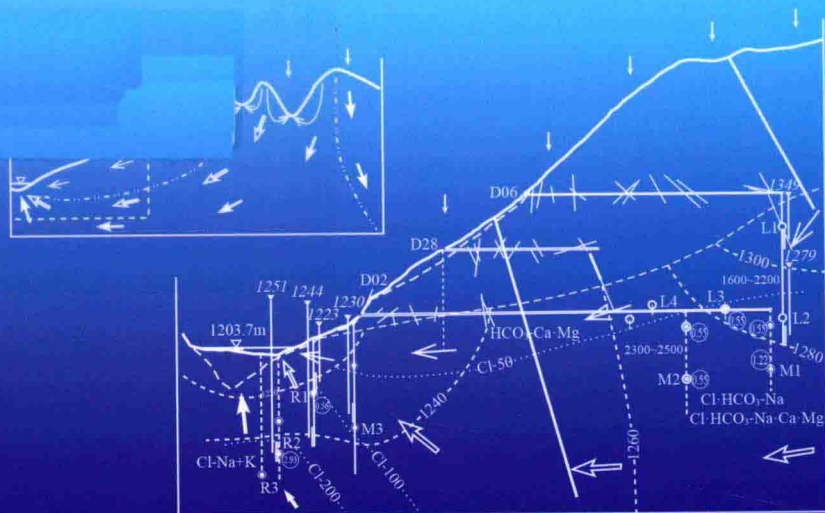




“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



第七版

水文地质学基础

FUNDAMENTALS OF HYDROGEOLOGY (7th Edition)

张人权 梁杏 靳孟贵 万力 于青春 编著



地质出版社

“十五”普通高等教育本科国家级规划教材

水文地质学基础

(第七版)

张人权 梁 杏 靳孟贵 万 力 于青春 编著



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是1960年出版的《水文地质学基础》的第七版。本书阐述了水文地质学基本概念、基本原理及基本分析方法。旨在为读者提供“提出问题、分析问题与解决问题”的思路与方法。本着“削枝强干，去旧布新；精确表述，清新可读”的要求，本版内容有所调整，力求体现当代水文地质学的概念、理论与方法体系。

本书是水文与水资源工程、地下水科学与工程、环境工程（环境地质方向），以及土木工程（工程地质方向）等专业的大学本科入门教科书。对于从事水文地质、工程地质、环境地质、油气及金属非金属矿产勘查、水利、农业以及生态保护工作的教学、科研及生产人员，有一定参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

水文地质学基础 / 张人权等编著. —7 版. —北京：
地质出版社，2018. 6

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
ISBN 978 - 7 - 116 - 10942 - 1

I. ①水… II. ①张… III. ①水文地质学 - 高等学校
- 教材 IV. ①P641 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 076335 号

Shuiwen Dizhixue Jichu

责任编辑：李惠娣

责任校对：李 玫

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083

咨询电话：(010)66554646（邮购部）；(010)66554579（编辑室）

网 址：<http://www.gph.com.cn>

传 真：(010)66554579

印 刷：固安华明印业有限公司

开 本：787mm × 1092mm 1/16

印 张：13.75

字 数：335 千字

印 数：1—10000 册

版 次：2018 年 6 月北京第 7 版

印 次：2018 年 6 月河北第 1 次印刷

审 图 号：GS (2018) 1434 号

定 价：27.00 元

书 号：ISBN 978 - 7 - 116 - 10942 - 1

（如对本书有建议或意见，敬请致电本社；如本书有印装问题，本社负责调换）



谨以此书纪念
中国水文地质学重要奠基人
王大纯先生
(1915—2007)

前 言

1960年,本书以《普通水文地质学》书名问世,1980年更名为《水文地质学基础》,此次出版为历时半个多世纪的第七版。本版的修订,力求体现“削枝强干,去旧布新;精确表述,清新可读”的要求。

作为水文地质及相关专业入门教科书,本书着重阐明水文地质学的基本概念、基本原理及基本分析方法。从而为读者提供提出问题、分析问题及解决问题的思路与方法。我们的目标,不仅仅局限于专业基础的论述,还想为读者提供一个探究问题的普适性逻辑框架。

本书修订分工如下:靳孟贵执笔第5章、第6章,梁杏执笔第7章、第9章,于青春执笔第12章,万力执笔第15章,张人权执笔其余各章并承担全书统稿工作。修编工作、图件格式设计以及部分图件编绘由梁杏承担。

