



何宇彬
等著

中国喀斯特水研究

STUDY OF KARSTIC-WATER IN CHINA

同济大学出版社

Study of Karstic-water in China

中国喀斯特水研究

何宇彬 韩宝平 著
徐 超 何宇平

同济大学出版社

责任编辑 卞玉清
封面设计 陈益平

中国喀斯特水研究

何宇彬 等著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

望亭电厂印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 27.75 字数 710 千字

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

印数:1—500 定价:52.00 元

ISBN-7-5608-1854-4/P·13

内容提要

本书是第一作者毕生从事喀斯特学和喀斯特水研究的成果,作者坚持“溶蚀理论—水文地质—水文地貌”相结合的综合观点,全面深入地研讨中国喀斯特水的生成、演化与运动规律,体现了中国学者独特的学术风格。

本书突出基础理论研究,也注意总结生产实践中存在的问题,并提出一些引人注目的新思路和新见解。

只有一个地球——保护地球
保护生态环境
保护人类的未来……

序 一

我国喀斯特分布甚广,若按碳酸盐岩分布面积积计,可达 746.3 万平方公里(包括埋藏部分),出露的含碳酸盐岩地层面积为 206 万平方公里,其中碳酸盐岩裸露面积就达 90 万平方公里以上。南北相比,南方各省较为普遍,尤以西南地区分布最广,发育程度也最高。北方地区虽分布面积较小,但比较集中,例如山东和山西高原及其邻近地区就达 47 万 km^2 。我国建国以来对喀斯特进行了大量研究,在国际上具有领先地位,“喀斯特学”已逐渐形成一门专门学科,如任美锒等著《岩溶学概论》、袁道先等著《中国岩溶学》可作为代表。喀斯特研究不仅具有重要科学意义,而且与生态环境、石油、煤炭等矿产资源以及水资源等,均有密切联系;特别是喀斯特水资源,在我国水资源中占有重要地位。

据初步统计,我国喀斯特水资源为 2039.67 亿立方米/年,约占全国地下水总水资源 8716.84 亿立方米/年的 23%;但西南各省喀斯特水资源约占地下水资源的 50% 以上,其中如广西占 62.33%、贵州占 73.22%。南方 2836 条地下河,总长度达 13919km,总流量达 $1482\text{m}^3/\text{s}$ 。北方地区喀斯特水资源,虽仅占全国喀斯特水资源的 9.4%,但其分布主要集中在山西高原与山东沂蒙山区,成为当地主要供水水源。据统计,山西全省流量大于 $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 的涌泉达 86 处,其中原始流量大于 $1\text{m}^3/\text{s}$ 的涌泉多达 19 处,全省涌泉原始总流量约为 $100\text{m}^3/\text{s}$ (31.5×10^8 立方米/年)。华北能源基地以及许多重要城市,如太原、阳泉、济南、淄博等,都以喀斯特水作为主要水源,同样在农业上也是重要的灌溉水源,对华北地区的国民经济建设,具有特殊重要地位。

近年来,我国对喀斯特水的研究完成了大量重要成果;但在地区上比较偏重北方地区,在研究内容上比较偏重水资源的评价。例如地矿、煤炭等部门联合进行的《中国北方岩溶》的专题研究,系统地综合研究了华北地区的喀斯特特征与喀斯特水的形成,并在此基础上,全面的计算了华北地区的喀斯特水资源。韩行瑞等著《岩溶水系统——岩溶大泉研究》,在研究喀斯特水系统的基础上,进一步对山西全省的涌泉资源,分别作出计算与评价。上述研究的主要特点,是普通采用系统理论与系统分析方法,在充分考虑三水转化关系的基础上,把每个涌泉泉域作为一个具有统一渗流场、水动力场、水化学场的喀斯特水系统;每个系统不仅具有巨大的储水空间,而且具有强大的传输能力与调蓄功能。在充分研究系统边界、介质结构、基本参数、输入输出功能等因素的基础上,建立了比较接近实际的数学模型,进行泉域水资源及其水位、水量变化趋势的预测、预报。同时在充分考虑环境、经济、社会等要素的基础上,建立不同类型的管理模型,把喀斯特水系统研究,纳入系统工程的轨道。这些研究成果,部分反映了我国喀斯特水研究的最新进展。

