

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 岩溶及岩溶水的分布	1
1.2 岩溶地下水的功能	2
1.2.1 宝贵的水资源	3
1.2.2 不可忽视的生态功能	3
1.2.3 珍贵的自然、文化遗产与旅游资源	4
1.2.4 岩溶地质灾害的致灾因子	4
1.3 岩溶水文地质学的研究内容	5
1.4 岩溶水文地质学的发展	6
1.4.1 国外岩溶水文地质学	6
1.4.2 中国岩溶水文地质学的发展	9
第2章 岩溶发生及发育基本理论	13
2.1 概述	13
2.2 碳酸盐岩溶解理论	14
2.2.1 岩溶动力系统理论	14
2.2.2 灰岩与白云岩溶蚀差异性研究	16
2.2.3 岩溶分异作用	17
2.2.4 温度变化产生的混合溶蚀作用	18
2.2.5 含碳酸盐的水溶液与卤水的混合溶蚀作用	19
2.2.6 硫化物对碳酸盐岩的溶解作用	20
2.3 硫酸盐岩岩溶发育特征	21
2.3.1 硫酸盐岩的分布	21
2.3.2 硫酸盐岩溶蚀作用	22
2.3.3 硫酸盐岩-碳酸盐岩复合岩溶作用——以中国华北地区为例	23
2.4 岩溶含水层中溶隙-管道-通道系统的发育理论	28
2.4.1 概述	28
2.4.2 洞穴系统形成演化模式的研究现状	29
2.4.3 溶隙-管道-通道系统形成演化模式研究	33
2.4.4 典型地质构造条件下岩溶裂隙管道系统发育特征	36
第3章 岩溶地下水的赋存	45
3.1 岩溶含水介质特征	45
3.1.1 岩溶含水介质的不均一性	45

3.1.2	岩溶含水介质的各向异性	48
3.1.3	岩溶含水介质的演化	48
3.2	岩溶含水层、隔水层与弱透水层	49
3.3	岩溶含水层系统	49
3.4	岩溶地下水的垂直分带	51
3.5	按埋藏条件的岩溶地下水分类	53
第4章	岩溶地下水运动的基本规律	56
4.1	岩溶含水层的水力参数	56
4.1.1	岩溶含水层的孔隙度	56
4.1.2	水头	58
4.1.3	水力传导率和导水率	59
4.1.4	水力传导率的规模效应	59
4.1.5	岩溶地下水流速	60
4.2	岩溶地下水运动基本规律	62
4.2.1	概述	62
4.2.2	多孔连续介质渗透定律	62
4.2.3	裂隙介质水力学定律	64
4.2.4	岩溶管道介质水力学定律	65
第5章	岩溶水系统	72
5.1	岩溶水系统的基本概念	72
5.2	岩溶水系统的构成	73
5.2.1	构成要素	73
5.2.2	岩溶水系统边界	74
5.2.3	岩溶蓄水构造	77
5.2.4	岩溶水系统的排泄	77
5.3	岩溶水系统分类	78
5.3.1	概述	78
5.3.2	岩溶水系统分类	80
5.4	岩溶水系统分析与系统模式	83
5.4.1	岩溶水系统分析概述	83
5.4.2	岩溶水系统形成模式	84
第6章	岩溶水动力特征	90
6.1	概述	90
6.2	中国北方岩溶裂隙水的水动力特征	92
6.3	中国北方岩溶水动力场类型	97
6.3.1	单斜逆置型岩溶水系统水动力场	97
6.3.2	单斜顺置型岩溶水动力场	100
6.3.3	向斜-盆地型岩溶水动力场	102
6.3.4	复杂结构的岩溶水动力特征	104

6.4	中国南方岩溶裂隙-管道水及岩溶裂隙-管道-通道水的水动力特征	106
6.5	中国南方岩溶裂隙-管道-通道水水动力类型	107
6.5.1	峰林谷地平缓构造区的岩溶裂隙-管道-通道水系统——以桂林冠岩 地下河为例	107
6.5.2	岩溶化背斜山地岩溶水动力特征	110
6.5.3	覆盖岩溶区岩溶裂隙-管道水动力特征	112
第7章	岩溶水化学特征	117
7.1	概述	117
7.2	干旱-半干旱区岩溶水化学特征——以山西为例	117
7.2.1	岩溶地下水系统的水化学特征	117
7.2.2	岩溶地下水的溶蚀能力及溶蚀速度	121
7.2.3	岩溶大泉水化学场分析——以丹河岩溶水系统为例	124
7.3	热带-亚热带岩溶水化学特征——以洛塔岩溶水系统为例	131
7.3.1	概述	132
7.3.2	岩溶水化学特征	133
7.3.3	溶蚀速度	136
7.4	巨型盆地的岩溶水动力-水化学特征	137
7.4.1	鄂尔多斯盆地岩溶水动力-水化学分带	137
7.4.2	华北平原古潜山水动力-水化学特征	140
第8章	岩溶水系统模型化研究	146
8.1	概述	146
8.1.1	岩溶水系统评价	147
8.1.2	岩溶地下水科学管理	147
8.1.3	岩溶区大型地下工程涌水及环境影响预测评价	147
8.2	岩溶水系统方法研究流程	148
8.3	岩溶水系统水均衡研究	149
8.3.1	岩溶泉域水均衡——以山西丹河岩溶泉域为例	149
8.3.2	地下河系统水均衡——以贵州仁怀长岗地下河为例	152
8.4	泉水流量衰减分析法	157
8.4.1	方法讨论	157
8.4.2	中国北方岩溶泉水流量衰减分析	159
8.4.3	中国南方岩溶裂隙-管道泉流量衰减分析	162
8.5	泉水流量频率分析法	165
8.5.1	经验频率法	165
8.5.2	理论频率法	166
8.6	泉水流量与降水量相关分析方法	167
8.6.1	一元回归分析	168
8.6.2	多元回归分析	170

