



济南岩溶水系统研究

徐军祥 邢立亭 魏鲁峰 等编著

JINAN
YANRONGSHUI
XITONG YANJIU



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

济南岩溶水系统研究

徐军祥 邢立亭 魏鲁峰 康凤新 编著
张中祥 李常锁 彭玉明 刘 莉

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2012

内 容 提 要

本书在全面分析地下水系统理论的基础上,划分济南地区地下水系统,研究了济南地区岩溶含水介质特征。通过地下水流动系统分析,探索了济南泉域的边界条件及地下水系统内部结构特征,可为济南保泉供水及城市规划建设提供依据。全书的研究思路及成果,对于类似条件下岩溶水资源的开发研究具有借鉴意义。

本书可供水文学及水资源、地质工程和城市规划等专业的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

济南岩溶水系统研究/徐军祥等编著. —北京:冶金工业出版社, 2012. 3

ISBN 978-7-5024-5851-5

I. ①济… II. ①徐… III. ①岩溶水—地下水资源—研究—济南市 IV. ①P641.134

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 020267 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 宋 良 张耀辉 美术编辑 彭子赫 版式设计 葛新霞

责任校对 李 娜 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5851-5

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012 年 3 月第 1 版, 2012 年 3 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 6 印张; 178 千字; 183 页

25.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010) 64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100010) 电话: (010) 65289081 (兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

我国是世界上岩溶最发育的国家之一，岩溶分布较广，类型较多。北方岩溶水文地质条件独特，单井出水量较大，水质良好，流量稳定，因此岩溶水成为北方地区重要的供水水源。在山西、山东等地区，奥陶系石灰岩广泛分布，岩层具有极强的导水性，并有层控的特点，在强径流和排泄区，单井出水量达 $5000 \sim 10000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。岩溶水往往集中排泄，从而形成数量甚多的岩溶大泉，在北方，天然流量每天在 10000 m^3 以上的大泉有百余个，这些泉不仅流量大，而且动态比较稳定，泉域范围很大，从数百平方公里至数千平方公里不等。很多岩溶泉区具有景观和历史文化价值，如济南的趵突泉、太原的晋祠泉都是著名的旅游胜地。虽然北方岩溶泉分布较广，但随着经济的发展，社会需水量不断增加，多数地区面临用水紧张、岩溶大泉流量衰减等问题。

济南历史悠久，是融“山、泉、湖、河、城”于一体的历史文化名城，境内泉眼众多，被誉为“泉城”。“家家泉水、户户垂杨”是泉城济南昔日的真实写照。然而近 30 多年来，泉水流量衰竭，泉水断流时有发生，济南泉水问题已引起社会各界广泛关注。为保护名泉，山东省地矿局系统的水文地质工作者，在济南地区进行了卓有成效的勘察与研究工作，取得了一批在国内有较大影响的成果。本书在总结作者多年济南地区水文地质勘察研究成果的基础上，探讨了岩溶地区保泉供水勘探研究方法。

本书的特点是将理论与实践有机结合，采用地下水系统理论划分岩溶水系统，结合新技术理论与常规的勘探方法确定了济南市区与东西郊的水力联系，根据大量实验数据研究下奥陶系岩溶含水介质的特征，采用化学动力学与水文地质学相结合的方法，计算了主要含水层的渗透系数，采用数值模拟优化保泉供水开采

布局,为济南城市供水、城市规划以及重大工程建设提供水文地质依据。

本书共7章:第1章由邢立亭、徐军祥编写;第2章由魏鲁峰、彭玉明编写;第3章由邢立亭、张中祥编写;第4章由徐军祥、邢立亭编写;第5章由康凤新、邢立亭、魏鲁峰编写;第6章由康凤新、邢立亭、刘莉编写;第7章由邢立亭、李常锁编写。此外,刘莉、张建芝还参与了本书绘图及资料整理等工作。

本书得到国家自然科学基金(41172222)、山东省自然科学基金(ZR2009EM010)及山东省重大水文地质问题研究等项目资助。书中引用了相关单位及专家、学者的大量文献,在此一并表示感谢!