历经近一个甲子的沧桑,在本书第七版出版之际,我们深切怀念已经离世的作者:王大纯先生奠定了本书的框架与风格;张咸恭、郭竹第、许绍倬分别参与了本书部分版本的编写。他们为本书的形成及完善殚思极虑,贡献至巨。我们一定不辜负他们付出的辛勤劳动,尽心尽力,做好本书的后续修订工作。

承蒙以下诸位师友认真审阅,提供宝贵建议及参考资料:张倬元、黄承武、袁道先、王瑞久、李文鹏、焦赳赳、文冬光、郝爱兵、任福弘、姚足金、秦毅苏、殷正宙、施德鸿、沈照理、蒋小伟、钟佐桑、郭华明、周爱国、周宏、陈刚、罗明明、郭会荣、孙蓉琳、马斌和陈文玲。部分读者和师生指正了本书中的错误。吴涛协助绘制了裂隙三维图。谨此对以上诸位表示感谢。

我们谨向本书所引用的参考文献的作者表示感谢。我们还要感谢多年来读者的信任和鼓励。

与本书有关的教学内容,请读者登录中国大学MOOC(慕课)网(<https://www.icourse163.org/>),查看中国地质大学(武汉)开设的“水文地质学基础”MOOC课程。

对本书内容的批评及建议,请发至以下电子邮箱:xliang@cug.edu.cn。

作者

2018年4月

· I ·

第六版前言

1960年,本书以《普通水文地质学》书名初版问世,1964年再版,1980年更名为《水文地质学基础》修订出版,1986年及1995年分别修订再版。此版为本书历时50年的第六个版本。

50年来,水文地质学蓬勃发展,由单纯的应用学科发展为具有多个应用及理论分支的地下水科学,成为地球系统科学最为活跃的基础学科之一。

50年来,水文地质学面临巨大的挑战和难得的机遇,学科迅猛发展,新问题、新理论和新方法不断涌现,知识总量翻倍扩展,如行山阴道上,目不暇接。此时,以不变应万变,排除浮躁,回归基础,方是正确应对之道。

以能力培养为中心,力求初学者能够“举一反三,以少胜多”,是本书一贯追求的目标。作为地下水科学入门教科书,我们无意对水文地质学作面面俱到的讨论。本书力求阐明水文地质学基本概念、基本原理及基本分析方法。期望初学者经过艰苦思考、反复练习,并通过今后工作实践,扎实理解基本概念,融会贯通基本原理,灵活掌握基本分析方法,不断提高分析问题和提出问题的能力。

同时运用逻辑思维和形象思维,才有可能创造性地解决复杂的水文地质问题。为此,本书着意精选图件,尤其是概念模型图件。我们相信,如能细心研读图件,必可获得文字无法提供的启示。

为使初学者了解国内外最新研究成果及发展趋势,本书还增添了一些拓展视野的章节(如第9章、第15章等),对于初学者,不可能也不要求完全掌握其内容,请使用此书的教师酌情明示学生考核范围及要求。

本书编写分工如下:靳孟贵执笔第5章、第6章,梁杏执笔第7章、第9章,于青春执笔第12章,万力执笔第15章,张人权执笔其余各章并承担全书统稿工作。修编事务、图件格式设计,以及部分图件编绘,由梁杏承担,王新峰、彭凤娟协同完成。本版增添了英文目录及中英文对照名词索引。英文目录及索引承蒙焦赳赳审阅,英文目录还经托特(József Tóth)审核,最终由作者定夺取舍。虽经努力,英文部分难免有不妥之处,仅供读者参考。

我们深切缅怀本书此前各版的主编王大纯先生。20世纪中期,水文地质学作为新的学科引入中国之际,王大纯先生主持编写了第一本结合中国实际的水文地

质学教科书。书中提出适合中国的地下水分类、中国潜水分带以及裂隙水分类。20 世纪 80~90 年代以来,广泛吸收国内外最新研究成果,深入探讨地下水资源及地下含水系统概念,引入地下水流系统理论,强调与地下水有关的生态环境问题。50 年来,本书不断充实完善的过程,正是中国水文地质学理论体系形成的缩影。王大纯先生是中国水文地质学当之无愧的重要奠基人。

王大纯先生视野开阔、勇于开拓,求真务实,与时俱进,为本书奠定了“重视基本概念,强调分析思路,论述深入浅出、语言平实清新”的学术风格。这种学术风格,对精心研读本书的一批读者已经产生深刻影响。1988 年,本书荣获全国高等教育优秀教材奖。1988 年及 1992 年,两度获得地质矿产部高等地质院校优秀教材奖。