8.7 岩溶水系统的数值模拟研究	172
8.7.1 概述	172
8.7.2 大型泉域岩溶水系统数值模拟研究——以山西丹河岩溶水系统为例	174
8.7.3 岩溶裂隙含水层与岩溶管道耦合线性流模型化数值模拟研究	192
8.7.4 岩溶裂隙水线性流与岩溶管道非线性流耦合模型数值模拟研究	197
8.7.5 美国地质调查局管道流数值模拟方法 (2008) 简介	206
第9章 岩溶地下水资源的开发利用	219
9.1 岩溶地下水资源的特性	219
9.2 中国北方岩溶泉域地下水的综合开发利用	220
9.2.1 概述	220
9.2.2 丹河岩溶水系统的综合开发利用	222
9.3 中国南方岩溶水的开发利用	224
9.3.1 概述	224
9.3.2 中国南方岩溶泉的开发利用	225
9.3.3 中国南方地下河的开发利用	229
9.3.4 中国南方岩溶水系统的综合开发利用	236
9.4 国外岩溶水开发利用	246
9.4.1 概述	246
9.4.2 岩溶泉开发利用	246
9.4.3 岩溶水流域的综合开发利用——以克罗地亚欧姆布拉泉域为例	253
第10章 岩溶水资源及水环境保护	259
10.1 国内外研究现状	259
10.2 中国北方岩溶水文地质环境问题与保护	263
10.2.1 岩溶水文地质环境问题	263
10.2.2 岩溶水文地质环境问题成因	272
10.2.3 中国北方岩溶地下水资源的可持续利用与保护	282
10.3 中国南方岩溶水资源及环境保护	300
10.3.1 概况	300
10.3.2 地下河污染问题	300
10.4 国外岩溶水资源及环境保护	306
10.4.1 岩溶地下水保护带划分	306
10.4.2 岩溶含水层的人工补给和保护——以美国爱德华岩溶含水层为例	309
参考文献	315

CONTENTS

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Distribution of Karst and Karst Water	1
1.2 Functions of Karst Water	2
1.2.1 Precious Water Resources	3
1.2.2 Unnegligible Ecological Effect	3
1.2.3 Valuable Natural and Cultural Inheritance	4
1.2.4 Karst Geological Hazard Factor	4
1.3 Scope of Karst Hydrogeology	5
1.4 Development of Karst Hydrogeology	6
1.4.1 Development of Karst Hydrogeology in the World	6
1.4.2 Development of Karst Hydrogeology in China	9
Chapter 2 Basic Theory of Karst Development	13
2.1 Overview	13
2.2 Theory of Solution for Carbonatite Rocks	14
2.2.1 The Study of Karst Dynamics System	14
2.2.2 The Difference of Corrosion between Limestone and Dolomite	16
2.2.3 Karst Differentiation	17
2.2.4 Mixture Corrosion Caused by Variation of Ground Water Temperature	18
2.2.5 Mixture Corrosion Caused by Brine Intrusion	19
2.2.6 Impact of Sulphide to Corrosion of Carbonatite Rocks	20
2.3 Basic Features of Sulphate Karst	21
2.3.1 Distribution of Sulphate Rocks	21
2.3.2 Karstification of Sulphate Rocks	22
2.3.3 Mechanism of Compound Karst Process Related to Sulphate Rocks and Carbonatite Rocks—A Case Study in North China	23
2.4 Theory of Development of Karst Fractural-Conduit-Channel System	28
2.4.1 Overview	28
2.4.2 Study of Cavern System Development	29
2.4.3 Study of Patterns of Karst Fractural-Conduit-Channel System	33
2.4.4 The Karst Fractural-Conduit System in Typical Geologic Condition	36

Chapter 3 Occurrence of Karst Groundwater	45
3.1 Karst Aquifer Medium	45
3.1.1 Inhomogeneous Property of Karst Aquifer Medium	45
3.1.2 Anisotropic Property of Karst Aquifer Medium	48
3.1.3 Evolution of Karst Aquifer	48
3.2 Karst Aquifer, Aquiclude, Aquitard	49
3.3 Karst Aquifer System	49
3.4 Vertical Zoning of Karst Water	51
3.5 Classification of Karst Groundwater Occurrence	53
Chapter 4 Basic Law of Karst Groundwater Movement	56
4.1 Hydraulic Parameter of Karst Aquifer	56
4.1.1 Porosity of Karst Aquifer	56
4.1.2 Hydraulic Head	58
4.1.3 Hydraulic Conductivity and Transmissibility	59
4.1.4 Scope Effect of Hydraulic Conductivity	59
4.1.5 Karst Groundwater Flow Velocity	60
4.2 The Basic Law of Karst Groundwater Movement	62
4.2.1 Overview	62
4.2.2 Darcy's Law for Porous Groundwater	62
4.2.3 Hydraulic Law for Fractured Groundwater	64
4.2.4 Hydraulic Law for Karst Conduit Flow	65
Chapter 5 Karst Groundwater System	72
5.1 Basic Conception of Karst Groundwater System	72
5.2 Formation of Karst Groundwater System	73
5.2.1 Essential Factors for Constructing Karst Groundwater System	73
5.2.2 Boundary of Karst Groundwater System	74
5.2.3 Karst Retain Water Structure	77
5.2.4 Discharge of Karst Groundwater	77
5.3 Classification of Karst Groundwater System	78
5.3.1 Overview	78
5.3.2 Types of Karst Groundwater System	80
5.4 Analysis of Karst Groundwater System and Patterns	83
5.4.1 Overview	83
5.4.2 Patterns of Karst Groundwater System	84
Chapter 6 Karst Hydrodynamics Features	90
6.1 Overview	90
6.2 Hydrodynamics Feature of Karst Fracture Water Flow in North China	92