由于水平所限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2011年11月

目 录

1 绪论	1
1.1 地下水系统	1
1.1.1 地下水系统的内涵	1
1.1.2 地下水系统边界确定	5
1.2 岩溶水系统研究现状	7
1.2.1 国外研究现状	7
1.2.2 国内研究现状	10
1.3 济南岩溶水系统研究现状	12
1.3.1 水文地质勘察研究	12
1.3.2 泉水历史成因研究	14
1.3.3 泉域岩溶水水质及水环境演化研究	15
1.3.4 岩溶水动态研究	16
1.3.5 岩溶地下水模型研究	17
1.3.6 边界与保泉措施	18
2 济南市自然地理概况	19
2.1 自然地理	19
2.1.1 交通位置及经济概况	19
2.1.2 地形和地貌	20
2.1.3 气象与水文	20
2.2 水资源开发利用现状	25
2.3 区域地质	26
2.3.1 地层	26
2.3.2 地质构造	28
2.3.3 侵入岩	29

3 济南地区地下水系统划分	31
3.1 水文地质分区	31
3.1.1 松散岩类孔隙水含水层 (组)	31
3.1.2 碳酸盐岩裂隙-岩溶含水层 (组)	33
3.1.3 碎屑岩夹碳酸岩岩溶-裂隙含水层 (组)	34
3.1.4 变质岩及岩浆岩裂隙含水层 (组)	34
3.2 济南地区岩溶水系统划分	35
4 岩溶含水介质特征研究	37
4.1 岩溶含水层赋存条件	37
4.1.1 寒武系张夏组 (ϵ_2z) 含水层	37
4.1.2 寒武系凤山组 (ϵ_3f) 与奥陶系 (O) 含水层	37
4.2 岩溶发育特征	44
4.2.1 岩溶发育的分带特征	44
4.2.2 岩溶发育的层状特征	45
4.2.3 地质构造对岩溶发育的控制	48
4.2.4 岩性与岩溶发育的形态和类型的关系	48
4.3 奥陶统含水介质类型和特征	50
4.3.1 下奥陶统白云岩骨架类型和特征	50
4.3.2 下奥陶统白云岩空隙空间	51
4.3.3 含水介质类型及特征	53
4.3.4 下奥陶统白云岩含水层特征	55
4.4 济南保泉三维地质模型	57
4.4.1 三维地质建模意义	57
4.4.2 三维地质建模系统设计策略	58
4.4.3 三维地质建模系统的体系结构	60
4.4.4 三维地质建模与可视化	62
4.4.5 三维模型应用	69

5 地下水流动系统分析	74
5.1 “三水”转化	74
5.1.1 大气降水转化为地下水	74
5.1.2 地下水转化为地表水	76
5.1.3 地表水向地下水的转化	79
5.1.4 地下水之间的相互转化	80
5.2 岩溶水的水动力特征	83
5.2.1 平面流场	83
5.2.2 纵剖面水动力场	85
5.2.3 水动力场的演化	86
5.2.4 张夏组灰岩与奥陶系灰岩的水力联系	90
5.2.5 火成岩体对岩溶水流场的影响	93
5.3 地下水动态特征	113
5.3.1 地下水动态影响因素分析	113
5.3.2 市区与东郊、西郊地下水的水力联系	129
5.4 地下水系统的水化学场揭示的问题	130
5.4.1 时间尺度水化学变化特征	130
5.4.2 空间尺度水化学变化规律	131
5.4.3 济南泉域岩溶水空间演化机制	132
5.4.4 水化学法确定碳酸盐岩含水层渗透系数 K 值	135
6 岩溶水系统研究方法	138
6.1 济南泉域范围的认识	138
6.2 济南泉域岩溶水子系统勘察技术	139
6.2.1 大型停水试验	139
6.2.2 开采性抽水试验	142
6.2.3 示踪试验	142
6.2.4 回灌试验	143
6.2.5 同位素水文地质	144
6.3 济南泉域岩溶水系统开采布局	146

6.3.1 济南泉域岩溶水系统范围	146
6.3.2 岩溶水补给资源量	147
6.3.3 开采布局	148
7 保泉与供水研究	150
7.1 优质地下水开发与保泉对策	150
7.2 岩溶水脆弱性与水环境保护	151
7.2.1 COP 方法及其应用	152
7.2.2 评价结果分析	157
7.3 城市规划建设与泉水保护	160
7.3.1 城市规划布局与泉水保护	160
7.3.2 重大工程建设与泉水运移通道的保护	167
7.4 水资源调蓄与增源增采	174
7.4.1 回灌补源条件	174
7.4.2 增源措施	175
7.5 监测网优化及岩溶水系统研究存在的问题	176
参考文献	179