最近我非常高兴地获悉,同济大学何宇彬教授继 1979 年发表的专著《中国岩溶研究》之后,又完成其续篇——《中国喀斯特水研究》新著。何宇彬教授长期结合教学工作,从事喀斯特研究,辛勤耕耘,造诣颇深。这本专著是用八年时间完成的,可以说是他长期从事喀斯特研究的一个系统总结。他一向重视喀斯特微观机理与水文地质结构的研究,所以该专著具有以下特色:1) 比较深入地分析研究了喀斯特的微观机理;2) 详细探讨了喀斯特水系统的水文地质结构模式与水动力剖面模式,以及随机模型在喀斯特水系统中的应用;3) 从形成

机理入手,研究中国南、北方喀斯特水的差异,并展开了分析对比。

这部专著是对我国喀斯特水研究的一个新的重要贡献,不仅具有理论意义,而且也具有实用价值。目前国际上对喀斯特水的研究,也逐渐发展成为一门独立学科,即“喀斯特水文地质学”,我相信何宇彬教授的新著,对推动这门新学科的形成与发展,必能发挥重要作用。

中国科学院院士

A handwritten signature in black ink, appearing to read '陈梦熊' (Chen Mengxi), written in a cursive style.

1997年3月 北京

序 二

《中国喀斯特水研究》一书是我国第一部在这方面的系统专著,它将丰富我国水文地质学内容。本书第一作者毕生从事喀斯特水及喀斯特学的专业研究,并用8年时间撰写此书。对此书的问世我表示祝贺。

本专著以中国的实际资料为基础,各章节均系统深入地研讨了中国喀斯特水及其生成环境的特点。向世人介绍了中国喀斯特水的自然规律和生产实践中存在的问题。

本书不仅从微观上研讨了喀斯特多重空隙介质,也从宏观上研讨了喀斯特发育的“时空演化”问题,突破了统治学术界百余年的戴维斯的“循环论”观点。

“地下水系统”观念引入国内已近十多年,但重功能轻结构的倾向亦显突出,导致一些模型脱离实际而失真。本书作者全面研讨了“喀斯特水系统”的概念、内涵和外延,并引用中国典型实例把“结构与功能”紧密地联为一体;喀斯特水系统实属方法论范畴,它不是研究的最终目的。笔者还提出了中国南北方两大自然喀斯特区的“喀斯特水动力剖面模式”,它给深入研究喀斯特水系统奠定了牢固的基础。近十数年来,国内同仁在各类模型的研究上像雨后春笋,但多停留在数学拟合上面,而对模型的实效却有所忽略,本书作者注意了这一问题。

“中国喀斯特水特征”的研究,是本专著的核心内容。笔者按南北方两大自然喀斯特区分别研讨了管流水(南方)与隙流水(北方)的基本特征,并从机理上展开了对比分析。使人们一目了然地了解这一多年难解的课题。

本书作者不但注意了基础理论研究,对应用问题也给予了重视。如:喀斯特洞穴深度、喀斯特塌陷、水资源利用及大水矿山的水害预防等。作者表达了一些自己的见解,供后人研讨发展。

总之,本书资料丰富、观点明确、学风严谨,实为水文地质界盼望已久的好著作。我在这里向广大读者推荐。

原中国地质学会水文地质专业委员会主任
中国地质大学水文地质系教授



1996年12月 北京

序 三

《中国喀斯特水研究》一书是本书第一作者毕生从事喀斯特和喀斯特水研究的结晶,它是《中国岩溶研究》一书在水文地质方面的续篇,在国内此领域中属第一部系统的专著,它的出版将丰富中国喀斯特学的内容。

本书特色之一是突出“水文地质学”观点,全面深入系统地研讨中国喀斯特及喀斯特水的形成、分布规律。作者认为:“溶蚀理论—水文地质—水文地貌”是喀斯特学研究的三部曲。

本书的特色之二是资料丰富翔实,既有微观溶蚀机理的实验研究资料,又有喀斯特水试验场的宏观资料;既有南北方区域喀斯特水资料,又有典型水源地及大水矿山的勘探研究资料。使全书各章节的研究达到较大的深度和广度。

本专著提出了一些值得重视的见解,如:

1. 通过溶蚀机理研究,深入研讨了“多重空隙介质”,并提出“大双重介质”(管流水)与“小双重介质”(隙流水)的概念,它给喀斯特水的深入研究归纳出两个既互相区别、又互相依存的重要方面。

2. 应用中国典型资料,提出了“中国喀斯特水文地质结构类型”及“喀斯特水动力剖面模式”,它是“喀斯特水系统”研究的重要基础。

3. 基于中国南北方两大自然喀斯特区的差异,作者分别探讨了“中国南方管流水特征”和“中国北方隙流特征”,并从机理上进行了研究对比,使读者对中国喀斯特水特征一目了然。

