中国地下水科学的机遇与挑战

Opportunities and Challenges in Chinese Groundwater Science

中国地下水科学战略研究小组

Committee on Chinese Groundwater Science

国家自然科学基金委员会 地学部

中国地质调查局 水文地质环境地质部

2008 年 3 月 1 日

中国地下水科学的机遇与挑战

(Opportunities and Challenges in Chinese Groundwater Science)

中国地下水科学战略研究小组
(Committee on Chinese Groundwater Science)

资助单位
国家自然科学基金委员会地学部
中国地质调查局水文地质与环境地质部



2008 年 3 月 1 日（最终稿）

中国地下水科学战略研究小组

负责人

郑春苗（美国阿拉巴马大学；北京大学）

万　力（中国地质大学－北京）

成员（以姓氏笔划排列）

王焰新（中国地质大学－武汉）

冯夏红（美国达特矛斯学院）

任　理（中国农业大学）

吴吉春（南京大学）

张仁铎（中山大学；原美国怀俄明大学）

张幼宽（美国依阿华大学）

李广贺（清华大学）

李文鹏（中国地质环境监测院）

葛社民（美国科罗拉多大学）

董海良（美国俄亥俄迈阿密大学）

前言

地下水资源在地球上分布极为广泛。它对许多地区的社会经济发展具有举足轻重的作用。对地下水资源的不合理开发利用，会引发一系列区域性的环境问题。同时，地下水作为一种赋存于地下的流体，对人类活动，如采矿等，会造成了巨大的危害。地下水科学是研究存在于地质介质中水的运动规律及其与地质介质相互作用的学科。地下水科学的发展不仅有利于保证人们对水资源的需求、保护和改善环境、促进生态系统良性循环，而且可以揭示人类活动与自然环境之间的关系。

目前，在中国社会的发展过程中存在着四方面与地下水有关的问题：一是对地下水资源的过量开采使得水资源短缺矛盾加剧，并引发出一系列危及人类生存的环境问题；二是人类活动产生的大量废弃物处置不当，致使地下水普遍受到不同程度的污染；三是中国广大的干旱半干旱地区，除水资源贫乏外，地下水水质很差，从而引起许多环境问题；四是矿产和能源资源的大量开采，以及人类大型工程建设中，遭遇的灾害性地下水环境问题。这些问题向地下水科学提出了新的挑战，也为地下水科学的发展提供了前所未有的机遇。

近几十年来，美国以及其它发达国家的地下水科学取得了巨大的进展。无论地下水科学的理论方法，还是技术手段，均有很大的突破。如何将国外水文地质学的先进理论方法与中国地下水的实际问题相结合，准确地把握中国地下水学科发展的脉络和趋势，促进学科健康发展，是当前中国地下水科学界十分关注的问题。

中国国家自然科学基金委员会是资助地下水科学基础研究的主要部门。中国地质调查局负责全国范围内的地下水调查和监测工作。许久以来，这两个部门皆希望开展一项中国地下水科学的战略研究。2004 年 11 月，中国自然科学基金委地学部的柴育成、姚玉鹏、王广才，中国地质调查局水文地质环境地质部的武选民，和美国阿拉巴马大学的郑春苗，在北京就此问题进行了讨论，认为有必要成立一个由海内外专家组成的研究小组，开展中国地下水科学的战略研究。2005 年 4 月，成立了由中国和美国大学及科研机构 12 位成员组成的“中国地下水战略研究小组”。考虑到地下水科学多学科交叉的特点，小组成员的背景和科研领域包括水文地质、水资源、水文地球化学、地质微生物、土壤物理等。2005 年 6 月，小组成员在中国地质大学（北京）参加了由自然科学基金委地学部主办的，万力和郑春苗主持的“中国地下水科学的机遇与挑战”的学术研讨会期间举行了第一次会议。之后，又分别于 2006 年 2 月在美国科罗拉多大学以及 2006 年 7 月在北京召开了两次小组会议。

在两年多的时间里，中国地下水战略研究小组拟写了这本“白皮书”。本书的目的是客观地总结中国地下水科学的研究现状，清楚地认识当前国际地下水科学研究的前沿问题，紧密地结合中国地下水科学领域中的实际问题，深入地探讨中国地下水科学所面临的问题。本书针对中国地下水学科的科研、教育和数据等方面的问题，提出了一系列具体建议，包括近期目标和长远规划。旨在为中国广大地下水科学工作者和学生提供一本参考书，帮助他们了解国内外地下水科学研究的现状以及发展趋势，选择合适的研究方向，以便有力地推动中国地下水科学的研究和教育。

本书的结构安排如下。第一章“地下水”简要地叙述地下水在水循环过程中的作用以及地下水对于人类生存的重要性。第二章“中国地下水科学的现状”从几个方面综述中国地下水科学的发展和研究现状，指出目前存在的主要问题。第三章“国际地下水研究前沿”介绍国际上地下水科学的演化过程和发展趋势，概述当前国际地下水研究的一些前沿问题。第四章“地下水数据”介绍获取地下水相关基础数据的一些新手段和技术以及国际上基于互联网的水文信息系统赛百结构（cyberinfrastructure）的发展情况，探讨建立和发展全国性观测联网的必要性。第五章“教育与人才培养”总结中国地下水学科的教育体制的演化过程以及和欧美国家的差别，提出改进大学生和研究生教育的一些具体设想。第六章“优先研究领域”根据中国地下水科学的特点，结合国际地下水研究的发展趋势，提出中国地下水科学的优先研究领域。第七章“推动中国地下水科学发展的建议”在前述章节的基础上，提出加强地下水科研、教育和数据共享的策略和具体措施。附录中列出了中国地下水研究一些重要信息，包括政府管理机构、资助单位、高等院校、研究结构、和主要重点实验室。附录中还列出了“地下水战略研究小组”成员的简历以及对本书作出贡献的人员名单。

致谢　我们首先感谢中国自然科学基金委地学部柴育成主任、姚玉鹏博士、和王广才博士对这项工作的大力支持。没有他们的支持，便没有本书的出版。我们同样感谢中国地质调查局水文地质环境地质部武选民博士、文冬光博士、和殷跃平主任对本项工作的支持。我们的工作还得到了海内外许多同行的大力帮助。在此我们深表谢意。

中国地下水科学战略研究小组
2008 年 3 月 1 日

目录

序

前言

目录

详细摘要

1. **地下水**
1.1 地下水与水循环
1.2 中国地下水概况
1.3 中国地下水问题

2. 中国地下水科学的现状
2.1 水文地质调查
2.2 区域水文地质
2.3 水文地球化学
2.4 地下水污染
2.5 地质微生物与生物修复
2.6 生态水文地质
2.7 地下水模拟与随机方法
2.8 地下水管理模型
2.9 非饱和带水文学
2.10 存在的问题

3. 国际地下水研究前沿
3.1 地下水科学的演化与趋势
3.2 区域水文地质
3.3 水文地球化学
3.4 地下水污染
3.5 地质微生物与生物修复
3.6 生态水文地质
3.7 地下水管理优化模拟
3.8 非饱和带水流与溶质运移
3.9 随机水文地质学
3.10 地下水定量计算与模拟

4. 地下水数据
4.1 地下水研究的数据需求

4.2 获取地下水数据的新技术
4.3 基于互联网的信息存储、发布、共享系统
4.4 在中国建立全国性监测联网的必要性

5. 教育与人才培养
5.1 人才培养体系的建立
5.2 人才培养模式的特点
5.3 大学生教育
5.4 研究生教育

6. 优先研究领域
6.1 引言
6.2 区域水文地质与地下水管理
6.3 地下水水质与水化学
6.4 地下水污染与含水层修复
6.5 地质微生物与生物修复
6.6 生态水文地质
6.7 非饱和带研究
6.8 随机水文地质

7. 促进中国地下水科学发展的建议
7.1 加强科研的建议
7.2 加强教育的建议
7.3 加强基础数据共享的建议

附录
A. 中国有关地下水科学的政府管理机构
B. 中国有关地下水科学研究的资助单位
C. 中国有关地下水科学的高等院校
D. 美国有关地下水科学的高等院校
E. 中国有关地下水科学的主要研究机构
F. 中国有关地下水科学的主要重点实验室
G. 中国地下水科学战略研究小组成员介绍
H. 为本书作出贡献的个人和单位名单

详细摘要

中国地下水科学面临严峻的挑战

水是生命依存的最基本要素。没有水，便没有生命。地下水是水资源的重要组成部分。全世界 15 亿以上的人口主要以地下水作为饮用水。中国人均占有水资源量仅为世界平均水平的四分之一。全国 500 个城市中 400 个缺水或严重缺水。尤其在华北和西北地区，水资源短缺的矛盾更为突出。在这些地区，地下水利用率往往超过供水总量的 50%，许多城市高达 80%以上。

近几年，中国的废水排放量每年约 480 亿吨，其中大部分未经处理或处理后尚未达标即被排入江河湖泊或直接用于灌溉，导致地下水污染。在一些经济发达的地区，地下水污染已经相当普遍和严重，从而加剧了地下水资源的短缺。

在中国现阶段的社会经济发展过程中，地下水资源普遍过量开采，水资源短缺矛盾加剧并引发出一系列危及人类生存的环境问题；地下水普遍受到不同程度的污染，加之很多地域存在天然劣质地下水，直接威胁供水安全；矿产资源的大量开采和人类大型工程活动带来了一系列灾害性的地下水问题。如何保证地下水资源的可持续利用、保护我们的生存环境、促进人与自然的和谐发展，已经成为地下水科学当前及未来所面临的严峻挑战，同时也为地下水科学的发展提供了前所未有的机遇。

中国地下水科学研究急需加强

社会需求是中国地下水学科发展的动力。20 世纪 50 年代，大规模的经济建设迫切需要足够的地下水资源，寻找优质地下水是学科发展的主要方向；60 年代后期，大规模地开发利用地下水，使许多地区出现了地面沉降、地面塌陷和水质恶化等一系列地质环境问题，大范围区域地下水资源评价及合理开发成为学科的重要研究内容。90 年代中期，随着社会经济的发展和生活水平的提高，与环境和生态有关的一系列地下水问题愈来愈受到人们的关注。

全国性的水文地质调查工作是水文地质学科建设和发展的基础，也是中国水文地质学的特色。该项工作从 1955 年始，历经 40 多年，不仅提高了全国区域水文地质研究程度，而且为国民经济建设和社会发展提供了系统完整的水文地质基础资料。区域水文地质学是研究区域地下水空间分布规律的学科。几十年来，中国水文地质工作

者在此领域进行了大量基础性研究，其理论成果主要表现在对中国区域地下水分布规律的认识和表述，以及在长期实践过程中形成的基岩地下水找水理论。

中国水文地球化学的发展可分为两个阶段：20 世纪 50 年代到 80 年代为第一阶段，80 年代以后为第二阶段。在第一阶段中，从前苏联引进了水文地球化学学科，经历引进吸收、创新发展的历程，形成了具有中国特色的水文地球化学理论和方法体系。水文地球化学第二阶段的发展是全面吸收和引进国外先进的理论、技术和方法。在水文地球化学理论与方法上，形成了地下水系统中化学组分迁移形式评价的热力学-水化学-数学模型体系，确立了地下水化学场演化的定量评价技术与方法。

中国水文地质学者早在 20 世纪 80 年代即开始关注地下水污染问题。最早期的研究与污水灌溉、污水土地处理、矿坑废水排放等实际问题有关。主要研究的污染物包括氮的化合物、磷酸盐、硫酸盐、重金属、酚、氰化物等。研究方法多为区域性的调查工作，有机污染物的研究基本空白。90 年代以前，在国家“六五”和“七五”等攻关项目的支持下，广泛开展了地下水系统中污染物的存在形态、迁移规律和污染趋势预测的试验、模拟研究。90 年代以来，随着环境问题的日趋严重和测试技术的进步，中国地下水污染研究进入新阶段，相继开展了地下水脆弱性评价理论方法与案例研究；地下水有机污染调查、评价；垃圾场渗滤液导致的地下水污染与防治；污染含水层修复理论与技术研究等；核废料地质处置也开展了部分基础研究和场地尺度的试验。

20 世纪 90 年代以前，中国的地质微生物研究尚处于初始阶段。由于认识水平、研究手段和方法的限制，地质微生学的研究仅限于水－岩作用、地质风化、变价元素输移过程中的生物作用现象，对于地质微生物群落结构与演化的认识基本属于空白。90 年代至今，由于对地质作用过程中微生物研究的迫切需要，以及污染地下水系统功能恢复技术研发的极大需求，尤其是现代微生物学研究方法与手段的不断发展，在国家自然基金、国家高技术研究（“863”）、国家攻关等项目的资助下，大大推动了中国地质微生物学和污染地下水系统（非饱和带和含水层系统）生物修复的研究进展。

与生态水文地质学密切相关的生态水文学研究在中国始于在 20 世纪 90 年代。研究侧重在流域或区域尺度上的“大气-土壤-植物”系统的水分能量交换模型、森林对降水-汇流过程和土壤侵蚀过程的影响、进行了水分与热量交换为核心的地气相互作用野外观测、流域植被系统的水文过程响应规律等方面。另一个重要研究方向是生态需水量的计算和评价，在国内已经形成了很有影响的水文学科前沿领域。此外，中国地质调查局开展了一系列旨在以生态环境保护为目的的地质调查工作，包括大江大河流域、沿海地区、北方荒漠化和西南岩溶石山地区石漠化等环境地质调查，为今后生

态水文地质学的研究奠定了基础。

中国地下水数值模拟的发展始于70年代初。80年代初，多位学者相继出版了水文地质数值法的专著和教材，标志着中国地下水数值模拟应用的推广。目前，地下水数值模拟的应用已遍及与地下水有关的各个领域和各个产业部门。总体来讲，中国地下水数值模拟领域的应用水平较高，但理论研究较少、软件开发明显落后。地下水定量计算的另一关键领域，随机水文地质学的研究在中国起步较晚，且从事该领域研究的中国学者不多，与国际先进水平相比，还存在着较大的差距。数量不多的研究一般都以跟踪研究为主。

20 世纪 80 年代中后期，中国开始了地下水管理模型的研究与应用。在不长的时间里，几乎所有以地下水为主要供水水源的大城市，针对不同的问题，都建立了地下水管理模型。一些典型地区还建立了区域地下水管理模型，如河北平原、河西走廊、柴达木盆地等。但由于建模所考虑的因素多为水力要素，模型结构也比较简单，多归结为求解线性规划问题，大大限制了模型的实用性和可操作性。20 世纪 90 年代以来，随着可持续发展理论的引入，人们对环境问题的重视以及运筹学算法的发展，地下水管理模型无论从管理的内容还是建模的方法上都有了很大的发展，在研究内容上更多地涉及社会、经济、环境等因素，在模型结构上以多目标和非线性为研究热点和难点问题。

非饱和带水文学在中国的起步较晚。20 世纪 70 年代以来，随着土壤水分能量概念的引进和较先进的测试手段的应用，中国的非饱和带水文学在土壤水分运动和溶质运移、土壤－植物－大气连续体（SPAC）系统水分循环等方面的研究取得了长足的进展。但与国际先进水平相比，中国的非饱和带水文学研究还存在着较大的差距。

总之，中国的地下水科学的研究和应用在过去 50 年里取得了巨大成就，为国民经济的发展作出了巨大的贡献。但总体来说，中国地下水学科的进一步发展还面临着不少困难。比如，中国政府对地下水科研项目的资助缺乏连续性和足够的力度，从而未能对一些重大科学问题进行长期、深入的研究；地下水学科的基础研究仍较为薄弱，特别是与野外试验和室内实验相结合的基础研究亟待加强。学科交叉不够，地下水、地表水、非饱和带水的研究基本“分家”；缺少鼓励多学科交叉和不同背景科学家之间实质性合作的经费资助体制和学术激励机制；地下水监测数据共享不够，部分数据质量较差，严重地制约了科研的进展；由政府资助项目所得的地下水定量计算和模拟软件缺乏共享机制。如果形成“给资助—软件被引用—再给资助”良性循环，对推动地下水模拟软件产业发展定有好处；新技术、新方法、新手段的研发和推广需要大大加强。

国际地下水科学研究发展迅速

自 20 世纪 70 年代末以来，美国等发达国家的地下水科学研究取得了巨大进展。无论是理论方法，还是技术手段，均有重大的突破。地下水科学的研究呈现多学科交叉、大空间尺度、长时间序列的趋势。非均质性、尺度效应和耦合过程等重要科学问题的深入研究需要大规模的野外监测和海量数据。可以说，多数前沿问题及研究热点都与以下三方面相关：

- 非均质性：普遍存在的物理、化学和生物的非均质性如何影响地下水资源的分布、循环、水质及其可持续性？
- 尺度效应：水文和生物地球化学循环的控制过程在多空间尺度（从分子到全球）和多时间尺度（从秒到数十年）上如何变化？
- 耦合：如何综合考虑各种不协调的、复杂的过程，包括人类活动，并反映到政策制定者和决策者使用的预测模型里？

区域水文地质研究的前沿问题可以概括为如下五个方面。（1）如何定量描述区域尺度非均质性，尤其是对断层带渗透性的野外试验方法的研究，以及对不同应力条件下断层水文地质特性的刻画。在数值模型中如何考虑区域尺度渗透性，并将其应用于解决流域水资源管理和流体、溶质、能量运移等问题。（2）目前，尚缺乏野外直接测量大尺度范围内地下水补给量的方法。利用地热和地球化学数据，通过数值模拟反求的补给量往往不够准确。耦合模拟热量传输和溶质运移过程，进而得到地下水的补给量，是一个值得进一步探索的方向。（3）地震会导致地下水位、地下水温度和溶质浓度出现异常变化。因此，地震诱导的液流可以作为天然的水文地质测验。（4）在地壳内，地下流体的运动是矿物和石油重新分配的重要动力。因此，恢复古流体场、温度场和化学场的演化过程，是今后值得注意的研究方向。（5）海陆交界带的水文系统是全球水循环的一个重要组成部分。地下水向海岸地带的排泄对海水的营养物和溶质平衡有重要作用。海陆交界带正在成为区域水文地质研究的一个热点。

水文地球化学的研究加深了人们对水－岩相互作用、地下水的化学演化、矿化过程、石油地质以及地下水溶质运移方面的理解和认识。全球性的人口、气候、植被、土地利用和污染等环境要素的变化都会造成水质的变化，引发新的环境问题。另一方面，新技术、新方法的涌现，交叉学科的产生，为水文地球化学的进步和发展提供了新的机遇。当前水文地球化学的前沿研究着重于水文、化学、生物过程的耦合，特别是水文、生态和气候条件对养分循环的联合影响及反馈作用；地下水测龄的新理论、新技术、新应用；多种同位素的综合使用以揭示污染物的来源和水－岩相互作用

的过程和机制；发展水文和地球化学过程的计算机模拟技术与软件以增加可模拟的过程、时空尺度和计算精度。

在美国和西方发达国家，公众对地下水污染的关注促使政府为保护地下水和修复污染的含水层制定了许多严格的法律和管理条例，极大地推动了对地下水污染机理和修复技术的研究。目前，地下水污染和修复的前沿研究有以下几个方面。（1）利用布有密集监测网的大规模野外试验来验证和进一步改进污染物迁移理论和模型。（2）定量描述含水层渗透系数的空间变异性，特别是由极端非均质性造成的优先流通道，为模拟污染物迁移和修复过程奠定理论基础。（3）在污染物迁移和转化的模型中综合考虑物理、化学和生物过程的非均质性。（4）研究新近凸现的污染物（药物和病源菌），提高分析技术的灵敏度、分析污染源和污染路径、模拟这些污染物在地下水中迁移转化规律、评价这些污染物对生态的影响。（5）在强放射性废料的地质处置的研究中，考虑裂隙岩层的水文地质非均匀性、非饱和双重介质中的水流和核素迁移机制、长时间尺度迁移模型的不确定性和可靠性、以及通过同位素和环境示踪剂的方法寻找潜在迁移通道等。

地质微生物学是目前地球科学研究最为活跃的交叉学科之一。微生物作用对地下水水质起着重要的影响。微生物治理水体污染物方法日趋成熟。在利用微生物修复地下水有机污染物方面，当前的前沿研究主要集中于寻求各种野外条件下最有效的降解路径。已经发现的、有降解污染物能力的微生物的数量和功能在不断增加。基因工程可以把具有某种特定功能的基因引入到微生物。难降解化合物的生物降解已经成为可能。地下水中重金属和放射性核素微生物去污的机遇和挑战是找出影响污染物在地下水中运移和转化的主要控制因素，以开发新的生物降解技术和长期监测方案，从而更加合理地评估风险。地下水中的病原菌迁移转化机理及其修复策略也将是今后的一个重要研究方向。此外，微生物修复的野外应用必须配备有先进的检测技术。尽管近些年来这方面的进步迅速，包括分子方法、稳定同位素方法、地球物理方法的发展，但大量研究工作尚需进一步开展。

生态水文学已成为当今热门的研究领域，其主要研究内容为陆生环境与水生环境植物与水分的关系，阐述和探讨不同环境中植物－水分的相互作用；在流域尺度上研究水文和生物功能相互关系；在生态过程和生态模式的基础上，探讨影响植被变化的水文学机制；遵守质量守恒和能量守恒的原则，在周围环境不同的情况下，研究生态变化过程的机制；研究水文循环与生态系统之间的相互作用机理和过程。当今的一些前沿问题包括：土壤蒸发与植被蒸腾的定量化；土壤中水分与养分间的相互作用；植被对河川径流的影响；植被与地下水的补给关系；水文变化与植被的相互影响等。

许多水文地质的核心问题，如地下水资源管理、地下水质管理（包括修复系统设计）、监测网设计以及含水层参数估计等，都需要地下水模拟－优化耦合模型。当前，模拟－优化耦合模型的前沿研究方向包括：发展基于启发式搜索的全局最优化方法并减轻全局最优化方法对高计算量的要求；定量分析模拟模型固有的不确定性对最优解及管理决策的影响；通过大尺度实地示范证明模拟－优化方法在野外条件下的适用性和有效性。近年来，随着水文科学领域越来越强调水资源利用的可持续性，发展盆地尺度的水资源可持续性管理模型成为一个新的重要研究课题。一般来说，正是在河流盆地尺度内，水文、农业和经济之间的关系才能够融入一个综合的模型框架里，进而寻求更合理、更经济的利用水资源的政策手段。在不久的将来，改进的盆地尺度水政策模型将成为水管理非常重要的研究方向。对于许多河谷盆地来说，利用高效全面的分析工具才能得到合理的水分配决策，以达到水资源可持续利用的策略。未来建模将综合考虑经济、农业、工业、生态和水文等因素，建立基于 GIS（地理信息系统）的决策支持系统。

在过去 30 年中，水文地质学的一个重要进展是随机方法（包括地质统计学方法）在非均质含水层中地下水渗流和溶质运移研究中的应用。应用随机方法所取得的研究成果加深和改变了我们对非均质介质中流体流动和溶质运移的认识。随机方法在水文地质学中的应用正在逐渐广泛和深入。目前的前沿研究方向集中于两个方面：水文地质参数的空间变异性及尺度效应，以及水文地质参数的时间变异性及尺度效应。具体来讲，前沿问题包括：利用非平稳理论来描绘含水层介质和参数的时空变异性，利用野外实验来检验随机理论的研究成果，以及多尺度作用下的溶质运移的随机理论。

非饱和带水分和溶质运移已成为地下水科学最具挑战的前沿领域之一。非饱和带是固体介质、水、气三者并存的一个复杂系统。由于非饱和带是植被生长的基础，上通大气，接受降水补给，下与饱和地下水系统相通。因此，非饱和带水分的运动是水循环中的关键一环。非饱和带中的水流与溶质运移直接影响到地下水的水流与溶质运移。另外，人类活动（如农业耕作、工程建设、城市化等）首先直接影响非饱和带，然后通过非饱和带间接影响地下水系统。地下水系统对地表水和生态系统的影响也必须通过非饱和带。因而，非饱和带是地下水系统不可或缺的研究领域。非饱和带中水流与溶质运移研究的一个挑战性问题是尺度问题。其它重要前沿问题包括：非饱和带中水流和溶质运移、转化过程和机理以及数学建模；土壤物理性状和过程的观测与定量化；非饱和带中物理、以及化学过程与生物过程的耦合。

数据是中国地下水科学发展的瓶颈

可以说，中国地下水研究的最大障碍是缺乏足够的、可靠的、可以共享的基础数据。系统地改变资助政策和管理措施，以鼓励大量基础数据的采集、积累、和共享是发展中国地下水科学发展的当务之急。近年来地下水科学的进步在很大程度上是由水文地质数据获取的革命性新手段和新技术带动起来的。

互联网的普及和其它新技术的发展，尤其是遥测传感器的无线和声波传输，加之传感器的成本不断降低、其尺寸和重量的微量化，正在为环境监测和环境科学研究带来根本的变化。大范围的、多变量智能传感器阵列构成的智能网络，正在成为研究复杂现实世界的全新工具。这一技术使得在时间和空间上进行密集监测成为可能，有望揭示以前难以监测到的现象。廉价的测量地下水位、湿度、温度、溶解氧、CO_2、盐度、营养物等参数的传感器已经渐渐普及。充分有效地利用传感器网络进行数据的连续收集和监测，将需要新的赛百结构、方法、中间设备、基础设施配置及多学科科学家和工程人员的协作。大量、高质量的数据有助于新的科学问题的提出。中国的地下水研究者和工程人员应该充分利用这些新兴的测量技术和手段。

由于地下水系统非均质性的普遍存在，含水层中地下水流动和污染物运移的三维模拟需要大量的水文地质数据。虽然传统的监测手段和抽水实验可以估计含水层的水力特征，但费用很大，而且只能取得研究区内有限点上的数据。与传统的水文地质方法不同，地球物理方法（包括电阻率法、电磁法、地面穿透雷达、地震、交叉测井电阻率/雷达/地震层析成像）的覆盖密度大，可以迅速获得大量的数据，且花费较低。虽然在某些情况下，可以建立地球物理数据与水文地质特征之间的定量关系，但需要指出的是，地球物理数据仅能间接表征含水层的水文地质特征，例如渗透系数、孔隙度或污染羽的移动。地球物理方法作为估算水文地质参数的补充或替代方法，用于地下水模拟颇具吸引力。

多参数水质监测系统是一种新兴的、获取大量现场水质数据的方法，正逐渐为水文地质学者所熟悉。所谓的“数据探测器”包含多种探头或传感器，以便同时测量各种不同的参数。将数据探测器与数据记录系统相连接，可以实现数据的连续收集；与数据读取仪表相连接，可以实现原位数据采集。解决“大视野”科学问题，要求我们监测并观察各种尺度（区域尺度、大陆尺度乃至全球尺度）内的水循环。卫星遥感逐渐成为研究区域和全球范围水循环的重要工具。遥感可以提供大量的数据，其采集成本远远低于地面数据。收集全球尺度内的水文数据，遥感或许是唯一可行的方法。遥感技术的进步将为水文学（包括地下水文学）的发展带来新的机遇。

在过去的 10 多年里，信息技术得到了迅猛发展。计算速度、存储容量和网络基础设施的飞速进步，使得我们可以进行海量的科学和工程数据的收集、存储和计算。信息学科出现于大气学、生物多样性、生物医学、地球科学和海洋学等学科有关的子领域。为了满足科学研究的需要，美国联邦政府和有关组织增加了资助基金的数量，以支持各学科之间新的信息技术的发展。例如，美国自然科学基金会于 2000 年设立了信息技术研究计划，鼓励信息技术在科学、工程及教育领域中的应用，以及创新的基础设施的发展，以支持信息技术研究和教育。这些行动被称为“美国未来科学的先期投入”。中国水文学的计算机信息基础设施与美国等一些发达国家之间还存在着很大的差距。科技部、国家自然科学基金委和中国地质调查局应该继续加大投入，发展计算机信息基础设施和信息技术研究，以促进水文数据在互联网上的存储、发布和共享。

地下水资源的严峻形势，与之相关的生态环境问题和地质灾害日趋严重，已成为制约经济社会全面、和谐、可持续发展的重大战略问题。中国地下水监测现状难以满足经济社会发展的需求，迫切需要健全完善地下水监测网络。因此，中国急需建立国家级长期地下水监测网，收集稳定、可靠、大空间尺度、长时间序列的数据。这些数据的获取将有利于实现区域地下水开采总量控制，有效地防治跨省（区、市）地质灾害，有助于提高全国地下水资源评价程度，为国民经济和社会发展规划以及国家重大战略部署提供科学依据。再者，地下水监测是一项服务于全社会的基础性、公益性工作，地方监测网难以起到国家级监测网的作用。美国、荷兰等发达国家都建立了国家级的地下水监测网络。这些网络的建立和数据的获取在提高区域地下水资源调查、评价，制定合理利用方案和科学保护措施，避免出现灾害性或灾难性后果等方面发挥了重要作用。国内外的经验也表明，在为政府、社会公众和科学研究提供信息服务与决策支持等方面，国家级地下水监测网具有地方监测网无法比拟的优势。

中国地下水科学的教育体制亟待改进

加强地下水学科本科和研究生教育是推动中国地下水科学发展的首要任务。地下水资源具有一般地质矿产资源和地表水资源的双重属性：研究地下水运动需要运用水力学和流体力学的基本原理；研究地下水的区域水量均衡、资源保证率以及地下水径流特征时，需要借助于水文学和水资源学的基本理论；研究地下水的埋藏分布特征、水量、水质形成条件以及地下水的各种区域性规律乃至环境地质效应则必须依靠地质学的理论。此外，地下水不仅是一种资源，同时又是一种重要的地质营力、地球环境的一个重要组成部分和地质环境信息的一种重要载体。片面地用地质学或水文学来覆

盖或替代其它学科的主张或做法既不利于这门学科的成长，也不符合科学发展取向的自然客观规律。

在目前中国本科专业体系中与地下水科学相近的专业为“水文与水资源工程”。地下水科学与水文与水资源工程在培养目标、学科定位等方面存在很大的区别。前者的突出特点是培养的专业人才必须具有坚实的地质理论基础，而后者则隶属传统面向地表水的一级学科“水利工程”。因此，设立“地下水科学与工程”或恢复“水文地质”本科专业，既可以解决就业市场对学生的需求，又可以避免目前在“水利工程”一级学科名义下培养水文地质专门人才所遇到的尴尬局面。这种局面的产生是中国学术界习惯性将“水文学与水资源”理解为主要面向地表水研究，即该专业主要是培养从事地表水资源工程和水利施工中相关问题的设计、评价、开发、管理与保护的教学、基础研究和应用的高级工程技术人才，学科门类上属于水利工程。而水文地质专业面向的是地下水研究，学科归属为地质科学。

近几年，中国地质大学、南京大学、吉林大学、长安大学均设立了“地下水科学与工程”硕士、博士招生点。中国的地下水科学领域的研究生尤其是博士生的培养质量亟待加强，从论文选题的前沿性、研究手段的先进性、研究的学科跨度和发表成果的国际性等方面与发达国家尤其是北美仍有较大差距。应当大力加强研究生导师队伍建设，重视并切实加强基础研究，通过承担基金项目、开展国际合作、实施国际同行的学术评价标准等方式，提高研究生的培养质量。

中国地下水科学的优先研究领域

考虑到中国地下水科学的现状和当前国际地下水研究的趋势，结合中国社会经济发展和环境保护的需求，本书提出了推动中国地下水科学发展的优先研究领域，供资助地下水研究的政府部门和与地下水有关的科研人员和学生参考。这些优先研究领域包括（重要性与排列顺序无关）：

- 人类活动、气候变化、土地使用变化对地下水循环的影响
- 区域尺度含水层系统三维表达与耦合过程的数值模拟
- 地下水可持续利用与科学管理模型
- 地下水过量开采及水质污染引起的区域环境地质问题
- 岩溶地区地下水系统运动机理与可持续开发利用
- 区域地下水监测网的建立、完善与管理
- 地下水同位素示踪剂的发展与应用

- 生物过程动力学以及对水化学的影响
- 特殊环境下水文地球化学问题的研究
- 与地下水污染、修复有关的行政管理与法律框架
- 地下水污染现状的系统客观评价
- 含水层物理及化学非均质性对污染物归宿运移的影响
- 经济、高效的地下水污染修复方法与技术
- 地下水中的病菌及其控制因素
- 地质微生物群落结构、代谢能力与物质循环对生物修复的影响
- 区域水文地质条件及其变化与植被生态格局的关系
- 陆生生态系统分布与地下水系统之间的相互作用及反馈机理
- 潜水含水层中地下水各种物理化学过程的生态效应
- 高寒地区气候变化对地下水的影响及其生态响应
- 水文地质参数非平稳场的时空变异性和尺度效应
- 随机水文地质学理论在实际工作的应用
- 非饱和带多重界面水分水质转换机制及其生态效应
- 非饱和带的生物和地表生态对水的净化机制
- 非饱和带中的多相流问题、时空变异性和尺度转换
- 农业可持续发展中的土壤特性变化、土壤污染问题

促进中国地下水科学发展的建议

本书的最后一章列出了我们对促进中国地下水科学发展的一些想法和建议，包括科研、教育、和数据问题。

为了提高中国地下水科学的研究水平，我们建议中国自然科学基金委和其它与地下水有关的政府部门大幅度增加对上述优先研究领域的资助强度，鼓励地下水科学和其它相关领域的交叉，以便推动中国地下水科学研究整体水平的提高。作为地学的一个基础和骨干学科，我们认为地下水科学在基金委地学部的地位应该进一步提高，建议地学部成立一个与“地质学”学科相同等级的“水文科学”或“水科学”学科管理组。尽管中国的地下水科研与实际工作为解决公众的饮水问题和推动国民经济建设做出了巨大贡献，但中国地下水科学基础研究的现状与美国和其它西方国家相比，还比较落后。这种状况与地下水对中国社会经济发展所发挥的重要作用很不相称。我们认为，改变这种状况的一个有效办法是针对中国地下水的特点，由基金委牵头设立一个重大的科研计划，提出关键科学问题和预期目标。通过该计划的实施获得一批系统

的重要成果，在国际一流水科学类杂志上发表一批有代表性的论文，从而提高中国地下水科学在国际上的地位。在重大科研计划的基础上，我们建议建立一个以地下水为主题的国家重点实验室。这一科技平台将有利于提高地下水科学在中国学术界的地位，建立一个能够攻克与地下水相关的重大科学问题的综合团队。同时有利于吸引海外人才回国参与中国的地下水科研工作，从而加强与国际水文科学界的合作和交流。

要促进中国地下水科学的发展，首先要加强地下水学科本科和研究生的教育。我们建议：第一，重视本科生教育知识的全面性。除了最基本的地下水理论和实践外，本科生教育还应加强数理化、地质学基础和相关领域的课程，包括地表水文学、水化学、气候学、生态学、地质微生物等等。第二，注重硕士、博士研究生的独立思考能力和实践能力的培养。特别是博士生，应该选择能够为地下水及相关科学做出原始贡献的题目。鼓励研究生将研究成果发表在国际水资源刊物上。第三，加强国际交流。研究生在读期间，应争取国家资助到国外高水平大学学习访问，以开阔科研视野，丰富国际经历。同时应鼓励研究生在读期间参加国际会议，宣讲他们的论文。我们建议基金委或其它部委设立资助杰出研究生自主选题的“博士生创新基金”。

缺乏可靠的、可以共享的基础数据是阻碍中国科学，特别是地学发展的瓶颈。要想从根本上解决这个问题，需要中国政府的决心和相应的政策。我们建议：第一，将在中国政府直接拨款资助的生产性调查项目中所收集的数据列为共享资源。数据的质量一旦经过检验，尽快在互联网上公开发布，供决策者和科研人员使用。第二，通过基金委重大和重点基础科研项目所收集的数据也应在项目完成之后一定时间成为公共流通的共享资源。使用这些资源的论文必须注明原始数据的出处和对原始数据收集者的致谢。第三，基金委加大力度支持水文信息系统和赛百结构的研究和开发。鼓励各个地调局、水利部门和科研单位采纳数据存贮、检索、和发布的统一标准和规范。最后，在学术刊物刊登的文章中第一次使用任何原始数据，必须描述这些数据的采集过程以及实际的数据。建议在科技部设立的科技基础条件平台建设计划中，安排地下水数据共享系统专项课题，以构建一个拥有海量数据、实现资源有效共享的基础数据平台。

第一章　地下水

1.1 地下水与水循环

水是生命依存的最基本要素。在地球表面，水几乎无所不在、无处不有。雨雪从空中落到地表，一部分汇入河流湖泊成为地表水，另一部分则渗入地下岩层中成为地下水。而后在岩石空隙中缓慢流动，最终排入河流、湖泊或海洋等地表水中。在太阳能的作用下，又重新进入大气，如此循环往复。这一过程就是通常所指的水循环（见图 1.1）。

水在地球上以气、液、固三种形式出现。海洋和陆地上所占水的比例为 96.5% 和 3.5%。在陆地上，一半的水处于冰川和永久积雪固体的状态中，另一半处于液态的水中。如果仅仅从储量的角度考虑，地下水占了陆地液态水的 98%，我们所熟悉的湖泊和河流只占 2%。地下水是水循环中的一个关键环节，因为含水层为水循环过程提供了至关重要的通道和储藏空间（见图 1.2）。

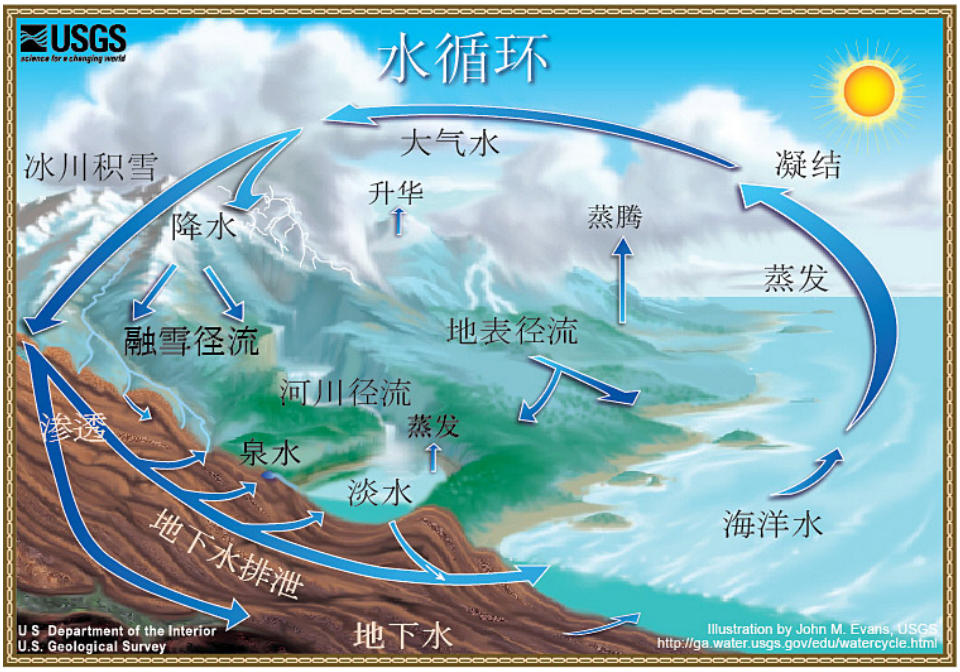


图 1. 1. 水循环示意图(引自 http://www.usgs.gov)

地下水中只有一半左右为淡水资源，但此量仍然远远大于整个地球上所有河流湖泊总淡水量（内孝芳，2004）。如此多的地下水却没有像江河湖泊中的水那样引起一般人的关注。除了埋藏于地下外，从整个地球的尺度看，江河中的水呈线状分布，湖泊中的水呈点状分布，而地下水在地层中几乎无处不在，呈面状、体状分布。正是这种分布状况，使生活在远离江河湖泊的人类，不需要地面的输水工程，依靠地下水就可以生存。全世界超过 15 亿的人口主要以地下水作为饮用水（Alley et al., 2002）。在中国，北方和西部地区主要城市的供水量有 50％来自地下水，许多城市甚至高达 80％以上。

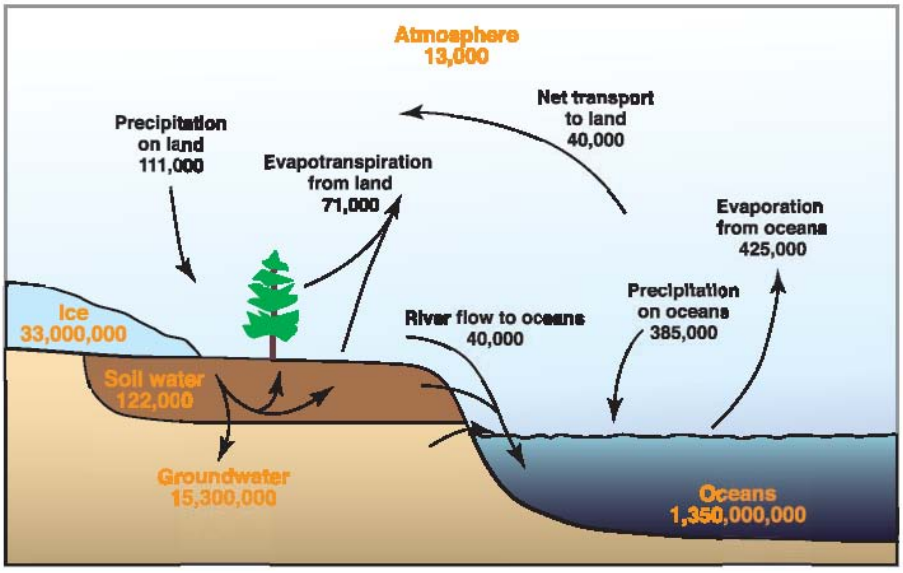


图1.2.全球水储量和通量，包括地下水储量和其它主要储量（立方千米）和通量（立方千米/年）项的比较（Schlesinger,1997）

地下水在岩层中的流动极其缓慢，使得时间上不均匀的降雨可以长期储存在地层中而缓慢补给地表水，这也正是许多河流湖泊得以存在的原因，含水层使地表水“细水长流”。含水层具有天然的净水作用。地下水经过含水层的过滤后，通常可以直接饮用，甚至是质量上乘的“矿泉水”，而地表水往往要经过处理后才能饮用。通过深部循环，地下水还可吸收地下深处的热能成为地下热水，而开发利用地下热水则可以获得电能和热能。

几千年来，江河中的“洪水”给人类造成了很大的危害，但我们常常忽视地下水给人类带来的灾害。在矿山开采中，大量地下水突然涌入矿井，造成人员伤亡的事故屡见不鲜；地下水开采造成水位大幅度下降，引起地面沉降和地裂缝，毁坏建筑；在许多山区，地下水的作用还会引起滑坡等地质灾害。

地下水通常较地表水难以污染，然而一旦被污染，其不良后果很难消除。生活污水的排放，不适当地使用化肥、农药，以及工业排放的大量废水废料，已经并正在使许多宝贵的地下水源污染，通过饮水危及人类的健康。除了人为影响而产生的地下水水质问题外，某些天然的地下水由于缺乏某种人体必需元素或过量富集某种元素也会影响人类的健康。比如：缺碘的地下水作为饮用水源会引起甲状腺肥大；高氟地下水使人产生骨质疏松、易折等现象。

地下水是重要的生态环境因子，它的变化往往会影响生态系统的天然平衡状态。在许多地区，地下水过多，则地下水位抬升，造成土壤次生盐渍化，影响植被生长；另外一些地区，开采地下水使地下水位下降，湿地退化，水生植物消失，景观受到破坏，甚至使绿洲变成沙漠。

人类已进入 21 世纪，面对以上问题和挑战，我们需要对自然界中地下水的循环演化规律有更深刻的了解，对地下水与地质介质的相互作用机理有更深入的揭示，对地下水与环境的关系有更清醒的认识。我们相信，地下水科学的进步必将对人类社会的可持续发展产生巨大影响。

1.2 中国地下水概况

地下水是自然界中水循环的一个重要环节，大气降水是其主要补给来源。在中国，多年降水在空间上的不均匀分布造成地下水资源的不均匀分布。由东南沿海向西北是降雨量变化最大的方向，在东南沿海地区年均降水量均在 1500 mm 以上，最大可达 2000－3000 mm；长江流域约 1200 mm，华北地区一般在 600－800 mm；而新疆塔里木盆地降水量在 50 mm 以下（图 1.3）。

在这样的水资源条件下，各地区水的需求的满足程度不同。一般说来，长江流域及其以南地区，降水较为充沛，水文循环总量可满足生产及生活的需要；但由于水

量季节分配不均匀，某些地区在干旱季节，尤其干旱年份仍感到缺水。华北、东北地区，一般雨季水量不少，但干旱季节长，普遍感到缺水，总的说来水量不能满足要求。西北干旱或沙漠地区，降水稀少，水资源贫乏，形成大范围的荒漠，仅在盆地边缘由于获得山区冰川和积雪融化水而得到补给。

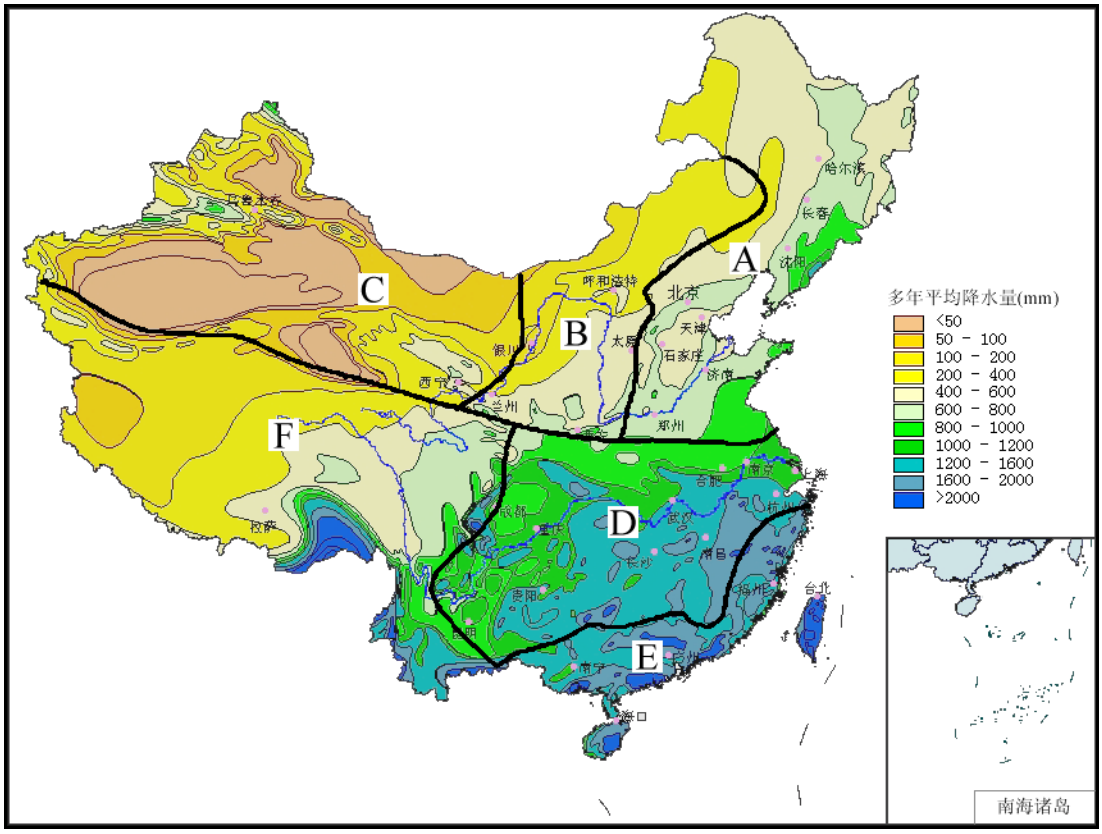


图 1.3. 中国多年平均降雨量分布及水文地质分区
（引自张宗祜和李烈荣，2004；陈梦雄和马凤山，2002）

中国大地构造格局是决定各个地区不同自然地理条件的重要因素，并与气候分带存在密切关系。在中国，存在阴山～天山、秦岭～昆仑和南岭三条巨型纬向构造带，将气候由北向南划分为北温带、中温带、南温带及亚热带，同时秦岭山系是黄河水系与长江水系的分水岭，南岭构造带又是长江水系与珠江水系的分水岭。

