA/kg 之间，尾矿堆的照射量率最高超过 1×10^5 fA/kg。在尾矿堆以北有两个照射量率偏高的突出部分，西面的一个据认为是由尾矿

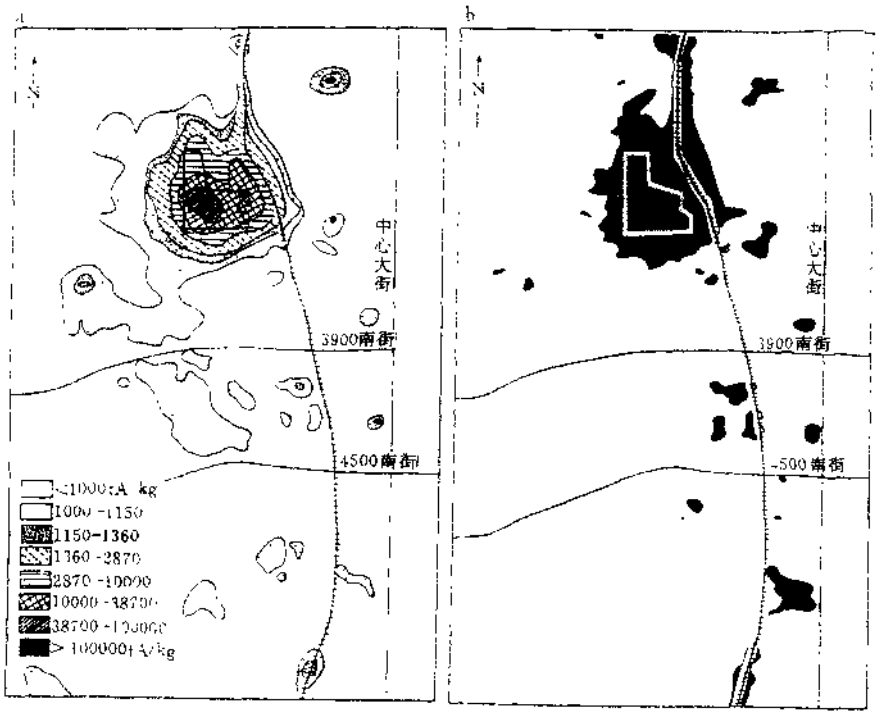


图 4—4

a. 根据航空 γ 测量数据计算的维特罗选矿厂的照射量率等值线图；b. 高于背景值的^{226}Ra 含量分布范围

受风吹动造成的，东面的一个沿铁路分布，可能由测量时正在运输的放射性物质或由沿铁路运输散落的矿石或尾矿引起。沿铁路的其它辐射异常据推测也是由散落物引起的。

利用此次航空放射性测量数据，盐湖城卫生局和犹他州卫生厅划定出 14 个此前未知的放射性异常区，地面检查发现 9 个地点属于铀选矿厂的尾矿、1 个是铀矿石、3 个是放射性炉渣，还有 1 个是储存的选矿设备。在 80 年代初所查出的这些污染地段都得到了清理。

德国的曼斯费尔德附近是一个古老的采铜区，从 1199 年即开始采掘，结果形成成千上万的矿渣堆，同时矿渣还用作建筑材料。1986 年原东德的地球物理调查所在此处进行了航空 γ 测量，仪器为 Scintrex 公司生产的 GAM 2001，飞行高度 100 m，线距 250 m，其结果绘成 1∶25000 的 eU、eTh、K 含量图，表明全区覆盖有大量 eU 异常，是由当地的采铜和冶炼活动引起的。地表检查证明放射性污染十分严重，有些矿渣堆的 eU 含量超过 70×10^{-6}，剂量当量率超过了 3000 nSv/h。调查结果为这一老矿区的复原工作提供了依据。

3. 建筑材料的放射性污染及其监测

建筑物是人们每天工作和生活的场所，建筑材料中放射性元素的含量与人的健康息息相关。由土壤和岩石制成的建筑材料不同程度地含有天然放射性核素，而其中能以气态从建材中扩散出来的同位素主要是^{222}Rn。当建筑材料的镭质量活度高于正常值（约 37 Bq/kg）时，就会成为室内氡的重要来源之一。有时一些工业废料含有较多的放射性元素，也被用作建材的原料，成为长期危害人体健康的污染源。

我国多数地区用各种砖作建材，其中所含放射性元素以钾的质量活度最高——148～555 Bq/kg，镭次之——37～185 Bq/kg，钍为 37～148 Bq/kg。原料中含核素高的石灰、水泥制作的建筑材料，其室内氡浓度可高于正常值的 5～18 倍，例如我国一家渣制水泥厂，其原料来自白云鄂博铁矿的尾渣，用其水泥建成的房屋室内氡浓度高于正常值的 4～6 倍。

表 4—1　混凝土氡射气速率和放射性元素含量

样品名称及取样点	样品数	单位质量的射气速率/(10^{-2} Bq·kg^{-1}·h^{-1})			元素平均含量			平均射气系数/%
		范围	平均值	标准离差	w(U)/10^{-6}	w(Th)/10^{-6}	w(K)/%	
普通混凝土								
阿尔伯克基	12	2.59～7.22	4.51	1.30	2.5	6.0	1.5	22
堪萨斯城	12	1.48～2.41	1.96	0.26	1.0	2.0	0.7	25
费城	7	1.30～2.04	1.55	0.30	0.6	1.5	0.7	17
盐湖城	9	1.85～2.78	2.37	0.30	2.0	4.0	0.6	14
旧金山奥克兰	21	2.11～4.07	3.07	0.44	1.5	3.0	0.6	24
奥斯汀	8	2.22～3.40	2.66	0.44	1.3	1.5	0.8	24
圣安托尼奥	8	1.00～2.66	1.70	0.52	3.0	7.5	1.5	8
芝加哥	12	0.93～5.14	2.44	1.33	1.5	2.0	0.5	25
圣鲍尔明尼波里斯	5	2.00～2.78	2.29	0.33	1.5	4.0	1.5	19
诺克斯维尔	6	1.70～2.89	2.18	0.44	1.0	1.2	0.5	23
粉煤灰混凝土								
诺克斯维尔	8	2.96～4.40	3.74	0.59	1.5	2.6	0.7	25
磷酸盐矿渣混凝土								
萨宛那	2		0.85		0.6	2.2	0.6	14

有人曾对美国常用建筑材料的放射性核素含量和单位质量氡射气速率进行了调查，调查的重点是混凝土，测量了取自十个大城市的混凝土样。表 4—1、4—2、4—3 列出了不同地区混凝土和其它建筑材料的单位质量平均氡射气速率和 U、Th、K 含量的平均值。调查结果表明，在所测试的建材中，最强的氡辐射体为混凝土，最弱的是木材。

表 4—2　混凝土中不同组分的辐射

样品种类及取样地点	样品数	单位质量射气速率平均值/(10^{-2}Bq·kg^{-1}·h^{-1})	元素平均含量			平均射气系数/%
			w(U)/10^{-6}	w(Th)/10^{-6}	w(K)/%	
旧金山						
水泥	4	0.37	1.0	2.0	0.3	1
细砂	2	0.56	2.8	2.4	3.1	16
粗砂	2	0.93	0.8	2.3	0.6	12
砾石	4	0.78	1.2	3.7	0.7	7
诺克斯维尔						
水泥	2	<0.67	2.0	4.5	0.8	<3.5
粉煤灰	2	<1.18	14.5	27.5	3.0	<1
砂	2	<0.37	2.0	1.0	0.5	<4
砾石	2	<0.26	1.0	1.0	0.4	<3

表 4—3　其它建材的射气速率和放射性元素含量

样品种类及取样地点	样品数	单位质量射气速率平均值/(10^{-2}Bq·kg^{-1}·h^{-1})	元素平均含量			平均射气系数/%
			w(U)/10^{-6}	w(Th)/10^{-6}	w(K)/%	
石膏(5个不同地点)	12	2.26	1.0	0.5	0.2	28
石料(新墨西哥石料库)	9	1.85	4.5	13.0	3.0	4
红砖(加州)	6	0.37	3.6	10.4	1.7	1
砖坯(新墨西哥)	2	1.30	2.5	6.7	1.9	6
木材(西部两州)	2	0.07	—	—	—	—
土(加州圣约瑟)	2	7.77	3.2	11.2	1.6	25
土(马里兰州艾里山)	2	7.77	3.3	15.1	2.2	25

在同一类建筑材料中，单个样品的氡射气速率差异很大。而且，即使建材的铀含量大致相同，其氡射气速率也可能很不一样。例如，花岗岩的铀含量比混凝土高，但其氡的射气速率却较低，这是因为它们的射气系数不同。

在俄国，全俄勘探地球物理研究所(BIIPI)提出用以下参数对建筑材料的辐射和室内居民辐射剂量进行监测。

(1)建筑材料放射性元素的质量活度 a_{ef}，单位为 Bq/kg

$$a_{ef} = a_{Ra} + 1.31\,a_{Th} + 0.085\,a_K \tag{4.1}$$

式中 a_{Ra}、a_{Th}、a_K 分别为单位质量建材内的 Ra、Th 和 K 的放射性活度，即质量活度。

(2)室内 γ 射线照射量率 $\dot{X}_{MED}$，原单位取 μR/h，下文中已换算为 fA/kg。

表 4 -4 列出俄国对上述参数规定的允许值。

建材目前主要是由各种天然岩石制成的，表 4 -5 列出主要类型岩石放射性元素含量以及 a_{el} 和 X_{MED} 的计算值。

表 4 -4 俄国建材辐射及室内照射量率允许值

辐射监测参数	单位	允许值
单位质量建材放射性元素有效放射性活度 a_{el}	Bq/kg	370 —— 新建房屋之建材(1 级) 740 —— 居民点内的铺路建材(2 级) 1350 —— 居民点外的铺路建材(3 级)
室内 γ 射线照射量率 X_{MED}（背景以上的增量）	fA/kg	2365 —— 新建房屋内 4658 —— 原有房屋内 2365 —— 计划新建住宅区、疗养院和儿童场所的天然背景

表 4 -5 主要类型岩石的放射性数据

岩石名称	放射性元素含量 w（括号内为质量活度 a/(Bq·kg^{-1})）			计算的 a_{el} /(Bq·kg^{-1})	计算的 X_{MED} /(fA·kg^{-1})
	w(U)/10^{-6}	w(Th)/10^{-6}	w(K)/%		
1. 岩浆岩(地壳平均克拉克值)	2.5(31)	13(53)	2.5(783)	167	659.3
1.1 超基性岩(纯橄榄岩等)	0.03(0.4)	0.08(0.3)	0.15(47)	4.8	71.7
1.2 基性岩(辉长岩、辉绿岩、玄武岩等)	0.6(7.0)	1.8(7.0)	0.7(210)	35	143.3
1.3 中性岩(闪长岩、安山岩等)	1.8(22)	6.0(24)	1.8(540)	100	430.0
1.4 酸性岩(花岗岩、流纹岩等)	2.1～7.0 (26～87)	8.3～19 (34～77)	2.3～4.0 (720～1250)	131～294	501.7～1218.3
1.5 碱性岩(正长岩、粗面岩等)	4.0～10.0 (49～124)	20～50 (81～203)	4.0～5.0 (1250～1560)	262～522	1003.3～2078.3
2. 沉积岩					
2.1 含盐岩石	1.0(12)	1.0(4)	8.0(2500)	230	931.7
2.2 碳酸盐岩	1.8(22)	2.0(8)	0.3(94)	41	143.3
2.3 硅质岩	1.7(21)	2.2(9)	0.3(94)	41	143.3
2.4 陆源岩石(砂岩、泥质页岩、砾石、粘土等)	3.1(38)	10.4(42)	1.8(563)	140	573.3
2.5 煤	1.8～13.7 (22～170)	0.5～6.0 (2～24)	0.3～1.0 (94～313)	35～220	215.0～860.0
2.6 炭质页岩	12～100 (148～1235)	7～11 (28～45)	1.7～2.8 (532～876)	230～1370	860.0～5160.0
3. 变质岩					
3.1 铁镁质硅酸盐类(闪岩、石英岩、大理岩等)	0.6～1.3 (7～16)	1.8～4.2 (7～7)	0.2～1.7 (62～532)	22～84	71.7～358.3
3.2 长英质岩石(变质砂岩、结晶片岩、片麻岩等)	2.6～3.5 (32～43)	9.0～16.0 (36～55)	2.5～3.6 (782～1126)	146～225	573.3～860.0

计算某一放射性元素的单位质量放射性活度可按下式进行

$$a_U = a_U w_U; \quad a_{Th} = a_{Th} w_{Th}; a_K = a_K w_K \tag{4.2}$$

式中 w_U、w_{Th}、w_K 为相应放射性元素所占的质量分数；a_U =12.35 Bq/kg（1×10^{-6}平衡铀中的^{226}Ra 产生的质量活度），a_{Th}=4.06 Bq/kg（1×10^{-6}平衡钍中的^{232}Th 产生的质量活度），a_K =313 Bq/kg（1%钾中的^{40}K 产生的质量活度）。

测道 a_U、a_{Th}和 a_K，即可按式（4.1）计算单位质量有效放射性活度 a_{ef}。

计算 $\dot{X}_{MED}$值时，算出的是放射性元素均匀分布半空间界面上的 $\dot{X}_{MED}$，采用如下公式

$$\dot{X}_{MED} = \gamma_U w_U + \gamma_{Th} w_{Th} + \gamma_K w_K \tag{4.3}$$

式中 γ_U=46.58 fA/kg（1×10^{-6}平衡铀），γ_{Th}=20.78 fA/kg（1×10^{-6}平衡钍），γ_K=107.5 fA/kg（1%钾）。

根据表 4—5 的数据，岩石按放射性可分为三组：低放射性组的 $a_{ef}\leqslant100$ Bq/kg，$\dot{X}_{MED}\leqslant716.7$ fA/kg；正常放射性组（接近地壳岩石的平均值，即 a_{ef}=150 Bq/kg，$\dot{X}_{MED}$=860.0 fA/kg）：$100<a_{ef}<200$ Bq/kg，$716.7<\dot{X}_{MED}<1075.0$ fA/kg；高放射性组 $a_{ef}>200$ Bq/kg，$\dot{X}_{MED}>1075.0$ fA/kg。

以往 a_{ef}是通过取样并进行室内分析的办法确定，$\dot{X}_{MED}$则采用专门的剂量计测定，前者费时费力，而后者灵敏度低。近来全俄勘探地球物理研究所提出了采用辐射仪和 γ 能谱仪的测定方法。在物探工作中天然放射性元素的质量分数 w_U、w_{Th}、w_K 是用 γ 能谱仪测定的。为了加快速度，可以只用能谱仪在基点上进行测定。在建材矿床上的大量一般测点上，a_{ef}和 $\dot{X}_{MED}$可用闪烁辐射仪测定。

如将上述（4.2）式代入（4.1）式，可以得出：

$$a_{ef} = 12.35\ (w_U + 0.43\ w_{Th} + 2.15\ w_K) \tag{4.4}$$

而根据（4.3）式 $$\dot{X}_{MED}=46.58\ (w_U+0.45\ w_{Th}+2.3\ w_K) \tag{4.5}$$

对比（4.4）、（4.5）两式可见，括弧内的表达式在误差范围内可以认为是相等的，因此

$$a_{ef} = K \cdot \dot{X}_{MED}, \qquad K = 12.35/46.58 = 0.265\ \text{Bq/fA} \tag{4.6}$$

可见，利用辐射仪先测 $\dot{X}_{MED}$（fA/kg），再计算 a_{ef}，比较简便。实践表明，用 γ 能谱仪测 w_U、w_{Th}、w_K 计算，a_{ef}和通过 $\dot{X}_{MED}$计算的 a_{ef}相差不超过 10%。

用剂量计测 $\dot{X}_{MED}$误差达 30%，如改用高灵敏度的闪烁辐射仪，工作效率和灵敏度均可提高一个数量级。

4. 采煤和燃煤的污染及其监测

许多重要的采煤区在采煤过程中形成大面积的放射性污染。例如，德国的鲁尔矿区发现，由煤矿抽向地面的水中^{226}Ra 含量所导致的活度浓度达 13 kBq/m^3，流入地下坑道中的水达 63 kBq/m^3。鲁尔区所有煤矿每年抽出的水含^{226}Ra 导致的总活度共 37 GBq。又如波兰的上西里西亚煤田，由煤矿抽向地面的水中含^{226}Ra 达 16 kBq/m^3；流入地下坑道中的水含 Ra 达 400 kBq/m^3，每开采百万吨煤就会向地面抽出产生 2 GBq 的^{226}Ra，而该煤田的 66

个煤矿年产煤量约 1 亿 8 千万吨，这就意味着每年约向地面抽出共产生 360 GBq 的^{226}Ra。

在地面上放射性污染的分布在很大程度上与水的化学成分有关，共有两类含镭的水，A 类含硫酸盐甚少或不含硫酸盐，但含 Ba^{2+} 离子；B 类水含大量硫酸盐，但不含 Ba^{2+} 离子。在 B 类水中镭不沉淀，而 A 类水中的镭，当其与硫酸盐水混合后，镭与钡同时沉淀，形成放射性沉积物。很多煤矿已采煤百年以上，在矿山废水流经之处形成很厚沉积层，质量活度达 150 kBq/kg，并导致土壤和植物的污染，土壤质量活度由 0.2 到 31 kBq/kg，在水道两侧的新鲜植物中含^{226}Ra，其质量活度达 1 kBq/kg。

煤的燃烧过程实际上是放射性元素在燃烧产物中富集的过程。印度 Aligarh Muslum 大学利用裂变径迹法对印度两家热电厂的煤、炉渣和飞灰中的铀含量进行测定，发现他们所用的煤含铀的质量分数为 17.1×10^{-6}，炉渣为 25.7×10^{-6}，而飞灰为 29.1×10^{-6}。

目前世界上许多发展中国家都以煤作为主要能源，因此粉煤灰成为一种量大面广的放射性污染源。据联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）的统计，一个每天烧煤 10 t 的热电厂，向大气释放的^{238}U 放射性活度达 1850 kBq，一个 1000 MW 的热电厂每年排放粉煤灰 3×10^5 t，其中 1.4×10^5 t 排入大气。调查表明，在热电厂周围由于粉煤灰放射性引起的癌症死亡率比在核电站周围高 30 倍。

用粉煤灰和煤渣制造建筑材料曾被认为是废物利用的好办法，殊不知当煤的放射性元素含量偏高时，这会导致严重的后果。我国核工业总公司曾经对石煤渣砖所建房屋的室内吸收剂量率做过调查，其结果见表 4—6。

表 4-6 石煤渣砖所建房屋和对照房屋室内伽马射线吸收剂量率

房屋类型	组别	房间数	吸收剂量率/($10^{-8}Gy\cdot h^{-1}$)
石煤渣砖所建房屋	1	83	95.1
	2	236	64.3
	3	62	38.2
	4	111	81.2
	5	120	70.7
	6	111	54.1
	7	105	27.9
	8		30.0
对照房屋	1	76	9.3
	2	90	10.5
	3		9.2

由此可见，石煤渣砖房屋的 γ 辐射吸收剂量率比对照组房屋高 3～9 倍。另据对福建西部几家综合渣制砖厂进行的放射性监测，发现一些石煤渣制品 U、Ra、Th 核素的含量比正常值高 3～5 倍。

5. 石油开采及运输中的放射性污染和监测

石油的放射性污染过去长期为人们所忽视，原苏联在其开展的全国性系统放射生态调查中才发现这一问题。1988 年 ЮЗНЬЦОВ 地质企业发现巴库和高加索地区石油管道的照射量率达 14333～143334 fA/kg（200～2000 μR/h）。该企业近年来在斯塔夫罗波尔边区的调查中发现，在采油时放射性盐类沉淀在输油管道、容器和其它设备的壁上，将采油废水放

\蒸发和过滤场也促使面积性放射性污染的形成，面积达几十至几百万平方米，γ射线的照射量率达 7167～71667 fA/kg（100～1000 μR/h）。清洗、修理和更换管道、容器和设备也使地面被固体放射性废料污染，照射量率可达 143334～215001 fA/kg（2000～3000 μR/h）。另外，每年还要发生数以千计的输油、水管的泄漏，泄漏量达数万立方米。每年又有数百公里的过期污染管道报废，其中相当一部分变卖给居民和单位，作为建筑材料。

油田上放射性污染之面积大者甚至在 1∶50 万的航空γ能谱测量中也反映出来，污染物以镭及其衰变产物为主，铀、钍含量不超过土壤的背景值。ЮЖНЕФТЕГЕОФИЗИКА 地质企业用路线汽车能谱测量在斯塔夫罗波尔边区测过的 40 个油气田，其地表全被放射性废料污染，发现 300 多个污染地段，γ射线照射量率 4300～215001 fA/kg（由 60 到 3000 μR/h），其中大部分在 7167～71667 fA/kg（100～1000 μR/h）范围内。

在采油过程中到达地表的液态物质的活度浓度见表 4—7。

表 4—7　油田液体放射性元素活度浓度

液体名称	核素活度浓度/（Bq·L^{-1}）	
	^{226}Ra	^{228}Ra
采油孔的油水混合液	10.0	14.0
分离后的油	9.0	10.0
分离后的水	8.0	11.6
其中用于保持层压	6.4	9.3
流向吸收层	6.4	9.3
流向蒸发场	8.0	11.6
输油主干线中的油	8.9	9.6

分离后的气中^{222}Rn 的活度浓度为 67 Bq/m^3。

从表 4—7 可知，采到地面的油水混合物已经达到液体放射性废料的水平，含^{226}Ra 10 Bq/L、^{228}Ra 14 Bq/L，而按照该国辐射安全规定，^{226}Ra 不得超过 2 Bq/L，^{228}Ra 不得超过 2 Bq/L。这就是说，油水混合物中镭的两种同位素活度浓度都超过限值 5 倍，两者加在一起为 10 倍。

斯塔夫罗波尔边区东部采油区占地约 3000 km^2，上面分布约 30 个村庄，共 80000 人。该地平均污染密度为 1.11 G Bq/km^2，这相当于切尔诺贝利的^{137}Cs 污染密度（111 G Bq/km^2），因为对镭的要求要比对^{137}Cs 的要求严格 100 倍。油田放射性物质对地下水的污染也很严重，因为该地地下水位深度仅 1～2 m。

据报导，德国油气层中含^{226}Ra 也很高，达 280 Bq/L。

油气田的放射性污染在某些其它油气田也会存在，有必要制定全国性的规划，进行系统调查。

6. 磷肥的放射性污染及其监测

在天然环境中磷和铀之间有着稳定的共生关系，磷肥的原料——磷矿石含有偏高的铀，磷肥的副产品中则含有较多的铀衰变产物，这些都会给磷肥厂周围的环境造成放射性污染。

在西班牙西南部奥迭尔河和廷托河汇合入海处附近有一个大型磷酸厂，用于制造磷酸盐肥料，其原料为磷灰岩，含有大量铀系放射性核素。因此，需要估算该厂每年排入周围环境的核素数量。此外，还测定了西班牙西南部几种商品肥料的放射性元素含量，以估计

其对农田的放射生态影响。

所有的调查工作均基于测定固体和液体样的U同位素、^{226}Ra、^{210}Po、^{228}Ra和^{40}K的含量。U同位素和^{210}Po用α能谱法测定，其它核素通过γ能谱法测定。在测定之前液体样品要过滤。

在西班牙的工厂、生产磷酸的方法是用硫酸来处理原岩，在此过程中形成硫酸钙沉淀($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)，称为磷石膏，这种副产物或者直接排入奥迭尔河，或者堆在厂房周围。

对磷矿石、磷酸和磷石膏的样品进行了分析，结果表明：

(1)矿石富含U同位素、^{226}Ra和^{210}Po，而且这三个核素处于长期平衡，质量活度为1000～1300 Bq/kg，比土壤背景值高50倍。

(2)钍系元素含量和土壤背景值相比近似或略高，^{40}K的含量很低($a<30$ Bq/kg，$w<0.1\%$)。

(3)在磷酸生产过程中，U的同位素一般与磷酸共存，而^{226}Ra和^{210}Po主要与磷石膏共存 —— 80%的U，3%的Po和<1%的Ra存留于磷酸中，而15%的U，90%的Ra和Po存留于磷石膏中。其余部分的放射性元素进入过滤后的残渣内。

知道每年产出的磷石膏量及其中U、^{226}Ra、^{210}Po的质量活度平均值，可以得出工厂附近每年排出的U同位素总活度约0.6 TBq，^{210}Po总活度1.8 TBq，^{226}Ra总活度1.8 TBq，各种放射性核素总量的80%存留在磷石膏堆中，其它直接排入奥迭尔河，存放的磷石膏也逐渐被水溶解流入河中。到达廷托河的水^{238}U活度浓度40 Bq/L，^{226}Ra为0.9 Bq/L，^{210}Po为9Bq/L。

为研究河流的污染，还取了水系沉积物样，样品湿重数公斤，烘干、磨碎、混合后在高纯锗探测器上测量(分辨率1.88 keV)，探测器覆盖有10 cm厚的铅屏，内有2 mm的铜衬，以便测得较低的质量活度(Bq/kg)。

磷肥厂的环境放射性污染在我国亦有发现。核工业总公司在上海市郊进行航空γ能谱测量时，曾发现102×10^{-6}的铀异常，是背景值的45倍，经查是由化肥厂的磷矿粉引起的。

施加磷肥对农田的放射性污染程度如何也是人们普遍关心的问题。对此，西班牙的韦尔瓦大学已作了初步估算，他们测定了西班牙11种化肥的质量活度，非磷肥的铀系元素含量都很低，而磷肥较高，如磷酸铵肥料(以P_2O_5计)中的铀导致的质量活度为2500 Bq/kg、Ra的为50 Bq/kg、Po的为250 Bq/kg。为了估算磷肥对农田的影响，假定每年每万m^2最多上150 kg P_2O_5，1 kg P_2O_5所含铀的活度为2500 Bq，而铀均匀分布在近地表10 cm的土壤层中，土壤密度为1.5×10^3 kg/m^3，那么每年每公斤土壤增加约0.25 Bq的铀，它不超过未扰动土壤铀正常含量的1%。所以，他们认为磷肥对农田的放射性污染可以忽略不计。

二、核废料处理场地的选址和勘察

1. 核废料的地质处理

1993年核电在世界发电量中所占的份额为26%，该年年底全世界共有30个国家的430个核电站在发电，总装机容量为3380×10^8 W。据预测2005年以前这一段核电仍会继续增长，尤其是在一些能源比较缺乏的国家，例如日本。日本拥有处于不同建设阶段的核反应堆29个，比其他任何国家都多，预计日本的核发电装机容量到2005年将增长16%～27%，即从380×10^8W增至440×10^8～480×10^8 W。建立核电站带来的一个严重问题是其废料如何处理，这些废料中含有大量裂变产物，其中很多具有相当长的半衰期。例如^{85}Kr为

^{90}Sr 为 28 a、^{137}Cs 为 30a，这些同位素至少要经过 10 个半衰期才能变得对人体健康无害，因此需要将其安全存放数百年。反应堆还能产生少量半衰期比这长得多的衰变产物，如 ^{239}Pu 为 24000 a，因此它的存放时间要长达 24×10^4 a。

人们并非一开始就认识到把废料储存到地下地质体内的必要性的，美国能源部建立的地面核废料库中已储存了几十万立方米的液体和固体核废料。液体废料容易泄漏，在美国的汉福德核废料库 1973 年一次就流失 437 m^3。尽管后来采取了一些防漏措施，但由于储存期以数十万年计，放在地面终非长久之策，许多国家都已认识到，为了保护生物圈和人类的安全，最好的办法是把核废料存入地下地质体。

适于储存核废料的地质体 各国都根据自己的条件来选择，不过迄今研究得最多的是两种：盐体和深成结晶岩体。

盐体被认为是储存核废料的最好地质介质，其优点是未经破坏的盐层干燥，盐体中产生的裂隙易于愈合，盐比其它岩石更易吸收核废料释放的热，盐屏蔽射线的能力强，盐抗压强度大，而且一般位于地震活动少的地区。