4. 作者从“常温常压开放系统”和“高温高压封闭系统”两个方面探讨喀斯特洞穴的发育深度,并提出:“在高温高压封闭系统内,白云岩的油气储运多于灰岩储层”,这给油气田研究提供了新的思路,并引起俄罗斯学者的兴趣。

5. 本书除突出基础理论研究外,对生产实践亦较重视。作者总结了中国南方截堵暗河,修筑溶洼水库和地下水库的经验;对中国北方喀斯特水资源也进行了全面系统研究;对于大水矿山由于强排疏干所引发的环境灾害亦给予重视,并提出了“预防水害”的意见。这些见解对指导生产实践都是有益的。

本书作者用了8年多时间(1988—1996年)完成这部专著的写作,做到了严谨求实、精益求精。它的出版将受到中国喀斯特学界欢迎,我在此向作者表示祝贺并向广大读者推荐。

中国科学院院士

中国地质学会岩溶专业委员会主任
地质矿产部岩溶地质研究所研究员

袁道先

1996年12月 桂林

绪 论

一、指导思想

70年代末期,“系统科学”又被广泛地应用于各个学科领域,它变成了现代科学家们的思维方法。“系统”是指相互联系、相互制约和相互作用的若干部分所组成的具有某种功能的总合。亦可认为,由若干相互联系、相互作用的因素所组成的具有一定结构和功能的有机整体。

笔者认为,辩证法的核心是“对立统一”和由“量变到质变”的哲学观念,它与系统论之间有着密切的关系,前者属意识形态范畴,它侧重于哲理方面;而后者是应用唯物论的观点阐明分析具体问题,它更侧重于方法论范畴。

“系统论”具有它自己的一般方法论原则,即:整体性、最优化和模型化。它们分别从不同方面表现了系统方法的本质特征。整体性原则是系统方法的根据和出发点,系统方法之所以成为一种独立的科学方法,主要就是由于它把对象作为整体来研究。离开了整体性原则也就谈不上系统方法。最优化原则是系统方法的基本目的,人们设计和运用系统论的目的,总是为了实现最优化、高质量、高效率地完成一定的工作任务。离开了模型化原则,系统方法也就失去存在的意义。模型化原则作为实现最优化原则的手段和必要途径,也是系统方法的重要组成部分。

辩证唯物主义哲学或系统科学都要求人们把所研究的问题视为整体。即从系统的整体与部分、结构与功能、整体与环境的相互联系和相互作用的关系中,探求研究对象的本质和规律。从而有些学者把这一哲学观点和方法称为系统工程的核心。

“地球系统科学”在喀斯特研究中深化了对喀斯特发育机理的研究。地球系统科学是近20年来发展起来的理论,它要求在研究各种表生地质作用时,从岩石圈、水圈、大气圈和生物圈界面上的物质、能量运移规律中去考察其机理。在研究喀斯特作用时,由于有 CO_2 的介入,使得采用这样的思路更有必要。在国际地质对比计划 IGCP299“地质、气候、水文与喀斯特形成”课题的实施中,就紧紧抓住了四层圈之间碳、水、钙循环的运动规律;使用各种轻便仪器捕捉其行踪,并利用该项目跨洲、跨越各种自然环境进行广泛对比的有利条件,掌握碳、水、钙循环在不同环境下的不同表现和喀斯特作用的关系(袁道先等 1993)。

喀斯特作用是空间与时间的函数,从而研究喀斯特必须具有时空观念。水-岩作用是喀斯特成生的内因,但它的环境因素也是变化万千、错综复杂的。从而对喀斯特水的研究也涉及到多学科交叉渗透问题。

溶蚀理论和喀斯特水文学研究,五六十年代在欧美学者中发表了一些成果论文;自60年代以来,中国学者亦予以重视并取得了某些新进展。然而水文地质学研究途径却一直是中国学者的研究特色。近年来,地理学界又提出了“喀斯特水文地貌学”(Karstic Hydrogeomorphology)的新思路。