1 绪 论

1.1 地下水系统

1.1.1 地下水系统的内涵

地下水主要是指赋存于岩石空隙中的水，包括重力水、毛细水和结合水。地下水以其稳定的供水条件、良好的水质，成为农业灌溉、工矿企业以及城市生活用水等人类社会必不可少的重要水源，尤其是在地表缺水的干旱、半干旱地区，地下水多成为当地的主要供水水源。

水文地质学发展的初期，主要是解决“找水”问题，人们只注意到以定流量抽水时水井周边的地下水位会很快达到稳定，且不随时间而变化。随着开采地下水规模的增长，人们发现井群开采影响范围随时间延续而不断扩展，地下水的运动是非稳定的，必须将整个含水层而不是井附近含水层中的一个小范围作为研究对象，此时人们仍然认为，地下水的流动仅仅局限于含水层，而含水层上下的岩层是绝对隔水的。但在许多情况下，井群中所抽出的水量远远超过了含水层所能供给的量。赫伯特首次明确指出地下水存在垂直运动，但当时不为人们所接受，随后人们才逐渐注意到“越流”的存在，再也不把含水层当做一个独立的单元来对待。研究地下水时，往往必须将若干个含水层连同其间的弱透水层（相对隔水层）合在一起看做一个完整的单元，即看做一个系统。于是，便出现了“含水层系统”、“含水系统”等术语。

大规模开发利用地下水，不仅仅产生了地下水资源枯竭问题，同时也导致了地面沉降、海水入侵、淡水咸化、土壤沙化、植被衰退等一系列与地下水有关的环境生态问题，地下水污染的预测与防治日益得到重视，为此人们又提出了基于地下水流动单元的地下水流动系

统。20 世纪 70 年代以来,随着对地下水开发利用程度的不断加大,地下水的水质水量、赋存条件及其与其他含水层之间的关系等也逐渐被纳入了研究的范围,形成了地下水系统理论。H·B·鲍科夫斯卡亚在《水文地质学概念的现状和预测问题》一文中指出:“任何一个复杂系统可归纳为三个方面:(1)系统的组成;(2)系统的结构,它表征系统与周围介质的相生作用和系统内各要素的相互联系;(3)系统的作用、性质和发育历史。”鲍科夫斯卡亚提出了“水文地质系统”这一术语,但在该术语含义上和本质上与“地下水系统”并无明显差别,只是所采用的名词有所不同而已。美国地质调查所水资源处的拉尔夫·C·海斯认为,“地下水系统”这一术语,指的是从潜水面到岩石裂隙带底面的这一部分地壳,是地下水赋存和运动的场所,由含水层(作为地下水运动的通道)和圈闭层(阻碍地下水运动)所组成。还有一些水文地质学家认为,地下水系统指的是具有某种性质的岩石集合体,它能自由地容纳水和运移水,并与其他不能自由容纳水和运移水的岩石相邻接。美国道济认为地下水系统的定义是“任何真实的或抽象的结构、装置、方案或过程,在一定的时间内所反映的物质、能量、信息的输入和输出及其演变关系”。《地质词典》把地下水系统定义为是由边界围限的、具有统一水力联系的含水地质体,是地下水资源评价的基本单位。王德潜认为地下水系统是指受自然和人为因素控制的,时空分布上由具有共同的补给、径流、排泄特征与演变规律的若干个相对独立的水文地质单元所组成的统一体。荷兰阿姆斯特丹自由大学教授英格伦博士(G. Engelen)认为地下水系统可以看做是在时间、空间上具有四维性质、能量不断新陈代谢的有机整体,它可以从出生、成长、一直到衰老或消亡。在 20 世纪 80 年代,英格伦等进一步发展了地下水流理论,把赋存地下水的介质场、驱动地下水流的水势场、温度场和水化学场,看做是从源至汇由流面群构成的、具有时空演变的有机体。日本的 A. Bogli 则以“地下水盆地”作为含水层集合体的名称,认为其是包含多层地下水的单元。它在垂向上,受地层的层位关系或地质发展史条件限制;在水平方向上,受地层沉积特征和构造地质条件所限制。从系统分类的方法论的观点来看,地下水圈是一个由处于等级从属关系的许