但是像加拿大和瑞典这样的国家，大部分领土属于前寒武纪地盾，因此它们主要研究利用深成结晶岩储存核废料，研究对象包括片麻岩、花岗岩、辉长岩等。这些岩体能否储存核废料主要取决于其中地下水的活动情况。由于结晶岩中地下水的唯一通道是裂隙，所以圈定裂隙带并研究其含水性是重要的任务。在具体选择储存场地时考虑以下几个条件：地势平坦、因而水力梯度小，主要裂隙带不要穿过场地，小裂隙带应尽可能少，要避开可能有矿的地点。

其它研究的目标还有粘土、玄武岩、凝灰岩、页岩、砂岩、石膏、碳酸盐岩也是可以考虑的目标。一般来说，碳酸盐岩是不适合的，但由不透水岩石包围的碳酸盐岩透镜体是值得研究的。除了陆上的地质体外，对海底的岩石也已开始研究。

一些国家的核废料处理计划 目前有一些国际组织负责对核废料处理工作进行组织协调，推动技术进步，提供安全指南并开展一些研究项目，它们是国际原子能机构（IAEA）、核能源机构（NEA）、欧洲共同体委员会（CEC）等。许多国家都有全国性的核废料处理计划，例如美国、加拿大和瑞典。

美国从 1966 年开始执行一项“盐丘计划”，1970 年曾准备将一个采空的盐矿作为储存核废料的试验场地，但后来放弃这一设想，因为担心那里的大量巷道和钻孔会成为核废料向上运移的通道。自从 1987 年的核废料政策修正案要求能源部只研究内华达州的尤卡山作为核废料储存的候选场地以来，迄今一直在对那里分布的火山岩进行可行性研究，目标在于能储存 7 万吨核废料，至少在 1 万年内不会影响人类的安全，这项工作称为场地鉴定，预计 2001 年完成，成本会超过 60 亿美元。如果核规章委员会批准可行性报告，将会在这里建设 160 km 长的隧道网，计划在 2010 年接收第一批废料。已做的研究表明，火山和地震对该场地威胁的可能性很小，潜水面亦很深（山脊之下 800 m），因此核废料可以储存在干岩中。

1978 年加拿大开始执行一项核燃料废料管理计划（NFWMP），委托加拿大原子能公司负责，主要研究目标是地盾的深成岩，也研究过页岩、盐和粘土。该计划分为三个阶段：（1）设想评价阶段，为期 10 a，论证深成结晶岩中储存核废料的可能性；（2）选址，在举行听证会和政府验收第一阶段成果后开始；（3）建立地下实验室。

瑞典从70年代中期开始研究核废料的地质处理，按照该国法律，在找到安全处理核废料的方案之前不准建立新反应堆。瑞典研究过的四个场地都在花岗岩、片麻岩中，在Stripa附近的一个废弃铁矿山进行了一系列试验。"Stripa"计划开始时由瑞典核燃料供应公司与美国能源部合作，后又有英、法、日、加等多国加入。

核废料在地下的储存方案 在选定储存核废料的地质体后，一般要打竖井和巷道，将包装好的核废料存入地下洞穴。核废料的保护层包括：容器及其周围的缓冲材料，洞穴或竖井本身及回填物，地质介质。

废料通常首先用硅酸硼或硅酸铝包装（也有的采用以榍石为基质的玻璃陶瓷）。用硅酸硼包装液体废料遇到的问题是：废料在离开反应堆十年内温度可上升到300℃，在此温度下硅酸硼玻璃如与地下水接触会很快分解。一种解决办法是大大减少所包装废料的数量并在放入地下之前先在地面储藏50 a，以便使温度不致上升到100℃以上。

澳大利亚研制出一种称为Synroc（合成岩石）的材料，能把废料中的核素吸收到矿物晶格中，这是一种钛酸盐陶瓷，主要由碱硬锰矿、变锆石、钙钛矿组成，它无论在低温下（<100℃）、还是在高温下（>300℃）都有很强的抗淋滤能力，比硅酸硼高1000至10000倍。如把25%的Synroc均匀渗入金红石基质，则这种材料的抗力更强。由Synroc包装的核废料数量大，离开反应堆后可直接存入地下。

容器由不锈钢、钛或铜制成，设计寿命300～500 a，如用非金属或耐腐蚀材料寿命可达数千年。缓冲材料用膨润土，其吸水能力强。洞穴或竖井要用回填物封住。以上这些措施都是针对初始阶段（100 a左右），在过后的几十万年至几百万年中，主要靠地质介质起保护作用。

值得指出的是，丹麦准备将核废料储存在钻孔中，按6个1000 MW当量的反应堆运转30 a计算，废料将装满4500个直径0.35 m、长2 m的容器，可将它们放进8个2500 m的孔内。钻孔分布在直径500 m的圆上、孔距200 m，在每个孔内下套管950 m，即进入盐层200 m，废料容器放在1200～2500 m深处。应当说，当废料数量不大而盐层厚度较大时，这是一种节约资金的好方案。

需要指出的是，核废料的地质处理目前仍处于研究试验阶段，并未开始实施。在研究试验阶段，地球物理方法在解决地质和工程问题方面已发挥了重要作用，下面主要介绍地球物理方法在研究盐体和深成结晶岩体中的作用。

2. 盐体选址和勘察中的地球物理工作

盐体普查 为了储藏核废料，首先要了解盐层的深度、厚度和构造，圈出适合储藏的盐体，一般倾向于把核废料储存在盐丘里。

(1) 重力测量 盐丘是重力法能有效勘查的对象。盐的密度稳定，为2.1×10^3 kg/m^3，往往低于围岩（$2.2\sim2.4\times10^3$ kg/m^3），在盐丘上可测到$n\times10\sim n\times100$ g. u. 的重力低。当盐丘上部有厚层石膏时，由于石膏密度大，结果形成弱重力低背景上的重力高。当盐丘为致密火成岩环绕（火成岩在盐丘形成过程中侵入）时，则在重力低的边缘出现环状重力高。盐丘表面起伏可用高精度重力和地震测量综合研究。当盐丘地区的重力场非常复杂时（重力场为盐上、盐下层位、盐层和基底的综合反映），采用最小化法进行解释：首先根据地质-地球物理资料提出模型，然后自动选择与观测重力异常最吻合的模型曲线，使两者偏差的平方和等于最小值。

(2) 电法测量　盐比围岩电阻率高，是电性基准层，以往盐层构造用直流电测深研究，近年来则愈来愈多地采用大地电流法和磁大地电流法。采用大地电流法确定盐体埋藏深度时，利用大地电流平均场强与盐层深度之间的统计关系，因此要掌握少量钻探和地震资料。平均场强的高值区对应于盐丘和盐垣，这样圈出的局部构造很多已被地震或钻探所证实。

(3)地震测量　在构造比较简单的沉积岩区地震反射和折射法探测盐层起伏很有效。丹麦准备储存核废料的莫尔斯盐丘，其位置和形态就是根据反射面的分布确定的。在某些情况下地面地震法只能确定盐丘顶部平缓部分的位置，而侧壁的形态和位置难以确定，这时就要采用井中地震，借助于透过波。

总之，为了研究盐层构造，一般先用重力和电法，两者结合起来能更详细地确定盐层构造在平面上的大小和形态。根据重力和电法结果布置地震测网，通过地震法可准确确定盐体深度，而利用井中地震则可准确确定盐体侧壁的位置和形态。

研究盐体的内部结构　为了确定盐体是否适于储存核废料，必须研究盐体的内部结构，即其所含杂质（夹层）数量、含水性和裂隙发育程度。

(1) 确定杂质（夹层）的数量　盐的相对纯度是影响其能否储藏核废料的一个重要因素，杂质的出现会使盐层的抗压强度减小，屏蔽射线的能力降低。盐体所含杂质包括泥质组分、石膏等，泥质组分有的形成单独的夹层，有的与盐混在一起，形成泥盐。美国得克萨斯州的帕洛杜罗盆地用天然伽马测井和密度伽马-伽马测井评价了中上二叠系盐层的纯度。γ射线强度与泥质含量相关，因为泥质组分中的钍量较高。γ-γ测井求得的密度则与石膏的百分含量之间存在着线性相关关系。计算了每个钻孔每个盐层的γ强度平均值。不到30 ft（约9.14 m）的夹层，其γ强度与盐层一起平均，当夹层厚于30 ft时，就把盐层当作两个单独的层处理，据此编制了不同旋回的γ射线强度的等值线图，它实质上就是泥质含量分布图，从中可以选择泥质含量最低的地区作为储存核废料的地点。

在美国盐谷地区还曾用垂直地震剖面法，根据波速的不同划分盐中的夹层。在丹麦的莫尔斯盐丘则用井中重力研究过盐内的夹层。

(2) 研究含水性　盐体含水对建立核废料库是一个潜在的危险，它使部分盐溶解成为卤水，减小盐的机械强度并腐蚀废料容器。

测量盐体的含水量可以采用中子测井，以^{252}Cf为中子源。试验表明，在释放的γ射线谱线上氢本身的峰很弱，不能用作评价含水量的尺度，但可利用快中子与Na和Cl原子核的相互作用，以下列参数衡量含水量：Na中子非弹性散射峰与Cl中子俘获峰的比值。非弹性散射是指Na的原子核吸收一个中子并放出一个中子和γ射线，γ射线峰的位置在438 keV；中子俘获是指Cl的原子核俘获一个中子并放出γ射线，其峰的位置在789 keV。上述比值与水的含量呈正比。

美国还曾利用瞬变电磁法来确定卤水的位置。在新墨西哥州地下600 m深的Salado组盐层中开挖了废料密封试验场（WIPP），下伏有Castile组的石膏和石盐，在更往下的Bell Canyon组中根据油气钻探的资料含有卤水。将核废料放入600 m深的盐层中是考虑到上覆的盐层和下伏的石膏与石盐都不透水，但是一定要查明试验场周围出现卤水的最小深度，为此开展了地面瞬变电磁测量，采用中心回线装置，发射回线500 m×500 m。在打到卤水的WIPP12号孔，卤水的位置与瞬变电磁法一维反演的低阻层位置相当吻合。废料储藏场上的一维反演表明，卤水出现的最浅位置超过1050 m，对应于Bell Canyon组。

(3) 了解裂隙发育程度　为了保证核废料库的安全，必须了解盐层的裂隙发育程度。主要方法为井中电法（特别是无线电波法）和声波测井。

盐的电阻率高，电磁波传播的损耗小，无线电波法的探测距离大，夹层或裂隙的电阻率或介电常数与盐不同，这些都是应用无线电波法的有利条件。无线电波法包括透视和反射法，透视法测孔间信号的衰减，而反射法的发射和接收天线位于同一孔内，测电磁脉冲的走时和反射层的特征。

在德国北部的盐丘中所作的无线电波测量，反射法采用 20、40 MHz 两种频率，脉冲重复频率为 1000 Hz，探测距离分别为 300 和 600 m。将测得的走时换算成距离，通过偏移处理可得到反射面的位置。透视法的频率范围为 4～25.6 MHz，接收灵敏度优于 0.1 μV，测量时一个天线固定，另一天线在另一孔内移动，求出不同频率上总衰减与深度的关系曲线。测量以反射法为主，透视法为辅。均匀的盐不会产生明显反射，裂隙增多则反射亦增多。无裂隙的盐电阻率高、衰减小，多裂隙的盐则电阻率低、衰减大。总之，衰减小、反射少的盐体更适于储存核废料。

利用声波测井确定裂隙带的位置时可以利用不同的参数，如反射波幅度、声波速度和区间时间。

3. 深成结晶岩体选址和勘察中的地球物理工作

按照加拿大的设想，核废料拟储存于花岗岩质深成结晶岩体 500～1000 m 深度上类似于矿山的处理洞穴中。在深成结晶岩体的选址和勘察过程中，地球物理工作分为三个阶段，即场地筛选、场地评价和洞穴开挖过程中的勘察。

场地筛选　首先开展区域普查来筛选几个地区，作为候选的处理场地，每个地区的面积可达上千平方公里。在筛选过程中，了解深成岩体的形态和深度、周围地质环境、主要不连续面的位置和走向，盖层的特征、岩石的完整性等都是很重要的。由于场地筛选是区域性调查，涉及面积很大，所以要选用快速普查性的地球物理方法，尤其是航空地球物理方法。航空磁测曾被用来确定深成岩体的边界以及岩体中的岩石与构造界面，一般与航空磁测同时开展的航空 γ 能谱测量也可用于划分花岗岩体的边界，花岗岩体铀的含量可达 8×10^{-6}，而围岩往往低于 2×10^{-6}。航空电磁法用来填绘裂隙带在近地表的投影以及覆盖层的特征。湖区的裂隙带则采用船载声纳设备圈定。地面重力法曾用来确定深成岩体的形态和深度及其地质环境，岩石的完整性可以通过测量岩石的整体电阻率来评价，采用的方法有 MT、AMT、TEM 和直流电阻率法等。

在加拿大的 Lac du Bonnet 岩基上所作的航空磁测，航高 150 m，线距 300 m，岩基在磁场中表现明显，与地质上填绘的岩基边界吻合。磁场是由两种波长组成的，一种波长对应于岩基的主体，而短波由岩基内的小规模特征引起，如岩石的不均匀和裂隙。航磁线性体往往与广泛存在的构造形变的方向性、组分带状分布以及航空摄影线性体一致，说明航磁线性体反映了岩基的主要构造要素。

重力可以用来确定深成岩体的形态和深度。图 4—5 显示一条南北向跨过岩基的 39 km 长的重力剖面，图上包括实测和模型重力曲线以及根据当地常见岩石单元作出的解释剖面。与岩基有关的 100 g.u. 的重力低非常明显，叠加在重力低上的局部重力高很可能是由高密度的包裹体引起。

在岩基上还作过低空直升机电磁和甚低频测量，传感器高度 30 m，线距 100 m，其详

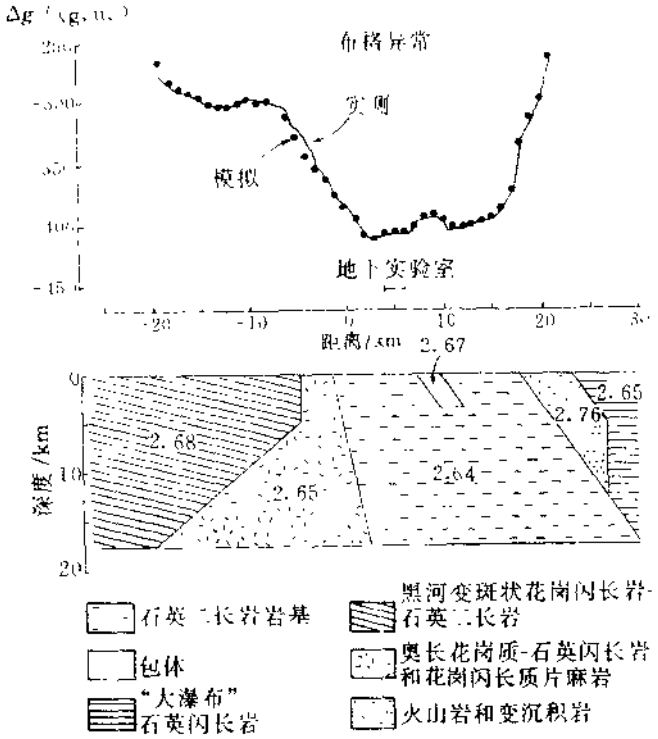


图 4-5　跨过岩基的一条南北向重力剖面和二维重力模型（右侧为北）

地质剖面中的数字表示密度（单位：$10^3\ kg \cdot m^{-3}$）

细程度可与地面测量相比。电磁测量采用吊舱装共面和共轴发射-接收线圈，相距约 7 m。在 900、4000 和 33000 Hz 频率上记录实、虚分量。陡倾近地表裂隙带可在共轴线圈的响应中得到反映。被盖层充填的谷地则可通过共面线圈数据反映出来。采用简单的二层模型来计算表层物质的电阻率，通过反演实、虚分量数据可算出盖层的厚度。

船载声纳系统工作频率 3.5 和 7.0 kHz，用于填绘湖底的线性体。除了水深数据外，该方法还可给出湖底粘土和淤泥的厚度。

场地评价　场地评价是在经过筛选的较小区域内进行更详细的调查。每个区域的面积可达 100 km^2，总的目标是圈定主要裂隙带、确定其几何形态，进行岩性填图并了解覆盖层的特征。

在 Lac du Bonnet 岩基的表面上，由缓倾和直立的两组裂隙带形成一系列不对称的谷地。如果其中充填良导盖层，就会形成明显的电阻率异常。在该岩基上作过甚低频和水平线圈电磁测量，根据导体不但可以确定裂隙带的位置，而且根据实、虚分量曲线的不对称性还可以大致估算裂隙带的倾斜方向。有的导体已被钻探证实为裂隙带引起。沿导体所作的地震折射法或电测深确定了盖层的厚度，这有助于磁模拟以及确定裂隙带的倾角。

鉴于磁模拟是多解的，磁场受谷地盖层厚度的影响很大，除了磁测之外，采用地质雷达可以更精确地显示裂隙带的倾角，地质雷达的缺点是探测深度只能达到 30～50 m。

为了进一步了解裂隙带的深部情况以及发现深埋的裂隙带（如几百米至上千米），曾试用过声频大地电磁法，但看来在几百米的深度上探测宽约 10 m 的裂隙带其分辨率还不够，而且地电断面也并非近似于水平层状。高分辨率地震反射法更能胜任这一任务。宽于地震波主波长 1/8 的目标可被探测到，例如在 P 波速度约 5500 m/s 的花岗质岩石中，如采用 150 Hz 左右的工作频率，就可以探测到 5 m 宽的裂隙带。但是要求探测离地表 1000 m 以内的反射体意味着有用的反射包含在地震记录的头 1 s 内，然而对高分辨率地震常用的炮检距来说，在这一时间段内也有地滚波到达，为了减小地滚波的影响，需要采用频率滤波、f-k 滤波、减小炸药量以保留信号的高频成分，并且选择适当的检波器距使地滚波在叠加时尽量减小。例如，在某研究区内炮点距和检波器距均取 17 m，将 100 g 的炸药放在 3 m 深基岩内的炮孔内。采用 48 道地震仪，数据取样间隔 0.25 ms，作 24 次叠加。主频约 100 Hz。

场地评价还包括了一系列井中物探和测井方法，其目的是了解岩性变化、圈定和查明裂隙带的特征，了解井液的盐度和流向。井中电视和声波电视提供井壁的光学和近光学图像，它们和岩心的裂隙录井一起确定裂隙带的位置。所有电测井和核测井，除了天然 γ 测井外，都明显显示裂隙带。在裂隙带以下井液电阻率立刻开始下降，这是因为裂隙带内的地下水盐度高。钻孔内 95%的岩心均为花岗质，但英云闪长岩、角闪岩和变沉积岩都偏镁铁质，因此在中子-中子和密度测井上有其特征响应。

物探方法如果能估算裂隙的水压渗透性，其作用就会明显增高，已经提出了三种途径：一是利用裂隙空间的电导率；二是利用裂隙内声波能量的损耗，三是利用地震波通过时钻孔对裂隙压缩的响应。

在岩基的钻孔内还开展过井间地震测量，频率范围 1～5 kHz，由于 P 波速度约 5500 m/s，分辨率可达 1 m 左右，在 100～350 m 的深度内形成了 600 条射线，圈定出一些非透明带，即裂隙带。在相距 140 m 的双孔内也作过井间雷达测量，中心频率为 22 MHz，取样点距 5 m，形成了 600 条射线，在两井之间发现了高衰减带，对应于裂隙带。在瑞典的 Stripa 计划中也采用了井中雷达和井中地震方法，并作了水力试验，以圈定裂隙带并研究其水力连通性。所用之雷达系统为 RAMAC 脉冲雷达系统，可作单双孔的衰减值和波速层析，其频率范围为 10～80 MHz，脉冲重复频率 42 kHz，峰值功率 500 W，探头直径 48 mm。裂隙水引起介电常数和电导率的局部变化，裂隙使岩石机械强度降低，因此雷达和地震波速度减小和雷达波衰减加大的部位反映裂隙密集区，两者的结果相当一致。

对于准备开挖的场地来说，层析方法的作用更大，因为在这样的地点钻孔的数目要控制在最低限度，以防在岩体中形成新的地下水通道。在花岗岩中，利用现有的设备，井间最大穿透距离为 500 m。

开挖阶段的勘察工作　一旦开挖储存核废料洞穴的工作开始以后，就需要了解洞穴周围岩体的水文地质和地质力学条件。虽然加拿大尚未正式开挖储存洞穴，但已经在地下实验室（URL）内作了数年的试验，它是在 Lac du Bonnet 岩基内挖的一个类似矿山的地下建筑，大部分试验是在地下 240 m 的深度上进行的，现已延深至地下 440 m。

由于本阶段研究的目标减小，所以要采用高分辨率，因而是高频的物探方法。雷达、超声波和声辐射方法都曾得到有效的运用。在地下实验室 240 m 的深度上曾采用雷达探测该深度以下 50 m 内的一个裂隙带，明显的雷达反射带与根据钻孔岩心确定的裂隙密集带十分吻合，为发现裂隙带还作过单孔雷达测量。

在竖井壁上打的水平钻孔内测量超声波P波和S波的波速，其中心频率在20 kHz左右，比在场地评价阶段高得多。波速是通过钻孔间直接透射的时间计算的。由于岩石的密度已知，也可计算出动力模量。当发射和接收机在竖井壁的成对钻孔内同步移动时，还可以确定开挖破坏带的厚度。根据P波和S波波速试验结果也确定了岩石的各向异性。

声辐射测量用于监测开挖的安全性，利用声辐射参数的变化来预测可能产生的岩爆并确定其位置。声辐射测量还用于追踪向裂隙带内灌浆的进程，这时在裂隙带附近的一系列钻孔内放置加速度计，在灌浆过程中记录的声辐射强度是同灌浆的进展相关的。

在地下实验室内所打的地下钻孔内也作了孔间地震层析，以圈定孔间的裂隙带。利用井间电磁层析可以了解裂隙带内灌浆前缘的推进，采用频率为180～190 MHz和380～390 MHz。在灌浆前后得出相对介电常数和绝对衰减值的层析图，并且逐像元地算出两者的差异。

总的来说，在深成结晶岩地区核废料处理场地选址和勘察工作中，地球物理方法既能快速而经济地做到对大片地区的地质构造进行全面的了解，又能对候选场地进行详细评价和勘察，下面以表格的形式将各个阶段的地球物理工作加以总结。

表4·8　深成结晶岩区核废料地质处理中的地球物理工作

研　究　目　标	采　用　方　法
第一阶段：场地筛选	
1. 确定深成岩体边界，三维填图	航磁、航空γ能谱、重力
2. 研究深成岩体内的构造	航磁、航空电磁、声纳
3. 了解岩石完整性	大地电磁、声频大地电磁、其它电法
4. 研究盖层特征	航空电磁
5. 岩性划分	航磁
第二阶段：场地评价	
1. 普查近地表裂隙	甚低频、水平线圈电磁、地面磁测
2. 详查近地表裂隙	雷达
3. 岩性划分	地面磁测、γ和密度测井
4. 了解盖层特征	电法、地震折射
5. 发现深埋裂隙	地震反射
6. 探测孔内裂隙	电阻率、声波、井径、密度、孔隙度、温度、雷达、甚低频、管波测井
7. 探测孔间裂隙	地震和雷达层析
8. 估算裂隙导水性	全波声测井、管波测井
9. 液流测量	液体电阻率、温度、流量测井
第三阶段：开挖过程中的勘察	
1. 计算动力模量	用超声波测V_P和V_S或声辐射测量
2. 探测破坏带厚度	用超声波测V_P和V_S
3. 探测裂隙	雷达剖面测量、地震和雷达层析
4. 灌浆追踪	声辐射测量
5. 开挖安全性研究	声辐射测量

在各个阶段的工作中，除地球物理方法外，必须综合应用其它地学方法，尤其是水文地质、地球化学、地质和岩石力学方法。由于地球物理方法在解释上的多解性，必须通过钻探来验证其解释的正确与否。

第二节　地下水和地表水污染的监测与治理

据环境保护部门1989年的统计，我国主要水系受工业废水排放的影响，平均污径比达到了1%，最高的水系已近10%，见表4-9。

表4—9　我国主要水系纳污状况

水　　系	多年平均径流量/ ($10^8 m^3 \cdot a^{-1}$)	工业废水排放量/ ($10^8 m^3 \cdot a^{-1}$)	污径比/ ($m^3 \cdot m^{-3}$)
松花江水系	1192.1	15.115	0.0127
辽河水系	486.2	11.354	0.0234
海河水系	291.8	28.216	0.0967
黄河水系	687.5	14.614	0.0213
淮河水系	766.5	11.941	0.0156
长江水系	10800.0	157.968	0.0146
浙闽水系	2001.0	6.062	0.0030
珠江水系	4738.6	26.123	0.0055
西南水系	4684.4	5.702	0.0012
内陆水系	1115.5	0.913	0.0008

许多城区地下水也受到污染，比较严重的有包头、长春、郑州、鞍山、太原、沈阳、哈尔滨、北京、西安、天津、石家庄、兰州、乌鲁木齐、上海、无锡、杭州、合肥、武汉、广州等，每年由于地下水污染全国损失434亿元。

在地下水和地表水污染的监测和治理工作中，地球物理方法可以发挥重要作用，尤其是各种电（磁）法。

一、无机污染的监测

被无机盐污染的水，由于离子浓度增高，使其电阻率降低。一般来说，地下电阻率与介质孔隙的连通性、孔隙中是否有液体以及液体的电阻率有关。如果孔隙的大小和连通性基本不变，而液体的电阻率只和污染有关，用电法就可以确定污染的范围和程度，通过电测深和时间域电磁法可以确定污染的垂直分布，而通过电剖面法和频率域电磁法可以确定污染的横向范围，用电（磁）测量比只用钻探成本低、效率高。此外，电（磁）测井也是一种辅助手段。

应用地面电测监测污染的基本条件是：污染水与非污染水电阻率有明显差别，埋藏不太深，污染水体有一定的厚度，地表物质电性比较均匀。工作时可先用电测深或时域电磁法确定污染水体顶底板深度，然后按一定系统进行固定极距的电剖面或固定装置和频率的频域电磁测量。电测一般都要与少量监测井互相配合。不同岩性的电阻率变化会形成对污染监测的干扰，因此在解释时要注意利用地质、钻探和其它地球物理资料。

对工矿废水污染的监测是受到广泛关注的问题。利用地球物理方法对工矿废水进行污染监测有许多成功的实例。

美国威斯康星州索克维尔烟尘堆积场原来是一个砂砾开采场，从1970年以后威斯康星电力公司用它来堆积发电厂的烟尘。该地地表为不分层的冰碛物，厚度由20 ft至100 ft（6.1～30.5 m），基岩为白云岩。从1974～1980年在堆有烟尘和尚未堆积的地段共打了33个监测井，为了对地下水的污染情况进行全面的了解，开展了电测深。在有监测井的地方都布有测深点，以便把地电剖面同地质剖面相关起来，测线大致垂直地下水的流向，测线距离60 ft（18.3 m），供电电极距由1 ft（0.3 m）逐次加大到200 ft（61 m）。电测深与采集水样同时进行，即每月一次，这样能准确知道潜水面深度、水温和电导率，以便确定电阻率变化与水质的关系。电阻率也会因不同季节土壤含水量和温度的变化而变化，这会掩盖水质的变化，为解决这一问题，对砂、砾和粘土样品与温度和含水量的关系进行了室内测定，以便在对电测深资料进行解释前消除这些因素的影响。图4—6为一条测线的地电断面图（a）及根据它得出的水质断面图（b）。由此可以看出用电测深资料可定时地监测污染的范围随时间的变化，它所提供的水质断面图比只靠少量监测井要详细得多。