笔者认为,“溶蚀理论—水文地质—水文地貌”应作为喀斯特学研究的三部曲;因为喀斯特作用无论从微观到宏观,还是从自然地理作用到水文地质作用,都是一个有机联系的整

体。它给喀斯特研究提供了崭新的、更广阔的前景,这也就是本书中各章节选题的思路。

“水文地貌学”提出从水流与形态的特征关系去揭示喀斯特水流特征规律的新思路。在喀斯特化流域中,所有形态特征值(如峰顶高程、垭口高程、洼地底面高程等)构成无方向、无时间因次的数值分布集合,称为“形态标量场”。而水流在该标量场中运动,受制于标量场中地貌势、地貌梯度、相对基面位置及状态等条件,从而构成有方向、有时间因次的速度分布集合,称为“水流量场”。由于水流与形态在喀斯特化流域互为因果,而在流域形态结构中对流域水运动做出明确响应的形态标量场是最低势面,称 L_m 面,根据地貌势与水文势对称原理把 L_m 面形态标量场转变为水流量场。通过这种转换,喀斯特地下分水岭的位置和汇流方向已能确定。这不但解决了峰丛洼地和峰丛干谷区的流域圈定难题,并由此发现在峰林溶原区由于散流作用使得地表和地下分水线不封闭,流域水流呈开放态,从而证实了喀斯特化流域的开放特征。所以,水文地貌学进一步将形态作为水流形成的动力源和水流识别的信息源,这就是水文地貌学的主要特点(谭明 1993)。

不同的学术观点之间的互相渗透、取长补短,应作为学术界认真对待的问题。因为认识是不断深化而无止境的,科学研究水平是随着新技术手段的发展、随着科研人员思路的开阔而更新的。如“板块学说”兴起于 30 年代,但于四五十年代曾为“大地构造”学派所取代;然而自 60 年代以来,随着海洋地质和石油地质的发展又重新崛起。就喀斯特学领域而言,随着电子显微镜的引用,微观溶蚀机理研究得到了迅速发展,中国学者开拓了这一新领域。

一位旅居瑞士的华裔科学家许靖华博士认为:地球生命历史过程并非是残酷的争斗,而应是共演。在 10 亿年的自然发展过程中,互相共存是通则,互斗而亡才是特例。从而他对达尔文的“适者生存、物竞天择”理论提出了质疑和批评。

这一新思想对学术界的争鸣应有所启示。当前,对喀斯特塌陷机理提出了不同的认识(如潜蚀、吸蚀、气水压力作用等),这应是正常现象。但过于强调自己的见解,而不能虚心地引介他人的学术见解,就有可能阻碍学术思路的进展。笔者基于大量研究实例,提出了喀斯特塌陷机理是以水动力因素为主体的综合成因论。

二、国内外喀斯特水研究进展

喀斯特水系统是一个不断演化的动态系统,它是由一个复杂的反馈环所控制,即系统内的各种作用过程改变着系统的特征;而系统特征的改变又促活了新的作用过程,因此喀斯特含水介质在空间上的极不均一性和时间上的可变性是不同于孔隙-裂隙介质的。

1. 国内

(1) 喀斯特含水介质研究

1981 年,陈文俊等人把碳酸盐岩含水介质空间归纳为溶隙系、溶管、溶管系及溶管网,从而他们把喀斯特水类型划分为:隙流、管流、脉流及网流四类(图 0-1、表 0-1)。

基于矿床充水特点,我国矿山部门把矿床水类型划分为:溶隙充水、溶洞充水及溶道充水(刘启仁 1984)。

1988 年,陈雨孙和边际提出喀斯特水运动的三重介质见解。认为,喀斯特空隙空间按其尺寸通常分三类(表 0-2),从水力作用观点含水介质归纳三类:① 储水介质 由基质空隙构成,起着储水作用;② 输水介质 由溶隙或溶缝构成,其作用是提供过水通道;③ 控水介质 部分地或全部地贯穿喀斯特化岩体中的水平溶洞,它控制喀斯特水的运动,并使之成为