中国北方地区，由于北北东向的新华夏系构造带影响，由东部半湿润气候带过渡到半干旱气候带的内蒙古高原与黄土高原；而南北向的贺兰山系构造带则是半干旱

气候带与以沙漠、绿洲景观为象征的干旱气候带的分界线，也是黄河水系与内流水系的天然分水岭。

根据气候分带结合大地构造与地质、地貌条件，中国共可划分为六个水文地质大区（图 1.3）：

A、 东部大平原半湿润气候季风带水文地质区；

B、 内蒙古高原、陕甘黄土高原半干旱气候草原带水文地质区；

C、 西北内陆盆地干旱气候沙漠带水文地质区；

D、 华东、华中及西南丘陵山地潮湿气候带水文地质区；

E、 东南、华南海洋气候亚热带水文地质区；

F、 青藏高原冰漠及高山草原带水文地质区。

秦岭～淮河一线不仅是中国的自然地理分界，也是地下水资源形成和分布南北差异的分界线，此线以北为北方，以南为南方。中国地下水资源的地区分布的主要特点是：南方多，北方少。南方地下水平均年资源量占全国地下水资源量的 69.2%，而北方仅占 30.8%。北方平原区地下水资源量占全国平原区地下水资源量的 78%；南方山丘区地下水资源量占全国山丘区地下水资源量的 79%（图 1.4）。

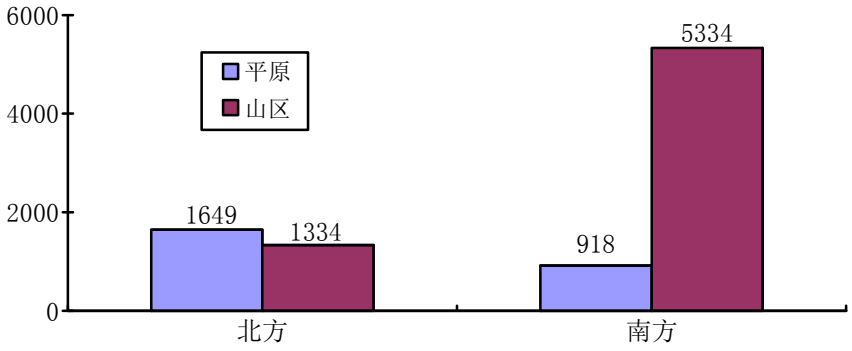


图 1.4. 中国平原和山区的天然地下水资源量（亿方/年）（张宗祜和李烈荣，2004）

中国的地下水资源的补给量以珠江流域和雷琼地区最为丰富，其地下水天然资源补给模数（每年每平方千米补给量）分别达 32.2 万立方米和 41.5 万立方米；长江

流域平均补给模数为 14.8 万立方米（其中，洞庭湖流域达 23.1 万立方米）；华北平原补给模数在 5 万立方米左右；西北地区最小，不足 5 万立方米。

根据含水层介质性质和赋存状态地下水可分为孔隙水、岩溶水和裂隙水三种类型，其中裂隙水的天然资源量最大，而孔隙水在开发利用上占主要的地位（图 1.5）（张宗祜等，2004）。

中国各大平原和盆地是地下水资源的富集区。其中：松辽平原、三江平原、黄淮海平原、河西走廊、准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地、四川盆地等平原、盆地的地下水天然资源量每年达 2045 亿立方米，占全国地下水天然资源量的 22%，地下淡水可开采资源量为每年 1082 亿立方米，占全国地下水可开采资源量的 31%。

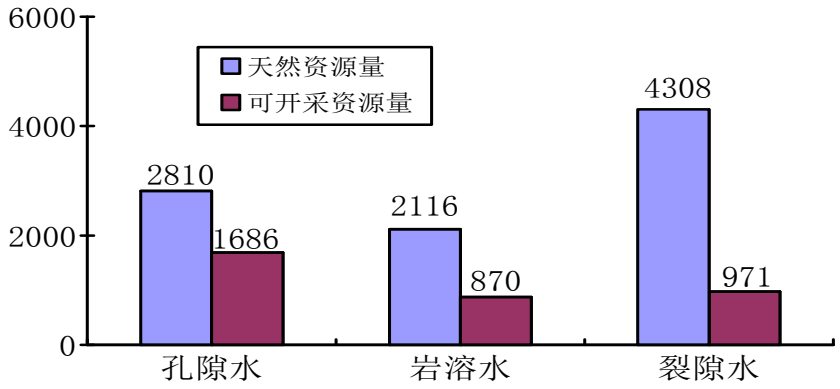


图 1.5. 中国天然地下水资源分类（亿方/年）(张宗祜和李烈荣，2004)

1.3 中国地下水问题

中国属水资源短缺国家，人均占有水资源量仅为世界平均水平的四分之一（Jiao and Wen, 2004）。根据水利部 2006 统计数字，中国 500 个城市中有 300 个缺水，严重缺水的城市达 108 个。尤其在华北和西北地区，水资源短缺的矛盾更为突出。图 1.6 显示的是华北平原由于地下水位大幅度下降，造成许多靠地下水补给的地表河流的断流。



图 1.6. 华北平原石家庄附近干枯的河道

地下水污染进一步加剧了地下水资源的短缺程度。据中国环保总局公布的资料，2004 年中国废水排放量约为 480 亿吨，其中：工业废水排放量为 220 亿吨，生活污水排放量为 260 亿吨。生活污水的绝大部分未经处理或处理后尚未达标就被排入江河或直接用于灌溉。中国主要城市和地区的地下水水质受人为活动的影响较大，硝酸盐、亚硝酸盐、铵氮、氯化物等组分的含量普遍升高，水污染导致许多城市供水困难，严重危害人民身体健康（图 1.7）。



图 1.7. 浙江钱塘江边受到严重污染的井水

中国某些地区如黄土高原、黄淮海平原等地，水资源极为贫乏，许多地方人畜饮水十分困难，而其水质又很差，从而引起许多环境问题。如地下水中某些元素含量过高或过低引发的氟中毒、砷中毒、甲状腺肿大、克山病等地方病，正严重制约着这些地区的社会经济发展，寻找合格的饮用水源，改善水质是十分迫切的任务。

矿山和油田开发往往造成地下水资源的极大浪费和地下水环境的恶化。矿坑排水，尾矿堆放，以及矿山和油田对生产和生活用水的高度需求，导致了地下水资源的枯竭，并引起植被退化、土地沙化、地面塌陷、边坡失稳和土壤及地下水污染等许多环境问题（图 1.8）。中国新兴能源开发基地，如晋陕蒙接壤地区的能源基地和天山南北的能源基地及农业基地等，均处于生态环境极为脆弱、水资源严重不足的地区，如何合理开发、利用和保护地下水环境将成为这些地区经济能否持续发展的关键因素。

中国社会和经济的高速发展，基本建设规模日益扩大，矿山、水利、交通等领域内的大型工程与地下水的关系极为密切，出现了矿坑突水、水库渗漏、隧道渗水等地下水灾害问题。此类问题往往与裂隙、岩溶地层有关，裂隙和岩溶水力学的研究是解决问题的关键。



图 1.8. 湖南水口山矿区地面塌陷

总之，中国现阶段社会发展过程中，地下水资源普遍过量开采，水资源短缺矛盾加剧并引发出一系列危及人类生存的环境问题；地下水普遍受到程度不同的污染，

加之很多地域存在天然劣质地下水，直接威胁供水安全；矿产资源的大量开采和人类大型工程活动引发了一系列灾害性的地下水问题。如何保证地下水资源的可持续利用、保护我们的生存环境、促进人与自然的和谐发展，已经成为地下水科学当前及未来所面临着的严峻挑战。

参考文献

内孝芳，2004，水文学原理，中国水利水电出版社，北京。

张宗祜，李烈荣，2004，中国地下水资源与环境图集，中国地图出版社，北京。

陈梦雄，马凤山，2002，中国地下水资源与环境，地震出版社，北京。

Alley, W.M., R.W. Healy, J.W. LaBaugh, and T.E. Reilly, 2002, Flow and storage in groundwater systems, *Science*, 296:985-90.

Jiao, J.J., and D. Wen, 2004, Perspectives on Chinese groundwater resources, *Ground Water*, 42(4):488-490.

Schlesinger, W.H., 1997, *Biogeochemistry – An Analysis of Global Change*, *2nd edition*, Chapter 10, Academic Press, San Diego, CA.

第二章　中国地下水科学的现状

在中国，研究地下水的学科通常称为水文地质学。它即是地质学的一个组成部分，又是水文学的一个重要分支。社会需求一直是中国水文地质学学科发展的动力。五十年代，大规模的经济建设迫切需要足够的地下水资源，寻找优质地下水是学科发展的主要方向；六十年代后期，大规模地开发利用地下水，造成许多地区出现了地面沉降、地面塌陷和水质恶化等一系列环境地质问题，大范围区域地下水资源评价及合理开发成为学科的重要研究内容。九十年代中期，随着社会文明的进步和生活水平的提高，与环境和生态有关的一系列地下水环境问题愈来愈受到人们的关注。本章将从几个侧面介绍中国水文地质学的发展和研究现状。

2.1 水文地质调查

全国性的水文地质调查工作始终是水文地质学科发展的源泉和基础，也是中国水文地质学的特色。该项工作从 1955 年始，历经 40 多年，不仅提高了全国区域水文地质研究的程度，而且为国民经济建设和社会发展提供了系统完整的水文地质基础资料，至今仍发挥着重要作用（陈梦熊，2003）。

从 20 世纪 50 年开始，到 1980 年已基本上完成了全国区域水文地质普查工作，掌握了区域地下水分布条件和含水层结构特征，共完成调查面积 950 万 km^2（其中 1:20 万 610 万 km^2，1:50 万 170 万 km^2，1:100 万 170 万 km^2），基本上查清了中国主要地区的 1/20 万－1/50 万区域水文地质条件和地下水资源概况。最近一轮的全国地下水资源评价（2000－2002 年）的结果为：地下水天然资源量大约为 9200 亿 m^3/a，淡水可开采资源总量大约为 3500 亿 m^3/a。此外，还针对一些地区的特殊需要，开展了专门性的水文地质调查。如以城市供水为目的而开展的“城市水文地质调查”；针对农业灌溉需要而展开的“农田水文地质调查”；为矿产资源合理开发和矿山生产安全服务而进行的“矿区水文地质调查”等。

1999 年地质大调查以来，重点开展了鄂尔多斯盆地、河西走廊、塔里木盆地、柴达木盆地、吐－哈盆地、准噶尔盆地、岩溶石山地区、西藏“一江两河”地区、首都地区、华北平原地区、三江平原、松辽西部、松嫩平原等以流域（盆地）为单元的大比例尺区域水文地质调查(图 2.1)，查明了中国西部地区和北方重点地区主要大型地下水盆地或地下水系统的地下水资源总量，评价可持续利用的区域地下水资源潜力及其空间分布。紧密结合重要基础设施、主要城市、重点农业开发区和生态环境建设及严重干旱缺水地区需要，开展重点地下水资源勘查与合理开发利用示范研究。同时也开展了区域地下水水质与污染调查评价的工作。

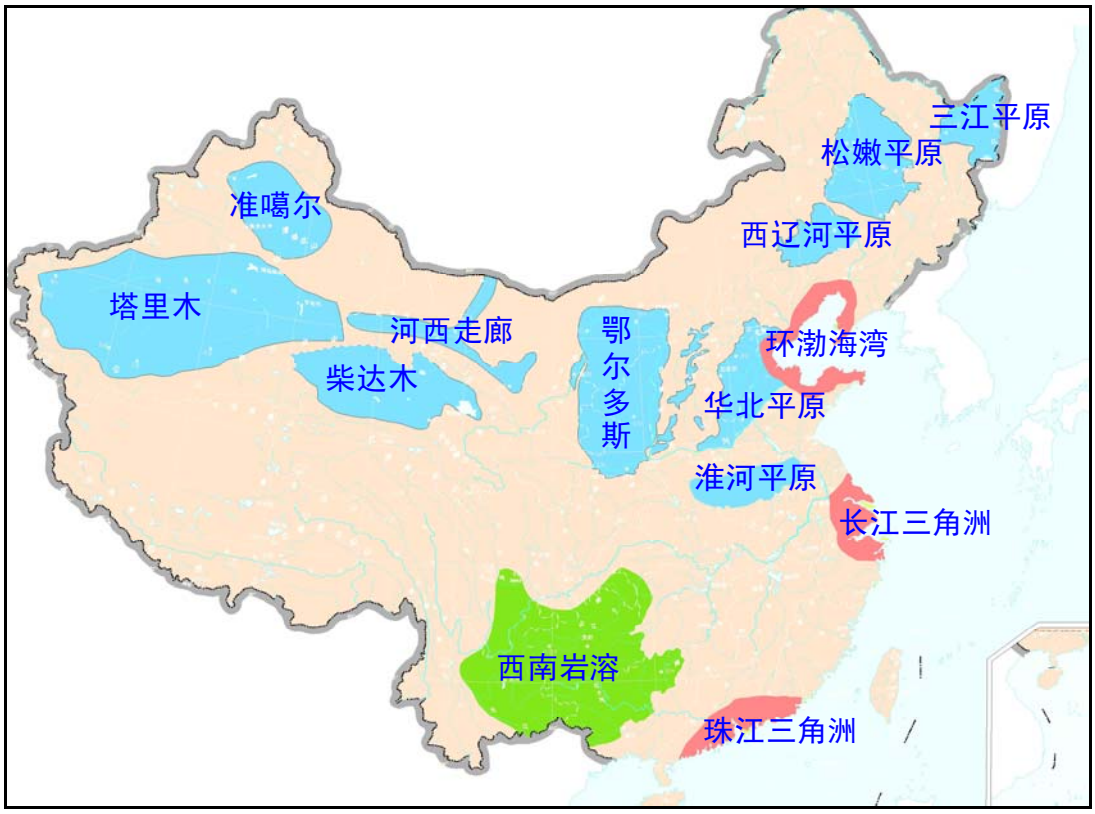


图 2.1. 中国 1999 年以来以流域（盆地）为单元的大比例尺区域水文地质调查工作区示意图（根据中国地质调查局）

2.2 区域水文地质

区域水文地质学是从宏观角度研究地下水空间分布规律的学科。几十年来，中国水文地质工作者进行了大量基础性研究，在理论上主要表现在中国区域地下水分布规律的认识和表述，以及在长期实践过程中形成的基岩地下水找水理论。

为了满足全国范围内的城市建设、农业灌溉、矿产开发、水利和交通工程远景规划的需要，在苏联专家指导下，地质部水文地质工程地质局于1957年编制完成了第一张1:300万比例尺的《中国水文地质分区图》和1:400万比例尺的《中国潜水区划图》，编制出版了第一部《中国区域水文地质概论》（陈梦熊，2003）。该项战略性的研究工作奠定了以后几十年中国区域水文地质调查的框架和基础，也是中国区域水文地质学的开端。其主要内容是根据影响潜水性质、分布规律和动态类型的自然地理条件把中国分为七个水文地质大区，将更详细的地质构造单元作为进一步划分亚区的依据，提出了一套符合中国特点的区域水文地质分区理论和方法。

经长期实践，中国区域水文地质调查形成了一整套颇具特色的方法体系，并制定了一系列相应规范。该调查方法充分考虑了中国地域辽阔、地质条件复杂、地下水类型繁多等特点；将中国的含水层按照含水介质划分为孔隙水、裂隙孔隙水、裂隙水、岩溶水、冻结层水五种类型；将含水层埋藏条件划分为裸露型、覆盖型与埋藏型三种型式（陈梦熊等，1975，1979；袁道先等，1976，1979）。

在区域水文地质普查勘探和流域尺度水文地质综合研究的基础上，完成了《中华人民共和国水文地质图集》（张宗祜等，1979）、《中国水文地质图》（张宗祜等，1987）、《亚洲水文地质图》（张宗祜等，1997）、《中国地下水资源与环境图集》（张宗祜等，2004）等一系列水文地质图（册）。

基岩缺水地区在中国的分布极为广泛，研究这些地区的区域地下水分布规律和寻找地下水，一直是中国水文地质学家的重要任务，并形成了相应的理论。其中以刘光亚提出的“蓄水构造理论”和肖楠森提出的“新构造控水理论”最为典型。两者的共同之处均强调了地质构造与地下水的关系。他们的提出对中国缺水的基岩山区找水起到了巨大作用，促进了中国水文地质学的发展。

“蓄水构造理论”中，将各种不同尺度的地质单元（地层、断层、接触带、岩体、岩脉等）分为导水和阻水两大类型。这两种地质单元在空间中的一定组合方式必然形成有利于蓄存地下水的条件，加上补给条件优于排泄条件，就形成了蓄水构造。寻找地下水就是寻找蓄水构造。刘光亚提出了九大类蓄水构造模式，并详细论述了各模式的特点和野外识别方法（刘光亚，1979）。

“新构造控水理论”的核心思想是：基岩地区的新构造断裂对地下水的运动有主要控制作用，其主要依据是新构造断裂（特别是活动断裂）具有裂隙延伸长，切割性和连通性好的特点，同时胶结、充填程度低，利于地下水贯通、汇集。肖楠森还进一步论证了张性和张扭性断裂是最为富水的断裂，及其野外识别方法（肖楠森，1981，1986）。

中国地质调查局针对西部人畜饮用缺水重大社会问题，于 1999－2004 年组织 13 省（区、市）地勘与科研单位的数百名技术人员，选择西北基岩地区、第四系地区和西南红层地区严重缺水村镇，开展了大量地质勘查、供水示范工程建设及综合研究工作，在基岩地区，应用“新构造控水”理论，建立了 15 种基岩裂隙水相对富集模式；在第四系地区和半胶结地层分布区，应用“古沉积环境控制水质形成与演化”理论，建立了 8 种地下淡水层（体）埋藏分布模式；在西南红层丘陵区，提出了“红层风化裂隙水资源化”的新认识，建立了“分散式”供水新模式。

2.3 水文地球化学

在中国，水文地球化学的发展可以分为两个阶段，二十世纪五十年代到八十年代为第一阶段，八十年代以后为第二阶段。第一阶段，主要从前苏联引进了水文地球化学学科，经历了引进吸收、创新发展的历程，形成了具有中国特色的水文地球化学理论和方法体系。在区域水文地球化学方面，结合区域水文地质调查，通过测定地下水中宏量组分和水化学分类，基本查明了全国不同地区的地下水水质和水化学分区，为地下水开发利用提供了基础资料；在特殊类型地下水的水文地球化学方面，结合社会发展的需求，在医疗及饮用矿（泉）水、地下热水、工业矿水（卤水）和油田水等方面开展了普查性调查评价工作，基本上了解了此类地下水的空间分布特征，初步探

讨了形成规律和控制因素；在应用水文地球化学方面，主要围绕农田供水、土壤改良、地震预报、地方病防治、矿坑排水、古水文地质－水文地球化学找矿（包括放射性水文地球化学）、找油、地下水化学成分异常等生产实际的需求，开展了调查和研究工作，并涉及到少数微量组分和生物学的研究。总体上，这一时期中国的水文地球化学研究以区域性调查和了解区域含水层水化学特征为主。

水文地球化学第二阶段的发展是全面吸收和引进国外先进的理论、技术和方法。在水文地球化学理论与方法上，形成了地下水系统中化学组分迁移形式评价的热力学-水化学-数学模型体系，确立了地下环境条件下水化学场演化的定量评价技术与方法（张宗祜等，2000；王焰新等，2004）；在岩溶地球化学研究方面，通过典型地区岩溶发育规律的调查，较系统地分析了不同地区岩溶水水化学和同位素地球化学特征，在岩溶系统碳循环、全球环境变化、野外试验场等领域取得了重要成果（袁道先等，2002）；在研究手段方面，环境同位素、微量及痕量元素、气体和有机污染物分析、地下水微生物群落分析的分子生物学技术得到较快的发展。在国家自然科学基金的资助下，不仅大量使用氢、氧、碳同位素解决水的成因、年龄等问题，而且其它同位素如 ^{14}C-AMS、^{36}Cl-AMS、^{10}Be-AMS、^{37}Cl、^{11}B、^{7}Li、^{32}Si、^{15}N、NO_3 中的 ^{18}O 等的测试技术及其在水文地质研究中的应用也得以开展，甚至开始应用 SF_6、CFC 测定年轻地下水的年龄。

另一方面，应用水文地球化学研究较有特色，主要涉及成矿（生油）规律、地方病防治和地下水污染防治的水文地球化学研究。成矿（生油）规律的水文地球化学－古水文地质分析通过探索金属矿产和陆相油气盆地中油气的形成分布规律，为矿产资源的综合评价提供了水文地球化学标志，丰富了成矿和生油理论（汪蕴璞等，1987；刘崇禧和孙世雄，1988；李学礼等，2000；汪蕴璞，1991；王焰新，1990）；始于 20 世纪 60 年代的地方病防治的水文地球化学调查研究，针对中国十几个省区的克山病、大骨节病、地方性甲状腺肿、氟中毒、砷中毒、癌症、伽师病以及其它的生物地球化学地方病进行了长期调查、研究，初步总结了各种地方病病区的水文地球化学特征，探讨了环境地球化学背景及影响生态地球化学系统的主要因素和相关因素，揭示了浅层地下水微量元素迁移集散规律及其健康效应（林年丰，1991）。根据调查和研究结果，科学出版社 1989 年出版了《中华人民共和国地方病与环境图集》，反映

了地方病的分布、流行特点和与环境因素的关系。

2.4 地下水污染

中国水文地质学者早在 20 世纪 80 年代即开始关注地下水污染问题。最早期的研究与污水农业灌溉、污水土地处理、矿坑废水排放等实际问题有关。主要研究的污染物包括氮的化合物、磷酸盐、硫酸盐、重金属、酚、氰化物等，研究方法多为区域性的调查工作，有机污染物的研究基本空白。

到 20 世纪 90 年代以前，在国家“六五”和“七五”攻关等项目的支持下，广泛开展了地下水系统中污染物的存在形态、迁移规律和污染趋势预测的试验、模拟研究；以济宁市地下水污染为案例，建立了中国第一个地下水质模拟模型；广泛开展了郑州市、石家庄市等主要华北城市地下水污染状况和污染机理的研究，在城市地区地下水污染状况的调查、评价，地下水污染机理分析，地下水资源管理等方面取得了重要的研究进展；热力学与水化学理论、灰色理论、模糊理论、时间序列分析理论等在地下水水质演化分析方面得到了广泛的研究与应用。期间所取得的的研究成果对于中国地下水污染研究和地下水资源管理具有显著的推动作用。值得一提的是，1990 年前后十年间，集中出版了一系列地下水水质模型与溶质运移的学术著作（朱学愚和谢春红，1985；王秉忱等，1985；林学钰等，1985；孙讷正，1989；赵勇胜和林学钰，1994；陈崇希和李国敏，1996）。

20 世纪 90 年代以来，随着环境问题的日趋严重和测试技术的进步，中国地下水污染研究进入新阶段，相继开展了地下水脆弱性评价理论方法与案例研究；地下水有机污染调查、评价；垃圾场渗滤液导致的地下水污染与防治；污染含水层修复理论与技术研究等；核废料地质处置也开展了部分基础研究和场地尺度的试验。科技部、国家自然科学基金委员会和中国地质调查局及一些地方政府陆续资助了一些地下水污染的调查、研究和污染含水层修复课题。国家“八五”攻关课题“淄博市地下饮用水源地石油污染治理研究”，是中国第一个污染含水层修复工程示范项目。首次将化学氧化、深部含水层曝气、地下水力截获、微生物治理理论与技术研究成果用于地下含

水层石油污染控制与修复，成功建立了非均质各向异性岩溶裂隙含水层污染控制的地下综合治理示范工程。

国家自然科学基金委资助了重点项目“浅层地下水污染敏感性与内在净化作用研究”和一批地下水污染领域的面上项目。开展了硫酸盐和硝酸盐污染地下水净化的电化学、生物学和高分子有机材料研究，取得了重要研究进展。中国地质调查局于1999年以来，启动北京市郊、淮河流域、苏锡常地区的地下水污染调查评价，初步建立了有机污染物的调查、取样、测试和评价技术。

总的来看，与发达国家尤其是20世纪80年代以来蓬勃发展的地下水污染与含水层修复研究相比，中国在研究的深度、广度上均明显存在差距，缺乏单个场地的详细调查和多种手段的综合运用；研究手段，尤其是污染场地综合勘察技术、以污染控制（如高放射性核废料安全处置、CO_2地质隔离、废液深部地层回注）为目标的大型试验场技术、污染场地精细描述的环境地球物理技术、污染地下水分层取样技术、环境示踪技术、痕量－超痕量污染物测定技术、污染物迁移过程的耦合模拟技术等亟待引进、发展和完善。

2.5 地质微生物与生物修复

20 世纪 90 年代以前，中国在地质微生物研究方面尚处于初始阶段。由于认识水平、研究手段和方法的限制，地质微生物学的研究仅限于水－岩作用、地质风化、变价元素迁移过程中的生物作用现象的分析与论述，对于地质微生物群落结构与演化的认识基本属于空白。

90 年代至今，随着地质作用过程中对微生物研究的迫切需要，以及污染地下水系统功能恢复技术研发的极大需求，尤其是现代微生物学研究方法与手段的不断发展，如探针技术、分子生物学技术（PCR－DGGE、生物芯片技术等）、核磁共振、显微技术等的广泛应用，在国家自然科学基金、国家高技术研究（“863”）、国家攻关等项目的资助下，极大地推动了中国地质微生物学和污染地下水系统（非饱和带和含水层系统）生物修复的研究进展，在以下几方面取得了研究进展：

（1）微生物群落结构与环境胁迫群落演化研究进展

利用现代分析、材料和生物学理论与技术，在特定降解与适应性能的菌种分离和纯化、生物降解界面效应理论、微生物活性强化机制、降解菌剂与生物载体制备方面取得研究进展。

基于环境胁迫微生物群落结构演化与基因变异的现代生物学理论，采用土壤微生物的筛选、分离与纯化技术，从油田污染土壤中分离具有石油烃降解能力的菌种，以及低温地区或低温季节条件下（10℃－20℃）降解石油烃的菌种。石油化工污染地下水得到以苯为唯一碳源、硝酸盐为唯一电子受体，厌氧反硝化条件下的苯降解混合菌。有机污染土层和地下水微生物群落结构鉴定与分析，对于强化有机污染非饱和带生物修复效果，研究和评价污染地下水系统中 BTEX 等苯系物的自然衰减生物学过程具有重要理论和实际意义。利用现代微生物学与化学分析技术、量化微生物活性，构建微生物活性指标与微生态环境内在关系，为有机污染地下水系统修复奠定微生物基础。

地球表层大多数元素的地球化学循环，是由生物参与的生物地球化学循环。在地下水系统中物质转化与循环是建立在地质动力学、热力学和地球化学、生物学等多层次、复合型作用的基础之上。基于微生物作用效应的水－岩作用过程研究受到广泛关注。为了揭示微生物在岩溶发育方面的作用机制，科技工作者在不同的岩溶地区分离和鉴定出不同类型的微生物群落，初步研究了微生物作用与岩溶发育之间的内在关系。利用微生物学技术手段，在油田地下水极端环境条件下（高温、高盐度）微生物群落的研究取得了一定程度的进展，为改善采油技术提供了条件。

（2）污染地下水系统生物修复进展

污染地下水系统生物修复主要表现在污染非饱和带生物修复和污染含水层的生物修复。关于污染非饱和带土层的生物修复主要包括微生物修复、植物修复、植物－微生物联合修复。对于微生物修复，主要针对有机污染非饱和带土层的微生物修复，主要的研究进展表现在通过调控微生态环境增强微生物降解效应；揭示土壤中石油烃微生物降解的微观界面效应，在强化微生物降解材料研究与制备方面取得了进展，如生物表面活性剂、微生物载体、菌剂与生物载体制备的一体化设备等，在国家“863”等项目支持下在大庆油田、辽河油田等分别建立了污染土层微生物修复示范工程。

对于重金属污染非饱和带土层，生物修复手段多为植物修复。其研究进展主要表现在超富集植物的筛选、富集环境与机制识别、超富集植物的生理生态评价等。开展示范性规模的修复工程建设。

基于污染地下水系统所具有的独特的物化、生物与水动力条件受到广泛的关注。开展了地下水系统中氮输移与转化研究，在集约化农业区氮素在水－土－生复合系统中的迁移转化、生物-水动力-物化作用的质量平衡模型构建、氮素输移的复合界面效应与生物学过程方面取得了研究进展。在氮污染地下水脱氮微生物的筛选与试验性研究以及脱氮供碳材料制备方面取得了进展。

污染含水层的生物修复方面，由于技术与经费多种因素的制约，技术研究、设备研发、材料制备和修复工程建设方面进展较为缓慢。自国家“八五”科技攻关项目“淄博市地下饮用水源石油污染治理研究”（1991－1995）首次支持开展污染含水层微生物治理技术研究、化学和生物材料制备、原位综合微生物修复示范工程建设，并取得重要研究进展以来，再无规模性的污染含水层原位治理工程的建设与运行，这制约了污染地下水生物修复的理论、技术和工程的研究进展，难以适应中国安全饮水保障体系建设的重大战略要求。

（3）生物技术与研究方法进展

污染非饱和带土层的微生物分析技术与方法和微生物群落与活性分析技术的研究开展广泛，地下水毒理评价的 Ames（“三致”试验）方法、植物生理生态与环境胁迫的分子生物学表达、微生物群落分析与显微技术、PCR-DGGE 技术等构成的毒理性评价方法体系逐步得到发展和完善。现代分析技术，如探针技术、核磁共振、GC/MS、原子力显微（AFM）技术在微观过程学的研究方面得到应用。这些为地质微生物和生物修复研究奠定了坚实的技术和方法基础。

总之，中国在地质微生物和生物修复研究方面，与发达国家相比，在微生物群落结构识别、生物修复理论研究、生物技术应用、生物修复工程化方面存在显著的差距，缺乏对地质微生物和生物修复系统完整的研究。用于支撑污染地下水系统修复的现代分子生物学理论与技术、酶系统、复合生物功能材料和复合生物修复理论与技术等方面尚缺乏具有原创性的研究成果。

2.6 生态水文地质

本节讨论中将生态水文地质的研究内容界定为地下水与地表植被之间的关系。近几十年来，在中国西北生态脆弱地区，许多内陆河流域大规模的水资源开发，导致下游林地消失、草场退化和沙尘暴频发等一系列环境问题，引起了全社会的广泛关注。近几年来，关于西北内陆盆地平原区天然植被很大程度上依赖地下水的观点，已成为共识。地下水在西北地区生态环境的维持、保护与建设中起着不可替代的重要作用。

地下水的埋藏深度与植被生长状况间的关系是生态水文地质学的重要研究内容。通常，将引起天然植物凋萎以致于死亡的地下水埋深临界值称作该植物的地下水生态埋深。天然植被对地下水的吸收主要依靠其根系，植物根系层范围的土壤含水量必须能保证植物生长最低的需水要求。在一定条件下，土壤含水量是地下水通过毛细上升水来维持的，其大小和分布取决于地下水埋深。如果地下水埋深太大，植物根系层的土壤含水量就可能低于植物生长最低的需水要求，植物就会因缺水而死亡，因此，地下水埋深是一个重要的生态环境指标（郑丹等，2005）。塔里木河和黑河两个典型内陆河流域的研究表明，天然植被生长状态与地下水埋深的关系密切（郭占荣和刘花台，2005）。在陕北风沙滩地，地下水位埋深与植被生长、河湖基流量及土地荒漠化存在相关性，该地区的生态安全地下水位埋深为 1.5－5 m（杨泽元等，2006）。

土壤盐分含量的多少与植被生长关系密切，地下水埋藏深度与土壤次生盐渍化的关系是生态水文地质学的另一项重要研究内容。通常认为，不引起土壤积盐且不危害作物生长的最小地下水位埋深为地下水临界埋深，它与气象条件、土壤质地、地下水矿化度、灌溉排水条件和农业技术措施（耕作、施肥）等有关，不同的地区有不同的地下水临界深度。此外，在同一年内的不同阶段地下水的临界深度也可以不同。天山北麓平原灌区的多年土壤改良试验结果呈示，在时间上对地下水埋深进行调控可以更有效地防治土壤盐碱化（郭占荣和刘花台，2002）。大同盆地的数据分析表明，当潜水埋深在 1.4－2.5m时，土壤及潜水盐化的可能性最大也最严重（张妙仙和杨劲松，2001）。

西北内陆盆地的水资源循环过程中，大面积的蒸发是地下水的主要排泄方式，

也是造成土壤盐碱化的主要原因。准确评价地下水蒸发量不但是地下水资源量计算的关键，也是深入了解地下水－地表水－大气水相互转换机理的核心问题，同时，对植被生态的保护均具有重要意义。地下水在毛细管力作用下上升，通过非饱和带到达地表进入大气。毛细管上升高度有限，并与介质的性质有关，因此，地下水的埋深和非饱和带土壤性质对地下水的蒸发有明显的控制作用。生长于地表的植被，其根系从土壤中吸取水分，最终通过叶面蒸腾进入大气，对地下水的蒸发起到增强作用。研究地下水埋深、土壤性质和植被与地面蒸发的定量关系是认识地下水蒸发规律和计算地下水排泄量的关键。近几年，有针对玉米作物，研究种植条件下不同潜水埋深的潜水蒸发损耗量、土壤水储存量和作物耗水量的变化规律（郭占荣等，2001）；利用室内模拟实验，定量分析粉砂壤土中地下水埋深对土壤蒸发量的影响，得到了土壤蒸发量与地下水埋深的关系。

通常情况下，一个流域的河川基流量等于地下水的排泄量。研究基流量与植被之间的关系是了解地下水与植被间相互作用机理的最好途径。一个流域内植被生长的好坏与大气降雨入渗地下补给地下水的能力有很大关系，在一定条件下，植被生长状况较好，则河流的基流量较小，否则相反。针对黄河上游和中游地区的基流量，有人认为几十年来黄河基流量的变化与人类的活动（水土保持工作）有很大关系（钱云平等，2004）。为保证河流生态服务功能，用以维持或恢复河流生态系统基本结构与功能所需的最小流量称为河流生态基流量，有人提出了整合计算方法（刘静玲等，2005）。

严登华等（2001）将生态水文学的发展总结为三个阶段。第一阶段是以修复遭到破坏的生态过程、水文过程以及协调两者间的相互关系为目的探索性研究。第二阶段的生态水文学研究主要是以湿地为研究对象。第三阶段是 20 世纪 90 年代中期以后，生态水文学研究进入理论探寻阶段。研究侧重在流域或区域尺度上的“大气-土壤-植物”系统的水分能量交换模型、森林对降水-汇流过程和土壤侵蚀过程的影响、进行了水分与热量交换为核心的地气相互作用的野外观测和流域植被系统的水文过程响应规律等方面的研究。另一个重要研究方向是生态需水量的计算和评价，在国内已经形成了较有影响的水文学科前沿领域（王根绪等，2005）。此外，中国地质调查局开展了一系列旨在以生态环境保护为目的的地质调查工作，包括大江大河流域、沿海地

区、北方荒漠化和西南岩溶石山地区石漠化等环境地质调查，为今后生态水文地质学的研究奠定了基础（韩再生，2003）。

以上介绍表明，中国的生态水文地质学研究已初步形成。许多问题是中国所特有的，是一个极有可能出现原始创新成果的领域。

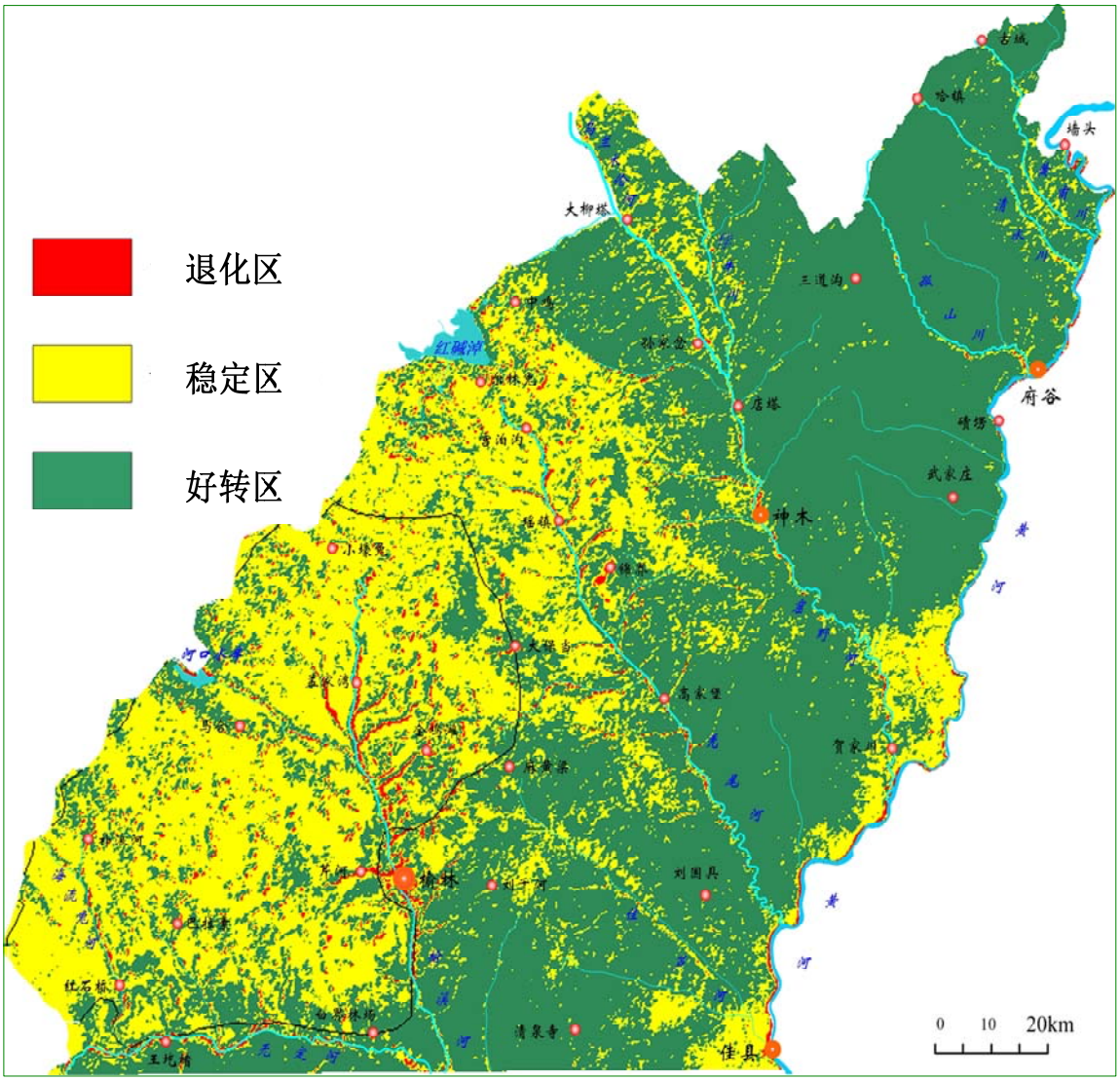


图 2.2. 基于植被指数(NDVI)计算的陕北地区近年来植被生态变化趋势示意图
（中国地质调查局西安地质调查中心提供）

2.7 地下水模拟与随机方法

在中国，地下水的数值模拟的发展始于二十世纪七十年代初，经几十年的努力，该模拟方法已得到广泛应用。中国的众多学者所撰写的多部有关的专著和教材，对地下水数值模拟的推广应用起到了积极作用（薛禹群，1980；孙讷正，1981；王秉忱等，1985；林学钰等，1985）。值得一提的是，张宏仁（1975）将地下水非稳定流理论系统地介绍到中国，为中国地下水数值模拟的开展打下了重要的基础。地下水流动数值模拟的发展主要表现在三个方面，即理论研究、程序编制和实际应用。

理论上，针对抽水井附近数值模拟误差较大的问题，国内学者提出了“对数插值”法、“奇点磨光法”和“混合井流”的数值模拟方法，同时，在实践中还发现了有限元求解地下水流问题时不满足局部质量守恒的现象。

在程序编制方面，70-80 年代，各高等院校和研究院所开发了各自不同的应用程序，解决了大量实际问题。90 年代，随着国外商业软件的引进，中国地下水模拟软件的开发受到很大的影响。值得一提的是，GWM 软件是中国开发的唯一商业化地下水模拟软件。

在应用上，数值模拟解决了很多国民经济建设中急需解决的各类问题，其中包括：水资源评价问题；地下水污染问题，水－岩作用和生物降解作用的模拟；非饱和带水分和盐分运移问题；海水入侵、高浓度咸水 / 卤水入侵问题（薛禹群等，1991）；热量运移和含水层贮能问题；地下水管理与合理开发、井渠合理布局和渠道渗漏问题；地下水－地表水联合评价调度问题；地面沉降问题；参数的确定问题。它所涉及的地质条件多种多样，有潜水，也有承压水；有单个含水层，也有多个含水层存在越流的情况，以及种种复杂的地质构造和岩相变化的情况。

总体来讲，中国地下水数值模拟领域的应用水平较高、理论研究较少、软件开发明显落后。

随机水文地质研究在中国起步较晚，从事该领域研究的中国学者不多。与国际前沿研究相比，中国在这一领域的研究还有较大差距。数量不多的研究一般是跟踪性研究，仅在个别研究方向接近国际前沿。

水文地质参数的空间变异性是随机水文地质学的主要研究内容之一，因为水文地质参数的空间变化是饱和及非饱和带水流和溶质运移不确定性的主要原因。中国学者在这一方面做了大量研究工作。他们对水文地质参数的分布规律，水文地质参数估计以及水文地质参数空间变异性对地下水数值模拟的影响等方面进行了十分有意义的探索。

地下水溶质运移随机理论是地下水研究中十分活跃的领域。该研究仍处在初期理论探索阶段，离实际应用还有一定距离。中国学者从20世纪90年代起便开始从事地下水随机理论研究。他们的研究包括非饱和土壤参数统计特征，宏观弥散度的确定和区域地下水溶质运移（如：杨金忠等，2000），以及裂隙介质和岩溶系统中的地下水问题（如：黄勇和赵志芳，2004；张贵金和徐卫亚，2003）。地下水非平稳随机理论研究是目前国际上随机水文地质研究领域的研究热点和难点。近年来中国学者与美国学者合作，在地下水非平稳随机理论方面取得了一些进展（如：Wu et al., 2003, 2004；廖华胜和李连侠，2004）。

总之，中国在随机水文地质领域的研究目前总体上还处于起步阶段，需大大加强。

2.8 地下水管理模型

中国于 20 世纪 80 年代中后期开始地下水管理模型的研究与应用工作，在不长的时间里，几乎所有以地下水为主要供水水源的大城市，针对不同的问题，都建立了地下水管理模型，如石家庄、西安、哈尔滨、长春、济南、包头等。一些典型地区还建立了区域地下水管理模型，如河北平原、河西走廊、柴达木盆地等。这些研究大大推进了中国地下水科学管理的进程，但由于当时建模所考虑的因素多为水力要素，模型结构也比较简单，多归结为求解线性规划问题，大大限制了模型的实用性和可操作性。

20 世纪 90 年代以来，随着可持续发展理论的引入，人们对环境问题的重视以及运筹学算法的发展，地下水管理模型无论从管理的内容还是建模的方法上都有了很大的发展，国内外学者都致力于研究更实用的地下水管理模型，在研究内容上更多地

涉及社会、经济、环境等因素，在模型结构上以多目标和非线性为研究热点和难点问题。

国外在 20 世纪 80 年代初、国内在 80 年代末是地下水管理模型研究的高潮期，而目前处于平稳或偏低潮阶段。咎其原因，一是地下水管理模型在实用性、可操作性方面有待提高，没有强调可持续发展的建模原则，且由于算法的限制，模型过于简单；二是管理决策者对地下水管理模型的期望值过高，没有摆正地下水管理模型的位置。实际上，地下水管理模型仅仅是水资源管理和规划，地区总体发展规划的决策依据是不能完全用其取而代之的。总体而言，地下水管理模型研究存在以下 5 个方面的问题：

（1）国外管理模型理论研究多，算例多，而建立实用管理模型较少。如对于假想的算例，可建立非常复杂的数学规划问题，但对于大规模实际问题，这类数学规划常常难以求解。国内应用实际问题建模多，但模型简单，大都归结为求解线性、单目标规划问题，不能准确地描述地下水系统及其管理问题，导致模型的实用性和可操作性较差；

（2）以可持续发展为基本原则建立起来的地下水管理模型考虑的因素愈来愈多，结构更为复杂，但目前的数学规划方法还不能完全满足管理模型的需要，因而多数情况下，不得不将管理模型简化，影响了模型结果的精度；

（3）地下水系统是动态的，应建立多阶段动态地下水管理模型，但对于分布参数系统，多阶段意味着系统的决策变量和状态变量大大增加，目前静态数学规划方法尚不能处理大型、多阶段动态管理问题，而动态规划又无法处理分布参数系统的最优化问题；

（4）对大型地下水水质管理模型，尤其对于将水量和水质同时作为决策变量的非稳定地下水管理模型，由于模型过于复杂，目前尚无有效的建模方法和求解方法。地下水管理模型的多目标动态规划模型研究和应用目前还很不够。

（5）地下水管理模型的多目标动态规划模型研究和应用目前还很不够。

尽管地下水管理模型中存在很多问题有待解决，但应看到，地下水管理模型的研究和应用，已大大推进了地下水的科学管理和开发利用。随着研究的进一步深入和相关学科的发展，地下水管理模型的实用性和可操作性将得到改善，在地下水资源合理

开发利用乃至宏观经济决策中会起着更为重要的作用。

2.9 非饱和带水文学

非饱和带水文学在中国的起步较晚。就非饱和带水文学的主要研究内容—土壤物理学来说，中国早在二十世纪三十年代就开展了与此相关的土壤质地分类、水稻土结构以及土壤水对植物生长的影响等研究。新中国成立后，研究目标主要围绕着国家建设和农业生产的发展进行。研究内容主要集中在土壤质地、结构、孔隙、水分参数等基本物理性状以及土壤物理性质与植物生长、水分利用的关系；土壤结构与肥力、水土流失和土壤结构退化的关系等方面。二十世纪七十年代以来，随着土壤水分能量概念的引进和一些比较先进的测试手段的应用，中国的非饱和带水文学在土壤水分运动和溶质运移、土壤－植物－大气连续体（SPAC）系统水分循环等方面的研究取得了长足的进展（如：张蔚榛和张瑜芳，1983；雷志栋等，1985；杨金忠，1986；邵明安等，1986；黄康乐，1988；康绍忠等，1990）。

进入二十一世纪，中国农业面临着人口基数大、粮食消费水平不断增加、耕地面积不断减少、土壤退化和水资源严重不足与污染等诸多问题。保证粮食安全、实现农业和环境可持续发展给非饱和带水文学提出了前所未有的挑战。非饱和带水文学必需在改善耕地质量、提高农田生态系统的资源利用率方面做出应有的贡献。通过研究土壤结构演化对自然和人为干预的响应，揭示改善土壤质量、提高土壤水肥利用率和降低土壤侵蚀的内在机制；通过研究土壤内部、土壤与其环境（大气、植被、地下水、岩石圈及人类活动等）的能量转化和物质循环过程，促进土壤生态系统的健康良性循环；通过应用遥感技术、成像技术以及数学模型（确定性模型、随机模型和统计模型），实现不同尺度研究结果的科学转化，使非饱和带水文学研究成果真正服务于可持续发展的农业、环境和社会。

随着人口、资源问题的日趋突出和环境问题的逐渐加重，土壤资源在中国生态环境建设中的地位受到了广泛的关注。非饱和带水文学研究应当密切关注中国生态环境建设中的土壤侵蚀、土壤污染、地下水污染、土壤退化和荒漠化问题。例如，西北主要农业区和草地土壤侵蚀严重，荒漠化已经发生并有加剧趋势；华北地区水资源日

趋紧缺，灌溉水渗漏、养分淋失严重，土壤及地下水污染面积扩大；东北黑土地结构退化，持水力降低，土壤侵蚀加剧，面临着荒漠化的威胁；长江中下游地区季节性干旱明显，土壤和水污染问题加重。应当有针对性地加强土地利用方式与土壤性状演化、污染物迁移动力学过程、水肥利用效率、水土流失规律等方面的研究。图 2.3 显示的即是这方面研究的一个例子。



图 2.3. 不同施肥量条件下硝态氮在农田土壤中淋失动态的地中渗透实验观测
（中国农业大学科学园）

中国幅员广大，气候、地势、土壤和植被复杂多变，既给非饱和带水文学研究

提供了得天独厚的研究场所，也对非饱和带水文学家在选择研究方向、确定关键因子、设计研究方案和总结研究结果等方面提出了挑战。与国际先进水平和发展趋势相比，中国在非饱和带水文学领域的研究还有较大差距：

（1）研究基础薄弱，缺乏达到国际领先水平的创新性研究。主要反映在研究项目基本处于跟踪国际水平的状态，还没有出现中国学者独立提出的描述土壤物理性状或过程的理论或方法。

（2）不少研究领域，如土壤中的多相流问题，土壤微生物在土壤中的迁移问题，则刚刚起步甚至处于空白状态。

（3）研究过程不够系统和实验资料缺乏，严重影响了研究结果的权威性。在中国找不到几个具有 20 年以上对土壤水分和溶质运移进行长期观测的定位实验站。此外，也缺乏典型地区土壤基本性状、结构演变、水热动态等方面的长期观测资料。

（4）研究手段落后。无论是实验室分析测定，还是田间观测研究，目前非饱和带水文学研究的先进仪器设备（压力薄膜仪、时域反射仪、称重式地中渗透计等）主要从发达国家引进。大多数研究单位难以承担昂贵的进口费用。由于技术、管理和维护等方面的原因，很多已购置的设备也未能得到充分的利用。

（5）研究队伍小，研究人员专业范围窄，缺乏不同专业的合作。从发表学术论文的情况来看，目前从事非饱和带水文学研究的单位主要集中在少数重点大学和重点科研单位。

2.10 存在的问题

综上所述，中国地下水科学的理论研究与实际应用工作在过去 50 年里已经取得了很大成就，为国民经济建设作出了巨大贡献。但在进一步的发展过程中还存在不少问题，包括：

（1）对科研项目的资助缺乏连续性和足够的力度，从而不能对一些重大科学问题进行长期、深入的研究。国外发达国家强调目标管理、以一流学术期刊发表的论文作为衡量成果水平的主要标志，这一科技管理体制应该为中国所借鉴。

（2）基础研究仍较为薄弱，特别是与野外试验和室内实验相结合的基础研究，亟待加强。有过于注重模型的倾向，而常常忽略了数据的获取这一更为基础的重要环节。美国和欧洲一些发达国家在过去 20 年里投入了大量资源开展许多野外试验和室内实验，为地下水研究取得突破性成果提供了关键的原始数据。中国在这方面应努力借鉴。

（3）学科交叉不够。地下水、地表水、非饱和带水的研究基本“分家”。缺少资助体制和学术上的激励机制，鼓励真正意义上的多学科交叉和不同背景科学家之间的实质性合作。

（4）地下水监测和数据共享不够，有些数据质量较差，严重地制约了科研的进展。中国有一些原创性的成果没有体现出来。例如：美国并没对全国进行 1:20 万水文地质调查，而中国在基础性水文地质调查方面优于美国，但共享程度不高。另外，中国到处都是“大型野外试验场”，很多数据都可以从大型工程中获得（如三峡、黄河小浪底等），但在体制上还难以保证数据的有效获得。

（5）由政府资助项目所得的地下水模拟软件缺乏共享机制。高质量、标准化的地下水模拟软件对地下水科研十分重要。如果形成“给资助—软件被引用—再给资助”良性循环，对推动地下水模拟软件产业发展定有好处。

（6）新技术、新方法、新手段的研发和推广不够，应安排专项资金资助自主创新，加快形成拥有自主知识产权的地下水科学与工程领域的高新技术。

（7）需要认真分析与国外发达国家水文地质教育存在的差距，以人为本，抓教育、培养一批具有全球视野的一流科学家。

（8）应十分重视中国社会现阶段发展过程对于“地下水科学”的强烈需求，加快发展具有中国特色的地下水科学，如供水水质安全问题，煤矿开采中的地下水问题，大型水电工程中大坝渗流问题，地下水作用下的岩体稳定性问题与地质灾害防治等。

参考文献

王秉忱，杨天行，王宝金，1985，地下水污染、地下水水质模拟方法，辽宁科学技术出版社，沈阳。

王根绪，刘桂民,常娟，2005，流域尺度生态水文研究评述，生态学报，25（4）：892－903。

王焰新，1990，鄂东南金属矿床成矿规律的古水文地质分析，中国地质大学博士学位论文。

王焰新，郭华明，闫世龙，王润福，李义连，2004，浅层地下水系统环境演化及污染敏感性研究，科学出版社，北京。

朱学愚，谢春红，1985，地下水运移模型，中国建筑工业出版社，北京。

刘光亚，1979，基岩地下水，地质出版社，北京。

刘崇禧，孙世雄，1988，水文地球化学找油理论与方法，地质出版社，北京。

刘静玲，杨志峰，肖芳，孙涛，2005，河流生态基流量整合计算模型，环境科学学报，25（4）。

孙讷正，1981，地下水流的数学模型和数值方法，地质出版社，北京。

孙讷正，1989，地下水污染数学模型和数值方法，地质出版社，北京。

严登华，何岩，邓伟，王春梅，侯佑泽，厉彩虹，2001，生态水文学研究进展，地理科学，21(5):467-473.