6.3	Types of Fracture Water Flow in North China	97
6.3.1	Karst Hydraulic Flow Field in Negative Monocline	97
6.3.2	Karst Hydraulic Flow Field in Positive Monocline	100
6.3.3	Karst Hydraulic Flow Field in Syncline-Basin	102
6.3.4	Karst Hydraulic Flow Field in Complex Geological Structure	104
6.4	Hydrodynamics Feature of Karst Fracture-Conduit-Channel Water Flow in South China	106
6.5	Type of Karst Fracture-Conduit-Channel Water Flow in South China	107
6.5.1	Karst Fracture-Conduit-Channel Water Flow System in Peak Forest-Valley	107
6.5.2	Karst Hydrodynamics Feature of Anticlinal Mountain	110
6.5.3	Karst Fracture-Conduit Water Flow in Covered Karst Areas	112
Chapter 7	Karst Hydrochemical Characteristics	117
7.1	Overview	117
7.2	Karst Hydrochemical Characteristics in Arid and Semi-Arid Regions—A Case Study of Shanxi in North China	117
7.2.1	Hydrochemical Features of Karst Groundwater System	117
7.2.2	Corrosion Ability and Corrosion Rate	121
7.2.3	Hydrochemical Field of Karst Spring—A Case Study of Danhe Karst Groundwater System	124
7.3	Karst Hydrochemical Characteristics in Tropic and Subtropic Regions—A Case Study of Luota in South China	131
7.3.1	Overview	132
7.3.2	Karst Hydrochemical Features	133
7.3.3	Corrosion Rate	136
7.4	Karst Hydrodynamic-Hydrochemical Zoning of Macroscopic Basin in China	137
7.4.1	Karst Hydrodynamic-Hydrochemical Zoning of Erdos Basin	137
7.4.2	Karst Hydrodynamic-Hydrochemical Zoning of Paleo-buried Hill in North China Plain	140
Chapter 8	Modelling of Karst Groundwater System	146
8.1	Overview	146
8.1.1	Assessment of Karst Groundwater System	147
8.1.2	Scientific Management of Karst Groundwater System	147
8.1.3	Prediction and Assessment for Water Gushing and Environmental Effect in Underground Work	147
8.2	Study Process of Karst Groundwater System Analysis	148
8.3	Study of Karst Groundwater Budget	149
8.3.1	Budget of Karst Spring Basin	149

8.3.2	Budget of Karst Subterranean River System	152
8.4	Regression Analysis of Karst Spring Discharge	157
8.4.1	Discussion	157
8.4.2	Regression Analysis of Karst Fractural Spring Discharge in North China	159
8.4.3	Regression Analysis of Karst Fractural-Conduit Spring Discharge in South China	162
8.5	Frequency Analysis of Karst Spring Discharge	165
8.5.1	Experience Frequency Analysis Method	165
8.5.2	Theory Frequency Analysis Method	166
8.6	Correlation Analysis (Spring Discharge-Precipitation)	167
8.6.1	Correlation Analysis for One Element	168
8.6.2	Correlation Analysis for Multiple Elements	170
8.7	Numerical Modelling for Karst Groundwater System	172
8.7.1	Overview	172
8.7.2	Numerical Modelling for Large Karst Fractural Groundwater Drainage	174
8.7.3	Numerical Modelling of Coupled Linear Flow for Karst Fractural Flow with Karst Conduit Flow	192
8.7.4	Numerical Modelling of Coupled Linear Flow for Karst Fractural Flow with Non-linear Flow for Karst Conduit Flow	197
8.7.5	Recommendation of "Documentation of Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005" (U. S. Geological Survey, 2008)	206
Chapter 9	Development and Utilization of Karst Groundwater Resources	219
9.1	The Nature of Karst Groundwater	219
9.2	Comprehensive Development and Utilization of Karst Spring Basin in North China	220
9.2.1	Overview	220
9.2.2	Comprehensive Development and Utilization of Danhe Karst Spring	222
9.3	Development and Utilization of Karst Groundwater in South China	224
9.3.1	Overview	224
9.3.2	Development and Utilization of Karst Spring in South China	225
9.3.3	Development and Utilization of Subterranean River in South China	229
9.3.4	Comprehensive Development and Utilization of Karst Groundwater System	236
9.4	Development and Utilization of Karst Groundwater in the World	246
9.4.1	Overview	246
9.4.2	Development and Utilization of Karst Spring	246
9.4.3	Comprehensive Development and Utilization of Karst Water Drainage	253

Chapter 10 Protection of Karst Water Resources and Environment	259
10.1 Overview	259
10.2 Protection of Karst Water Resources and Environment in North China	263
10.2.1 The Problems of Karst Hydrogeological Environment	263
10.2.2 Cause for Problems of Karst Hydrogeological Environment	272
10.2.3 Karst Water Resources Protection and Sustainable Utilization	282
10.3 Protection of Karst Water Resources and Environment in South China	300
10.3.1 Overview	300
10.3.2 Analysis of Subterranean River Pollution in South China	300
10.4 Protection of Karst Water Resources and Environment in the World	306
10.4.1 Karst Aquifer Protection Zoning	306
10.4.2 Artificial Recharge of Karst Aquifer and Its Protection, Case Study of Edwards Aquifer in U. S. A	309
References	315