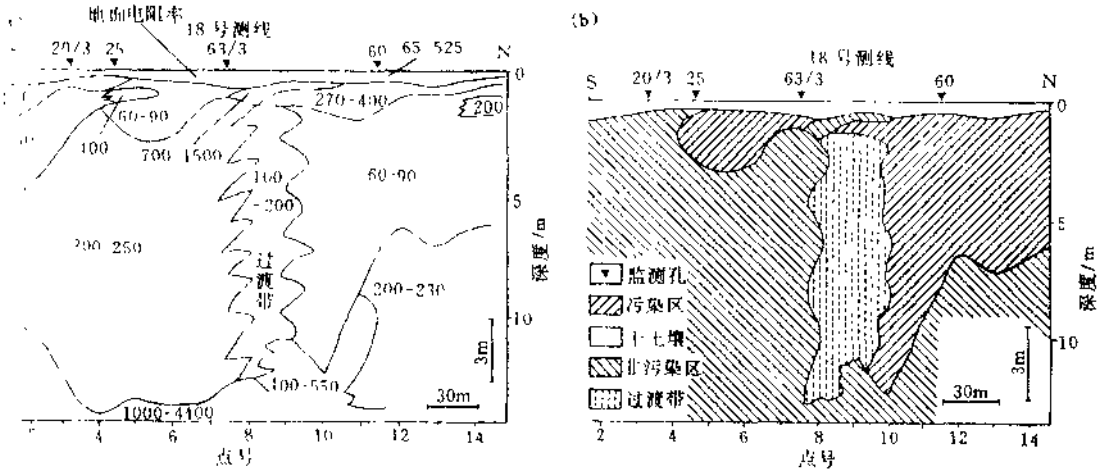


图4－6

（a）一条测线上根据13个测深点数据建立的地电断面；（b）根据地电断面作出的水质断面图
电阻率单位为Ω·m，垂直比例尺比水平比例尺大12倍

工厂的废水排入地下，不仅污染水源，而且在某些地区还加速地下岩溶的发育过程。例如，在俄国的奥卡河沿岸有一个大的化工厂生产硫酸，酸性废水渗入地下，溶蚀了石膏质的岩石，在这些岩石中形成了岩溶洞穴，老洞穴不断加大、新洞穴不断出现，连接成地下通道，沿这些通道，溶解的物质流入奥卡河，造成河水污染。通过地面电测和河水电阻率测量可以圈定岩溶水的通道位置并且评价岩溶作用随时间的发展。从图4—7中t_1和t_2两次观测的视电阻率曲线可以看出电阻率低的加宽，是溶洞加宽的结果。河水电阻率测量表明，被溶解物质的流入量明显增加（电阻率低面积扩大）。通过上述测量确定了废水污染的范围和程度，以便采取必要的措施。

在葡萄牙西北的埃斯塔雷亚化工联合企业，废水通过渠道排入6 km外的泻湖，其它废

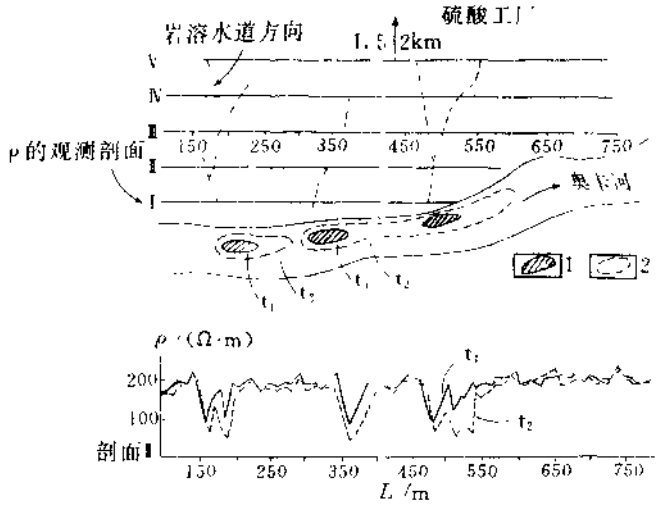


图 4—7 用电法监测工厂废水对岩溶的加速作用

图上部：1—t_1 时的电阻率低范围；2—t_2 时的电阻率低范围。

图下部：t_1、t_2 表示不同时间所测的视电阻率曲线

料则贮存在附近的人工池内。该地近代风成沙覆盖着泻湖淤泥，下面为薄层第四系沉积，再往下为白垩纪沉积直接覆盖在前寒武系片岩上。共有两个含水层，上层在风成沙内，与渠道内的废水直接接触，下层在第四系沉积的底部。上层水在化工企业附近有严重污染，下层水在西面有咸水侵入，在化工企业附近也受到污染，这在钻孔的水样中有所显示。所作物探工作用于确定污染水的分布和地质控制因素。电磁填图先采用 10 m 线圈距测水平磁场，其探测深度对应于上含水层，然后用 20 m 线圈距测垂直磁场，探测深度对应于下含水层，结果表明上层水污染区电阻率低达 20 Ω·m，发育于企业的西南侧。下层水污染区的电阻率低至 10 Ω·m。此次电磁测量结果与 70 年代所作电测深加以对比，确定了污染随时间的发展。电阻率-深度断面与钻孔控制资料大体吻合，在化工企业附近及西南侧电阻率低于 5 Ω·m 的地方，水样 pH=4，Fe 625×10^{-9}，Cu 834×10^{-9}，Pb 111×10^{-9}，Zn 2848×10^{-9}，Mn 710×10^{-9}等，而在电阻率超过 200 Ω·m 的非污染区，上述金属浓度要低几至几十倍。地震折射结果表明，第四系沉积的波速 1.6～1.8 km/s，白垩系沉积 2.2～2.3 km/s，前寒武纪片岩 2.8～3.4 km/s，利用折射法可圈出片岩面的局部构造，后者控制下含水层污染的横向范围。

矿山和油田废水也是地下水和地表水的重要污染源，例如美国全国有成千上万口已废弃的但封得不好的油气井，当由于二次回采而使产油层产生过压时，这些井会使注入的油田卤水沿钻孔向上运移而进入浅部用作饮水的含水层。在俄克拉荷马州林肯县产油的普鲁砂层附近曾利用可控源声频大地电磁法（CSAMT）来圈定卤水的污染。从本世纪 30 年代就开始从普鲁砂层采油，从 50 年代开始注入卤水来提高回采率。瓦穆萨组是该区饮水的主要水源层，淡水层的底部深度变化于 40～135 m 之间，固溶物总量低于 500 mg/L。1979 年所打的试验井表明在油田上含水层的卤水含量异常高。在该区选出的一些部位按一定网格开展了 CSAMT 测量，图 4—8 示出一口废井附近典型的视电阻率拟剖面，它表明深部的良

导物质朝地表运移，其它一些测线上也测到另外一些污染体。根据物探结果所打的两口试验井的 Br/Cl 比值表明，瓦穆萨组的污染源确实是普鲁砂层的卤水。

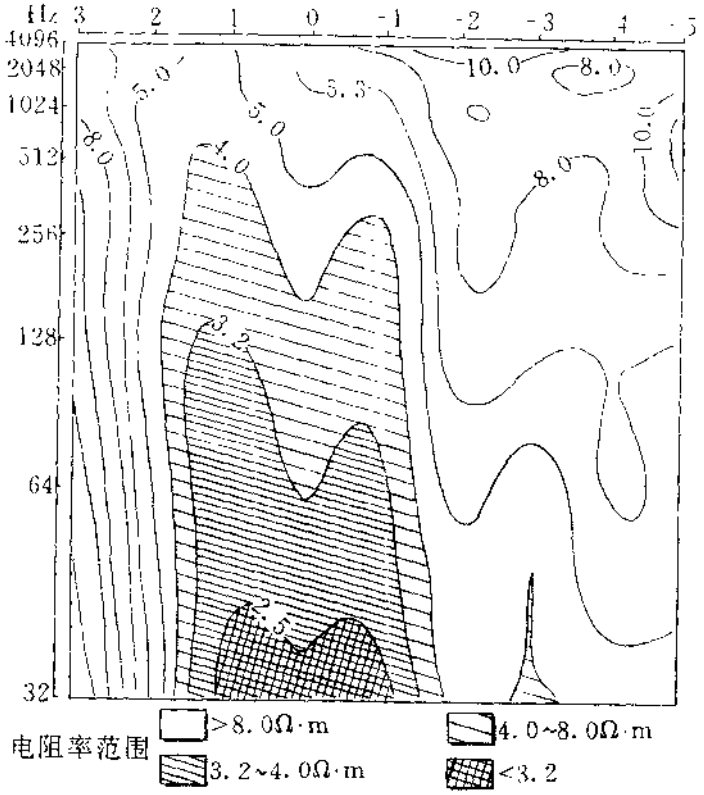


图 4—8　废注水井附近的视电阻率数据

直升机电磁测量也成功地用于调查矿山废水的污染范围。德国威悉河含有大量的卤水通过不莱梅市，卤水是由上游的几个钾盐矿山排放的，它使河水电阻率降低到<6 Ω·m。航空电磁测量追索到电阻率低于 6 Ω·m 的污染区，异常的范围远远超出河床本身，说明卤水已侧向侵入沿河的浅部含水层，而该含水层是为城市供水的。为了验证航电的结果，又对浅部含水层进行了钻探取样和分析。打了很多钻孔，花了两年时间，而航电测量只花了两天时间，令人吃惊的是，两种方法所得到的结果完全一样。

二、有机污染的监测

探测有机污染是一个新的课题，仅在北美治理含水层有机污染的费用就高达几十亿美元。用地球物理方法探测有机污染比探测无机污染要复杂，总的来说还处在试验阶段。

90 年代加拿大滑铁卢大学、美国科罗拉多州立大学等单位在波音公司、通用电器公司等资助下，在加拿大安大略省的 Borden 基地开展一项实验，研究主要对象是乙烯 (C_2Cl_4)。它用于服装干洗和金属清洗，仅 1986 年美国就生产乙烯 12×10^6 L。乙烯的特点是比重大（1623 kg/m³），在水中下沉，不太受地下水横向流动的影响。虽然乙烯的溶解度低（200 mg/L），但这仍然比世界卫生组织规定的饮水标准（0.01 mg/L）高几个数量级，每排放 1 L 乙烯最终可污染 1000×10^4 L 的地下水。实验场地面积 9 m×9 m，周围用钢板打入地下，穿

过 3.3 m 厚的地表含水层进入下伏半隔水层，有效地隔断场地内外的水力联系。通过钻孔向场地内注入 770 L 乙烯，在围绕注入孔的 9 个监测孔内进行中子、密度和感应测井，还定期测地面和井地电阻率。地面雷达工作频率 200、300、500、900 MHz，沿测线进行测量。地球物理监测开始于注液前几天，注液延续了 72 h，注液后观测 912 h，第 1 个星期每 8 h 观测一次，以后放稀。随后采用表面活化剂清除乙烯，再监测清除的过程。在中子测井曲线上，由于氯俘获中子，出现明显的负峰（图 4 9 (a)），从电阻率异常的变化上则可以看出乙烯随时间的运移（图 4 9 (b)）。雷达测量表明，注入的乙烯先在注入点下 1 m 深左右的界面上汇聚，形成随时间愈益明显的反射，然后沿该界面向两侧扩散。

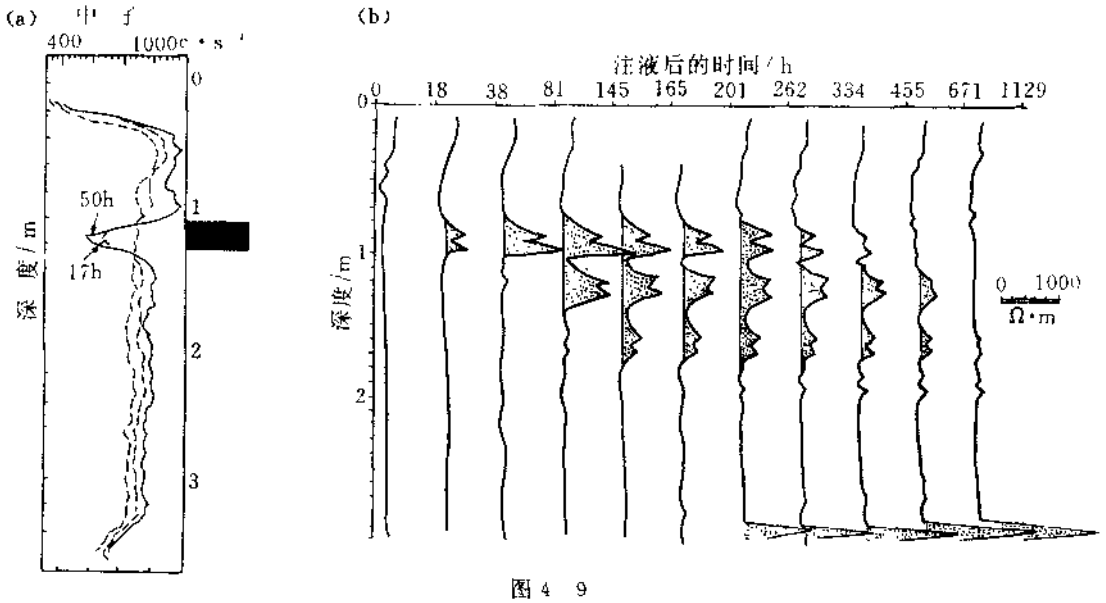


图 4 9

(a) 注入乙烯后不同时间的中子测井曲线；(b) 注乙烯后电阻率随时间的变化

其它不溶于水的有机污染物，如四氯乙烯（全氯乙烯，PCE），一种比重大于水的非水相液体（DNAPL）干洗剂，以及甲苯，一种比重小于水的非水相液体（LNAPL），都可以用地质雷达探测。最好的办法是通过不同时间的反复测量来查明它们的运移。在粘土含量较高的土壤中，地质雷达的探测深度很小，这时甲苯可以用复电阻率法探测出来，据认为在粘土矿物的表面上甲苯通过电化学聚合而成为二苯基，这种聚合反应可以通过电阻率随频率的变化而观测到，对于其它碳氢化合物和有机污染物也可以观测到类似的反应。芬兰地质调查所的实验表明，在粘土成分很少的冰碛物分布区，复电阻率法同样适用，当污染物为甲苯时，在 0.1 和 10 Hz 频率上，相位异常为负，在 100 Hz 上相位异常为正；当污染物为乙二醇时，在所有频率上相位异常为负，但在 10 Hz 以下异常弱，而大于 10 Hz 时较强。

利用地质雷达探测有机污染物的可能性主要取决于它们的相对介电常数，如果它们与周围介质的介电常数有明显差异，就可以形成反射。实验室测定的常见有机污染物介电常数值见表 4 -10。

石油污染颇为常见，已有许多利用地质雷达探测石油污染的实例。例如，在美国印地安纳州北部的一个油库，石油污染区上电磁波幅度出现明显的降低，接收信号幅度下降的确切原因尚不清楚，但可能的解释有，在潜水面以上石油呈分散的不均匀分布，使电磁波

表 4--10　常见有机液体的相对介电常数

有机液体名称	电磁波频率 /Hz				
	1×10^6	2×10^7	1×10^8	3×10^8	3×10^9
甲　醇	31	31	31	30.9	23.9
乙　醇	24.3	24.3	23.7	22.3	6.5
乙　烯	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17
四氯乙烯	2.28	2.28	—		2.28
航空汽油			—	1.95	1.94
煤　油		—	—		2.09

生散射。而且，信号衰减是在充气带内观测到的，可以推测汽化的石油也会引起电磁波的衰减，在雷达记录上形成一种“晕”效应。后来，在此处打的监测井证实了潜水面的位置和石油的聚集部位。在明尼苏达州也得到同样的结果，该处用地质雷达探测石油管线的泄漏，浮在潜水面上的石油使反射电磁波的幅度明显降低（图 4　10）。

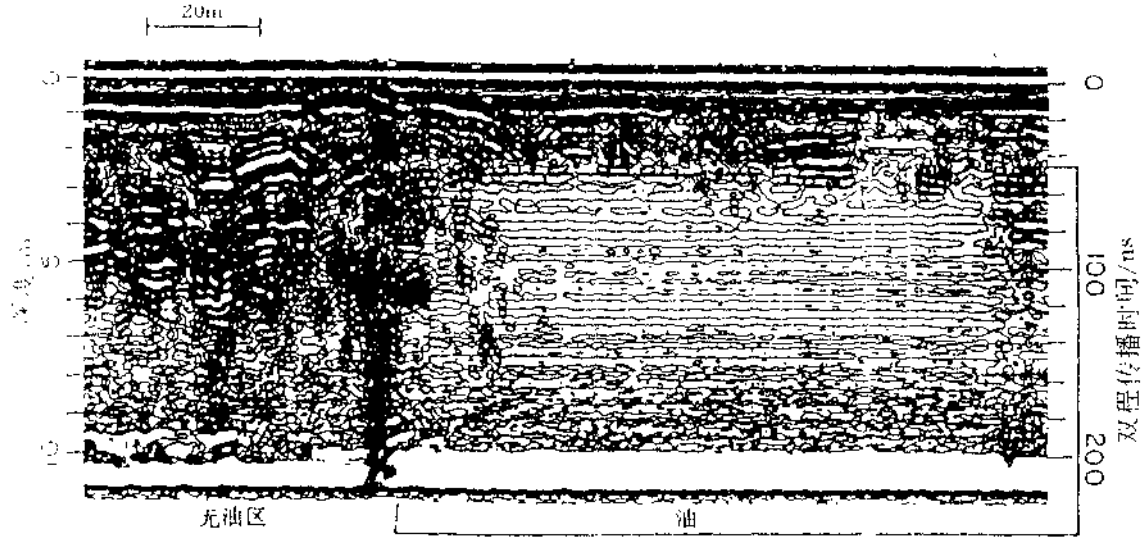


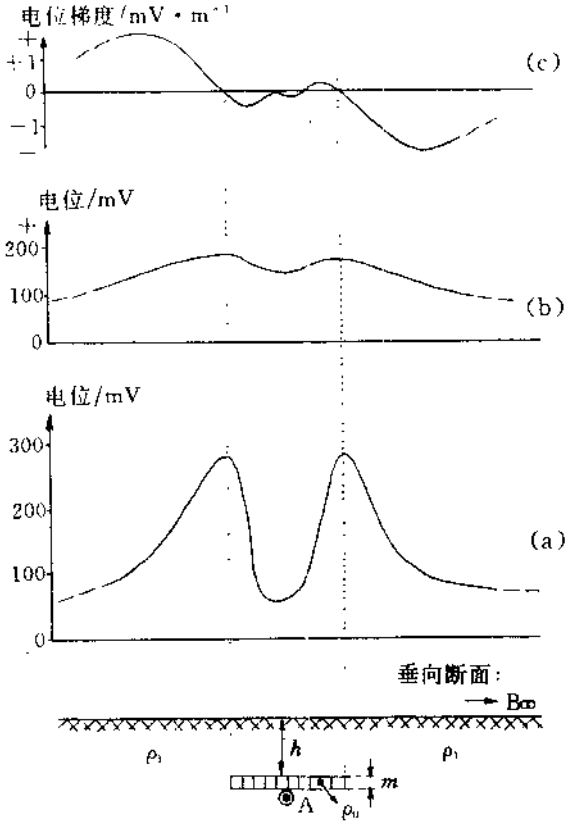
图 4--10　石油管线泄漏区上的地质雷达记录
（中心频率 80 MHz）

美国杨百翰大学利用地质雷达在亚利桑那州的 Tuba 城附近监测地下汽油罐漏油造成的土壤和地下水污染，调查是分三个阶段进行的。第一阶段用雷达圈出污染区，协助确定监测井位；第二阶段打监测井，取土样和水样分析油含量，测量井中水位，确定水力梯度和水流方向；第三阶段对比雷达和土样、水样化学分析数据，以便确切了解污染的范围和程度，水力梯度和流向资料也有助于确定污染的范围。与上述实例不同的是，这里雷达剖面上反射的增强部位对应于漏油处，这种不同可能是由于在上面的例子中石油污染出现在潜水面之上，而此处除部分油浮于潜水面上以外，另一部分则分布于潜水面下方的饱水沉

积中，研究人员认为是高阻的石油污染液体使雷达信号衰减变小。在石油污染的部位潜水面的反射也变得模糊不清。

利用常规的直流电法和电磁法也有可能探测石油污染，石油进入地下介质的孔隙系统后可使其电阻率明显增高。目前正在研究利用地面低频电磁或电阻率成像方法追索几十至几百米深处的石油污染，例如偏移电磁测井（Offset EM logging）将发射回线置于井口附近的地面上，接收线圈放入井中，或者将接收线圈放在地面离井口一段距离上，而将发射线圈放入井内。一个成功的实例是在美国俄克拉荷马城的 Carlswell 空军基地，利用钻孔 EM 测量数据作出地下电阻率三维分布图像，推断出石油污染的位置，据此所打的钻孔证实了高阻区与油的污染吻合。

浮在潜水面上的高阻油层对电法测量来说会产生屏蔽作用，据此有人提出了“屏蔽体”法（SB）。屏蔽体法是一种井地电法，一个供电电极置于污染层之下，用于确定污染层的范围。室内模拟和数学模拟的结果见图 4—11。室内模拟在电解质槽内进行，数学模拟采用有限元法。在野外试验中采用了电测深和屏蔽法两种方法，其目的是确定石油污染的范



A、*B*∞ 供电电极
□□□ 深 *h*、厚 *m* 的污染带

图 4—11 屏蔽体法的室内实验和数学模拟结果

(a) 室内测得石油污染带上的电位值 V (mV)；(b) 数学模拟计算的电位值 V (mV)；(c) 数学模拟计算的电位梯度 ΔV (mV/m)。室内实验的 $\rho_1=33\ \Omega\cdot m$，$\rho_0\to\infty\ \Omega\cdot m$，$m/h=0.1$；数学模拟的 $\rho_1=1\ \Omega\cdot m$，$\rho_0=10000\ \Omega\cdot m$，$m/h=0.1$

围，污染层厚度 0.2 m，深 5.7 m，赋存于 7 m 厚的第四系砾-砂沉积中、下伏不渗透的白垩系沉积。电测深 $AB/2$ 最大为 50 m，在 $AB/2=15$ m 时沿一些测线出现了电阻率的升高，为污染带的响应，但最高异常值仅达背景值的 15%，难于断定污染带的横向范围，而屏蔽法显示污染带的范围比电测深要清晰得多，地球物理野外测量结果已被监测孔证实。

不过，最近澳大利亚 Coffey Partners 公司则提出，用地质雷达和低频电磁法探测石油污染均较困难，只有频率在 30 kHz 至 5 MHz 的电磁波法效果最好。当频率为 1.2 MHz 时，通过土壤和风化岩石的最大探测深度约 30 m。在南澳的一个大型柴油机车加油站发现油量库存记录和实际消耗量在两年之内相差 50×10^4 L，后来对埋藏输油管的压力测试表明，在终端泵站和加油点之间有明显漏油。开始用 EM 31 电磁仪作剖面测量和地质雷达探测均未奏效，后来改用 GRC-2 仪器作无线电波剖面法，其垂直发射线圈和水平接收线圈沿剖面移动，两者保持零耦合状态，测量垂直磁场强度 Hz，线圈距在工作期间保持不变。结果在柴油污染范围内测出明显 Hz 低值异常，并经钻探和槽探证实。

以上情况说明，对有机污染的地球物理探测方法及其应用条件尚需做深入系统的研究。

三、井中多个含水层之间交叉污染的监测

已经废弃的工业用和供水用井，以及一些设计得不适当的监测井穿过多个含水带，使得地下水流系统“短路”。如果其中有的含水层已被污染，便会产生水层之间的交叉污染。

美国地质调查所和美国环境保护署合作在宾夕法尼亚州东南部三叠纪斯托克顿组地层中用物探方法研究了废弃井中多个含水层之间的交叉污染，测量了井内的垂向水流，取样并分析了井中的液体。所使用的物探方法包括井径测井、液体电阻率测井、液体温度测井、自然伽马测井和单点电阻测井。在 16 个钻孔的 45～143 m 之间进行，用以划分岩性、地层，圈定含水裂隙和确定井液垂向运移带，测量垂向液流是为了确定井液运移的方向和速度。

井径测井有助于岩性、地层对比，识别裂隙和可能存在的含水洞穴，并用于其他测井结果的定性井径校正。井液电阻率测井反映了井液固溶物的含量，用于识别出水带和受水带。出水带和受水带都会引起电阻率的突变，而通过出水带和受水带之间电阻率梯度低又可确定井液垂向流动区间。温度测井用来识别出水带和受水带以及井中垂向液流的区间。在没有垂向液流的井中，在井孔上部液体温度随深度降低，而在井孔下部则随着地温梯度升高。在垂向液流区间温度梯度很小或等于零。天然伽马测井用于岩性、地层对比。单点电阻测井用于充液的孔内，测量井中电极和地面电极之间的电阻，可作岩性、地层对比并有助于圈定含水带。

斯托克顿组是一个多含水层系统，粉砂岩-泥岩相对于砂岩来说是隔水层，但在粉砂岩、泥岩和砂岩中均有含水裂隙，每个含水裂隙或裂隙带一般具有不同的水头，当钻孔穿过一个以上含水带时，水将向低水头的方向流动。出水带和受水带可根据井径、单点电阻、液体电阻率和液体温度测井识别，井液流动的方向和速度可以通过在孔内特定深度上注入一股良导液体，然后用液体电阻率探头监测液体的流动，在口径 152 mm 的钻孔中，测量的下限是 2.273 L/min。在 15 个钻孔的不同深度上注入了良导液体，在 13 个钻孔中测到以每分钟达 27.276 L 的速度向下移动的液流，只是在两个钻孔中液流不明显。总的来说，液流向下，由含水层系统上部粉砂岩-泥岩和砂岩中的裂隙，流向含水层下部砂岩中的裂隙。在确定井中液流区间以后，从选择的深度上取了流动液体样进行分析，分析挥发性有机化合物。所有取样的 9 个钻孔中的流动液体样都含有可观浓度的挥发性有机化合物，证实了交叉污

染的存在，其中三氯乙烯浓度高达 5800 μg/L。

因此，地球物理测井可以指导监测井的设计和施工，出水带和受水带之间不应由裸孔连通，以免产生交叉污染。例如，在 MG-11.4 孔中利用测井来确定放置封隔器的深度，以便分带取样分析，在浅带（潜水面至地面下 22.9 m）三氯乙烯浓度达 11000 μg/L，而中带（22.9 ～29.0 m）和深带（38.1 ～45.1 m）分别为 530 μg/L 和 1100 μg/L。据此对 MG-1114 加以改装，使其只在地下 42～49 m 以下裸露，这样就消除了浅部污染水产出带和深部受水带之间的交叉污染。

总之，地球物理测井，井中垂向液流测量和井中流动液体的取样和分析结合起来是识别地下水交叉污染的有效方法。

四、地表水和地下水污染治理防护中的地球物理工作

1. 地表水污染治理工作

在杭州西湖换水过程中曾经成功地应用了地球物理方法。杭州西湖是闻名中外的旅游景点，过去它是一个封闭型的内陆湖泊，由于常年污染，湖水的水质和透明度日益变差。市政府决定开凿隧道引钱塘江水更换西湖湖水。为了解江水进入西湖的运移和分布情况、换水的进度和效果，浙江省地矿厅物化探大队用电阻率法在换水过程中及其前后进行了动态和静态观测。

在换水之前对江水和湖水的电阻率进行了测量，江水的电阻率变化范围为 81～93 Ω·m，平均 88 Ω·m。西湖由五个相互连通的湖泊组成，其中电阻率最低的变化范围为 55～60 Ω·m，平均 57 Ω·m，最高的变化范围 69.5～75 Ω·m，平均 72 Ω·m。这是利用电阻率法监测换水过程的基础。

水电阻率观测比例尺为 1∶5000，线距 200～400 m，整个湖面均匀分布 20 条测线。观测仪器为测井全自动记录仪，安装在电瓶驱动船上，用七心电缆连接电源，探测器和自动记录仪。探测器为井液流体电极系，固定在水深约 70 cm 处，换水期间每天沿各测线连续探测水的电阻率一次。

根据观测结果，可以得出江水进入西湖后逐日的扩散范围、水流的主要方向（即电阻率高的长轴方向），指导了换水工作的进行（图 4—12）。同时发现了一些原来未发现的污染源。

