



CRC Press
Taylor & Francis Group

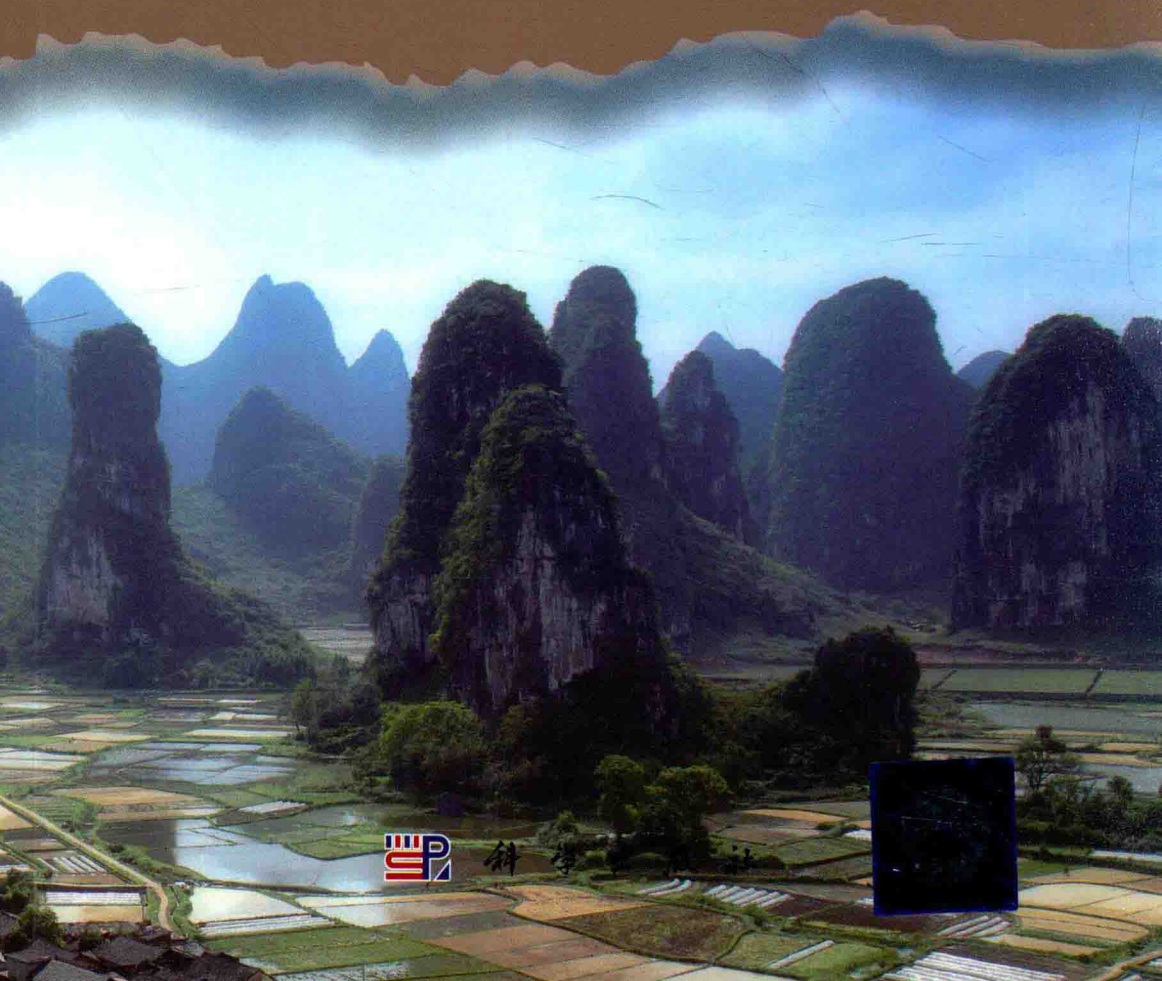
METHODS IN KARST HYDROGEOLOGY

岩溶水文地质学方法

〔瑞士〕 Nico Goldscheider

〔爱尔兰〕 David Drew 编

陈宏峰 何 愿 等 译



科学出版社



岩溶水文地质学方法

[瑞士] Nico Goldscheider [爱尔兰] David Drew 编

陈宏峰 何 愿等 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2015-6213 号

内 容 简 介

本书首先对岩溶水系统的介质结构与水流的高度非均质性和各向异性特征进行了描述;然后,对地质和地貌结构调查、岩溶洞穴探测、水文学方法、水力学方法、水化学方法、同位素方法、示踪技术、地球物理探测、岩溶水动力模拟等各类水文地质勘查技术方法进行了系统总结与回顾,提出了各方法在岩溶地区的适用性与局限性,以及注意事项和相应的改进措施;最后,通过不同目标和需求的岩溶调查工作实例,对各类方法的综合运用进行了概述。