第1章 绪 论

1.1 岩溶及岩溶水的分布

岩溶是水对可溶性岩石（碳酸盐岩、硫酸盐岩、卤化物岩等）进行的以化学溶蚀作用为特征并包括水的机械侵蚀和崩塌作用以及物质的携带、转移和再沉积的综合地质作用，以及由此所产生的现象的统称。因此，岩溶一词，在不同的场合可有“岩溶现象”、“岩溶作用”等多重含义。国际上普遍将岩溶称为喀斯特（karst），喀斯特一词原来是克罗地亚伊斯特拉半岛石灰岩高原的地名。19 世纪末，欧洲学者斯维奇（J. Cvijic）首先对该地区进行研究，他借用了“喀斯特”这一名词作为石灰岩地区的一系列溶蚀作用过程和产物的名称，现已成为世界各国通用的专业术语。

在我国，岩溶与喀斯特为同义语，两者均可使用。岩溶地下水（karst ground water）是赋存于岩溶化岩体中地下水的总称，又称岩溶水（karst water）。

岩溶在全球分布普遍（图 1.1）。据统计，全球岩溶地区的面积约占陆地面积的 12%，即约 2000 万 km²。岩溶及岩溶水在全球各大洲均有分布。

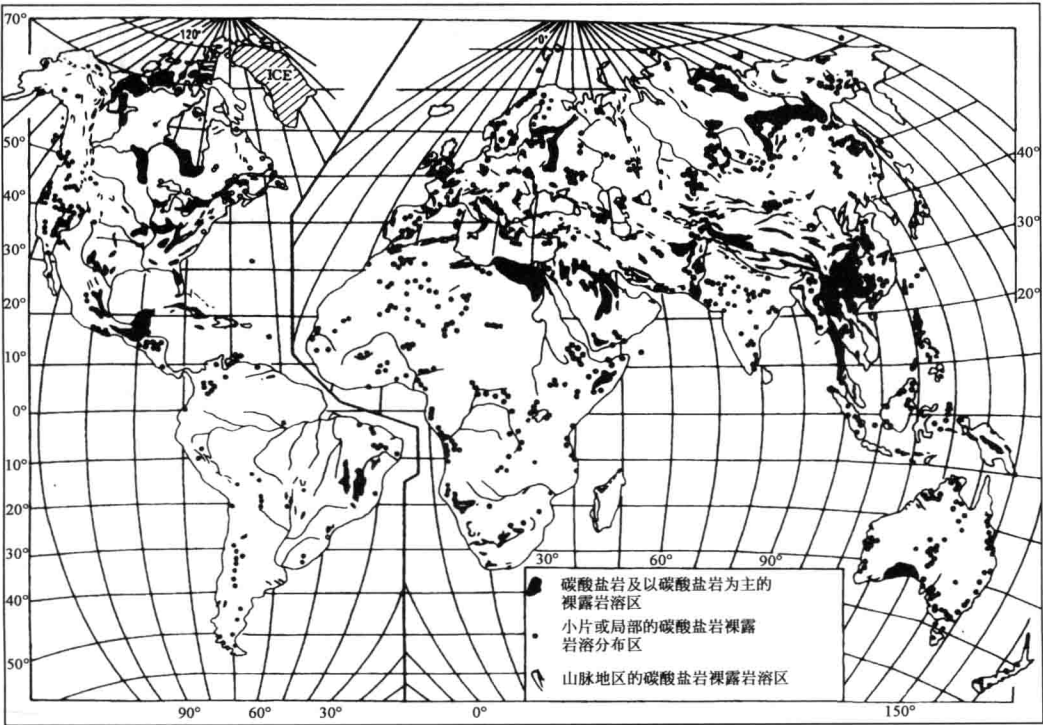


图 1.1 世界主要岩溶分布区 (Ford and Williams, 1989)

在亚洲，中国是岩溶分布最广泛的国家（图 1.2）。东南亚的越南、泰国等国，西亚的土耳其、伊朗、伊拉克、阿拉伯半岛及俄罗斯亚洲部分均有成片分布。中国岩溶区总面积约为 $344 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占陆地国土面积的 35.8%，其中裸露面积约为 $90.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占陆地国土面积的 9.5%。