本书此前各版作者,还有以下几位:张咸恭、郭竹第、史毅虹、许绍倬。他们辛勤劳动的成果依然凝结于此书之中,谨此向他们表达深切敬意。

本书承蒙以下诸位师友审阅部分章节,并提供宝贵建议及参考资料:张蔚榛、张倬元、袁道先、段永侯、王瑞久、李文鹏、焦赳赳、文冬光、蒋小伟、王焰新、周爱国,谨此表示诚挚感谢。我们谨向本书所引用的参考文献的作者表示感谢,他们的成果为撰写本书提供了基础。感谢地质出版社王章俊副社长、魏智如主任的关注,感谢本书责任编辑李惠娣博士的辛勤劳动,使得本书得以顺利出版。

本书的思考题仅供读者理解内容参考之用,我们不希望用标准答案束缚他们的思路。

与本书有关的某些内容,请读者登录中国地质大学(武汉)水文地质学基础精品课程网页浏览:<http://jpkc.cug.edu.cn/2007jpkc/swdxxjc4/>^❶。

对本书内容的批评及建议,请发至以下电子邮箱:xliang@cug.edu.cn。

作 者

2010 年 8 月

❶ 这个精品课程网页已取消。

目 录

前 言

第六版前言

第1章 绪论	(1)
1.1 水文地质学的研究对象	(1)
1.2 地下水的功能	(1)
1.2.1 宝贵的资源	(1)
1.2.2 重要的地质营力	(2)
1.2.3 不可忽视的致灾因子	(3)
1.2.4 活跃灵敏的生态环境因子	(4)
1.2.5 极有价值的信息载体	(5)
1.3 水文地质学发展简史	(5)
1.4 当代水文地质学的特点	(7)
第2章 地球中水的分布与循环	(9)
2.1 地球中水的分布	(9)
2.2 地球中水的循环	(10)
2.2.1 水文循环	(10)
2.2.2 地质循环	(11)
2.3 中国水资源概况	(12)
2.4 中国地下水概况	(13)
2.4.1 地下水的供水意义	(13)
2.4.2 中国地下水分区	(13)
第3章 岩土中的空隙和水	(16)
3.1 岩土中的空隙	(16)
3.1.1 孔隙	(16)
3.1.2 裂隙和溶穴	(18)
3.2 岩土中的水	(19)
3.2.1 结合水	(19)
3.2.2 重力水	(20)
3.2.3 毛细水(毛管水)	(20)
3.2.4 气态水、固态水及矿物中的水	(21)
3.3 与水有关的岩土性质	(21)

3.3.1 容水度	(21)
3.3.2 含水量	(21)
3.3.3 给水度(重力疏干给水度)	(21)
3.3.4 持水度	(22)
3.3.5 渗透性	(22)
第4章 地下水的赋存	(24)
4.1 含水层、隔水层与弱透水层	(24)
4.2 含水系统	(25)
4.3 潜水、承压水和上层滞水	(26)
4.3.1 潜水	(26)
4.3.2 承压水	(27)
4.3.3 上层滞水	(30)
第5章 地下水运动的基本规律	(31)
5.1 渗流基本概念	(31)
5.2 重力水运动的基本规律	(32)
5.2.1 达西定律	(32)
5.2.2 渗透流速与实际流速	(33)
5.2.3 水力梯度	(34)
5.2.4 渗透系数与渗透率	(34)
5.2.5 达西定律的实质及适用范围	(35)
5.3 流网	(36)
5.3.1 均质各向同性介质中的流网	(36)
5.3.2 层状非均质介质中的流网	(38)
第6章 包气带水	(41)
6.1 毛细现象和毛细水	(41)
6.1.1 毛细现象的实质	(41)
6.1.2 毛细负压及其测定方法	(43)
6.1.3 毛细上升高度与悬挂毛细水	(44)
6.2 土壤水势及其组成	(44)
6.2.1 重力势	(45)
6.2.2 压力势和基质势	(45)
6.2.3 溶质势	(45)
6.3 包气带水的分布与运动规律	(46)
6.3.1 包气带水的垂向分布特征	(46)
6.3.2 包气带水运动的基本定律	(47)
6.3.3 包气带水的数量与能量的关系——水分特征曲线	(47)
6.3.4 重力给水度的讨论	(48)
6.4 涉及包气带水的主要领域	(50)
第7章 地下水中的化学组分及其演变	(52)
7.1 概述	(52)