杨金忠，1986，一维饱和与非饱和水动力弥散的实验研究，水利学报，3:10－21。

杨金忠等著，2000，多孔介质中水分及溶质运移的随机理论，科学出版社，北京。

杨泽元，王文科，黄金廷，段磊，2006，陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究，西北农林科技大学学报，34（8）。

李学礼等，2000，古水热系统与铀成矿作用，地质出版社，北京。

肖楠森，1981，新构造裂隙水，水文地质工程地质，8（4）：22－25。

肖楠森，1986，新构造分析及其在地下水勘察中的应用，地质出版社，北京。

汪蕴璞，1991，洋底水岩界面水及其成矿作用，北京科学技术出版社，北京。

汪蕴璞等，1987，油田古水文地质与水文地球化学，科学出版社，北京。

张宏仁编译，1975，地下水非稳定流理论的发展与应用，中国地质出版社，北京。

张妙仙，杨劲松，2001，地下水埋深对土壤及地下水盐分影响的信息统计分析，土壤，33（5）：239－242。

张宗祜，沈照理，薛禹群等，2000，华北平原地下水环境演化，地质出版社，北京。

张宗祜等，1979，中华人民共和国水文地质图集，地质出版社，北京。

张宗祜等，1987，中国水文地质图，地质出版社，北京。

张宗祜等，1997，亚洲水文地质图，地质出版社，北京。

张宗祜等，2004，中国地下水资源与环境图集，中国地图出版社，北京。

张贵金,徐卫亚，2003，岩溶坝区透水参数的随机模型，水文地质工程地质，2003年第4期：19-25。

张蔚榛，张瑜芳，1983，土壤释水性和给水度数值模拟的初步研究，水文地质工程地质，1983 年第 5 期：18-28。

陈梦雄，2003，中国水文地质工程地质事业的发展与成就，地震出版社，北京。
陈梦熊等，1975，区域水文地质普查规范，地质出版社，北京。
陈梦熊等，1979，综合水文地质图编图方法与图例，地质出版社，北京。
陈崇希，李国敏，1996，地下水溶质运移理论及模型，中国地质大学出版社，北京。
邵明安、杨文治、李玉山，1986，土壤-植物-大气连续体中的水流阻力及相对重要性，水利学报，9（6）：8-14。
林年丰，1991，医学环境地球化学，吉林科技出版社，长春。
林学钰等，1985，地下水水质模型及管理程序集，吉林科技出版社，长春。
郑丹，李卫红，陈亚鹏，刘加珍，2005，干旱区地下水与天然植被关系研究综述，资源科学，27（4）：160－167。
赵勇胜，林学钰，1994，地下水污染模拟及污染的控制与处理，吉林科技出版社。
袁道先，刘再华，林玉石等，2002，中国岩溶动力系统，地质出版社，北京。
袁道先等，1976，岩溶地区区域水文地质普查规程，地质出版社，北京。
袁道先等，1979，岩溶地区供水水文地质工作方法，地质出版社，北京。
钱云平,蒋秀华,金双彦,张培德，2004，黄河中游黄土高原区河川基流特点及变化分析，地球科学与环境学报，26（2）：88－91。
郭占荣，刘花台，2002，西北内陆灌区土壤次生盐渍化与地下水动态调控，农业环境保护，21（1）：46-49。
郭占荣，刘花台，2005，西北内陆盆地天然植被的地下水生态埋深，干旱区资源与环境，19（3）：157－161。
郭占荣，荆恩春，聂振龙，焦鹏程，董华，2001，不同潜水埋深条件下蒸发蒸腾试验研究，勘察科学技术，5：28－29。
黄勇，周志芳，2004，岩体渗流模拟的二维随机裂隙网络模型，河海大学学报（自然科学版），32（1）：91-94。
黄康乐，1988，求解二维饱和非饱和溶质运移问题的交替方向特征有限单元法，水利学报，1988 年第 7 期：1－13。
康绍忠、熊运章、王振镒，1990，土壤-植物-大气连续体水分运移力能关系的田间试验研究，水利学报，1990 年第 7 期：1－9。
韩再生，2003，生态环境地质调查进展与展望，地质通报，22（11－12）：977－982。
雷志栋，杨诗秀，许志荣，G. Vachaud，1985，土壤特性空间变异性的初步研究，水利学报，1985 年第 9 期：10－21。
廖华胜，李连侠，2004，地下水非平稳随机模型及空间变异性与非均匀性相互关系研究的展望，水利学报，2004年10期：13-21。
薛禹群，1980，水文地质数值法，煤炭工业出版社，北京。
薛禹群，谢春红，吴吉春等，1991，海水入侵咸淡水界面运移规律研究，南京大学出版社，南京。
Wu, J., X. Hu, and D. Zhang, 2003, Application of nonstationary stochastic theory to solute transport in multi-scale geological media, *J. Hydrol.*, 275(3-4):208-228.
Wu, J., X. Hu, and C. He, 2004, A Numerical method of moments for solute transport in a porous medium with multiscale physical and chemical heterogeneity, *Water Resour. Res.*, 40, W01508.

第三章　国际地下水研究前沿

3.1 地下水科学的演化与趋势

水文地质学作为一门定量的科学可以追溯到 1856 年达西定律的发现—亨利·达西发现流过沙柱的水通量与水力梯度成正比 (Darcy, 1856)。一百五十多年来，世界各国的许多地下水科学工作者为地下水学科的发展做出了许多的努力。以美国和加拿大为例，在美国科学院的建议下，美国国会于 1879 年创立了美国地质调查局（USGS）。从此，美国地质调查局对水文地质学在美国乃至全球的发展起了重要作用 (Narasimhan, 2005)。迈因策尔是美国地质调查局早期的水文地质学家之一，他发表了一篇美国水文地质学的奠基之作 (Meinzer, 1923)，使地下水研究在美国成为一门真正的学科。在水井水力学方面，泰斯给出了地下水的非稳定井流公式 (Theis, 1935)，把水力水头的变化与含水层弹性储存量－释放量的变化联系起来。之后，雅各布和汉图什又做出了重要贡献 (如：Jacob, 1940; Hantush, 1956)，促进了水井水力学的迅速发展。在区域地下水流动方面，哈伯特 (Hubbert, 1940, 1953) 提出了地下水流势能的概念，并对区域地下水流的特点进行了严谨的理论分析，加深了人们对区域地下水流动规律的认识。托特（Toth, 1962, 1963）提出了地下水流动系统的概念。他认为地形对地下水盆地中局部、中间和区域流动系统的形成具有控制作用。从 20 世纪 60 年代末开始，电子计算机的广泛应用极大地增强了水文地质学家模拟和分析复杂水文地质系统的能力 (Freeze and Witherspoon, 1967)。

在地下水水质方面，亨穆于 20 世纪 50 年代末首次做了十分系统的研究（Hem, 1959)。水动力弥散统计理论于 50、60 年代提出 (Taylor, 1953; Scheidegger, 1954; Bear, 1961)。该理论通过一种类似于分子扩散理论的方法阐述了溶质对流运移的计算值和实际观测值的差异，据此得到的对流－弥散方程成为研究溶质运移的基础 (如：Ogata, 1970; Bredehoeft and Pinder, 1973)。在美国和西方其它发达国家，从 20 世纪 70 年代开始，公众对地下水污染的关注和政府关于保护地下水水质和修复污染含水层的政策使得地下水领域的研究和就业得到爆炸性的增长。

1992 年以前，美国自然科学基金会对水文科学（包括地下水学科）的基础研究的资助由分散在工程部和地学部的一些项目组管理。为促进水文科学的发展，美国国家科研委员会（National Research Council）成立了称为“水文科学的机遇”的专门委员会 (Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences)。该委员会于 1991 年完成了叫做《水文科学的机遇》的研究报告（COHS, 1991），并建议美国自然科学基金会在地学部成立与地质学科同等级的水文科学项目管理组。此后，该项目组成为美国自然科学基金会内负责资助地下水及地表水基础研究的主要部门。

COHS 的报告《水文科学的机遇》明确指出水文科学是地球科学的一个独特的具有重要社会功能的分支学科。它建议水文科学研究应该着眼于大陆水文过程和全球水均衡，包括多时间－空间尺度上的流量、储量、通道和滞留时间。它预见了水文科学必须从多学科交叉的角度来研究，强调了资料收集的重要作用，和建立可以获得长期观测资料的基础研究设施的必要性。此外，这个报告还阐述了需要多学科、跨院系培养研究生的依据。

当前，地下水是与水相关的众多科学研究中的一个中心主题。在美国以及其它西方发达国家，地下水领域的研究经费来源较多。总体来说，地下水科学的研究趋势是：1）多学科交叉，与地质学、地球化学、地表水文学、土地利用、土壤学、大气科学、生物学、生态学、全球变化、数学以及社会学的联系日趋紧密；2）越来越多地通过因特网使用赛百结构和信息学进行海量数据的发布、存储、分析和可视化；3）越来越需要基于大规模的野外观测网来监测和预测多种时间空间尺度下的水动力与水质变化过程。

本章接下来的部分主要讨论当前国际地下水科学的一些主要研究领域的现状和前沿问题。大体说来，大多数的前沿问题及研究热点与以下三方面相关：

- 非均质性：如何处理普遍存在的物理、化学和生物的非均质性对地下水资源的分布、循环、水质和可持续性的影响？
- 尺度效应：水文和生物地球化学循环的控制过程在多空间尺度（从分子到全球）和多时间尺度（从秒到数十年）上是如何变化的？
- 耦合：如何将各种不协调的、复杂的过程，包括人类活动，综合考虑到政策制定者、决策者所能使用的预测模型里？

3.2 区域水文地质

尽管地下水流势能理论的概念和达西定律在 20 世纪之前就提出来了，在 20 世纪五十年代后，随着社会对地下水需求量的增加，人们对各种地质过程认识的加深，区域地下水流动的研究才得到了广泛重视，地下水与地质过程的相互作用成为研究主题。这些研究的一个重要主题就是地下水与其它过程是如何相互作用的 (Person et al., 1996; Ge et al., 2003)。

3.2.1 区域尺度下的非均质性

在自然界，含水层介质渗透性的非均质是普遍存在的，而均质则是非均质的特例（图 3.1）。在基岩地区，地质构造（如断层）造成的区域尺度的非均质性对地下水的运动具有明显的控制作用，对各种水文地质过程也有重要的影响，如横跨断层带水头梯度和溶质浓度梯度的变化 (Heywood et al., 2002)。断裂带的水文地质特征取决于断层对地下水流动是起阻水、透水或是阻水－透水双重作用，以及断裂本身的连通程度。非均质性研究的核心问题是如何定量化地描述组成断层带岩体的渗透性。通过钻孔取得断层带岩体样品，然后进行室内实验分析，能获得厘米尺度下的岩体渗透性参数 (Morrow, 1984; Seront et al, 1998)。此种方法得到的结果只能给出断层带渗透性的下限值，难以表征断层带的大尺度渗透性特征。许多学者利用断层带几何特征、断层泥粒径和孔隙结构、局部和区域应力状态和变形特征，来描述断层带的结构，并评价其渗透性 (Antonellini and Aydin 1995; Mozley and Goodwin, 1995; Caine et al., 1996; Heynekamp et al., 1999)。

对于岩溶裂隙含水层，以往的研究侧重于岩溶形成机制和裂隙与岩块间的水量交换。相对较老的古生代和中生代岩溶含水层，岩块渗透性较小和裂隙渗透性较大，地下水以裂隙渗流为主（White, 1969, 1988）。相对年轻的含水层，岩块渗透性较大（Palmer 2002），岩块中的渗流不可忽视（Screaton et al., 2004），岩块与裂隙间除有水量交换外，化学或溶质的交换也起着重要的作用。岩溶系统非均质性的形成机理和发展过程是值得进一步研究的问题。

将来的研究应注重：区域尺度断层带的渗透性，尤其是针对断层带渗透性的野外试验方法；不同应力条件下断层的水文地质特性；在数值模型中如何考虑区域尺度渗透性，并用于解决流域水资源管理和流体、溶质、能量输运等问题。

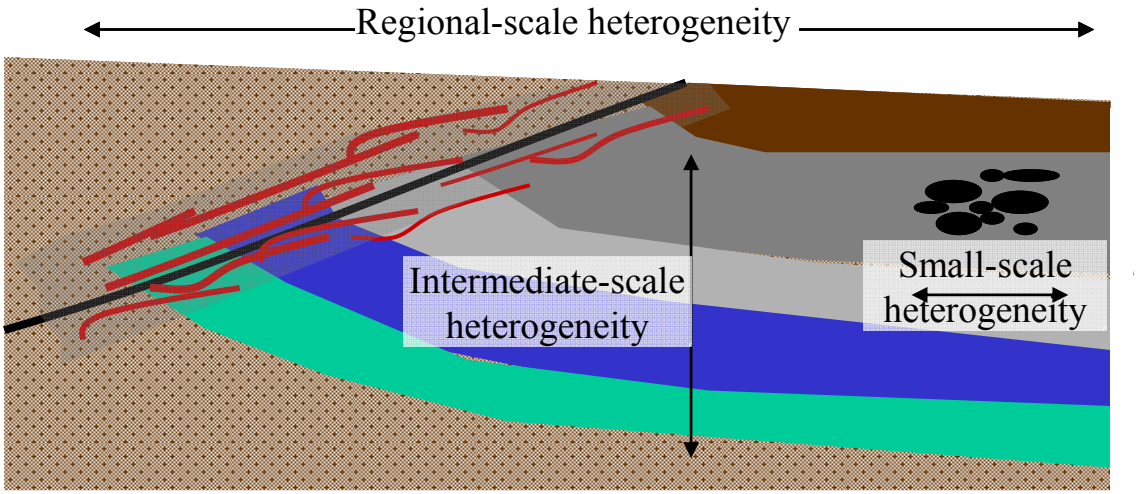


图 3.1. 不同尺度渗透率非均质性成因示意图

3.2.2 深部地下水系统的补给

水均衡分析是了解盆地尺度地下水资源长期可持续利用的必要手段。澳大利亚大自流水盆地地下水流动系统的研究表明地下水的长距离流动需要较大的水头差和足够的地下水补给量（图 3.2）。大尺度含水层地下水资源评价中往往过高估计了地下水的补给量，导致地下水的过量开采引起水位的大幅下降。美国中部平原地区的 Ogallala 含水层就是一个例子(McGuire et al., 2003)。保证一个盆地地下水资源的可持续利用，关键在于准确评价地下水的补给量，确定合理的开采量。目前，尚缺乏野外直接测量大尺度范围内地下水补给量的方法。利用地热和地球化学数据，通过数值模拟间接得到的补给量又不够准确。今后，在地下水模拟中耦合热量传输和溶质运移过程，进而得到地下水的补给量，是一个十分值得进一步探索的方向。

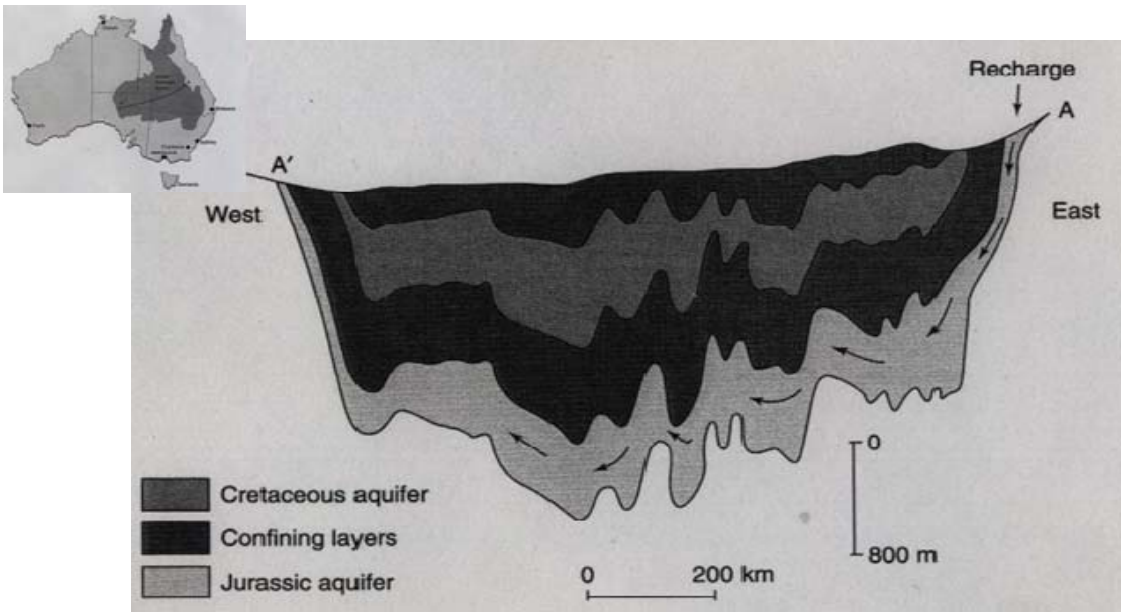


图 3.2. 澳大利亚大自流水盆地：深层含水层在高地获得补给;
地形梯度为该深层含水层流动系统提供了驱动力

3.2.3 地震诱导的液流作为天然的水文地质试验

地震会造成地下水位、地下水温度和溶质浓度出现异常变化。通常认为，地应力从集中到释放是地震从孕育到发生的本质，地应力的变化必然会造成含水层受力条件变化，进而影响地下水的动态，此种认识已经用于研究地震预兆、激发机制和余震 (Roeloffs, 1996; Bosl and Nur, 2002; Jonsson et al., 2003)。地震后地应力释放，地下水位逐渐恢复，地震引起的瞬时水位变化和随之发生的水位恢复过程相当于天然的含水层水力试验，可用于求取水文地质参数 (图 3.3)（Ge and Stover, 2000）。该方法的理论基础是多孔饱和介质弹性力学（e.g., Wang，2000）。它描述了多孔介质的两种基本特性：应力的变化引起孔隙水压力的变化，孔隙水压力的变化又引起介质体积的变化。这种相互作用过程可以用线性本构方程、压力平衡方程和流体质量守恒方程组成的方程组描述。

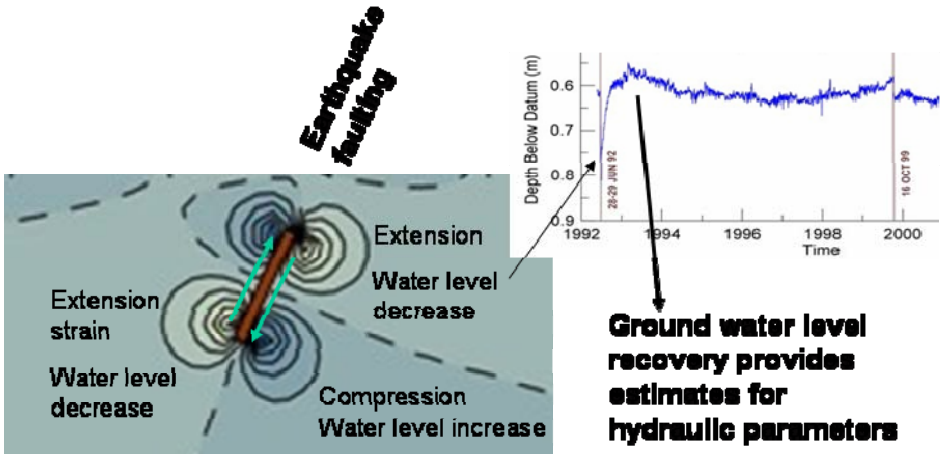


图 3.3. 地震应力和对应的地下水位时间序列示意图:
地下水位变化特征为迅速下降后缓慢恢复

3.2.4 大尺度水流和溶质迁移过程

在地壳内，地下流体的运动是矿物和石油重新分布的重要动力。特别是大型沉积盆地内，数百万年大尺度地下水流动将溶解的矿物和碳氢化合物在合适的地区富集，形成大量沉积矿床和大型油田。例如，含金属的卤水在沉积盆地流动导致金属矿物沉积，形成了北美中部密西西比河谷碳酸盐沉积的铅、锌矿(Sverjensky, 1986; Bethke and Marshak, 1990)。上百万年内，地下水流动系统随着区域构造和沉积特征的变化引起的盆地结构的变化而演化，形成了墨西哥湾油田（图 3.4）。由于流体场、温度场和化学场均随盆地结构变化而演化，恢复古流体场、温度场和化学场的演化过程，是理解盆地矿物和石油分布的一个重要环节和研究方向。

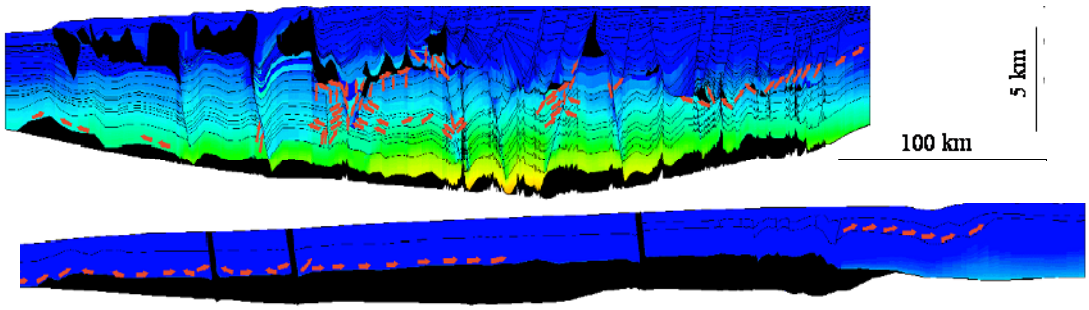


图 3.4. 在 6600 万年时间内盆地演化引起的流体流动（红色箭头）（上图为盆地的当前状态；下图为盆地的初始状态）(Stover et al., 2001)

3.2.5 处于海洋－陆地界面的地下水

海陆交界带的水文活动是全球水循环的一个重要组成部分，此处，大陆水流动系统和海底水流动系统中的各种驱动因素相互作用。大陆水流动系统已有较深入的研究，相对而言，随着近几十年海洋钻探的进步，关于海底水流动系统的研究才有所进展。研究表明，在海底存在活跃的水流动系统，陆地地形使地下水朝海岸流动，海水的高盐度则使地下水向下和向陆地流动，咸水楔体通常向陆地延伸很远（图 3.5）。与地形一样，近海岸和海岸带三角洲的沉积作用通常也是重要的驱动因素。

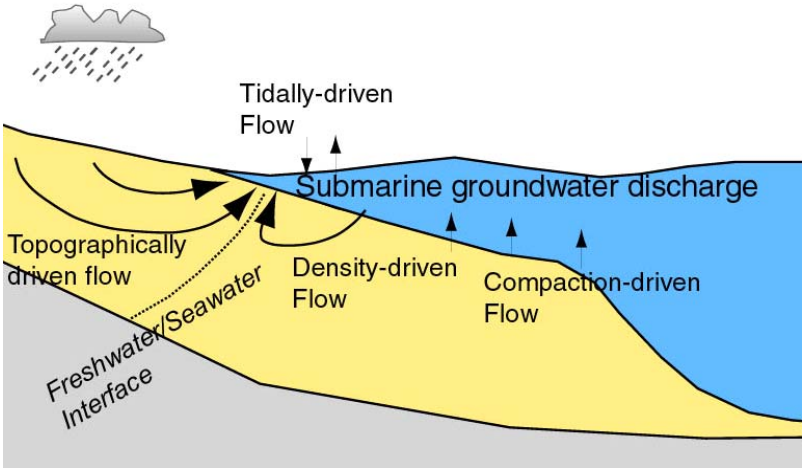


图 3.5 海陆界面的流体流动及其主要驱动因素的概念模型

几十年来，交界带的水文地质研究的主要目的是评价地下淡水资源，预测因地下水开采引起的海水入侵 (Bear et al., 1999)。在稳定条件下，陆地地下水和海水界面形成一个向陆地倾斜的混合区域 (Reilly and Goodman, 1985)。海水位变化、降水、沉积作用或浮力都能引起水流变化，造成交界带移动或咸度变化（Voss and Souza, 1987; Voss, 1999）。全新世时期的海平面上升了大约130m，海岸线向陆地后退了数百公里，引起了咸淡水交界带的移动，但地下水系统的变化往往不与此同步，从而导致在大陆边缘出现异常的高盐度和低盐度区 (Kooi et al., 2000; Swart et al, 2000; Person et al., 2003)。

地下水向海岸地带的排泄（Submarine Groundwater Discharge, 或者 SGD）对海水的营养物和溶质平衡有重要作用，尽管全球范围内地下水对海水的补给比地表水对海水的补给少得多，但地下水在局部范围内的作用往往不可忽视 (Bokuniewicz, 2001)。海水 Radium 同位素研究表明，在离海岸线 20-50 km 的地方仍有地下水排泄；在美国沸罗里达洲东海岸观测到离海岸4 km处存在流量为40 m^3/s 的海底泉。海底地下水的排泄形式多样，而且受潮汐和陆地降雨量的控制 (Taniguchi, 2002, Smith and Zawadzki, 2003)。

与海底地下水排泄有关的前沿研究问题包括：

（1） 大陆架范围内海底含水层的空间分布、水文地球化学持征、及与陆地水文地质系统的联系；

（2） 第四纪特别是全新世以来滨海地区古水文地质条件及海平面波动对大尺度区域水文地质系统的影响；

（3） SGD定量评价的方法与手段；

（4） 对典型水文地质条件地段进行多手段多学科SGD综合评价；

（5） 滨海地区包括地下水与海域的海水水质与水量的藕合数值模型。

3.3 水文地球化学

水文地球化学，或者水化学，研究水在地壳内流动时水和岩土的相互作用。这种相互作用决定了地下水或地表水的化学特征。地下水的化学成分是表征水质的指标。这些化学成份是由流域内水文、化学和生物过程的相互作用形成的。流域的补给源、通道、补给方式、水在地下的停留时间以及流经通道的矿物和生物环境等都对水化学成分有影响。水圈的化学过程控制化学风化的速率和元素的地球化学循环，影响地壳和大气圈的化学成份。

水化学研究加深了人类对水-岩相互作用、地下水的化学演化、矿化过程、石油地质以及地下水溶质运移方面的认识。在方法上，由于传统化学原理的引入，如质量守恒原理、质量转移、矿物热力学及动力学等，加上同位素理论的发展和应用，使水

化学取得了显著发展。

目前，水化学研究面临新的挑战。人口膨胀造成对淡水的需求不断增加。气候、植被、土地利用和污染等环境要素的变化都会引起水资源量和质的变化。同时，新技术、新方法的发展，新交叉学科的不断产生为水化学进一步发展提供了新的机遇。

3.3.1 水文、化学、生物过程的耦合

化学风化、水-岩相互作用是早期水文地球化学的主要研究内容，近年来，生物过程的重要性引起了广泛重视，特别是水文学、生态学和气候学对养分循环过程的联合影响及反馈作用方面的研究。大气圈中的二氧化碳浓度上升可提高植被对水的利用率 (Feng, 1999)、降低植被蒸腾量，增加地下水的补给量。大气中氮的沉降对植被起到“施肥”作用，通过植被的变化影响水循环和碳循环的变化。一氧化二氮是一种很强的温室气体，其释放受降水和土壤水分的控制（Li et al.,1992a, b）。气候变化会改变有机物的降解速率，影响生态系统的养分循环和大气的 CO_2 含量。土地利用和水土管理会影响水循环和养分输出通量。全球范围内的氮肥使用造成了地下水和地表水化学成分的改变。由于这些复杂的耦合过程的存在，对未来气候的准确预测必须考虑水文和生态过程对气候变化的响应和反馈作用。

通过多种氧化还原化学反应过程，微生物还能改变重金属或其他污染物的溶解度使其溶解或沉淀。DeLemos et al.（2006）报道了一项关于密闭式垃圾填埋场的研究。在美国新罕布尔什州的一个垃圾场，含重金属和有机挥发物的垃圾渗滤液污染了地下水。垃圾填埋场封闭后，地下水中的重金属和有机物含量明显减少，但砷的含量却增加了。造成此种现象的主要原因是垃圾场的封闭使氧的来源减少，而微生物的生长需要消耗大量的溶解氧和有机物，导致还原环境和铁氧化物的溶解，最终，吸附在氧化铁表面的砷就被释放到地下水中。此种过程也造成了许多地方的地下水砷污染，如印度孟加拉邦、孟加拉国、越南和柬埔寨等地区 (Berg et al., 2001; Polya et al., 2005; Smedley and Kinniburgh, 2002)。

生物过程改变化学环境已是一种常见的现象（见 3.5 节）。这些过程中微生物所需的溶解氧往往通过地表水的补给得到，与水文条件的变化密切相关，但其中的许

多热力学和动力学过程还有待进一步研究。关于特定水文环境下的化学和生物反应耦合模拟研究才刚刚起步。

3.3.2 利用多种示踪剂来研究水文地质过程

自从稳定、放射性同位素示踪剂在水化学研究中取得应用以来，人们已开发出许多不同类型的示踪剂，而且定量分析所需要的浓度越来越小。不同性质的示踪剂可以表示水与介质间相互作用的不同特点，提供一系列关于盆地的地质、水文、化学和生态环境等方面的信息。

在实际应用中，示踪剂可分为两大类：一类用于测定地下水年龄，另一类用于研究水文和化学过程，如水的混合过程、水的流动路径以及地下水流经的介质环境。通常，一种示踪剂仅显示地下水系统某一方面的信息，为获得更多更全面的信息，将多种示踪剂联合使用是近几年的发展趋势，但在方法上还有待进一步开发和研究。

地下水测龄

放射性同位素和水中溶解性气体是两类广泛用于地下水测龄的示踪剂。两种示踪剂测试地下水年龄的原理和方法有所不同，通常将前者称为同位素测龄法，后者称为气体测龄法。同位素测龄法是一种基于放射性核素衰变的地下水测龄方法，其可测范围取决于放射性核素的半衰期和分析仪器的灵敏度，通常在 1/10(或更长)到 5(或更短)个半衰期之间（表 3.1）。

气体测龄法的基本原理是测量溶解在地下水中的气体浓度，在假设地下水是塞状流（plug flow)的条件下，通过与大气降水中相应气体浓度的比较，计算出地下水的年龄。通常情况下，气体（如 CFC-12）在水中的浓度 $C_{CFC-12,}$ 与在大气中的分压 $p_{CFC-12,}$ 成正比：

$$C_{CFC-12} = K\ p_{CFC-12}$$

式中 K 为随温度变化的比例常数。

表 3.1 地下水和地表水测龄的主要放射性核素

同位素	半衰期 (年)	衰变模式	实例
^{3}H	12.43	β^-	(Clark and Fritz, 1997; Cook et al., 2005; Cook and Solomon, 1997; Plummer et al., 1993; Solomon and Cook, 2000; Solomon et al., 1992)
^{14}C	5730	β^-	(Clark and Fritz, 1997; Cook et al., 2005; Geyh, 2000; Kalin, 2000)
^{36}Cl	301000	β^-	(Clark and Fritz, 1997; Cook et al., 2005; Frohlich, 1990; Lehmann and Purtschert, 1997; Park et al., 2002; Phillips, 2000)
^{39}Ar	269	β^-	(Clark and Fritz, 1997; Lehmann and Purtschert, 1997; Loosli et al., 2000)
^{85}Kr	10.72	β^-	(Clark and Fritz, 1997; Cook and Solomon, 1997; Loosli et al., 2000; Plummer et al., 1993)
^{81}Kr	210000	ec	(Collon et al., 2000; Frohlich, 1990; Loosli et al., 2000)
^{129}I	$1.60x10^{7}$	β^-	(Frohlich, 1990)
^{222}Rn	3.8 days	α	(Cecil and Green, 2000; Clark and Fritz, 1997; Lehmann and Purtschert, 1997)
^{226}Ra	1600	α	(Clark and Fritz, 1997)
^{234}U	246000	α	(Clark and Fritz, 1997; Frohlich, 1990; Osmond and Cowart, 2000)
^{32}Si	140	β^-	(Clark and Fritz, 1997)

图 3.6 给出了几种气体在大气中的分压随时间的变化。由于所有气体的溶解度都和温度有关，因此在计算年龄之前必须先确定温度。一种解决办法是利用多种气体（如同时用 CFC-11 和 CFC-12），或利用其它气体如惰性气体或 N_2/Ar 比可求得温度（e.g., Andrews and Lee, 1979; Heaton and Vogel, 1981; Stute and Schlosser, 2000）。地下水的年龄就是采样时间减去降水中气体浓度与地下水气体浓度相同时所在时间。例如，如果 2005 年所采水样的 CFC-12 浓度说明该水样与含 200 pptv CFC-12 的大气平衡，那么根据塞状流模型及图 3.6，该水样的年龄为 2005-1975=30 年。

CFCs 在大气中的浓度已趋于稳定或有下降的趋势，用简单的塞状流模型计算地下水年龄往往多解。一种新的气体（SF_6），已经被用于地下水测龄的示踪剂。SF_6 是一种工业产品，其在大气中的浓度在不断增大（图 3.6）。关于地下水测龄的更多信息，可以参考近期的一篇综述文章(Plummer and Busenberg, 2000)。

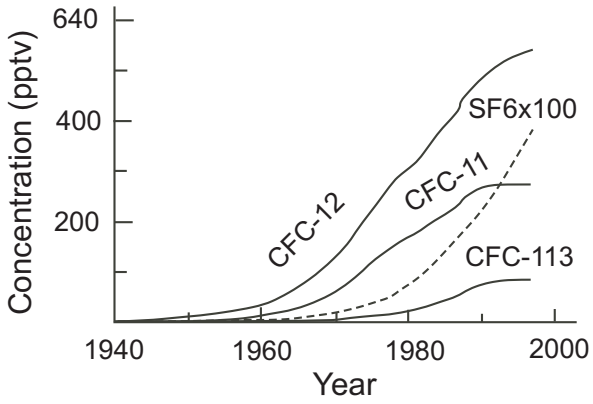


图 3. 6. 北美大气中 CFC-11, CFC-12, CFC-113, 和 SF_6 的浓度
(from Plummer and Busenberg, 2000)

标记来源与过程的示踪剂

根据地下水中示踪剂与介质的化学反应特点，可分为非反应性和反应性两种。非反应性示踪剂与介质之间不发生化学反应，可以用于跟踪水体流动有关的过程，如补给、混合和排泄。最有代表性的非反应性示踪剂是氚、氚和 $^{18}0$，它们在浅层地下水中与岩石的反应可以忽略。另一类非反应性示踪剂是卤族元素化合物，如氯化物、溴化物，这类示踪剂与土、岩的化学反应非常弱。在雨水中的氯化物浓度较高时，其弱吸附作用可以忽略，因而在海岸附近流域盆地的研究中极其有效（Chen et al., 2002; Gebhardt and Coleman, 1974）。

非反应性示踪剂不与介质发生反应，不能提供有关介质的信息和水岩之间发生的化学反应的信息。对于这种信息，我们需要借助活性示踪剂。许多元素，如钙、镁、硅，为化学风化产物，即酸性降水与基岩的反应产物。这些示踪剂的浓度随地下水年龄的增加而增加。溶解有机物或一些无机物（如硝酸盐）通常可以指示水与土壤之间的反应。此外, 碱度、pH 值、溶解氧和氧化还原电位都经常被用来指示水的年龄和/或水流的路径。

许多同位素示踪剂可以指示地下水溶解物的来源（如大气、农田）或与介质的相互作用（如化学风化、离子交换、吸附等）。例如，Sr 同位素可以指示地下水中所

含 Sr 是源于降水、矿物或基岩的化学风化，还是人类活动 (e.g., Capo et al., 1998; Chang et al., 2002; Harrington and Herczeg, 2003)。硝酸盐的氮和氧同位素可以用来区分硝酸盐的来源，如大气、森林土壤、动物排泄物、化肥或者微生物的反硝化作用（Kendall and McDonnell, 1998; Michalski et al., 2004; Vilomet et al., 2001）。稳定碳同位素可用于区分碳的各种来源，如大气 CO_2 、海相碳酸盐的溶解, 或者植被与土壤有机质（如：Dogramaci and Herczeg, 2002; Finlay, 2003; Pazdur et al., 1999）。在一些水文研究里已经综合使用了多种同位素，并在揭示水的来源和过程方面起了重要作用（e.g., Bullen and Kendall, 1998; Farber et al., 2004）。Kendall and McDonnell (1998) 所著的书中介绍了大量同位素示踪剂的原理及其在流域水文学中的应用。

3.3.3 水文地球化学模拟

水文和地球化学过程的计算机模拟技术和软件开发是与示踪剂平行发展的另一个领域。目前，该领域的发展趋势是可模拟的过程数量越来越多，时空尺度越来越广，精度越来越高。其中以下几个方面的研究尤为重要。

第一个方面是关于地下水测年模型的使用。尽管已有许多地下水测年方法，但地下水年龄计算仍非易事。地下水的年龄通常是流经多种途径的多种不同年龄地下水的平均。地下水年龄的解译往往取决于模型，包括地下水的补给路径和在不同路径的流速。此外，不仅需要知道一个系统的平均流动时间，还需要知道流动时间的完整分布。一方面，快速流动通道决定了某些工程的设计指标，如核废物的处置场所。另一方面，低速流动通道决定了一个受污染的地下水系统自然修复所需要的时间。

尺度转换，即利用小尺度的观测资料预测大尺度行为（或相反，利用大尺度的观测资料预测小尺度行为），对于所有地下水模型都是一个极大的挑战。这个问题亟需解决，不仅是出于优化水文模型的需要，而且是将水文模型与大气模型、生态系统模型耦合的需要。没有这些过程的耦合就不能预测气候变化、生态系统结构的变化、水资源的质和量随气候的变化、以及供水需求变化。化学和生物反应在孔隙尺度上发生，这种反应在时间和空间上往往都是高度非均质的。由于这种复杂性，尽管计算能力取得了飞跃发展，目前预测未来的能力还是非常有限。在比较大尺度观测（如卫星

图片）和小尺度观测（地面实测）时，尺度效应也是非常重要的。这一领域今后需要加强。

尽管示踪剂，特别是同位素示踪剂的使用越来越广泛，综合考虑同位素示踪剂和生物过程的水化学模型却还很少。同位素资料的解译往往还局限在简单的质量守恒技术。鉴于同位素示踪剂的多样性和有效性（可以追踪水文过程，化学过程和生物过程），未来的同位素示踪剂研究要强调水文地质学家、地球化学家和地质生物学家合作。

目前，无论是基于热力学的地下水地球化学模拟，还是地下水溶质运移模拟，均借助于计算机来完成。Truesdell and Jones (1973, 1974)是开发计算机模拟软件的先锋之一，他们编写了著名的软件 WATEQ，用于天然水的配分计算。在此以后，开发出了各种可以计算包括固体、气体、离子和有机络合物在内的系统配分的模型，如 CHESS、MINTEQA2、PHREEQC、The Geochemist's Workbench®、和 WATEQ4F (详情参见插页 3.1)。其中一些模型包含了简单的溶质运移的组件，如 PHREEQC 和 NETPATH。更复杂的水化学和污染物运移模型试图耦合地下水的流动和化学反应，提供化学组分时间演化和三维分布特征。在 MT3D (Zheng, 1990) 之后的 MT3DMS (Zheng and Wang, 1999a) 就是一个例子。它充分利用地下水流模型 MODFLOW (Harbaugh et al., 2000)，得到三维的流速分布，再代入溶质方程计算中。影响运移过程的化学反应在运移方程中定义。作为 MT3DMS 的进一步拓展，PHT3D 模型将 MT3DMS 对多组分对流－弥散三维运移的模拟与 PHREEQC-2 对反应过程的定量表征融合在一起 (Prommer et al., 2003)。

插页 3.1. 地球化学模拟软件

1．CHESS (Chemical Equilibrium of Species and Surfaces)
网址: http://chess.ensmp.fr/index.html
CHESS 是一个配分模型，专门用于模拟包括氧化物或矿物，有机质，胶体和气体的复杂水系统的平衡状态。CHESS 在许多领域尤其是环境工程、废物处置的安全性和性能评价，地下水和地表水的污染研究中得到应用。

2．EQ3/6
网址: http://www.llnl.gov/IPandC/technology/software/softwaretitles/eq36.php
EQ3/6 是一个水系统的地球化学模拟软件包，所提供的配分－溶解度和反应路径软件使得水－岩系统随时间和反应进程的数值模拟成为可能。

3．MINEQL+
网址: http://www.mineql.com/
MINEQL 是一个化学平衡模拟系统，可用于水化学计算、地下水地球化学、化学配分、滴定曲线、离子平衡、水化学、水质计算、矿物平衡、溶解度图、pH 计算、氧化还原反应、腐蚀计算、环境化学、土壤化学、离子吸附、logC-pH 图和热力学计算。

4．MINTEQA2 (US EPA 免费提供)
网址: http://www.epa.gov/ceampubl/mmedia/minteq/
MINTEQA2 是一个平衡配分计算模型，用于计算实验室或天然水系统中低浓度水溶液的平衡状态下的组成。该模型对于计算各种条件下（包括恒定分压的气相），溶解组分、吸附组分和多个固相的平衡质量分布十分有用。

5．PHREEQC (USGS 免费提供)
网址: http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/
PHREEQC 基于水溶液离子缔合模型，具有以下功能：（1）计算配分和饱和指数；（2）分批实验和涉及可逆和不可逆反应的一维溶质运移计算，其中可逆反应包括液相、固相、气相、固溶体、表面络合和离子交换平衡，而不可逆反应包括反应物的特定摩尔转移、动力学控制的反应、溶液的混合和温度变化；（3）逆向模拟，从而找到可以在给定的成分不确定性范围内解释水的成分变化的矿物和气体摩尔转移。