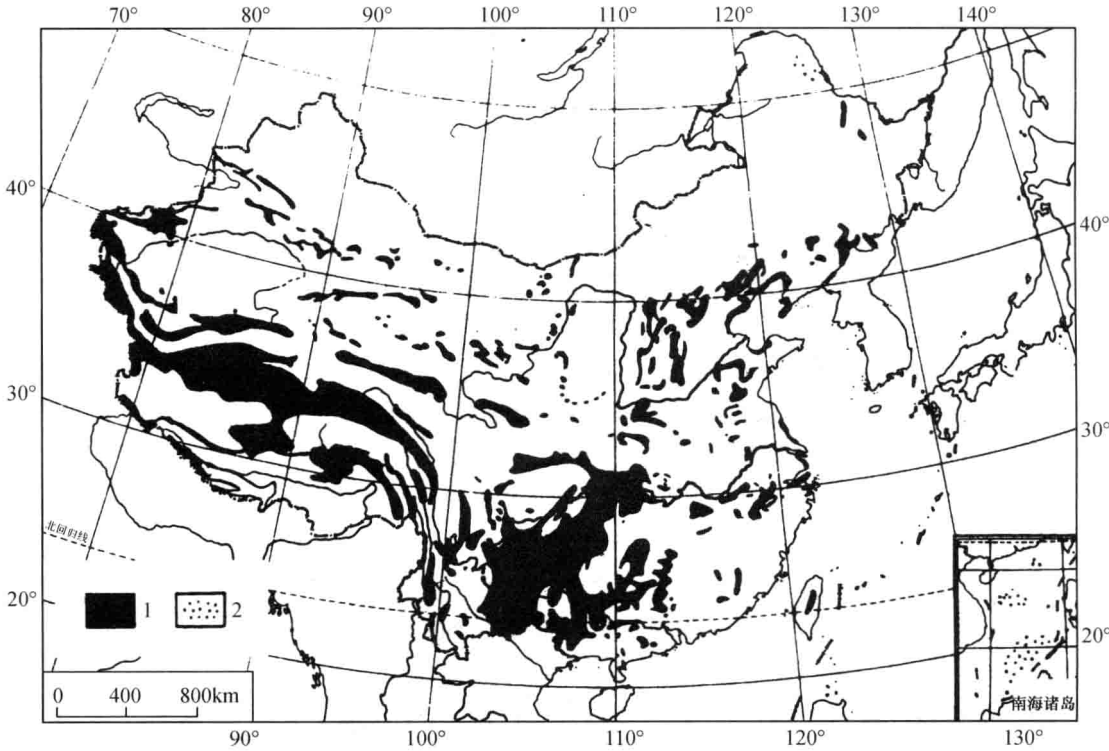


图 1.2 中国裸露岩溶分布
1. 碳酸盐岩；2. 珊瑚礁

欧洲有 35% 的陆地面积为岩溶区，总面积达 $300 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，具有丰富的岩溶水资源，很多大城市都依靠岩溶地下水作为供水水源。奥地利和斯洛文尼亚城市供水的 50% 以上依靠岩溶水。

北美洲的加拿大及美国均有大片岩溶区。美国约有 20% 的国土为岩溶区。得克萨斯州和密西西比河流域东部的岩溶区、佛罗里达州的城市和工农业供水均主要依靠岩溶地下水。

1.2 岩溶地下水的功能

地下水的功能（functions of ground water）大体上可以概括为资源、致灾因子、生态环境因子和信息载体等方面（张人权等，2011）。岩溶地下水的功能在下述几方面表现十分突出。

1.2.1 宝贵的水资源

据粗略统计,全球有 20% ~ 25% 的人口部分或全部依靠岩溶地下水供水 (Ford and Williams, 2007)。中国岩溶地下水天然资源总量为 $2039.67 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 占全国地下水总量的 23.4%。中国北方在华北地台范围内的 13 个省、市, 岩溶总面积为 $68.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 裸露面积为 $7.78 \times 10^4 \text{ km}^2$, 岩溶地下水天然资源总量为 $108.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 天然排泄量大于 100L/s 的泉有 130 多处, 成为北方 30 多个大、中城市及 100 多个县级城市和数十个大型煤电能源基地的供水水源。中国南方地区岩溶地下水天然资源量约 $1847 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。据滇、黔、川、桂、湘五省区统计, 共分布暗河 2836 条, 枯季总流量为 $1521.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 相当于 $479.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 成为南方几十个大、中城市及广大农村的生活和工农业用水水源 (陈梦熊、马凤山, 2002)。

应特别指出, 每个泉域或地下河域都是一个巨大的蓄水构造或天然的地下水库, 具有巨大的调蓄功能。受极端气候影响, 我国近年来南北方均出现特大干旱, 地表水严重不足, 岩溶地下水起到了应急和后备水源地的作用。

在欧洲有数十个大、中城市靠岩溶水供水, 奥地利和斯洛文尼亚城市供水的 50% 以上依靠岩溶水源。美国佛罗里达州、得克萨斯州的城镇供水也主要靠岩溶水。佛罗里达州分布有 300 多个较大的岩溶泉, 总排泄量达 $357 \text{ m}^3/\text{s}$; 得克萨斯州南部的爱德华岩溶含水层是安东尼奥市及若干城镇和众多农场、牧场的唯一水源。在世界上一些干旱地区, 岩溶水也受到格外重视, 如西亚的伊朗、伊拉克、阿拉伯半岛及北非地中海沿岸等都在开发岩溶地下水。土耳其拥有世界级的岩溶大泉, 是供水的重要水源。

岩溶热矿水资源也日益受到重视。我国北方地区, 北京、天津、河北平原地下埋藏巨大的热储, 主要是深埋 1500 ~ 2000m 的中上元古界厚达上千米的岩溶化白云质碳酸盐岩含水层。目前北京、天津、河北平原开发的热水大多来自上述含水层。陕西渭北及鄂尔多斯盆地周边广泛分布的热带, 主要赋存于奥陶系及寒武系碳酸盐岩含水层中。我国南方四川盆地、云南高原的断陷盆地也是巨大的热储, 主要含水层均为岩溶化的碳酸盐岩层。

1.2.2 不可忽视的生态功能

岩溶地下水的生态功能主要表现在如下两个方面。

1. 岩溶大泉及地下河的水生态作用

世界上大江大河的补给主要靠大气降水 (雨水和冰川、雪山融水)。但在枯水期, 泉水是重要的补给源头, 其中岩溶泉是重要的补给源之一。在我国华北地区主要河流的源头几乎全部为岩溶泉。由于泉域相当于大型的地下水库, 有巨大的调蓄能力, 可以将我国季风气候下的不均匀降水储存于地下, 成为保证河流常年流水的重要水源。例如, 山西汾河的主源是雷鸣寺泉, 沿河又受到兰村泉、晋祠泉、洪山泉、郭庄泉、霍泉及龙子祠泉的补给, 泉水总补给量占年径流量的 50% 以上, 是河流基流量的主要来源; 海河上源主要受山