2. 地下水污染治理工作

地球物理方法也可用来监测有机化合物污染的治理过程。美国能源部执行了一项“非干旱区土壤和地下水易挥发有机化合物综合示范计划”（VOCNAS），向地下注入甲烷与空气的混合物，作为新陈代谢的碳源，以繁殖一种微生物，使三氯乙烯降解。混合物注入地下后，在运移的途径上，由于置换了地层水，使电阻率升高，因而可以通过地下（井间）电阻率层析使运移的途径成像。电阻率层析是在 5 个钻孔之间进行的，每一孔内有 21 个电极，从地面到 61 m 深度等距分布，两孔之间的地面有 4 个电极。图像是采用迭代重建算法做出的，该算法基于有限元正演模型和牛顿最小二乘极小化。地下电阻率分布的时间变化，采用逐像元地将治理前和治理过程中某一瞬间的电阻率相减的办法成像，这一差分层析图去掉了岩层电阻率的静态特征，只显示由治理过程引起的动态特征。结果发现，注入气体流动途径为复杂的三维通道网，有些通道延伸到距注入井 30 m 以外，这些通道在几个月过程中并不稳定，不断有新通道出现，气体注入通道的电阻率随时间而增大。

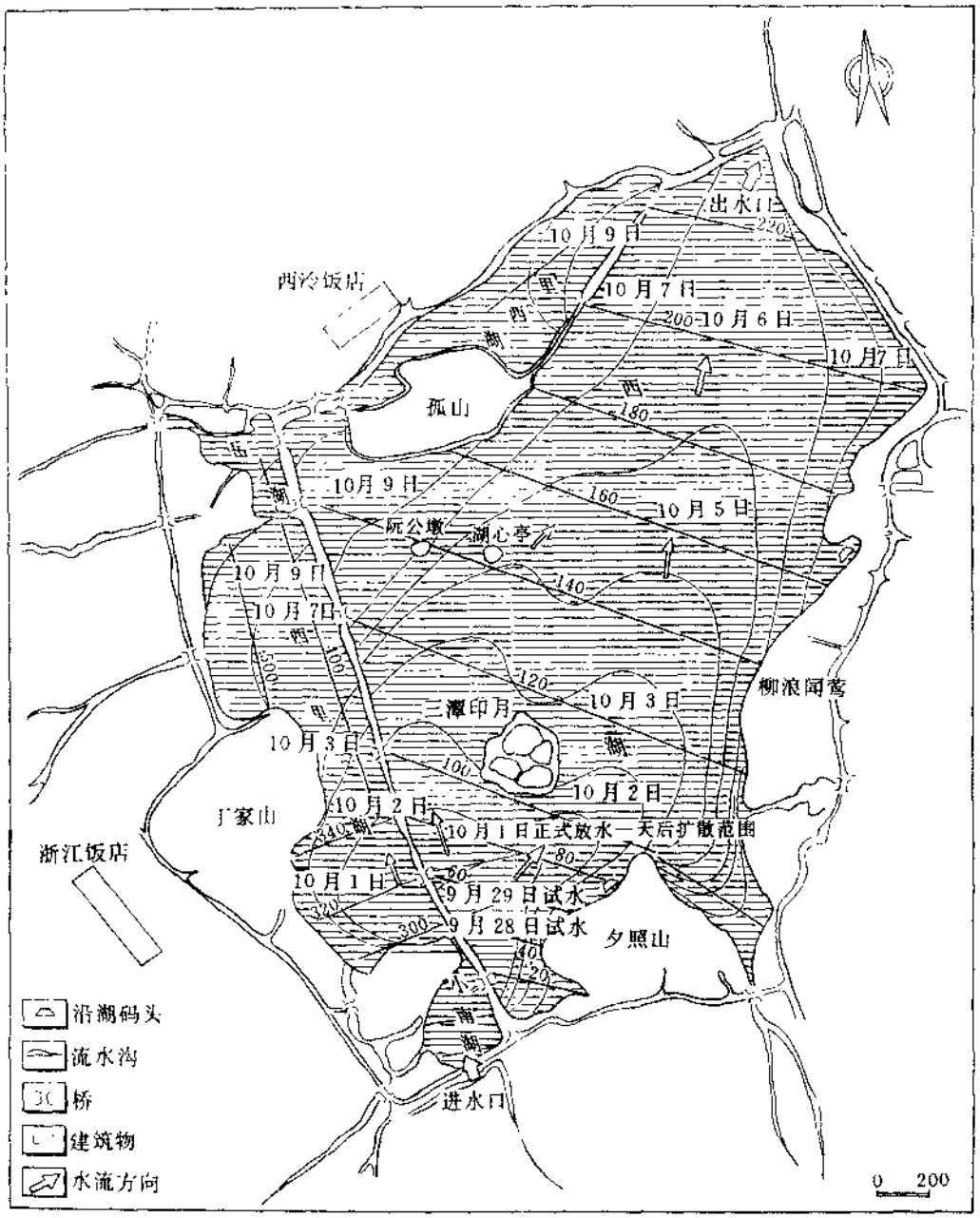


图 4－12　西湖初次换水混合流推进图

对微生物繁殖有影响的其它因素还包括大气降水和来自地表的水溶养分。所以，在另一组试验中，水从地面渗入地下并作出渗入前和渗入过程中某一瞬间电阻率差值的图像，这些图像表明，水的入渗也是限于具有三维结构的狭窄通道，水流受地层渗透率变化（砂和泥的分布）的控制，不过水流通道随时间的变化小。这些通道在图像上表现为低阻带。

美国桑迪亚国家实验室提出一种不尽相同的治理方案，并在南卡罗莱纳州的一个场地

作了试验。该场地也被挥发性的三氯乙烯和四氯乙烯污染。为了治理污染，打了两口水平井，由潜水面以下的井注入空气，而由上面的另一口井抽取污染物——当空气通过地下孔隙时溶解挥发性污染物，再被上面的井抽出。空气在地下的分布会直接影响治理的范围并且影响如何对注入气流进行调节。因此，桑迪亚实验室利用监测井井间地震数据，根据注入气体饱和度变化引起的地震波速变化了解空气的分布。为了尽可能提高分辨率，选用了井间层析成像方法，既减少了近地表噪声的影响及与近地表物质有关的衰减，又使震源和检波器更接近目标，减少高频波的能量损耗，高频波由于波长短而具有更高的空间分辨率。为此，在空气注入前后都作了S波和P波层析。S波震源为频率扫描气动可控震源，检波器为井中三分量检波器。震源和检波孔相距17.4 m，孔内测点垂向距离1 m。

3. 地下水污染防护工作

为了防止工业废料污染地下水，常见的做法是将其放在贮存池内，池底铺有防渗层。为了检查防渗层的施工质量以及监测随时间的推移防渗层可能出现的泄漏，有些企业已经在建造贮存池之前在池下预先布设电极阵列，以便进行监测。

1988年南加州爱迪生公司在内华达的莫哈维发电厂一个大型蒸发池下布置了电阻率监测系统，以通过电阻率的变化来监测渗漏。该蒸发池已经用了10年，在发现渗漏后重新衬砌时安装了监测系统。在重新启用之前先做了背景电阻率测量，以后每季度测量一次并与背景相比较。

该电阻率监测系统是由63对电极组成的阵列，按正方形网格分布，电级水平距91.4 m (300 ft)，电极埋藏深度至少15 m，有22对电极在池的正下方。每对电极由上下两个电极组成，下面的是供电电极，上面是测量电极，供电电极在下是为了避免测量电极的极化。这种单极-单极装置相应具有无穷远供电电极和测量电极。不过有人认为单极-偶极装置对渗漏更为灵敏，因为它测的是电位梯度，而非电位本身。电极由3 m长、2.5 cm口径的聚乙烯管和包在上面的两块1.6 mm厚的铅片组成，上、下两块铅片分别用作测量和供电电极，电线通过聚乙烯管引向地面，供电电流为频率1 Hz、150～300 mA的方波，供电利用阵列中的一个电极，而在其余的电极上测量电位，而无穷远电极则用作供电和测量的回路。每个季度一次的监测已作了两年半，与背景值相比电阻率变化不超过2%，这说明贮存池未发生渗漏，监测系统的工作也是稳定的。

捷克的一家发电厂也进行过类似的监测，他们为了检查粉煤灰堆放池的施工质量，在未敷设防渗层之前先在池底埋设若干条平行长导线作为检测用的供电电极，然后在其上敷设防渗层。施工结束后向池内放水，将设置在防渗层下的长导线作为供电线路的一个极，另外一个极置于无穷远，在小船上用单电位电极（另一电极置于无穷远）进行测量，在池边用经纬仪测量定位。如果测到高电位异常，即为防渗层破漏处，发现率为94%。

第三节　地下固体废料污染的监测和治理

一、固体废料污染的监测

许多原有的固体废料处理场地，后来停止使用，就地掩埋。现在从环境调查和治理的角度，需要了解其确切范围和污染状况。还有一些已关闭的工矿企业，它们的地下废弃物，尤其是一些有害、有毒废弃物，都需要加以治理。如果当地准备上新的工程，更需要将地

下废弃物的情况查明。这里地球物理工作的任务包括：①确定废料堆的平面和深度范围；②圈定废料堆中的较大型物体，如空罐、盛废料的容器等；③测定污染的范围和控制污染的地质构造或人工构筑物；④评价地下水的状况。常用的地球物理方法有电（磁）法、磁法、地质雷达等。不同方法的用途不同，可按表 4 -11 选择。下面按不同的方法加以介绍。

表 4 11 探测固体废料埋藏场地的地球物理方法的选择

地球物理方法	探测目标							
	位置	范围	上隔离层	下隔离层	堆积厚度	单个物体	渗漏通道	污染范围
磁测	+	—	—	-	—	+	—	—
电剖面法	+	+	+		—	—	+	+
电测深法	*	*	+	+	+	—	*	+
激发极化法	*	*	—		*	*	*	*
自然电场法	*	*	—		—	*	*	*
电磁法（频域、时域、甚低频）	+	+	*	*	+	+	*	+
地质雷达	*	+	+	—	—	+	—	-
地震折射法	*	*	—	+	+	-	+	+
地震反射法	—	—	—	*	*	—	*	+

注：+表示适用，*表示用途有限，—表示不适用。

1. 磁法

生活垃圾和工业废料中往往含有铁磁性物质，许多工业废料又常常装在铁质容器中埋藏，这是使用磁法探测地下固体废料的前提。

过去有毒废料经常非法倾倒，并且没有人去记录它的准确位置。这些废料会对人体造成潜在的威胁，现在需要清除，要查明位置。如果采用机械或人工挖掘的办法来寻找，会将废料容器破坏造成泄漏，而且工作效率也很低。在爱尔兰的基尔代尔郡有一个非法的有毒废料处理场，据估计有 180000 m^3 废料，含有氰化物、砷、汞、钾、铅、磷等，大多数废料装在金属筒中，因此有可能被磁测发现。结果金属筒根据变化剧烈的高频磁场特征圈出，异常超过 3000 nT，而两侧的背景场变化很小。

又如澳大利亚 ADI 服务公司利用新英格兰大学研制的 TM-4 铯蒸气成像磁力仪探测地下未爆炸的炸弹（UXO），此项工作要求做到万无一失，分辨率高，并能提供直观图像。TM-4 磁力仪取样率 100 次/秒，精度 0.01 nT，由两人操作。ADI 公司曾在德国北部探测第二次世界大战时遗留的炸弹，以保证石油钻探的安全。在所有建议的井位周围都作了磁测扫面，成功地清理出几千个井位。工作区的地磁背景噪声低，在进行日变改正后可测出 12 m 深的炸弹。

2. 直流电法

根据一些文献的报道，固体生活垃圾的电阻率在 $n\sim n\times10\ \Omega\cdot m$ 范围内，而其淋滤液的电阻率则常小于 $10\ \Omega\cdot m$。因此，用电剖面法圈定生活垃圾时，垃圾堆一般表现为电阻率低，而且最低值在中心部位，朝边缘则不断增大。尽管生活垃圾成分非常复杂，但电阻

率的分布却往往是渐变的，这可能是因为单个的导电物体太小，不足以形成单独的异常。它们的电场形成一个总体上均匀的异常场，几乎所有的生活垃圾堆都具有这样的特征。

一般认为，不仅是生活垃圾中的固体组分使电阻率降低，而且淋滤液和渗入液也起到同样的作用，这可能是生活垃圾中含有盐分所致。因此，电剖面法可以成为圈定垃圾场地横向范围的手段。

垂向电测深可以作为电剖面法的补充，通过电阻率的垂向分布查明废料场地的地质断面、废料层的深度和厚度。在位于德国莱茵河一个岛上的有害废料场上，作了一条电测深剖面。包括 10 个测深点，最大供电极距 260 m。在废料场内外电测深曲线的形态截然不同，废料场外的测深曲线 VES 17E 和废料场内的测深曲线 VES 13E 经解释分别代表如下的地电剖面：

VES 17E			VES 13E		
地电层	电阻率 Ω·m	厚度 m	地电层	电阻率 Ω·m	厚度 m
1	91.12	0.77	1	94.35	1.02
2	651.39	10.10	2	8.00	0.93
3	47.87	47.78	3	22.69	19.25
4	63.92		4	86.58	

VES 17E 的 1、2、3 层分别代表土壤、湿的砂砾和粘土，其中第 2 层电阻率最高。而 VES 13E 的第 1 层为土壤，2、3 层均属废料、电阻率最低，合计 20 m，再往下为基岩，其电阻率升高至 90 Ω·m 左右。总的来说，在废料场内出现电阻率低。

3. 电磁法

电磁法的结果与直流电法近似，然而电磁法工作效率更高、成本更低。从原理上讲，电磁法也是记录由废料或地质构造引起的电阻率差异，然而它的优点是横向分辨率更高，尤其是针对陡倾、延伸大的小构造。电磁法易于圈定废料堆、非铁金属和含盐淋滤液。其穿透深度取决于频率，最适用的频率为 800～7000 Hz，超过 15 kHz 的频率难以穿过粘土质的屏蔽层。

在一个含有机质和重金属的工业废料堆上作了电磁测量，发射和接收线圈水平共面，相距 50 m，记录 888 Hz、1777 Hz 和 3555 Hz 频率的实虚分量，所有频率上的实虚分量在废料堆上都出现低值，这是由于废料的电阻率比周围的粘土质沉积更低。

在澳大利亚珀斯的一个生活垃圾场上曾用瞬变电磁法来圈定它的污染范围。接收回线布置在直径 25 m 的发射回线的中心，为了确定淋滤液的整体范围，共完成 83 个 TEM 测深点，除了污染区本身，还扩展到周围的背景区。根据 TEM 确定的污染区与钻井的资料吻合。

地质雷达也是近来常用于探测固体废料的方法，它的显示直观。不过，地下水分的含量对其结果有很大的影响。使用地质雷达的效果主要取决于地下物质介电常数的差异（见表 4－12）。

表 4-12 不同物质的相对介电常数

物质名称	相对介电常数
空气	1
淡水	81
海水	81
干砂	4
砂（含水 3%～5%）	10～30
砂（含煤油 6%～30%）	3
粘土	15
土壤（干至含水 15%）	4～29
土壤（含水>15%）	30～50
砂岩	6
页岩	7
玄武岩	8
花岗岩	7

粘土成分的横向变化会给雷达结果带来干扰，粘土含量的增高可突然减小测量的深度，使人产生反射界面上升的错觉。在大雨前后取得的地质雷达剖面在探测深度和反射特征上都会有很大差别。因此，对雷达数据的解释要非常细心。

地质雷达曾被用来调查一个废弃的煤气制造厂，对有建筑物的地区用 0.5 m 的线距进行了雷达剖面测量。发射频率为 300 MHz，圈出了许多磁测未能发现的埋藏物体，尤其是发现了一些与陶瓷管道和排水通道有关的线状物体。它们既未能被磁测、也未能被低频电磁法发现。

由于有机化学物质的介电常数很低，地质雷达很适合寻找有机污染物，如焦油、挥发性碳氢化合物和用过的油。可惜的是，砂透镜体和其他高阻物体也会形成非常近似的反射。因此，部分已知的有机污染物可以用地质雷达来追踪，确定其空间延伸。但是，如果没有其他已知资料，仅凭雷达反射特征就断定有机污染物的有无，是容易出问题的。

4. 地震法

据文献报道，城市垃圾的 P 波速度大体上在 370～720 m/s，而 S 波速度大体上在 160～200 m/s 之间。如果下面的层位比上面层位的波速高，则地震折射法可以探测出两者之间的平坦界面，它常用于查明浅部未固结层的厚度和基岩的起伏。非渗透基岩面上的凹陷对污染渗入液和淋滤液起到控制作用，它是可以用地震折射法追踪的。但是，废料堆和非固结沉积之间的界面用地震折射是难于发现的，因为它们二者的波速往往相当接近。

地震反射法过去主要用于油气勘探，因为它的探测深度大，而把浅部的影响视为干扰。近年来随着具有高频震源的浅层高分辨率地震仪的出现，已经有可能分辨出小于 50 m 深度的反射。尽管有了这些新发展，目前地震反射法仍然主要适于探测废料场下方的地质构造，例如确定含水层的位置、厚度和延伸，以及探测对地下有害液体流动起导向作用的断层。

5. 重力法

根据某些地区的资料，生活垃圾和工业废料的密度可由 275 kg/m^3 变至 1346 kg/m^3。其

周围地质介质的密度一般要大得多，由 1600 kg/m³ 到 3200 kg/m³。尽管如此，重力法并不常用于探测废料场，因为它们往往规模较小，引起的异常较小，在地质因素形成的重力场背景上不易区分。

应用重力测量成功圈定回填场地的一个实例是在美国的印地安纳州。在回填场地上方及其附近作了 8 条测线，点距 5～10 m，共 200 个测点。首先求出由冰川沉积物和基岩岩相变化引起的区域变化，然后由布格异常图中减去区域分量，得出剩余重力异常，回填部分的形态是通过正演和反演两条途径确定的。这个应用重力测量调查回填场地的实例之所以成功，是因为冰川沉积比较均匀，而且它与回填物之间的密度差足够大。

6. 综合地球物理方法

在德国汉诺威的一个生活垃圾场上，利用直升飞机，作了综合航空磁测、航空电磁和航空放射性测量，测线距 50 m，直升飞机的平均离地高度为 50 m，磁探头的离地高度 30 m。结果表明，该垃圾中含铁磁性物体，在周围背景上形成明显的特征。在总磁场强度等值线图上（图 4－13 (a)），垃圾堆南侧的最大值超过 750 nT，北侧相应的最小值小于－560 nT。它们之间的零等值线为近东西向，大致相当于垃圾堆的中心。在同一架飞机上还进行了 DIGHEM 航电测量，垃圾堆引起了电阻率的降低，由其边缘的大于 10 Ω·m 向中心逐渐降低到小于 2 Ω·m，10 Ω·m 的等值线大体上与垃圾堆的边界重合（图 4—13 (b)）。航电同航磁等值线图相比更容易解释，垃圾堆的范围也更明显。航空放射性活度也从垃圾堆的边缘向中心增加 5 倍，但垃圾堆与异常重合性较差，异常未必全由垃圾引起，也可能受地质因素（如粘土层）的影响。

美国田纳西州橡树岭禁区 50 年来一直是一个核生产、开发和研究基地，它的许多废料堆的位置、几何形态和成分，有些已知，有些知之甚少，也有的未知。为了更进一步了解已知场地和圈出其余的有害废料堆放场，1992 年开始了一项两阶段的航空调查。第一阶段包括航空放射性测量、多光谱扫描和航空摄影，第二阶段包括直升飞机电磁、磁测和放射性测量。

首先选择了 SWSA 4 场地进行试验，其面积为 93000 m²，堆积低放射性废料，包括纸、玻璃制品、废旧金属、实验动物尸体和一些大件设备，大多数废料埋在一系列 15～122 m 长、2～9 m 宽、2～4 m 深的沟内，有关埋藏的记录已在 50 年代毁于火灾，所以有关沟的位置、方向和废料的成分都是未知的，需要采用地球物理方法在制订治理计划前加以调查。

试验中采用了两种综合电磁-磁力梯度-甚低频-放射性测量系统。系统 A 为踏勘性测量设计，吊舱离地高度 30 m。系统 B 用于高分辨率测量，吊舱离地高度只有 5 m，以详细圈定和识别目标。系统 B 用专门为此次测量开发的小型电磁-磁力梯度吊舱，配有宽频发射机，主要功率输出是在 4 kHz、12 kHz、20 kHz、28kHz 和 34 kHz，发射接收距 3.76 m。吊舱内还配有激光剖面测量仪和高度传感器，吊缆长 30 m。垂直磁力梯度测量采用一对相距 1 m 的铯磁力仪传感器，位于吊舱的尾椎上。GPS 天线位于吊舱的上方，接收机则位于机舱内。

地面测量采用 Geonics EM31 地电导率仪和超声波测距与数据系统（USRADS），后者能自动记录测点位置和 EM31 实虚分量的读数，每秒 1 次，所以取样密度很大。不过 EM31 是单频的（9.8 kHz）共面线圈电磁系统，它提供不了深度信息。

结果表明，根据航空垂直磁力梯度异常可相当好地确定埋藏场地的边界，4 kHz 水平共

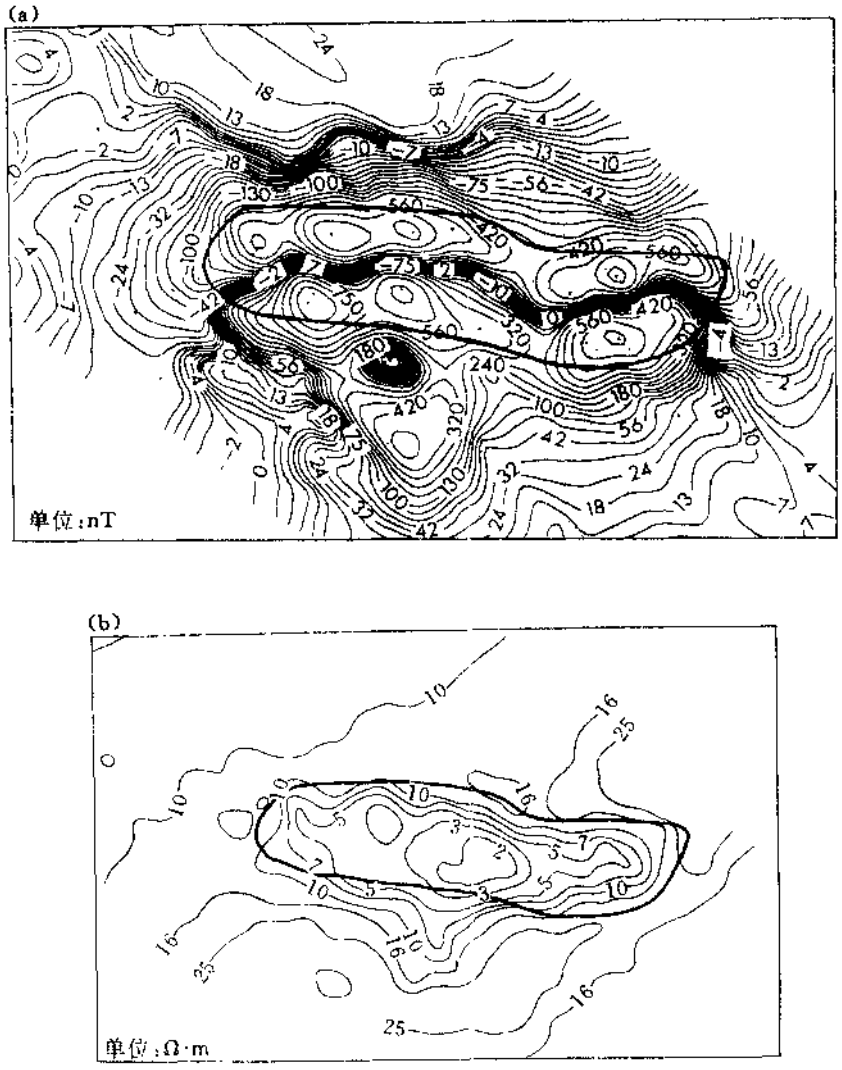


图 4 13 德国汉诺威一个垃圾堆上的综合航空物探测量

(a) 航磁总强度等值线图；(b) 据直升机电磁系统 (DIGHEM) 测量结果得出的电阻率等值线图，频率 385 Hz

面航空电磁数据显示埋藏场地的边界不如航磁梯度清楚，但异常区的总体形态还是相似的，局部异常反映了埋藏废料的具体地点。地面测量更靠近目标而且测点更密，故能更清楚地分辨出单个废料沟的边界。总之，先用航空地球物理测量圈出埋藏场地的总体边界和其中的局部异常，指导地面检查是发现埋藏废料的有效手段。

二、固体废料的治理

美国橡树岭国家实验室 (ORNL) 对埋藏放射性和有害废料采取了一种就地熔融的治理方法，它是在污染土壤的周围按方形网布置四个电极，供电并将土壤和废料熔化为化学上均匀的、耐久的玻璃-微晶质物体，使之不易淋滤。在高温下 (1300～2000℃) 产生的气体

和微粒则被导入废气处理系统。问题在于熔化的过程不易掌握，供电要足够长使所有废料都能熔化才行，因此需要一种遥测方法来监测熔化的范围。

为了监测熔化过程采用了井间电阻率层析，仪器为Syscal R2。出于环境保护考虑，无法采用不极化铅电极，只能采用铜片电极。在熔化点周围打了等距离的六个6 m深的钻孔，邻孔相距6 m，对面孔相距9 m，每个孔内放入5个电极。电极由0.3 m宽的铜片组成，包在直径10 cm的聚乙烯管上，两个无穷远极布在70 m以外。孔内30个电极中的每一个轮流用作供电电极，其余29个电极则同时作为测量电极之用，总共可取得870个电位读数。其中有半数为重复读数，可用于评价数据精度。由于R2系统是单道的，收录全套数据的时间要几至十几小时，所以改用多道仪器是很重要的。共测了三套数据：熔化前的背景值，熔化电源刚刚切断后的熔化值（熔化体可保持液态数日），熔化过去数月后恢复到室温后所取的值。

电阻率层析成像清楚地反映出熔化过程及熔化过后的“熔融带”状况。熔融过程中的温度分布很不均匀，高导熔融体外包着一层薄而高阻的晕圈，是由土壤完全脱水造成的。高阻层外又围着中等导电程度区，那里的土壤温度还不到100 C。电阻率层析虽不能给出熔融体内的详细结构，但确定熔融体的横向和深度范围是相当有效的，而且成本很低。研究还表明，今后最好采用频率几十至几百千赫的电磁法来代替直流电法，以便克服高阻晕圈的屏蔽。

三、新废料场的选址

废料场的选址主要考虑废料的淋滤液是否会污染地下水，所以要了解废料场和含水层之间是否存在水力通道。常用的场地评价方法是地质填图和抽水试验，测量通过岩石的流量，以了解淋滤液运移的可能性。这种方法的缺点是只能获得有限面积上的少量信息，而对周围的情况了解不够，那里可能存在着未知的断层和裂隙，会成为污染淋滤液的通道，其流速和方向会大大超出抽水试验和渗透性试验所显示的范围。虽然目前许多废料场具有防渗衬砌，但随时间的推移，衬砌也会渗漏或损坏，所以防止污染液体的运移仍然是很重要的。

爱尔兰北部的一个废弃采石场，其周围岩石为杂砂岩，目前正考虑作为垃圾场，曾用三种不同方法作了调查，即地质填图、抽水试验和磁测。地质填图由于露头不好而比较困难，只发现一条3 m宽的裂隙带。在采石场底部打了钻孔，测了水位，抽水试验发现在采石场内有两条裂隙，其中一条已被地质填图找到，涌水量在裂隙1、2均为40 m^3/d，而完整岩石为4 m^3/d，通过裂隙的流量比通过完整岩石高一个数量级。

跨过采石场作了两条磁测剖面，它们都探测到两条裂隙系统。剖面1的裂隙1上出现正负相伴的异常，幅度220 nT，而裂隙2与背景相差350 nT以上。剖面2上裂隙1的异常为65 nT，而裂隙2的磁异常极高，可能沿裂隙出现磁铁矿化。所采用的三种方法中，常规填图花了6 h，由于露头不好漏掉一条裂隙，抽水试验探测到两条裂隙，但它需要打钻、配备抽水设备，作精确水准测量并进行七天监测。磁测花了70 min测到两条裂隙，而且还可以在周围地区快速开展面积性磁测，以确定有无其它裂隙和断层。