本书提供的技术方法系统全面,文字浅显易懂,内容由浅入深,对我国岩溶地区的水文地质和环境地质调查及其他的专项勘查和研究工作均具有较高的指导价值。诚如原著的绪论所言,本书旨在为岩溶地下水资源保护、管理和开发实践提供帮助,能帮助解决工程建设中的岩溶水文地质问题,适合岩溶水文地质领域的硕士、博士和高级研究人员阅读参考,对从事技术研发的科学家和工程技术人员也能提供基础指导。

Methods in Karst Hydrogeology / edited by Nico Goldscheider & David Drew / ISBN: 978-0-415-42873-6

© 2007 Taylor & Francis Group, London, UK

All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by

CRC Press, a member of the Taylor & Francis Group.

本书中文简体翻译版授权由科学出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

岩溶水文地质学方法 / (瑞士) 戈德沙伊德 (Goldscheider, N.), (爱尔兰) 德鲁 (Drew, D.) 编; 陈宏峰等译. —北京: 科学出版社, 2015. 10

书名原文: Methods in Karst Hydrogeology

ISBN 978-7-03-045947-3

I. ①岩… II. ①戈… ②德… ③陈… III. ①岩溶水-水文地质学
IV. ①P64②P641③P641.1④ [P345]

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 241207 号

责任编辑: 王 运 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张: 17 1/4

字数: 348 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

译者名单

陈宏峰 何 愿 夏日元

甘伏平 张劲松 杨树奇

邹胜章 覃汉莲

作者名单

- Attila Kovács, Centre of Hydrogeology (CHYN), University of Neuchâtel, 2009
Neuchâtel, Switzerland
- Bartolomé Andreo-Navarro, Dept. of Geology, Faculty of Sciences, University of
Malaga, 29071 Malaga. Spain
- Chris Groves, Hoffman Environmental Research Institute, Western Kentucky
University, Bowling Green KY 42101, USA
- Chris Smart, Department of Geography, University of Western Ontario, London, Ontario
N6A 5C2, Canada
- Daniel Hunkeler, Centre of Hydrogeology (CHYN), University of Neuchâtel, 2009
Neuchâtel, Switzerland
- David Drew, Department of Geography, Trinity College, Dublin 2, Ireland
- Frank P. Bosch, Institute for Geophysics, University of Münster, 48149 Münster,
Germany
- Heinz Surbeck, Centre of Hydrogeology (CHYN), University of Neuchâtel, 2009
Neuchâtel, Switzerland
- Jacques Mudry, Department of Geosciences, University of Franche-Comté, 25030,
Besançon, France
- M. Lee Davisson, Flow and Transport Group, Lawrence Livermore National Laboratory,
Livermore, California, USA
- Marcus Gurk, Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering
(ITSAK), Thessaloniki, Greece
- Martin Sauter, Geoscience Centre, University of Göttingen, 37077 Göttingen, Germany
- Neven Kresic, Malcolm Pirnie, Inc., 3101 Wilson Blvd., Suite 550, Arlington, VA
22201, USA
- Nico Goldscheider, Centre of Hydrogeology (CHYN), University of Neuchâtel, 2009
Neuchâtel, Switzerland

Philipp Häuselmann, Swiss Institute for Speleology and Karst Studies (SISKA), 2301
La Chaux-de-Fonds, Switzerland

Pierre-Yves Jeannin, Swiss Institute of Speleology and Karst-studies, SISKA, 2301 La
Chaux-de-Fonds, Switzerland

Ralf Benischke, Joanneum Research, Institute of Water Resources Management,
Hydrogeology and Geophysics, 8010 Graz, Austria

Robert E. Criss, Department of Earth and Planetary Sciences, Washington University,
St. Louis, MO, USA

Stephen Worthington, Worthington Groundwater, Dundas, Ontario, Canada

Timothy D. Bechtel, University of Pennsylvania and Enviroscan, Inc., 1051 Columbia
Ave., Lancaster, PA 17603, USA