多单元组成的复杂的动力学系统。

由此可知,地下水系统是一个错综复杂的、在时空分布上具有四维性质和各自特征、不断运动演化的若干独立单元的统一体。所以只有运用系统分析的方法,才有可能把如此错综复杂、支离分散的认识,概括在一个完整的系统结构内。中国科学院资深院士陈梦熊先生全面总结和概括了学术界对地下水系统的认识,认为地下水系统是水文系统的一个组成部分,它是一个错综复杂的、包括各种天然因素、人为因素所控制的、具有不同等级的互相关联以及互相影响的统一体。这个统一结构的地下水系统,可以归纳为:

(1) 地下水系统是由若干具有一定独立性而又互相联系、互相影响的不同等级的亚系统或次亚系统所组成。

(2) 地下水系统是水文系统的一个组成部分,与降水和地表水系统存在密切联系,两者互相转化。地下水系统的演化,很大程度上受地表水输入与输出系统的控制。

(3) 每个地下水系统都具有各自的特征与演变规律,包括各自的含水层系统、水循环系统、水动力系统、水化学系统等。

(4) 含水层系统与地下水系统代表两种不同的概念,前者具有固定的边界,而后者的边界是自由可变的。

(5) 地下水系统的时空分布与演变规律,既受天然条件的控制,又会因社会环境特别是人类活动的影响而发生变化。

地下水系统是水文循环系统的一部分,由输入、输出和水文地质实体三部分组成。张光辉等认为地下水系统是由赋存于岩石空隙中并不断运动着的水体及相应含水岩层两部分组成,是一个复杂的人工-自然复合系统,为一开放体系。2004年11月中国地质调查局公布的《地下水系统划分导则》对其的解释是具有水量、水质和能量输入、运移和输出的地下水基本单元及其组合,是在时空分布上具有共同地下水循环规律的一个独立单元,可以包括若干次一级的亚系统或更低的单元系统。

概括来说,地下水系统是地下水含水系统和地下水流动系统的统一,如图1-1所示。地下水含水系统是由隔水层或相对隔水层圈闭的、具有统一水力联系的含水岩系。而地下水流动系统是由从源到汇

的流面群构成的、具有统一时空演变过程的地下水体，两者的对比如下：

(1) 整体性。含水系统的整体性体现于它具有统一的水力联系，即存在于同一含水系统中的水是个统一的整体，在含水系统中的任何一部分加入（补给）或排出（排泄）水量，其影响均将波及整个含水系统。含水系统是一个独立而统一的水均衡单元，是一个三维系统；可用于研究水量乃至盐量和热量的均衡，边界属于地质零通量边界，为隔水边界，是不变的。地下水流动系统的整体性体现于它具有统一的水流。沿着水流方向，盐量、热量和水量发生有规律的演变，呈现统一的时空有序结构，为四维时空系统；它以流面为边界，边界属于水力零通量边界，是可变的。

(2) 级次性。含水系统和流动系统两者均有级次性，地下水流动系统可分为区域、中间和局部的流动系统。图 1-1 所示为一由隔水基底所限制的沉积盆地，构成一个含水系统。由于其中存在一个比较连续的相对隔水层，因此，此含水系统可划分为两个子含水系统（I、II）。同时，此沉积盆地中发育了两个流动系统（A、B）。其中一个为简单的流动系统（A），另一个为复杂的流动系统（B）。后者可以进一步划分为区域流动系统（ B_r ），中间流动系统（ B_i ）及局部流动系统（ B_l ）。在同一空间中，含水系统与流动系统的边界是相

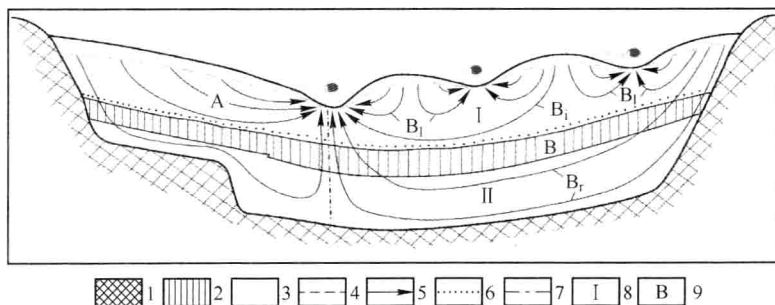


图 1-1 地下水含水系统与地下水流动系统

- 1—隔水基底；2—相对隔水层（弱透水层）；3—透水层；4—地下水位；5—流线；
6—子含水系统边界；7—流动系统边界；8—子含水系统代号；9—子流动系统
代号； B_r 、 B_i 、 B_l 分别为B流动系统的区域的、中间的与局部的子流动系统