7.2 地下水中的化学组分	(52)
7.2.1 地下水中主要气体成分	(52)
7.2.2 地下水中的溶解性总固体及主要离子成分	(53)
7.2.3 地下水中的同位素组分	(56)
7.2.4 地下水中其他组分	(56)
7.3 地下水中的微生物	(57)
7.4 地下水的温度	(58)
7.5 地下水中化学成分的形成作用	(59)
7.5.1 溶滤作用	(59)
7.5.2 浓缩作用	(61)
7.5.3 脱碳酸作用	(62)
7.5.4 脱硫酸作用	(62)
7.5.5 阳离子交替吸附作用	(62)
7.5.6 混合作用	(63)
7.5.7 人类活动对地下水化学成分的影响	(63)
7.6 地下水基本成因类型及其化学特征	(63)
7.6.1 溶滤水	(64)
7.6.2 沉积水	(64)
7.6.3 内生水	(65)
7.7 地下水化学分析及其图示	(66)
7.7.1 地下水化学分析内容	(66)
7.7.2 地下水化学成分的库尔洛夫表示式	(67)
7.7.3 地下水化学特征分类及图示	(67)
第8章 地下水的补给与排泄	(69)
8.1 概述	(69)
8.2 地下水补给	(69)
8.2.1 大气降水补给地下水	(69)
8.2.2 地表水补给地下水	(76)
8.2.3 地下水的其他补给来源	(77)
8.2.4 地下水人工补给	(78)
8.3 地下水排泄	(79)
8.3.1 泉	(79)
8.3.2 泄流	(81)
8.3.3 蒸发与蒸腾	(81)
8.3.4 地下水的人工排泄	(83)
8.4 含水层之间的水量交换	(83)
第9章 地下水流系统	(86)
9.1 地下水流系统理论的创建	(86)
9.2 地下水流系统的某些概念及术语	(90)
9.3 地下水流系统基本特征	(91)

9.3.1	地下水流系统的水动力特征	(91)
9.3.2	地下水流系统的水化学特征	(92)
9.3.3	地下水流系统的水温度特征	(94)
9.3.4	地下水流系统的时间变化	(94)
9.4	盆地地下水流模式及其控制因素	(95)
9.4.1	定水头上边界盆地地下水流模式的局限性	(95)
9.4.2	盆地地下水流模式的物理模拟	(96)
9.4.3	通量上边界的盆地地下水流模式的数学模拟	(97)
9.4.4	盆地地下水流模式的物理机制初步探讨	(99)
9.5	Tóth 理论对水文地质学的突破性贡献	(101)
第10章	地下水动态与均衡	(103)
10.1	地下水动态与均衡的概念	(103)
10.2	地下水动态的影响因素	(103)
10.2.1	地下水动态的两类影响因素	(103)
10.2.2	气象(气候)因素影响下的地下水动态	(104)
10.2.3	水文因素影响下的地下水动态	(106)
10.2.4	其他因素影响下的地下水动态	(106)
10.2.5	人为活动影响下的地下水动态	(107)
10.2.6	影响地下水动态的转换因素	(109)
10.3	天然条件下的地下水均衡	(110)
10.3.1	均衡区与均衡期	(110)
10.3.2	水均衡方程式	(110)
10.4	均衡计算中的某些问题	(112)
第11章	孔隙水	(113)
11.1	孔隙水的特征及其控制因素	(113)
11.2	洪积物中的孔隙水	(114)
11.3	冲积物中的孔隙水	(114)
11.4	湖积物中的孔隙水	(116)
11.5	干旱内陆盆地孔隙水系统:石羊河流域	(116)
11.6	干旱半干旱黄土高原孔隙水系统	(118)
11.7	半干旱平原孔隙水系统:河北平原	(121)
11.7.1	河北平原的自然背景与地下水基本特征	(121)
11.7.2	河北平原地下水流系统分析	(121)
11.7.3	末次盛冰期以来河北平原地下水流系统的演变	(123)
11.7.4	河北平原地下水开发利用引发的问题及其对策	(126)
第12章	裂隙水	(129)
12.1	概述	(129)
12.2	裂隙的成因类型及其中的地下水	(130)
12.2.1	成岩裂隙水	(130)
12.2.2	风化裂隙水	(131)