在废料场选址工作中还可采用直流电法、电磁法、地震法、井中地球物理方法等，此处不拟详述。

第四节　大气污染的监测

许多国家，包括我国，是靠燃烧矿物燃料来发电、供暖和供气．在此过程中排出大量 CO_2、SO_2、NO，和含有重金属及放射性元素的飞灰，造成大气的污染．城市汽车尾气也成为污染大气的另一主要来源。大气污染带来的严重后果一是酸雨，二是温室效应。发电厂和矿产加工业使大气中的 SO_2 浓度过高，以每年发电 1 GW（10^9 W）计算，排出的 SO_2 就达到 1.6×10^5 t，导致酸雨的形成，对森林和湖泊造成破坏。燃煤或者燃油还使大气中的 CO_2 浓度日益增加，以每年发电 1 GW 计算，排出的 CO_2 达到 2.0×10^7 t，大气中 CO_2 浓度的增高导致了温室效应。

一些核地球物理方法可用来监测大气的污染。例如，在环境保护领域，原位测定室外空气和工作场所 SO_2、NO，、O_3、NH_3、AsH_3、烃类和卤化碳的痕量浓度是一个很重要的问题。利用一些辐射源，如电离室内的^{3}H、^{63}Ni 和^{85}Kr，可以电离空气流，通过电场来收集电荷载体。当有害组分的分子经过探测器时，它们藉助于选择性化学反应或热解作用转换为带电气溶胶，这些气溶胶由于其截面较大和漂移速度慢而使电荷载体复合，从而使所测的电离电流减小。这类电离装置称为气溶胶电离气体分析器，灵敏度很高，可以分析 10^{-9}级的浓度。

成都理工学院曾使用中子活化分析来测定燃煤热电厂周围气溶胶中的化学元素组分。为了研究成都地区某电厂排放废气对大气环境的影响，他们在离厂 1.5～2.0 km 范围内取了气溶胶样品，并同时采集了燃煤、炉渣、飞灰和除尘器截留下来的粉尘样品。采用仪器中子活化方法测定气溶胶样品是因为它的灵敏度高、精确度高、不破坏样品，且能同时测定 40 多种元素。样品先在反应堆内辐照，中子流量为 2×10^{13}/（cm^2 · s），辐照时间 10～16 h 不等，冷却 4～6 d，进行第一次测量，测量时间 2000 s；冷却 15 d 进行第二次测量，测量时间 4000 s。鉴于目前对热电厂周围气溶胶中的各种化学组分尚未规定最大允许浓度，所以分析结果只是同地壳中元素克拉克值作了对比。样品中子活化分析的结果表明，易挥发性元素（如 Zn、Cd、Sb、Se、Hg、Mo 等）主要富集在直径几微米的微粒中，这些微粒绝大部分由电厂的烟囱排放，散落在较大的范围内。在距电厂 1.5～2.0 km 范围内气溶胶中包含了 Zn、Cd、Se、As、Sb、Hg、Br 等有害元素，其中 Zn、Cd、Sb 浓度超过克拉克值 20 倍，Se 超过 100 倍，As 超过 15～20 倍，Hg 超过 5～10 倍。

石油含有痕量元素，在燃烧时也会造成大气污染，中子活化分析是分析痕量元素的一种有效手段，但有少数痕量元素不适于用中子活化分析，印度的萨哈核物理研究所试用了 α 活化分析。10 mL 样品在铝盘上用红外线烘干，然后在真空中用回旋加速器 40 MeV 的 α 粒子束照射 1 h，再用高纯锗探测器和多道分析器测 γ 能谱，结果发现了三种用中子活化法未测到的元素 - Nb、Ta 和 Tl，它们在中子活化分析中由于其它元素的高放射性背景而难以分辨。Tl 有毒并易形成有机金属化合物，像 Pb 一样能从汽车尾气中排入大气。

地球物理方法还可用来间接研究大气污染，例如 X 荧光法可现场快速测定煤样中的硫含量，从而预测某种煤对大气可能造成的 SO_2 污染程度。葡萄牙 Coimbra 大学采用^{55}Fe X 射线源激发，用气体正比闪烁计数管分析未加工煤样中的硫含量，硫能明显与其它元素的谱线分开，能量分辨率 1.8%。当采用 3.7×10^7 Bq（100 mCi）的 X 射线源、探测窗口直径 20

~25 mm 时，可以使分析时间缩短到 100 s。硫的计数率与其含量呈线性关系，检出限为 0.15%。

俄国科学院地圈动力研究所的研究表明，大气的电位梯度是其污染程度的标志。由工业、交通等引起的近地表大气组分的变化（化学组分变化、尘埃的增加、固态和液态烟雾）对电荷的分解和运移有很大影响，使大气电导率降低，导致电位梯度平均值的增大、结果电场强度 E 的垂直分量加大。

第五章　天然和人为灾害的监测和防治

据设在布鲁塞尔的流行病灾害科学中心的资料，从1965年到1992年，全世界死于自然灾害的人数约360万，受灾人数超过30亿，总经济损失为3400亿美元。由于人口快速增长和高度集中等原因，受灾人数以每年约6%的速度递增。表5—1列出了全世界重灾次数增加的情况，其中A类指经济损失超过年国民生产总值1%以上的灾害，B类指受灾人数超过全国总人口1%以上的灾害，C类指死亡人数在100人以上的灾害。

表5-1　世界1963～1992年重灾次数的增加

灾害类别	1963～1967	1968～1972	1973～1977	1978～1982	1983～1987	1988～1992
A	16	15	31	55	58	66
B	39	54	56	99	110	139
C	89	98	93	138	162	205

据预测，到2000年，世界半数人口将居住在城市，即有35亿人口居住在不超过世界总面积3%的地区。由于人文设施高度集中，几乎任何一种自然灾害都会同时引起技术灾害。

我国是一个自然灾害多发的国家，据估计每年由各种自然灾害造成的直接经济损失为300（一般低灾年）～500（一般高灾年）亿元。在上述总损失中，地质灾害（不包括地震）约占四分之一，即每年75～125亿元，这还是低估了的数字。表5－2列出了几种主要地质灾害造成的经济损失的估算值。

表5-2　我国几种主要地质灾害造成的年经济损失

灾害类型	直接经济损失 亿元	间接经济损失 亿元	间直比
崩塌、滑坡、泥石流	20～30	150～225	7.5∶1
地面沉降	16～20	48～60	3∶1
岩溶地面塌陷	10～15	30～45	3∶1
地裂缝	5～10	15～30	3∶1
总　计	51～75	243～360	

在灾害的监测、预报和防治工作中，地球物理方法同样可以发挥巨大的作用，国内外都有许多成功的先例，下面按照应用领域分别加以介绍。

第一节　滑坡调查和监测

滑坡是危及人类生存环境，造成人员巨大伤亡和财产巨大损失的地质灾害之一。R. H.

杨斯研究了美国在1925～1975年这段时期由滑坡和地面沉降造成的损失，其直接经济损失至少为750亿美元。这一数字是同一时期内由水灾、飓风、龙卷风和地震造成的总损失的三倍多。日本"国家灾害防御研究中心"前理事长N. Ohhira指出，日本每年由滑坡造成的损失为大约15亿美元。在我国，滑坡也给铁路、公路、水电、城市建设和人民生活造成严重威胁和巨大经济损失，如1982年发生铁路滑坡崩塌4544处，线长626 km，其中大型滑坡约1000处以上。川藏公路沿线已查明滑坡419处，严重影响了正常运输。在水电建设中，很多电站都面临着边坡不稳定的困扰，尤其是长江三峡工程从重庆至宜昌段，已查出大小崩塌、滑坡及危岩体283处，总体积约15亿 m^3，其中体积大于1000万 m^3 的崩塌、滑坡有25处。

由此可见，滑坡是一种分布范围广、频繁发生，危害性甚大的地质灾害，必须进行有效防治，由于它们具有隐蔽性和突发性，必须查明其分布范围、形成条件和孕育因素，监测其稳定性，才能达到有效防治的目的。

物探方法在一定的程度上可用来查明滑坡的分布范围、形成的地质条件及滑坡体的范围和结构，可快速大面积地了解这种地质灾害的地质背景，从而为监测网点布设和治理工程设计提供有用的信息。有的方法还能够用来监测滑动的过程并且对突发性的滑动作出预报。

一、滑坡调查中的物探方法

从目前国内外滑坡地质调查的应用现状来看，主要包括电阻率法、甚低频法、地震折射法和反射法、地质雷达法、天然声辐射和电磁辐射测量法、射气测量法和无线电波透视法等。

一般来说，滑坡的产生和发展与地下水及降雨、地表水下渗等关系最为密切。水对滑坡的作用主要表现为增加滑坡体的容重，降低滑坡体中滑动带的抗剪强度等。由于水的作用，使滑坡体内的岩石物性（电阻率和地震波速）均与未经破坏的岩石物性存在着明显的差异。因此，利用电阻率测量和地震测量方法可以大致圈定滑坡体的范围、确定滑动面的深度和形状及查明滑坡区地下水的分布等。

天然声辐射和电磁辐射测量用于监测岩石（或土壤）的破坏过程。有关的研究表明，岩石在发生破坏过程中会产生声辐射和电磁辐射。

利用射气测量可评价边（斜）坡的稳定性、圈定滑坡体的范围以及监测滑坡过程的动态变化。滑坡本身是一种现代地动力作用过程造成的结果，其应力状况的变化会导致射气场的异常变化。有关的测量结果表明，在滑坡地区射气场一般起伏很大，最高与最低浓度之间可相差8～12倍，并且存在着带状异常和簇状异常，异常的走向以垂直斜坡倾向为主。滑坡体本身对应于射气场偏高的部位，但在不同地区，射气浓度可能很不一样，这种差别主要是由于滑坡的发展阶段及所处的构造、地动力环境不同造成的。在同一滑坡体的不同部位射气浓度亦不相同，靠近滑坡轴部平均射气浓度比在滑坡的边缘部分高，在活动滑坡上这一点表现尤为明显。

地质雷达以其分辨率高、对导电率变化和水具有极强的敏感性为特点，是确定基岩中裂隙、节理和层理的有效手段。在采石场和露天采矿场，应用地质雷达成功地填绘出岩石内裂隙的分布及其连续性，这对评价边坡稳定性是至关重要的。

二、物探方法在滑坡调查中的应用

1. 圈定滑坡体的范围并确定滑动面的深度

在滑坡区，岩石天然结构受到破坏，矿物组分也发生变化，含水量和孔隙水含盐度增大。因此，滑坡体内岩石的电阻率和地震波速明显低于滑坡体外未经破坏岩石的电阻率和地震波速。

一般来说，滑坡区内泥质页岩、页岩、泥质砂岩的电阻率显著降低，而可塑性粘土的电阻率降低不明显。滑坡体中岩石的波速低于未经破坏的基岩（滑床）的波速，而衰减系数增大。表 5－3 和表 5－4 列出了在乌克兰黑海沿岸滑坡体和滑床上所做的电性和地震参数的对比结果。

表 5－3　乌克兰黑海沿岸滑坡体和基岩的电阻率

岩石名称	电阻率/（Ω·m）	
	滑床基岩	滑坡体中的岩石
泥岩	60～100	30～45
泥质砂岩	30～80	20～30
页岩	30～80	10～20
粘土	6～10	4～6

表 5—4　乌克兰黑海沿岸滑坡体和基岩的地震参数

岩石名称	纵波波速/（$m \cdot s^{-1}$）		横波波速/（$m \cdot s^{-1}$）		纵波衰减系数/m^{-1}		横波衰减系数/m^{-1}	
	滑床	滑坡体	滑床	滑坡体	滑床	滑坡体	滑床	滑坡体
泸塌质砂	310～370	250～270	190～210	150～190	0.11～0.15	0.55～0.58	0.14～0.17	0.50～0.52
粉砂质粘土	340～880	530～690	250～280	200～230	0.30～0.31	0.33～0.34	0.12～0.16	0.30～0.32
砂与粘土	890～950	600～740	280～300	210～250	0.09～0.11	0.32～0.34	0.10～0.12	0.29～0.33
粘土	1600～1750	830～980	310～380	270～290	0.03～0.06	0.28～0.31	0.02～0.05	0.24～0.27

注：地震波频率为 50～80Hz。

由于滑坡体内外的电阻率和地震波速变化明显，故可藉助电阻率测量和地震测量来圈定滑坡体的大致分布范围并确定出滑动面的深度。美国、原苏联利用这两种物探方法均取得了较好的效果。图 5—1 为伏尔加河谷滑坡区的一条剖面。地电剖面的上部是由较干燥的滑坡沉积物组成，电阻率 ρ_1 为 20 Ω·m。第二层为滑坡体的主体，其特征是含水量增高（达 34%～37%），因而 ρ_2 显著降低，为 4～5 Ω·m。第三层是未受滑坡影响的泥质岩石，其含水量为 25%～28%，ρ_3 值与 ρ_1 相当。根据测量结果，在滑坡体内电阻率测深曲线一般为 H 型（$\rho_1>\rho_2<\rho_3$），而在滑坡体以外曲线类型就会改变。据此便可圈定滑坡体的范围并确定滑动面的深度。

这一测量结果所反映出的规律具有普遍的意义。在美国加利福尼亚南部一深切河谷的沿岸进行了电阻率和地震折射波综合测量。这里曾发生过滑坡。在滑坡区内，地震折射测量反映出三层断面，而电阻率测深则显示出三层或四层断面。每层的电阻率值和速度值变化范围基本上是稳定的。表 5—5 示出了断面各层的一般特性。电测深曲线为 H 型。其解释结果为：第一层和第二层分别代表了非饱和的和饱和的滑坡层，而第三层为未破碎的基岩。由此圈出了滑坡体的范围，确定了滑坡体中滑动面的深度及其形状。

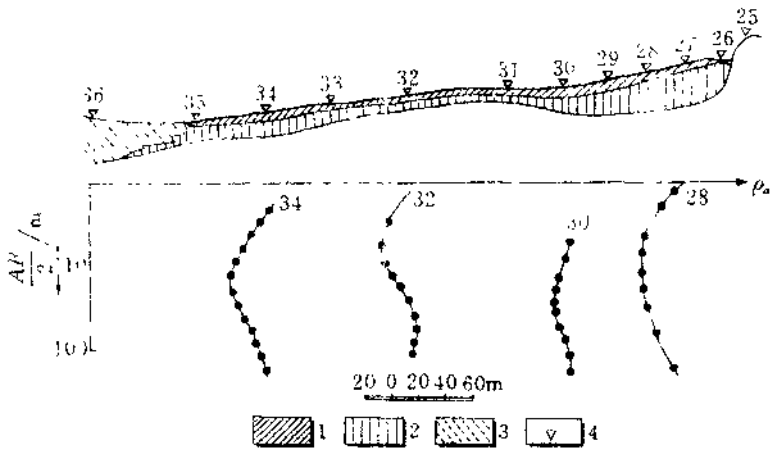


图 5-1 伏尔加河谷滑坡区地电剖面

1—干燥滑坡物质；2—含水量较高的滑坡物质；3—现代冲积物；4—电测深点

表 5—5 美国加州南部某河谷沿岸地震折射与电阻率测量解释结果

层 位	地震波速/（m·s⁻¹）	电阻率/（Ω·m）
1	低（360～600）	低（15～45）
2	中（1200～1500）	很低（3～20）
3	高（1800～2100）	高（>900）
4		更高（>1000）

俄罗斯一直比较重视利用射气测量来研究滑坡。从 80 年代到最近都有文献报道这方面的成功实例。据 1992 年的文献报道，莫斯科地质勘探学院用射气法对沃里斯克西南伏尔加河右岸一片计划进行建筑的滑坡区进行了研究。结果显示，滑坡区内岩石 Rn 浓度平均比未扰动岩石的 Rn 浓度高五倍。调查表明整个滑坡地区并非一个整体，而是由九个滑坡体组成的，彼此之间的界线为 Rn 和 Tn 异常带。由于不同滑坡体的滑动速度可能不同，因此建议建筑物都设计在单个滑坡体范围内，并且应该对整个地段或滑坡体采取防治措施。

2. 研究滑坡形成的重要因素——地下水的作用

滑坡的形成与地形坡度、地层岩性、地质构造等因素有关。有时坡度虽小，但土质疏松或岩石是硬度较小的页岩或泥岩，特别是坡面与岩层面平行时，也容易产生滑坡。当降水渗入土层或岩层时，在浮土与基岩界面或岩石中间的界面上，往往形成一种易于滑动的泥化层，日积月累，特别在大雨后就易形成滑坡。另外，滑坡的地下水分布与补给，特别是对岩石滑坡、堆积层滑坡而言，一般是由其所处的地质构造和地层岩性条件所决定。因为构造条件和地层岩性控制着地下水运动、相互补给的途径，如断裂带、裂缝带的透水性和导水作用都较好。滑坡区内由于滑坡体物质与基岩顶面存在着明显的透水性差异，因而大量的地下水可沿着基岩顶面活动，尤其是基岩顶面的沟槽适宜于地下水的汇集。

由此可见，地形、地层岩性和地质构造是滑坡形成的前提条件，而地下水的活动是其诱发因素。利用物探方法可以了解地下水的分布、作用，这对预测滑坡以及采取防滑措施

有着重要的意义。

物探方法可用来确定地下水位及其随时间的变化。一般可采用电测深法、地震折射法、甚低频法等。在一些滑坡地质断面上，由于粘土层的存在限制了用电法测地下水的深度，因此往往使用地震折射法。饱水与非饱水岩石的纵波波速之比往往与岩性、孔隙度有关，但通常大于 1.4，通过重复地震测量，可以了解最大和最小降雨量期间的水位变化，将不同时间绘制的地下水位等值线图进行对比，可以评价地下水位变化的动力学特征。

铁道部科学研究院西北研究所用甚低频电磁法查明了宝成铁路 K410 滑坡的地下水分布。宝成线 K410 滑坡是一个规模较大的堆积层老滑坡体，平面范围长约 500 m，宽约 200 m。铁路在老滑体前部通过，自 1955 年通车后，老滑体前部始终处于不稳定状态，曾发生过较大的滑动，造成铁路中断。在滑坡区周围发育有断层破碎带和线性构造。据地质推断，断层破碎带在山体中构成富水带，线性构造则切割山体使地下水以此为通道实现对滑坡区的补给。此外，地下水沿基岩层面运移，亦对滑坡区地下水构成另一渗透补给的途径。用甚低频法作了倾角法测量和波阻法测量，由此得出了倾角滤波值异常图和视电阻率异常图。二者的异常带基本吻合，大致反映了地下水的分布范围。经钻孔验证，位于异常带范围内的钻孔有承压水涌出，而异常带范围之外未见承压水，调查结果为查清滑坡区水文地质条件及排水工程设计等提供了依据。

滑坡的发生与降雨的渗透有关，因此渗透性高的地层容易产生滑坡。在这些地方有可能形成自电异常，其幅值可达几十毫伏。季节性过干、过湿的地区也容易产生滑坡，这种地段的范围可通过电阻率法和自然电位法来确定，主要表现在这些数值的变化。在若干年内，如果自电正异常区不断扩大，则说明岩石变松的范围扩大，有可能产生滑坡。但应当指出，自然电位的分布不仅受水文因素的影响，也受岩性特征的影响（例如粘土含量高会引起正异常），因此为了可靠地解释自然电位资料，必须把地质和电阻率测量的资料也考虑在内。

3. 监测滑坡的发展过程

滑坡在孕育和发展过程中，往往会导致岩体位移、应力集中而引发岩体产生微破裂，从而导致声辐射。除了常规的监测技术（如钻孔倾斜仪、地面倾斜仪、裂缝计等）外，声辐射技术、微动观测也能用于监测滑坡的发展过程。

声辐射技术是在被监测的地质体中（或钻孔内）埋设检波器，检拾声辐射信号，记录声辐射脉冲的强度和频度。声波脉冲的强度和能量能够比较准确地反映岩石破裂的过程，以此来预测滑坡。有许多国家利用这一方法有效地监测滑坡的发展过程并作出成功的预测。捷克在一露天采矿场用钻孔声辐射结果划分出了稳定性不同的四个岩体，确定出了岩体的扰动情况及天然应力分布的变化。这些结果得到钻孔倾斜仪测量结果的印证。智利也根据声辐射测量成功地预测了滑坡。

在日本中部被第三纪沉积物覆盖的许多地区滑坡频繁发生，已采用了各种方法来查明滑坡产生的机制。其中的方法之一是微动观测法，该方法通过微动观测，求出质点运动的频谱及轨迹，以此确定地下地质结构的颤振特性和变化过程，从而预测滑坡的移动。在日本长野以西约 20 km 的奈良尾和阿吉美木两个滑坡区进行了微动观测。在奈良尾地区由轨迹确定的地面颤振的方向性可用来识别主要和次级的滑动，而在阿吉美木地区则划分出了稳定带和非稳定带。据认为，微振特性与应力分布状况有关，这或许是用该方法预测滑坡

的基础。

直接观测滑坡物质的移动方向和速度对评价斜坡的稳定性和监测滑坡的发展是很必要的。为此可采用物探方法系统监测人工和天然基准点。例如，可以把永久磁铁放在滑坡体内的钻孔中，它所引起的磁异常最大值应超过测量精度的5～10倍，钻孔的排列线应垂直滑坡方向，井口的平面位置与高程同滑坡体外基岩上的固定大地测量基准点联测。磁铁在地面投影位置的测量精度为0.1～0.15 m，对磁铁位置进行重复测量，周期长短要考虑使移动的距离为测量位置精度的二至三倍。把不同时期所测的磁场图加以对照，就可以确定移动的方向和距离，进一步可求出移动的速度。作为天然基准点，可利用滑坡体内长期存在的不均匀体，其物性与围岩有明显差别，如视电阻率和自然电位局部异常（岩相的变化、水分的增多等）以及局部磁异常（如滚石、粘土透镜体）。

第二节　岩溶、洞穴及其引起的地面陷落的调查

岩溶是一种分布广泛的地质现象。据统计，约占世界陆地面积1/4的地区分布有可溶性岩石。在可溶性岩石分布地区，由于溶蚀作用引起的溶洞、落水洞及地下水系通道会导致地面沉陷等自然灾害。我国也是一个岩溶广泛发育的国家，据估计，近40年来发生较大规模岩溶塌陷800余处，约70个城市、100多个矿山、企业受到危害。因此，在岩溶发育地区，开展国土整治和环境保护时，需要开展岩溶地质调查，查明岩溶的发育特征和分布规模。

老矿山开采和开发会遗留下许多地下硐室、巷道等等，它们有可能导致地面沉陷。据美国地调所和矿业局估计，仅美国就有32000 km^2的地下开采区，并且这一数字将增至161000 km^2，为此需要花费近120亿美元进行处理，以防止发生地面沉陷。此外，与地基沉降、水坝或建筑物的地基调查、古遗址探测等有关的地下洞穴的探测已成为人们愈来愈关注的问题之一。

在岩溶地质调查和各种洞穴探测中，主要开展地质调查、多种勘探方法（物探、钻探和坑探等）和测试方法等工作。在覆盖地区，一些地质方法在一定程度上受到局限。因此，许多调查人员较为注重物探方法。实际上，物探方法在这一应用领域已取得了良好的地质效果。

一、岩溶、洞穴地质调查中的物探方法

对岩溶的地球物理调查一般分为两个阶段。第一阶段是评价形成岩溶的基本条件和因素，对岩石及有关的构造进行填图，包括研究岩溶发育层位的埋深和状况、与岩溶发育有关的破碎带、断裂带的位置、覆盖物各个层位的组分和厚度及地下水运移状况等，采用的物探方法主要是电阻率法和地震折射法。第二阶段是直接探测岩溶洞穴的位置、产状及充填物的性质等，采用的方法有电阻率法、地质雷达、地震法、微重力法、射气法、井中雷达和井中无线电波法等。这些方法同样可用来探测其它的洞穴，如矿山老硐等。

由于岩溶发育区的地质条件差异甚大，故物探方法的使用也是因地制宜。从近年来国内外岩溶地质调查的方法应用情况来看，各种物探方法在一定程度上均可用于岩溶的调查和研究。美国和其它国家在岩溶发育区曾采用多种物探方法进行过试验研究。现对一些方法及其特点作一简述。

1. 地震法

用于岩溶调查的地面地震方法包括地震折射法和高分辨率反射法。美国研究人员在方法试验研究的基础上提出了折射波形（Refracted Wave Form）和折射扇形排列（Refracted Fan Shooting）两种方法。它们本质上属于标准折射法在排列方式上的两种变种。折射波形法是使震源和检波器之间的距离保持恒定，一般为待勘查目标的四倍。测量时通过信号的振幅和走时的变化来圈定异常。折射扇形排列法与折射波形法的区别是它使用多个检波器排列成半圆形，各检波器至震源的距离均相等。这两种方法野外作业简便、快速，解释简单、成本较低。在美国佛罗里达州三个岩溶发育区的调查结果表明，它们对探测浅部的干溶洞效果颇佳，但探测深度不大。

高分辨率反射法在岩溶调查中也具有良好的效果。它可用于查明岩溶区的基岩地质条件和覆盖层地质条件，圈定出潜在岩溶塌陷危险区或地段。野外作业时一般采用多道接收、多次覆盖，并通过增强主频率和提高信噪比来提高分辨率和探测能力。在条件适宜时应采用横波（SH）反射法，这是因为横波反射法比纵波反射有较高的分辨能力（一般情况要高一倍以上）。

钻孔地震成像（包括钻孔-地面和钻孔-钻孔等测量方式）也可有效地探测岩溶。该方法通过测量地震波，以成像的方式，可较准确地圈定出较深部和钻孔之间的溶洞，并可确定出溶洞内及其周围物质的物性参数和水文地质特征等。

2. 电法

探测岩溶最常用的电法有电阻率法、电磁法、自然电场法和地质雷达法等。电阻率法作为传统的电法在岩溶探测中被广泛使用。它具有较好的垂向分辨率，适合于浅部和深部溶洞的探测。为提高探测能力，往往采用多种电极排列方式，如 Wenner（温纳）和 Bristow（单极-偶极）排列等。使用电阻率法时，应该特别注意溶洞的充填情况，如空溶洞为电阻率高，而充水溶洞为电阻率低。

自然电场法探测渗漏地带，确定地下水的流速和流向以及地下水和地表水的关系。该方法在查明岩溶发育区的地下水系分布规律方面效果良好。

地质雷达作为一种较新的探测技术，近年来在岩溶地质调查中取得了很好的效果。美国和欧洲的一些国家已将其作为岩溶探测中一种必备的常规手段。该方法适用于低导电覆盖区，可非常准确地确定出地下溶洞的埋深、大小，并且具有很高的分辨率，可直接探测出极小的岩溶特征（其尺寸甚至小到零点几米，当然这还取决于其埋深）。该方法的局限性是受地表良导层的影响甚大，良导层的存在会大大减小其探测深度。因此，地质雷达适合于探测浅部的岩溶，探测深度一般为 6～9m，在非常干燥的砂土覆盖区可达 30m。

3. 重力法

重力测量广泛用于岩溶和洞穴等探测，尤其是微重力测量。西方国家的一些研究人员将微重力测量作为岩溶发育区普查和详查中的主要方法之一。实际野外测量时测网的布设取决于所研究的洞穴特征，目的是使被探测对象能够明显地分辨出来。用重力法探测溶洞，无论溶洞是空的还是被物质所充填，其密度一般比围岩的密度要低，故在重力剖面上溶洞的位置与负重力异常相对应。重力测量的缺点在于干扰因素较多，如地形的起伏、近地表物质的不均匀等。因此，重力测量最好是用于地形平坦区。

4. 射气测量法

经验表明，岩溶发育地段对应于线性带状射气场。这种场反映了断裂裂隙带和地动力带的存在，而这些构造活动带导致了岩溶的发育。在这样的地段范围内划分出低值带和局部最小值则是最有利于岩溶发育的部位，有可能对应于溶洞。

莫斯科地质勘探学院曾在莫斯科、卡卢加和其它地区利用射气测量进行了大比例尺岩溶区划，取得了良好的效果。射气测量的浓度低值异常与岩溶发育特征对应。尽管其机理尚不是完全清楚，但实际观测结果所反映出二者的相关性，可用来有效地查明岩溶特征的分布。