William E. Winston, Department of Earth and Planetary Sciences, Washington
University, St. Louis, MO, USA

前 言

到 2015 年,将全球缺乏安全饮用水的人口数量减至目前的一半,是联合国千年发展目标之一。湖泊、河流仅占全球液态淡水的极小部分,大部分淡水储存于地下含水层中。地下水不仅远比地表水丰富,而且地质环境也为地下水免遭污染提供了一定的天然防护。因此,地下水资源的合理开发与管理是实现上述千年发展目标的关键。

世界上很多地区的岩溶含水层储存了重要的淡水资源,尽管天然的水质极佳,但相对于其他类型含水层,岩溶含水层对污染物具有更高的脆弱性;同时,还具有独特的水文地质特征,例如,地下水可在岩溶管道中远距离快速迁移,因此,需采用专门的调查方法。

本书是第一本系统介绍岩溶含水层研究方法的参考书,由来自 8 个国家的 21 名学者组成的国际团队完成。作者包括从事项目研究的科学家和对岩溶科研感兴趣的工程师,在此感谢所有作者对本书的贡献。完成本书不轻松,耗费了大量时间,但能与优秀的专家团队合作,也是我们的荣幸和快乐。

Nico Goldscheider & David Drew

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 本书的目标	1
1.2 岩溶含水层调查的特殊性	1
1.2.1 含水层演化	2
1.2.2 空间非均质性	2
1.2.3 渗透系数的尺度效应	2
1.2.4 补给和入渗的双重性	3
1.2.5 介质空隙、水流和储存的双重性	3
1.2.6 急剧的动态变化	4
1.3 岩溶含水层研究方法综述	4
1.4 加拿大 Walkerton 地区的实例	6
第2章 地质与地貌结构	8
2.1 引言	8
2.2 矿物学、岩石学和地层学	9
2.2.1 可溶岩矿物	9
2.2.2 可溶岩	10
2.2.3 岩性对岩溶的影响	11
2.2.4 从岩石地层学到水文地层学	11
2.3 地质构造	14
2.3.1 褶皱	14
2.3.2 断裂	15
2.3.3 节理和层面	16
2.3.4 裂隙研究	17
2.4 地形地貌	17
2.4.1 岩溶地貌分类与地形测绘	17
2.4.2 岩溶地貌与水文地质学的关系	19

2.5 小结	21
第3章 洞穴调查	22
3.1 引言	22
3.2 洞穴调查数据在水文地质学上的应用	24
3.2.1 洞穴测绘	24
3.2.2 洞穴三维模拟	25
3.2.3 洞穴和钻孔精确定位	27
3.2.4 洞穴调查成果解译	28
3.2.5 预测未知管道的分布及特征	29
3.2.6 洞穴成因及洞穴网络的发育阶段识别	31
3.2.7 水文地质学家的可靠洞穴数据来源	31
3.3 洞穴环境调查	32
3.3.1 管道形态分析	32
3.3.2 洞穴沉积物分析	32
3.3.3 洞穴水流示踪	33
3.4 洞穴水流监测	33
3.4.1 引言	33
3.4.2 渗流带水流特征	34
3.4.3 渗流带的运移特征	36
3.5 小结	39
第4章 水文学方法	41
4.1 引言	41
4.2 岩溶含水层系统的总体水文特征	42
4.3 基本概念:水均衡	43
4.4 泉流量曲线	44
4.5 降雨和补给的监测	45
4.5.1 引言	45
4.5.2 人工观测站	46
4.5.3 自动记录雨量站	46
4.5.4 多普勒雷达	47

4.6 水流观测	47
4.6.1 引言	47
4.6.2 水位测量	47
4.6.3 流量直接观测	49
4.6.4 流速仪	49
4.6.5 堰和水槽	51
4.6.6 示踪剂稀释	52
4.6.7 间接测流方法	53
4.6.8 洞穴滴水观测	54
4.7 电子数据记录	54
4.8 小结	56
第5章 水力学方法	58
5.1 引言	58
5.2 水力学与水文地质学参数	58
5.2.1 孔隙度、有效孔隙度和储水系数	58
5.2.2 水头	61
5.2.3 导水系数与渗透系数	62
5.2.4 地下水流速	63
5.2.5 地下水流量	63
5.3 钻孔水力学试验	67
5.3.1 引言	67
5.3.2 压水试验	67
5.3.3 微水试验	70
5.4 含水层抽水试验	72
5.4.1 引言	72
5.4.2 数据分析	73
5.4.3 含水层各向异性	81
5.4.4 含水层各区段导水系数	83
5.5 小结	84
第6章 水化学方法	85
6.1 引言	85
6.2 参数与过程	85
6.2.1 概论	85