12.2.3	构造裂隙水	(131)
12.3	裂隙介质及其渗流	(134)
12.3.1	裂隙及裂隙网络	(134)
12.3.2	裂隙水流的基本特征	(135)
12.4	裂隙及裂隙水的研究方法	(136)
12.4.1	岩层(岩体)裂隙野外调查统计	(136)
12.4.2	裂隙水的模型化方法	(138)
12.5	断层的水文地质意义	(140)
12.6	官地水电站玄武岩裂隙水流系统	(141)
第13章	岩溶水(喀斯特水)	(144)
13.1	岩溶及其研究意义	(144)
13.2	岩溶发育基本条件	(145)
13.2.1	岩石的可溶性:碳酸盐岩的成分与结构	(145)
13.2.2	可溶岩的透水性	(146)
13.2.3	水的侵蚀性: $\text{CaCO}_3 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ 体系	(146)
13.2.4	水流对岩溶发育的控制作用	(147)
13.2.5	深源 CO_2 与岩溶发育	(147)
13.2.6	生物对岩溶发育的影响	(148)
13.3	岩溶水系统的改造与演变	(148)
13.3.1	介质改造机制:溶蚀-机械侵蚀-重力崩塌	(148)
13.3.2	差异性水流与介质差异性改造	(148)
13.3.3	我国南方岩溶的地下河系化	(150)
13.3.4	新构造运动对岩溶发育的影响	(153)
13.4	岩溶水特征	(154)
13.4.1	中国南北方岩溶及岩溶水发育的差异	(154)
13.4.2	岩溶含水介质特征	(155)
13.4.3	岩溶水运动特征	(156)
13.4.4	岩溶水补给及排泄特征	(156)
13.4.5	岩溶水动态特征	(157)
13.4.6	岩溶水化学特征	(158)
第14章	地下水资源与水资源管理	(160)
14.1	地下水资源概念的演进	(160)
14.2	地下资源的特性	(161)
14.2.1	地下资源的系统性	(161)
14.2.2	地下资源的可再生性:补给资源与储存资源	(162)
14.2.3	地下资源的变动性与调节性	(163)
14.2.4	地下资源的多功能性	(163)
14.3	地下水资源属性及其意义	(164)
14.3.1	储存资源及其意义	(164)
14.3.2	补给资源及其意义	(164)

14.4	地下水可持续开采量评价方法	(165)
14.5	水资源管理及地下水管理	(166)
第15章	地下水与生态环境	(168)
15.1	地下水是活跃的生态环境因子	(168)
15.2	不合理开发水资源导致的地表水体生态环境负效应	(169)
15.3	人为干扰下地下水变化与土壤退化	(170)
15.4	地下水变化引起的岩土体变形与位移	(171)
15.4.1	地面沉降及地裂缝	(172)
15.4.2	岩溶塌陷	(173)
15.4.3	滑坡	(173)
15.4.4	水库诱发地震	(174)
15.4.5	潜蚀与管涌	(174)
15.5	地下水水质危害	(174)
15.5.1	天然地下水有害水质与地方病	(174)
15.5.2	地下水污染	(175)
15.6	地下水支撑的生态系统	(175)
15.6.1	概述	(175)
15.6.2	陆生植被生态系统与生态地下水位	(176)
15.6.3	生态需水量	(177)
15.6.4	含水层中的生物	(177)
15.6.5	潜流带生态系统	(177)
15.6.6	湿地生态系统	(178)
15.6.7	海底地下水排泄带与近岸海洋生态系统	(178)
第16章	当代水文地质学发展趋势及研究方法	(180)
16.1	当代水文地质学发展趋势	(180)
16.2	水文地质学科发展的某些关键问题	(181)
16.2.1	概念是学科发展的基石	(181)
16.2.2	控制性实验是探索自然本质的重要途径	(182)
16.2.3	方法论对学科发展的导向作用	(182)
16.2.4	多学科交叉渗透、多技术方法综合应用是学科发展的方向	(183)
16.2.5	向工程领域延伸是学科发展的要求	(184)
16.3	水文地质调查及研究中的某些理念与方法	(184)
16.3.1	重视地质成因分析的必要性	(185)
16.3.2	信息提取与组织	(186)
16.3.3	目标导向与问题导向	(189)
16.3.4	定性分析和定量模拟	(189)
参考文献		(190)
索引		(202)