6．The Geochemist's Workbench®
网址: http://www.rockware.com/catalog/pages/gwb.html
The Geochemist's Workbench®可以在三个功能逐渐增高的级别上获得：GWB 基本版，GWB 标准版和 GWB 专业版。GWB 基本版提供一套基本的水文地球化学工具，如平衡化学反应，绘制氧化还原－pH 图，计算溶液配分，矿物饱和度，气体逸度，模拟离子吸附和表面络合反应，绘制 Piper 图, Stiff 图及其它水化学图解。GWB 标准版增加了反应路径模拟功能，而 GWB 专业版增加了 1D 和 2D 反应性运移模拟。

7．WATEQ4F (USGS 免费提供)
网址: http://water.usgs.gov/software/wateq4f.html
WATEQ4F 用于计算天然水中宏量、微量和氧化还原组分的配分。

8．JESS (The Joint Expert Speciation System)
网址: http://jess.murdoch.edu.au/jess/jess_home.htm
JESS 是模拟复杂水环境中化学配分的强大研究工具。大多数 JESS 模拟是利用水介质中相关反应的已知热力学参数来计算配分的。可以模拟各种化学平衡，包括质子化、络合物形成、溶解、吸附反应等。

9．NETPATH (USGS 免费提供)
网址: http://water.usgs.gov/software/netpath.html
NETPATH 是一个交互式的 Fortran 77 程序，用于解释沿流径初始水样与终结水样之间的净地球化学质量平衡反应。该程序利用的数据包括所研究的水化学系统的化学和同位素资料。考虑的过程包括溶解、沉淀、离子交换、氧化还原、有机化合物的降解、非全等溶解、气体交换、混合作用、蒸发、稀释、同位素分馏、同位素交换等。对于所选定的演化前后的水样，对应所研究系统的化学和同位素约束的成分的各种可能的相的组合，均计算地球化学质量平衡反应。

3.4 地下水污染

在美国和西方发达国家，公众对地下水污染的关心促使政府为保护地下水和修复污染的含水层制定了许多严格的法律和管理条例。在美国，国会先后制定了 1974 年的“安全饮用水法”（Safe Drinking Water Act of 1974），1976 年的“资源保护与恢复法”（Resource Conservation and Recovery Act of 1976），1980 年的“全面环境回应、补偿与责任法”（Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980），和 1986 年的“超级基金修正与重新签署法”（Superfund Amendments and Reauthorization Act of 1986）。这些法律设定了一套完整的饮用水标准，规定了新建工业场地所需的地下水环境评估和监测的措施，建立了全国需要优先整治的污染场地（Superfund 场地）的清单，制定了国家环保部门可以追究污染者责任并征收污染整治费用的条款。这些法律的制定极大地推动了地下水污染的研究工作，加深了人们对污染物在地下水和土壤中运移反应机理的理解，促进了地下水污染测试和模拟手段以及

修复技术的发展。在这一节，我们将讨论目前国际上地下水污染研究的几个前沿方向。

3.4.1 大型野外试验场

通过在观测井密布的野外试验场的研究，极大地丰富和发展了描述和预测地下水溶质运移的理论与方法。特别是 1980 年代后期以来，在加拿大安大略省的 Borden 军事基地（(MacKay et al., 1986)、美国马萨诸塞州的 Cape Cod 军事基地 (LeBlanc et al., 1991) 和密西西比州的 Columbus 空军基地（Boggs et al., 1992）开展的野外试验，为发展和验证溶质运移理论及其数学模型提供了新的认识和大量数据。以哥伦布（Columbus）空军基地的示踪试验（图 3.7）为例，该场地过去被用作宏观弥散试验场地，近来被用作生物自然修复试验场地。从 20 世纪 80 年代开始，美国及全世界大量学者利用在该场地收集的资料研究了高度非均质含水层的污染物运移过程，改进了相关理论和计算机模型，从而提高了对含水层的描述和对污染物运移和修复预测的精确度 (Zheng, 2006)。当前关于污染物运移方面的许多新认识都建立在该场地的研究成果上，比如，小尺度的非均质性以及由此形成的优先流通道对污染物运移起主要控制作用（Zheng and Gorelick, 2003）。有关学者针对哥伦布试验场已经提出了至少四种用于解释瞬时释放污染源形成的污染物羽状体的非高斯和其它异常现象（见图 3.8）的假设和模型。其中包括分数阶对流－弥散模型（fractional-order advection-dispersion）、非局部弥散理论（nonlocal dispersion）、连续时间随机走动模型（continuous-time random walk）和双重介质质量交换模型（dual-domain mass transfer）。充分利用野外观测资料验证和比较这些理论模型的意义重大，对相关地下水文学研究极具参考价值。



图 3.7. 美国密西西比州哥伦布空军基地宏观弥散(简称 MADE)试验场

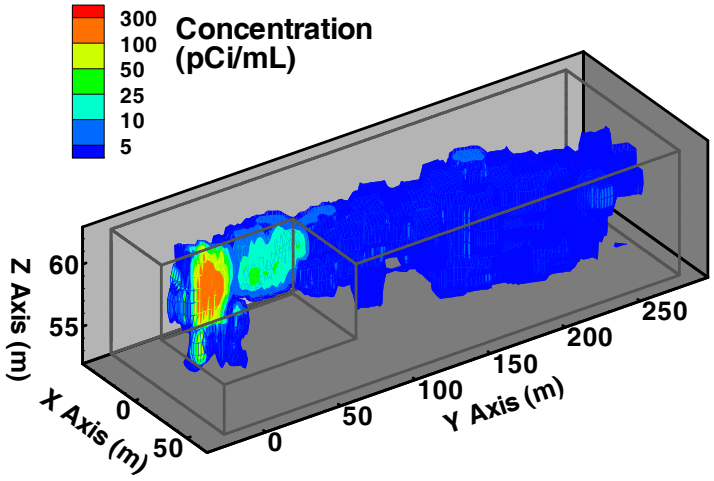


图 3.8. MADE 试验场自然水力梯度示踪试验观测到的氚羽状体

3.4.2 非均质性对污染物迁移转化的影响

含水层渗透系数的空间变异性，也就是含水层的非均质性，对污染物的运移起着至关重要的控制作用。在过去的二十多年里，水文地质研究的一个非常活跃的领域就是对各种尺度上含水层非均质性的描述，以便更加准确地模拟地下水流动和污染物运移（de Marsily et al., 2005）。这一领域的前沿研究包括利用地质统计学方法和其它随

机方法描述含水层非均质性和由此形成的优先流通道（图 3.9）；推导与传统对流-弥散模型不同的新的数学和计算机模型，用于描述高度非均质含水层的非高斯溶质运移(Feehley et al., 2000; Berkowitz et al., 2006)；利用地球物理方法描绘非均质性含水层（Rubin and Hubbard, 2006）；在污染物迁移转化的模型中综合考虑物理和化学非均质性。

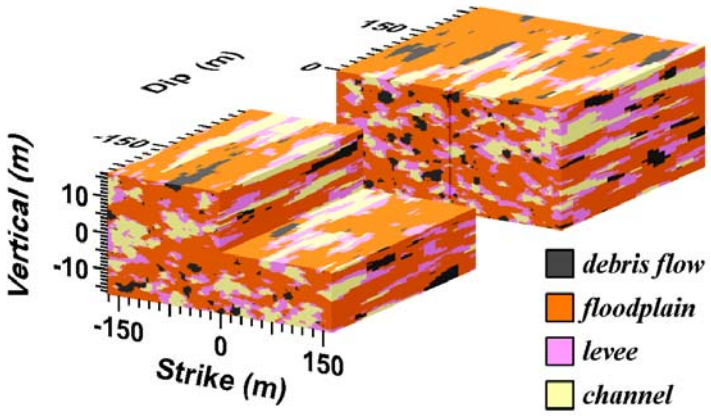


图 3.9. 美国加州某场地河流沉积相的三维分布图：浅色（黄色）表示连通的河道相（channel）造成的高渗透性优先通道 (Carle, 1999)

3.4.3 新近凸现的污染物（Emerging Contaminants）

根据美国地质调查局 (http://toxics.usgs.gov/regional/emc/index.html, 2006)，“新近凸现的污染物”定义为环境中不常见，但是进入环境后会带来有害的生态效应和/或对人体有害的人工合成或者自然产生的化学物或微生物”。近年来，地下水科学家越来越关注两类污染物—药物和病源菌。值得注意的是，这些污染物的一部分在环境中早已存在。但是通过最新的监测方法才检测到它们的存在。地下水中常见药物化合物包括抗生素、荷尔蒙、类固醇、处方药和非处方药。常见的影响地下水水质的病源菌包括原生动物、细菌和病毒。在美国和其它西方国家，已经开展了一些关于药物和病源菌的研究，包括能够检测更低限的分析技术、污染源和污染路径分析、在地下水中的迁移转化规律模拟、以及接触这些污染物后的生态影响评价。

3.4.4 高放射性废料的地质处置

美国和其它西方发达国家面临的一个重要环境问题是如何处置高放射性核废料。为了寻找安全、长期的核废料地质储藏场，这些政府已经对放射性污染物在长时间尺度上的迁移转化规律研究投入了大量资金。主要研究方向包括：裂隙基岩地层的表征、非饱和双重介质中的水流动和核素迁移机制（图 3.10）、长时间尺度迁移模型的不确定性和可靠性、以及通过同位素和环境示踪剂的方法寻找潜在迁移通道等。

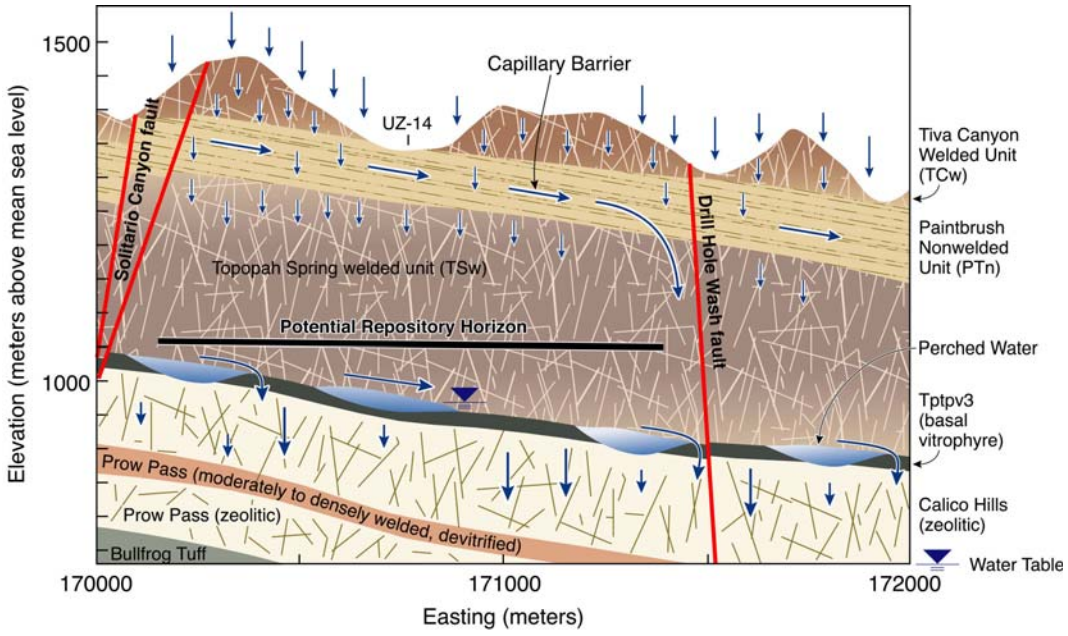


图 3.10. 美国 Yucca 山计划中的核废料储藏场地的概念模型(Wu et al., 2004)

3.5 地质微生物与生物修复

地下水水文学与生物学是紧密结合的。早在 20 世纪初期，人们就认识到微生物作用对地下水水质起重要影响（Chapelle, 2000）。地质微生物学这一交叉学科的发展，在某种程度上是因为要进一步认识这一影响和想利用生物治理水体污染的需要。生物修复可定义为利用微生物活动使污染物降低毒性或者去除。这一过程依赖于微生

物的酶促反应使污染物转化或降解。生物修复方法正日趋成熟。与化学方法、物理方法相比，这一方法有如下优势：

- 使污染物在原位完全降解，并且没有有害的副产物；
- 同时适用于有机污染物和无机污染物；
- 管理机构和公众一般都能接受；
- 对多数地质环境和含水层都适用。

3.5.1 地下水有机污染物的生物降解

由于有机污染物的普遍性和前述的生物修复的优越性，有机污染物的生物降解这一领域的研究成果很多，已经比较成熟。过去 20 年里，已经有许多成功应用于实际的例子(Suthersan and Payne, 2005; Atlas and Philp, 2005)，大多数都是在美国废弃的空军基地。尽管一些环境咨询公司、生物技术公司已经在开展一些常规的清理工作，这些公司的研究开发部门以及大学研究人员还在继续从事这一方面研究，期望找出更有效的技术。

多数有机污染物在好氧和厌氧条件下都能降解，只是降解速度不同。好氧降解需要充足的氧化剂，如 O_2（Suthersan and Payne, 2005）。一些有机物，如石油碳氢化合物、非氯化苯酚化合物和氯代物，可用好氧生物降解。一些氯代脂肪化合物(CAHs)，可以通过共代谢作用被微生物转化。例如，甲烷氧化菌可以产出一种酶——甲烷单加氧酶（methane monooxygenase，MMO）, 这种酶能够把三氯乙烯（TCE）降解。 很多微生物都可以好氧降解 MTBE。如果一个污染含水层的 O_2 不充足，则可以采用厌氧生物降解。MTBE 和其它一些化合物（如三氯乙烯）的厌氧氧化在近几年才得到证实，主要的电子受体为 NO_3^-、Mn^{4+}、Fe^{3+}、SO_4^{2-}以及产甲烷环境。这方面研究尚缺乏大型野外试验场的支撑。

还原脱氯是含卤有机污染物降解的主要途径 (Suthersan and Payne, 2005)。这类化合物包括广泛使用的溶剂，如 CT、二氯甲烷(MC), TCA, 三氯乙烯(TCE), 四氯乙烯(PCE), 多氯联苯 (PCBs), 含氯杀虫剂, 氯氟烃, 氯化苯酚和氯化苯等。脱氯还原的关键

在于将可溶性电子受体溶液注入污染含水层，强化生物对这些污染物的转化能力。作为电子受体的氯代物分子的还原结果是破坏氯键，替换为氢键，之后进一步脱氯。

当前的前沿研究领域主要集中于找出各种野外条件下最有效的降解路径，比如厌氧降解 MTBE 和 TCE。有降解污染物能力的微生物的数量和功能在不断增加。基因工程预示着新的机遇，可以把有某种特定功能的基因引入到微生物。随着这些发展，难降解化合物的生物降解已经成为可能。

3.5.2 地下水中重金属和放射性核素的生物转化

金属在制药、电子、催化和核能等许多工业领域的应用越来越广。但是，与此同时，这些工业造成了严重的环境污染问题。重金属和放射性核素是引起癌症和婴儿畸变的重要原因。美国环境保保局（USEPA）列出需优先控制的污染物包括 Sb, Cr, Hg, As, U, Tc, Pb, Se, Cd 这些可溶、可回收的金属。在美国，亟需以生物降解手段处理这些金属及其放射性同位素污染物。这些物质主要是来源于美国能源部留下的 60 亿立方米受污染的土壤、地下水和其它环境介质。这些污染需要设法清除、管理和监测。美国能源部专门成立了环境修复科学研究计划 (Environmental Remediation Science Program, 简称 ERSD)，以资助这些污染场地的生物修复技术的开发和应用 (http://www.science.doe.gov/ober/ERSD/ersphome.html)。与有机污染物的生物修复不同，金属污染物的生物修复尽管已经取得了一定成就，目前还是热门研究问题 (Lovley, 2000; Lloyd et al., 2005)。这主要是因为金属污染物的生物修复目前还只是在实验室特定条件下有效。大范围的野外试验还处于研究阶段，没有开始实际应用 (http://www.esd.ornl.gov/nabirfrc/)。

微生物可以与金属和放射性核素通过很多机制相互作用，其中一部分是金属生物修复的基础(Lloyd and Macaskie, 2000)。生物吸附是指，微生物通过与新陈代谢不相关的作用，将重金属和放射性核素吸附到生物体。生物吸收是指，微生物通过与新陈代谢相关的作用，将重金属和放射性核素吸收到生物体内。对于多数微生物生理很重要的金属离子，金属的吸收需要能量，但是由于需要新陈代谢能力活跃的细胞，从而限制了其实际应用。有些微生物（金属还原菌）能够将有毒性金属转化为不易溶从而

毒性减小的低价态金属，如 Cr(VI) 转化为 Cr(III)，U(VI) 转化为 U(IV)；有些微生物还能将金属和放射性核素以碳酸盐或氢氧化物的形式沉淀，从而将其从含水层中除去。某些金属也能够以硫酸盐或磷酸盐的形式沉淀。

目前，该领域的机遇和挑战是找出影响污染物在地下水中的运移和转化的主要控制因素，以开发新的生物降解技术和长期监测方案，从而更加合理地评估风险，需要新的工具和方法用于原位检测、监测、模拟和稳定污染物，并且将污染物从地下介质中除去。就美国能源部留下的污染场地修复而言，尽管生物降解很重要，还需要考虑其它一些方法。比如，已经有人尝试用各种氧化剂、还原剂和纳米材料转化和/或固定污染物。固定(沉淀) 以后的金属和放射性元素的长期稳定性问题很重要，目前有学者在研究相关含水层中的稳定性评价问题。

3.5.3 地下水中的病原菌及其修复策略

在过去二十多年，在许多地下水系统中发现了病原微生物(Macler and Merkle, 2000)。尽管根据总大肠杆菌规定（Total Caliform Rule, TCR）(USEPA, 1989)，美国的所有公共引水系统需要检测总大肠杆菌和粪源大肠杆菌，仍然有大量的公共引水系统受到了污染。地下水相关的病原菌是许多疾病暴发的根源。在工业欠发达国家，约80%的疾病是由水生病原菌引起的，这些疾病造成每天约有 27,000 人过早死亡（Miller, 2000）。这些疾病有很多都是缘于受污染的地下水。在一些国家问题更严重，地下水不经水厂处理就直接饮用 (Nygard et al., 2004)。

控制水生病原微生物的方法很多，包括：最佳管理实践，源头保护隔离，源头水评价和保护，井源保护,，污染源头控制，布井标准，井源和污染源头隔离。这些方法已经成熟，并获得了广泛应用。

近来有人研究用通过河流堤岸过滤法用来去除地表水中的病原菌，从而使得地表水可以作为重要的饮用水资源。河流堤岸过滤系统的有效性取决于生物化学、物理和水力学等多方面的复杂因素。需要找出并量化这种关系，以提高我们评价某一场地受病原菌污染可能性的能力。但是目前这种关系还没有建立。实际上，近期位于威斯康星州 La Crosse 密西西比河的河流堤岸过滤系统的一项研究并没有发现病毒浓度和地

表水在地下水所占的比例、地表水的运移时间或距离之间存在联系。这一结论说明，必须通过更详细的野外试验。为了提高对地下水病原菌的运移和转化的预测能力，今后的研究需要将实验室、野外和模拟工作结合起来。

3.5.4 野外应用

生物治理水体污染物的野外应用可以分为两类：生物激发活化 (biostimulation)和生物强化技术 (bioaugmentation)。如果待处理污染场地存在所需的微生物，可以通过注入有机碳和其它营养成分来激发该微生物的活力。这种技术的一个局限性是，由于微生物总量在含水层的积累是一个缓慢的过程，修复所需时间较长。如果一个受污染场地不存在有所需(降解作用)的微生物时，则需要将所需微生物从异地引进，在实验室培养以后，注入污染场地。与生物激发活化法不同，生物扩增法存在几个缺点。如：价格昂贵，微生物不一定能够进入含水层以及原有微生物要与注入微生物争夺有限的资源。另外，向含水层注入细菌需要向有关部门审请许可证。

效果检测是生物修复的重要组成部分。在生物修复之前，需要先确定污染场地是否具备生物自然修复能力，如果存在，其速率是多少。检测方案需要考虑合适的采样地点、采样频率和测量参数。

化学分析的目的是精确定量生物降解过程中目标污染物的浓度，确定污染物是否以预期的速率被去除。近来，稳定同位素有效地用于追踪污染源和检测生物降解的速度和程度。这些稳定同位素包括：C、H、Cl、N 和 S (Aggarwal et al., 2005; Atlas and Philp, 2005)。化合物的生物降解通常会引起重同位素(如 ^{13}C)在残余化合物的富集，同时引起轻同位素(如 ^{12}C)在降解产物的亏损 (Smets and Pritchard, 2003)。特定化合物的稳定同位素分析具有更强的功能，因为它可以用于检测某种化合物的降解程度。把这种方法与传统浓度检测的方法相结合，自然或人工生物降解的速率和转化路径就能准确确定了(Elsner et al., 2005)。

生物修复作为一种环境修复技术，必须确保有足够的降解特定污染物的微生物。确定微生物数量的方法很多，如：菌落计数法、耗氧量和 CO_2 产量测量法、新陈代谢生物标志化合物的产生和同位素偏移。

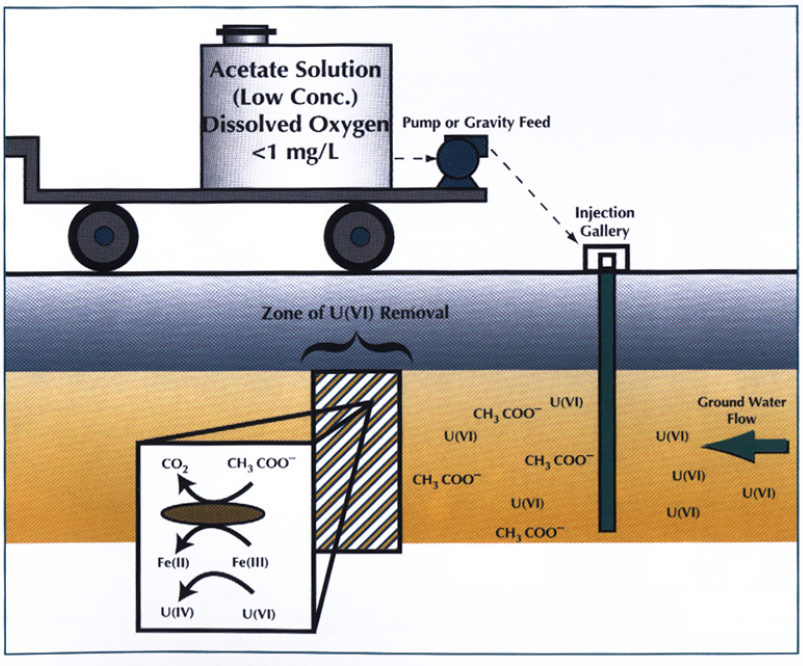
近年来，分子方法已经用于研究微生物群落结构及功能。菌落测定方法包括16S rRNA 基因分析、变性梯度凝胶电泳（denaturing gradient gel electrophoresis，DGGE）、长度非均质性聚合酶链式反应（length heterogeneity polymerase chain reaction，LH-PCR），和终极制性片段长度多态性（terminal restriction fragment length polymorphism，TRFLP）。分子探针法可以用来补充这些方法。一种与特定微生物的 DNA 或 RNA 杂交的分子探针法已经取得应用。探针法既能用于原位也能用于异位。这些方法包括 DNA 基因芯片、荧光原位杂交和稳定同位素探针。近来，检测和量化特定代谢基因与实时 PCR 被用于精确定量污染物降解涉及的基因类型和数量(Beller et al., 2002)。生物监测器可以用来评价和检测特定类型化合物的毒性。

近年来，地球物理方法被用于现场监测与生物、化学、水文过程相关的生物地球化学反应过程。这方面研究需要地球物理、地球化学、水文地质、地质微生物等多学科专家的合作。通过野外修复试验、数值模拟和理论研究的综合研究，有望检测到生物修复引起的物理、化学和生物性质的变化。可以通过建立数学模型来研究这些过程。

几个成功的实例预示了这一领域的前景。例如，由生物修复引起的渗透系数变化（由于矿物的沉积和溶解）可以通过层析成像数据监测出来(Hubbard et al., 2001; Chen et al., 2001)。反硝化过程中生成的气体可以通过雷达检测出来。氧化还原电位的变化可以通过电压来测定。Williams et al. (2005) 检测出了因沉积物特征变化引起的复电阻率和声波传递信号的变化，而这种沉积特征的变化是由微生物作用形成硫化物沉积造成的。这些研究发明了用非破坏性的，在野外宏观尺度上可使用的检测微观生物地球化学过程的新方法，有望在生物修复的实践中得到广泛应用。

插页 3.2. 重金属生物转化－以 U(VI)为例

重金属和放射性离子是地下水和土壤中常见的污染物。这些废物是在核发电厂、矿山开采与核武器生产过程中产生的。传统的方法是将污染的地下水抽到地表，处理后再回注到地下。但这一方法价格昂贵，并且效果不好。最近，生物的方法得到了重视。以铀污染为例（参见插页图 3.11）：氧化的铀在水里溶解度很大，随水流动，如果进入饮用水，这将是一种致癌物质。在用生物治理地下水的过程中，有机碳(如醋酸)和其它营养成份可以注射到地下。因为有过剩的有机物，地下水的含水层马上由好氧变成厌氧条件。在厌氧条件下，金属还原菌被迫用 U(VI)代替氧气进行呼吸。也就是说，从醋酸到 U(VI)有电子转移。金属还原细菌起到了催化作用。由于这一电子的转移使得 U(VI)还原成为 U(IV)。这一还原以后的 U(IV)不溶于水，以晶质铀矿形式沉淀出来，从而从水中除去。这种依靠注射碳源和营养成份到地下水中激发活化本源细菌的方法叫生物活化法。但有些污染区本身没有金属还原菌，这时就得从外界引入。这种方法叫生物强化法(Gentry et al., 2004)。实验室培养的细菌和醋酸(和其它营养成份)可以同时注射到地下开始生物治理。这一生物强化法成功的关键问题是要将注射的细菌扩散至整个污染区。由于安装地下水水井的费用高，有些放射性离子污染区无法接近，这些原因往往迫使研究者在离污染区较远的位置注射细菌到地下水含水层，期望细菌能扩散到污染区。如果所注射的细菌吸附在注射井周围，那它们的功能就大大受到限制。为了最大限度地扩散注射的细菌，研究者必须充分了解地下水中控制细菌移动的规律。如果感兴趣的读者可参考以下综述性的文章 (Harvey and Harms, 2002; Ginn et al., 2002, 2005).



插页图 3.11. U(VI)污染物生物转化过程示意图

3.6 生态水文地质

目前，生态水文地质学的研究刚刚起步，尚未形成自己特有的知识结构和理论体系，还属于生态水文学的研究范畴。生态水文学已成为当今热门的研究领域，其主要研究内容是：通过分析陆生环境与水生环境植物与水分关系，阐述和探讨不同环境中植物－水分的各种相互作用问题；在流域尺度上研究水文和生物相互功能关系；在生态模式和生态过程的基础上，探讨影响植被变化的水文学机制；在质量守恒和能量守恒的基础上，在周围环境不同的情况下，研究生态变化过程的机制；研究水文循环与生态系统之间的相互作用机理和过程。

国际期刊《生态工程》发表过一期叫做“生态水文学－利用生态系统特征来管理水资源可持续利用的科学背景”的专集 (Zalewski, 2000)。该专集内容包括：生境尺度的河流、水库生态水力学的研究 (Kemp et al, 2000; Dubnyak and Timchenko, 2000); 水文过程和水文格局的生态环境效应 (Biawas and Boruah, 2000; Dakova et al., 2000; Wagner and Zalewski, 2000); 模型与制图研究 (Timchenko et al., 2000; Witte and van der Meijden, 2000; van Ek et al., 2000; Spence and Hickley, 2000), 以及土地使用、地下水对生态环境的影响和治理 (Schuller et al., 2000; Holzbecher and Nützmann, 2000)。

Hunt and Wilcox (2003) 为美国《地下水》杂志撰写的社论中指出，社会上关心的问题不仅仅局限在水文学上。比如说，对泉、湖、河流、湿地抽水会有什么影响？面对这样的问题，水文学家通常收集大量的水文地质资料，建立一个模型，然后得出关于水位下降、流量减小的精确估计。但是，公众关心的是抽水会对与该系统相关的植物、鸟类、鱼类以及其他一些感兴趣的动物产生什么影响？为了让“生态水文学”不只是一个时髦名词，水文学家必需参与交叉学科的研究。不仅涉及到解释水文原理和概念，而且包括学习和了解生态原理和概念。这将意味着新的研究中，往往是用定性的语言和统计数据来描述，而不是传统水文学上的定量方程和确定性模型。

最近，Newman et al. (2006) 对缺水环境下的生态水文学研究进行了系统总结，提出了几方面挑战性问题，其中与地下水有关的有以下几个方面：

（1）土壤蒸发与植被蒸腾

在缺水环境下生物可利用的水量已被证明是许多植物和微生物作用过程的重要驱动力。生物可利用水量是由降雨的空间和时间分布及其总量决定的，同时也取决于冠层截留、地表入渗、蒸发和地表径流等过程的再分配。大多数水文学研究已经通过将冠层截留、土壤蒸发（E）和植物蒸腾（T）三个变量合为一个变量——蒸发蒸腾（ET）来估算水均衡。在缺水的生态系统中蒸发蒸腾量占水均衡总量的 95%，区分蒸发与蒸腾是理解生物需水量和定量描述水文循环生物反馈机制的关键。许多学者在不同研究方法、生态系统类型和时间尺度上作了探索性的工作。但是，该问题的解决过程中还需要考虑根的类型和生理学特征、土壤水分再分配过程，以及降雨的随机特征。

（2）土壤中水分与养分间的相互作用

土壤中的养分可降低植被对降雨和土壤水分的响应，而土壤水分则可促进微生物对氮的固定和土壤有机质的矿化作用。因此，更好的理解水分与养分之间的相互作用对改进生态系统结构与功能的变化、超营养作用和水质的变化等问题具有重要的意义。

在缺水环境中，水分与养分之间相互作用的重要性并不局限于根系层或土壤层。在世界范围内温暖的沙漠与灌木林地中硝酸盐的含量能达到 14%至 71%。这些地区土壤中硝酸盐积聚过程与机理，以及与饱和带中地下水的水位和水质的关系，将是今后的重要研究问题。

目前，温带和热带的生物群系通过大气沉积作用所获取的氮要比工业化前多的多，研究水分和养分的相互作用及如何影响生态系统过程已是一个紧迫的问题。这些研究将会提高我们对生态系统动态过程的认识水平，促进生态系统的管理、恢复和修复。

（3）植被与河川径流

理解植被对河川径流的影响是生态水文学的一个基本问题，已有大量的研究。植被在土壤水、地表径流和河川径流当中的作用可有三种尺度的研究方法，即基于点上或山坡等尺度上的现场观测（小尺度）、一定空间区域上沿着一条山坡剖面进行数学模拟（中尺度）和遥感监测（大尺度）。此问题研究的最终目的是通过控制植被覆盖，以调控河流流量和减少水土流失。

（4）植被与地下水的补给

土壤含水量随降雨的变化而不同，进而影响植被的生长，而植被生长状况又会影响降雨入渗、土壤含水量和地下水的补给。已有的研究已表明，在其他条件相同的情况下，植被的存在将减少地下水的补给量，与无植被情况比较，对地下水补给量的影响达到两个数量级。

借助遥感方法，通过分析植被生长状况，还可以预测地下水的流动以及地下水补给。在研究思路上，还可以通过用空间代替时间的方法预测植被变化导致的地下水补给量的变化。浅层土壤的类型反映了地下水补给对植被变化的响应，而垂向剖面中深部土壤类型要比植被变化更能反映地下水的补给形式。例如，美国西南部的氯化物剖面的上部反映了全新世的气候与植被特征，而深处的部分则反映了更新世的气候与植被特征。

（5）水文变化与植被

植被的分布、生长和衰亡对水文循环更加敏感，年降雨量越大，植物生长及生物累积量就越大。降雨的季节性对植被类型、生物多样性、对外来物种入侵的敏感性、和生产力等产生明显的影响。

近几十年来，在植物的蒸腾方面的研究取得了很大进展，如连续树液流动的测量、侧枝传导性的测量、基于叶片的气孔对蒸腾作用影响的监测以及木质部空洞形成临界值的量化 (图 3.12)。分子生物物理方法增强了我们预测植物根系深度和水分摄取的能力，可以更好地阐明植物是如何影响水分通过根系在土壤剖面中的运动规律。此外，通过稳定同位素在植物体内、土壤和降雨中的比较，还可以了解植物地摄取土壤水的时间和地点，以及外界环境条件又是如何影响植物的生长和水分利用效率。

模拟植物根系对水的摄取是一个极为关键性的问题。大多数根系吸水的模型主要基于以下条件：最小需求与土壤水分供给功能、利用欧姆派生定律来计算水分对植被阻抗的影响或者应用基于土壤水分可利用性的直接函数。这些模型为我们理解水分摄取是如何受到根系特征及行为特性、土壤质地以及水势的联合影响提供了有力的工具，而且还是将根系水分吸收与更大尺度（例如，整个流域尺度）的模型联系起来的关键。目前，根系水分吸收模型存在的主要困难是缺少模型参数化的必要数据和野外

数据的空间与时间敏感性研究。此外，考虑更多的作用过程和条件控制，以及根系吸水和排泄之间比例的空间变异性是下一步的研究方向。

借助于卫星和气体示踪技术开展植被对水分输入变化的响应以及植被对水流通量和储量的影响、大尺度气候波动和异常产生的植被分布和物种变化等问题的研究，可望对这些生态水文过程的认识产生突破。



图 3.12. 测量植物蒸腾率的通量塔

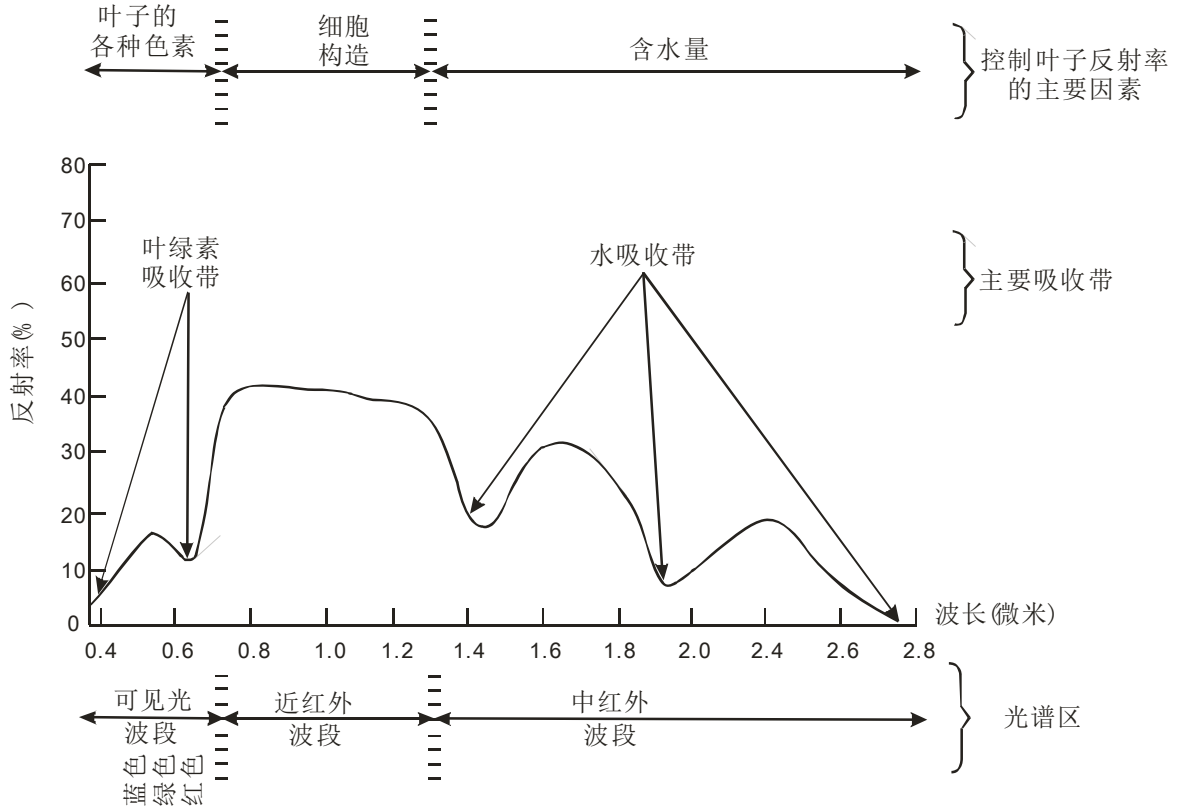
插页 3.3. 利用卫星数据定量评价地表植被状况的指标: NDVI

生态水文学的研究中大尺度范围内的植被生长状况的定量评价，一直是阻碍学科发展的主要问题。自人造地球资源卫星发射以后，该难题得到了较好的解决。卫星可以获得大范围内不同时间的地物光谱信息。植被对不同波长的光吸收（或反射）的强度不同（插页图 3.13），同时，不同的植被覆盖对光的吸收（或反射）的强度也不同，利用卫星遥感数据中的这种特征，就可定量描述地表植被的覆盖程度，进而评价植被的生长状况。

研究表明，植被信息主要隐含于遥感数据的红光波段及红外波段，利用这些波段的不同组合可以进行植被研究，这些波段间的不同组合方式统称为植被指数(Vegetation Index)。NDVI-归一化差异植被指数是最广泛使用的一种植被指数，常被用来进行区域和全球的植被状态研究。此概念首先由 Kriegler et al. (1969) 提出，Rouse et al. (1973) 作了详细描述。NDVI 消除了部分辐射误差，能反映出植物冠层的背景影响，且与植被覆盖度有关，对高植被区具有较低的灵敏度。计算公式为：

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

式中，NIR 为近红外波段反射率，R 为红光波段反射率。
通常情况下，-1≤NDVI≤1，负值表示地面覆盖为云、水、雪等，对可见光高反射；0 表示有岩石或裸土等，NIR 和 R 近似相等；正值，表示有植被覆盖，且随覆盖度增大而增大。



插页图 3.13. 控制叶子反射率的主要因素与光谱区的对应关系

目前，植被指数已被作为一种常规的遥感手段，广泛应用于土地利用覆盖探测、植被覆盖密度评价、作物识别和作物预报等领域的研究。植被指数还可用来诊断植被一系列生物物理参量：叶面积指数(LAI)、植被覆盖率、生物量、光合有效辐射吸收系数(APAR)等；反过来又可用来分析植被生长过程：净初级生产力(NPP)和蒸散（蒸腾）等等。卫星数据是复杂地面状况的混合反应，而且受大气时空变化影响，因此植被指数没有一个普遍公式，到目前为止不同学者已经发展了近 50 种不同用途的植被指数。下面介绍三种不同空间分辨率的覆盖全球大陆的植被指数，可以免费下载为全世界科学家共用。

(1) GIMMS-NDVI 数据
该数据是在 NOAA/AVHRR 数据基础上，经一系列校正处理，去除因视角、火山灰及其他无关因素对植被变化监测影响后制作的一个标准数据集。GIMMS 已被全世界

科技工作者用来进行生态演化、监测等方面的研究。数据空间分辨率为 8 km。数据可免费从美国马里兰大学网站（http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms/）下载。

(2) MODIS - NDVI 数据
美国 NASA 的地球观测系统(EOS)计划启动于上世纪 80 年代中后期，MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectrometer，中等分辨率成像光谱仪）是 EOS 计划中重要的传感器。该数据集是经美国 NASA MODIS 数据产品开发小组按照标准算法集开发的用于科学研究和农业、林业、水利、土地、环境等部门使用的标准数据产品。NDVI 采用 16 天最大化合成，空间分布率 250m，时间上从 2000 年 4 月份开始，直到最近。数据可免费从美国地质调查局网站（http://edcdaac.usgs.gov/）下载。

(3). SPOT - VEGETATION S10 数据
1986 年 2 月法国 SPOT-1 卫星发射以来，SPOT 卫星数据因其具有较高地面分辨率、可侧视观测生成立体像对以及可在短时间内重复获取同一地区数据等有别于其它卫星遥感数据的特点，而受到遥感用户青睐。Vegetation 计划由法国、比利时、瑞典、意大利等几个欧共体国家合作完成，植被探测器(VGT)是一个相对独立的系统，具备完全独立于星上其它传感器的数据记录、数据传输、故障诊断等系统。SPOT/Vegetation 数据包括 P 类和 S 类，以三种标准格式提供给用户。部分数据可免费从 Vito 网站（http://www.vgt.vito.be/）下载。

3.7 地下水管理优化模拟

优化问题是许多水文地质问题，如地下水资源管理、地下水质管理（包括修复系统设计）、监测网设计以及含水层参数估计等问题的核心。尽管在水文地质界，优化的涵义非常广泛，本书中它专指为一个需要综合考虑多方面、往往相互冲突的因素的技术问题找出最优解。这些因素在数学上用一个或多个目标函数和约束条件表示。最优化通常与含水层模拟相结合组成所谓的模拟－优化(S/O)方法。在过去的 20 年中，模拟－优化方法的理论发展和实地应用一直是热点研究领域并取得了丰硕的研究成果 (e.g., Gorelick, 1983; Freeze and Gorelick 1999; Mayer et al., 2002; Orr and Meystel, 2005)。本节讨论管理优化模拟的一些前沿研究内容。虽然含水层参数估计是非常基本的最优化问题，但由于它自身环境和考虑因素的特殊性，放在其它地方讨论。

3.7.1 高效强优化方法的发展

数学规划技术是最早也最广泛地用于地下水管理最优化的，包括 a) 线性规划 (LP)；b) 非线性规划 (NLP)；c) 混合整数线性规划(MILP)；d) 混合整数非线性规划 (MINLP)； e) 微分动态规划 (DDP)。LP 仅在含水层模拟模型和目标函数都为线性时才能使用。当两者都不能作为线性处理时，必须使用 NLP。当最优化问题中包含离散决策变量，例如井位置和固定资产成本时，必须使用 MILP 或 MINLP。对于包含多个管理时期的最优化问题，DDP 更有效。

线性规划在计算上效率最高，已用于大量应用性模拟－优化软件，例如 AQMAN (Lefkoff and Gorelick, 1987)，MODMAN (Greenwald, 1994, 1999)，MODOFC (Ahlfeld 和 Riefler, 1999)，以及 MODFLOW-2000 中的地下水管理模块 (GWM) (Ahlfeld et al., 2005)。以上所有软件仅包括水流相关的约束条件。线性规划的主要局限性是该方法严格来说只能用于承压含水层，并且通常来说不能处理溶质运移问题。非线性规划和动态规划有更广泛的适用性。然而，在这些方法中，根据决策变量（以及 DDP 中的状态变量）要对目标函数的导数（或梯度）进行评估；这也是这些方法被称作“梯度”法的原因。尽管考虑到计算效率时这些梯度方法非常有利，但它们也有着显著的限制条件。首先，如果目标函数高度复杂且为非线性，解空间内可能存在多个局部最优点，因此，梯度方法可能得到的是某个局部最优点，而不是全局最优解。其次，梯度计算正是导致不稳定性和不收敛等数值问题的主要来源。

最近，大量基于启发式搜索的最优化方法不断被用于地下水管理问题，包括模拟退火，遗传算法，禁忌搜索，人工神经网络和外逼近法。这些最优化技术被集中称作全局最优化方法，因为它们能给出全局或近全局最优解。由于能够不受目标函数的梯度支配，模仿某些自然系统（例如遗传算法模仿生物进化过程）而确定最优解，它们也被称为“无梯度”方法。即便如此，一个全局最优化方法也可包含一些基于梯度的搜索方法的元素。全局最优化方法的文献包括 Goldberg (1989)，Sen and Stoffa (1995)，以及 Glover and Laguna (1997)。

全局最优化方法需要很高的计算量，尽管如此，因为它们能确定全局最优值，能有效处理诸如井位置等离散变量，且易于与任何水流或运移模型连接，它们仍不断

被用于求解地下水管理问题。修复设计最优化中模拟退火的应用实例包括 Dougherty and Marryott (1991) 以及 Wang and Zheng (1998)。遗传算法的应用实例包括 McKinney and Lin (1994), 以及 Wang and Zheng (1997)。人工神经网络的应用实例包括 Rogers and Dowla (1994) 以及 Aly and Peralta (1999)。Karatzas and Pinder (1993) 以及 Zheng and Wang (1996) 分别第一次将外部逼近法和禁忌搜索用于地下水问题。

全局最优化方法对计算的要求可通过多种方法减轻，例如，Zheng and Wang (1999b) 提出了一套联合方法，在该方法中，一种全局最优化方法—禁忌搜索，用于寻找最优井位，同时线性规划用于寻找最优抽水量。实质上，一个很大的混合整数问题被分解成小的子问题，每个子问题有着较少的决策变量，因此能更快达到最优值。Aly and Peralta (1999) 将人工神经网络和遗传算法结合来减少所要求的前向模拟次数。该方法中，采用人工神经网络在完成一定数目的前向模拟后构建一个响应函数，以后用该响应函数代替模拟模型。Zheng and Wang (2002) 通过实例，示范了如何结合一个简单三阶响应函数与遗传算法来设计一个大区域的地下水污染修复系统。

Mayer et al. (2002) 讨论了关于地下水修复问题最优化的许多挑战并建议科研界进一步开发更有效的强优化方法，能够评估更广范围的一系列修复技术，可以容易地把地下介质的特性用随机方法来表达，以及允许多目标函数的建立。Orr and Meystel (2005) 提出了一个未来研究的新方向，即利用智能控制的新方法以减轻对严格性、强计算能力、随机偏微分方程的依赖，并将重点转到以目标为导向，灵活、适应性强、多解的决策支持系统 (MRDS)。该系统应拥有很强的非监督学习（导向预测而不是预报）和高效最优化能力，能够提供实地含水层管理问题的解。

3.7.2 不确定性的考虑

应用模拟－优化方法的前提条件是已存在一个经过校准的水流及/或运移模型。模拟模型固有的不确定性显然会影响最优解的确定。为解决这种不确定性以及相关问题，大量随机方法已被发展起来 (e.g., Wagner and Gorelick，1987, 1989；Wagner et al.，1992; Morgan et al., 1993; Minsker and Shoemaker, 1998)。一种方法是将这种不确定性转换成概率约束。例如，可以指定约束条件在95%的可靠性内满足。另一种方法是

将不确定含水层参数，例如渗透系数，用多个实现（realization）表示。然后可以指定约束条件满足所有实现，而不是确定性方法中某个特定实现。Wu et al. (2006) 应用一个噪声遗传算法的变量 (NGA)，它能够充分减少后述方法中要求的实现数目。管理模拟中处理不确定性的更多信息可参阅 Gorelick (1997)，Freeze and Gorelick (1999)，Mayer et al. (2002), 以及 Orr and Meystel (2005)。

3.7.3 盆地尺度可持续性管理

水文科学领域中一个关键性研究主题是分析并管理水资源利用的可持续性。可持续性的概念可定义为保证长期、稳定以及灵活的水供给来满足增长的市政、农业和工业需求，同时减小对环境的负面效应。Lawford et al. (2003) 提出：“从地区到全球尺度，水的使用和可持续性已成为非常紧迫的问题，以前水文科学从来没需要为水政策提供如此多的信息，以前我们也从来没有看到改进这种关系是多么的具有挑战性。” 一般来说，正是在河流盆地尺度内，水文、农业和经济关系才能够融入一个综合的模型框架里，因此，寻求更合理、更经济的利用水资源的政策手段更可能用于该尺度 (McKinney et al.，1999)。在不久的将来，改进的盆地尺度水政策模型将成为水管理研究非常重要的方向 (例如: Burness et al., 2004; Cai and Rosegrant, 2004; Siegfried and Kinzelbach, 2006)。对于许多河谷盆地来说，利用高效全面的分析工具才能得到合理的水分配决策，以便达到水资源可持续利用的策略。将来建模的方向将是整合经济、农业、工业和水文等因素，建立基于 GIS 的决策支持系统（McKinney et al.，1999）。