西高原和太行山前岩溶泉的补给；汇入永定河的桑干河发源于山西朔州神头泉。在西南岩溶区，大量的地下河和岩溶泉往往是长江和珠江三级支流的源头，如乌江及其支流三岔河、六冲河的基流量大部源自沿河排泄的大型地下河和岩溶泉。红水河及其上游的南盘江、北盘江，也主要源自沿线的地下河和岩溶泉。很多地下河本身就构成了大流域的四、五级支流，保证了上述大江大河的基流量，维系了河道及两岸的生态环境。相反，如果过度开采使泉水干涸，破坏了泉域的自然循环系统，这些河流枯水期就得不到补给，成为干河道，甚至成为城镇污水排放通道，这就破坏了河道及沿河的生态环境。这种情况在国内外都发生过，而在我国北方地区，如山西汾河、丹河、沁河、桑干河；河北滹沱河、山东大汶河流域都十分严重。

2. 表层岩溶带及表层岩溶水的生态功能

表层岩溶带（epikarst）是岩溶含水层包气带上部地表土壤层与可溶岩界面附近岩溶相对发育、含水较丰富的地带。表层岩溶带的厚度在我国南方一般为几米至十几米，其下界为岩溶化较弱的基岩，有时为弱隔水层。表层岩溶带中溶隙、溶沟、溶槽发育，形成表层岩溶含水层和普遍分布的表层岩溶泉。表层岩溶水是广大石山地区农村生活用水的重要来源，也是维系生态的基本条件。

表层岩溶水、地表土壤层及植被为共生关系，由于植被被破坏，水土流失，也造成表层岩溶泉干涸，加剧石漠化进程，严重影响广大石山区的生存条件。

1.2.3 珍贵的自然、文化遗产与旅游资源

岩溶泉与地下河具有奇特的自然景观，很多岩溶泉和地下河又有深厚的文化底蕴，早已成为旅游胜地。中国北方的济南趵突泉、山西太原晋祠泉和洪洞广胜寺泉、河南辉县百泉、辽宁本溪水洞地下河、北京石花洞等都以古迹与泉水文化为特色；中国南方以大型的地下河-洞穴-天坑构成自然的景观著称于世，如广西乐业的百郎地下河及大石围天坑群已成为世界地质公园，桂林冠岩地下河和贵州的安顺龙宫、独山皇后地下河、小七孔景区，以及重庆武隆岩溶景区、云南香格里拉及四川黄龙的岩溶泉华，都是国内外著名的岩溶风景区。

欧洲巴尔干半岛的克罗地亚、斯洛文尼亚都是以岩溶地貌、洞穴及岩溶泉为主要旅游景观的国家。例如，克罗地亚的普利特维察国家公园以泉华及堰塞湖著称，与我国黄龙、九寨沟颇为相似；美国佛罗里达州有 300 多个较大的岩溶泉，很多泉区都是国家公园，集旅游、疗养、娱乐为一体，成为美国乃至世界级的以泉水为主的旅游休闲胜地。

1.2.4 岩溶地质灾害的致灾因子

岩溶地下水活动是岩溶塌陷形成的重要动力因素，可以在自然条件下由于极端降雨、干旱引起，也可以由人工抽水、矿山及隧道涌水、水库蓄水、灌溉和给排水工程的渗漏引起。

地下采矿或隧道等地下工程施工岩溶涌水造成的灾害是我国极为严重的环境地质问题。例如,1984年河北开滦煤矿范各庄矿由于开挖面揭穿陷落柱,造成奥陶系高压岩溶水涌入矿坑,最大涌水量 $34.2\text{m}^3/\text{s}$,21小时后矿井全部淹没。隧道岩溶突水造成的人员伤亡和经济损失都极为严重。据统计国内外隧道涌水量超过 $1.0\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 的大型突水事件中,70%都发生在岩溶隧道。我国近年发生的宜万铁路马鹿菁隧道、渝怀铁路园凉山隧道特大涌水都造成严重人员伤亡和巨大经济损失。

我国岩溶地区大量开发岩溶地下水,采矿、隧道等地下工程排水,桥梁及高层建筑桩基施工扰动,破坏了岩溶地下水流系统与岩土之间的平衡状态,岩溶塌陷作用的频率越来越高,分布也越来越广,危害性也随之增大。

1.3 岩溶水文地质学的研究内容

岩溶水文地质学(Karst Hydrogeology)是研究岩溶地下水(karst groundwater)的科学。岩溶水文地质学是水文地质学的分支,它沿用了水文地质学的一些基本概念和方法。但是由于传统的水文地质学是在研究孔隙介质及孔隙水渗流运动规律(达西定律)的基础上发展起来的,不能完全适用于描述岩溶介质及岩溶地下水的运动特征。岩溶介质是由可溶岩中的孔隙、裂隙、溶蚀裂隙-溶蚀管道-地下河通道等组成的多重复杂介质,岩溶含水层中地下水的运动既有渗流,也有岩溶管道流及通道流,后者多为紊流状态,不服从达西定律。因此,岩溶水文地质学在某些基本概念和研究方法上就形成了很多特点,同时也由于其复杂性和多变化,而为研究者提供了广阔的探索空间。应当说,岩溶水文地质学还处于蓬勃发展和完善阶段,吸引了国内外很多学者投身本学科的研究工作。概括来说,岩溶水文地质学是研究岩溶地下水的储存条件、形成条件、运动特征、水量和水质时空变化规律、水资源开发利用及保护的一门学科。