第1章 绪 论

1.1 水文地质学的研究对象

水文地质学 (hydrogeology) 是研究地下水的科学。

水文地质学研究的是：在与岩石圈、地幔、水圈、大气圈、生物圈和人类活动相互作用下，地下水的水量与水质在时间和空间上的变化，以及地下水对各个层圈相互作用产生的影响，从而服务于人与自然相互协调的可持续发展（王大纯等，1995；张人权等，2004）。

地面以下岩土空隙中普遍赋存水。其中，岩土空隙完全被水充满的部分，称为饱和带，其顶面为地下水面；地面以下到地下水面之上，岩土空隙被水和空气充填，称为非饱和带。传统水文地质学的研究对象是饱和带水。

饱和带和非饱和带水存在着千丝万缕的联系，非饱和带水的重要性愈来愈被人们所认识，因此，水文地质学的研究对象，从传统的饱和带水，扩展为地面以下岩土空隙中的所有的水，既包括饱和带水，也包括非饱和带水。

20 世纪 70 年代，苏联学者提出地下水圈的概念。他们认为，从地壳浅部到地幔，以各种不同形态存在的水，是相互转换、不可分割的统一整体，称之为地下水圈 (subsurface hydrosphere)。从而，他们提出，水文地质学是研究地下水圈的科学 (Pinnekel, 1981, 1996；加弗里连科，1981)。

随着科学的发展，水文地质学的研究对象也在不断扩展，由地壳浅表岩土空隙中的饱和带水，扩展到非饱和带水，目前已扩展为从地壳到下地幔的地球各层圈中的水。

1.2 地下水的功能

地下水的功能 (functions of groundwater) 有多种，大体上可以概括为资源、地质营力、致灾因子、生态环境因子和信息载体等方面（张人权，1987）。

1.2.1 宝贵的资源

水是人类赖以生存的、不可缺少的资源 (resources)。作为水资源的组成，地下水分布广泛，变化稳定，水质良好，便于应用，是理想的饮用水源，也是生活、工业和农业用水的重要供水水源。在我国干旱、半干旱的华北、西北地区，地下水往往成为主要的、甚

至是唯一的供水水源。据统计, 2002 年全国总供水量为 $5534 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中, 地下水供水量为 $1091 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总供水量的 19.7%。我国华北, 地下水供水量占总供水量的比例较大, 河北超过 80%; 北京、山西、河南、山东等地地下水供水量达 50% ~ 70% (林祚顶, 2004)。

富集某些盐类和元素的地下水, 称为工业矿水, 是提炼有工业价值矿产品的液体矿床。含有某些特殊组分、具有某些特殊性质, 因而具有一定医疗保健作用的地下水, 称为矿(质)水(mineral water)。通过饮用矿水、用矿水沐浴、用矿泉泥进行泥浴, 对于治疗关节炎、神经衰弱等多种顽固性疾病, 疗效显著。

地球是一个巨大的热库, 蕴藏着丰富的地下热能。热水和热蒸汽是主要载热流体, 可用于供暖、建立温室, 进行地热发电, 截至 2004 年, 全球地热发电量为 56786 GW · h (Bertani, 2005)。我国地热资源占全球的 7.9%, 高温地热资源主要分布于藏南、滇西、川西及台湾, 中低温地热分布广泛(孔令珍, 2006)。

利用含水介质储能, 也是能源利用的一个途径, 其方式是: 冬季向井灌注冷水, 夏季抽取用于降温(冬储夏用); 夏季向井灌注温水, 用于冬季供暖(夏储冬用)。

20 世纪 70 ~ 80 年代以来, 一种全新的地热利用方法——地源热泵(ground-source heat pump)空调技术得到大力发展, 其中以地下水源热泵为主。地下水源热泵是将浅部地下水抽进热泵系统, 经过热交换后再回灌注入含水层, 利用相对恒定的地下水温度与季节性气温的差异, 作为空调能源(李世君等, 2006)。1997 年, 美国有 30 万台地源热泵投入使用, 提供了相当于 8000 ~ 11000 GW · h 的能量。我国于 20 世纪 90 年代开始推广, 2004 年底, 北京已有 500 多万平方米建筑物采用地源热泵空调(马立新等, 2006; 李世君等, 2006)。此项技术利用浅部地下水的能量, 洁净简便, 有利于改善城镇空气质量, 减少温室气体排放, 是可持续发展的能源开发方式。地下水的回灌补充, 避免水质污染, 避免浅层地下水温度上升, 则是保障地下水源热泵持续利用的关键。