3.7.4 大尺度实地示范

虽然模拟－优化在理论进展上已取得了很大进展，将 S/O 方法应用于大尺度实地问题还存在很多限制。导致实地应用很少的原因有以下几个。首先，S/O 方法的使用需要很强的计算能力，难以处理许多复杂的三维实地问题。其次，目前从业者在实地工程中可用的常规通用 S/O 软件还很少。最后，因为文献中大部分研究采用的是简单的假想问题，与传统的试错法相比 S/O 方法的优越性还没有被充分证明。

模拟－优化建模研究中非常重要的一个工作，是证明了模拟－优化方法在实地

条件下的适用性和有效性。 例如，Zheng and Wang (2002) 介绍了一个位于麻萨诸塞州 Cape Cod 镇的 Massachusetts Military Reservation (MMR) 军事基地的最优化示范项目的结果。该项目包括一个抽水－处理－回灌系统的设计，该系统用于围堵并清除一个潜水非承压砂岩含水层中的大规模三氯乙烯(TCE)污染羽。在进行仅基于模拟的传统的试错法分析的同时，进行模拟－优化分析。研究显示，该系统不仅可能在试错法设计的抽水量下去除更多的 TCE 质量，并且通过减少抽水井数目并采用动态抽水可大量节省费用。另外一个最近的实地示范项目由 Becker et al. (2006) 报道，其目的是评价相对于传统的试错法与建模方法相比，污染运移模拟－优化方法具体有哪些效益和效用。该项目共选择三个实际地下水污染抽水处理设施。每个设施设定三个最优化函数，并由三个建模组独立求解(两个使用模拟－优化方法，一个采用试错法)。结果清晰显示出，模拟－优化方法能搜索更广范围内井的位置和抽水量并确定出比当前试错法更好的解。寻找到的解要优于利用试错法获得解的 5% 到 50%（利用最优目标函数值来衡量），平均提高约 20%。为了降低计算量要求，在某些情况下，模拟－优化计算可以应用多种数学方法求解一系列改进的子问题，并/或使用“元模型（meta-model）”，例如神经网络或回归模型，来替代最优化算法中的非常费时的数值模拟模型。

3.8 非饱和带水流与溶质运移

非饱和带又称为包气带，指地下水位以上、土壤水分含量小于饱和含水量的土层，是固体介质、水、气三者并存的一个复杂系统。由于非饱和带上同大气相接触，接受大气降水补给，维系植被生长；下与地下水系统相通，土壤水的运动成为全球水循环中的关键一环，非饱和带中的水流与溶质运移过程直接影响到地下水的水流与溶质运移过程。另外，人类活动（如农业耕作、工程建设、城市化等）的直接影响大部分发生在非饱和带，然后通过非饱和带间接影响地下水系统。同时地下水系统对地表水和生态系统的影响又是通过非饱和带来产生的，因而，研究非饱和带成为研究地下水系统不可或缺的领域。

3.8.1 非饱和带水文学研究中的尺度问题

研究非饱和带的水流与溶质运移过程中一个挑战性问题就是尺度问题。关于非饱和带物理过程的实验研究大都局限于一定的取样范围或测定规模，而人们往往利用这些结果来描述或预测其它尺度（更宏观或更微观）下的非饱和带的物理状态或过程。由于非饱和带的物理参数和状态变量都存在着时间和空间变异性，这些研究结果的科学价值已经受到质疑。利用随机理论和统计学（经典统计学和地学统计学）理论研究非饱和带水文学的参数和变量的时空变化规律（Warrick et al., 1986；Zhang et al., 1990），将确定性模型与随机模型结合起来，科学地实现不同研究尺度（点—面—区域）结果的相互转换，是非饱和带水文学研究中需要解决的关键问题之一。由于土壤中的水文过程的高度非线性特性以及它们之间的相互作用，典型的观测资料在很大的空间和时间尺度范围内呈现高度的变异性。目前水文学（包括非饱和带水文学）所面临的主要挑战，就是要揭示出超越实验室尺度外的空间和时间上的变化规律，建立起严密的、经得住检验的水文现象的数学理论（图 3.14）。近年来，统计数学、随机过程、非线性方程、数值方法的发展 (e.g., He and Ren, 2006) 和计算机速度、容量的增长以及遥感技术的发展，为在更大的空间和时间尺度上发展水文理论提供了机遇。寻求水文过程变异性中的多尺度的不变性，就是探索水文现象中隐藏的秩序和规律，以发展新的预测模型和新的测量方法。

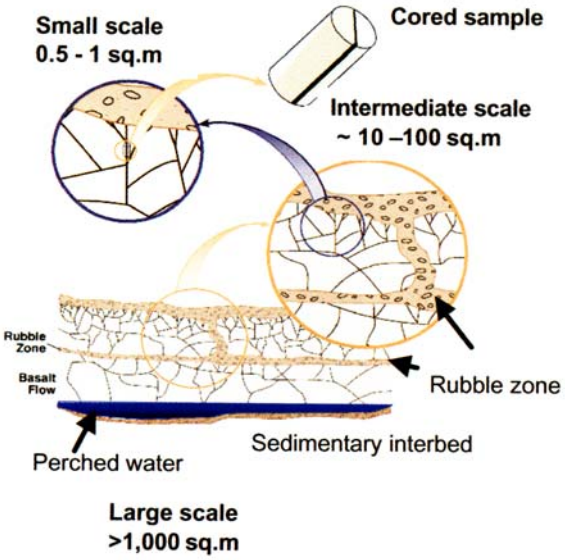


图 3.14. 非饱和带中的尺度问题（Faybishenko et al., 2000）

我们现在对于非饱和带渗流过程的认识是依赖于实验室和小田块的实验结果，这类实验排除了许多与自然的和大尺度环境相关的因素，当今的科学挑战就是将这些小尺度上获得的知识扩展到大尺度上去，如：具有不同气候条件、不同的灌溉和雨养农业区以及森林区、不同城市化程度的流域。由于土壤的时空变异性，将点上的测量值和模型转化到田间和区域上是极端困难的。土壤是发育于地球陆地表面具有生物活性和孔隙结构的介质。这一维持生命的物质通过受生物、气候、地质和地形条件影响的风化过程而产生并继续演化，因此，它在地球表面随着时间和空间不断发生变化。仅在中国就有上万种土壤序列。土壤所具有的一种独特的物理性质——非饱和水力传导度，是非饱和带水文学中极其重要的水力学参数，它是土壤的空间变异性和不均匀性的典型特征参量。水力传导度是描述土壤水流运动最重要的参数，但水力传导度依赖于土壤含水量，事实上，当土壤从干土变为饱和状态时，水力传导度值可变化一千万倍。这一独特的性质对于土壤吸收、保持和传输水的能力是有好处的。然而，它显著地增强了土壤的不均匀性，在野外，只相距几米，所测量到的相同含水量下的水力传导度值可相差几个数量级。现在的研究兴趣集中在：怎样描述非饱和水力传导度和相关土壤参数的随机分布函数及其在各个尺度上的空间相关关系；如何改进方法来收集足够的数据，以获得每一土壤系列或土壤地图单位中的空间变异性。找到能定义从局部到全球尺度的土壤水特性的时空变异性的均值和方差的概念性模型是十分必要的(Pachepsky et al., 2003)。

许多水流与溶质运移过程需要在微观尺度，即土壤或岩石中单一孔隙的尺度下来研究。溶于水中的化学物质的运移是一个复杂的动态过程，进入土壤中的溶质可以同其它物质和土壤颗粒相互作用，并参与土壤中微生物的生命循环，这些生物地球化学过程和流体的运动形式和速率之间存在某种反馈关系。对微观尺度的进一步认识对于建立应用于中等尺度的预测模型是十分必要的，在中等尺度下，我们就可以解决大多数非饱和带水文学和地下水文学问题。当γ 和 X-射线、核磁共振和其它能源的层面照相技术应用于土壤测量后，就有可能测量单一孔隙中的含水量和水势，这些测量将有助于在微观上检验颗粒表面水膜运动的物理特性，希望能揭示化合物的浓度和分布对宏观测量的水力传导度值的影响机理，进而能更精确地预测非饱和带水流与溶质运移

的宏观过程。以某种统一的方法来定量分析不同尺度上生物、化学和物理过程的各种耦合及时间依赖关系是一个新的挑战。

3.8.2 非饱和带中水流和溶质迁移转化过程机理

对涉及到多相流特别重要的化学反应动力学过程，我们还缺乏充分的理解。对于这些动力学过程，需要进行原位实验研究以便能考虑到土壤特性的影响。在非均质动力学情况下，运移分析一般是根据拟均质方法或化学反应器中采用的方法，拟均质方法假定反应发生在溶液之中而不是在固体－液体界面。不论是在非饱和带还是在饱和带，人们对只微溶于水的合成有机液体的表面性状还知之甚少，描述有机液体运移的现有理论仍然是采用石油文献中多相流的概念，还需进一步检验这些方法的有效性。在微观尺度上，需要认识到孔隙的几何形状、有机液体和压力－吸力特性之间的相互作用的性质，并能用数学方法对其进行描述。在中等尺度上，特别是对于比水重的有机溶液，需要定义地质层和污染物扩散形态之间的相互关系。现存的预测有机溶液在土壤分布的多相流运移模型需要估计许多参数和关系，因而需要建立有效的实验方法来获得这些输入信息。

土壤水对大埋深的浅层地下水（潜水）的补给机理，还有待进一步研究。在中国华北平原由于大规模超采地下水，导致很多地区浅层地下水的水位埋藏深度大于 20 米，而这些地区非饱和带下部（2 米以下到潜水面）的土壤物理特性资料很少。如何在已经形成大面积浅层地下水降落漏斗的地区，开展降雨和灌溉对大埋深的浅层地下水（潜水）的补给机理的研究？这对于定量探讨人类活动对水循环演变的作用机制意义重大，也是非常重要的科学问题。

在有冻土存在的情况下，在地表水、非饱和带土壤水和饱和带地下水之间的相互作用方面提出了许多研究课题，可能最关键和最具挑战的科学问题是有关水在土壤中向冻胀带的运移以及水与冰体之间分离的微观物理过程。相关的问题涉及到溶质运移和土壤水压力影响的物理和化学过程。必须在理论、实验室、野外试验和数值模拟等所有方面对这些基本过程进行研究；必须特别注意空间变异性和尺度问题。主要是由于寒冷地区的工作条件困难，目前在这些地方的基本水文资料还很少。在这些地区，

应当进行以下资料收集工作：不同土壤的传导度与温度；孔隙中冰的含量和其它条件的关系；在不同土壤中、不同冻胀条件和不同化学物质下溶质浓度和运动的变化规律；在液态水、冰镜体和土壤中，在发生冻胀之前、之中和之后的压力变化；流经土壤和积雪的液体的流速和流量；同其它交叉科学结合（比如与生物圈观察结合）的基础研究，以确定水圈的不同相中的能量和质量关系；应用遥感资料，以便能将田间测量的水文变量提升到区域尺度上去。

非饱和带水文学已经在一定程度上实现了对土壤通透性和扩散性能的观测和定量描述，不少模型已经具有一定的预测土壤中能量和物质传输的功能，但我们对现实土壤中各种运移和转化规律的认识还远远不够。例如：土壤中水热耦合运移中水汽的地位和作用仍存在争议，土壤水力传导度的观测值并不能真正告诉我们土壤中死孔隙的数量和分布、孔隙弯曲度、以及土壤溶液在某些孔隙中的滞留时间。在微观尺度（孔隙）上研究土壤中的物质的运移和转化过程已经受到了国际上的广泛关注，应当是今后一段时期研究的热点问题。另外，化学物质（化肥、农药、重金属和其它无机及有机污染物）在农田非饱和带中的运移规律及模拟仍有待进一步发展，应当将物理过程与这些物质运移中发生的生物和化学过程（根系吸收、土壤表面挥发、降解、硝化与反硝化、溶解与沉淀、CO_2 的固定与释放、微生物的作用等）结合起来，开展综合研究。

3.8.3 非饱和带水文学研究中的数学建模

计算机技术的日新月异，使得土壤物理状态和过程的模拟研究在近年来得到了较大发展，其中有的研究是将土壤视为“黑箱”，通过一些经验关系或传递函数来描述土壤中的各种物理过程（Jury, 1982; Zhang, 2000; Ren et al., 2003）。尽管所建立的模型在特定环境下具有一定的预测功能，但真正能够用来预测土壤系统对复杂环境条件响应的却很少。这是因为：（1）土壤中的物理、化学和生物过程往往是非线性的，存在着复杂的耦合作用以及这些过程特别是生物过程对土壤环境的反馈作用，而我们对现实土壤中这些非线性关系及相互耦合作用还缺乏深入了解；（2）难以准确地获得建模所需要的、适宜尺度下的各种土壤物理参数。应当尽可能地把土壤物理模型建立在物

理学理论的基础上，不仅要强调非饱和带水文学与土壤学等其它学科的合作，而且需要吸收利用力学、化学、生物学、地质学、水利学等学科在多孔介质研究中的理论和成果。非饱和带水文学模型不仅要能够验证实验结果，更要成为认识和预测土壤状态和过程的手段 (van Genuchten and Sudicky, 1999)。

3.8.4 土壤物理性状和过程的观测与定量化

土壤结构及其稳定性和非均质性在很大程度上影响着土壤中所有的物理、化学和生物过程。土壤结构的形成过程、稳定机制及其与植物、微生物、土地管理（如土壤耕作和森林砍伐）的相互作用是非饱和带水文学探讨甚多但仍然面临巨大挑战的课题。尽管对土壤大孔隙（裂隙、生物孔隙等）的研究引起了国内外的广泛关注，但农田尺度上大孔隙与土壤物理性状和过程以及相关土壤行为的相互作用机理远没有搞清楚，这也是非饱和带水文学进一步发展、研究成果应用于生产的限制因子。

近年来，随着电子技术的发展，对土壤物理性状和过程的测定出现了两个明显的发展趋势—非接触性观测（土壤孔隙、结构、优先流等）和多参数的同步定位测定。例如，CT 技术已经成功应用于土壤结构、孔隙的观测，便携式 CT 开始应用于田间土壤、水分和植物的观测研究。TDR 和热脉冲–TDR 等多功能探头实现了土壤含水量、电导率、温度、导热率、热容量的连续定位测定，并可间接获得土壤容重、孔隙度等特性，为深入研究土壤中水、热和溶质的耦合运移机理提供了条件 (Kluitenberg, 2002)。探地雷达技术可提供地表以下几十米地层的高分辨率结构图，人们正在研究，怎样从雷达分布图来确定土层结构中的水力传导度，它是决定土壤水的流速和流量的关键的物理特性参数。应用探地雷达技术，也可能确定土壤中污染物的分布。科学有效地利用这些先进的监测技术，有利于对土壤性状和物理过程的定量化描述，是非饱和带水文学研究的重要方向。

3.8.5 非饱和带中物理、化学过程与生物过程的耦合

必须强调地球化学和微生物过程对污染物运移和归宿的重要性。未来的研究工作应集中在：将地球化学和微生物过程结合到非饱和带水分运动和溶质运移模型中去，

考虑水文过程的时空变异性对模拟的影响，需将模型的尺度从实验室尺度提升到田间尺度。非饱和带水文学未来的优先研究工作可概括为以下三个方面：1）需要跨学科的研究方法，包括理论和实践的结合，多学科的交叉，如土壤科学、水文学、地质学、工程、数学、社会科学、政策和管理等。污染物运移和归宿是由物理、化学和生物过程所控制的，但传统上却是由分割的学科而不是用学科集成的方法来进行研究的。2）必须将理论、测量和技术运用到不同的尺度范围中去，建立起空间尺度过程。对于大部分理论和实用研究，应尽可能早地从实验室条件转入实际的野外条件，特别要推荐详尽的、用集成方法进行的中等尺度（数量级为米）的野外实验（最好在已存在污染的地方进行的实验）。3）建立起一个提高表征和监测能力的标准“工具箱”，特别需要能提高数据质量和能更好解决非饱和带中污染物运移和归宿的不确定性问题的仪器和数学手段，需要将非饱和带中污染物运移的物理、化学和生物过程耦合起来的数值模型。并且，随不同的目的和不同的空间尺度，可能需要不同的表征和资料收集技术（Looney and Falta, 2000）。

微生物学和水文地质学的结合是 21 世纪整个地球科学应重视的方向之一。如微生物及其酶能使大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的之间，以水为载体的碳循环增加一个数量级。在没有阳光的条件下，微生物的化学自养作用，可导致另一类生物地球化学循环。微生物在降解非饱和带和地下水中的污染物质以及改变含水介质孔隙性方面都起着重要的作用。在非饱和带中，繁殖着大量的微生物，在地表以下 250 m 的土壤中还发现成千上万的细菌种类。这些微生物作用于复杂的有机物，并将它们转化为简单的有机化合物，最终变为矿物形式。在碳循环和调节磷、氮和硫的可利用性的过程中，细菌和真菌的作用特别重要，它们的作用导致二氧化碳和腐殖质的产生，而腐殖质则影响到土壤的渗透性和持水能力。土壤微生物学和有机污染物的生物转化在科学和工程上带来新的挑战，对土壤中运移过程的微生物影响的量化以及这些过程对微生物生态系统的反馈机制的研究还处于初始阶段。在运移过程的综合分析中，除了考虑物理和化学过程，还需考虑微生物过程以及定量微生物的影响的研究都处于初期发展阶段。涉及到酶动力学的数学表达还需要进一步的研究。现在使用的假定有充分营养存在的生物反应器理论还是非常不完善的，这是因为在实际的微生物生态系统中，有限的矿物营养和产生能量的化合物可能严重限制生物过程的发展。在非饱和带水文环

境中的土著的微生物群落可以大大地影响到合成有机化合物运移和转化的速率。微生物群落的性质、在复杂的水文和地球化学系统中微生物的繁殖机制以及它们怎样将有机化合物转化为其它分子形式正形成活跃的研究领域，必须在微观尺度和田间尺度下对这一系统有详尽的认识。需要进行的研究包括：1）在实验室进行多维流的控制性实验，2）建立参数测量的方法，3）提高模拟的能力（Lovley, 2003）。

在美国，一些研究非饱和带和地下水的主要项目由多个机构，如基金委、环保局、农业部和能源部等联合资助，因此，项目资助额度大，有利于跨学科、跨学校在大尺度上进行联合研究。中国应当借鉴这类经验。

3.9 随机水文地质学

在过去 30 年中，水文地质学的一个重要进展是随机方法（包括地质统计学方法）在非均质含水层中渗流和溶质运移模拟中的应用。自上世纪 70 年代至今，水文地质文献中呈现大量应用随机方法的文章。应用随机方法所取得的研究成果加深和改变了我们对非均质介质中流体流动和溶质运移的认识。随机方法在水文地质学中的应用愈来愈广泛和深入。全球范围内许多学校都开设了随机水文地质学方面的课程。伴随 1989 年以来出版的专著 （Dagan, 1989; Gelhar, 1993; Dagan and Neuman, 1997; Cushman, 1997; Kitanidis 1997; Zhang, 2002; Rubin, 2003)， 随机水文地质学已经发展成为水文地质学的一门分支。

3.9.1 水文地质参数的空间变异及尺度效应

地质介质的非均质性是与生固有的。这种非均质性存在于不同尺度上。由于受非均质的影响，污染物在含水层中的形状极其不规则 (Mackay et al., 1986; Killey and Moltyaner, 1988; Garabedian et al., 1991; Boggs et al., 1992)。这种不规则性主要是由渗透系数的空间变化造成的。而渗透系数的空间变化则很难完全、准确地测定和描述。尽管早在六十年代，欧美学者 (Matheron 1967; Gelhar, 1974）就已在水文地质学的研究中应用随机方法，建立了一些随机水文地质的理论，但一般认为，弗里泽 （Alan Freeze）于 1975 年发表在“水资源研究”上的论文标志着随机水文地质学研究的开

始。这部分是因为弗里泽当年在国际水文地质界的声望和影响。在北美，弗里泽（Freeze, 1975）首先研究了水文地质参数的不确定性对地下水模拟结果不确定性的影响，指出渗透参数的误差会带来相当大的水头计算误差。他的研究结果在水文地质学术界产生了相当大的影响，吸引了一批研究人员开始用随机方法对非均质介质中的水流和溶质运移问题进行更深入的研究。

由于含水层的非均质性，流体运动和溶质运移参数往往随空间变化。通常我们仅能搜集到有限的水文地质参数值。而每个参数值所代表的范围未必一样。为了得到水文地质参数的空间变化，我们往往需要做大量的不同尺度的水文地质实验。这在实际中则很难实现。因此，根据地质统计学的方法，利用已知值估计未采样处的水文地质参数及其空间变异性，是水文地质学的一个重要研究课题。这方面的前沿问题包括非平稳介质的地质统计分析、考虑沉积环境或沉积相的地质统计分析等 (Ritzi et al., 2004; Neuman, 2006)。

传统随机方法通常将渗透系数及渗流速度视为随机变量。因而受渗流速度影响的因变量水头和溶质浓度亦具随机性。由于渗透系数的资料有限，通常很难求得水头或随机浓度的概率密度函数。因此，我们仅能估计水头或者溶质浓度的总体均值。 为了求得水头或者溶质浓度的总体均值，我们必须拥有随机场或随机过程的多个载体，即多个含水层或污染体。而在实际工作中，我们只有一个载体，即一个含水层或污染体。因此，不可能得到总体均值。为了应用随机理论，我们必须作各态历经假设，即假设含水层的空间平均可代替总体平均。遗憾的是，这不得不采用的各态历经假设是无法证明的。我们只能研究在什么条件下可以使用各态历经假设以及在非各态历经条件下的地下水流动和溶质运移规律。

当前水文地质随机理论的研究成果不过是用物理和数学方法近似求取野外尺度变异性的初步尝试。这些成果既未被野外试验检验，也未被严格的概率理论证明。随机模型的校正和预测需要更多的实验观测数据。但是实际研究中这些数据很难收集。野外试验中一个显而易见却很难实现的要求是质量守恒，即采样过程和数据解译方法应该保证计算得到的总质量与野外试验所投入的总质量一致。野外溶质运移试验中另一个很难达到的要求是对初始条件的详细描述。而我们必须精确地知道初始时刻溶质的分布才能使用随机模型模拟污染体的运移。虽然野外试验费用高，耗时长，但其科学

价值很大。我们需要研究合适的试验和理论方法，为地下水的模型结构识别和参数估计服务。通常模型参数和边界条件带有很大的不确定性。如果考虑测量误差，问题则更加复杂。今后需要进一步开展模型结构的识别和验证、模型结构的尺度确定、参数估计、地质模型等方面的研究。这些研究成果将使得我们能够更精确地了解和评价含水层系统。

早期的随机理论假设水文地质参数是空间相关的平稳场或不相关的平稳场。如果空间相关性存在，则认为相关长度是有限的。平稳随机过程的理论在有关专著里有详细的总结 (Dagan, 1989; Gelhar, 1993; Dagan and Neuman, 1997; Zhang, 2002; Rubin, 2003)。根据平稳随机过程的理论，随着试验尺度的增大，时间的增长，弥散度将趋于常量。但是，80 年代收集到的数据显示，野外尺度的弥散度往往在几个数量级范围内变化并不趋于常量。这不符合渗透系数的统计稳定性的假设。越来越多的资料表明，渗透系数是非平稳的。为了解决非平稳性，1990 年以来有学者提出了平稳增长的非平稳随机过程或随机分形理论(Neuman, 1990; Cushman, 1990; Molz and Boman, 1995; Molz et al., 2004)。Cushman（1990）的书收集了地下水水文学领域关于随机分形理论最早的试验和理论成果。

裂隙在地下水流动和溶质运移中的作用越来越引起关注。裂隙表面的粗糙度具有随机特征。Brown and Scholz (1985) 提出了自然介质表面粗糙度的随机分形模型。20 世纪 80 年代末和 90 年代，有关岩石裂隙表面的观测资料证实了随机分形模型的正确性。之后有人尝试将单一裂隙尺度上的地下水流动和溶质运移特征与其表面的分形特征结合起来。尽管分形几何理论在裂隙网络上的最初应用集中在估计分形维数，后来分形裂隙网络模型被改进后用于融合分形网络的特征——随尺度变化的裂隙密度分布函数和裂隙长度幂函数分布函数。这些模型已经开始用于解释裂隙岩层中随尺度变化的地下水流动和溶质运移问题。

多尺度非均质条件下的溶质运移问题还需进一步研究。多尺度非均质性常见于由持续多个时间尺度的沉积过程而形成的地层中。沉积过程时间上的多尺度性会产生其空间上的多尺度性。 研究多尺度性，要进行物理实验和数值模拟。数值模拟表明，渐近行为在多尺度介质中很难达到。在这种情况下，各个尺度的变异性相互作用，引起溶质体在不同阶段的弥散不同。比如，在早期，溶质体只发生小尺度的变异。在扩

散过程中，大尺度的渗透系数变异性越来越重要。因此，随着溶质体的各个部分流入高渗透通道或者经过低渗透区，溶质体变得越来越不规则。由于大多数地质介质的非均质都存在多尺度性，因此需要发展考虑尺度作用的溶质运移理论。

3.9.2 水文地质参数的时间变异及尺度效应

在过去 30 年中，含水层非均质性和水文地质参数的空间变异一直是随机水文地质学的主要研究对象。虽然大家都知道，水文地质参数除了存在空间变异性，还存在时间变异性。但迄今为止，关于时间变异性的研究还很少。尽管早在 1972 年，作为随机方法在地下水水文学上的最早应用，Gelhar (1974) 就研究了地下水流动和污染物运移的时间变异问题。然而在 Gelhar 及其学生的早期研究之后，水文地质参数的时间变异问题却在很长时间内未引起重视。例如地下水系统中的一个重要过程或参数是地下水补给量。众所周知，地下水补给量随时间和空间变化。其变化受许多因素的影响，如降水持续时间和强度、地形、植被种类和覆盖度、蒸散作用、土壤含水量以及渗透系数等。由于这些影响因素本身就很难精确估计或测量，因此，正确估计地下水补给率的难度就更大了。美国国家研究委员会 2004 年的报告（NRC, 2004）指出：“目前我们对地下水补给与排泄的时间和空间变异的定量能力还很差。鉴于地下水在水文循环中的重要性、地下水对河流基流和湖泊补给的贡献以及社会对地下水供水的依赖性，这一方面的研究亟待加强”。由于缺少地下水补给量的实际观测资料，目前对地下水补给过程，尤其是时空变异问题的认识还极其有限。对地下水补给量的量化及其时间空间变异性方面的研究是当前地下水科学的一个重要前沿领域。

虽然地下水补给量和河流的基流量很难测量，但是观测孔水位和河流径流量的测量却容易得多。目前已经收集到大量不同时间尺度，从若干年到数十年的地下水位观测值。从 USGS 网站 http://waterdata.usgs.gov/nwis/gw 可直接下载到多达 85 万的水位观测数据。通过研究观测井中的水位变化可以获知关于地下水补给和排泄的重要信息。地下水系统中的水位波动是该系统对补给和排泄的动态响应，包含大量有关地下水补给和排泄的信息。Zhang and Schilling (2004) 用谱分析方法对位于美国依阿华州的 7 口井长达 4 年的每小时水头观测数据进行了研究，发现当地下水补给过程为白噪声

或分形时，含水层中的水位皆可能做出分形的响应。当我们观测到水位呈分形变化时，补给过程是白噪声还是分形则取决于含水层的物理参数，即导水系数和给水度。Zhang and Li（2005）用非平稳谱分析和数值模拟进一步证实了前者和 Zhang and Schilling (2004) 的结论。他们使用接受白噪声补给的线性含水层模型证明水位波动确实存在尺度效应：在大多数含水层中水位以布朗运动形式波动。最近, Zhang and Li (2006) 通过理论分析和数值模拟进一步研究发现地下水补给量的时间相关性削弱地下水位和基流量的时间变化强度。而地下水日补给量的时间相关性则非常之弱。

3.10 地下水定量计算与模拟

在本节我们将讨论前面还没有提到过的与地下水定量计算和模拟有关的一些前沿问题。

3.10.1 地下水在多孔介质中的流动、运移和反应的孔隙尺度研究

研究流体在多孔介质中的流动、运移和反应对很多科学问题都具有重大的意义，如环境污染物的运移、油藏模拟、采矿、地质碳回收、化学风化、交代矿化、混凝土侵蚀和生物修复等方面。这此问题涉及到流体的流动、伴随来自或者通往固液界面的反应物、生成物扩散的非均质化学反应及在固-液界面发生反应。由于化学反应改变了孔隙的形状，这又进一步使问题复杂化，因为化学反应在很大程度上连续地改变介质的水文性质。如增加石油产量常用的技术是向油层注酸（如盐酸和氢氟酸）来溶解地层中的自生矿物，因为这些矿物的存在降低了孔隙介质的渗透率。当酸注入后，就会产生高渗透通道或是孔洞。在图 3.15 中，在一次试验中，当注入卤水-CO2 后，在灰岩中形成了孔洞(Wellman et al., 2003)。孔洞的形成主要依赖流体的速度，流体的流速则受孔隙尺度的非均质性和反应动力学过程的影响。快速的反应动力学过程会使平衡长度与孔隙的尺度在同一数量级上。因此定量描述这类系统的时间演化，就必须弄清孔隙尺度下对流-弥散-反应的过程。孔隙尺度通常是微米级，在这种尺度下，流

体的运动可以用 Navier-Stokes 方程来描述，分子扩散可以用 Fick 定律和混合作用来解释。

但是在实践中，如地下污染物的运移、三次采油中感兴趣的尺度为 10^3-10^5 米。在实际应用中，因为需要大量的节点才能作到求解微观的控制方程，所以是不可能的。野外尺度上的流动、运移和反应模型通常是用宏观连续介质模型来描述的（如平均化的典型体元体），涉及到的变量包括（压力、温度、饱和度、速度和浓度等）(Lichtner et al., 1996)。宏观控制方程中的系数一般是在实验室尺度下测量得到 (1cm-1m) 或是根据经验估计得出。这些宏观关系，如渗透率和孔隙度的关系，不仅是由岩石的形状决定的，还与流体的流动、反应和它们的相互作用有很大的关系。最近，为了更好地掌握反应对固相物质的改变情况，和通过孔隙和裂隙的水流和溶质变化的多尺度过程，开展了一系列的理论和模拟研究。如利用孔隙晶格 Boltzmann 模型来研究微观尺度下的耦合反应(Zhang et al., 2000; Kang et al., 2002a,b,c, 2003)。为了更好的描述有突变的反应锋面，需要连续介质和微观介质的综合模型。根据孔隙大小，快速反应可以产生孔隙尺度的浓度梯度和可能不稳定的反应，从而产生孔洞和其它结构。为了弄清孔隙尺度构造的影响和宏观系数的机理，以及孔隙尺度下的动态影响、对流的非线性作用、弥散和反应机理，需要开展系统研究，包括采用结合了实验结果的计算方法，根据孔隙结构的统计结果，通过增大尺度，来预测宏观物理和化学系数。



图 3.15. 经过 CO_2 和卤水注射的灰岩，可以看到出现的溶孔 (Wellman et al., 2003)

3.10.2 运移和地球化学反应的耦合模拟

当前，面对地下水科学与工程的问题需要多种学科的知识，如地质学、水力学、地球化学、地球物理学和生物学等。由于学科越分越细，每种学科都变得越来越复杂和定量化，因此将各种学科的知识综合到一起变得越来越困难。现在水流和运移模拟成为解决这类问题的有效手段，水流和运移模型成为综合各类野外数据的工具，通过它可以理解不同的物理、化学和生物过程的关系。随着计算机软件和硬件发展，模拟可以解决的过程的数量、种类和复杂度等方面都有了重大的提高。为了开发可以全面耦合运移和生物反应过程的软件，近来许多研究者在开发计算机软件上作了大量的工作。Yeh and Tripathi (1989), Lichtner et al. (1996), Zheng and Bennett (2002), 以及 Barry et al. (2002) 等对这些模型做了综述。

在水文地质界和地球化学界，运移模拟和多组分生物和地球化学反应的耦合仍是活跃领域之一。尽管有很多耦合模型，只有少数在实际工作中取得应用（Prommer et al., 2003)。Barry et al. (2002) 认为理想的模拟软件应具有以下特点：

- 水流模拟软件应能处理非均质性、非水相液体（NAPL）的演化、质量守恒；可以处理不规则形状和局部速度场守恒；
- 运移模拟软件应能处理突变锋面，不产生数值弥散和振荡，保证局部和整体质量守恒和处理不规则的区域；
- 使用有效和准确的时间积分方法，多相质量运移和反应软件应能模拟多种组分和反应过程；
- 理想条件下，通过自适应剖分和/或近似方法的误差控制，可对所有组分进行时空的误差估计和控制。通过算子分裂算法控制总误差及所有模拟都应支持并行算法。

3.10.3 模拟非线性水文地质过程

水文地质过程受物理、化学和生物过程控制。这些过程可以用一系列的控制方程来描述，这些方程通常都是非线性的。非线性方程很难进行解析求解，通常数值法是最好的方法。除了方程本身外，水文地质条件的复杂性，进一步增加了问题的复杂性。如孔隙介质中热对流和运移的影响是就一个典型的非线性的例子。美国内华达核废料处置场地就面临这样的问题，放射性废料放热是废料贮藏室设计时必须考虑的。放射性核素的溶解和核废料的溶解速度也强烈受到水热的影响。大范围内，核废料产生的热可能改变围岩的矿物成分，从而改变核废料贮藏室下面沸石层的性质，沸石层是主要的核粒子运移的天然屏障。热也可能影响到核粒子运移到潜水面，从而使贮藏室失效 (e.g., Viswanathan et al. 1998)。最后，土壤中近地表的温度成为研究重点，因为它可能会影响到地表上的生态系统。因此，要进行巷道尺度和场地尺度的模拟来评价影响的大小。

如果高辐射的核废料贮藏在地下，由于衰变产生的热是随时间变化的热源，可能会影响到流体的性质、水文性质和贮藏室周围热运移的机理。为了正确了解这些影响，必须求解质量和能量的两相平衡方程。如果热量大，在靠近贮藏室的地方，在沸点温度下会产生气液两相。会产生一个由流体对流、热传导和气相潜热运移控制的复杂的、非线性的热量－质量相互作用的过程。人们开始研究水岩作用及对热和质量运移的影响，是因为它们会很大程度上影响整个系统，但在此不展开讨论。推导化学反应运移的方程可以详见 Lichtner et al. (1996)。在今后的很长时间内，非线性的动态水文地质系统模拟是研究的重点。

3.10.4 地下水模拟的反问题

要建造一个有用的水文地质数学模型，我们必须解决好预测与识别这两个互逆的问题。前者(通常称为正问题)根据已知的水文地质条件和参数来预测含水层的状态(水头，浓度和温度等)，后者(通常称为反问题)则根据含水层状态的观测来识别未知的水文地质条件和参数。因为含水层地质结构的复杂性和在各种尺度上的可变性，与其

它领域相比，解地下水模拟的反问题非常困难。目前，这一问题已成为建立和应用水文地质数学模型的瓶颈 (Sun, 1994; Hill and Tiedeman, 2007; Sun and Yeh, 2007)。

从更一般的意义上说，地下水模拟的反问题包括四个子问题：(1) 数据收集问题，(2) 模型结构确定问题， (3) 尺度选择问题，(4) 参数识别问题，以及(5) 可靠性分析问题。这些问题都还没有得到很好地解决。它们是当前地下水模拟研究的热点。以下是一些很值得研究的课题：

(1) 关于条件适定的理论研究。研究在何种条件下(对数据的要求)，水文地质条件和水文地质参数可以变成可识别的。

(2) 自适应的分布参数识别方法。利用先天信息和观测资料识别一个代用的结构以及与之相应的参数值。由于计算上的困难，目前还只能识别一个简单的代用结构。

(3) 新的可用于解反问题的最优化方法。各种进化算法以及人工神经网络模拟已用于观测设计和参数估计。目前需要解最大-最小及最小-最小等最优化问题的有效数值方法。

(4) 基于地质信息的参数化方法。参数化的实质是升尺度。岩芯与地球物理手段得到的地质结构信息经数据处理与条件化之后，可得到一个结构尺度上的参数估计。

(5) 解多尺度反问题。多尺度模拟方法已开始用于环境与水文地质研究。升尺度与降尺度的问题都涉及到参数识别，很值得研究。

(6) 随机识别方法。把未知参数当作随机场来识别。对随机场空间结构的假定可能影响结果的可靠性。

(7) 基于矩阵求逆的直接识别方法。 这种方法可得到网格尺度上的参数分布，不须知道参数结构， 但要求知道每个网格点上的观测值。因为识别结果对观测误差极为敏感，这一方法曾被放弃。但最近出现了几个相对稳定的直接算法。

(8) 应用卡曼滤波及其改进形式解反问题。

(9) 目标定向的建模方法。为不同的应用目标建造不同的模型。可以用最低的建模费用达到预定的精度要求。有关的概念，理论与算法已经建立。

(10) 解特定的反问题。包括对非饱和带的水流与水质的参数识别，对非线性动力吸附，解吸，生物与化学反应函数的识别，以及对污染源的识别等。对多相流的参数识别问题也已做了一些研究。

参考文献

Aggarwal, P.K., J.R. Gat, and K.F.O. Froehlich, eds., 2005, *Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science,* Springer, Dordrecht, The Netherlands, 381 p.

Ahlfeld, D.P., and R.G. Riefler, 1999, *MODOFC Documentation and User's Guide*, University of Connecticut, Storrs, CT.

Ahlfeld, D.P., P.M. Barlow, and A.E. Mulligan, 2005, GWM-A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000), U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1072, 124 p.

Aly, A.H., and R.C. Peralta, 1999, Optimal design of aquifer cleanup systems under uncertainty using a neural network and a genetic algorithm, *Water Resour. Res.*, 35(8):2523-2532.

Andrews, J.D., and D.J. Lee, 1979, Inert gases in groundwater from the Buner sandstone of England as indicators of age and paleoclimatic trends, *J. Hydrol.*, 41:233-252.

Antonellini, M.A., and A. Aydin, 1995, Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: geometry and spatial distribution, *AAPG Bulletin*, 79:642-671.

Atlas, R.M., and J. Philp, 2005, *Bioremediation, Applied Microbial Solutions for Real-World Environmental Cleanup*, ASM Press, Washington, D.C., 366 p.

Barry, D.A., H. Prommer, C.T. Miller, P. Engesgaard, A. Brun, and C. Zheng, 2002, Modeling the fate of oxidisable organic contaminants in groundwater, *Adv. Water Resour.*, *(*25th anniversary edition), 25(8-12): 945–983.

Bear, J., 1961, On the tensor form of dispersion in porous media, *J. Geophys. Res.,* 66(4):1185-1197.

Bear, J., A.H.D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, and I. Herrera, 1999, *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods, and Practices*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 625 p.

Becker, D., B. Minsker, R. Greenwald, Y. Zhang, K. Harre, K. Yager, C. Zheng, and R. Peralta, 2006, Reducing long-term remedial costs by transport modeling optimization, *Ground Water*, 44(6):864–875.

Beller, H.R., S.R. Kane, T.C. Legler, and P.J.J. Alvarez, 2002, A real-time polymerase chain reaction method for monitoring anaerobic, hydrocarbon-degrading bacteria based on a catabolic gene, *Environ. Sci. Technol.*, 36(18):3977-3984.

Berg, M., H.C. Tran, T.C. Nguyen, H.V. Phan, R. Schertenleib, and W. Giger, 2001, Arsenic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam: A human health threat, *Environ. Sci. Technol.,* 35(13):2621-2626.

Berkowitz, B., A. Cortis, M. Dentz, and H. Scher, 2006, Modeling non-Fickian transport in geological formations as a continuous time random walk, *Rev. Geophys.,* 44, RG2003.

Bethke, C.M., and S. Marshak, 1990, Brine migration across North America – the plate tectonics of groundwater, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 18:287-315.

Biawas, S.P., and S. Boruah, 2000, Fisheries ecology of the northeastern Himalayas with special reference to the Brahmaputra River, *Ecol. Eng.,* 16(1):39-50.

Boggs, J.M, S.C. Young, and L.M. Beard, 1992, Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer, 1. Overview and site description, *Water Resour. Res.,* 28(12):3281-3291.

Bokuniewicz, H., 2001, Toward a coastal ground-water topology, *Journal of Sea Research*, 46(2):99-108.

Borchardt, M.A., N.L. Haas, and R.J. Hunt, 2004, Vulnerability of drinking-water wells in La Crosse, Wisconsin, to enteric-virus contamination from surface water contributions, *Applied and Environmental Microbiology,* 70:5937-5946.

Bosl, W.J., and A. Nur, 2002, Aftershocks and pore fluid diffusion following the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.,* 107, 2366.

Bowling, J.C., C. Zheng, A.B. Rodriguez, and D.L. Harry, 2006, Geophysical constraints on contaminant transport modeling in a heterogeneous fluvial aquifer, *J Contam. Hydrol*., 85:72–88.

Bredehoeft, J.D., and D.L. Norton, 1990, Mass and energy transport in a deforming earth's crust, in *The Role of Fluids in Crustal Processes*, Studies in Geophysics, 27-41, National Academies Press, Washington D.C.

Bredehoeft, J.D., and G.F. Pinder, 1973, Mass transport in flowing groundwater, *Water Resour. Res.*, 9(1):194-210.

Brown, S.R., and C.H., Scholz, 1985, Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, *J. Geophys. Res*., 90:12575-12582.

Bullen, T.D., and C. Kendall, 1998, Tracing of weathering reactions and water flowpaths: A multi-isotope approach, in *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, C. Kendall, and J.J. McDonnell, eds., p. 611-646, Elsevier, New York.

Burness, S., J. Chermak, and D. Brookshire, 2004, Water management in a mountain front recharge aquifer, *Water Resour. Res.,* 40, W06S21.

Cai, X., and M.W. Rosegrant, 2004, Optional water development strategies for the Yellow River Basin: Balancing agricultural and ecological water demands, *Water Resour. Res.,* 40, W08S04.

Caine, J.S., J.P. Evans, and C.B. Forster, 1996, Fault zone architecture and permeability structure, *Geology*, 24:1025-1028.

Capo, R.C., B.W. Stewart, and O.A. Chadwick, 1998, Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods, *Geoderma*, 82(1-3):197-225.

Carle, S.F., 1999, T-PROGS: Transition Probability Geostatistical Software, Version 2.1, Hydrologic Science Group, University of California, Davis, C.A.

Cecil, L.D., and J.R. Green, 2000, Radon-222, in *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*, P.G. Cook, and A.L. Herczeg, eds., Kluwer Academic Publishers, Norwell, M.A.

Chang, C.C.Y., C. Kendall, S.R. Silva, W.A. Battaglin, and D.H. Campbell, 2002, Nitrate stable isotopes: tools for determining nitrate sources among different land uses in the Mississippi River Basin, *Canadian J. Fisheries and Aquatic Sciences*, 59:1874–1885.

Chapelle, F.H., 2000, *Ground-Water Microbiology and Geochemistry*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 496 p.

Chen, J., H.S., A. Wheater, and M.J. Lees, 2002, Identification of processes affecting stream chloride response in the Hafren catchment, mid-Wales, *J. Hydrol.*, 264(1-4):12-33.

Chen, J., S. Hubbard, and Y. Rubin, 2001, Estimating hydraulic conductivity at the South Oyster site from geophysical tomographic data using Bayesian techniques based on the normal linear regression model, *Water Resour. Res.,* 37(6):1603-1613.

Clark, I., and P. Fritz, 1997, *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, Lewis Publishers, New York.

COHS (Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences), 1991, *Opportunities in the Hydrologic Sciences*, National Academies Press, Washington, D.C.

Collon, P., W. Kutschera, H.H. Loosli, B.E. Lehmann, R. Purtschert, A. Love, L. Sampson, D. Anthony, D. Cole, B. Davids, D.J. Morrissey, B.M. Sherrill, M. Steiner, R.C. Pardo, and M. Paul, 2000, Kr-81 in the Great Artesian Basin, Australia: A new method for dating very old groundwater, *Earth and Planetary Science Letters*, 182(1):103-113.

Cook, P.G., A.J. Love, N.I. Robinson, and C.T. Simmons, 2005, Groundwater ages in fractured rock aquifers, *J. Hydrol.*, 308(1-4):284-301.

Cook, P.G., and D.K. Solomon, 1997, Recent advances in dating young groundwater: Chlorofluorocarbons, H-3/He-3 and Kr-85, *J. Hydrol.*, 191(1-4):245-265.

Cushman, J.H., 1997, *The Physics of Fluids in Hierarchical Porous Media: Angstroms to Miles,* Kluwer Academic, Norwell, MA.

Cushman, J.H., ed., 1990, *Dynamics of Fluids in Hierarchical Porous Media*, Academic Press, San Diego, CA.

Dagan, G., 1989, *Flow and Transport in Porous Formations*, Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Germany.

Dagan, G., and S. P. Neuman, 1997, *Subsurface Flow and Transport: A Stochastic Approach*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Dakova, Sn., Y, Uzonov, and D., Mandadjiev, 2000, Low flow—the river ecosystem's limiting factor, *Ecol. Eng.*, 16(1):167-174.

Darcy, H.P.G., 1856, Les fountaines publiques de la Ville de Dijon, Victor Dalmont, Paris, France.

de Marsily, G., F. Delay, J. Gonçalvès, Ph. Renard, V. Teles, and S. Violette, 2005, Dealing with spatial heterogeneity, *Hydrogeology Journal*, 13(1):161-183.

DeLemos, J.L., B.C. Bostick, C.E. Renshaw, S. Stürup, and X. Feng, 2006, Landfill-stimulated iron reduction and arsenic release at the Coakley Superfund Site (NH), *Environ. Sci. Technol.,* 40(1):67-73.

Dogramaci, S.S., and A.L. Herczeg, 2002, Strontium and carbon isotope constraints on carbonate-solution interactions and inter-aquifer mixing in groundwaters of the semi-arid Murray Basin, Australia, *J. Hydrol.*, 262(1-4):50-67.

Dougherty, D.E., and R.A. Marryott, 1991, Optimal groundwater management, 1. Simulated annealing, *Water Resour. Res.*, 27(10):2493-2508.

Dubnyak, S., and V. Timchenko, 2000, The ecological role of hydrodynamic process in the Dnieper Reservoirs, *Ecol. Eng.*, 16(1):181-188.

Elsner, M., L. Zwank, D. Hunkeler, and R.P. Schwarzenbach, 2005, A new concept linking observable stable isotope fractionation to transformation pathways of organic pollutants, *Environ. Sci. Technol*., 39(18):6896-6916.

Farber, E., A. Vengosh, I. Gavrieli, A. Marie, T.D. Bullen, B. Mayer, R. Holtzman, M. Segal, and U. Shavit, 2004, The origin and mechanisms of salinization of the Lower Jordan River, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(9):1989-2006.

Faybishenko, B., P.A. Witherspoon, and S.M. Benson, eds., 2000, Dynamics of Fluids in Fractured Rock, Geophysical Monograph No. 122, American Geophysical Union, Washington, D.C.

Feehley C.E., C. Zheng, and F.J. Molz, 2000, A dual-domain mass transfer approach for modeling solute transport in heterogeneous porous media, application to the MADE site, *Water Resour. Res.,* 36(9):2501-2515.

Feng, X., 1999, Trends in intrinsic water-use efficiency of natural trees for the past 100-200 years: A response to atmospheric CO2 concentration, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63:1891-1903.