互交叠的,两个流动系统(A、B)均穿越了两个子含水系统(I、II)。

(3) 控制因素多重性。控制含水系统发育的因素主要是地质结构(沉积、构造、地质发展史);控制地下水流动系统发育的因素主要是水势场,由自然地理因素控制,但在人为影响下会发生很大变化。

从地下水系统概念的产生可以看到,人们对水文地质实体研究的视野在不断开阔,从一口井附近小范围的含水层,扩展到整个含水层,随后又扩展到地下含水系统与地下水流动系统,最终认识到了地下水系统只是环境生态系统中的一个组成部分。换句话说,人们所面对的研究对象是一个愈来愈复杂的系统。研究视野由含水层的局部向包含水文、生态环境、技术经济的地下水系统转移;研究目标由解决具体生产问题转向实现可持续发展的全局性课题,研究内容从地下水的水量研究扩展到地下水圈的研究。学科发展上纯粹的水文地质学正在消亡,多学科交叉渗透成为主流。

当前,国际上都很重视地下水系统的研究,其主要原因是随着国民经济的迅速发展,各国普遍存在因大量开采地下水而造成过量开采以及相应发生的一系列环境负效应问题。因此,不首先获得科学的区域性水资源评价,就不能妥善解决局部地区的问题。研究地下水系统是做出科学的区域地下水资源评价和建立最佳开采方案的可靠途径,只有在全面研究地下水系统的基础上,才有可能建立正确的数学模型,实现模型化和最优化,并为建立管理模型创造条件。

地下水系统研究的全过程,基本可归结为:查明水文地质条件→建立水文地质模型或概念模型(即地下水系统赋存的环境)→建立与地下水运动条件相适应的数学模型(进行参数研究和资源评价)→因地制宜,制定地下水资源最优开发利用方案,建立管理模型。地下水系统的研究,不仅在理论上具有重要意义;而且在实际应用上,必将提高复杂条件下进行地下水资源评价与开展动态预测的水平;同时在工作方法上也将会实现新的改进。因此,地下水系统的研究,对水文地质科学的发展,将会产生十分深远的影响。

1.1.2 地下水系统边界确定

地下水系统的研究,不仅要考虑水文地质实体,还要研究由流线

与等势线组成的流场，把分析研究水流系统的流网结构作为划分系统边界的重要依据，也即搞清地下水水流的来龙去脉。

1.1.2.1 一级地下水系统

一级地下水系统主要受地貌、构造以及一、二级地表水系的控制，依据盆地边界或地表水系流域范围划分。一级地下水系统之间不通过边界产生物质和能量交换，系统内部具有独立完整的水循环演化体系（区域水循环）；系统内部水文地质条件、水动力特征、水化学特征符合区域水循环基本规律。所有地下水系统分区的界线都构成一级地下水系统的边界，重点考虑的边界划分依据有：地形地貌、地表或地下分水岭、国界、海岸线等。

1.1.2.2 二级地下水系统

一级地下水系统内部可包含着若干规模相当的次级盆地或流域，它们与邻近的地下水系统没有或只有少量的物质和能量交换，地下水循环和演化相对独立，各具特点。因而可在一级地下水系统的基础上，划分出若干个二级地下水系统。二级地下水系统在一级地下水系统边界的基础上，重点考虑了一级地下水系统内部的边界类型，如地表水分水岭、地下水分水岭、岩相古地理界线等。

1.1.2.3 三级地下水系统

二级地下水系统内，山区和平原含水介质和地下水补、径、排条件有很大差异，各具特点。因而在二级地下水系统划分的基础上，主要根据山区与平原含水介质的不同，重点考虑含水介质的特征和岩相古地理特征、渗流场和化学场特征，以山区与平原的构造或岩相界线为参照可进一步划分出若干个三级地下水系统。

1.1.2.4 四级地下水系统

四级地下水系统边界确定应根据具体的构造、水文地质条件具体分析，一般可将地下水系统的边界归纳为地表水体、断层接触边界、岩体或岩层接触界、天然分水岭、构造分水岭等边界类型，如图 1-2

所示。此外,对所研究的地下水系统,如果人类活动对平行或相交于地下水流线的界线影响很小,或这种影响可以通过勘探、调查加以控制,也可将其定为人为流量边界。如局部地下水系统、亚区域地下水系统、区域地下水系统之间的界线,若不受人类活动影响,则可以将它们作为隔水边界。