6.2.2	与降雨有关的参数	87
6.2.3	与土壤有关的参数	87
6.2.4	与碳酸盐岩有关的参数	88
6.2.5	与其他岩石有关的参数	90
6.2.6	人为来源的化合物	90
6.3	采样方案与方法	93
6.3.1	采样的时空布置	93
6.3.2	采样位置	94
6.3.3	采样频率	94
6.3.4	取样方法	95
6.4	分析方法	96
6.4.1	持续测试方法	96
6.4.2	实验室方法	96
6.5	水化学数据分析	99
6.5.1	引言	99
6.5.2	应用灰岩溶蚀的有关参数评价含水层功能	99
6.5.3	评价水流的滞留时间与来源	103
6.5.4	确定侧向补给	105
6.5.5	混合作用的确定和定量研究	106
6.5.6	利用统计方法进行整体分析	107
6.6	评价污染物的来源与归宿	108
6.6.1	岩溶泉污染物检测	108
6.6.2	定量确定污染物	110
6.6.3	确定污染源	111
6.6.4	污染物归宿的调查	111
6.7	小结	112
第7章	同位素方法	113
7.1	引言	113
7.2	氢、碳和氧同位素	114
7.2.1	同位素丰度及其对岩溶水文地质学的重要性	114
7.2.2	同位素变化与指标	114
7.3	大气淡水的氢、氧同位素	115
7.3.1	地理变化	115

7.3.2	时间变化	116
7.3.3	大气降水线	117
7.4	确定岩溶水的来源	117
7.4.1	岩溶水中大气降水的百分率	117
7.4.2	同位素混合与溶质的相关性	119
7.4.3	岩溶泉的稳定同位素示踪	120
7.4.4	岩溶水对地表水流的贡献	121
7.5	氧同位素在岩溶含水层中的滞留时间	121
7.5.1	泉水同位素的时间变化	121
7.5.2	同位素、物理和化学变化的相对范围	123
7.5.3	线性水库模型	123
7.5.4	水文脉冲模型	123
7.6	放射性同位素确定地下水年龄	125
7.6.1	氙	127
7.6.2	氙-氩-3 和氩-85	128
7.6.3	放射性碳同位素技术	129
7.6.4	氮的研究	130
7.7	小结	133
第8章	示踪技术	135
8.1	引言	135
8.2	人工示踪剂类型	136
8.2.1	综述	136
8.2.2	荧光染料	137
8.2.3	盐	139
8.2.4	颗粒示踪剂	140
8.3	示踪试验的准备和操作	142
8.3.1	初步调查和合法性评估	142
8.3.2	示踪剂类型和投放量	142
8.3.3	投放点和投放技术	144
8.3.4	选择取样位置和采样方法	145
8.3.5	实验室分析	148
8.3.6	野外测试设备	151

8.4 评价与解译	152
8.4.1 数据准备、数据质量与误差分析	152
8.4.2 示踪剂背景	152
8.4.3 地下水中示踪剂运移	153
8.4.4 穿透曲线	154
8.4.5 传输时间和运移速度	155
8.4.6 回收率	156
8.4.7 管道网络的描述	156
8.4.8 应用解析模型定量研究传输参数	158
8.5 小结	160
第9章 地球物理方法	161
9.1 引言	161
9.2 地球物理学概论	165
9.2.1 为什么应用物探	165
9.2.2 物探的应用条件	166
9.2.3 噪声问题	166
9.2.4 分辨率与探测深度	167
9.2.5 方法选择	167
9.2.6 定位测量	167
9.2.7 非唯一性	168
9.3 地震方法	168
9.3.1 概述	168
9.3.2 地震折射法	170
9.3.3 地震反射法	171
9.3.4 面波	172
9.4 重力法	172
9.5 电法和电磁法	174
9.5.1 概述	174
9.5.2 直流电法	174
9.5.3 交流电磁法	176
9.5.4 自然电位法	182
9.5.5 地质雷达法(GPR)	184