目前国内外岩溶水文地质学的主要研究内容主要包括以下几个方面。

(1) 岩溶含水介质特征的研究,即研究岩溶含水层中作为地下水储存空间和运移通道的孔隙、溶隙、溶洞、管道和通道的形态特点及空间分布特征。岩溶发育的不均一性造成岩溶含水介质的高度不均一性及各向异性,给岩溶水资源的开发利用及评价造成很大困难。因此,以岩溶发育的基本规律和理论为指导,结合各种勘查手段,查明和研究岩溶含水介质特征,就成为岩溶水文地质学的基本内容之一。

(2) 岩溶地下水形成条件的研究,即研究岩溶地下水的补给、径流、蓄积和排泄条件。碳酸盐岩的层组条件、地质构造形态、地貌条件及环境因素对岩溶地下水的形成有重要影响,从而形成各具特色的岩溶地下水系统。岩溶地下水形成条件的研究实质就是对岩溶地下水系统的结构及其补、径、蓄、排条件的研究。

(3) 岩溶地下水运动规律的研究是岩溶水文地质学中最具特点的内容。岩溶含水层中地下水流具有裂隙流与管道流并存、层流与紊流并存、线性流与非线性流并存、以及可以相互转化的特征,使得单纯利用描述孔隙水层流运动的达西定律难以准确描述岩溶地下水运动规律,这就必须把孔隙水流、裂隙水流、管道流的数学模型引入岩溶水文地质学中,用以解释各种特殊的岩溶水动力现象,并探讨岩溶水流模拟及资源评价的新方法。

(4) 岩溶地下水化学场及水质研究。岩溶地下水在复杂的地质体中运移并溶蚀周围可溶岩,形成独特的水化学场,通过水化学研究可以间接获得地下水流的补给、运移特征及动态特征,为地下水系统的研究提供信息。岩溶地下水水质的研究包括地下水物理、化学及微生物组分和性质的研究,是水质评价和水质保护的基本依据。

(5) 岩溶地下水动态研究,包括地下水位及泉水流量随时间变化规律的研究,同时也包括地下水(包括泉水)水质变化的研究。动态研究对于揭示岩溶地下水的补给、蓄积、径流及含水介质特性均有重要意义;另外,动态的趋势性变化反映环境变化与开发利用对水资源的影响,是判断水资源安全性及可持续性的主要根据。

(6) 岩溶地下水与环境的相互关系。岩溶环境是很脆弱的地质环境,岩溶地下水是岩溶环境中最活跃的因素。地下水位在自然和人为因素影响下的剧烈变化,均可产生严重的环境问题,如地面塌陷、生态退化等。反过来,如果环境在人为作用下(如水利工程、隧道工程、矿山、城市建设)发生巨变,也会严重改变岩溶地下水的储存及运动特征,从而催生新的环境问题。

(7) 岩溶地下水资源的开发利用、保护与科学管理,即在研究开发利用地下水资源的同时,又能使地下水资源的再生能力和水资源得到保护与改善,取得最佳的社会、经济和环境效益。

(8) 岩溶水文地质勘查技术与研究方法具有一定的特殊性和专业性,其中包括三维岩溶水文地质概念模型的研究与构成、岩溶水文地质钻探及钻孔水文地质观测的特殊要求和技术、岩溶地下水流通试验、洞穴探测技术、水化学及同位素技术、岩溶水文地质物探技术、岩溶水模型技术等。

1.4 岩溶水文地质学的发展

1.4.1 国外岩溶水文地质学

19世纪中叶,欧洲岩溶研究进入了地理和地质综合研究时期,研究的主要内容有岩溶的地质成因、岩溶的地貌特征、岩溶作用的性质、岩溶水文学特征等。19世纪末,国内外学者发表了不少岩溶方面的研究论文,其中以欧洲学者斯维奇(J. Cvijic)的研究较著称,他在1893年发表了《喀斯特现象》一文,阐明喀斯特形态主要由侵蚀-溶蚀作用形成,为绝大多数学者所接受,我国明代地理学家徐霞客在17世纪时已提出了类似观点。斯维奇还提出石灰岩地区的准平原作用与其他地区不同,认为石灰岩区的侵蚀基面为地下水面,而地下水面又处于不同高度,因此,夷平面可位于不同高度。他提出喀斯特区域的地下水可分为三带:最上为干燥带(即包气带),中间为季节饱和带,最下面为全饱和带。20世纪,在溶蚀机理、洞穴学、岩溶水文地质、岩溶工程地质学等都取得了长足发展。

洞穴学是与岩溶水文地质密切相关的一门学科。许多国家都设有洞穴研究的专门机构和洞穴协会。例如,法国国家科学研究中心在穆利斯(Moulis)设有洞穴实验室,许多国家还在各地区设有洞穴组织,已举行了多次国际洞穴会议,并出版了论文集。

由于岩溶水文地质与社会环境及经济发展有密切关系,20世纪70年代以来,岩溶水

文地质学发展极为迅速,召开了多次世界岩溶水文地质及岩溶环境学术会议,其中包括1988年在中国桂林召开的国际水文地质学家协会第21届大会。近年来出版了很多重要专著,如D. Ford与P. Williams的《岩溶水文地质学与地貌学》(*Karst Hydrogeology and Geomorphology*, 2007); P. Milanovic的《岩溶区地质工程》(*Geological Engineering in Karst*, 2000)等。