Finlay, J.C., 2003, Controls of streamwater dissolved inorganic carbon dynamics in a forested watershed, *Biogeochemistry*, 62(3):231-252.

Freeze, R.A., 1975, A Stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media, *Water Resour. Res.,* 11(5):725-741.

Freeze, R.A., and P.A. Witherspoon, 1967, Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation, *Water Resour. Res.*, 3:623-634.

Freeze, R.A., and S.M. Gorelick, 1999, Convergence of stochastic optimization and decision analysis in the engineering design of aquifer remediation, *Ground Water*, 37(6):934-954.

Frohlich, K., 1990, On dating of old groundwater, *Isotopenpraxis*, 26(12):557-560.

Garabedian, S.P., D.R. Leblanc, L.W. Gelhar, and M.A. Celia, 1991, Large-scale natural gradient tracer test in sand and gravel, Cape Code, Massachusetts, 2. Analysis of Spatial moments for a non-reactive tracer, *Water Resour. Res.,* 27(5):911-924.

Ge, S., and S.C. Stover, 2000, Hydrodynamic response to strike- and dip-slip faulting in a half-space, *J. Geophys. Res.,* 105(B11):25513-25524.

Ge, S., B. Bekins, J. Bredehoeft, K. Brown, E.E. Davis, S.M. Gorelick, P. Henry, H. Kooi, A.F. Moench, C. Ruppel, M. Sauter, E. Screaton, P.K. Swart, T. Tokunaga, C.I. Voss, and F.Whitaker, 2003, Fluid Flow in Sub-seafloor Processes and Future Ocean Drilling, *EOS*, 84(16):145-152.

Gebhardt, H., and N.T. Coleman, 1974, Anion adsorption by allophanic tropical soils: 1. Chloride adsorption, *SSSA Journal*, 38:255-259.

Gelhar, L.W., 1974, Stochastic analysis of phreatic aquifer, *Water. Resour. Res.,* 10(3):539-545.

Gelhar, L.W., 1993, *Stochastic Subsurface Hydrology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Gentry, T.J., C. Rensing, and I.L. Pepper, 2004, New approaches for bioaugmentation as a remediation technology, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 34:447-494.

Geyh, M.A., 2000, An overview of C-14 analysis in the study of groundwater, *Radiocarbon*, 42(1):99-114.

Ginn, T.R., B.D. Wood, K.E. Nelson, T.D. Scheibe, E.M. Murphy, and T.P. Clement, 2002, *Adv. Water Resour.*, 25:1017-1042.

Ginn, T.R., T. Camesano, T.D. Scheibe, K.E. Nelson, T.P. Clement, and B.D. Wood, 2005, Microbial transport in the subsurface, In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M.G. Anderson and J.J. McDonnell, eds., Wiley, New York, p. 1-24.

Glover, F., and M. Laguna, 1997, *Tabu Search*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.

Goldberg, D.E., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA, 412 p.

Gorelick, S.M., 1983, A review of distributed parameter groundwater management modeling methods, *Water Resour. Res.*, 19(2):305-319.

Gorelick, S.M., 1997, Incorporating uncertainty into aquifer management models, In *Subsurface Flow and Transport: A Stochastic Approach*, G. Dagan and S.P. Neuman,

eds., Cambridge University Press, p. 101-111.
Greenwald, R.M., 1994, *MODMAN User's Manual*, International Ground Water Modeling Center (IGWMC), Golden, CO.
Greenwald, R.M., 1999, *Hydraulic Optimization Demonstration for Groundwater Pump-and-Treat Systems, Vol. II: Application of Hydraulic Optimization*, EPA/542/R-99/011B, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
Hantush, M.S., 1956, Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers, *Transactions of the American Geophysical Union*, 37(6):702–714.
Harbaugh, A.W., E. R. Banta, M.C. Hill, and M.G. McDonald, 2000, MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water flow Process, U. S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.
Harrington, G.A., and A.L. Herczeg, 2003, The importance of silicate weathering of a sedimentary aquifer in and Central Australia indicated by very high Sr-87/Sr-86 ratios, *Chemical Geology*, 199(3-4):281-292.
Harvey, R.W., and H. Harms, 2002, Transport of microorganisms in the terrestrial subsurface, In *In Situ and Laboratory Methods, 2nd ed.*, C.J. Hurst, ed., ASM Press, Washington, D.C.
He, X., and L. Ren, 2006, A multiscale finite element linearization scheme for the unsaturated flow problems in heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 42, W08417.
Heaton, T.H.E., and J.C. Vogel, 1981, Excess air in groundwater, *J. Hydrol.*, 50:201-216.
Helm, D.C., 1994, Horizontal aquifer movement in a Theis-Thiem confined aquifer system *Water Resour. Res.*, 30(4):953-964.
Hem, J.D., 1959, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1473, 269 p.
Heynekamp, M.R., L.B. Goodwin, P.S. Mozley, and W.C. Haneberg, 1999, Controls on fault-zone architecture in poorly lithified sediments, Rio Grande Rift, New Mexico: implications for fault-zone permeability and fluid flow, in *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust*, W.C. Haneberg, P.S. Mozley, J.C. Moore, and L.B. Goodwin, eds., AGU Geophysical Monograph Volume 113, 27-50.
Heywood, C.E., D.L. Galloway, and S.V. Stork, 2002, Ground displacements caused by aquifer-system water-level variations observed using interferometric synthetic aperture radar near Albuquerque, New Mexico, U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report WRI 02-4235, 18 p.
Hill, M.C., and C.R. Tiedeman, 2007, *Effective Groundwater Model Calibration, With Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty*, Wiley, New York, 456 p.
Holzbecher, E., and G. Nutzmann, 2000, Influence of subsurface watershed on eutrophication—Lake Stechlin case study, *Ecol. Eng.*, 16(1):175-180.
Hubbard, S.S., J.S., Chen, J. Peterson, E.L. Majer, K.H. Williams, D.J. Swift, B. Mailloux, and Y. Rubin, 2001, Hydrogeological characterization of the South Oyster Bacterial Transport Site using geophysical data, *Water Resour. Res.*, 37(10):2431-2456.
Hubbert, M.K., 1940, The theory of ground-water motion, *Journal of Geology*, 48(8):785-944.
Hubbert, M.K., 1953, Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions, *AAPG Bulletin*, 37:1954–2026.

Hunt, R.J., and D.A.Wilcox, 2003, Ecohydrology-why hydrologists should care, *Ground Water,* 41(3):289-289.

Ingram, H.A.P., 1987, Ecohydrology of Scottish peatlands, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh – Earth Sciences*, 78(4):287-296.

Jacob, C.E., 1940, On the flow of water in an elastic artesian aquifer, *Transactions of the American Geophysical Union,* 21:574–586.

Jonsson, S., P. Segall, R. Pedersen, and G. Bjornsson, 2003, Post-earthquake ground movements, correlated to pore-pressure, transients, *Science*, 424:179-183.

Jury, W.A., 1982, Simulation of solute transport using a transfer function model, *Water Resour. Res.,* 18:363-368.

Kalin, R.M., 2000, Radiocarbon dating of groundwater systems, in *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*, P.G. Cook, and A.L. Herczeg, eds., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.

Kang, Q, D. Zhang, and S. Chen, 2003, Simulation of dissolution and precipitation in porous media, *JGR - Solid Earth*, 108(B10), 2505.

Kang, Q., D. Zhang, and S. Chen, 2002a, Displacement of a two-dimensional immiscible droplet in a channel, *Physics of Fluids*, 14(9):3203-3214.

Kang, Q., D. Zhang, and S. Chen, 2002b, A unified lattice Boltzmann method for flow in multiscale porous media, *Physical Review E*, 66(11), 057306.

Kang, Q., D. Zhang, S. Chen, and X. He, 2002c, Lattice Boltzmann simulations of chemical dissolution in porous media, *Physical Review E*, 65(3), 036318.

Karasaki, K., B. Freifeld, A. Cohen, K. Grossenbacher, P. Cook, and D. Vasco, 2000, A multidisciplinary fractured rock characterization study at Raymond field site, Raymond, CA, *J. Hydrol.*, 236:17–34.

Karatzas, G.P., and G.F. Pinder, 1993, Groundwater management using numerical simulation and the outer-approximation method for global optimization, *Water Resour. Res.*, 25(10):2245-2258.

Kemp, J.L., D.M. Harper, and G.A. Crosa, 2000, The habitat-scale ecohydraulics of river, *Ecol. Eng.*, 16(1):17-29.

Kendall, C., and J.J. McDonnell, eds., 1998, *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Elsevier, New York.

Killey, R., and G. Moltyaner, 1988, Twin Lake tracer tests: Setting, methodology, and hydraulic conductivity distribution, *Water Resour. Res.,* 24(10):1585-1612.

Kirchner, J.W., X. Feng, and C. Neal, 2000, Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments, *Nature*, 403:524-527.

Kitanidis, P.K., 1997, *Introduction to Geostatistics: Applications in Hydrogeology*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kluitenberg, G.J., 2002, Heat capacity and specific heat, In *Methods of Soil Analysis, Part 4,* J.H. Dane and G.C. Topp, eds., SSSA Book Series 5, Soil Science Society of America, Madison, WI.

Kooi, H., J. Groen, and A. Leijnse, 2000, Modes of seawater intrusion during transgressions, *Water Resour. Res.,* 36(12):3581-3590.

Kriegler, F.J., W.A. Malila, R.F. Nalepka, and W. Richardson, 1969, Pre-processing transformations and their effects on multispectral recognition, in *Proc. Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 97-131, 1969.

Lawford, R., D. Fort, H. Hartmann, and S. Eden, eds., 2003, *Water: Science, Policy, and Management*, AGU Water Resources Monograph Series, Volume 16, American Geophysical Union, Washington, D.C.

LeBlanc, D.R., S.P. Garabedian, K.M. Hess, L.W. Gelhar, R.D. Quadri, K.G. Stollenwerk, and W.W. Wood, 1991, Large-scale natural gradient tracer test in sand and gravel, Cape Cod, Massachusetts, 1: experimental design and observed tracer movement, *Water Resour. Res.,* 27(5):895-910.

Lefkoff, L.J., and S.M. Gorelick, 1987, *AQMAN: Linear and Quadratic Programming Matrix Generator Using Two-Dimensional Groundwater Flow Simulation for Aquifer Management Modeling*, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4061.

Lehmann, B.E., and R. Purtschert, 1997, Radioisotope dynamics - the origin and fate of nuclides in groundwater, *Applied Geochemistry*, 12 (6):727-738.

Li, C., S. Frolking, and T.A. Frolking, 1992a, A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity, *J. Geophys. Res.,* 97(D9):9759-9776.

Li, C., S. Frolking, and T.A. Frolking, 1992b, A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model application, *J. Geophys. Res.,* 97(D9):9777-9783.

Li, J., 2006, Analysis of radial movement of a confined leaky aquifer due to well pumping and injection, *Hydrogeology Journal*, 15(6):1063-1076.

Lichtner, P.C., C.I. Steefel, and E.H. Oelkers, eds., 1996, *Reactive Transport in Porous Media*, Reviews in Mineralogy, 44, 438 p.

Liu, H.H., and F. J. Molz, 1997, Multifractal analyses of hydraulic conductivity distributions, *Water Resour. Res.,* 33(11):2483–2488.

Lloyd, J.R., and L.E. Macaskie, 2000, Bioremediation of radioactive metals, in *Environmental Microbe-Metal Interactions*, D.R. Lovley, ed., ASM Press, Washington, D.C., p. 277-327.

Lloyd, J.R., R.T. Anderson, and L.E. Macaskie, 2005, Bioremediation of metals and radionuclides, In *Bioremediation, Applied Microbial Solutions for Real-World Environmental Cleanup*, R.M. Atlas and J. Philp, eds., ASM Press, Washington, D.C., p. 293-317.

Looney, B.B., and R.W. Falta, eds., 2000, *Vadose Zone Science and Technology Solutions*, Batelle Press, Columbus, OH.

Loosli, H.H., B.E. Lehmann, and J.W.M. Smethie, 2000, Noble gas radioisotopes: ^{37}Ar, ^{85}Kr, ^{39}Ar, ^{81}Kr, in *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* P.G. Cook, and A.L. Herczeg, eds., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.

Lovley, D.R., 2000, *Environmental Microbe-Metal Interactions*, ASM Press, Washington, D.C., 395 p.

Lovley, D.R., 2003, Cleaning up with genomics: Applying molecular biology to bioremediation, *Nature Review, Microbiology*, p. 35-44.

MacKay, D.M., D.L. Freyberg, P.V. Roberts, and J.A. Cherry, 1986, A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer, 1. Approach and overview of plume movement, *Water Resour. Res.,* 22(13):2017-2029.

Macler, B.A., and J.C. Merkle, 2000, Current knowledge on groundwater microbial pathogens and their control, *Hydrogeology Journal*, 8:29-40.

Mao, M. and L. Ren, 2004, Simulating nonequilibrium transport of atrazine through saturated soil, *Ground Water*, 42(4):500-508.

Matheron, G., 1967, *Elements pour une Theorie des Milieux Poreux*, Masson, Paris, 166 p.

Mayer, A.S., C.T. Kelley, and C.T. Miller, 2002, Optimal design for problems involving flow and transport phenomena in saturated subsurface systems, *Adv. Water Resour.,* 25:1233–1256.

McGuire, V.L., M.R. Johnson, R.L. Schieffer, J.S. Stanton, S.K. Sebree, and I.M. Verstraeten, 2003, Water in storage and approaches to ground-water management, High Plains aquifer, 2000, U.S. Geological Survey Circular 1243, 51 p.

McKinney, D., and M. Lin, 1994, Genetic algorithm solution of groundwater management models, *Water Resour. Res.*, 30(6):1897-1906.

McKinney, D., X. Cai, M. Rosegrant, C. Ringler, and C. Scott, 1999, *Integrated Basin-Scale Water Resources Management Modeling: Review and Future Direction,* System-Wide Initiative on Water Management (SWIM), Research Paper No. 6, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

Meinzer, O.E., 1923, The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 489.

Michalski, G., T. Meixner, M. Fenn, L. Hernandez, A. Sirulnik, E. Allen, and M. Thiemens, 2004, Tracing atmospheric nitrate deposition in a complex semiarid ecosystem using $\delta^{17}O$, *Environ. Sci. Technol.*, 38:2175-2181.

Miller, G.T., 2000, *Living in the Environment: Principles, Connections, and Solutions*, 11th Edition ed, Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, CA.

Minsker, B.S., and C. A. Shoemaker, 1998, Quantifying the effects of uncertainty on optimal groundwater bioremediation policies, *Water Resour. Res.*, 34(12):3615-3625.

Molz, F.J., and G.K. Boman, 1995, Further evidence of fractal structure in hydraulic conductivity distribution, *Geophys. Res. Lett.,* 22(18):2545-2548.

Molz, F.J., H. Rajaram, and S. Lu, 2004, Stochastic fractal-based models of heterogeneity in subsurface hydrology: Origins, applications, limitations, and future research questions, *Reviews of Geophy.,* 42, RG1002.

Morgan, D.R., J.W. Eheart, and A.J. Valocchi, 1993, Aquifer remediation design under uncertainty using a new chance constrained programming technique, *Water Reaour. Res*. 29(3):551-561.

Morrow, C., L.Q. Shi, and J. Byerlee, 1984, Permeability of fault gouge under confining pressure and shear stress, *J. Geophys. Res.,* 89:3193-3200.

Mozley, P.S., and L.B. Goodwin, 1995, Patterns of cementation along a Cenozoic normal fault: a record of paleoflow orientations, *Geology*, 23:539-542.

Narasimhan, T.N., 2005, Hydrogeology in North America: past and future, *Hydrogeology Journal,* 13(1):7-24.

Neuman, S.P., 1990, Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media, *Water Resour. Res.,* 26(8):1749-1758.

Neuman, S.P., 1994, Generalized scaling of permeabilities: Validation and effect of support scale, *Geophy. Res. Lett.,* 21(5):349-352.

Neuman, S.P., 2006, Blueprint for perturbative solution of flow and transport in strongly heterogeneous composite media, using fractal and variational multiscale decomposition, *Water Resour. Res.,* 42, W06D04.

Newman, B.D., B.P. Wilcox, S.R. Archer, D.D. Breshears, C.N. Dahm, C.J. Duffy, N.G. McDowell, F.M. Phillips, B.R. Scanlon, and E.R. Vivoni, 2006, Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision, *Water Resour. Res.,* 42, W06302.

NRC (National Research Council), 2004, *Groundwater Fluxes Across Interfaces*, National Academies Press, Washington, D.C.

Nygard, K., L. Vold, E. Halvolsen, E. Bringeland, A.J. Rottingen, and P. Avistland, 2004, Waterborne outbreaks of gastroenteritis in a religious camp in Norway, 2002, *Epidemol. Infect.*, 132:223-229.

Ogata, A., 1970, *Theory of Dispersion in a Granular Medium*, U.S. Geological Survey Professional Paper 411-I.

Orr, S., and A.M. Meystel, 2005, Approaches to optimal aquifer management and intelligent control in a multiresolutional decision support system, *Hydrogeology Journal,* 13(1):223-246.

Osmond, J.K., and J.B. Cowart, 2000, U-series nuclides as tracers in groundwater hydrology, in *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*, P.G. Cook, and A.L. Herczeg, eds., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.

Pachepsky, Y., D.E. Radcliffe, and H.M. Selim, eds., 2003, *Scaling Methods in Soil Physics*, CRC Press, Washington, D.C.

Palciauskas, V.V., and P.A. Domenico, 1982, Characterization of drained and undrained response of thermally loaded repository rocks, *Water Resour. Res.*, 18:281-290.

Palmer, A.N, 2002, Karst in Paleozoic rocks: How does it differ from Florida? In *Hydrogeology and Biology of Post-Paleozoic Carbonate Aquifers*, Karst Waters Institute Special Publication 7, J.B. Martin, C.M. Wicks, and I.D. Sasowsky, eds., Karst Waters Institute, Charles Town, West Virginia.

Park, J., C.M. Bethke, T. Torgersen, and T.M. Johnson, 2002, Transport modeling applied to the interpretation of groundwater ^{36}Cl age, *Water Resour. Res.*, 38(5), 1043.

Pazdur, A., T. Goslar, M. Pawlyta, H. Hercman, and M. Gradzinski, 1999, Variations of isotopic composition of carbon in the karst environment from Southern Poland: present and past, *Radiocarbon,* 41(1):81-97.

Person, M., B. Dugan, J.B. Swenson, L. Urbano, C. Sttot, , J. Taylor, and M. Willett, 2003, Pleistocene hydrogeology of the Atlantic continental shelf, New England, *GSA Bulletin*, 115:1324-1343.

Person, M., J. Raffensperger, S. Ge, and G. Garven, 1996, Basin-scale hydrological modeling, *Review of Geophysics*, 34(1):61-78.

Phillips, F.M., 2000, Chlorine-36, in *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*, P.G. Cook, and A.L. Herczeg, eds., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.

Plummer, L.N., and E. Busenberg, 2000, Chlorofluorocarbons, in *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*, P.G. Cook, and A.L. Herczeg, eds., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.

Plummer, L.N., R.L. Michel, E.M. Thurman, and P.D. Glynn, 1993, Environmental tracers for age dating young ground water, in *Regional Ground-water Quality*, W.M. Alley, ed., Van Nostrand Reinhold, New York.

Polya, D.A., A.G. Gault, N. Diebe, P. Feldman, J.W. Rosenboom, E. Gilligan, D. Fredericks, A.H. Milton, M. Sampson, H.A.L. Rowland, P.R. Lythgoe, J.C. Jones, C. Middleton, and D.A. Cooke, 2005, Arsenic hazard in shallow Cambodian groundwaters, *Mineralogical Magazine*, 69(5):807-823.

Prommer, H., D.A. Barry, and C. Zheng, 2003, A MODFLOW/MT3DMS based multicomponent reactive transport model, *Ground Water*, 41(2): 247-257.

Reilly, T.E., and A.S. Goodman, 1985, Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationships in groundwater systems – a historical perspective, *J. Hydrol.*, 80:125-160.

Ren, L., J. Ma, and R. Zhang, 2003, Estimating nitrate leaching with a transfer function model incorporating net-mineralization and uptake of nitrogen, *Journal of Environmental Quality,* 32:1455-1463.

Ritzi, R.W., Z. Dai, D.F. Dominic, and Y. Rubin, 2004, Spatial correlation of permeability in cross-stratified sediment with hierarchical architecture, *Water Resour. Res.,* 40, W03513.

Roeloffs, E.A., 1996, Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, *Advances in Geophysics*, 37:135-195.

Rogers, L.L., and F.U. Dowla, 1994, Optimization of groundwater remediation using artificial neural networks with parallel solute transport modeling, *Water Resour. Res.*, 30(2):457-481.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering, 1973, Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, in *Proc. Third ERTS Symposium*, NASA SP-351, 1, 309-317.

Rubin, Y., 2003, *Applied Stochastic Hydrogeology*, Oxford University Press, New York., 416 p.

Rubin, Y., and S.S. Hubbard, eds., 2006, *Hydrophysics*, Springer, New York, 523 p.

Scheidegger, A.E., 1954, Statistical hydrodynamics in porous media, *J. Appl. Phys.*, 25:994-1001.

Schuller, D., H. Brunken-Winkler, P. Busch, M. Förster, P. Janiesch, R. v. Lemm, R. Niedringhaus, and H. Strasser, 2000, Sustainable land use in an agriculturally misused landscape in northwest Germany through ecotechnical restoration by a "patch network concept", *Ecol. Eng.,* 16(1):99-117.

Screaton, E., J. B. Martin, B. Ginn, and L. Smith, 2004, Conduit Properties and Karstification in the Santa Fe River Sink-Rise System of the Floridan Aquifer, *Ground Water,* 42:338-346.

Sen, M., and P.L. Stoffa, 1995, *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*, Elsevier, The Netherlands.

Seront, B., F.T. Wong, J.S. Caine, C.B. Forster, R.L. Bruhn, and J.T. Fredrich, 1998, Laboratory characterization of hydromechanical properties of a seismogenic normal fault system, *Journal of Structural Geology*, 20(7):865-881.

Siegfried, T., and W. Kinzelbach, 2006, A multiobjective discrete stochastic optimization approach to shared aquifer management: Methodology and application, *Water Resour. Res.,* 42, W02402.

Smedley, P.L., and D.G. Kinniburgh, 2002, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters, *Applied Geochemistry*, 17:517-568.

Smets, B.F., and P.H. Pritchard, 2003, Elucidating the microbial component of natural attenuation, *Current opinion in Biotechnology*, 14(3):283-288.

Smith, L., and W. Zawadzki, 2003, A hydrogeologic model of submarine groundwater discharge: Florida intercomparison experiment, *Biogeochemistry*, 66:95-110.

Solomon, D.K., and P.G. Cook, 2000, ^{3}H and ^{3}He, in *Environmental Tracers in Subsurface*

Hydrology, P.G. Cook, and A.L. Herczeg, eds., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.

Solomon, D.K., R.J. Poreda, S.L. Schiff, and J.A. Cherry, 1992, Tritium and helium-3 as groundwater age tracers in the Borden aquifer, *Water Resour. Res.*, 28(3):741-755.

Spence, R., and P. Hickley, 2000, The use of PHABSIM in the management of water resource and fisheries in England and Wales, *Ecol. Eng.*, 16(1):153-158.

Stone, J.R., P.M. Barlow, and J.J. Starn, 1996, Geohydrology and conceptual model of a ground-water flow system near a Superfund site in Cheshire, Connecticut, U.S. Geological Survey Open-File Report 96-162.

Stover, C.S., P. Weimer, and S. Ge, 2001, The effects of allochthonous salt evolution and overpressure development on source rock thermal maturation: a two-dimensional transient study in the northern Gulf of Mexico Basin, *Petroleum Geosciences*, 7:281-290.

Stover, C.S., S. Ge, P. Weimer, and B. McBride, 2001, The effects of salt evolution, structural development, and fault propagation on Late Mesozoic/Cenozoic oil migration: a two-dimensional fluid flow study along a megaregional profile in the northern Gulf of Mexico, *AAPG Bulletin*, 85(11):1945-1966.

Stute, M., and P. Schlosser, 2000, Atmospheric noble gases, in *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*, P.G. Cook, and A.L. Herczeg, eds., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.

Sun, N.-Z., 1994, *Inverse Problems in Groundwater Modeling*, Kluwer Academic Publishers, New York, 337 p.

Sun, N.-Z., and W. W.-G. Yeh, 2007, Development of objective-oriented groundwater models: 1. Robust parameter identification, *Water Resour. Res.,* 43, W02420.

Suthersan, S.S., and F.C. Payne, 2005, *In situ Remediation Engineering*, CRC Press, Boca Raton, FL, 511 p.

Sverjensky, D.A., 1986, Genesis of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14:177-199.

Swart, P., U.G. Wortmann, R.M. Mitterer, M.J. Malone, P.L. Smart, D.A. Feary, and A.C. Hine, 2000, Hydrogen sulfide-rich hydrates and saline fluids in the continental margin of South Australia, *Geology*, 28(11):1039-1042.

Taniguchi, M., 2002, Tidal effects on submarine groundwater discharge into the ocean, *Geophysical Research Letters*, 29(12), 1561.

Tátrai, I., K. Mátyás, J. Korponai, G. Paulovits, and P. Pomogyi, 2000, The role of the Kis-Balaton water protection system in the control of water quality of Lake Balaton, *Ecol. Eng.*,16(1):73 -78.

Taylor, G., 1953, Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube, in *Proc. Royal Soc. Lond.*, A219:186-203.

Theis, C.V., 1935, The relation between lowering of the piezometric surface and rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Transactions of the American Geophysical Union*, 16:519–524.

Timchenko, V., O. Oksiyuk, and J. Gore, 2000, A model for ecosystem state and water quality management in the Dnieper River delta, *Ecol. Eng.*, 16(1):119-125.

Toth, J., 1962, A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, *J. Geophys. Res.,* 67(11):4375-4387.

Toth, J., 1963, A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, *J. Geophys. Res.,* 68(16):4795-4812.

Truesdell, A.H., and B.F. Jones, 1973, WATEQ – A computer program for calculating chemical equilibria of natural waters, National Technical Information Service PB-220 464, p. 77.

Truesdell, A.H., and B.F. Jones, 1974, WATEQ, A computer program for calculating chemical equilibria of natural waters, *U.S. Geological Survey Journal of Research*, 2(2):233-248.

USEPA, 1989, Drinking water; national primary drinking water regulations: total coliform (including fecal doliforms and E. Coli); final rule. FR 54:27544 (June 29, 1989), USE, PA, Washington, DC.

van Ek, R., J.-P. M. Witte, H. Runhaar, and F. Klijn, 2000, Ecological effects of water management in the Netherlands: the model DEMNAT, *Ecol. Eng.*, 16(1):127-141.

van Genuchten, M.Th., and E.A. Sudicky, 1999, Recent advances in vadose zone flow and transport modeling, in *Vadose zone Hydrology: Cutting across Disciplines*, M.B. Parlange and J.W. Hopmans, eds., Oxford University Press, NY.

Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell, and C.E. Cushing, 1980, The river continuum concept, *Canadian J. Fish Aquat. Sci,* 37(1):130-137.

Vilomet, J.D., B. Angeletti, S. Moustier, J.P. Ambrosi, M. Wiesner, J.Y. Bottero, and L. Chatelet-Snidaro, 2001, Application of strontium isotopes for tracing landfill leachate plumes in groundwater, *Environ. Sci. Technol.*, 35(23):4675-4679.

Viswanathan, H.S., B.A. Robinson, A.J. Valocchi, and I.R. Triay, 1998, A reactive transport model of neptunium migration from the potential repository at Yucca Mountain, *J. Hydrol.*, 209:251–80.

Voss, C.I., 1999, USGS SUTRA Code – history, practical use, and application in Hawaii, in *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices*, J. Bear, ed., Kluwer Academic Publishers, p. 249 - 313.

Voss, C.I., and W.R. Souza, 1987, Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone, *Water Resour. Res.,* 23:1851-1866.

Wagner, B.J., and S.M. Gorelick, 1987, Optimal Groundwater quality management under parameter uncertainty, *Water Resour. Res.,* 23(7):1162-1174.

Wagner, B.J., and S.M. Gorelick, 1989, Reliable aquifer remediation in the presence of spatially variable hydraulic conductivity: From data to design, *Water Resour. Res.,* 25(10):2211-2225.

Wagner, I., and M. Zalewski, 2000, Effects of hydrological patterns of tributaries on biotic processes in a lowland reservoir consequence for restoration, *Ecol. Eng.*, 16(1):70-90.

Wagner, J.M., U. Shamir, and H.R Nemati, 1992, Groundwater quality management under uncertainty: Stochastic programming approaches and the value of information, *Water Resour. Res.,* 28(5):1233-1246.

Wang, H.F., 2000, *Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics*, Princeton University Press, Princeton, N.J., 287 p.

Wang, M., and C. Zheng, 1997, Optimal remediation policy selection under general conditions, *Ground Water*, 35(5):757-764.

Wang, M., and C. Zheng, 1998, Application of genetic algorithms and simulated annealing in groundwater management: Formulation and comparison, *J. Am. Water Resour. Assoc.*,

34(3):519-530.
Warrick, A.W, D.E. Myers, and D.R. Nielson, 1986, Geostatistical methods applied to soil science, in *Methods of Soil Analysis. Part 1, 2nd ed*., A. Klute, ed., Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
Wellman, T.P., R.B. Grigg, B.J. McPherson, R.K. Svec, and P.C. Lichtner, 2003, Evaluation of CO2-brine-reservoir rock interaction with laboratory flow tests and reactive transport modeling, paper SPE 80228, Presented at the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston.
White, W.B., 1969, Conceptual models for carbonate aquifers, *Ground Water,* 7(3):15–21.
White, W.B., 1988, *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*, Oxford University Press, New York, 464 p.
Williams, J.H., W.W. Lapham, and T.H. Barringer, 1993, Application of electromagnetic logging to contamination investigations in glacial sand-and-gravel aquifers, *Ground Water Monitoring and Remediation,* 13(1):129 -138.
Williams, K.H., D. Ntarlagiannis, L.D. Slater, A. Dohnalkova, S.S. Hubbard, J.F. Banfield, 2005, Geophysical imaging of stimulated microbial biomineralization, *Environ. Sci. Technol.*, 39(19):7592-7600.
Witte, J.-P. M, and R. Van der Meijden, 2000, Mapping ecosystem types by means of ecological species groups, *Ecol. Eng.*, 16(1):143-152.
Wu, J., C. Zheng, C.C. Chien, and L. Zheng, 2006, A comparative study of Monte Carlo simple genetic algorithm and noisy genetic algorithm for cost-effective sampling network design under uncertainty, *Adv. Water Resour.*, 29:899–911.
Wu, Y.-S., G. Lu, K. Zhang, and G.S. Bodvarsson, 2004, A Mountain-scale model for characterizing unsaturated flow and transport in fractured tuffs of Yucca Mountain, *Vadose Zone Journal*, 3:796–805.
Yeh, G., and V. Tripathi, 1989, A Critical evaluation of recent developments in hydrogeochemical transport models of reactive multichemical components, *Water Resour. Res.,* 25(1):93-108.
Zalewski, M., 2000, Ecohydrology — the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources, *Ecol. Eng.*, 16(1):1-8 .
Zhang, D., 2002, *Stochastic Methods for Flow in Porous Media: Coping with Uncertainties*, Academic Press, San Diego, CA.
Zhang, D., R. Zhang, S. Chen, and W.E. Soll, 2000, Pore scale study of flow in porous media: scale dependency, REV, and statistical REV, *GRL,* 27(8):1195-1198.
Zhang, R., 2000, A generalized transfer function model for solute transport in heterogeneous soils, *Soil Science Society of America Journal*. 64: 1959-1602.
Zhang, R., A.W. Warrick, and D.E. Myers, 1990, Variance within a finite domain as a function of sample support size, *Math Geology*, 22:107-121.
Zhang, Y.-K., and K. Schilling, 2004, Temporal scaling of hydraulic head and river baseflow and its implication for groundwater recharge, *Water Resour. Res.,* 40, W03504.
Zhang, Y.-K., and Z. Li, 2005, Temporal scaling of hydraulic head fluctuations: Nonstationary spectral analyses and numerical simulations, *Water Resour. Res.,* 41, W07031.
Zhang, Y.-K., and Z. Li, 2006, Effect of temporally correlated recharge on fluctuations of groundwater levels, *Water Resour. Res.,* 42, W10412.
Zheng, C., 1990, *MT3D: A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of*

Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems, Report to the U.S. Environmental Protections Agency, Ada, OK.

Zheng, C., 2006, Accounting for aquifer heterogeneity in solute transport modeling: a case study from the macrodispersion experiment (MADE) site in Columbus, Mississippi, in *Handbook of Groundwater Engineering*, *2nd edition*, J.W. Delleur, ed., CRC Press, Boca Raton, FL.

Zheng, C., and G.D. Bennett, 2002, *Applied Contaminant Transport Modeling, 2nd edition*, John Wiley & Sons, New York, 621 p.

Zheng, C., and P.P. Wang, 1996, Parameter structure identification using tabu search and simulated annealing, *Adv. Water Res.*, 19(4):215-224.

Zheng, C., and P.P. Wang, 1999a, *MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multi-species Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems*; Documentation and User's Guide, Contract Report SERDP-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 169 p. (available at http://hydro.geo.ua.edu/mt3d).

Zheng, C., and P.P. Wang, 1999b, An integrated global and local optimization approach for remediation system design, *Water Resour. Res.*, 35(1):137-148.

Zheng, C., and P.P. Wang, 2002, A field demonstration of the simulation-optimization approach for remediation system design, *Ground Water*, 40(3):258-265.

Zheng, C., and S.M. Gorelick, 2003, Analysis of the effect of decimeter-scale preferential flow paths on solute transport, *Ground Water*, 41(2):142-155.

第四章　地下水数据

4.1 地下水研究的数据需求

地下水研究的最大障碍是缺乏足够的数据。计算机技术的发展为建立大型的综合模型奠定了基础，但目前最缺乏的是建模所需的各种参数和能够充分验证模型的实验和实测数据。必须加强含水层及土壤物理、化学性状和过程的长期定位监测，建立系统、可靠的含水层及土壤物化性状和物化过程的信息数据库。这些包括水文地质勘测（岩层及土壤序列、质地、结构等）、水动力学（水力传导系数、含水层储水系数、孔隙度、土壤水分特征曲线参数、土壤饱和水力传导度等）、水化学与环境同位素（各种化学指标、主要溶质成分、污染物浓度、反应速率、弥散系数等）的数据库，以及降雨、植被、土壤水、腾发量和地下水补给的数据库，等等。

在这一章，我们首先讨论获取水文地质数据的一些新技术和新手段。之后介绍美国基于互联网的水文信息存贮、发布、共享系统的一些情况，以及发展水文科学中赛百结构（cyberinfrastructure）和信息学（informatics）的重要性。最后，我们探讨建立和发展全国性观测联网的必要性。另外，插页 4.1 简要介绍了美国大学促进水文科学联合会的情况，以期对建立中国地下水科学的国家研究基础设施与观测联网有借鉴作用。

4.2 获取地下水数据的新技术

4.2.1 传感器网络（Sensor Networks）

互联网的普及和其它的技术发展，尤其是遥测传感器的无线和声波传输，再加上传感器的成本、尺寸和重量的不断降低，正在为环境监测和环境科学研究带来根本性的变化。大范围的、多变量智能传感器阵列构成的智能网络，正在成为研究复杂的现实世界的全新的工具。这一技术使得在时间和空间上进行密集监测成为可能，有希望揭示以前难以监测到的现象。对研究人员目前就很有吸引力的是对实验或者观测网进

行实时远程控制的潜力；这种实时远程控制是通过局域网、嵌套的或相邻的网络、或远处来源传输来的数据来实现的（Estrin et al., 2003）。

中国的地下水研究者和工程人员应该做好充分利用这种新兴技术的准备。价格相对便宜的用来测量地下水位、湿度、温度、溶解氧、二氧化碳、盐度、营养物等参数的传感器已经开始渐渐普及了。充分有效地利用传感器网络进行数据的连续收集和监测，将需要新的赛百结构、方法、中间设备、基础设施配置及多学科科学家和工程人员的协作。大量、高质量的实测数据有助于新的科学问题的提出和解决。

作为一个实例，Selker et al. (2006) 描述了利用分布式纤维光缆传感网络测定水温的方法在 5 项水文地质研究中的应用（见图 4.1）。该方法的测量精度可达 0.01℃，空间分辨率为 1m，时间分辨率小于 1 分钟，所使用的光缆总长度可达 30,000 m。光缆系统的工作原理是光从仪器光源到光缆某一点的传输时间受该点周围的物理环境影响。上述方法对于蒸发、入渗、湖沼系统、以及 1—10,000 m 尺度的能量预算的观测具有重要的使用价值。

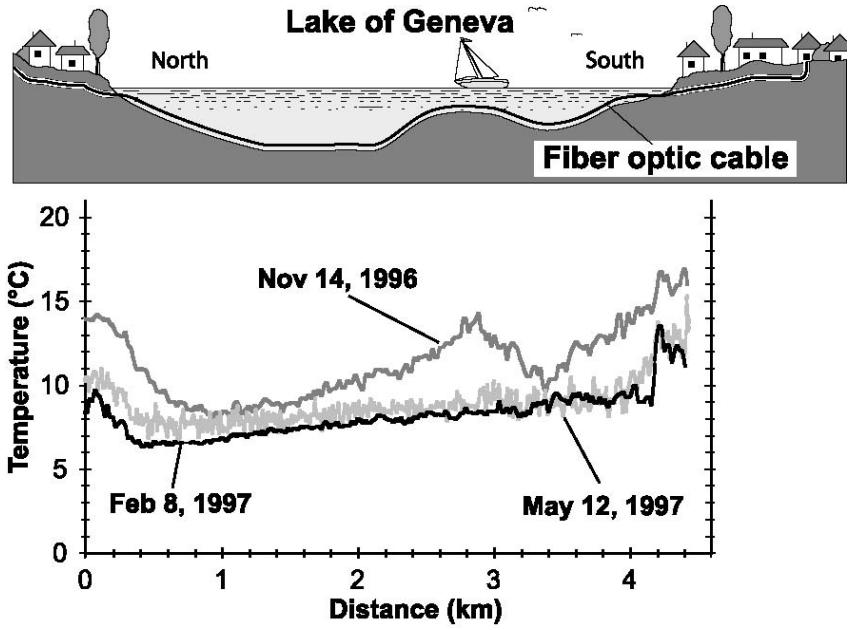


图 4.1. 利用现有的通信光缆测定法国（南部）和瑞士（北部）之间的日内瓦湖底部温度的剖面图（Selker et al., 2006）

4.2.2 水文地球物理方法 （Hydrogeophysics）

水文地球物理是一门用地球物理技术估计含水层的特性和监测地下水流动和污染物运移的交叉学科。该研究领域正在美国和欧洲迅速崛起。常用的水文地球物理方法包括电阻率法、电磁法、地面穿透雷达（GPR）、地震、交叉测井电阻率/雷达/地震层析成像。Hubbard and Rubin (2002) 列出了水文地球物理的典型用途：

- 描绘水位埋深和基岩深度
- 探测断层
- 描绘咸－淡水界面
- 描绘含水层岩性
- 圈定垃圾填埋场
- 估算非饱和带的含水量
- 探测地质体的空隙
- 估算水力渗透系数和孔隙度
- 评价水质
- 评价废弃物密闭装置的完整性
- 直接检测污染物
- 监测物理－化学－微生物过程

因为地下水环境非均质性的普遍存在，对含水层中地下水流动和污染物运移进行三维模拟时需要大量的水文地质数据。传统的监测手段和抽水实验可以估计含水层的水力特征，但是花费很大，而且只能给出研究区内有限一些点上的数据。与其不同，地球物理方法（例如雷达、电法和地震）的覆盖密度大，可以迅速获得大量的数据，且花费不高。地球物理数据只能间接表征含水层的水文地球物理特征，例如水力传导系数、孔隙度或污染羽的移动等。在某些情况下，可以建立地球物理数据与水文地球物理特征之间的定量关系。地球物理方法作为估算水文地质参数的补充方法或替代方法，用于地下水模拟是很具吸引力的。

作为一个实例，Bowling et al. (2007) 将用于描绘美国著名的示踪剂实验场（“MADE”实验场）附近的浅层冲积含水层的三种水文地球物理方法（探地雷达、

地震反射、直流电阻率）进行了对比（图 4.2）。所得数据为分析 MADE 实验场的大范围自然水力梯度示踪实验所建立起来的水流和溶质运移模型提供了很有价值的限制条件。值得一提的是，在原位实验中利用一个钻孔流量计（borehole flowmeter）所收集的数据，通过一个对数－对数关系，可以将三维电阻率数据转化三维水力渗透系数的分布。基于地球物理方法的水力渗透系数分布所模拟得到的示踪羽与观测的示踪羽的吻合程度，并不亚于基于 3000 多个流量计测点的水力渗透系数分布所模拟得到的示踪羽与观测的示踪羽的吻合程度 (Bowling et al.., 2006)。更多的实例可以从 Guérin (2005) 和 Rubin and Hubbard (2006) 的论著中找到。

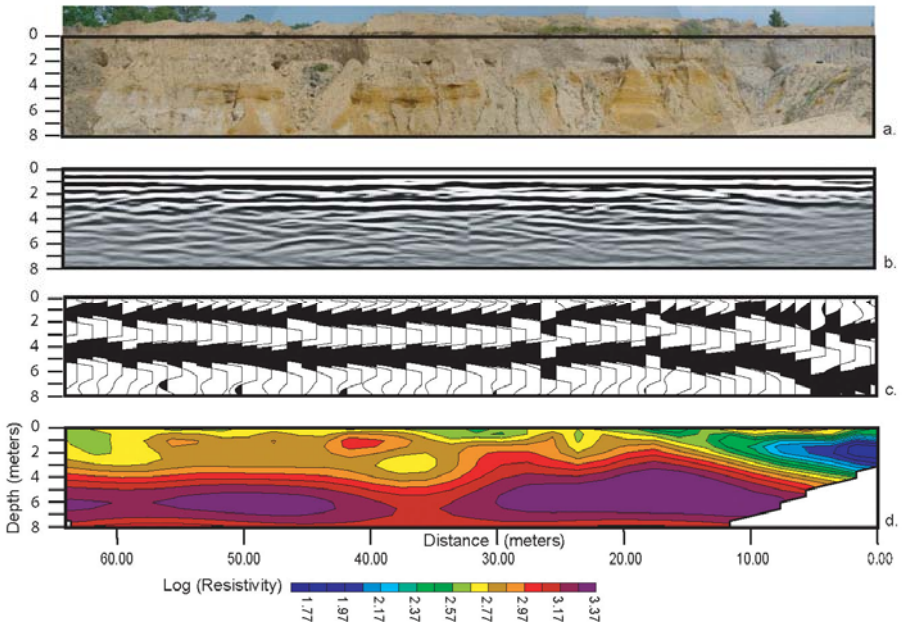


图 4.2. 位于密西西比州的一个砂砾石采石场剖面照片 (a)，以及用于研究的三种地球物理方法：探地雷达法 (b)，高分辨率地震法(c)，直流电阻率法(d) (Bowling et al., 2007)

4.2.3 现场多参数水质监测 （On-Site Multi-Parameter Monitoring System）

一种新兴的大量获取现场水质数据的方法 — 多参数水质监测系统，正逐渐为水文地质学者所熟悉。这些所谓的“数据探测器”包含多种探头或传感器，以便同时测量各种不同的参数（图 4.3）。将数据探测器与数据记录系统相连，可以实现数据的连续收集；与数据读取仪表相连，可以实现原位数据采集。目前，数据探测器中常用的

探头有溶解氧、电导率、温度、pH、氧化还原电位（OPR）、深度（压力）、盐度、硝酸盐含量、铵、浊度、叶绿素、氯化物、玫瑰精 WT（一种荧光颜料，广泛应用于水流路径的研究）。此外，数据探测器也可用于悬浮系统，在湖泊与河口生态系统中进行水化学自动垂直取样。数据探测器在数据采集方面颇有价值：较高的瞬时分辨率保证了溶解氧和温度的迅速测量；较高的空间分辨率保证了湖泊盐度和温度垂直剖面的准确性。

数据探测器目前已经可以用于测量一些重要的化学成分，但因为其昂贵的费用限制了研究者个人能够一次同时使用的数量。此外，一份关于水文科学仪器新进展的报告（http://www.cuahsi.org, 2006）指出，这类探头的使用会受到种种条件的限制。很多探头在生物堆积的影响下产生测量误差和漂移，溶解氧探头所受影响尤为严重。在传感器上增加擦拭装置可以稍微减轻生物堆积的影响。此外，能够提供生物化学方面最丰富数据的探头（如硝酸盐和铵）检测限太高，远远高于环境背景值，在受人类活动干扰较少的水生生态系统中尤其明显。目前，大多数的水文－生物地球化学研究中所需要的可选离子电极都不能达到检测限标准，且已有电极的使用寿命很有限（几个小时）。



图 4.3. 美国 In-Situ Inc.的原位多参数水质监测系统示意图 (from http://www.in-situ.com)

水质研究中另一项比较有前景的新技术是原位湿法化学分析仪，利用该仪器可以对很多生物地球化学无机离子进行湿法化学分析，如硝酸盐、铵和磷。图 4.4 显示的是一个例子。与可选离子电极相比，原位湿法化学分析的检测限更低，且能测定某一背景值下（通常较低）某些重要的生物地球化学成分的含量。该分析仪可用于测定较短时间尺度内（分钟）溶质的含量，以获取密集的数据，进而对其生物地球化学现象进行更深入的分析。虽然原位湿法化学分析是一种有效的新方法，但其分析仪价格过于昂贵，导致很多研究者无力购买，为提高试验精度而同时采用多种仪器的可能性也就更小。总体来说，虽然该方法尚未得到广泛应用，但已经经过比较好的检验，而且现在就可以使用 (http://www.cuahsi.org, 2006)。



图 4.4. 美国 EnviroTech LLC 的原位湿法化学分析仪示意图
(from http://www.n-virotech.com)

4.2.4 遥感（**Remote Sensing**）

解决“大视野”科学问题的研究趋势，要求我们监测并观察各种尺度内的水循环：区域尺度、大陆尺度乃至全球尺度（Becker, 2006）。基于卫星的遥感技术逐渐成为研究区域和全球范围水循环的重要工具。遥感可以提供大量的数据，且其采集成本是地面数据无法比拟的。要收集全球尺度内的水文数据，遥感或许是唯一可行的方法。Becker（2006）总结了目前有可能用于地下水调查的各类基于空间的传感器 (见表 4.1)。遥感技术的飞速发展，使我们能够：（1）利用航空影像更加精细地描绘土地类型和地面覆盖情况；（2）将卫星数据与地面测量相结合，更好地评价蒸散发及地下水补给；（3）利用干涉合成孔径雷达（InSAR）数据，确定地面沉降；（4）利用 NASA 重力恢复与气候试验（GRACE）数据，近似确定大范围内地下水储量的变化。遥感技术的进步将为水文科学的发展带来新的机遇，遥感技术所提供的水文数据之多是以前无法想象的。

表 4.1. 目前对地下水调查有应用前景的基于空间的传感器一览表 (Becker，2006)

Sensor	Launch Year	Ground Resolution (m)	Precipitation	Surface Temperature	Soil Moisture	Water Storage	Snow Water	Land Cover	Topography
AMSR-E	2002	5400–56,000	×	×	×		×		
ASTER	1999	15, 30, 90		×				×	×
AVHRR	1991–2003	1100	×	×	×		×		
GRACE	2002	300,000				×			
ENVISAT-RA2	2002	~1000		×					×
Landsat-7	1999	30, 60		×				×	
MODIS	1999	250, 500, 1000		×				×	
OrbView-2	1997	1100		×				×	
OrbView-3	2003	1, 4		×				×	×
RADARSAT-1	1995	8–100			×				
SRTM	2000	30, 90							×

4.3 基于互联网的信息存储、发布、共享系统

在过去的十年里，信息技术得到了迅猛发展。计算能力、存储容量和网络基础设施的飞速进步，使我们可以进行海量科学和工程数据的收集、存储和共享。信息学

相关的新领域逐渐开始作为大气学、生物多样性、生物医学、地球科学和海洋学等学科的子领域出现。例如，美国能源部 (DOE) 在 2001 年发表了一份研讨会报告 — “美国非饱和带科学与技术发展计划”，其中一个关键部分是建立“…一个虚拟国家图书馆（virtual library），用于收集主要非饱和带污染区的地质、水文地质、化学、生物学数据，以及可以利用这些多学科数据的实验数值模型”。

在美国，为了满足科学团体的需要，美国联邦政府和其它的组织增加了资助基金的数量，以支持各学科间新的信息技术的发展。例如，美国自然科学基金会于 2000 年设立了信息技术研究计划（ITR 2002），鼓励信息技术在所有的科学、工程和教育领域的应用，以及创新的基础设施的发展，以支持信息技术研究和教育。这些行动被称为“美国未来科学的先期投入”（http://www.nsf.gov, 2002）。

与中国其它自然科学存在的问题类似，中国水文学研究的瓶颈在于缺乏数据共享机制。某一区域或场地的基础数据可能分散于某些组织甚至个人手中，难以实现数据的一致性和标准化。幸运的是，中国政府、各种科研基金机构正在逐步解决这个问题，一些共享水文数据的互联网站点也相继出现（比如, 国土资源科学数据共享网站 http://www.resdata.cn）。然而，中国水文学的计算机信息基础设施与美国等一些发达国家之间仍然存在巨大的差距。科技部、国家自然科学基金委和中国地质调查局应该继续加大投入，发展计算机信息基础设施和信息技术研究，以促进水文数据在互联网上的存储、发布和共享。

下面列出了美国地下水研究中的一些最重要的数据源和信息系统 (Zheng et al., 2006)，可以作为发展中国水文学赛百结构 (cyberinfrastructure) 的借鉴：

- 美国地质调查局国家水信息系统（NWIS） — 流量、水质和地下水位；网址：http://waterdata.usgs.gov/nwis.