含水介质还可以用来建造水封油库, 储存废物, 为减少温室气体而储存 CO_2 (Wang et al., 2006; 张晓宇等, 2006)。

地下水景观, 如泉水、温泉、间歇泉、古井遗址、湿地等, 是良好的旅游资源。

1.2.2 重要的地质营力

地下水是重要的地质营力(geological agent)(沈照理等, 1985; 张人权, 1987; Tóth, 1999)。地球内部无处不在的地下水, 是物质和热量传输及应力传递的载体, 是各种地质作用的积极参与者。

水是良好的溶剂, 进入地下后, 与周围岩土相互作用, 获得各种化学组分, 因此, 所有的地下水都是溶液。

在表生带中, 地下水对成壤过程、风化过程, 以及岩溶发育过程中的重要作用, 早已被人们所熟知。在地壳深部乃至地幔, 地下水与气体、成矿溶液、烃类等共同构成地质流体, 促成成矿元素和烃类迁移与聚集, 形成有工业价值的矿床和油气藏。在岩浆作用、变质作用、成岩作用、岩石圈的形成与演化过程中, 地质流体的影响, 愈来愈被人们所认识。从化学角度研究水-岩相互作用, 已经成为当今的一个热点(沈照理等, 1985, 1994, 2002)。

油气从储层向圈闭迁移聚集成为有工业价值的油气藏过程中,地下水流动起着重要作用。应用地下水流系统理论寻找与勘察油气田,已经成为重要方法(Tóth, 1980; 陶一川, 1993; 梁杏等, 2000, 2015; Liang et al., 2000)。

20 世纪 80 年代以来,对不同尺度地质构造形成中地质流体的作用有了新的认识。地球发育板块构造的必要前提,在于流体的热传输和润滑作用,没有水,就没有板块构造。逆冲断层是流体富集带,高压流体托浮上盘,起着“气垫”作用,同时润滑作用降低推移阻力,因此,推覆体才有可能发生数十千米到大于 100 km 的大范围运移(王宗起等, 1996; 杨巍然等, 1996)。

岩土体与其空隙中的水,共同构成一个力学平衡体系。当空隙水(间隙水)压力增大时,岩土体结构面(或潜在破坏面)有效应力和抗剪强度降低,使岩土体失稳,变形破坏。对于裂隙基岩,通过地下水和岩体之间的化学作用和物理作用,使结构面软化、泥化,强度降低。突然增强的空隙水压力,可以使原有的裂隙“楔裂”解体。暴雨、洪水、水库蓄水时,往往诱发滑坡。因此,从力学角度研究水-岩相互作用,十分重要(张倬元等, 1981, 2016; 王士天等, 1997; 黄润秋等, 2005)。

20 世纪 30 年代开始,发现某些水库蓄水后频繁发生地震,称之为水库诱发地震(reservoir-induced earthquake)。20 世纪 60 年代,美国采取深井灌注方法处理化学废液,用高压将化学废液注入 3000 多米的深井后,先后发生 1584 次地震。通过深井注水和抽水试验后,得出结论:库水渗入断裂带,空隙水压力增大,使断裂锁固能力降低,发生滑移,是水库诱发地震的原因。由此,人们提出了设想,在强震区的活动断裂带钻井注水,诱发小震,释放部分应力,以避免破坏性地震的发生(张倬元等, 1981, 2016)。

1.2.3 不可忽视的致灾因子

地下水既是地质营力,又是致灾因子(hazard factor),除了岩土体位移、水库诱发地震外,地下水还会引发其他灾害。例如,地面沉降、地裂缝、岩溶塌陷、潜蚀管涌、矿坑与隧道突水、海水入侵含水层、石窟文物损坏等。

平原地区开采深层地下水,随着地下水位下降,孔隙水压力降低,黏性土骨架会发生不可逆转的塑性压缩,引起地面沉降。我国有 46 个城市发生地面沉降,总面积约 94000 km²,最大沉降速率达 80~114 mm/a(天津、太原)(段永侯, 1999; 殷跃平等, 2005)。

在沉积厚度急剧变化的边界(如隐伏断裂、掩埋阶地),开采地下水使其两侧发生差异性地面沉降,会产生地裂缝。西安市产生 13 条地裂缝,就是活动性隐伏断裂叠加开采地下水后两侧差异性地面沉降造成的(张家明等, 1991)。由于控制地下水开采,这种差异性地面沉降有所减弱,但迄今依然存在。