二、物探方法在岩溶、洞穴调查中的应用

1. 评价与监测由岩溶引起的地面沉陷

岩溶区溶洞的发育是造成地面沉陷的直接原因。为了有效地评价可能发生的地面沉陷，需要查明溶洞的发育规律和分布特征。

在美国北卡罗莱纳州威尔明顿西南 17 km 处有一条铁路干线通过。沿该铁路干线时常出现地面沉陷直至崩塌现象。这一地区地质剖面自上而下分为砂层、粉砂粘土岩、薄砂岩和灰岩（图 5--2）。引起地面沉陷和崩塌的直接原因是由于地下发育有直径甚小（小于 1 m）的岩溶管。岩溶管最初发源于灰岩中的小溶洞，然后逐渐扩展到上覆的粉砂质粘土层、砂层，直到地表（图 5- 2）。尽管这种岩溶管在地下的直径很小，但一旦引起地面塌陷，其范围可达到 6～15 m（直径）。为研究和摸清该地区岩溶管的发育特征，研究人员最初沿铁路干线打了一百多口浅孔，但结果很不理想。

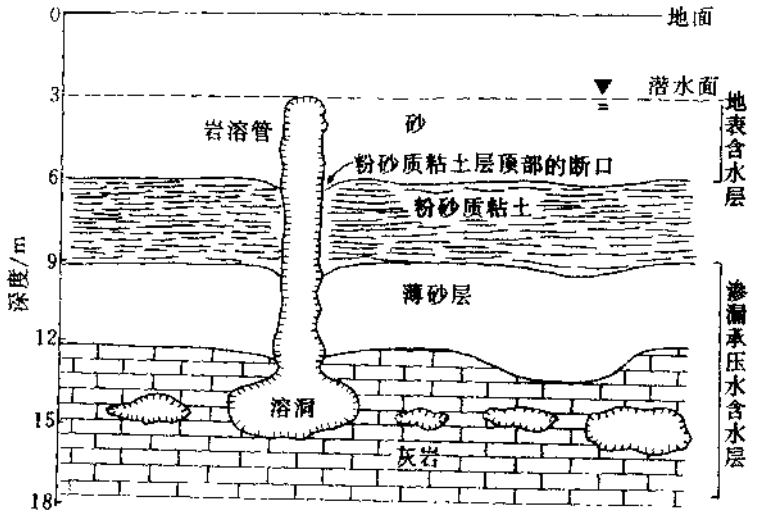


图 5--2 美国北卡罗莱纳州某铁路干线的地质断面示意图

为此，研究人员选择了地质雷达进行试验。初步的雷达测量结果表明，虽然其探测深度达不到基岩的深度（因为基岩之上为良导的粘土层），但粉砂质粘土层顶部的形态特征可作为指示地表沉陷的一个标志，而雷达可有效地探测到这一标志。通过钻孔对地质雷达异常进行了验证，结果在异常处打到了岩溶管。

继地质雷达试验工作取得成功之后，又开展了以地质雷达为主，结合地震折射和微重

为的综合物探测量。通过对不同测量结果的分析和对比，可较好地查明覆盖层和基岩中是否存在着已有的或潜在的岩溶特征。例如，若重力显示出低异常且雷达剖面亦有异常反映，就会在基岩中存在着溶洞，且上覆的盖层中也发育有岩溶管特征；若重力剖面有低异常而雷达剖面无异常反映，则表明基岩中有溶洞但尚未发育岩溶管。根据折射测量结果可确定出基岩的深度，并可判断出有利于发生塌陷的强风化和溶蚀的基岩地段。此外，通过深入分析地质雷达剖面上的异常细节可以对岩溶的发育特征以及可能发生的地面沉陷所处的发育阶段进行正确的评估。

为了对该地段可能发生的地面沉陷进行监测，在本次测量之后六个月又利用雷达进行测量，目的是识别异常的变化情况，以此来判断岩溶的发育。第二次测量与第一次测量所反映的异常几乎没有变化，表明两次测量期间岩溶状况无明显变化。以后每隔 6 个月作一次雷达测量，以对这一地区可能发生的地面沉陷作长期监测。

2. 探测矿区的地下硐室和矿山巷道

在许多老的矿山基地，由于开采而遗留下地下硐室、洞穴或老窑。它们会导致地面沉陷，从而给矿区的生产安全、地面上的公共设施和人民生命财产造成严重的威胁。因此，在开采区，地下硐室的探测已成为一项重要任务。物探方法在这一领域可发挥重要作用。

国内外的资料显示，地震方法，特别是高分辨率地震反射法，电阻率法和一些放射性方法等可用于矿山开采中的地下废巷道、硐室等洞穴的探测，并且取得了较好的实际效果。

美国科罗拉多大学利用地震方法对探测和定量描述废弃的煤矿巷道进行了理论研究和实际探测。理论研究表明，三种物理效应使地震方法完全适用于洞穴的探测：①洞穴的直接反射或散射；②由洞穴共振诱发的二次反射或散射；③应力诱发的速度效应。其中第三种效应是相对新的研究成果，它已得到实际观测结果的验证。这一效应的实质内容是：空洞的存在会大大影响到其周围的原始应力分布而诱发速度的变化。由于洞穴周围的侧向挤压增强，使得洞穴上方传播速度增大。这样，用地震测量便可探测出地下洞穴。研究人员由美国中西部三个煤矿区作了野外测量。地下巷道的直径为 1～3 m，位于 10～30 m 深度的煤层中，既有空的也有充水的。用该方法取得了较好的探测效果。

美国堪萨斯州地质调查所等单位利用浅层高分辨率地震反射法探测煤层内的洞穴。在堪萨斯东南的浅部采煤区（煤层深度 7～10 m，厚度 0.6～1.0 m）曾进行房柱式开采，煤层采空后形成地下洞穴，易产生地面沉陷。他们用地震反射法确定洞穴位置。在 12 次覆盖的共深点剖面上，可以明显地看到，洞穴与煤层相比，波的振幅较低、频率较高、相干性差、信噪比低，二者易于区分。地震测量结果得到钻探的证实。此外，在另一个实行水采的盐矿（盐层深 120 m，厚 60 m）上，直接探测到了地下 50 m 深处岩盐溶蚀形成的洞穴。

煤炭部科学研究院从 80 年代开始用二维自动地电阻率系统探测地下废巷道、洞穴等。在门头沟区，由于小煤窑开采时代久远，地下老窑分布范围大，一般距地表 40～100 m，最深达 160 m，形成复杂的窑口、窑道和采空区。针对复杂的地质情况，在施工中合理地布置测量装置，采用单极-偶极测量装置。用统计平均剔除法校正地表不均匀的影响并用拟断面图进行资料处理解释。根据处理解释结果定出了研究区内（1.8 km^2）的老窑分布。为验证解释结果，专门设计了验证孔，结果两个验证孔分别在约 60 m 和 45 m 的深度见到老窑采空区，表明该方法的探测效果良好。

3. 确定水库区、湖区、河床堤坝的渗漏点和泄漏带

在岩溶发育地区兴建的水库、湖区以及坝区内，由于岩溶特征的发育往往会导致严重的渗漏或泄漏。为此，必须采用有效的方法寻找渗漏点，以便采取相应的补救措施。

一般而言，自然电场法、电阻率法可用来确定渗漏点或圈定泄漏带，并且效果颇为明显。在水库、湖区渗漏地点上往往出现明显的自电负异常，据此可快速地找到渗漏点。笔者曾在江西某水库使用自电法在库区查明了若干个渗漏点。电阻率法的使用应根据实际情况采用不同的排列装置。如在美国佛罗里达州中西部兴建了一些用于旅游、农业的人工湖。由于地处岩溶区，人工湖出现严重的泄漏现象。为此使用了电阻率测量。根据湖区的地质、水文和地形等条件分别采用了不同的排列方式，其中包括 Wenner 电剖面和测深排列、Schlumberger 排列和 Bristow 排列。测量结果显示出与线性裂隙（它们是引起湖区泄渗的原因）有关的异常，由此成功地探测到泄渗地带，这为后来采用的补救方案和措施提供了必要的信息。

第三节　山崩的防治

山崩是指陡崖经过长期的天然破坏，裂缝逐渐增多和增大，最后导致岩体崩塌的过程。它对于附近的建筑物、道路和航道等构成严重的威胁，因此有必要事先对岩体的破坏状况进行探测，以便采取相应的防治措施。

我国曾成功地利用地球物理方法探测长江三峡链子崖危岩体，为制订整治方案提供了重要的依据。链子崖危岩体位于湖北秭归县境内的长江南岸，此处历史上曾多次发生山体

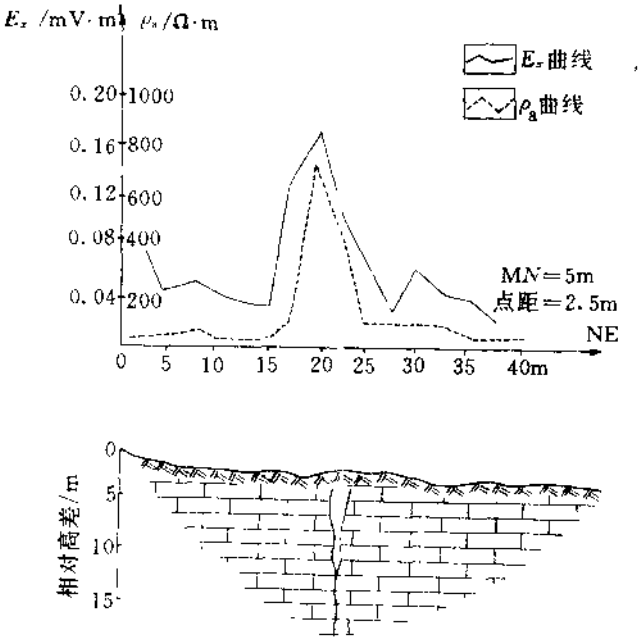


图 5 -3　一条隐伏裂缝的实测剖面

崩滑断航事件。该岩体南北长约 300 m、东西宽 100 m，陡崖北端临江处高达百余米。岩体内已发现大裂缝 30 余条。岩体上部为二叠系灰岩组成，其中有岩溶发育，陡崖底部为软弱的煤系地层。煤层经多年开采，形成许多老硐。监测表明，近年来岩体变形有加剧趋势，一旦发生崩塌，将会再次危及航道及上下游人民生命、财产安全。1989 年国务院批准立项整治。为了制定正确的整治方案，曾采用多种手段进行调查。

岩体部分为表土及植物覆盖，裂缝、岩溶带及老硐等从地表都难以查清。为避免加速危岩的破坏，钻探、硐探等也不宜较多布置，因此物探方法可以发挥较大作用。物探工作是由地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究所完成的。

圈定裂缝、岩溶带和老硐的主要物探方法为音频大地电场法，它用来测量频率在 20～20000Hz 间的大地电磁场的电分量，在隐伏的裂缝和空洞上，无论它们是否充填，都出现明显的电分量 E_x 和视电阻率 ρ_s 异常（见图 5-3），极距的大小是根据裂缝或空洞的大小通过试验而因地制宜地加以调整。该方法在链子崖查出宽度几厘米至几米的隐伏裂缝 5 条，地表明缝的隐伏段 13 处。推断出一条近南北向、长约 200 m、宽数米的隐伏岩溶发育带。这一推断引起了极大重视，在随后布置的距地表数十米的勘探平硐中，在所推测的岩溶发育

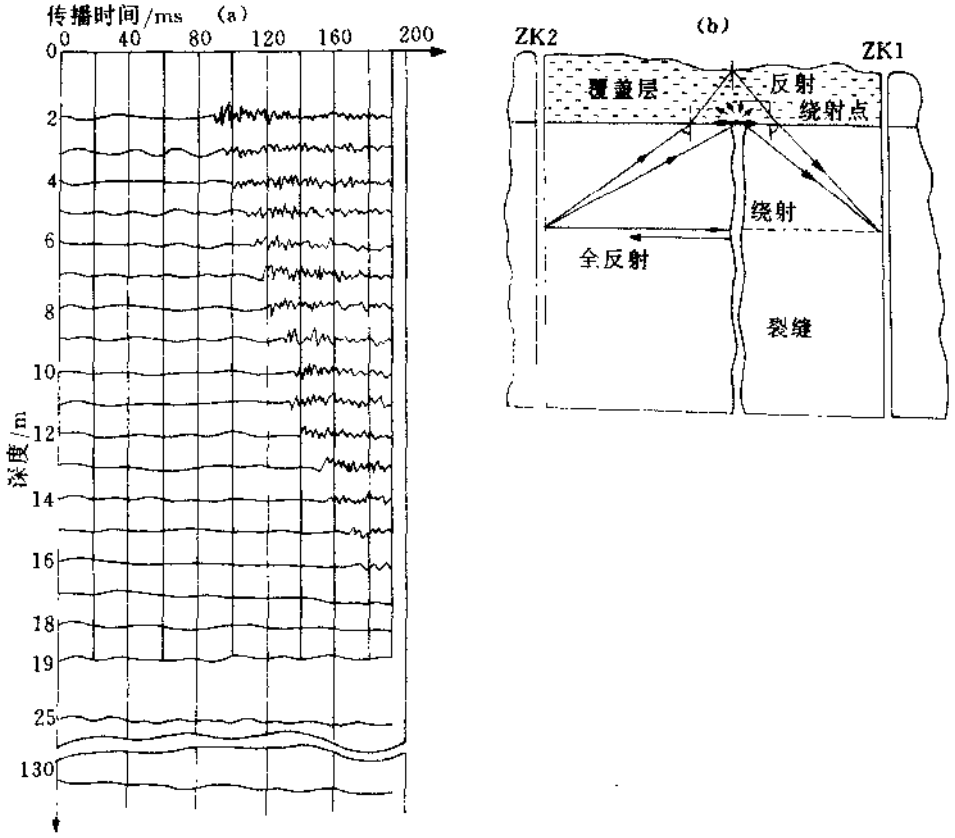


图 5--4

(a) 当发射和接收装置保持相同深度时，ZK 和 ZK_2 钻孔间的声波记录波形；

(b) 当两个钻孔间存在张开裂缝时声波的绕射和反射

带的位置上揭露出岩溶育竖井，水平截面 3.4 m×5.3 m，向下可见延深逾 20 m，证实了音频大地电场法成果的可靠性。

在评价危岩的破坏程度时，查明裂缝的下延深度是很重要的，为此作了井间声波测量。在一条裂缝的两侧布置了两个钻孔，ZK_1 和 ZK_2，在一个孔内用 GPZ-1 型振源激发声波，在另外一个孔中放置可贴壁的三分量检波器进行接收，从孔口（或孔底）开始，以一定点距同步发射和接收信号，结果发现 2～16 m 井段可以接收到可靠的信号，但走时逐渐拉长、振幅逐渐减小。从 19m 以下，完全无法辨认波形，再往下直至 130 m 均收不到信号（见图 5-1(a)）。如果两孔之间没有裂缝，在 2～4m 深度内（覆盖层），接收信号应最小，走时最长，因为低速覆盖层对弹性波的衰减大于基岩，在进入基岩后振幅应增大而走时缩短。实测结果与此相反，由此推断，在 5 m 以下，从基岩顶部开始便存在至少一条以上张开裂缝，5～17 m 接收的信号是通过覆盖层绕射或从地面反射至接收点的（见图 5-4(b)），故裂缝至少贯穿到 150 m，以上推断得到了室内模拟实验的证实。

第四节　地裂缝调查

我国已在 7 个省（自治区）200 个县市发现地裂缝 700 余处，由于它对地面建筑产生严重危害，已经引起各方面的关注，其中尤其是西安的地裂缝更加令人瞩目。因为西安是闻名中外的历史名城，我国建都时间最长的地方。

西安已发现十条地裂缝带，总体走向北东，间距 2～2.5 km，长度一般为 3～4 km，最长的约 8 km，近似平行等间距分布在城区和近郊区的 150 km^2 范围内。由于其不断活动，据不完全统计，截止到 1989 年底已破坏各种房屋 300 多处、路面 30 余处，给城市建设带来巨大危害。

随着对西安地裂缝调查工作的深入开展，地裂缝的成因成为地学界研究的重要问题之一。为此，水文地质工程地质技术方法研究所采用高分辨率地震技术，为研究地裂缝成因机制提供了地球物理论据。

地震数据采集使用美国 INPUT/OUTPUT 公司 Mini-Sosie DHR-2400 车载数字地震仪，以 Waker 公司的夯机作为震源，数据在现场进行实时相关处理，提高了抗环境振动干扰的能力，为在城市开展地震勘探创造了有利条件。

西安市第四系地层平均厚度约 600 m，其中存在着可连续追踪的 6 组地震反射标准层（t_1～t_6），t_5 存在于新第三系的顶部。结合钻孔及地质资料，已经掌握反射标准层与地层之间的对应关系。

在穿过西安十条地表地裂缝带的地震剖面上，均显示出地裂缝带下方存在着第四系断层。就其产状而言，均为南倾高角度正断层，上盘（南侧）下降，下盘（北侧）相对上升。地面见到的地裂缝带的产状和位置与断层是一致的。

根据地震探测结果可以认为，西安地表地裂缝带实际上就是第四系断层向上延伸至地表的结果，即断层在地表的露头。进一步说又是从第三系下部的断层，不断继承性向上延伸的结果。今后西安市重要工程选址应先开展地震勘探工作，查清拟选场地内及其周围的隐伏第四系断层，以便使工程避开这些断层。

第五节　泥石流的治理

一些河流的两侧多由松软的土和岩石组成，形成许多碎石堆沿山坡和河床缓缓移动，成为滑坡。雨、融雪渗入岩石以及有些滑坡物质盖住泉水都会使岩石进一步松软，一旦大雨来临，这些物质就呈悬浮状沿河而下，逐渐带动较大的石块，形成泥石流。

为了制订治理的规划，必须对泥石流的补给源进行调查，地球物理方法在这项工作中可以起到很大的作用。例如，格鲁吉亚的杜卢日河曾多次发生灾难性泥石流，特别威胁着一个叫克瓦列里的城镇。为此，沿岸修建了一道很长的防护石坝，经泥石流的冲刷已逐渐损坏。因此，必须对该河从河源至下游的所有泥石流补给源的分布、补给材料的厚度与规模进行全面的调查，以便采取措施控制补给源。

在该地采用电测深法，确定补给区的地质结构和疏松沉积物的厚度以及堤坝设计地区冲积层的厚度。由于地形复杂，主要采用 $AMON$（B上）电测深装置，最大 AO 为 100 m，B 垂直于 $AMON$，相距 250 m。在河湾地区采用对称测深装置（$AMNB$），最大 AB 为 500 m。根据杜卢日河一条支流的电测深结果，作出三层地电剖面：第一层厚 11～20 m，电阻率1000～3100 Ω·m，相当于潮湿、但局部干燥的坡积层；第二层厚 20～24 m，电阻率500～800 Ω·m，相当于潮湿而局部含水的坡积层；第三层电阻率 200 Ω·m，是里阿斯统的泥质页岩。

第六节　土地盐碱化调查

在农田灌溉当中，如果排水不畅，就会引起次生盐碱化。航空红外摄影、航空和地面电法是探测次生盐碱化的有效方法。例如，在原苏联中亚的“饥饿”草原，主灌渠两侧由于地下水面的上升发生次生盐碱化，其视电阻率较低（6～10 Ω·m），但在淡水从渠中漏失的地段也出现局部的脱盐带，其电阻率明显升高（15～30 Ω·m）。在原苏联的土尔盖地区将土壤按含盐度分为五类（表 5－6）。

表 5—6　原苏联土尔盖地区土壤含盐度分类

土壤分类	含盐度/%	电阻率/Ω·m
不含盐	<0.2	>12
弱盐化	0.2～0.3	7～12
中等盐化	0.3～0.6	3.3～7
强盐化	0.6～1.0	2.5～3.3
极强盐化	>1.0	<2.5

在澳大利亚广大地区，尤其是西澳，由于农田开垦和灌溉，地下水面上升，使土壤深层的盐到达地表，导致盐碱化。盐碱化每年给澳大利亚带来的经济损失超过 1 亿澳元。为此该国政府将 90 年代定为土地治理十年，并投出 32 亿澳元执行土壤改良计划。为了解盐碱化的分布和区域水文地质条件，世界地学公司曾开展航空磁测和电磁测量。航磁用来了

解地质构造，结果表明西澳广泛发育粗玄岩墙，高盐区往往位于岩墙的上坡，岩墙起到挡水作用。航电主要了解盐的分布，采用 QUESTEM 系统，频率 75Hz，飞行高度 120 m。在联邦和西澳州政府的资助下，世界地学公司、联邦科学和工业研究组织（CSIRO）联合研制了一种新的专用航电系统——SALTMAP，该系统的特点是可高分辨率探测表土的电导率分布，带宽大（采用重复频率 500 Hz 的方形波，频率上限达 50 kHz），接收三个分量，实现高速信号处理便于压制干扰。

研究发现，土壤含盐度与室内、野外测定的电导率之间呈正相关关系。表 5--7 列出澳大利亚的含盐度分级及其与作物根部土壤电导率之间的关系。

表 5—8 将含盐度与农作物的产量联系起来。

表 5-7 澳大利亚土壤含盐度分类

含盐度分类	根部土壤含盐度			具有相应耐盐力的作物分类
	固溶物总量/10^{-6}	$\sigma_{EC_{1:5}}$/（dS·m^{-1}）	σ_{EC_e}/（dS·m^{-1}）	
低	<1800	<0.60	<3.8	不耐盐作物（如苜蓿）
中	1800～3000	0.60～1.00	3.8～6.5	中等耐盐作物（如小麦）
高	3000～4000	1.01～1.35	6.6～8.6	高耐盐作物（如粟）
极高	>4000	>1.35	>8.6	特高耐盐作物

注：$\sigma_{EC_{1:5}}$——用 1 份土壤：5 份水的萃取液测定的电导率；σ_{EC_e}——用饱和萃取液（$6.4\times EC_{1:5}$）测定。

表 5—8 土壤含盐度与作物产量的关系

σ_{EC_e}/（dS·m^{-1}）	多年生牧草	一年生牧草	大、小麦	粟	蚕豆
<1.8	100～95	100～95	100	100	100
1.8～3.8	95～80	95～75	100	100	100～80
3.8～6.5	80～55	75～50	100～90	100	80～55
6.5～8.6	55～35	50～25	90～75	100～80	55～35
>8.6	<35	<25	<75	<80	<35

我国长春地质学院等单位也曾研究用电（磁）法和农业化学样品分析相结合的办法进行区域性盐碱化调查。他们提出，表层电阻率受土壤含水量和温度的影响很大，必须进行改正。研究结果表明，在温度不变的条件下，土壤含水量从 10%变到 25%时，视电阻率大约变化 50%；在含水量不变的条件下，温度每变化 1℃，土壤视电阻率约变化 2%。根据大量试验的结果，可求出不同含水量和温度的视电阻率改正公式。通过测量和改正获得表层视电阻率后，可将其换算为土壤含盐量、阴离子浓度和 pH 值，这要求在测区内一些具有代表性的地段上测量土壤视电阻率并进行农业化学样品分析，用数理统计方法求出土壤视电阻率与上述三者的关系式，然后将这些关系推广到全测区。

第七节 沙漠化的治理

沙漠化是许多国家面临的共同问题，而我国的这个问题显得尤其突出，荒漠和戈壁的

面积已达到 170 万 km^2，占全国土地的约六分之一，沙漠化仍在扩展。据估计由土地沙漠化每年所造成的经济损失约 4.5 亿元，给生活在沙漠化地区人民的生活带来严重的后果。

室内实验证明，有可能利用电渗现象在具有典型沙漠化土地特征的沙质土壤中改变水的天然运移并使之保持在一定层位土。采用这种方法可以为植物的生长创造更好的条件，将土壤中的水集中在作物根系发育的层位，限制水向更深的层位渗透。

将直流电通入孔隙介质可以引起隙间水的层状运动，移向阴极，这种现象可以用卡萨格兰德定律表示

$$Q = k_e SV/L \tag{5.1}$$

式中 Q 为由电渗现象引起的水流速度；S 为电渗现象所涉及的土壤断面面积；V/L 为电位梯度；k_e 为电渗渗透系数。

建立了开展实验的室内模型，用来模拟在典型降雨条件下的活动沙丘的一部分。在模拟降雨之后，利用放在模型内不同深度上的水平电极向土壤通直流电，用不同的间接测量方法监测湿度的分布，其数据与不通电时所取得的实验结果进行对比，发现在阴极周围积累了大量的水。

图 5　5 的曲线表示用两种不同方法测得的通电与不通电结果的差值。在阴极带出现最

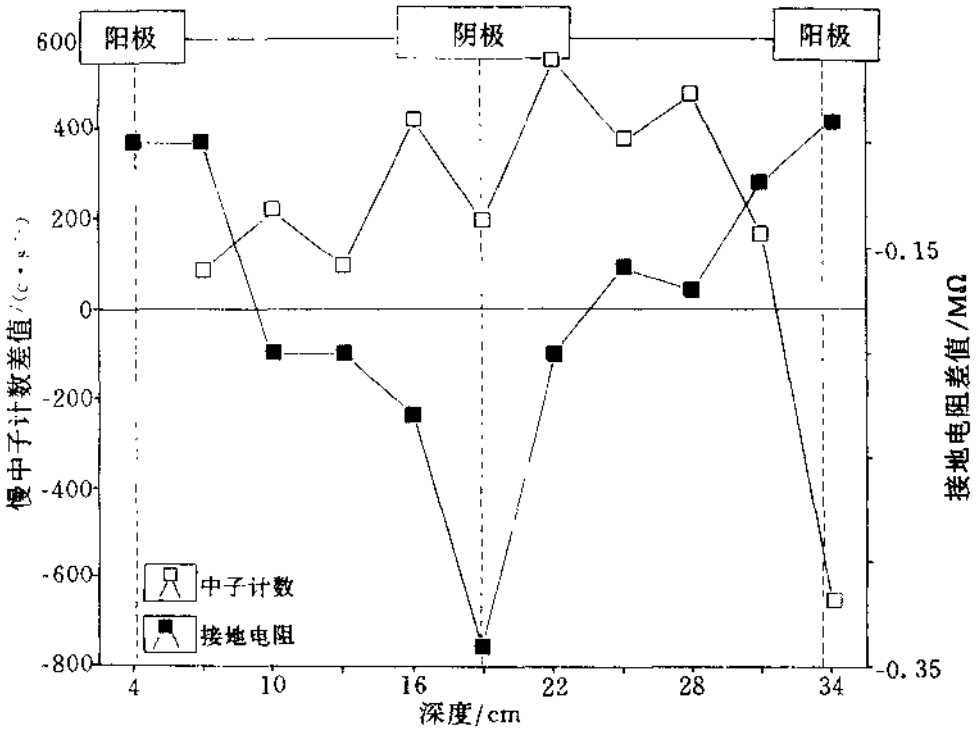


图 5　5　在电渗现象的作用下不同深度上水的分布

小值的曲线对应于垂向电极排列的接地电阻值，另外一条曲线则在阴极带出现高值，表示慢中子计数，正比于中子探头测得的含水量。

两种方法都定性地证明电渗法在治理土地沙漠化方面的有效性，电渗法所需的电能较小，却大大增加了作物在沙漠地区成活的可能性。

第八节　旱灾的治理

在为制订旱灾治理规划而开展的调查中，地球物理方法也可以发挥作用。在印度安得拉邦的许多地区，近年来出现严重的旱灾。为了治理旱灾拟采取水土保持和回灌措施，这就要求了解该区的土壤厚度、风化壳厚度和基岩起伏，为此尼赫鲁工学院在安得拉邦的典型缺雨区进行了系统的电阻率测深。

测区为 Burgul 河流域，下伏为太古代花岗片麻岩，有岩脉穿插。测深采用施伦贝尔热排列，最大供电电极距达 200 m，此时电测深曲线已与渐近线重合。为避免地形的影响，测线垂直于斜坡方向布置。所得测深曲线多属 A 和 H 型，表示大地的三层性质。第一层的电阻率从 10 Ω·m 变化到 200 Ω·m，这一变化可能是由土壤盖层中以及在粘土和砂的混合物中含水量不同引起。代表风化层的第二层，电阻率也从 20 Ω·m 变化到 140 Ω·m，从已有的井孔剖面来看，这与风化程度、粒度和含水量有关。第三层为未风化的花岗片麻岩。

根据测深结果，以 0.5 m 和 5 m 的间距分别绘制了土壤厚度和基岩深度等值线图，从图上可以看出，土壤厚度从 0.5 m 变至 4 m。而基岩深度从 5 m 变至 30 m。将土壤厚度小于 1 m 的地区划分出来，它们位于测区的北部、西北部和南部，这里应当采取水土保持措施。另外，还将基岩深度超过 25 m 的地区划分出来，它们位于测区中部和西南部，这些基岩深度大的地区将被选作人工回灌的地区。