  该站点提供了 50 个州、哥伦比亚特区以及波多黎各等地区大约 140 万个点的水资源数据。这些数据被分为三类：“地表水”—河流、湖泊和泉的流量及其水位；“地下水”—井水位；“水质”—河流、湖泊、泉、井的化学和物理数据。可以获得各点的实时数据。
- 美国地质调查局国家水质评价（NAWQA） — NAWQA 各研究单元的水文学、水质和生物学数据；网址：http://water.usgs.gov/nawqa/.

该站点含有或链接了全国范围内几十个研究单元（流域）的化学、生物和物理水质数据。美国地质调查局从 1991 年开始系统地收集这方面的数据，其中包括：a) 含水层沉积物中的化学含量，水生生物；b) 各点、流域、井和网络特征的描述；c) 固定采样点的日流量；d) 采样井的地下水位；e) 地表水点和井；f) 营养物、杀虫剂和挥发性有机物样本；g) 地层沉积物和水生有机组织的样本。NAWQA 研究区的流量、水质和地下水位数据从 NWIS 网站也可以获得，但生物数据只能从 NAWQA 网站获得。

- 美国环保局 STORET — 水质、生物和物理数据；网址：http://www.epa.gov/STORET/.

  美国环保局将 STORET（STOrage“储存”和 RETrieval“检索”的缩写）作为水质、生物和物理数据的信息库。它是历史数据中心（Legacy Data Center，LDC）的现代化扩展，该中心也受美国环保局支持。LDC 是一个静态的档案数据库，而 STORET 是一个含有水质数据的动态操作系统。LDC 含有历史上的水质数据，最早可追溯到 20 世纪早期，一直延续到 1998 年末。STORET 的数据始于 1999 年，同时也含有 LDC 中历史数据的备份。两个系统都含有地表水和地下水原始的生物、化学和物理数据。数据收集者包括联邦政府、各州的地方机构、印第安部落、志愿组织、学校和其它机构。与 NWIS 相比，NWIS 只包含了美国地质调查局收集的数据，而 STORET 含有很多组织收集的数据。

- 美国地质调查局与环保局的国家水文地理数据库（NHD） — 数字化空间数据；网址：http://nhdgeo.usgs.gov/.

  国家水文地理数据库（NHD）是一个综合的数字化空间数据系统，包括地表水的特征，例如湖泊、水塘、河流、泉及井等的信息。在 NHD 中，地表水特征被组合成为“河段”，可以提供一个框架，将水数据与 NHD 的地表排水系统链接起来。利用该链接可以按照从上游到下游的顺序进行水数据的分析和显示。NHD 有几个变体—全国范围内都有 1:100,000 的中等分辨率数据，部分州有 1:24,000 的高分辨率数据。

- 美国地质调查局无缝数据分布系统 — GIS 和地质空间数据；网址：http://seamless.usgs.gov/.

无缝数据分布系统（SDDS）提供了一种利用“国家地图”获取地理空间数据的途径，在国家基础层面及其它地理空间数据层面上可以自由下载。这些层面被划分几个框架类型，包括：地点、建筑物、运输、边界、水文、正射影像、土地覆盖和高程。无缝数据服务器对于下载数字高程模型数据和国家土地覆盖数据库尤其有用，两者都是栅格数据库，通过地图查询可以选择美国内任何地区范围内的数据。

- 国家气候数据中心（NCDC）气候数据在线（CDO） ─ 降雨量、温度、以及其它的气象参数；网址：http://cdo.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo.
  国家气候数据中心（NCDC）是世界上最大的气候数据档案馆，包括各种空间和时间精度的降雨量和温度。
- 美国长期生态研究（LTER） ─ 气候、水文和生态数据；网址 http://www.lternet.edu/data/.
  该网站含有和链接了几十个由美国国家科学基金会资助的 LTER 研究网点上的气候、水文和生态数据。2000 多个生态数据库是整个网络信息系统的一部分。该系统用于促进数据的交换和整合，以满足生态研究的需要。

4.4 在中国建立发展全国性观测联网的必要性

中国地下水资源量多年平均为 9234 亿立方米，约占淡水资源总量的三分之一。近三十年来，全国地下水开采量以每年 25 亿立方米的速度递增，现状开采量近 1100 亿立方米/年，约占全国供水总量的 20%，地下水已成为许多地区（尤其是北方）不可或缺甚至是唯一的供水水源。在华北和西北地区，城市供水总量中地下水分别占 72%和 66%；全国耕地面积的 40%需要地下水灌溉；农村地区普遍饮用地下水。

由于地下水的过量开采和开采布局不合理，全国已形成大型地下水降落漏斗 100 多个，地下水超采区 62 万平方公里，诱发地面沉降 7 万平方公里，岩溶塌陷坑 4 万多个。北方地区因河流上中游过度拦截地表水，造成下游地下水盐失衡，湿地消失、植被死亡、土壤荒漠化迅速发展。城市与工业“三废”的不合理排放，使 40%的

城市地下水污染趋势加重。化肥、农药的大量使用，对农牧区浅层地下水的污染尚不十分清楚。

地下水资源的严峻形势，与之相关的生态环境问题和地质灾害日趋严重，已成为制约经济社会全面、协调、可持续发展的重大战略问题。中国地下水监测现状难以满足经济社会发展的需求，迫切需要健全完善地下水监测网络。下面简要总结建立完善中国地下水监测网络的必要性。

第一，建立完善地下水监测网络，是监控中国中东部地区日趋严重并已成为经济社会发展特别是城市化进程重要制约因素的地质灾害和其他环境地质问题的重要手段。控制和缓解地面沉降、地裂缝、岩溶塌陷、海水入侵等地质灾害的第一步是健全完善地下水监测网络，掌握地下水动态变化，对地下水开采布局、开采层位及开采量进行调整优化，从而达到科学利用地下水资源、防治地质灾害、保护地质环境的目的。

第二，建立完善地下水监测网络，掌握地下水动态变化特点，对地质生态条件做出准确评价，是生态建设与环境保护的基础。西北地区一些典型事例预示着地下水普遍存在着巨大危机。如目前甘肃敦煌月牙泉的水位较 1947 年下降了 11 米，大体代表了整个山前平原的地下水位下降情况。在河西走廊、准噶尔盆地和吐鲁番盆地等地区，形势更为严峻。但由于监测范围十分有限，地下水的总体变化形势很不清楚，难以为退耕还林还草工程投资决策提供可靠依据。

第三，建立地下水监测网络，及时掌握地下水污染的状况和发展趋势，查明污染源和污染途径，从源头上加以控制，是保障供水安全的重要基础。地下水污染具有长期性、隐蔽性和复杂性的特点，一旦遭到污染，将对环境和人类健康造成长期损害，难以治理，甚至无法根治。

第四，欧美等发达国家和中国北京、上海的经验表明，建立长期监测网络，是不断提高地下水资源评价和研究水平，加以科学保护和合理利用，避免出现灾害性后果的重要手段。北京五十年的监测资料为准确评价地下水资源量，保证首都供水，建立应急地下水水源地提供了科学依据。上海通过地下水长期监测，查明了地面沉降产生的原因，为采取综合措施控制地面沉降，保障国际大都市的规划、建设与运营做出了巨大贡献。

第五，建立完善地下水监测网络，是实施国家重大工程建设和运行安全的基础保障。南水北调中线和东线工程建成在即，尽快建立地下水监测网络，是科学评价南水北调工程通水后与地下水之间的相互影响及其生态与环境影响的基础。国家高速铁路网络建设速度不断加快，尽快建立地下水和地面沉降监测网络，是保证高速铁路建设和安全运营的重要基础。

国家级地下水监测网是服务于国家目标的区域控制性的骨干监测网，具有地方监测网难以替代的作用。它将有利于实现区域地下水开采总量控制，有效防治跨省（区、市）地质灾害。有助于提高全国地下水资源评价程度，为国民经济和社会发展规划以及国家重大战略部署提供科学依据。而且，地下水监测是一项服务于全社会的基础性、公益性的工作，地方监测网难以起到国家级监测网的作用。美国、荷兰等发达国家都建立了国家级的地下水监测网络，在提高区域地下水资源调查、评价和研究水平，制定合理利用方案和科学保护措施，避免出现灾害性或灾难性后果等方面发挥了重要作用。国内外的经验也表明，在为政府、社会公众和科学研究提供信息服务与决策支持等方面，国家级地下水监测网具有地方监测网无法比拟的优势。

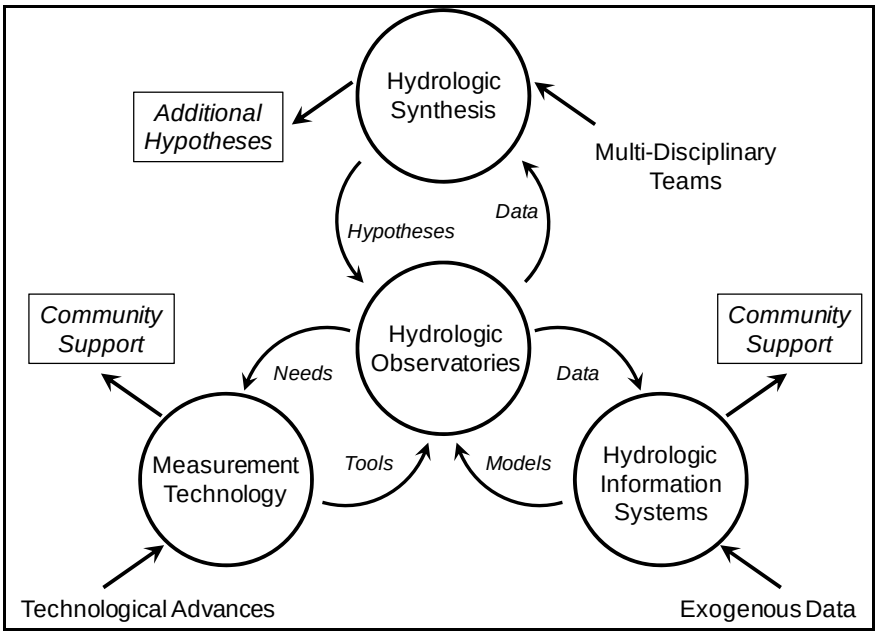
结合中国水文地质条件的实际，国家级地下水监测网建设应以沉积盆地和岩溶水系统为基本单元；并在考虑水文地质条件差异、气候特征、环境地质问题突出以及地下水在社会经济发展中重要性等的基础上，选择建立地下水大比例尺监测示范区和长久的野外研究基地，监测大气降水、地表水（冰川、河流、湖泊与沼泽）与地下水（非饱和带地下水、饱和带地下水）数量、质量及其它们之间相互转化关系，同时重视监测水资源开发与地质环境（地质灾害）、生态环境、土地质量的变化的关系。

插页 4.1. CUAHSI – 美国大学促进水文科学联合会

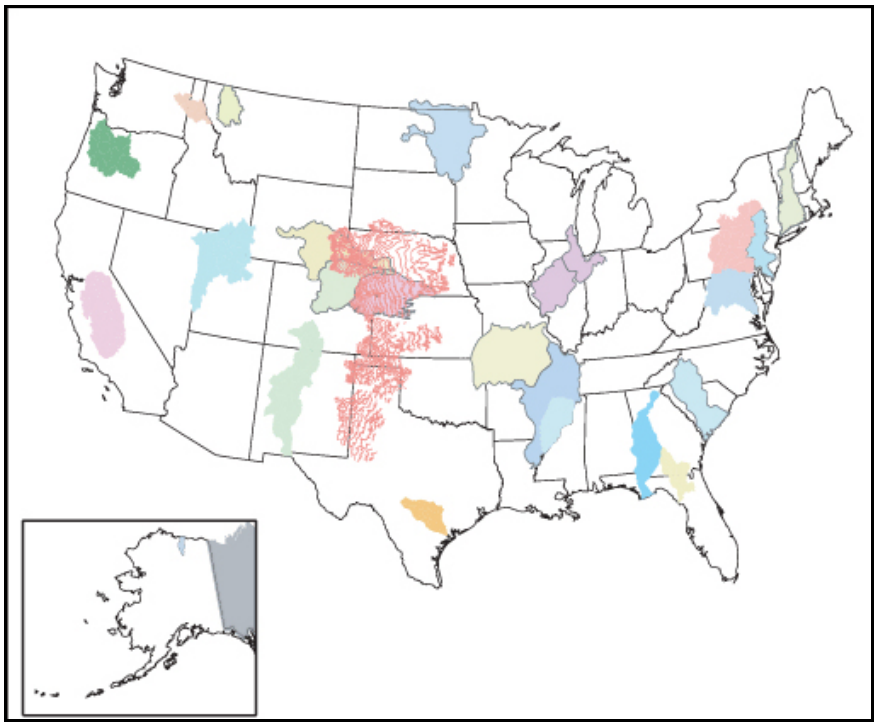
美国大学促进水文科学联合会（CUAHSI）(http://www.cuahsi.org) 是美国国家科学基金会资助的，由 110 多所大学组成的一个组织机构，旨在为水文科学界建立基础设施和服务体系，促进水文科学和教育的发展。通过 CUAHSI，水文科学界可以共同协作，以期获得更多的政府资助投入基础设施的建设，其资助强度可能远远超过个人或单独实验室能争取到的资助的总和。

CUAHSI 主要由 4 个部分组成，如插页图 4.5 所示：水文观测站、水文信息系统、测量技术、水文科学综合。这 4 个部门之间联系密切。通过水文观测站可以获得大量的不同时空尺度上的数据，水文信息系统可以提供简易而快捷的网络支持，以实现上述数据的管理、可视化和模拟。要成功地获得综合的、连贯的、多尺度、多学科的水文数据，需要精确的测量技术。最后，通过水文科学综合将不同知识背景的研究人员集中起来，共同研究同一复杂的多面性的问题，而该问题的解决方案往往在于传统学科的交叉。

水文观测站是 CUAHSI 的中心部分；每个建议的观测站的面积约为 10,000 km^2，同时设有数据收集和实验系统，以阐明关键性的水文科学问题。由 CUAHSI 资助的可能的野外观测网络如插页图 4.6 所示。水文观测站的主要目的是获得界面和水文边界处（地表－大气，地表－地下水，地下水－地表水，地表－地表水）的连续的、长期的时空资料，包括径流方向、流量、水的滞留时间、沉积物、营养物质及其他污染物等方面。在这些界面附近的研究最有可能取得突破性的成果，促进我们对不同的气候和地形下的大陆水动力学的了解。



插页图 4.5. CUAHSI.主要的水文科学组成部分 (http://www.cuahsi.org)



插页图 4.6. 建议的美国水文科学观测网 (http://www.cuahsi.org)

参考文献

Becker, M.W., 2006, Potential for satellite remote sensing of ground water, *Ground Water* 44(2):306–318.

Bowling, J.C., C. Zheng, A.B. Rodriguez, and D.L. Harry, 2006, Geophysical constraints on contaminant transport modeling in a heterogeneous fluvial aquifer, *J. Contam. Hydrol*., 85:72–88.

Bowling, J.C., A.B. Rodriguez, D.L. Harry, and C. Zheng, 2007, Integrated geophysical and geological investigation of a heterogeneous fluvial aquifer in Columbus, Mississippi, *J. Applied Geophysics*, 62:58–73.

Estrin, D., W. Michener, G. Bonito, and the workshop participants, 2003, Environmental cyberinfrastructure needs for distributed sensor networks: A Report from a National Science Foundation Sponsored Workshop, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA. 12-14 August 2003.

Guérin, R., 2005, Borehole and surface-based hydrogeophysics, *Hydrogeology Journal*, 13:251-254.

Hubbard, S., and Y. Rubin, 2002, Hydrogeophysics: State-of-the-discipline, *EOS*, 83(51), p. 602, 606.

Rubin, Y., and S. Hubbard, 2006, *Hydrogeophysics*, Springer, Netherlands, Water and Science Technology Library, Volume 50, 523 p.

Selker, J.S., L. Thévenaz, H. Huwald, A. Mallet, W. Luxemburg, N. van de Giesen, M. Stejskal, J. Zeman, M. Westhoff, and M. B. Parlange, 2006, Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems, *Water Resour. Res*., 42, W12202.

Zheng, C., J. Lin, and D.R. Maidment, 2006, Internet data sources for ground water modeling, *Ground Water*, 44(2):136–138.

第五章　教育与人才培养

5.1 人才培养体系的建立

新中国成立初期，大规模的基本建设，特别是矿山、水利和大型工业企业的建设，需要进行水文地质及工程地质勘察。而当时中国这方面的人才培养和专业教育几乎是一片空白。为适应第一个五年计划（1950-1955）建设的需要，南京大学和东北地质学院设立了二年制的水文地质与工程地质专科，有效地缓解了新中国建设初期对地下水专业人才的需求。1952 年，北京地质学院（文革中迁至武汉，1987 年组建成立中国地质大学，现京、汉两地办学）和东北地质学院（后更名长春地质学院，2000 年合并为吉林大学）成立水文地质工程地质系，正式开始了中国水文地质与工程地质专业的本科教育。1956 年，成都地质学院（后更名为成都理工大学）设立了水文地质与工程地质本科专业。之后，煤炭、冶金、核工业等部属院校也陆续设立了水文地质与工程地质本科专业。1978 年后，在原宣化地质学校，西安地质学校基础上分别建立的河北地质学院（后更名为石家庄经济学院），西安地质学院（后更名为西安工程学院，2000 年合并为长安大学）也设立了水文地质与工程地质本科专业。至此，中国建立了较为完善的水文地质本科教育体系。1956 年，中国首批水文地质专业的研究生在前苏联专家的指导和帮助下毕业于北京地质学院。1978 年，全国恢复研究生教育制度，相关院校开始培养水文地质专业的硕士及博士。

自 1952 年至 1978 年，中国水文地质专业的人才培养体系基本采用前苏联的相应专业和课程体系。20 世纪 60 年代以前的教材大都从前苏联引进。20 世纪 70 年代开始，中国学者开始较多了解美国、欧洲和日本的水文地质教育和科学研究方面的动态，并及时在教材建设方面得到体现，尤其是 20 世纪 80 年代，集中出版了一批水文地质专业教材，基本满足了当时人才培养和科研、生产需要。

1998 年 7 月，教育部修订学科专业目录，“水文地质与工程地质专业”被分解，并入三个二级学科，即“水利工程”一级学科下的“水文学及水资源”（本科专业为“水文与水资源工程”），“环境科学与工程”一级学科下的“环境工程”本科

专业为“环境工程”），和“地质资源与地质工程”一级学科下的“地质工程”（本科专业为“土木工程”）。

经过 50 余年的发展，中国的水文地质教育体系基本形成。国家自然科学基金委员会地球科学部委托课题（D04244013）《中国地质学基础研究人才发展战略》报告统计的数据显示，以地下水有关的研究课题为博士论文选题的在校博士生到 2004 年已经超过 100 人（图 5.1）。

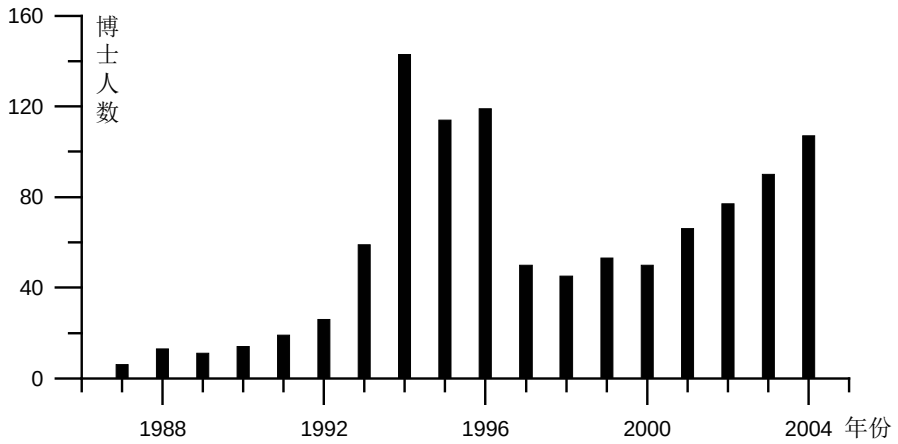


图 5.1. 中国 1987－2004 年水文地质与工程地质专业(方向)在校博士生人数

2004 年，在高校教师中，从事水文地质学教学科研的 257 人，占高校地质科学教师总量的 7.9%；环境地质学 186 人，占 5.7%；工程地质学 435 人，占 13.4%。这些教师中拥有博士学位的占 28%，拥有正高职称的占 27%，45 岁以下的占 80%。换言之，这是一支以年轻学者为主体，学历层次总体仍有待进一步提高的教师队伍（图 5.2）。

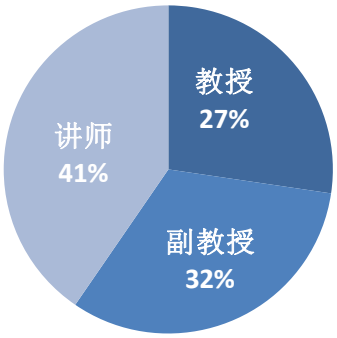


图 5.2. 中国高等学校 2004 年水文地质相关专业(方向)在校教师职称分布

5.2 人才培养模式的特点

北美和欧洲的水文地质教育则注意区分本科和研究生层次的不同侧重点。在本科培养计划中，不单独设立“水文地质”或“地下水”专业；而在研究生，尤其是博士生阶段，则大多在地质系或地球科学系中设立水文地质或地下水科学的研究方向，这些研究生的本科专业多为“地质学”或“地球科学”，也有来自“土木工程”、“环境科学”、“地理学”等其它理工科专业。美国的本科教育相对较强调基础的宽厚，而研究生教育则强调专业的精深，因此，地下水相关的课程一般只在研究生阶段才系统学习，博士生培养的基本要求是使研究生成为可独立承担本学科领域创造性研究的高层次人才。

中国在 1998 年学科专业目录调整以前的水文地质人才培养体系，从本科到博士阶段基本与俄罗斯的相近，如莫斯科大学地质系至今仍招收“水文地质与工程地质”本科生和“水文地质”、“生态水文地质”和“油气盆地水文地质”等方向的硕士生；莫斯科地质勘探学院则招收“地下水与工程地质勘察”的本科生，并设立“经济水文地质与工程地质”专门化方向。俄罗斯的水文地质教育从本科即开始强调专业的精深，比较重视学生实践能力的培养。

中国现阶段社会发展过程中，地下水不但是水资源中的重要组成部分，也是影响人类生存环境的重要因素之一。地下水科学是以地质学理论为基础，研究人类活动影响下及其与岩石圈、水圈、大气圈、生物圈耦合作用下，地下水系统结构、组成和地下水水量、水质的时空变化规律，研究运用这些规律如何兴利避害，以造福人类，同时研究地下水开发利用引起的地质灾害和环境问题并进行控制调整的一门学科。在解决人类面临的资源短缺、环境污染、地质灾害、生态环境恶化、气候变化、危险废物和温室气体处置等诸多问题中发挥着越来越重要的作用。水资源及其环境问题已成为当今世界的主要难题，中国作为一个水资源十分紧缺的国家表现得尤为突出，水资源的短缺及其伴随的环境问题，已经成为制地区社会、经济、环境协调发展的主要因素。中国 310 个城市以地下水为供水水源、北方城市生活用水的 90％靠地下水。此外，绝大部分的环境地质问题或灾害均与地下水有关，地下水开发利用不当而产生的地面沉降、岩溶塌陷、海水入侵等地质环境问题在中国相当普遍，存在大量的科研与

工程问题需要本专业开展深入研究和咨询服务。随着经济发展对水资源需求的增加和地下水超采加剧，地下水资源和环境问题将会更加突出，对该领域的人才需求将更加迫切。

目前，中国本科专业体系中，与地下水科学相近的专业为“水文与水资源工程”，但两者在培养目标、学科定位等方面存在很大的区别，前者突出的特点是培养的专业人才必须具有坚实的地质理论基础。可以预测，地质基础更扎实、专业更对口的“地下水科学与工程”专业将会有更好的就业前景。在资源、工程和环境等领域内，已形成一个与地下水为核心的广泛的人才需求市场。以地下水为特色的“水文与水资源工程”专业在中国仅有中国地质大学（北京、武汉）、吉林大学等五所大学，毕业生供不应求。据近三年统计，中国地质大学（北京）水文学及水资源工程(地下水方向)专业的一次性就业率分别为 94％ (2002)、95％ (2003)、97% (2004)；其中在地下水相关专业的就业率达到 90%。其他高校的情况也差不多。

就现阶段中国社会发展的需求而言，地下水科学领域内大学生的培养模式可以概括为：具备地球科学基本理论知识，掌握地下水的形成、分布、运动和变化等方面的专业知识和技能，并能从事地下水资源的勘查、评价、开发、管理，以及地下水环境和地质环境的调查、监测、评价和治理的工作。

5.3 大学生教育

由于地下水资源具有一般地质矿产资源和地表水资源的双重属性，使得这门科学在研究地下水运动时需要借助于水力学和流体力学的基本原理；在研究地下水的区域水量均衡、资源保证率以及地下水径流特征时，需要借助于水文学和水资源学的基本理论；而在研究地下水的埋藏分布特征、水量、水质形成条件以及地下水的各种区域性规律乃至环境地质效应时，则必须依靠地质学的各种理论。此外，地下水不仅是一种资源，它同时又是一种重要的地质营力、地球环境的一个重要组成部分和地质环境信息的一种重要载体。任何用地质学或水文学来覆盖或替代它的主张或做法，既不利于这门学科的成长，也不符合科学发展取向的自然客观规律。

中国目前所处的经济发展阶段，决定了市场就业或解决实际问题的专门知识和

技能培养，仍然是本科教育阶段不可回避的现实问题。这些技能在实际工作中是非常具体的，如：能对一个地区的含水层和构造的空间分布进行野外调查；结合含水层的分布状况，通过地表水体和地下水出露点的调查，能初步分析地下水的补给、径流和排泄条件；对于水文地质钻探的岩性进行描述和分析；能进行常规的野外水文地质试验，分析试验数据获得含水层参数；进行野外水化学取样，并了解各种水化学成分测定方法；能结合地下水水化学成分，分析地下水补、径、排条件；了解物探确定含水层和断裂构造的基本技术和方法；了解遥感确定构造、地层和地表植被分布的基本技术和方法；建立地下水流动概念模型的能力；能应用地下水模拟软件计算渗流场的水头和流量；具有综合评价地下水资源量和开采量的能力；能撰写地下水调查或研究报告；等等。因此，设立“地下水科学与工程”或恢复“水文地质”本科专业，既可以解决就业市场对学生的需求，又可以避免目前在“水文与水资源工程” 专业名义下培养水文地质专门人才遇到的尴尬局面。这种局面产生的原因是中国学术界对“水文学与水资源”的习惯性理解为主要面向地表水研究，即该专业主要是培养从事地表水资源工程和水利施工中相关问题的设计、评价、开发、管理与保护的教学、基础研究和应用的高级工程技术人才，学科门类上属于水利工程。而水文地质专业面向的是地下水研究，学科归属为地质科学。

地下水是地球系统中最活跃的因子。近年来得到快速发展的地球系统科学，对于地学青年人才培养提出了新的更高的要求。总的来看，地球系统科学尚未启动进入中国高校教育的行程。地球系统科学要求从数学、物理、化学和生物学等基础知识体系上重新审视地球系统过程，从根本上给学生以交叉学科的思维方式和研究方法的训练，使学生能够在进入地球科学领域后即获得较广阔的学术视野。就可持续发展领域的研究而言，定量化和系统化是其必然趋势。因此，适应地球系统科学发展的需求，地下水科学的学生必须具备坚实的自然科学基础知识。

对地下水系统的结构、组成和演化特征的精细刻画，是地下水科学研究的基础和取得创新的重要保障。因此，探测（物探、遥感）、测试分析和模拟计算技术的应用至关重要。因此，地下水科学专业的学生必须了解、掌握甚至发展这些新技术和新方法。

地下水的资源和环境属性决定了从事地下水研究的科技人员，应当积极地参与水资源管理、区域规划等决策过程。因此，学习和应用环境科学、经济学、法学等领域的知识，可以有效地提高地下水科学领域的专家参与决策的能力。

值得一提的是，教育部于 2006 年批准中国地质大学（北京）设立“地下水科学与工程”本科专业。从该校的专业培养计划和课程设置中有关地下水的专门内容，可以了解该学科人才培养的特点。

1、培养目标

具有扎实数理基础和地球科学基本理论，受到应用基础研究和技术开发方面的科学思维和科学试验训练、具有良好的科学素养，掌握地下水形成和演化机理、地下水及其环境调查、监测、评价、开发、治理等基本知识和技能，具有独立获取知识、综合分析与解决问题的能力和开拓创新的精神。掌握一门外语，能熟练阅读本专业外文文献。了解本专业学科发展的动向。

2、课程设置

课程设置采取“公共基础课+专业课+实践必修课+选修课”的分段组合方式，公共基础课主要安排在第一、第二学年，总学时数为 1480 学时，总学分为 88.5 学分。专业基础课和专业主干课主要安排在第三、第四学年，总学时 752 学时，47 学分，选修课主要安排在第三学年第二学期和第四学年第一学期，专业选修课不少于 15 学分。

（1） 公共基础课

法律基础、哲学、社会主义思想等课（168 学时）

大学英语（256 学时）

高等数学、线性代数、概率统计（280 学时）

大学物理、实验物理、工程力学（256 学时）

大学化学、化学实验（96 学时）

计算机应用（144 学时）

大学语文（32 学时）

（2） 专业基础课

地球科学概论、矿物与岩石、地层与构造、地貌学

复变函数、积分变换、数理方程

地下水科学概论、地下水水力学、地下水水化学

（3） 专业课程

地下水勘察、地下水资源评价、地下水模拟、地下水环境

（4） 专业实习

本科四年有三次专业野外实习：地质认识实习是培养学生观察基本的地质、地理、水文现象和掌握一般的野外地质工作方法；地质基础实习，培养学生观察野外地质现象、掌握野外地质工作的基本方法和地质报告编写；地下水专业实习，培养学生观察和描述水文地质现象，掌握野外水文地质工作的基本方法和水文地质填图方法。

（5） 毕业设计

学生在导师的指导下，学会收集整理资料、参阅参考文献，并运用所学的专业知识，独立完成毕业设计（论文）。毕业设计（论文）完成后，组织答辩，并给出优秀、良好、及格或不及格的成绩。

3、学制学位

学制四年，学生修满所规定的最低毕业学分，达到培养目标规定的各项要求后，授予工学学士学位。

5.4 研究生教育

近几年，中国地质大学、南京大学、吉林大学、长安大学均设立了“地下水科学与工程”硕士、博士招生点。中国的地下水科学领域的研究生尤其是博士生的培养质量亟待加强，从论文选题的前沿性、研究手段的先进性、研究的学科跨度和发表成果的国际性等方面与发达国家尤其是北美仍有较大差距。应当大力加强研究生导师队伍建设，重视并切实加强基础研究，通过承担基金项目、开展国际合作、实施国际同行的学术评价标准等方式，提高研究生的培养质量。

地下水科学是以地质学理论为基础的。必须强化学生的地质基础，尤其要重视通过野外实践和室内模拟试验，强化学生的地质思维和岩石矿物、构造、地层、地球

化学等地质学基础知识。应鼓励和吸纳地质学专业的本科生进入地下水科学的研究生行列。

为了解决本科阶段存在的基础宽厚与专业精深两种培养目标之间的矛盾，可以尝试本－硕连读（6 年）的培养模式，前三年主要用于基础训练，后三年用于专业训练和拓宽知识面。

提高教师的学术水平，是人才培养质量的根本保证。要通过制定与国际先进水平接轨的学术评价标准、加大师资培训力度、积极开展产学研合作和国际合作，造就一支地下水科学领域的高水平教师队伍。

必须重视教学和科研的基础条件建设。应集中建设一些不同层次、不同类型的高水平的教学科研平台，包括重点实验室、工程中心、产学研合作基地和野外观测台站（网），为地下水科学领域的人才培养提供硬件上的保障。

第六章　优先研究领域

6.1 引言

前面我们已经概述了中国地下水科学的现状和当前国际地下水研究的前沿。本章我们讨论推动中国地下水科学应该强调的优先研究领域。为了讨论方便，优先研究领域的叙述还是和前面的章节一样，以地下水科学各子学科的形式分类进行。但是，这种安排是带有一定随意性的，因为不同子学科的优先研究领域难免会有所重叠。此外，创新性的研究通常需要两个甚至更多个子学科的交叉。因此，下文对中国地下水科学优先研究领域的讨论应该从整体上看，把它当作一个有机结合体。

本章所列优先研究领域的编排并没有特定的顺序，其内容选择也不可避免的带有战略小组的 12 位成员的主观判断。不过，我们对这些优先研究领域已经经过了反复的讨论、探讨。我们相信，这些优先研究领域的发展能够有力地推动中国地下水科学的发展，同时缩小与发达国家的差距。我们也认识到，科研的进步与高质量的基础研究数据、先进的教育和培训体系是密不可分的。尽管本章主要讨论优先研究领域，下一章将涉及有关教育和数据的策略问题。

6.2 区域水文地质与地下水管理

为了与当前的经济社会发展相适应，中国区域水文地质研究需要在以下几方面优先研究：

- “人类－自然”共同作用下的区域地下水形成演化规律

以盆地分析和地下水流系统理论为指导，综合利用多学科研究方法（地质构造、水文地质、第四纪地质及地貌、地球物理、水文地球化学及同位素、古气候和岩相古地理、历史地理、考古、遥感等），研究第四纪以来地质历史时期（包括全球气候变化）区域含水层系统和地下水流系统的形成、演化机理及其系统特征以及区域地下水流系统与区域水文循环系统之间相互作用；研究大气降水在不同特征的水文地质单元（单一的潜水含水层、大厚度多层含水层、黄土地区、岩溶地区等）的入渗补给

机理与定量评价；研究浅层地下水、地表水体、非饱和带水、蒸发蒸腾的转化关系与定量研究，探索有效蒸发与无效蒸发的转化关系；研究地下水与其所赋存介质之间水文地球化学过程，研究不同级次地下水系统之间物质、能量的输运（迁移）、转化与聚集过程，探索深层地下水循环速率、演化特征及其资源性质；研究人类工程特别是大规模的水资源开发利用及跨流域调水等工程对区域地下水系统及生态环境的影响，预测其变化趋势，评价其正负环境效应，提出科学的对策措施；突出区域水资源-生态环境-人类活动之间的相互作用及可持续发展理念，加深大气降水、地表水、非饱和带水和地下水之间的系统性规律的认识。

- 区域尺度含水层系统三维表达与耦合过程的数值模拟

综合利用不同的勘探手段、不同调查尺度上获取的有价值的水文地质信息来准确地刻划区域尺度含水层系统的结构和参数；研究区域含水层系统水文地质参数的表征方法，建立区域地下水数值模拟模型；研究区域模型与局部模型的耦合、水流模型与水质模型的耦合、与地质过程的耦合、与地热模型的耦合、与水文地球化学模型（平衡态与非平衡态）的耦合、与同位素示踪的耦合、以及与水文过程与微生物过程的耦合，解决数值模型在解决地下水循环运动方面的准确性、对宏观决策的支持等方面存在的问题。加强对耦合参数的测量和反演问题的研究。加大力度支持发展综合性耦合过程的数值模型，并鼓励通过跨学科的合作，把这些数值模型应用于研究盆地尺度和长期的流体及相关的物质、能量的输运过程。

- 地下水可持续利用与科学管理

地表水与地下水相互作用及利用含水层调蓄水资源研究。开展关于地表水与地下水水文系统耦合的物理和化学过程对伴随的生态系统的影响研究；着重研究基于地表水和地下水相互转化机理与联合调蓄的可持续利用的区域评价；立足地表水与地下水联合利用，从区域尺度研究地下水人工调蓄的经济合理性和技术可行性，确定适合水文地质条件的人工调蓄方式和方法。

地下水资源补给量科学评价与可开采量评价。在充分认识区域水文地质特征的基础上，探究流域尺度含水层系统地下水资源补给量评价方法；在上中下游兼顾、地表水与地下水联合调蓄、水资源开发与生态环境保护并重的可持续理念下，结合开采

方式和开采地域，研究提出区域地下水可开采量的评价方法；结合经济社会发展规划，分析供水形势，预测用水需求，探讨开发潜力，研究水资源合理配置，提出流域尺度地下水资源开发利用模式和科学的调控方案。

干旱半干旱地区基于水、土资源利用和规划的流域适应能力和风险研究。开发包括区域经济、人口发展、土地利用、气候变化等因素的区域水资源规划和管理的决策支持系统，为决策者制定未来地下水资源的开发提供决策支持，为某项决策内在的不确定性因素进行风险评价，为流域的水资源管理进行多目标规划。

- 地下水污染及开发引起的区域环境地质问题研究

浅层地下水中污染物的迁移转化研究。研究含水层系统易污性评价；研究浅层地下水中污染物的迁移转化规律及污染物质在地下水中的运移机制，包括天然和人类活动引起的重金属、放射性物质和有机物对地下水的污染；科学评价、预测与防治地下水污染；研究物理、化学、微生物的含水层修复技术；认识盆地或流域尺度的污染致灾和迁移，制定流域尺度的管理规划。

水资源开发利用不当引起的区域环境问题研究。研究水资源开发方式或程度不当、地下水过量开采、矿山开发对水资源系统的过度扰动等引发的区域地面沉降与地裂缝、岩溶塌陷、土地沙漠化等环境地质问题的机理和过程，提出科学的防治对策。

土地利用对地下水环境的影响研究。研究不同地区（内陆盆地、黄土、岩溶、城市、滨海等）土地利用方式(农业、工业、建设、水域、林地、交通用地、矿山等)与地下水环境的之间的相互作用；探素地质环境功能区划的理论和方法，为地质环境利用与保护提供科学依据。

- 岩溶地区地下水系统运动机理与可持续开发

鉴于岩溶地下水系统的复杂性和对中国水资源开发利用的重要性，应加强岩溶地区地下水系统运动机理与可持续开发的研究。引进、开发岩溶区找水综合物探新技术，建立适合于岩溶地区的地下水数学模型，研究基质(matrix)与管道(conduit)之间的水流及溶质交换，构建流域尺度地下水循环系统及其时空演变规律模型；揭示岩溶水循环和演化过程与土地利用和生态环境变化之间的相互作用关系，科学评价岩溶地下水资源及其开发利用潜力，量化识别人类活动对水循环及地下水系统影响状况，探

索地下水补给与更新能力机制，制订盆地尺度岩溶水开发利用规划，提出水土资源可持续利用的科学调控对策，为水土资源科学规划和可持续利用提供科学依据。

- 区域地下水监测网的建立、完善与管理

区域水文地质研究水平最终还是取决于高质量的描述地下水数据的质量与数量。因此，区域地下水监测网的建立、完善与管理是推动中国地下水科学的最重要的步骤之一。有关部门应以现有区域地下水监测网点为基础，开展区域地下水监测网（水位、水量与水质）的时间和空间优化研究，完善监测孔布设，确定监测频率；开发完善适合区域特点的水文地质数据库系统，实现信息的有效管理；有效利用地下水监测信息，实现地下水系统的预报预警；中国应当加强研究区域水文地质信息的传播途径和发布形式，为社会公众和决策者提供信息服务。

6.3 地下水水质与水化学

过去40年推动水文地球化学领域科学进步的两个主要的技术方向，仍将继续对未来水文地球化学的发展作出贡献。这两个方向是：（1）分析技术的发展。新的测试方法不断出现，对越来越多的同位素、元素和分子成分能在更低的浓度条件下测定。在日趋严重的污染负荷下，地下水系统中不断出现新的、经常是痕量或超痕量物质，亟待识别和精确测定；（2）计算机和软件技术的发展。这使得地质和地球化学过程的数值模拟在时空尺度、精确性和复杂性上都大大提高。因此，即便是基础研究的资助机构，也应将发展上述两类技术作为重要使命和鼓励创新的基本策略。

运用不同的概念方法和观点，在各种不同时空尺度下，对来自地质、水文地质、地球化学、地球物理、生态学等较宽范围的专业知识领域内收集的信息进行综合和整合，是水文地球化学和地下水系统研究领域未来发展取得突破的关键之一。能反映影响地下水质量和能量通量的各种不同过程的方法，不仅可以提供一个综合各种信息的框架，而且可以提供关于不同过程和不同信息的相对重要性的更好的视角。需要注意的是，这些影响地下水系统的过程在天然条件下都是动力学过程，即使在稳态条件下从地下水系统获得的信息，常常需要按照它对过去或未来的条件的意义进行诠释。相当多的过程影响了地下水系统，在具体场地的研究中，哪些过程起主导作用，

则取决于所关心的时间尺度。需要考虑的过程包括：沉积、压实/沉降、成岩作用、侵蚀、冰川（或冰源）的前进/后退、海平面的升高 / 降低、海潮、陆潮、区域的或局部的构造应力、断裂或塑性变形、热流、微生物种群的生长/休眠/衰减、地球化学或生物地球化学过程、流体对流、气体生成和运移、溶质扩散和对流、放射性衰变及许多其它的反应。把地下水系统置于质量和能量的热力学框架下加以描述和研究，将有助于深刻地揭示其中所发生的过程及其相对重要性。

中国水文地球化学研究的优先领域的确定，需要基于中国的研究现状和资源－环境管理的需求分析。除了上述宏观、长远的观点外，我们提出以下近期的研究领域。需要明确的是，这些领域相互联系、相互重叠，常常需要将其整合，以便使我们获得的知识最大化。

- 同位素示踪剂的发展与应用

利用放射性和稳定同位素对水文地球化学过程的研究需要优先发展。中国并不缺少质谱仪，但是用于地下水方面的研究还很少，有待加强。这方面的资助应该鼓励同位素地球化学家和水文地质学家的合作，这样才能保证用正确的概念模型来解译数据，从而将同位素特征与水文地质系统的特征（如：水均衡和补给、地下水流动、化学平衡及动力学和溶质运移等）定量地联系起来。

- 非饱和带水化学

掌握地下水的化学特征需要对水源以及水与岩土的相互作用进行从补给到排泄的全过程追踪。人们逐渐认识到，包气带的地球化学过程对控制和改变地下水的化学成分有重要影响。这一研究领域在水文地质界还没有引起足够的重视，而土壤学界已经作了大量研究工作。此外，由于非饱和带与大气圈的关系密切又直接影响养分循环，而这些过程直接受非饱和带水文条件的控制，非饱和带水文化学也变得日趋重要。同时由于农田的水土过程直接影响地下水水质，非饱和带的研究对农业区尤其重要。

- 生物过程动力学以及对水化学的影响

地质微生物学是一门新的交叉学科，它的兴起和发展正在重新定义着地学领域的大量问题。水文地质学也不例外。早在 20 世纪 50 年代水文地质学就与地球化学、

构造地质学、石油地质学联系起来。而今天它又与地质微生物学和生物地球化学产生新的交叉。生物过程及其对养分循环的控制、重金属的迁移和固定化、污染物运移、自然降解或修复，这些过程的机理以及对地下水水质影响的研究都依赖于水文地质学与地质微生物学和生物地球化学的结合。这方面的研究应当加强。

- 特殊环境下的水化学

特定水文环境下的水化学过程对中国水资源的可持续性意义重大。由于滨海地区地下水系统很容易受海水的影响而盐度增加。这些地区人口膨胀，经济发展迅速，其地下水质的保护尤其重要。青藏高原是黄河、长江的源头，高海拔永冻层环境对气候变化极其敏感。最近研究表明，由于全球变暖永冻层区域发生了明显的水文响应，如河流径流量的增大和湖泊漏水等。西伯利亚从北向南的永冻层研究表明，河水的矿化度和溶解有机碳含量随永冻层厚度的减少明显增加，因此永冻层随气候的变化会导致一系列水文和水质的变化。岩溶地区对供水很重要，但地质环境复杂，同时易受污染。对这些地区的研究应加以重视。弱透水层和承压单元对水文和溶质运移的响应缓慢，研究难度较大。但是，它们通过渗透和超滤等复杂过程对水质起重要的控制作用。由于其巨大的化学和氧化还原梯度，含水层-弱透水层交界带是微生物活动的良好场所，影响水质。最后，地热系统由于其潜在能源的价值，其地球化学特征的研究也极其重要。

6.4 地下水污染与含水层修复

在美国以及其它西方发达国家，上世纪 70 年代开始，由于地下水污染引起的公众忧虑以及对污染地下水体和土壤的强制治理，污染水文地质学的研究得到了大量资助。同时，寻找高放射性核废料的地质处置场所的需要也促进了地下介质中放射性污染物的迁移转化规律的研究。中国有越来越多的地方发现了地下水和土壤污染，应该在地下水污染和修复方面开展研究。我们认为下列应该是中国地下水研究的优先领域：

- 发展与地下水污染、修复有关的行政管理与法律框架

迫切需要发展行政管理和法律框架，设定饮用水中一系列污染物的的最大允许浓度，同时强制对污染含水层采取修复措施。法律需要制定修复前、修复中和修复后的措施。修复前的行动包括：污染场址的评价用以选择合适的修复技术和采用某一技术所需要的法律许可。实际修复过程本身包括选用方法、预期目标和成本-收益分析。修复后措施包括短期和长期监测，以及分析预期目标是否达到。行政法规和法律文件应该指明相关责任单位负责场址调查和修复的费用。