归纳起来,国外在以下方面取得的进展值得重视。

1. 典型岩溶泉及洞穴系统的研究

对典型的岩溶泉域或洞穴系统建立长期的研究基地或水文地质试验场,运用多种手段坚持不断地探查、观测和试验。在大量实际资料的基础上,提高对岩溶地下水赋存状态、运动特征、补排机制、水量水质变化规律的研究,建立水文地质概念模型,探讨定量评价及预测模型。这种长期不间断的多学科多手段的研究,是不断创新并取得成果的基础。例如,美国肯塔基玛猛洞及其水文地质的研究,持续了一个世纪,探洞工作延续几十年,示踪试验进行了1000多次,从而建立了洞穴与岩溶含水层演化模式。法国的岩溶面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,相当于我国裸露岩溶面积的十分之一,却建立了6~8个岩溶水文地质试验场,研究工作坚持几十年,在岩溶水文地质基本理论方面取得重要成果,并培养了专业人才,法国最大岩溶泉沃克律兹泉最大流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$,有80多年的观测资料。

2. 新技术、新方法的应用

新技术、新方法、新设备的应用是提高研究水平的重要基础。洞穴探测,包括洞穴潜水探测,既是洞穴研究的基本方法,也是研究岩溶含水层及岩溶地下水流特征最直观可靠的方法。国外的探洞装备、测量技术较为先进。岩溶水文地质的很多新认识和新理论都与探洞工作分不开。

地下水示踪是岩溶水运动研究的最基本、最有效的技术。国外非常重视,不断推出新的既可靠又环保的方法。在水化学、同位素、物探技术应用方面都有很高水平。

3. 岩溶含水介质、岩溶水流状态

岩溶含水介质特征、岩溶水流状态是岩溶水动力学的基本问题,也是定量研究岩溶地下水的基礎。

美国的E. T. Shuster和W. B. White在前人工作的基础上,于1969年和1971年提出了双重介质模型,即岩溶管道流与溶隙扩散流共存,前者主要起排泄功能,而后者则起调蓄功能。由于岩溶化程度不同,各地区两者的匹配比例各异。两种含水介质对暴雨脉冲事件的响应及排泄动态的影响明显不同,在水文过程线上,前者(尖峰脉冲)代表洪水期峰值流量,而后者(平缓曲线)则代表基流部分。由于有落水洞、天窗直接灌入式补给,管流水对暴雨响应快、动态变化大,最大与最小流量之比可达 $10:1 \sim 1000:1$;而扩散流水则反应慢、变幅亦小,最大与最小流量之比一般小于 $10:1$ 。故在汛期,管道流水补给围岩中的扩散流水,但在枯水季节,扩散流因滞后效应水位相对较高,并向岩溶管道汇流。阿特金森1985年提出三重介质模型,即孔隙-裂隙-管道组合模型,相应的水流状态为扩散

流（达西流）、混合流、管道流（紊流），如图 1.3 所示。

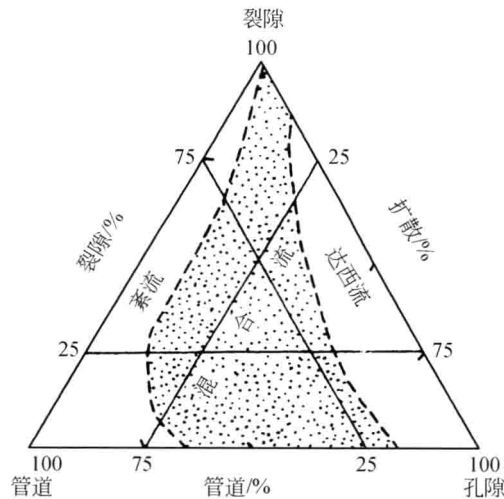


图 1.3 含水层介质三端元分类 (Atkinson, 1985)

尽管上述岩溶含水介质模型的研究都有一定的根据，但在实际应用上主要采用双重孔隙介质（dual-porosity media）模型，即认为岩溶含水介质是由原始的成岩孔隙、裂隙、层面裂隙组成的基岩孔隙度（matrix porosity）及由成岩后的构造断裂和岩溶作用形成溶蚀扩大裂隙，溶洞、溶蚀管道组成的次生孔隙度（secondary porosity）组成。

4. 岩溶水系统分析

自 1983 年 5 月荷兰“地下水系统调查方法和测量仪器”国际专题讨论会以来，采用系统思想研究地下水的分布规律和评价地下水资源已成为普遍的思路和方法。

D. Ford 和 P. Williams 2007 年所著《岩溶水文地质学和地貌学》再次强调用系统观点和方法研究岩溶及岩溶水的重要性，认为岩溶是由密切相关的作用于可溶岩的水文和地球化学两个亚系统组成的统一系统，并认为岩溶地貌的各种形态、各种现象与岩溶地下水都处于统一的岩溶系统之中，它们之间有着密切的因果关系。在岩溶水系统分析中，应注意泉域的边界条件、内部结构、补给及排泄条件的研究。

5. 岩溶水动力模拟及水资源定量研究

由于岩溶含水介质及水流状态的复杂性，传统孔隙水层流运动定律——达西定律已不能完全适应岩溶水的定量研究。目前国际上主要从两个方面来解决这个问题。

(1) 集中参数模型（lumped parameter models）。主要思路是把岩溶地下水当作一个不确定的系统，建立降水与地下水位或泉水流量之间的量化关系，求出反映岩溶水系统总体特征的集中参数，如泉水衰减曲线分析法、数理统计方法（如相关分析法、时序模型）、小波分析法、灰色系统理论方法等，多属于随机的不确定模型或概率模型。

(2) 分布参数模型（distributed parameter models）。属于确定性模型，按孔隙地下水运动的层流定律和管道流定律研究地下水运动的数学模型。由于岩溶含水层的非均匀性及