为了识别风化带厚度的变化和含水破碎带的存在，以便圈定可能的含水层，还作出了地电断面。

第九节　地面沉降的监测[1]

我国 30 多个城市，由于地下水的抽取量大于补给量，发生地面沉降现象。地面沉降的下均匀性，给城市建设带来潜在的危害，因此已引起有关城建部门的注意。

关于地面沉降造成的年经济损失，根据地质矿产部有关单位对宁波市的统计，1983～1987 年为 5.3 亿元，年平均 1.06 亿元。宁波市的累计沉降量还是偏小的，仅 252 mm，所以损失也是较小的。如与同期其他城市的资料相比，天津市区最大累计沉降量已达 2600 mm，沉降面积也大得多，故损失更大。如 1977 年 7 月底一次积水就造成直接经济损失 2 亿元；1985 年 8 月 19 日潮水越堤，短短几小时造成的直接经济损失即达 8000 万元。因此，综合考虑，全国城市地面沉降造成的年直接经济损失不下十几亿元。

目前监测地面沉降的方法主要是精密水准测量，由于它的效率低，所以监测费用较高。利用重力测量可监测地面沉降，它与精密水准测量配合，可大大减少后者的工作量。同时，

[1] 本节内容主要引自华昌才等在北京地球物理学会论文集 1995 年第 3 期发表的有关论文。

还能了解地下物质（主要是地下水）的变化情况。众所周知，重力随高度的正常变化，1 m 就有 3 g.u. 左右，再消除中间层物质的影响，仍有 2 g.u. 左右的变化。也就是说，地面沉降 1cm，可以引起 0.02g.u. 的重力变化。目前，利用 LaCoste-Lomberg 重力仪，观测精度可达 0.1 g.u.。因此，监测地面沉降大于 5 cm 引起的重力变化是可行的。不过要注意对测点进行纬度改正，因为沿南北方向移动 10 m，即可引起 0.06～0.08 g.u. 的重力变化。国内在天然地震预报工作中，布置了区域性的重力监测网，已在不少地区发现明显的重力增大趋势，是由地面沉降造成的。

国家地震局在上海、苏州、昆山布设了重力测网，主要目的是调查上海及其附近地区地面沉降和重力变化的关系。该网的基点设在佘山地震台，选在基岩上，并和绝对重力点联测，用重力仪读数时非常稳定，几乎无人为因素干扰。通过从 1987 至 1990 年的观测，发现昆山重力点相对重力值增大了 0.2 g.u.。相反，上海杨浦区原为典型的沉降区，由于较早开展回灌，使地面沉降得以控制，所以多年重力观测未曾发现超过误差范围的重力变化。在哈尔滨地区也布置了观测网，并以绝对重力观测点为基点，观测到 0.35 g.u. 的重力变化。陕西省地震局在西安经 7 年观测，发现重力值变化 2 g.u. 之多，主要是由地面沉降引起的。

从含水层抽取地下水，地面下沉 Δh，显然重力的增大是由两种因素构成的。一是地面重力观测点点位高程下降引起的 Δg_1，二是由 Δh 厚的地下水流失造成的重力变化，即中间层变化引起的 Δg_2。

$$\begin{aligned}\Delta g &= \Delta g_1 + \Delta g_2 \\ &= 0.3086\Delta h - 0.0419\sigma\,\Delta h \\ &= 0.2667\Delta h\end{aligned} \tag{5.2}$$

式中 Δh 单位为 m 时，则 Δg 的单位为 $10^{-5}\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2}$；$\sigma$ 为水的密度，即 1 g/cm³。将式（5.2）换算为法定计量单位，则得出

$$(\Delta g)_{\mathrm{g.u.}} = 2.667(\Delta h)_{\mathrm{m}} \tag{5.3}$$

Δg 的单位为 g.u.，而 Δh 的单位为 m。

总之，用高精度重力测量监测地面沉降，效率高、成本低，具有广阔的应用前景。

第十节　煤层自燃的监测

煤层自燃是由于自燃物质在一定条件下发生物理化学变化，聚积热量而导致燃烧的。地下煤层燃烧不仅白白浪费大量宝贵资源，而且也威胁煤矿的安全生产。例如，我国新疆每年煤田自燃煤炭 1 亿 t，经济损失达 30 亿元。

一般煤层发生自燃的基本条件为：

（1）具有低温氧化特性（即自燃倾向性）的煤呈碎裂状态存在；

（2）通风供氧使煤的氧化过程不断发展；

（3）在煤的氧化过程中生成的热大量聚积，难以及时疏散。

影响煤自燃倾向性的因素主要为其变质程度、水分、硫分、煤岩成分及粒度。一般情况下，低变质、少水分、丝煤和镜煤多、含硫量大而粒度小的煤，自燃倾向就高。煤的自燃实际上是煤自身氧化加速的过程，其氧化速度快到使产生的热量来不及向外扩散的程度

时，就会形成自燃。

要想有效地治理这一灾害和化害为利，首先要了解火区的大致范围。为此，河北煤炭科学研究所曾经利用氡气测量。

利用氡气测量的原理如下：煤层发生自燃时，温度均高于280℃，在高温高压的条件下，地下气体，包括氡气，向地表运移的速率会加大。水溶解氡的程度通常与周围气体含氡量呈正比，当周围气体的含氡量不变时，氡在水中的溶解度随着温度的升高而降低。例如，在0℃时，氡在水中的溶解系数为0.510，而在100℃时仅0.108。因此，当地下存在热源时，可降低岩石中孔隙水溶解氡的数量，从而增加了从地下向上迁移的氡的数量。氡在水中的溶解系数还取决于水的矿化度，水的矿化度越高，氡在水中的溶解系数越低。当地下存在热源时，由于布朗运动使水的矿化度增高，也使部分氡从水中分离出来而向地表迁移。在火区上方由于煤的燃烧产生大量CO、CH_4、CO_2等气体，其浓度相应增加数倍乃至上百倍，还产生大量水蒸气。这些气体不但成为氡向上运移的载体，而且使地下的镭元素被水蒸气和其他气体携带向上运移，这也是自燃区上方氡量升高的原因之一。

此外，煤层自燃大多发生在采空区、遗留的煤柱、破裂的煤壁及浮煤堆积等地点，其中以煤柱的自燃现象最多见。煤柱燃烧到一定程度，会支撑不住顶板的压力而坍塌，其破碎程度显然大于正常地层，破裂的范围可以看作一个大“集气杯”，即上小下大的柱体，柱体内的气体运移通道优于柱体外，这就导致煤柱内外的氡气浓度差异。

因此，通过地面氡气测量可以大致确定火区的分布范围。

用物探方法还可以确定过火区的范围，即经过燃烧后的煤层范围。实验表明，经过燃烧的岩石会具有磁性，经过烘烤再冷却后的沉积物，其磁化强度可增长6000倍，离燃烧面最近的岩石磁性最强，而且不一定要求温度达到居里点。有的样品加温到200℃再冷却后即可获得强磁性。根据在美国西部一些煤田的磁测结果，在燃烧带上测到几百nT的磁异常是常见的。

第十一节　采矿过程有关灾害的监测与预防

一、岩爆的预测

岩爆是一种极为常见的矿山地质灾害。深部岩体在高围压作用下变形所积聚的大量弹性能，在人工开挖巷道时，会急速释放出来，造成岩石突然爆裂和坍塌。

近年来为了进行岩爆预测，已作过大量研究，例如美国矿山局曾利用三维地震层析成像方法来了解矿山的异常应力状况，圈出应力集中和应力释放区。在美国南达科他州著名的Homestake金矿深逾2000 m的巷道内就曾进行过此类研究。利用原有的岩石锚杆来布设检波器并且作为震源的激发点，震源采用8磅（约3.63 kg）大锤，在不同深度的巷道间测量纵波的传播时间。在解释纵波速度与应力、应力和微震活动性的相关关系，以及利用观测结果评价岩爆发生的风险性时考虑到了多种因素。过去对“应力”一词理解得比较泛，没有将静水应力和差分应力区别开。实际上纯静水应力既不可能使微地震活动性加剧，也不可能使岩爆的风险性增大。相反，差分应力大，既会促进新裂缝的形成，又会沿原有的裂缝产生位移。因此，纵波速度最高的部位并不见得是微震活动性最强的地方（根据观测确实也不是），也不见得是岩爆最有可能发生的所在。

总的来说，波速的梯度可以解释为对应于应力梯度、或差分应力。这一点与观测结果是一致的，即微震集中于波速中等，但波速梯度较大的部位。因此，纵波速度梯度对岩爆灾害来说是比波速本身更有效的标志。

为了了解掌子面前方的异常应力分布，预测灾害的发生，还采用了差分层析方法，即从不同时间所测得的波速值中减去某一基准时间所测得的波速值，从而突出波速随时间的变化。采用这种办法可以清晰地看出应力所引起的波速分布随时间的改变。

为了预报岩爆发生的位置和时间，原苏联、美国和波兰等国还相继研制出试验性的声辐射监测系统，利用岩石破坏过程中产生的天然声辐射进行预测，以声脉冲能量的突然增大和脉冲时间间隔突然减小作为岩爆发生的前兆。在原苏联北乌拉尔的一个铝土矿上利用岩压自动监测系统，得以在 20～30d 之前预报出岩爆发生的地点，并且在岩爆发生前 6～8h 成功地作出短期预测。

德国的鲁尔大学等单位还研究了利用重力法预测煤矿岩爆的可能性。因为岩体扩容作用的发展会引起随时间变化的异常重力场，不同时间测得的重力异常的差异及其随时间变化的趋势，可以作为岩石稳定性变化的前兆。根据异常差值的奇异点位置则可确定岩石密度变化带的中心。

最后值得指出的是，利用天然声辐射测量预测岩爆的作法，在原则上同样可以用于山崩的预测。事实上岩爆和山崩同属岩石逐渐遭到破坏、裂隙不断发育，最后导致岩石突然坍塌的过程，而裂隙的发育同样引起声辐射。不同之处仅在于，岩爆是岩石受人为破坏的结果，而山崩是岩石受天然破坏的结果。

二、陷落柱的探测

当煤系地层的底板为灰岩而且岩溶发育时，溶洞上方的煤系地层常常坍塌，形成煤层中的陷落洞，这些陷落洞随后又可能被其上方崩落的致密岩石充填，形成陷落柱。其规模有大有小，小者直径仅数米，大者可超过百米。陷落洞及随之形成的陷落柱常常是地下水的通道，有可能在采煤过程中导致突水，淹没矿井，造成巨大损失。例如，1984 年开滦矿务局范各庄矿某工作面因遇陷落柱而造成突水，殃及四个大型矿井。陷落柱又是目前综合机械化采煤作业的主要障碍之一，往往导致综采作业的中断和采煤机械的损坏。如邢台矿务局车庄煤矿某工作面，在掘进中遇到陷落柱，不得不后退 60 m，另开切眼进行回采，因此丢失大约 6 万 t 煤。目前尚缺乏探测陷落柱的有效手段，不同单位利用不同的地球物理方法进行试验，都取得一定效果。看来，采用综合地球物理方法进行探测是有必要的。

1. 地震法

目前已有人开展过三维地震探测陷落柱的可行性研究。结果表明，只要矿区具备地震勘探的施工条件，煤系地层能够产生足够强的反射波，就可以应用三维地震方法探明陷落柱的位置和形状。在陷落柱存在的地方，煤系地层同相轴发生明显变化，阻抗界面的凹陷导致同相轴的下凹，反射波的振幅也变低，振幅极小值与陷落柱中心相对应。为了提高探测的分辨率，北京西山矿务局科研所等单位还进行了利用地震层析成像探测陷落柱的物理模拟试验。试验结果表明，现有地震层析成像技术可以准确确定煤层中陷落柱的有无及其分布范围。

煤炭科学研究院西安分院曾利用槽波透射法探测陷落柱的位置。槽波是在煤层中激发、通过同一煤层传播、衰减或反射，并在同一煤层中被接收的地震波。由于煤的密度和波速

基本上等于围岩的一半，因而在煤层内激发的弹性波大都集中在煤层内传播。槽波可以用来探测煤层的不连续性。

槽波地震法根据其震源和接收点的相对位置不同而分为透射法和反射法。当震源和接收点位于工作面同一侧进行探测时为反射法，当震源和接收点位于不同侧，接收透射波时为透射法。在某煤矿的巷道—钻孔、巷道—巷道、钻孔—钻孔之间进行了槽波透射探测，发现了两块低速异常区D和E，速度值仅1472 m/s。其中D异常与工作面揭露的8号陷落柱位置对应。E异常为球形，也解释为陷落柱，并已用其它方法证实。由于水的波速是1400 m/s，而陷落柱的波速是1472 m/s，故推断陷落柱内的充填物胶结性不好，松散，富含水。将该资料提供给煤矿，避免了灾害的发生。

2. 高密度电法

河北地质学院曾在邢台矿务局葛泉煤矿开展了高密度电法探测陷落柱的野外试验工作。结果表明，应用高密度电法及有效的数据处理方法，可较好地解决煤田陷落柱的探测问题。

该矿区已发现陷落柱19个，从井巷揭露的情况来看，陷落柱的长轴最大者为172 m，最小者28 m，长轴方向多数为北西向，柱顶多数发育到基岩顶面，少数发育到第四系冲积层。柱体由形状不同、大小不一、岩性各异的杂乱堆积物组成，经胶结压实，多数比较致密而无水。在本区曾开展了脉冲电磁法的野外试验，由于陷落柱无水，呈高阻反映，因此激励的二次场非常微弱，再加上该地区较强的电磁干扰，使脉冲电磁法的效果很差。

高密度电阻率法，同常规的电剖面和电测深法相比，既能提供地质体在某一深度沿水平方向电性的变化情况，也能反映地质体沿垂向在不同深度上的电性变化特征。在资料处理过程中，可采用多种参数进行综合解释。因此该方法弥补了常规方法测点密度稀和解释单一的不足。

在高密度电法中，可以选用多种采集系统，但由于本区要求探测深度较大，而偶极及差分采集系统适应于浅部勘探，故只能选择施伦贝尔热及温纳采集系统。由于本矿区接地条件较差，使供电电流小，再加上严重的电干扰，若MN太小就难以提高信噪比，所以最终选择了温纳高密度采集系统。

由于地电干扰大和地表存在较厚的砾石层，使野外数据采集质量难以保证。为此必须对原始数据进行滤波处理。从滤波角度，将实测的$\bar{\rho}(x)$看成是有用信号$\rho(x)$与干扰信号$\rho'(x)$之和，即

$$\bar{\rho}(x) = \rho(x) + \rho'(x) \tag{5.4}$$

从而得出

$$\bar{\rho}(\omega) = \rho(\omega) + \rho'(\omega) \tag{5.5}$$

式中$\bar{\rho}(\omega)$为实测值的频谱，$\rho(\omega)$是有用信号$\rho(x)$的频谱，$\rho'(\omega)$是干扰信号$\rho'(x)$的频谱。结合本区具体情况，$\rho(\omega)$反映为低频特征，而$\rho'(\omega)$反映为高频特征，因而对原始数据采用低通滤波器进行了处理。

3. 高精度磁测

中国地质大学曾使用IGS-2/MP-4便携式和台站式质子旋进磁力仪在山西霍州煤矿区进行了高精度地面磁法探测陷落柱的试验，测量地磁场的总强度及其垂直梯度，对测量数据进行了日变改正和正常场改正。日变改正由仪器自行完成，台站式磁力仪的采样间隔为

20 s。

从总强度异常图上可见，陷落柱所产生的磁异常强度普遍较低，与陷落柱周围相比，通常要低 20～40 nT，形成明显的低谷状磁异常。低谷的中心与陷落柱的中心重合，依据陷落柱的这一磁异常特征可直接判断陷落柱的位置和规模，而根据总强度垂直梯度异常可以圈出其边界。此外，对陷落柱总强度异常曲线进行圆滑处理后，可求取柱体深度。根据已有的陷落柱物性资料和矿区钻探资料，提出了理论模型，经正演计算，理论异常值与实测异常值吻合较好。

三、突水的预测和治理

突水又称灾害性涌水。当矿山巷道在施工过程中，穿过充水溶洞发育的地段、厚的含水砂砾石层、与地表水连通的较大断裂破碎带、积水老硐等时，会发生大量涌水的突发事件，使矿山被淹没。因此，为了预防突水，就需要事先查明含水地质体的位置。有时，矿山已经发生突水，需要查明突水位置，以便采取堵漏措施。

郑州地质学校曾经利用天然电场选频法成功地发现了煤矿的充水坑道。天然电场选频法是音频大地电磁法的一种，它以天然大地电磁场作为工作场源，测量天然大地电磁场的几个不同频率在地面产生的电分量异常，来研究地下地电断面的电性变化。选频的目的在于：(1) 提高抗干扰能力，压制工业电的干扰；(2) 不同频率获得的异常曲线可以互相对比，增加资料解释的可靠程度；(3) 不同频率的电磁波勘探深度不同，可以利用不同频率获得的异常曲线粗略估算异常激励体的埋深。选用的工作频率为 170、67 和 25Hz。在野外工作中，MN 测量电极既可平行测线方向、亦可垂直测线方向，或者依次平行和垂直测线测电位差，再换算为电场强度分量 E_x 和 E_y。

河南密县王村煤矿的煤层产于二叠系中，矿区第四系覆盖厚度约 40 m。在开采过程中，因遇到断层，该矿坑道被水淹没。为了在地面确定充水坑道位置以便打钻堵水，首先进行了钻探，打了 6 个钻孔未能找到坑道位置。后来投入天然电场选频法，确定出充水坑道位置，经钻探验证在 36.8 m 处见到坑道顶板，在 38.3 m 处见到坑道底板。根据观测结果灌入水泥，堵水成功。

近年来，中国矿业大学对利用以巷道高密度电法为主的综合物探方法预测突水的理论和工作方法进行了系统研究。

四、瓦斯突出的预测和治理

煤矿瓦斯突出迄今仍然是威胁煤矿安全生产的主要灾害之一，我国瓦斯突出灾害每年造成的经济损失在 10 亿元以上。

通过地质勘探阶段的钻孔，可以了解煤层瓦斯的赋存状况，但由于钻孔孔距过大，一般为 500～1000 m，对指导煤矿日常安全生产缺乏实用意义。因此，近年来开始研究煤矿瓦斯富集带预测技术，就是在煤炭开采之前，在地面开展高密度、高精度的地球物理和地球化学探测，预测出瓦斯富集带。该项技术包括高分辨率地震、频谱激发极化、电导率成像和气体地球化学测量。

地震探测采用高密度高分辨率多道地震采集、高精度和高分辨率处理以及人机联作岩性剖面解释的地震勘探系统，利用地震纵波、横波和转换波取得有关煤层、煤层构造、煤层顶底板岩性、裂隙、孔隙度、瓦斯聚集带的一系列信息。这套地震探测系统不仅研究包括落差仅几米的断层在内的构造，更重要的是研究岩性、孔隙度变化和裂隙发育带等导致

瓦斯富集的条件。

瓦斯垂直向上运移使上覆岩层的物理、化学性质发生变化，在近地表处形成次生的硫化矿物晕，因此可以采用谱激发极化方法预测瓦斯富集带。

电导率成像技术通过连续电导率剖面测量探测煤层顶底板岩性、裂隙发育程度，进而预测瓦斯富集带，瓦斯富集带在电性上表现为高阻。

瓦斯及存在于其中的其它气体（如汞）上移到近地表，或被土壤吸收、或逸散出地表，形成气晕异常。因此采用气体地球化学测量，在地面探测由地下逸出的微量烃类气体和汞蒸气等，可以预测煤矿的瓦斯富集带。

上述几项探测技术，形成煤矿瓦斯富集带预测的技术系列，在实际预测中则因地制宜选用两种或两种以上方法的组合，以减少多解性，提高预测的可靠程度。

在煤矿上，为了减少发生瓦斯爆炸的可能性，有些国家采用事先排气的办法，即在采煤之前，先从掌子面将煤层中积存的瓦斯排出。排气时从掌子面向煤层内打钻，使瓦斯渗入钻孔，然后抽出。实验证明，用这种办法50%的瓦斯可以安全排出。

由于煤层不全是平的，所以打钻时不能直线钻进，而要随煤层起伏。为此采用液压钻头和专门装置，使钻进方向可根据需要改变。使用CdTe伽马射线探测器可以指示钻孔应如何偏移，而不必定期提钻，以保证钻孔始终在煤层内钻进。围岩一般比煤层放射性高，如果从煤层内部测伽马射线强度，则该射线强度与探测器同围岩之间煤的厚度呈反比。如果把CdTe探测器安装在钻头附近，就可以知道钻头在煤层中的位置，使钻头保持在煤层的中部。

CdTe为固态探测器、平均原子序数约50，密度为$6.5\times10^3\ kg/m^3$，对伽马射线有很好的阻止效果，可以在室温下工作。工作中采用三个CdTe探测器组成的阵列。CdTe适用于此项工作是因为：(1) 体积小，不必致冷；(2) 耐震动；(3) 作为高原子序数探测器，对几百keV的伽马射线很灵敏。探测器的电耗很低，不会引起电火花。

五、井喷的预防

地下流体压力超过静水压力20%或更高就属于过压，过压会导致井喷。对付过压可采用高密度泥浆或下套管。在未知地区，为了防止井喷，事先就可以采用高密度泥浆，但如果地下流体压力正常，这会导致泥浆大量渗入高渗透性层位，那里的油气就被挡在离钻孔一定的距离上，使试油的结果被歪曲。因此，预测过压带既有利于采取措施防止井喷，又有助于选用最佳工艺，避免重泥浆对正常压力和低压层位的不利影响。

根据测井结果，过压带的孔隙度高、密度降低，弹性波速尤其低。因此，可以采用共深点法地震反射测量来圈定过压带。工作中先通过统计处理求出正常压力地区波速与深度的关系曲线，然后将待研究区与正常压力区的波速-深度曲线加以对比，波速比正常值低可能是过压的反映。

在斯洛伐克东部新第三纪盆地拉斯托米尔的已知高压区作了试验，采用SN338A 48道数字地震仪做24次共深点覆盖，作为震源采用10 kg炸药，放在26 m深的爆炸孔内。该试验证实了所选用方法的可行性。

第六章　展望和结论

全世界和我国的环境保护工作都在迅速发展。“七五”期间，我国环境污染防治投资为577亿元，占国民生产总值的0.7%，而“九五”期间预计投资达到1800亿以上，占国民生产总值的1%，随着对环境保护工作的日益重视，到21世纪，我国在环境保护方面的投资将会继续明显增长。

在一些发达国家，环境地球物理的发展也相当迅速。国际大地测量与地球物理联合会（IUGG）将未来25年的研究主题定为“地球物理与环境”。可以预计，到21世纪初，我国的环境地球物理在工作量上将上升到与矿产地球物理同等重要的地位。

从环境地球物理所解决的任务来看，地下水污染调查将成为主要工作领域之一，而且主要将针对有机污染物。另一个主要工作领域将是区域性氡气灾害预测和放射性污染调查。随着人民环境和保健意识的提高，一些过去长期存在但未引起人们注意的“隐形杀手”肯定会引起广泛的关注。“九五”期间地质矿产部门决定在第二轮区域地质填图计划中将环境地质、灾害地质、城市地质等内容包括在内。在这些工作中地球物理同样是不可分割的一部分，预计会成为环境地球物理应用的又一重要领域。

目前在环境保护工作中，地球物理工作方法主要用于污染监测。今后除监测外要更多地转向治理，了解治理的进程及其效果，也就是说地球物理方法要用于从确定污染源位置、污染范围和程度，制定治理方案，评价治理效果，直到环境完全复原的全过程。

在灾害调查中地球物理工作的重点将从监测转向预防，即通过调查采取工程措施，从根本上防止灾害的发生或减轻其危害程度，尽量做到防患于未然。将灾害的监测、预报和治理工程紧密结合起来。

关于地球物理场对人类生存环境和人类健康的影响，有的问题国内刚刚开始研究，有的问题完全没有研究。这是今后有待加强的领域，而且要求地球物理界与生物界和医学界联合起来，才能取得较好的效果。

总之，环境地球物理是一个新兴的学科，研究和应用领域正在不断开拓。下面仅就目前所了解的环境地球物理能够解决的一些问题及其采用的方法作一简略的概括，目的在于使读者对环境地球物理有一个总体印象。

表6—1　环境地球物理的任务和方法

所解决的环境问题	工　作　任　务	采　用　的　方　法
一、地球物理场环境效应的监测		
1　天然核辐射环境效应的调查	氡气灾害远景的区域预测	航空γ能谱测量、航磁、航电；地面γ能谱测量、土壤氡气测量
	室内氡浓度监测	氡浓度连续监测和积分测量
	新建筑规划区的选址和设计	航空、地面γ能谱测量、土壤氡气测量、水氡测量、建材放射性监测

续表

所解决的环境问题	工 作 任 务	采 用 的 方 法
2. 天然电磁场环境效应的调查	研究电磁场的生物效应和对人文设施的影响	电磁场生物模拟实验；地磁场感应电流测量，地磁场随时间变化的观测
3. 人工弹性波场环境效应的调查	研究人工振动对工程建筑的破坏和地基承载力的影响	地震折射法．在墙体上做地震和超声波环形剖面测量，利用配置速度和加速度传感器的地震测量系统监测振害
二、环境污染监测和防护		
1. 放射性污染监测和防护	监测核事故、矿山探采、选冶、建材、采煤、燃煤、采油、磷肥等造成的放射性污染	航空、地面γ能谱测量，样品β测量和γ测量
	核废料储存场地的选址和勘察： (1) 盐体普查及盐体内部杂质、水分和裂隙发育程度的评价； (2) 深成结晶岩体的场地筛选和场地评价	普查——重力、电法、地震；杂质——自然γ和γ-γ测井；水分——中子测井，地面、井中电磁法；裂隙 —井中无线电波法，声波测井 筛选——航磁、航空γ能谱测量、航电、重力、声纳、电（磁）法；评价——电（磁）法、磁测、雷达、地震、声辐射测量，综合地球物理测井
2. 水污染监测与防治	无机污染监测	电剖面、电测深、频域和时域电磁法、电测井
	有机污染监测	雷达、电（磁）法、谱激发极化、中子测井等
	地下水污染的治理	电阻率层析、地震层析
	废水池渗漏监测	利用池底电极阵列作电阻率测量
3. 固体废料污染监测与治理	探测固体废料埋藏场地的位置、范围、厚度、隔离层、渗漏通道和污染范围	磁测、电剖面、电测深、激发极化、自电、电磁法、雷达、地震、重力、放射性测量
	固体废料熔融治理的监测	井间电阻率层析
	废料堆放场的选址	磁测、直流电法、电磁法、地震、井中地球物理方法
4. 大气污染监测	测定空气中某些有害气体组分、气溶胶的化学元素组分；间接测量大气污染程度	核地球物理分析方法（气溶胶电离气体分析、仪器中子活化分析、X荧光分析），大气电位梯度测量
三、灾害的监测和防治		
1. 滑坡的监测和预报	确定滑坡体范围、滑动面深度和形态，监测滑动过程，预报突发性滑动	电测深、地震折射、氡气测量、天然声辐射和电磁辐射测量、地质雷达、甚低频法、微动观测等
2. 岩溶和洞穴的探测	评价岩溶形成的基本条件和因素	电测深，地震折射法
	确定岩溶和人工洞穴的位置和产状	电阻率法、地震法、微重力法、氡气测量、雷达、地温法、井中无线电波法等
3. 山崩的防治和预报	确定山体裂缝的位置及其延深；预测山崩发生的时间	声频大地电场法，井间声波测量；天然声辐射测量