- 对地下水污染的现状进行系统客观的评价

中国地下水污染研究的最大一个问题是缺少全国性的数据资料。我们强烈建议，在全国和省级层次上对全国的地下水污染进行全面评价。评价内容应该包括城市工业区和农村耕作区的所有主要污染物，包括有机污染物、无机污染物、药品和病原菌。根据评价结果，确定全国优先治理污染场所或者重点调查区域。另外，根据美国水质评价项目的经验，选定由流域和含水层构成的一系列研究区基本可以覆盖全国所有省、自治区和直辖市。需要收集和分析的详细资料包括这些研究区内的杀虫剂、营养物、挥发性有机物、微量元素以及生态等信息。这些监测资料可以提供中国河流、地下水、水生生态系统的长期一致、可比的信息，从而为合理管理和制定政策提供决策依据。

- 含水层物理及化学非均质性对污染物归宿运移的影响

含水层多尺度的物理和化学非均质性对污染物的归宿和运移起重要的控制作用。对于传统溶质运移理论和模型来说，高度非均质含水层中优先流通道的存在是刻画和模拟溶质运移的一个重要挑战。同时考虑物理和化学非均质性给溶质运移的模拟带来了前所未有的复杂性。由于了解并量化溶质运移和转化是评价地下水污染的范围和严重性不可缺少的一个内容，物理和化学非均质性的研究就成了未来一段时间的优先研究领域之一。这一优先领域的研究内容包括：综合地质、地球物理和地球化学特征来描述物理和化学的非均质性、改进或提出新的理论和模拟方法、建立密集布置仪器的示踪试验场址来原位研究溶质运移过程并检验各种理论模型的准确度。

- 发展经济、高效的地下水污染修复方法与技术

传统的地下水修复技术，如抽水-处理法成本高，对高度非均质含水层和非水溶性液体的污染源的处理效果不够理想。因此，研究符合中国需求的高效修复技术应该成为一个优先研究领域。这些技术包括生物修复、植物修复、渗透反应墙以及其它化学和生物的原位处理技术。研究应该侧重于了解主要机理、证明在试点场址和野外实地场址的可行性以及提出场址监测的方法和规则。

- 地下水中的病菌以及它们的控制因素

由于中国有很大部分的居民以地下水为饮用水源，病原菌的控制显得极为重要，急需开展地下水中微生物污染及其影响。首先，需要大量数据资料以更好地定义公众健康问题。这些资料包括已知和潜在的公众健康风险（地方病信息、污染微生物的致病性和微生物风险评价）和地下水中微生物的出现和分布。这些信息首先可以更好地定义任何公众健康问题的性质和范围。其次，需要更好地了解影响和限制地下水微生物污染的因素。主要问题是评价具体场址的水文地质特征以便判断该场址是否易受污染以及地下介质对微生物的运移和归宿起控制作用的物理、化学性质。

6.5 地质微生物与生物修复

由于经济发展的迫切需要，中国对地质微生物与生物修复的研究往往突出方法的实效性，经常直接利用国外先进技术或稍作调整，这样就造成中国地质微生物的研究缺乏后劲和潜力。因此中国应加强地质微生物的基础研究，包括地质环境中微生物的种类、形态、分布特征、营养和生长的一般规律，微生物的代谢、演替和调控、微生物的基因及其所携带的遗传信息表达等，从基础研究中寻找提高地质微生物地球化学作用的研究途径和方法。一些优先研究方向包括：

- 地质微生物群落结构与物质循环

研究地球表层环境的微生物地球化学过程及效应，识别生命不同结构层次（分子、细胞、个体、群体、群落）有机系统，揭示地下水系统物质构成与演化过程的生物作用，探索物质循环与转化的生物过程，以及二者的相互作用的内在关联性。

- 微生物代谢能力与修复理论

研究污染地下水系统微生物的种群结构与代谢能力，构建污染物生物可利用性评价指标，研究微生物代谢能力的高效生物降解增强技术，揭示微生物和植物修复理论与机制，探索物化和生物修复的耦合理论与技术。

研究高效降解复合微生物的降解与集成，高效降解微生物资源信息库，复合生物优化修复理论与关键技术，研究与制备复合功能生物修复材料，构建复合功能生物修复材料指标与评价体系。

- 污染地下水系统生物修复系统

针对目前污染地下水原位生物修复技术的发展趋势和难点，以污染物在地下水环境中迁移转化机理研究为基础，构建污染地下水复合修复系统与指标体系，量化污染物在地下水环境中的行为特征与毒理性表征，揭示迁移转化生物动力学，完善地下水污染修复理论，建立地下水污染原位修复技术指标体系，并在污染物转化的化学与生物作用模式与生物动力学、填充材料与传质效应、微生物酶活性与氮转化内在关联度方面实现创新和突破。

6.6 生态水文地质

生态水文地质学尚有许多领域有待开发和探索。目前，在中国开展生态水文地质学研究，可以优先考虑以下几个方面，以便促进生态水文地质学的发展，为解决许多已经出现的生态问题奠定基础：

- 区域尺度陆生生态状况的定量描述

该问题是研究生态与土壤和水之间相互关系的基础，也是生态水文地质调查的主要任务。生态状况的变化在空间上有巨大的差异性，在时间上又有周期性、趋势性和随机性的特点。以研究地下水运动的尺度来定量刻画地表生态状况的时空变化，从理论和方法上都需新的探索。

- 区域水文地质条件及其变化与植被生态格局的关系

研究不同尺度地下水系统的补给、径流、排泄条件对植被生态格局的控制及其相互影响，尤其要研究在人为作用干扰下，地下水水文过程发生变化对植被生态系统的影响。

- 非饱和带多重界面水分水质转换机制及其生态效应

非饱和带是地下水与地表水系统、大气圈以及植被生态系统相联系的重要纽带，包含水分转化、水质转化等多重界面。大气降水一部分通过非饱和带渗入补给地下水，另一部分为非饱和带持有，供给植物生长，通过蒸发和蒸腾作用与大气进行水量交换。虽然水文地质学家已对非饱和带的毛细水的运移规律曾做过较为详细的研究，但对非饱和带中气态水通过蒸发与凝结作用所引起的水分分布的变化研究较少，这对查明中国西北荒漠植被生长的水环境却显得十分重要。

- 非饱和带的生物和地表生态对水的净化机制

孔隙介质组成的非饱和带具有对渗入水有过滤、吸附、离子交换和生物化学降解作用，尤其是含有粘粒的亚砂土、亚粘土构成的非饱和带，颗粒比表面积大，孔隙多，具有微生物生长良好的水、热、气条件和繁衍空间，在一定条件下，非饱和带的生物降解作用不容忽视，而表层土壤中的植物根系对进入土壤中的水也有净化作用，两者共同构成非饱和带对水的生物净化功能，功能的强弱取决于非饱和带的岩性、结构、植被类型和覆盖率。

- 潜水含水层中地下水各种物理化学过程的生态效应

地下水运动过程中各种物理量（流量、水位、水量等运动要素）和化学成分的变化，会很大地影响土壤性质，导致植被生长条件的变化。例如，土壤盐碱化、沙漠化和荒漠化就是该过程的具体表现。

- 高寒地区气候变化对地下水的影响及其生态响应

高寒地区通常是生态脆弱地区，对气候变化的反应最为敏感，是研究全球变暖对人类生存环境作用机制的理想区域。

- 陆生生态系统分布与地下水系统之间的相互作用及反馈机理问题

生态系统与地下水资源有着密切的关系，完好的生态系统对地下水资源有良好的涵养作用，同时地下水系统也滋养着生态系统，两者间存在密切的依附关系。目前1:20 万水文地质调查范围覆盖中国大部分地区，基本查明了区内地下水系统的结构和特征，若查清生态系统与地下水系统之间的相互作用及反馈机理问题，将有利于从大尺度的角度对地下水资源的可持续利用，做出合理决策。

6.7 非饱和带研究

根据中国的现状和未来的发展趋向，非饱和带水流与溶质运移的研究应该优先考虑这些领域：

- 非饱和带中的多相流问题、时空变异性和尺度转换

在土壤水和溶质运移原理的基础上，研究溶质在各相间的平衡及分配系数和有机流体（如石油及其它活性污染物）在土壤中的滞留、降解和迁移规律，建立包括气体、水和有机流体（惰性与可挥发性）在内的土壤多相流理论和模型及参数测量方法。

利用微观与宏观相结合、实验和模拟相结合、确定性模型与随机模型结合的方法，研究微观尺度（团聚体或孔隙水平）和宏观尺度（小区、农田、区域）土壤物理性状及过程的变异性和相关性，回答“如何实现不同尺度土壤物理参数和过程相互转换”等科学问题。

利用非破坏性（如成像技术、多功能探头定位观测等）技术，进行土壤结构的定量描述及重建，研究田间条件下土壤结构及不同类型孔隙的形成过程及其稳定性。研究植物根系、土壤微生物、水热过程（如胀缩作用和冻融作用）和人类活动影响下（耕作、灌溉、改变植被、建筑等）对土壤结构形成过程和稳定性的影响机制，探讨“区域尺度土壤结构是如何演变的”、“土壤结构的稳定机制”等科学问题。

通过探讨土壤非均质性（地表状态、分层、团聚体、裂隙、生物孔洞等）对土壤持水力、蒸发和渗透过程（特别是优先流过程），以及溶质、重金属、化学农药和气体在土壤中迁移过程的影响，回答“土壤非均质性对非饱和气带中的能量和物质传输的影响机制”问题。其它前沿问题包括：土壤含水量—水分能量状态关系的定量化；水热盐耦合（水势梯度、温度梯度、溶质势梯度）运移；冻融土壤与水的相互作用。

- 非饱和带中物理、化学和生物过程的耦合

土壤水和地下水中污染物的归宿和运移的前沿课题之一就是土壤中酸的累积效应。另外的前沿课题涉及到化学物质与土壤颗粒相互反应的复杂性；微颗粒（胶团）的可能运移过程；微生物群落对污染物和土壤渗透性的影响；微生物群体生长、代谢

下土壤水、热、溶质的非稳定耦合运移。

研究“不同时空尺度下土壤结构与土壤有机质周转等土壤生物过程的耦合机制”；研究“植物-土壤相互作用对土壤水分状况的影响”；从土壤-植物-大气连续体(SPAC)概念出发，结合作物生长模型，建立主要农作物生长季节土壤水分动态变化的数学模型，为合理灌溉提供理论指导；定量描述和模拟根土相互作用过程，研究其对土壤力学性质的影响，为依靠植被治理山体滑坡和土壤侵蚀的生态工程提供理论指导；研究土地植被、土地使用对地下水补给的影响，为地下水模型提供关键的数据。

- 农业可持续发展中的土壤物理、土壤污染问题

第一，通过保护性耕作下土壤结构演变、水热动态、溶质运移和气体交换（CH_4，CO_2，N_2O）过程的研究，探讨“保护性耕作技术对提高土壤质量的机理”。第二，通过研究不同灌溉和施肥条件下土壤水分动态、农田水分平衡、肥料利用率与土壤结构、持水力和入渗性能的关系，探讨“提高作物水肥利用率、降低地下水污染、减少施肥导致的温室气体释放的机理和途径”。

农药对保证中国农业的稳产、高产是十分重要的，同时它又是对地下水资源构成潜在威胁的面源污染物之一，开展中国主要农业区农药淋失风险的评估对保证中国农业的可持续发展、建设生态农业具有重要的现实意义，同时，由于中国是一个总体上缺水的发展中国家，一旦宝贵的地下水资源受到农药的污染，再进行治理修复，无论是技术手段还是资金投入都是不可设想的。从这一点出发，不能象氮肥那样，发现地下水中含量超标，才引起政府和公众的关注。有鉴于此，尽早开展中国主要农业区农药淋失风险评估的研究工作是非常必要的。中国就农药 Atrazine 在土壤中的运移已开展了实验室研究和数学模拟，但田间尺度该农药淋失风险的模拟刚刚起步，区域和流域尺度尚未开展。通过在大尺度上研究农药在非饱和带的运移动态规律，将为中国主要农业区域划分出农药污染的脆弱带并制定相应的预防策略提供参考，这将为政府发展生态农业提供重要的信息。

6.8 随机水文地质学

随机方法是现代地下水研究的重要方法之一。随机方法与模型在水文地质各个领域的应用逐渐增多。随机水文地质学已发展为水文地质学的一个重要分支。地下水流和溶质运移随机理论的完善及随机方法的应用将有助于水文地质学各个领域的发展，加深我们对水文地质过程和机理的理解。现有的随机理论和方法具有相当大的局限性，有待进一步健全和发展。以下为几个优先研究领域：

- 非平稳场的空间变异性和尺度效应

早期的随机水文地质理论大都假设无论水文地质参数场是否具有空间相关性，它们都是平稳的。然而，从上个世纪 80 年代开始收集的数据表明，野外实地尺度的弥散度在几个数量级范围内变化且达不到渐近值。这与自然界多孔介质的渗透系数场在统计上是均质的假设不相符。事实上，越来越多的证据表明，渗透系数可能是非平稳的。因此，有必要发展考虑尺度间相互作用的非平稳随机过程。这种理论需要更多的野外实测资料，从而在此基础上发展描述和模拟大尺度上地下水流和溶质运移变化的理论和方法。

- 时间变异性及其尺度效应

过去的 30 年，我们对空间变异和尺度效应进行了大量研究，但忽略了时间变异及其尺度效应。迄今为止，这方面的研究还很少。尽管这方面的工作已经开始，但我们还不完全清楚地下水位，补给和排泄如何随时间变化。与地下水有关的变量和参数的时间变异及尺度效应还存在大量未解决的问题。例如，地下水位和基流量在大尺度含水层中或在长时间内，即 10 年甚至 100 年，是否也存在时间尺度效应？地下水位以及河流基流量的尺度效应是否存在过渡时间或者间断？时间分形尺度效应的物理过程是什么？降水、蒸腾、土壤含水量、地形和井位等如何影响地下水位和基流量的时间变异和尺度效应？含水层在什么条件下起分形过滤作用？地下水补给到底是个什么样的过程？地下水补给过程如何影响地下水位的分形维数？时间尺度效应的空间变异性是否是由含水层的物理参数，如渗透系数的空间变异引起？若是的话，又是如何影响的？正确回答这些问题将会极大地提高我们对复杂地下水系统的认识。

- 随机水文地质学的应用

从上个世纪 80 年代开始，各种随机理论的提出，极大地提高了我们对非均质介质中的流体运动和溶质运移的理解和认识。但是，随机理论和方法在实际问题上的应用还很少，随机模拟尚未成为水文地质研究的常规方法。就像国际随机水文学著名学者 Dagan 在 2002 年指出的一样，随机理论在水文地质上的应用“是一项极其重要和需要优先考虑的工作”。因此，随机理论和方法在水文地质实践中的应用是当务之急，应优先考虑。

第七章　促进中国地下水科学发展的建议

7.1 加强科研的建议

- 加大优先研究领域的资助强度

在第 6 章“优先研究领域”，我们针对中国地下水科学的现状，结合国际地下水研究的前沿问题，提出了一系列中国地下水科学的优先研究领域。我们建议中国的国家自然科学基金委员会大幅度增加对这些优先研究领域的资助强度，鼓励地下水科学和其它相关领域的交叉，由此推动中国地下水科学整体水平的提高。我们相信，地下水科学的进步将为保障公众的饮水安全，保护脆弱的生态环境，和保证国民经济的可持续发展作出重要贡献。

中国现在资助地下水科研的部委包括国家自然科学基金委员会、国土资源部、水利部、国家环保总局、建设部、科技部、教育部、卫生部，等等。在课题资助和管理体制上尽管还有一些问题有待解决，我们相信“公开申请、专家评审”的机制是最公平、最有效的资助方式，有助于将有限的资源支持高质量的科研。因此，我们认为，应该尽量实施公平竞争的资助机制。基金委作为中国基础研究的主要资助单位，应该加强和其它部委的合作与协调，进一步改进、完善地下水科学领域研究项目资助的评价体制。

我们认为一个切实可行的方案是，基金委和另一个或多个部委联合，定期或不定期地共同资助科学领域基础研究课题。比如，基金委联合国土资源部、水利部、国家气象局，共同资助区域或更大尺度的水循环研究，包括地下水、地表水、和大气水。这样即可以充分利用基金委在科研基金申报和管理方面的基本设施和丰富经验，同时又可以让研究内容与国土资源部、水利部和国家气象局所密切关心的问题紧密结合起来。再比如，基金委和环保总局合作，共同资助大规模的地下水污染的野外实验研究。这样，一方面，基金委增大了资助大型野外实验的经济能力；另一方面，环保总局得到了可以供决策参考的高质量的研究数据和成果。

- 提高地下水科学在地球科学学科体系中的地位

地下水科学处于多学科的交叉点，与地质学、地球化学、地表水文学、土地利用、土壤学、大气科学、生物学、生态学、全球变化、数学以及社会学的联系日趋紧密。作为地学的一个基础和骨干学科，我们认为地下水科学的地位在基金委地学部的地位应该进一步提高。我们相信在国家基金委地学部成立一个与“地质学”学科相同等级的“水文科学”或“水科学”学科管理组的时期已经成熟。水文科学管理组的成立将有助于打破地下水研究的许多人为障碍和分隔，鼓励广大科研人员真正把地球当成一个统一的系统，研究包括地下水在内的整个水循环的物理、化学、生物过程中不同时空尺度的各个环节。美国以及其它国家的经验表明，只有这样，才有机遇取得突破性的科研成果，促进整个地学的相互发展，满足社会对水的日益增长的需求。

为了协助基金委向上述方向过渡，我们建议地学部成立一个常设的水科学学术顾问委员会，为地学部的水科学研究提供实质性的咨询意见和科学上的指导。顾问委员会的成员应该包含来自水科学的各个主要领域的专家，比如，水文地质、水文学、水化学、生物生态过程、非饱和带过程、地表－大气相互作用、等等。这一顾问委员会的设立将不但能为地学部制定水科学研究的优先方向和战略规划提供重要的参考意见，而且将大大地加强和其它与水密切相关的部委的合作及协调。

- 重大研究项目的计划与实施

尽管中国的地下水科研与实际工作在过去几十年已经取得很大成就，为解决公众的饮水问题和推动国民经济建设作出了巨大贡献。但不可否认，中国地下水科学基础研究的现状与美国和其它西方国家相比，还比较落后。这种状况与地下水对于中国社会经济发展所发挥的重要作用很不匹配。我们认为，改变这种状况一个有效的办法是针对中国地下水的特点，由基金委牵头设立一个重大的科研计划，提出关键科学问题和预期目标。鼓励多领域的科研人员申报项目，吸引海外人才参与，加强实质性的国际合作，从而发挥大家的智慧和实力，在 10 年内共同努力完成该重大计划。争取获得一批系统的重要成果，在国际一流的水科学类学术刊物上刊登，提高中国地下水科学在国际上的地位。

具体设立怎样的重大的科研计划需要经过慎重的考虑与探讨。前面提到的水科学学术顾问委员可以作为这项工作的筹备组织者。我们认为在选择和设计重大科研计划时，应该考虑到这些因素：1）前沿科学问题；2）对中国的社会经济发展有重大意义；3）多学科的交叉；4）良好的前期研究基础；5）推动中国地下水科学整体水平的提高。作为一个例子，华北平原的地下水问题就具备作为重大科研计划的基本条件。首先，许多重要科学问题有待回答，包括，全球气候变化和地下水的相互作用、降雨入渗到厚度很大的非饱和带补给含水层的机理、人类活动对地下水质和水量的影响、地下水的过度开采带来的生态变化、地面沉降和和海水入侵等由地下水开采所诱发的环境问题，南水北调工程对华北水资源管理的影响。回答这些问题需要多学科的科研人员的合作，在已有的数据和研究基础上，用先进的手段采集大量新的数据，包括水文地质、地表水、大气水、非饱和带水、生物水文地球化学，等等。其次，华北是中国的政治中心和工农业最重要的基地之一，70％左右的供水来自地下水，保障饮用水安全和工农业需水显得得意义十分重大。

- 国家级科技创新基地的建设

在重大科研计划的基础上，我们建议中国设立一个以地下水为主题的国家重点实验室。由一个单位牵头，联合多个高校、科研机构共同建设该国家重点实验室。这一科技平台将有利于提高地下水科学在中国学术界的地位，建立能够攻克与地下水相关的多学科交叉的重大科学问题的综合团队。同时有利于吸引海外人才积极参与中国的地下水科研工作，以此加强与国际水文科学界的合作和交流。

地下水科学与其它地球科学分支学科一样，需要野外观测基地。中国独特的水文地质条件，使得设立多个这样的基地尤显必要。应当针对国家需求，投入专项经费，建立与加拿大 Borden 试验场、瑞典的 Stripa 试验场、美国 Cape Cod 与 MADE 试验场等相类似的野外综合试验场。应充分认识水文地质条件的独特性，在诸如西北干旱地区、西南岩溶地区、沿海地区、内陆盆地区等地区选择性地建设试验场。通过在试验场开展多学科的观测、探测和长周期试验，可以极大地提升地下水观测、探测、分析和信息传输的技术水平，丰富对复杂、多相和非均质地下水系统的认识，产出具有中国地域特色的原创性科研成果。

7.2 加强教育的建议

教育是科研的基础；科研又反过来促进教育。应大力推进中国高等教育和科技管理体制改革，使教育与科研相互促进，比翼齐飞。

要推动中国地下水科学的发展，首先要加强地下水学科本科和研究生的教育。我们在第 5 章“教育与人才培养”已做了详尽的介绍和分析。这里我们再强调几点。第一，本科生需要重视全面培养。尽管地下水科学是主题，但除了地下水最基本的理论和实践，本科生教育还应强调数理化，地质学基础，相关领域的课程，包括地表水文学、水化学、气候学、生态学、地质微生物等等。第二，应注重硕士、博士研究生的独立思考能力和实践能力的培养。特别是博士生，应该选择能够为地下水及相关科学作出原创性贡献的论文题目。鼓励研究生把研究成果在国际学术刊物上发表。第三，应加强国际交流。研究生在读期间，如果能够得到国家资助到国外高水平大学学习访问一个学期或更长，对开阔他们的科研视野，丰富他们的国际经历，都十分有益。我们高兴地看到，中国留学基金委员会已经从 2007 年起开始启动博士生联合培养资助计划，相信该计划的实施，会有助于产出与国外高水平博士和博士论文相当的青年学者及其研究成果。同时应鼓励研究生在读期间至少参加一次国际会议，宣读他们的论文。最后，我们建议基金委或其它部委设立公开竞争的资助杰出研究生自主选题的 3—5 年“博士生创新基金”。这样，获得者可以排除到处寻找资助的压力或变为导师的“打工仔”，有助于选择一些基础研究性强的前沿科学问题作为论文题目，为取得出色成绩准备良好的条件。

7.3 加强基础数据共享的建议

可靠的可以共享的基础数据的缺乏是阻碍中国科学，特别是地学发展的瓶颈问题。要从根本上解决这个问题，需要中国政府的决心和政策的改变。在第 4 章“地下水数据”，我们已经详细地讨论了有关地下水研究的基础数据问题，包括数据收集的新方法和基于互联网的水文信息系统和赛百结构（cyber infrastructure）的重要性。这里我们简要地归纳一下可以加强地下水基础数据共享的一些具体策略。

第一，对于中国政府直接拨款资助的生产性调查项目，收集的数据应该完全属于共享的资源。数据的质量一旦经过检验，应该尽快放到互联网上公开发布，供决策者和科研人员使用。第二，基金委资助的重大和重点基础科研项目，应该有政策规定，所收集的数据应该在项目完成之后一定时间后作为公共流通的共享资源。使用这些资源的论文必须注明原始数据的出处和对原始数据收集者的致谢。第三，基金委大力支持水文信息系统和赛百结构的研究和开发。鼓励各个地质调查、水利部门和科研单位采纳数据存贮、检索、和发布的统一标准和规范。最后，学术刊物刊登的文章第一次使用任何原始数据，必须描述这些数据的采集过程以及实际的数据。建议在科技部设立的科学技术基础条件平台建设计划中，安排地下水数据共享系统专项课题，以构建一个拥有海量数据、实现资源有效共享的基础数据平台。

附录

A. 中国有关地下水科学的政府管理机构 A-2

B. 中国有关地下水科学研究的资助单位..... A-2

C. 中国有关地下水科学的高等院校 A-3

D. 美国有关地下水科学的高等院校 A-5

E. 中国有关地下水科学的主要研究机构..... A-6

F. 中国有关地下水科学的主要重点实验室..... A-7

G. 中国地下水科学战略研究小组成员介绍 A-8

H. 为本书作出贡献的个人和单位名单 A-14

A. 中国有关地下水科学的政府管理机构

部委	机构名称
水利部	
国土资源部	中国地质调查局
建设部	
国家环保总局	
农业部	
国家电力公司	
交通部	

B. 中国有关地下水科学研究的资助单位

资助单位		下属机构
部委	国家自然科学基金委	
	科技部	
	国土资源部	
	水利部	
	中国科学院	中国科学院生态环境研究中心 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院遥感应用研究所 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院地球化学研究所 中国科学院遗传与发育生物学研究所 中国科学院青藏高原研究所 中国科学院东北地理与农业生态研究所 中国科学院南京土壤研究所 中国科学院南京地理与湖泊研究所 中国科学院地球环境研究所 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 中国科学院兰州地质研究所 中国科学院青海盐湖研究所 中国科学院新疆生态与地理研究所
	教育部	
	建设部	
	农业部	
	国家林业局	
	国防科工委	
	国家地震局	
	国家电力公司	
	交通部	
省级	科技厅	
	水利厅	
	国土资源厅	
	交通厅	
	教育厅	

C. 中国有关地下水科学的高等院校

高　校	院、系	网　站
中国地质大学（北京）	水资源与环境学院	http://www.cugb.edu.cn
中国地质大学（武汉）	环境学院	http://www.cug.edu.cn
吉林大学	环境与资源学院	http://cer.jlu.edu.cn
南京大学	地学院	http://www.nju.edu
东华理工大学	土木与环境工程学院	http://www.ecit.edu.cn
成都理工大学	环境与土木工程学院	http://www.cdut.edu.cn
长安大学	环境科学与工程学院	http://www.chd.edu.cn
石家庄经济学院	工程学院	http://www.sjzue.edu.cn
兰州大学	资源环境学院	http://www.lzu.edu.cn
北京师范大学	水科学研究院	http://www.bnu.edu.cn
桂林工学院	资源与环境工程系	http://www.glite.edu.cn
河海大学	水文学院、土木工程学院	http://www.hhu.edu.cn
中国农业大学	资源与环境学院、 水利与土木工程学院	http://www.cau.edu.cn
首都师范大学	资源环境与旅游学院	http://www.cnu.edu.cn
武汉大学	水利电力学院	http://swrh.whu.edu.cn
山东理工大学	资源与环境工程学	http://www.sdut.edu.cn
安徽理工大学	地球与环境学院	http://www.aust.edu.cn
合肥工业大学	资源与环境工程学院	http://www.hfut.edu.cn
山东科技大学	资源与环境工程学院	http://www.sdust.edu.cn
贵州师范大学	地理与生物学院	http://www.gznu.edu.cn
东北大学	资源与土工程学院	http://www.neu.edu.cn
山东师范大学	人口资源与环境学院	http://www.sdnu.edu.cn
西安理工大学	水利水电学院	http://www.xaut.edu.cn
河北工业大学	能源与环境工程学院	http://www.hebut.edu.cn
河南理工大学	环境资源学院	http://www.hpu.edu.cn
长江大学	化学与环境工程学院	http://www.yangtzeu.edu.cn
上海交通大学	环境科学与工程学院	http://www.sjtu.edu.cn
北京大学	水资源研究中心	http://hydro.pku.edu.cn
清华大学	环境科学与工程系	http://env.tsinghua.edu.cn

浙江大学	环境与资源学院	http://www.zju.edu.cn
同济大学	环境科学与工程学院	http://www.tongji.edu.cn
西北农林科技大学	资源环境学院	http://www.nwsuaf.edu.cn
新疆农业大学	水利与土木工程学院	http://www.xjau.edu.cn
中国海洋大学	环境科学与工程学院	http://www.ouc.edu.cn
青岛大学	环境科学系	http://www.qdu.edu.cn
太原工业大学	水利科学与工程学院	http://www.tyut.edu.cn
南京师范大学	地理科学学院	http://www.njnu.edu.cn
湖南师范大学	资源与环境科学学院	http://www.hunnu.edu.cn
香港大学	地球科学系	http://www.hku.hk

D. 美国有关地下水科学的高等院校（美国大学促进水文科学联合会成员）

序号	大学	序号	大学
1	Arizona State University	51	University of California — Los Angeles
2	Arkansas State University	52	University of California — Merced
3	Boise State University	53	University of California — Riverside
4	Brigham Young University	54	University of California — Santa Barbara
5	Clarkson University	55	University of Central Florida
6	Clemson University	56	University of Colorado
7	Colorado School of Mines	57	University of Colorado — Colorado Springs
8	Colorado State University	58	University of Connecticut
9	Columbia University	59	University of Delaware
10	Cornell University	60	University of Florida
11	Dartmouth College	61	University of Georgia
12	Drexel University	62	University of Idaho
13	Duke University	63	University of Illinois
14	Florida International University	64	University of Iowa
15	Florida State University	65	University of Kansas
16	Georgia Institute of Technology	66	University of Kentucky
17	Iowa State University	67	University of Maryland
18	Johns Hopkins University	68	University of Maryland — Baltimore County
19	Kansas State University	69	University of Massachusetts
20	Louisiana State University	70	University of Memphis
21	Massachusetts Institute of Technology	71	University of Miami
22	Michigan State University	72	University of Minnesota
23	Murray State University	73	University of Mississippi
24	New Mexico State University	74	University of Montana
25	New Mexico Tech	75	University of Nebraska
26	Northern Arizona University	76	University of Nevada — Las Vegas
27	Northeastern University	77	University of Nevada — Reno
28	Northwestern University	78	University of New Hampshire
29	Ohio State University	79	University of New Mexico
30	Oklahoma State University	80	University of North Carolina System
31	Oregon State University	81	University of North Dakota
32	Pennsylvania State University	82	University of Notre Dame
33	Princeton University	83	University of Pennsylvania
34	Purdue University	84	University of Rhode Island
35	Rutgers University (SUNJ)	85	University of South Carolina
36	Stanford University	86	University of South Florida
37	State University of New York — ESF	87	University of Tennessee
38	State University of New York — Buffalo	88	University of Texas — Arlington
39	South Dakota State University	89	University of Texas — Austin
40	Southern Illinois University	90	University of Texas — El Paso
41	Temple University	91	University of Utah
42	Texas A&M University	92	University of Vermont
43	Texas State University — San Marcos	93	University of Washington
44	Tufts University	94	University of Wisconsin
45	University of Alabama	95	University of Wyoming
46	University of Arizona	96	Utah State University
47	University of Alaska — Fairbanks	97	Virginia Tech University
48	University of California — Berkeley	98	Washington State University
49	University of California — Davis	99	West Virginia University
50	University of California — Irvine	100	Woods Hole Oceanographic Institution

E. 中国有关地下水科学的主要研究机构

部委	机构名称
国土资源部	中国地质科学院水文地质环境地质研究所 中国地质科学院岩溶地质研究所 中国地质环境监测院 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心 青岛海洋地质研究所 天津地质矿产研究所(天津地调中心) 沈阳地质矿产研究所(沈阳地调中心) 南京地质矿产研究所(南京地调中心) 宜昌地质矿产研究所(宜昌地调中心) 成都地质矿产研究所(成都地调中心) 西安地质矿产研究所(西安地调中心) 各省市自治区和有关行业地质勘查局
水利部	中国水利水电科学研究院 南京水利科学研究院 黄河水利委员会 长江水利委员会 各省市自治区水利水电勘察设计研究院
中国科学院	生态环境研究中心 地理科学与资源研究所 遥感应用研究所 地质与地球物理研究所 地球化学研究所 遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 东北地理与农业生态研究所 南京地理与湖泊研究所 南京土壤研究所 地球环境研究所 寒区旱区环境与工程研究所 青海盐湖研究所 新疆生态与地理研究所 沈阳应用生态研究所
国家地震局	中国地震局地质研究所 中国地震局预报研究所
核工业部	中国工程物理研究院核物理与化学研究所 中国原子能科学研究院核物理研究所 核工业地质局研究所 核工业铀矿开采研究所
国家环境保护总局	环境科学研究院

F. 中国有关地下水科学的主要重点实验室

国家级	中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室 中国科学院武汉岩土力学研究所环境岩土工程重点实验室 中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室 中国科学院植物研究所植被数量生态学开放研究重点实验室 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室 污染控制与资源化研究国家重点试验室（南京大学与同济大学共建） 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室（清华大学、中科院生态中心、北京大学、北京师范大学共建）
部级	北京师范大学资源科学研究所三维信息获取与应用教育部重点实验室 国土资源部地下水科学与工程重点实验室 国土资源部岩溶动力学开放研究实验室 国土资源部水资源评价管理系列模型开放研究实验室 国土资源部干旱-半干旱地区水资源与国土环境开放研究实验室 农业部植物营养与养分循环重点实验室 农业部土壤与水重点实验室 教育部生物地质与环境地质重点实验室 教育部植物土壤相互作用重点实验室 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 首都师范大学资源环境与 GIS 北京市重点实验室

G. 中国地下水科学战略研究小组成员介绍

郑春苗 （ZHENG Chunmiao）



成都理工大学（原成都地质学院）1983年学士学位，美国威斯康星（麦迪逊）大学1988年博士学位；现任美国阿拉巴马大学教授和北京大学水资源研究中心讲座教授；已主持30余项美国政府资助的科研项目；2006年获中国国家自然科学基金委海外青年合作基金（水文地质类）；撰写专著 *Applied Contaminant Transport Modeling* (1995初版，2002再版），发表论文100多篇；开发了地下水污染模拟标准软件MT3D和MT3DMS，在100多个国家得到广泛使用；提出了小尺度优先水流通道对溶质运移有控制作用的新观点和理论依据，在非均质性对溶质运移影响机理的研究中开辟了新途径；将先进的数学优化方法与复杂的野外条件相结合，在地下水污染治理方案设计、监测网设计和可持续性管理研究中取得了一系列成果；目前担任国际学术刊物 *Ground Water* 和 *Journal of Hydrology* 副主编，美国国家科研委员会（National Research Council）水文科学委员会成员，国际水文科协(IAHS)国际地下水委员会主席（2009－2013）；美国地质学会Fellow；美国地下水协会1998年度John Hem杰出贡献奖获得者；美国地质学会2009年度水文地质学杰出讲席（Birdsall-Dreiss Distinguished Lecturer）。

万力 （WAN Li）



1982 年毕业于南京大学，获水文地质及工程地质专业理学学士学位；1985 年和 1988 年中国地质大学(北京)分别获水文地质专业工学硕士和博士学位；现任中国地质大学（北京）教授；主持和参加了 30 余项科研项目；撰写专著《各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价》和《生态水文地质学》，公开发表论文 70 多篇；在基岩水文地质领域内，建立了以渗透结构为核心的裂隙岩体渗透性空间分布规律分析方法，并成功应用于多个水利枢纽工程；在非均质条件下的地下水动力场特征研究，揭示了矿山开采中矿坑涌水量随开采深度的变化规律；在生态水文学领域内，提出了黄河源区生态环境退化的原因，查明黑河下游地区绿洲演变与水资源开发之间的关系。曾获水利部和国土资源部科技进步二等奖各一项，获地矿部科技进步三等奖两项。兼任国务院学位委员会环境科学与工程学科评议组成员、国际水文地质学家协会中国国家委员会副主席、国防科工委高放废物地质处置专家组成员和其他 5 个专业委员会委员；“水文地质工程地质”等六个期刊的编委。1990 年国家教委和国务院学位委员会授予“做出突出贡献的中国博士学位获得者”称号；1995 年，中国地质学会授予“银锤奖”。

王焰新 （WANG Yanxin）



南京大学1984年理学学士学位，中国地质大学1990年工学博士学位，1998－1999加拿大滑铁卢大学高级访问学者。现任中国地质大学（武汉）教授。主持承担国家自然科学基金重点项目、863计划课题、政府间国际合作项目等课题40余项。赴欧美及俄罗斯、日本、印度等国讲学、参加学术会议或合作科研10余次，在国际学术会议上作大会特邀报告7次，发表SCI检索论文39篇、EI（光盘版）检索论文45篇，获国家发明专利6项。长期从事水文地质和环境工程领域的教学与科研工作，探索了地下水污染和原生劣质水成因与水质修复的新理论和新模型，通过实验揭示了岩土材料和零价铁去除水中砷、氟、镉和有机氯化物的机理；提出了从岩溶系统的水化学－同位素组成和泉钙华中提取地下水环境演化信息的新方法；提出了黄姜皂素清洁生产和煤工业废弃物资源化利用的新思路并建立了示范工程，从而为水污染控制寻找到新途径。现担任国际水文地质学家协会中国委员会副主席、国际地球化学协会水－岩相互作用工作组成员。2004年获国家杰出青年科学基金。

冯夏红 （ FENG Xiahong ）



北京大学 1982 学士学位，1985 硕士学位，美国凯斯西储大学 1991 博士学位，现任美国达特茅斯学院教授及 Frederick Hall 讲席教授；已主持和参加 20 余项美国和中国政府资助的科研项目；发表论文 50 余篇；主要成果包括沸石氧同位素交换的热力学和动力学性质，植物中氢氧同位素在气候及环境研究中的意义和应用，土壤碳循环及碳同位素的应用，溶质在积雪中的运移特征及季节性融雪对地表水质的影响，氧同位素在积雪中的变化特征及其对水文化学研究的意义，地表水化学变化的时间尺度及其对溶质，污染物运移的影响；曾经担任国际期刊 *Journal of Hydrology* 副主编。

任理 （REN Li）



1988 年和 1994 年在武汉水利电力大学农田水利工程专业获得工学硕士和博士学位。1994 年 10 月至 1996 年 9 月在北京农业大学土壤学专业进行博士后研究。2003 年 10 月至 11 月在荷兰 WAGENINGEN 大学的土壤物理及农业水文学与地下水管理研究所从事合作研究；2005 年 8 月在英国 ABERTAY 大学的 SIMBIOS 进行学术访问。中国农业大学资源与环境学院土壤和水科学系教授。中国土壤学会土壤物理专业委员会副主任。《水利学报》和《水文地质工程地质》编委。主持和参加了十多项科研课题，在国内外学术刊物上发表了 50 余篇学术论文。近 20 年来一直从事土壤水分、水热、水盐运动规律的数值分析和污染物在土壤环境中迁移动态的数学仿真以及地下水流数值模拟方面的研究工作。当前主要的研究领域为：联合运用农业水文学模型或分布式水文模型、地理信息系统和遥感技术模拟分析和预报区域或流域尺度土壤水分动态及氮肥、农药在非饱和土壤中的淋失风险；非均质多孔介质中流动问题的多尺度数值模拟；硝态氮、重金属、农药及其降解产物、兽药及其代谢产物在土壤环境中运移规律的数学仿真。曾先后受聘担任中国科学院地理科学与资源研究所客座研究员（2002 年至 2005 年）；中国科学院计算数学与科学工程计算研究所科学与工程计算国家重点实验室客座研究员（2002 年至 2004 年）；中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室水文水资源方向客座研究员（2004 年至 2007 年）。

吴吉春（WU Jichun）



1989、1991 年和 1994 年南京大学地球科学系获学士、硕士和博士学位，2000 年至 2002 年以高级访问学者身份应邀赴美合作研究，其后又多次赴美国、澳大利亚、挪威、香港、台湾的大学短期访问研究。现任南京大学教授，兼任水科学系主任，水资源与水环境研究所所长，水处理与水环境修复教育部工程研究中心副主任。至 2007 年已合作出版专著 3 本、教材 1 本,发表论文 166 篇；作为项目负责人或主要完成者完成科研项目有 30 多项。在非平稳地下水随机理论、海水入侵、地面沉降、复杂条件下的地下水流与污染物运移数值模拟、分数阶对流—弥散方程研究等方面取得多项重要成果。曾获国家教育部科技进步二等奖 2 次、三等奖 1 次，内蒙古自治区科技进步一等奖 1 次，并获首届全国高校优秀青年教师奖、第五届全国“青年地质科技奖”—金锤奖、第三届“江苏省青年科技标兵”、第九届霍英东教育基金会高校青年教师奖二等奖、电力勘测设计科技进步奖应用成果一等奖。江苏省“青蓝工程”学术带头人。2007 年获国家杰出青年科学基金。

张仁铎（ZHANG Renduo）



1982 年毕业于武汉水利电力大学，1984 赴美留学，在亚利桑那大学分别于 1986 年和 1990 年获硕士学位和博士学位。然后在美国农业部一国家实验室作研究，1993 年在怀俄明大学任教，1998 年成为该校终身教授。2000 年被教育部聘为"长江奖励计划特聘教授"，在武汉大学就职。现为中山大学"百人计划"第一类引进人才，博士生导师。主要研究方向为：污染物质在非饱和介质中的物理、化学和生物迁移转化过程研究；环境问题中的时空变异性和尺度效应；污染土水环境的生物治理研究；地下水的监测、保护及污染的治理；计算机数值模拟和地质统计方法在农业和环境问题中的运用。在美国主持和参加 30 多项科研项目，曾担任国际期刊 *Soil Science Society of America Journal* 和 *Journal of Environmental Quality* 副主编，目前担任 *Journal of Hydrology* 的副主编。在国内主持 5 项国家自然科学基金课题。2004 年当选为美国土壤科学学会（SSSA）Fellow 和美国农业科学学会（ASA）Fellow。共发表学术论文 100 多篇，出版学术专著 4 部。

张幼宽 （ZHANG You-Kuan）



1978年毕业于长春地质学院（现吉林大学），1982年获南京大学水文地质学硕士，1990年获美国亚利桑那（Arizona）大学水文学博士。现任美国依阿华（Iowa）大学地球科学系和土木环境工程系教授，依阿华水利科学研究所研究员,兼任南京大学“思源”讲座教授及河海大学特聘教授。其研究领域涉及地下水计算与模拟，随机地下水文学，地质统计学，流域水文学和生态水文学。主持并参与多项美国，意大利和中国政府资助的科研项目。发表论文70余篇。主要研究成果包括非均质介质中污染物运移的准线性和非各态历经性理论，地下水位及补给变化的分维及尺度性，以及地表覆盖变化对径流和基流的影响等。现为国际专业杂志 *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 及 *Vadose Zone Journal* 副主编，美国地球物理学会（**AGU**）地下水专业委员会委员，意大利政府地球科学咨询委员会委员。2005年当选为美国地质学会（**GSA**）Fellow。曾任中国地球科学促进会(IPACES)主席。

李广贺（LI Guanghe）



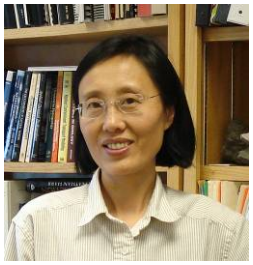
1986、1989 年吉林大学（原长春地质学院）分别获学士和硕士学位，1992 年中国地质大学获博士学位，现任清华大学教授、博士生导师。主要研究方向为地下水与土壤污染控制与修复，研究重点为污染场地环境风险评价技术与修复工程、污染地下水生态毒性与生物过程、劣质地下水净化理论与技术。承担和完成国家重大科技专项、国家科技攻关、国家“863”项目、国家自然科学基金等国家、省部级项目等近 30 项。在地下水污染机理与污染物输移模式、污染地下水毒理性评价、污染土壤和地下水修复技术与工程设计、污染场地控制的生物过程与分子生物学技术、劣质地下水净化、水体污染控制的复合生态技术与工程设计等方面取得重要研究成果。发表研究论文 100 余篇，获国家、省部级科技进步奖 4 项，主编论著和教材 4 部。主编的《水资源利用与保护》、《地下水污染控制理论与治理工程》为国家“十一五”重点教材。授权国家发明专利 6 项。现任中国地质学会环境地质专业委员会委员，《水文地质工程地质》、《工程堪察》、《中国环境科学》等杂志编委，教育部留学回国人员科研启动基金评审专家。

李文鹏（LI Wenpeng）



1981 年底毕业于河北地质学院，1985-1991 年先后为中国地质科学院硕士和博士研究生，1991 年获理学博士学位。现任中国地质环境监测院教授级高工，总工程师。长期从事西北干旱区地下水资源勘察、评价和研究，盐湖地区溶解开采以及地质灾害勘查防治等技术工作。合作完成生产与科研报告 61 份，发表论文 73 篇。合作出版专著 5 部。获省部级一、二、三等奖共 11 次。兼任国际水文地质学家协会免费委员及中国委员会副主席，中国地质大学（北京）和北京大学工学院兼职教授，《水文地质工程地质》编委会委员及副主编，中国地质学会水文地质专业委员会委员、岩溶地质专业委员会委员，中国地质学会灾害研究分会委员，中国水利学会水资源专业委员会委员，国土资源部地下科学与工程重点实验室客座研究员。1998 年入选国家人事部“百千万人才库”，1999 年获政府特殊津贴。

葛社民（GE Shemin）



武汉理工大学（原武汉建材学院）1982学士学位，加拿大不列颠哥伦比亚大学1985硕士学位，美国霍普金斯大学1990博士学位，现任美国科罗拉多大学教授；主持和参加多项美国和中国政府资助的科研项目；发表学术论文40余篇，研究成果包括将地下水与岩石变形之间的耦合机理应用到定量描述板块运动对盆地水文的影响，地震和地下水的相互作用，以及主动大陆边缘的地下水和地热传导规律。在裂隙介质流体及溶质运移也有贡献，提出了一透水系数的新见解。曾获王宽诚基金会奖。曾担任国际期刊 *Ground Water* 副主编。现任 *Hydrogeology Journal*和 *GeoFluids* 副主编。组织过多次国际会议。担任过海洋钻探计划水文地质规划组主席。多次参加美国自然科学基金会，环保局，能源部，及综合海洋钻探计划基金审批委员会评委。

董海良（DONG, Hailiang）



中国地质大学(武汉)1988学士学位 美国密西根大学1997博士，现任美国迈阿密大学副教授，中国地质大学(北京) 特聘教授兼地质微生物实验室主任。已主持和参加20多项美国和中国政府资助的科研项目；2002年获中国自然科学基金委的海外杰出青年基金。发表论文60多篇，其中以第一作者在Science发表两篇，涉足矿物，地球化学，地质微生物学和地下水微生物去污等多个领域。在矿物-微生物作用，极端地质环境下的微生物活动和治理地下水中的重金属污染等方面取得了一系列成果，开拓了一条野外和室内高新技术相结合的地质微生物学科。担任国际期刊 *Clays & Clay Minerals* 和 *Geomicrobiology Journal* 的特邀副主编，多次担任美国自然科学基金，能源部和美国空间总署基金审批委员会评委(panel)，组织过多次国际会议。2007年荣获迈阿密大学杰出研究奖，2008年美国粘土矿物学会 Marion L. and Chrystie M. Jackson 中年粘土科学家成就奖。

H. 为本书作出贡献的个人和单位名单

王红旗，北京师范大学
任图生，中国农业大学
刘宗炫，Pacific Northwest National Laboratory, USA
孙讷正，University of California-Los Angeles, USA
李俊亭，长安大学
李竞生，煤炭科学研究总院西安研究院
张人权，中国地质大学（武汉）
张东晓，北京大学
张蔚榛，武汉大学
陈崇希，中国地质大学（武汉）
武　强，中国矿业大学
郑跃军，中国地质环境监测院
郝爱兵，中国地质环境监测院
段永侯，中国地质环境监测院
洪　阳，National Aeronautics and Space Administration, USA
蒋忠诚，中国地质科学院岩溶地质研究所
焦赳赳，香港大学
詹红兵，Texas A&M University, USA
Randy Hunt，U.S. Geological Survey, USA