当土质堤坝两侧的水位差大时,含水层中的颗粒被水流带出。在堤坝下形成管涌通道,最终导致堤坝溃决。美国的土石坝,40% 是此类渗透变形导致破坏的(任天培等, 1986)。潜蚀管涌也是防洪堤溃决成灾的主要原因。

在松散沉积物分布区开采疏干岩溶水,随着岩溶水水位降低会产生地面塌陷。经调查统计,截至 2004 年我国发生岩溶塌陷 2841 处,坍塌面积约 400 km²(李瑞敏等, 2007)。

地下采矿或进行各种地下工程(隧道、地下厂房建设等)时,地下水大量涌入,不但造成施工困难,甚至导致毁灭性事故。例如,1984 年开滦煤矿范各庄矿由于开挖面接

触巨大陷落柱，使下伏奥陶系岩溶水大量涌入矿坑，最大涌水量达 $34.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ，21 小时后矿坑全部被淹没（区永和等，1988）。随着采矿深度不断加大，需要更加重视我国矿坑涌水的预测与防治。

滨海地带开采地下水，会导致海水入侵含水层，使原先地下淡水咸化，可利用地下水资源减少。

我国有不少流传千年的石窟，如龙门石窟、云冈石窟等，精美的石雕是不可再生的艺术瑰宝。非饱和带及饱和带地下水入渗并携带盐类积聚于石雕表部，长期风化，损坏石雕。通过排除与堵截地下水，可以有效延长古老石窟的寿命（方云等，2001；黄继忠等，2004；严绍军等，2005）。

在多年冻结区，季节性冻土融冻会导致公共建设及建筑物损坏。在青藏铁路的建设中，对冻土采用保温方式，考虑全球变暖，今后拟由“保温”转变为“冷却路基”的降温思路，以确保路基的稳定（程国栋等，2006）。

水土中富含或缺乏某些重要化学元素或有机组分，会导致地方病（克山病、大骨节病、心血管病、甲状腺病、砷中毒等），由此发展了医学水文地质学（林年丰，1991）或医学地质学（Selinus et al.，2005）。

1.2.4 活跃灵敏的生态环境因子

生态环境是复杂的巨系统，地下水则是生态环境系统中一个最为活跃灵敏的子系统。气候、土壤、水与生物，处于相互作用的动平衡状态，在特定的自然条件下，会形成不良的生态环境。人类活动不恰当地干扰天然地下水，已经成为生态环境恶化的重要因素。

不良生态环境有：土地沙化、盐渍化、沼泽化、湿地退化、石漠化、地表水基流减少和断流、湖泊咸化、冻土退化以及天然地下水水质不良、地下水污染等，并进而导致植被退化、枯萎，动物消失，危及生物多样性与人类生存（张人权等，2005；万力等，2005）。

我国半干旱的华北平原，在季风气候控制下，雨季和旱季分明，泛滥平原微地貌变化多样，天然条件下形成的盐渍地约 $272.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$ （1958 年）。20 世纪 50 年代末至 60 年代，片面实施“以蓄为主”的方针，拦蓄降水和地表水，只蓄不排，地下水位普遍抬升，蒸发增强，土壤累盐，次生土壤盐渍地迅速增加到约 $4122.53 \times 10^4 \text{ hm}^2$ （1961 年）。重新建立排水系统，强烈开发浅层地下水以后，20 世纪 80 年代，盐渍地减少到约 $171.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$ （1984 年）（任鸿遵，1992）。

我国西北干旱区，地貌上依次分布高山、盆地与湖泊，由盆地边缘向中心，沉积颗粒变细。降水以冰雪形式集中分布于高山，主要由冰雪融水形成的地表水，流出山口后，在戈壁带大量入渗转化为地下水，到细土平原受阻溢出，形成宜于农牧业发展的绿洲；随后，汇泉成河，地表水和地下水最终集中排泄于蒸发强烈的盐湖（salt lake）。近半个世纪以来，大量截引地表水灌溉及修建水库，抬高地下水位，造成绿洲大面积次生盐渍化，盐渍地占耕地面积的 45%~50%。截引地表水，使绿洲下游地表水减少，迫使过度开采地下水，地下水位大幅度下降，导致土壤沙化（soil desertification），植被大片死亡，从而使沙尘暴的发生更加频繁（李文鹏，1999；李文鹏等，1999；袁生禄，2006）。

我国南方岩溶地区，山高坡陡，降水易于渗漏，地下水普遍埋藏很深，不利于土壤发