9.5.6 磁法	185
9.6 钻孔物探测井	186
9.7 小结	190
第10章 岩溶水动力模拟	191
10.1 引言	191
10.2 岩溶系统的概念模型	191
10.3 模拟方法	193
10.4 整体模型	193
10.4.1 引言	193
10.4.2 单次事件模型(灰箱模型)	194
10.4.3 时间序列分析	197
10.5 分布式模型	198
10.5.1 引言	198
10.5.2 离散裂隙网络方法(DFN)	199
10.5.3 离散管道网络方法(DCN)	201
10.5.4 等效孔隙介质方法(EPM)	203
10.5.5 双重连续介质方法(DC)	204
10.5.6 离散-连续组合方法(混合)(CDC)	205
10.6 岩溶含水层的溶质和热量传输模拟	207
10.7 小结	209
第11章 各种方法联合运用	211
11.1 引言与方法总结	211
11.2 特定目标调查的综合方法	214
11.2.1 确定岩溶水系统范围	214
11.2.2 确定水源位置	214
11.2.3 水质和污染问题评价	215
11.2.4 岩溶水流系统的概化	215
11.2.5 岩溶地下水脆弱性评价	216
参考文献	217

第 1 章 绪 论

Nico Goldscheider, David Drew 和 Stephen Worthington

1.1 本书的目标

岩溶含水层研究不仅是科学的挑战,对人类的生产和生活也同样重要,岩溶地下水是世界上很多国家、地区和城市必不可少的淡水水源,据 Ford 和 Williams (1989) 估算,全世界 25% 的人口饮用水来自岩溶水;同时,岩溶含水层普遍受人类活动影响,对污染具有高度的脆弱性 (Drew and Hötzel, 1999)。Bakalowicz (2005) 指出:岩溶水的开发利用难度和脆弱性均较高,应尽量避免将岩溶水作为供水源。目前,在淡水资源极度匮乏的地中海周边地区,岩溶水资源尚未开发,大量潜在的饮用水由海底泉排泄,当然,如果遵循岩溶的发育规律,这些岩溶水资源是可以开发利用的。

本书主要介绍岩溶水文地质研究的技术方法,包括利用现代技术对数据进行解译和模拟。可广泛用于确定岩溶泉域的范围、钻孔定位、水质监测、化学或微生物污染问题的评价和治理、岩溶含水层脆弱性制图等。隧道、水库等工程建设也会引发各种岩溶和地下水问题,本书不专门讨论岩溶工程问题 (另有专著, Milanović, 2000),但本书能帮助解决工程建设中的水文地质问题。

本书的方法为研究岩溶水文地质系统水流和溶质运移特征提供方法支持,旨在为岩溶地下水资源保护、管理和开发实践提供帮助。岩溶水文地质领域的硕士、博士和高级研究人员能从中获取有用信息。技术改进和新技术开发还需开展大量工作,本书也能为从事技术研发的科学家和工程技术人员提供基础指导。方法从基础到深奥,读者可根据目标、时间、技术和人力资源的可行性选择合适的方法;同时,本书也可为扩展阅读提供有益参考。

1.2 岩溶含水层调查的特殊性

岩溶含水层特征与裂隙和孔隙含水层之间存在显著差异,正如 Ford 和

Williams (1989, 2007) 在专著《岩溶地貌和水文学》里所说, 岩溶含水层常存在某些特殊的现象与过程, 因此, 需要专门的调查方法。其他专著 (Bonacci, 1987; Dreybrodt, 1988; White, 1988; Klimchouk et al., 2000) 对岩溶地貌、洞穴和地下水流系统的演化也作了详细介绍。

1.2.1 含水层演化

碳酸盐岩在含 CO_2 水流的溶解作用下, 部分初始裂隙扩大为岩溶管道和洞穴, 因此, 含水层总是在随时间演化, 水流系统和管道网络的分布、规模也在随时间而改变: 管道垮塌或被沉积物充填; 饱水带管道与包气带管道相互转化等。这种演化过程在海岸带表现尤为明显, 过去低海平面时期形成的岩溶水系统远低于现代海平面, 多数已停止发育, 但局部可能仍在发育。由于岩溶含水层随时间发生演变, 有些地下水流通道和排泄出口难以根据现代地形和水文调查确定, 因此, 岩溶水文地质调查中还应分析地貌史, 预测可能存在的未知水流通道和排泄出口, 并制定相应的观测和采样方案。