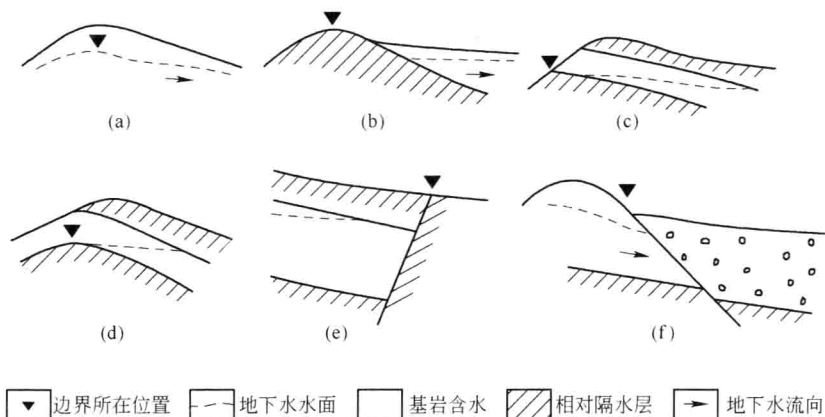


图 1-2 基岩地下水含水系统边界类型示意图

- (a) 地下分水岭边界; (b) 地表分水岭边界; (c) 隔水底板边界;
(d) 构造分水岭边界; (e) 阻水断层边界; (f) 透水断层边界

1.2 岩溶水系统研究现状

岩溶 (karst) 指可溶性岩石,特别是碳酸盐类岩石 (如石灰岩、石膏等),受含有二氧化碳的流水溶蚀,有时还加以沉积作用而形成的地貌,分为地表岩溶、地下岩溶。赋存并运移于岩溶化岩层中的水称为岩溶水 (karst water)。岩溶水系统是一个能够通过水与介质相互作用不断自我演化的动力系统。

1.2.1 国外研究现状

对岩溶水文地质模型的研究,始终伴随着对岩溶含水介质认识的深化。1975 年,岩溶水首次成为国际性水文地质大会的主题;IAH (国际水文地质家协会) 出版的《Hydrogeology of Karstic Terrains》首

次系统地研究了岩溶区的水文地质学问题。自此以后,几乎每年都有不同规模的国际学术讨论会召开,相关论文和专著不断涌现。20世纪以来,欧美学者进行了一些开拓性研究,并取得令人瞩目的成果。

1.2.1.1 岩溶含水介质研究

美国学者 E. T. Shustert 和 W. B. White 在前人和他们自己工作的基础上,于1969年和1971年首先明确提出了岩溶水双重介质模型,即在碳酸盐岩含水单元中常常同时存在着溶洞、暗河充水的管道集中流介质和由溶蚀裂隙组成的扩散流介质,且两者互相联系,前者起导水排泄的作用、后者起贮水网络的作用。Quinlan 和 Ewers 1985年在总结世界上一些著名岩溶区的研究成果基础上,建立了两端元岩溶含水介质及流动的特征谱。Atkinson 和 Smart 于1979年和1985年对大量岩溶、半岩溶含水层进行研究后认为,当一些被岩溶水拓宽的溶隙宽度达10cm以上时,其内的水流为非达西流,其水文地质意义不可忽略,由此提出了岩溶含水层的三端元分类模型——三重介质模型。著名示踪专家 Quinlan 在对玛猛洞区500多次示踪研究和对长期自动监测资料进行分析的基础上,提出了岩溶含水层的四重介质模型,认为碳酸盐岩的粒间孔隙在地下水的渗流中亦发挥了一定的作用,不能忽视。

1.2.1.2 岩溶水系统野外试验场研究

针对岩溶含水介质的复杂性,20世纪70~80年代,美国、法国、德国等建立了岩溶水文地质试验场。C. Fabian 研究了岩溶地下水系统组构等。

1.2.1.3 岩溶水系统数理模型研究

鉴于岩溶含水介质的复杂性,人们开始寻找新的研究理论和方法。受陆地水文学模拟方法及系统理论等的启示,系统理论被引入并成为研究的有效工具。它着眼于输入激发所产生的输出响应,而不考虑含水层内部结构及水流动态,将其视为一个“黑箱”,出现了全混合模型、等效多孔介质模型和快速水流通道模型等多种数理研究模