续表

所解决的环境问题	工作任务	采用的方法
5. 地裂缝调查	确定地裂缝的位置、产状、延深，研究其成因	地震反射法
泥石流治理	确定泥石流补给区的地质结构、补给物质（疏松沉积物）的厚度和范围、设计堤坝区的冲积层厚度	电测深
6. 土地盐碱化调查	了解盐碱化的范围和程度及形成的水文地质条件	航空和地面电（磁）法、航磁等
7. 沙漠化的治理	将土壤中的水集中在作物根系发育的层位	电渗法
8. 旱灾治理	了解土壤厚度、风化层厚度和基岩起伏，以便采取水土保持和回灌措施	电测深
9. 地面沉降监测	监测地面沉降的幅度随时间的变化	重力测量
10. 煤层自燃调查	了解火区范围	氡气测量、磁测
11. 采矿过程有关灾害的监测与预防	岩爆预测（了解异常应力状况，预报岩爆发生的位置和时间）	矿山地震测量、地震差分层析、重力测量、天然声辐射测量
	陷落柱的探测	高密度电法、高精度磁测、地震层析等
	突水的预测和治理	声频大地电场法、巷道高密度电法、井中无线电波法等
	瓦斯突出的探测和预防	高分辨率地震、谱激发极化、电阻率成像、γ测量
	井喷预防（探测过压带）	地震法

参 考 文 献

国家环境保护局，国家计划委员会：中国环境保护行动计划（1991～2000年），中国环境科学出版社，1994。

陈宏跃、程业勋主编，环境与地球物理，地震出版社，1997。

赵章元，交通环境学概论，中国环境科学出版社，1995。

物探化探译丛编辑部，环境与工程，地震出版社，1993。

陈仲候等，工程与环境物探教程，地质出版社，1993。

罗孝宽、郭绍雍，应用地球物理教程——重力磁法，地质出版社，1991。

傅良魁，应用地球物理教程——电法 放射性 地热，地质出版社，1991。

李金铭、罗延钟，电法勘探新进展，地质出版社，1996。

王振东，浅层地震勘探应用技术，地质出版社，1988。

王谦身等，微重力测量——理论、方法与应用，科学出版社，1995。

杨文采、李幼铭等，应用地震层析成像，地质出版社，1993。

毛文永，环境战略的新发展，环境科学，15卷4期，1～4页，1994。

唐永銮、曹军建，中国环境科学理论研究及发展，环境科学，14卷4期，2～9页，1993。

陈利秋，中国有害废物污染现状与控制对策探讨，环境科学，15卷5期，83～87页，1994。

孟 伟，适应市场经济加强环境保护科技综合实力，环境科学研究，9卷3期，1～5页，1996。

罗桂玲，确立环境资源的价值观促进经济与环境持续协调发展，环境科学研究，9卷3期，6～9页，1996。

臧玉洋，90年代我国环境保护科学技术发展战略设想，中国环境科学，13卷2期，137～148页，1993。

郭希哲、楚占昌等，我国地质灾害经济损失和防治效益估计，中国地质，第8期，18～20页，1991。

展建设、吴庆曾，跨孔声波穿透法在探测三峡链子崖隐伏裂缝中的应用，中国地质灾害与防治学报，2卷增刊，47～51页，1991。

连 克、朱汝烈等，音频大地电场法在地质灾害调查中的应用尝试——长江三峡链子崖危岩体隐伏地质结构的探测，中国地质灾害与防治学报，2卷增刊，37～42页，1991。

严寿民，瞬态瑞雷波勘探方法，物探与化探，16卷2期，113～119页，1992。

金培杰、曹玉立，甚低频电磁法在确定滑坡地下水中的应用，物探与化探，17卷2期，150～152页，1993。

崔占荣、张世洪等，瞬态瑞雷波勘探中一些问题的讨论，物探与化探，19卷5期，369～377页，1995。

唐大荣，地面岩溶塌陷的高分辨率地震勘查，物探与化探，18卷1期，35～39页，1994。

梁乃杰、魏玉轮等，杭州西湖初次换水观测结果的解释，物探与化探，13卷4期，281～289页，1989。

杨文采、杜剑渊，煤矿陷落柱地震层析成像试验，物探与化探，16卷3期，174～180页，1992。

张献民、王俊如等，应用高密度电法探测煤田陷落柱，物探与化探，18卷5期，363～370页，1994。

张忠苗、吴世明等，打桩振害机理与监测防治，物探与化探，17卷1期，57～71页，1993。

徐宝慈，当前环境工程地球物理研究的进展和动向，物探化探译丛，第5期，4～8页，1995。

魏树群，测氡法圈定火区范围的前景初探，煤田地质与勘探，20卷1期，33～36页，1992。

臧敬华，煤矿地质灾害的弹性波探测技术，煤田地质与勘探，20卷6期，51～57页，1992。

谢允忠，石家庄市航空物化探，航天遥感环境综合调查，航测与遥感，第4期，2～8页，1993。

程庶法摘译，世界核电站发展的某些趋势，地质矿产信息，第9期，18页，1995。

黄皓平、王延良等，电(电磁)法在盐渍土及次生盐渍化调查中应用的方法研究，中国地球物理学会年刊(第6届)，332页，地震出版社，1990。

曲 赞、阎桂林，高精度磁测在探测岩溶陷落柱中的应用，中国地球物理学会年刊（第7届），150页，地震出版社，1991。

周霄生、侯新生等，核地球物理方法在大气环境研究中的应用，中国地球物理学会年刊（第10届），452～453页，地震出版社，1994。

吴其斌，物探方法在岩溶地质调查中的应用，国外地质勘探技术，第2期，1～8页，1993。

吴其斌，探地雷达的发展现状，地质科技动态，第10期，1～3页，1995。

崔森沛、吴其斌，国外勘查地球物理的若干进展 一1992年，物探与化探，17卷6期，414～422页，1993。
崔森沛，井孔物探方法应用的新领域，物探与化探，卷3期，162～171页，1985。
崔森沛，工程物探的作用和发展趋势，国外地质科技 第1期，109～129页，1984。
崔森沛，核废料的地质处理与物探，地质科技参考资料，第 期，1～12页，1987。
崔森沛，开展对岩石土壤中氡气迁移性的评价，地质科技参考资料，第2期，15～18页，1989。
崔森沛，环境物探 物探应用领域的新前沿，地质科技参考资料，第2期，1 16页，1992
崔森沛，氡气灾害的成因、评价和治理方法及今后工作建议，地质科技参考资料，第13期，1～11页 1992。
崔森沛，放射性物探方法在环境勘查中的应用，国外地质勘探技术，第4期，1～12页，1993。
崔森沛，氡气灾害调查的一些结果，地质论评，卷2期，157～164页，1994。
崔森沛，地球物理学与环境的监测和保护，国外地质勘探技术，第2期，1～7页，1995。
崔森沛，环境和工程物探的一些进展，地质科技动态，第2期，28～31页，1995。
丁志俊，综述一 地球物理勘查与层析成像技术，物探化探译丛，第2期，20～33页，1995。
唐太荣等，Mini-Sosie地震技术在西安地裂缝勘查中的应用效果，地质灾害勘查监测技术论文集，地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究所，1991。
西马等，微动观测预测滑坡移动，物探化探译丛，第2期，31～37页，1986。
奥西波夫B.H.，自然灾害成为学者注意中心，地质矿产信息，第24期，1～12页，1995。
Cummings D. 等，滑坡调查中地震折射法和电阻率测量的应用，地质科技动态，第8期，28～32页，1990。
Мацнев А. В. 等，放射生态学是地球物理服务工作的重要方向之一，物探化探译丛，第4期，1～3页，1993。
Almossawi H. I. H., Effect of seismic signals on human, Geophysical Journal, Vol. 14, No 3, pp. 47～51, 1992 (in Russian).
Benson A. K., Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, fault, cavities Journal of Applied Geophysics, Vol. 33, No. 1～3, pp. 177～193, 1995.
Bjersted T. W., What's new at Yucca Mountain Geotimes, Vol. 39, No. 9, pp. 18～20, 1994.
Blaha P. and Knejzlik J., Geodetic measurement on high artificial slops. Landslides ---7th International Conference and Field Workshop on Landslides, pp. 137～142, 1993.
Bodansky D. *et al.*, Indoor Radon and Its Hazards. University of Washington Press, 1987.
Bolivar J. P. *et al.*, Fluxes and distribution of natural radionuclides in the production and use of fertilizers. Applied Radiation and Isotopes, Vol. 46, No6/7, pp. 717～718, 1995.
Briz Kishore B. H., Drought remedial measures through resistivity investigations in a typical crystalline region. Environmental Geology and Water Sciences, Vol. 20, No. 2, pp. 79～83, 1992.
Butler D. K., Microgravimetric techniques for detection and delineation of subsurface cavities. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, pp. 179～216, 1991.
Casten U. *et al.*, Induced gravity anomalies and rock burst risk in coal mines: a case history. Geophysical Prospecting, Vol. 41, No. 1, pp. 1～13, 1993.
Cui F. P., Radiometric methods in regional radon hazard mapping. Nuclear Geophysics, Vol. 4, No. 3, pp. 353～361, 1990.
Cui F. -P., Regional study of the radon hazard. Expanded Abstracts, 61st Annual International SEG Meeting, pp. 545～548, 1991.
Daily W. and Ramirez A., Electrical resistance tomography during in situ trichloroethylene remediation at the Savannah River site, Journal of Applied Geophysics, Vol. 33, No. 1, pp. 239～249, 1995
Daniels J. J. *et al.*, Site studies of ground penetrating radar for monitoring petroleum product contaminants. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, pp. 597～609, 1992.
Dobeski T. L. and Larson D. M., Seismic detection of abandoned coal mine workings. 28th US Symposium on Rock Mechanics, pp. 59～63, 1987.
Doll W. E., How can environmental geophysics be advanced ? The Leading Edge, Vol. 13, No. 10, pp. 1035～1039,

1994.

Dos Santos J. M. F. *et al.*, Application of gas proportional scintillation counters to the analysis of sulfur in coal. Nuclear Geophysics, Vol. 8, No. 1, pp. 103～106, 1994.

Elbring G. J., Cross well seismic imaging of an in-situ air stripping environmental remediation process. Expanded Abstracts, 63rd Annual International SEG Meeting pp. 476～479, 1993

Feknous N. *et al.*, Identification of acoustic emission sources in injected rock assisted by pattern recognition techniques. 44th Canadian Geotechnical Conference, Vol. 1, pp. 36-1～36-6, 1991.

Gallardo M. C *et al.*, Gamma spectrometric analysis of river sediments collected around phosphate fertilizer industries. Nuclear Geophysics, Vol. 7, No. 3, pp. 461～468, 1993.

Gibson P. J., Lyle P. *et al*, Environmental applications of magnetometry profiling. Environmental Geology, Vol. 27, No. 2, pp. 178～183, 1996.

Greenhouse J. *et al*., Geophysics and solvents: The Borden experiment. The Leading Edge, Vol. 12, No. 4, pp. 261～267, 1993.

Henderson R. J., Urban geophysics - A review Exploration Geophysics, Vol. 23, No3/4, pp. 531～542, 1992.

Hoekstra P. and Blohm M. W., Case histories of time domain electromagnetic soundings in environmental geophysics. Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol 2, pp. 1～15, 1990.

Huang M. *et al.*, Monitoring soil contaminations using a contactless conductivity probe. Geophysical Prospecting, Vol. 43, No. 6, pp. 759～778, 1995.

Jojo P. J., Enhancement of trace uranium in fly ash. Nuclear Geophysics, Vol. 8, No. 1, pp. 55～59, 1994.

Kaur H. *et al.*, Measurement of uranium and thorium in coal fly ash and bottom ash samples from a thermal power plant by using a high resolution semiconductor detector. Nuclear Geophysics, Vol. 6, No. 3, pp. 391～394, 1992.

King A. and Pesowski M., Environmental applications of surface and airborne geophysics in mining, CIM Bulletin, Vol. 86, No. 966, pp. 58～67, 1993.

Kobr M. *et al.*, Geophysical survey as a basis for regeneration of waste dump Haide 10, Zwickau, Saxony. Journal of Applied Geophysics, Vol. 31, No. 1～4, pp. 107～116, 1994.

Leonhardt J. W., Protection of the environment by the application of nuclear techniques in energy and mineral processing. Nuclear Techniques in the Exploration and Exploitation of Energy and Mineral Resources, IAEA, pp. 229～235, 1991.

Lepper C. M., Using geophysical methods to characterize environmental effects of abandoned mining and milling operations. Environmental Issues and Waste Management in Energy and Minerals Production, pp. 813～821, 1992.

Matias M. J. S. *et al.*, Integrated geophysical survey of contaminated aquifers west of Estarreja, Portugal. EAEG -- 56th Meeting and Technical Exhibition, Po36, 1994.

Mazac O., Benes L. *et al.*, Determination of the extent of oil contamination in groundwater by geoelectrical methods. Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 2, pp. 107～112, 1990.

Mazac O., Benes L. *et al.*, Geoelectrical detection of sealing foil quality in light-ash dumps. Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 2, pp. 113～119, 1990.

McDonald B., Recent use of portable X-ray fluorescence on heavy metal contamination sites. Proceedings of 27th Symposium of Engineering Geology and Geotechnical Engineering, pp. 36-1～36-14, 1991.

Medici F. *et al*, Measurements of indoor radon concentration and assessment of radiation exposure. Journal of Applied Geophysics, Vol. 31, No. 1～4, pp. 153～163, 1994.

Miller, R. D. *et al.*, Applications of shallow high-resolution seismic reflection to various environmental problems. Journal of Applied Geophysics, Vol. 31, No. 1～4, pp. 65～72, 1994.

Miller R. D. and Steeples D. W., Applications of shallow, high resolution seismic reflection to various mining operations. Mining Engineering, Vol. 47, No. 4, pp 355～361, 1995.

Mwenifumbo C. J., Borehole geophysics in environmental applications, CIM Bulletin, Vol. 86, No. 966, pp. 43～49, 1993.

Nielson D. L., Smith L. P. and Ward S. H., Geothermal exploration and radon emanometry as environmental geophysics. Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 1, pp. 279~290, 1990.

Nyquist J. E. and Hall W. E., Characterization of surface and borehole geophysics for characterizing a hazardous waste site: a case study. Expanded Abstracts, 63rd Annual International SEG Meeting, pp. 178~181, 1993.

Olhoeft G. R., Geophysical detection of hydrocarbon and organic chemical contamination. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, pp. 587~595, 1992.

Olsson O. *et al.*, Borehole radar applied to the characterization of hydraulically conductive fracture zones in crystalline rock. Geophysical Prospecting, Vol. 40, No. 2, pp. 109~142, 1992.

Olyphant J. L., Vibroseis operations in an urban environment. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, Vol. 31, No. 3, pp. 345~366, 1994.

Peacock R. J., Cavity detection — an engineering application for gravity. Exploration Geophysics, Vol. 23, No. 3/4, pp. 567~570, 1992.

Phillips J. D. and Fitterman D. V., Environmental geophysics. Reviews of Geophysics, Supplement, pp. 185~193, 1995.

Pippett T. D. J. *et al.*, Use of magnetics for the location of environmental contamination. Exploration Geophysics, Vol. 26, No. 2, pp. 206~208, 1995.

Purtscheller F. *et al.*, Radon emanation from gaint landslides of Koefels (Tyrol, Austria) and Langtang Himal (Nepal). Environmental Geology, Vol. 26, No. 1, pp. 32~38, 1995.

Rodriguez R., Mapping karst solution features by the integrated geophysical method. Karst Geohazards, pp. 443~449, 1995.

Rogers R. B. and Kean W. F., Monitoring ground-water contamination at a fly ash disposal site using surface electrical resistivity method. Ground Water, Vol. 18, No. 5, pp. 472~478, 1980.

Schubert H. and Gerhards, E., Radioactive environmental pollution as a result of copper mining and smelting. EAEG-56th Meeting and Technical Exhibition, P040, 1994

Skubacz K. *et al.*, Possible changes in the background radiation of the natural environment caused by coal mining activity. Nuclear Techniques in the Exploration and Exploitation of Energy and Mineral Resources, IAEA, pp. 425~429, 1991.

Sloto R. A. *et al.*, Identification of a multiaquifer ground water cross-contamination problem in the Stockton formation by use of borehole geophysical methods, Hatboro, Pennsylvania. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, pp. 21~34, 1992.

Solomon B. J., Black B. D. *et al.*, Identification of radon hazard areas along the Wasatch Front, Utah, using geologic techniques. Proceedings of the 27th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering, pp. 40-1~40-16, 1991.

Soonawala N. M., Holloway A. L. *et al.*, Geophysical methodology for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program. Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 1, pp. 309~331, 1990.

Spies B. R., Borehole resistivity tomography of a pilot scale in-situ vitrification test. Expanded Abstracts, 63rd Annual International SEG Meeting, pp. 472~475, 1993.

Steeples D. W. and Nyquist J. E., What environmental geophysics can do. Geotimes, Vol. 40, No. 5, pp. 15~17, 1995.

Van G. P., Park S. K. *et al.*, Use of resistivity monitoring systems to detect leaks from storage ponds. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, pp. 629~646, 1992.

Vanhala H. and Soininen H., Mapping oil contaminated sand and till by spectral induced polarization method. EAEG-56th Meeting and Technical Exhibition, P043, 1994

Viljanen A. and Pirjola R., Statistics on geomagnetically induced currents in the Finnish 400 kV power system based recordings of geomagnetic variations. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, Vol. 41, pp. 411~420, 1989.

Viljanen A. and Pirjola R., Geomagnetically induced currents in the Finnish high voltage power system. Surveys in Geophysics, Vol. 15, No. 4, pp. 383~408, 1994.

Vogelsaug D., Environmental Geophysics. Springer Verlag, 1995.

Walker P., Airborne geophysical radon hazard mapping. Expanded Abstracts, 63rd Annual International SEG Meeting, pp. 165~467, 1993.

Weller A. and Borner F. D., Measurements of spectral induced polarization for environmental purposes. Environmental Geology, Vol. 27, No. 3, pp. 329~331, 1996

Wesztergom V., Geomagnetic induction review. Acta Geodaetica, Geophysica et Montanistica Hungarica, Vol. 27, No. 2~4, pp. 301~317, 1992.

Whiteley R. J. ahd Jewell C., Geophysical techniques in contaminated lands assessment — Do they deliver? Exploration Geophysics, Vol. 23, No. 3/4, pp. 557~566, 1992.

Whiteley R. J., Environmental geophysics: Challenges and perspectives. Exploration Geophysics, Vol. 25, No. 4, pp. 189~196, 1995.

Zhdanov M. S. *et al.*, The Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration. Elsevier, 1994.

Zonge K. L., Application of controlled source audio frequency magnetotelluric measurements to engineering and environmental problems. Proceedings of the Symposium or the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, pp. 123~131, 1990.

Авдюшин С. И., Данилов А. Д.: Земной отзвук космических бурь. Наука в России, No. 4, стр. 61~64, 1994.

Адушкин В. В. и др.: Геоэкологический контроль за геофизическими полями мегаполиса. Геоэкология, No. 2, стр. 44~55, 1995.

Баддари К.: Комплексное изучение электромагнитного и акустического излучения при разрушении образцов горных пород. Геология и разведка, No. 6, стр. 145~148, 1989.

Гарецкий Р. Г., Каратаев Г. И.: Основные проблемы экологической геологии. Геоэкология, No. 1, стр. 28~35, 1995.

Коваль Г. И. и др.: Динамика параметров радиоэкологической ситуации в г. Киеве до и после аварии на ЧАЭС. Доклады Академии наук Украины, No. 1, стр. 114~118, 1994.

Микаэлян Л. А.: Радон в нашем доме. Природа, No. 7, стр. 20~26, 1992.

Никифоров Ю. А.: Радиоактивное загрязнение окружающей среды при нефтедобыче на примере Ставропольских месторождений. Российский геофизический журнал, No. 3/4, стр. 81~84, 1994.

Николаев А. В.: Геофизическая среда: новый подход. Наука в России, No. 4, стр. 58~60, 1994.

Серых А. С., Хайкович И. М.: К вопросу о радиационном контроле строительных материалов. Российский геофизический журнал, No. 1, стр. 63~67, 1993.

Смыслов А. А., Харламов М. Г.: Естественные радионуклиды в земной коре и проблемы радиоэкологии. Советская геология, No. 4, стр. 72~78, 1992.

Спивак А. А. и др.: Геофизические поля в условиях мегаполиса. Доклады Академии наук, Том 332, No. 5, стр. 641~643, 1993.

Сычев К. П.: Научное содержание и основные направления геоэкологии. Разведка и охрана недр, No. 11, стр. 2~6, 1991.

Темурьянц Н. А.: Биологическая эффективность электромагнитного поля. Природа, No. 9, стр. 14~20, 1994.

Христич В. А. и др.: Использование радон-торонового метода при изучении оползневого склона в г. Вильске. Инженерная геология, No. 6, стр. 87~95, 1992.

Чернышев В. Б.: Аномалии в поведении насекомых и геомагнитные бури. Природа, No. 9, стр. 20~25, 1994.

Чижов А. Б. и др.: К методике геоэкологического картирования. Геоэкология, No. 5, стр. 88~95, 1995.

Шемиль Ладе А. Э.: Радон и солнечная активность. Природа, No. 7, стр. 31~35, 1992.

与环境地球物理有关的英文缩写

ACH　Air Change per Hour 每小时（居室）换气次数
ACS　American Cancer Society 美国癌症学会
ADR　Absorbed Dose Rate 吸收剂量率
AE　Acoustic Emission 声辐射
AEC　Atomic Energy Commission 原子能委员会（美）；
Atomic Energy Corporation 原子能公司（英）
AECB　Atomic Energy Control Board 原子能监控管理局（加）
AECL　Atomic Energy of Canada Limited 加拿大原子能有限公司
AGL　Above Ground Level 离地高度
AIG　Aerosol Ionization Gas (analysis) 气溶胶电离气体（分析）
ALARA　As Low As Reasonably Achievable 便于达到的最低限度
AMT　Audio-frequency Magnetotelluries 声频大地电磁法
ART　Algebraic Reconstruction Technique 代数重建法
ASPF　Alpha Sensitive Plastic Film α 灵敏塑料薄膜
ASTM　American Society for Testing Materials 美国材料试验学会
ATD　Alpha Track Detector α 径迹探测器
BEIR　Biological Effects of Ionizing Radiation 电离辐射的生物效应
BWID　Buried Waste Integrated Demonstration 掩埋废料综合示范（计划）
CDI　Conductivity Depth Imaging 电导率深度成像
CDP　Common Depth Point 共深点
CERCLA　Comprehensive Environmental Recovery and Compensation Liability Act 环境全面复原及赔偿责任法（美）
CFR　Code of Federal Regulations 联邦法典（美）
CIAQ　Inter-agency Committee on Indoor Air Quality 跨部门室内空气质量委员会（美）
CMP　Common Midpoint 共中点
CRM　Continuous Monitoring of the Radon concentration 氡浓度连续监测
CRP　Common Reflection Point 共反射点
CSAMT　Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluries 可控源声频大地电磁法
DCM　Dichloromethane 二氯甲烷
DNA　Deoxyribonucleic Acid 脱氧核糖核酸
DNAPL　Dense Non-Aqueous Phase Liquid 比重大于水的非水相液体
DOE　Department of Energy 能源部（美）
EC　Electrical Conductivity 电导率
EEC　Equilibrium Equivalent Concentration 平衡当量浓度
EEGS　Environmental and Engineering Geophysical Society 环境和工程地球物理学会（美）
EM　Electromagnetics 电磁法
EML　Environmental Measurements Laboratory 环境测量实验室（美）
EPA　Environmental Protection Agency 环境保护署（美）

ERT Electrical Resistance Tomography 电阻率层析

ERWM (Office of) Environmental Restoration and Waste Management 环境恢复和废料管理办公室（属美能源部）

ESP Electrostatic Precipitator 静电过滤器

FDEM Frequency Domain Electromagnetics 频率域电磁法

FEM Frequency Electromagnetics 频率域电磁法

FWHM Full Width at Half-Maximum 半峰值全宽度

GAC Granular Activated Charcoal 粒状活性炭

GIC Geomagnetically Induced Currents 地磁场感应电流

GPR Ground Penetrating Radar 探地雷达，透地雷达

GPS Global Positioning System 全球定位系统

GPSC Gas Proportional Scintillation Counter 气体正比闪烁计数管

HEM Helicopter Electromagnetics 直升机电磁法

HFS High Frequency Sounder 高频测深仪

HPGe High-Purity Ge 高纯锗（探测器）

IAEA International Atomic Energy Agency 国际原子能机构

ICRP International Commission on Radiological Protection 国际辐射防护委员会

INAA Instrumental Neutron Activation Analysis 仪器中子活化分析

INEL Idaho National Engineering Laboratory 爱达荷国家工程实验室

ISS In-Seam Seismics 槽波地震法

ISV In-Situ Vitrification 原位玻璃化

IWLM Instant Working Level Meter 瞬时工作水平计

LET Linear Energy Transfer 线性能量转换

LF-R Low Frequency Resistivity method 低频电阻率法

LNAPL Light Non-Aqueous Phase Liquid 比重小于水的非水相液体

LTHMP Long-Term Hydrologic Monitoring Program 长期水文监测计划（美）

MF Modifying Factor 修正因数

MT Magnetotellurics 大地电磁法

NCRP National Council on Radiation Protection and Measurements 全国辐射防护与测量委员会（美）

NEA Nuclear Energy Agency 核能源机构

NFWMP Nuclear Fuel Waste Management Program 核燃料废料管理计划（加）

NMR Nuclear Magnetic Resonance 核磁共振

NRPB National Radiological Protection Board 全国辐射防护委员会（英）

NSG Near-Surface Geophysics Section 近地表地球物理分会（属 SEG）

NURE National Uranium Resources Evaluation 全美铀矿资源评价（计划）

ORNL Oak Ridge National Laboratory 橡树岭国家实验室

OSMRE Office of Surface Mining and Reclamation Enforcement 露天开采和复原执法办公室（美）

PAER Potential Alpha-particle Energy Release 潜在 α 粒子能释放量

PCE Perchloroethylene (tetrachloroethylene) 四氯乙烯

PERM Passive Environmental Radon Monitor 被动式环境氡监测器

PGNAA Prompt Gamma Neutron Activation Analysis 瞬发伽马中子活化分析

PIXE Particle Induced X ray Emission 粒子激发 X 射线辐射法

PPV Peak Particle Velocity 质点速度峰值

PTFE Polytetrafluoroethylene 聚四氟乙烯

PVC Polyvinyl Chloride 聚氯乙烯

QF Quality Factor 品质因数

RAV Radon Availability Index 氡可获量指数

RCRA Resources Conservation and Recovery Act 资源保护与复原法（美）

REM Roentgen Equivalent Man 人体伦琴当量

R-EM Radiowave Electromagnetic Profiling 无线电波电磁剖面法

RMT Radio Magnetotellurics 无线电大地电磁法

SAGEEP Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 地球物理用于工程和环境问题讨论会（美）

SB Screening Body method 屏蔽体法

SEG Society of Exploration Geophysicists 勘探地球物理学家协会（美）

SIP Spectral Induced Polarization 谱激发极化法

SIRT Simultaneous Iterative Reconstruction Technique 联合迭代重建法

SNL Sandia National Laboratories 桑地亚国家实验室（美）

SSNTD Solid State Nuclear Track Detector 固态核径迹探测器

SWSA Solid Waste Area 固体废料区

TC Total Count 总计数

TCE Trichloroethylene 三氯乙烯

TCM Terrain Conductivity Meter 地电导率仪

TDEM Time Domain Electromagnetics 时间域电磁法

TDS Total Dissolved Solids 固溶物总量

Total Dissolved Salt 总溶盐量

TEM Transient Electromagnetics 瞬变电磁法

TLD Thermoluminescence Detector 热释光探测器

UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 联合国原子辐射效应科学委员会

URL Underground Research Laboratory 地下实验室

URSI Union Radio-Scientifique Internationale 国际无线电科学联合会

USRADS Ultrasonic Ranging and Data System 超声波测距与数据系统

UXO Unexploded Ordnance 未爆炸炸弹

VES Vertical Electric Sounding 垂向电测深

VETEM Very Early Time Electromagnetics 甚早期电磁法

VLF Very Low Frequency 甚低频法

VOC Volatile Organic Compound 挥发性有机化合物

VOCNAS Integrated Demonstration for Volatile Organic Compounds in Soils and Groundwater at Non-Arid Sites 非干旱区土壤和地下水易挥发有机化合物综合示范计划

WHO World Health Organization 世界卫生组织

WIPP Waste Isolation Pilot Plant 废料密封试验场

WL Working Level 工作水平

WLM Working Level Month 工作水平月

XRF X-Ray Fluorescence X 射线荧光法

X830.9
2213