1.2.2 空间非均质性

所有含水层都具有非均质特征, 在砂岩或砾岩含水层中开展钻探, 基本都能钻遇地下水, 而在极度非均质的岩溶含水层中钻孔很难获得成功。岩溶管道和洞穴中存在大量的地下水流, 而相隔仅数米可能就是完全不含水的块状岩层 (图 1.1)。非均质性是岩溶水文地质调查需要考虑的主要问题, 首先, 现有的技术方法已能确定非均质性特征, 如开展地球物理探测 (下文简称“物探”) 调查地下含水裂隙或岩溶管道; 同时, 非均质性也意味着所有的插值法和外推法都难以直接用于岩溶含水层研究, 特别是根据钻孔水位或测压计水位观测数据难以绘制等水位图; 即使能生成等水位图, 也难以预测地下水的流向和流速, 除非还有大量的观测井数据。通常采用示踪试验确定岩溶地下水的流向和流速。

1.2.3 渗透系数的尺度效应

渗透系数的尺度效应是岩溶系统非均质性的直接结果, 基岩样品的渗透性主要由孔隙和微裂隙决定, 渗透系数值一般较低; 抽水试验涉及更大的基岩体, 测试结果主要受宽大裂隙控制, 渗透系数值更高; 而整个岩溶含水层受岩溶管道网络控制, 渗透系数值最高 (Kiraly, 1975)。因此, 实验室测试和抽水试验尽管能

分别反映岩块和抽水孔附近的水力特征,但渗透系数值并不能代表整个岩溶水系统。岩溶含水层的水力特征受大裂隙和管道控制,因此,岩溶含水层的数值模拟研究中,需同时考虑代表管道的超高渗透性单元和代表弱岩溶化岩体的低渗透性单元。

1.2.4 补给和入渗的双重性

岩溶含水层的补给来源包括岩溶区的内源补给和相邻非岩溶区的外源补给,水流以点状补给的方式集中潜入落水洞、漏斗,或经由土壤分散入渗进入基岩裂隙(图1.1)。内源补给通常更为分散,但表层岩溶带汇聚分散水流后,也以集中的方式向竖井和管道补给。孔隙含水层主要接受内源和分散补给,本节所述补给入渗的双重性主要针对岩溶含水层。在水均衡估算及解决地下水保护和含水层脆弱性等问题时,须考虑流域的外源补给的汇水范围。经由落水洞的点状补给也是污染物进入岩溶含水层的主要途径。

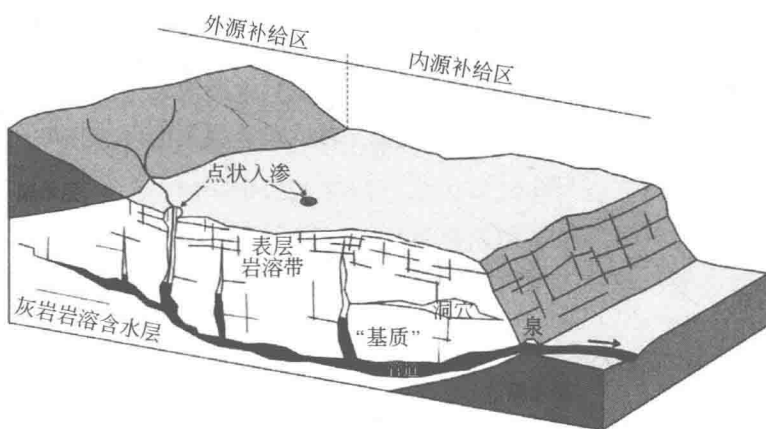


图1.1 非均质岩溶含水层系统示意图

岩溶水系统具有内源和外源双重补给、点状集中补给和分散入渗双重入渗方式以及管道和基岩的双重孔隙和水流等特征

1.2.5 介质空隙、水流和储存的双重性

岩溶含水层空隙包括粒间孔隙、裂隙和管道。管道规模从宽数厘米的溶蚀裂隙到巨型洞穴通道不等,因此,可认为岩溶含水层是嵌入到弱岩溶化基岩中,并与之相互作用的管道网络系统(图1.1)。管道中地下水流速较大,一般 $>100\text{m/h}$,