具独特形状的地下水位曲面。

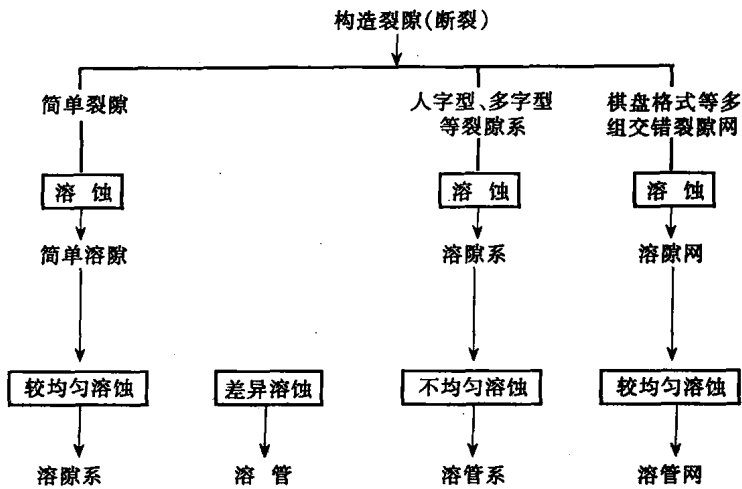


图 0-1 溶隙、溶管、溶管系、溶管网发育及其关系示意图

表 0-1

中国南方喀斯特水的动力特征表

水力参数	隙 流		管 流	脉 流	网 流	
	承压隙流	自由隙流			自由网流	承压网流
水力坡度		较小(千分之几)	大(千分之几至百分之几)	较大—较小(万分之几至百分之几)	小(千分之几至万分之几)	
地下水流速	很慢	较慢(数米/日至数千米/日)	很快(数百米/日至万米/日)	较快(数十米/日至数千米/日)	慢(数米/日至数百米/日)	很慢
水位变幅	很小(稳定)	较小(数米至数十米)	很大(数十米)	较大—较小(数米至数十米)	小(数米以内)	很小(稳定)
流量变化	小(稳定)	较大	大	较大	较小	小(稳定)
流态	层流	层流—紊流(常见层流)	紊流	紊流—层流(常见紊流)	层流	层流

1994 年,邹成杰等人依据喀斯特水贮存的形式和运动特征,将其划分为三类:Ⅰ. 溶隙型 各种构造裂隙经溶蚀后形成溶隙,一般宽度小于 5cm,平面延续性较好,地下水流态属线性层流范围;Ⅱ. 脉管型 溶隙经溶蚀扩大,宽度为 5—20cm,平面连续好,地下水运动进入非线性层流;Ⅲ. 管道型 脉管经溶蚀进一步扩大,溶道宽度大于 20cm,连续性好,地下水运动属紊流。

表 0-2

喀斯特介质的分类

空隙类型	宽度(cm)	水力特性	介质类型
溶 洞	$1-10^4$	紊 流	控水介质
溶 隙	$10^{-1}-1$	层流—紊流	输水介质
溶 缝	$10^{-3}-10^{-1}$	层 流	输水介质
基质空隙	$10^{-6}-10^{-3}$	层 流	储水介质

陈崇希(1995)为建立三重空隙介质地下水流统一的控制方程,提出了折算渗透系数 K_L 的概念,目的是将紊流流态的水流如同层流一样,其流动规律在形式上可用线性定律表示

$$V = K_L J$$

式中, V 为渗透流速(LT^{-1}); J 为水力坡度(无量纲); K_L 为折算渗透系数(LT^{-1})。当地下水属于紊流流态时, K_L 随 Re 而变化 $K_L = K_L(Re)$ 。引入 K_L 后,可将 5 个流动分区的不同分区流态采用一个统一的流动规律来表示。从而使“溶管或溶道—裂隙—孔隙”水流耦合起来,但 K_L 是个随雷诺数 Re 变化的参数。笔者认为,这一探讨仍属理论思维阶段,还难以达到实用的效果。

(2) 喀斯特塌陷

国内对塌陷的形成机理研究比较成熟。最先提出潜蚀论,其代表学者是左平怡(1980);尔后,徐卫国、赵桂荣(1985)提出真空吸蚀论,艾万钰、苏建三、曾昆甫(1982)又提出气水压力作用;康彦仁、项式均等人(1986)通过对长江流域的调查,认为潜蚀、吸蚀、气爆作用均是塌陷的机理。陈国亮的著作中提出压强差效应,压强差是指洞穴空腔与松散介质(或土洞)接触面上,下侧水、气流体因管道内水位变化而产生相应的压强差值;此值水位上升为正、下降为负,这一观点是铁道部第二勘测设计院喀斯特研究组在模型试验和多种现场试验的基础上提出的。

喀斯特塌陷研究中的两个主要问题是:① 塌陷的形成机理问题;② 预测预报问题。当前对后者的研究尚薄弱。

大型物理模拟试验,在研究武昌白沙洲塌陷中已采用。通过大比例尺物理模拟试验,再现喀斯特塌陷的全过程,研究塌陷发育机理,建立塌陷与各主要影响因素的关系,有助于分析判断塌陷机理。

地理信息系统在评价地质灾害问题方面,具广阔的应用前景。运用 GIS 的功能模块,可反映塌陷不同影响因素的图层系统;为综合塌陷各影响因素,可运用 GIS 的网络叠加功能,这样可形成一个综合图像。这一新技术手段在唐山塌陷区的研究中已被应用。

(3) 喀斯特水资源评价方法

针对喀斯特水系统结构复杂、三水转化迅速、流态多变等特点,我国学者对喀斯特水资源评价方法的研究已有很大发展。主要体现在两个方面:

① 输入-输出系统 根据三水转化迅速的特点,将降水、地表径流、地下径流作为一个统一的水资源系统。综合水文—水文地质学的水资源评价原则,从质量守恒原理出发,按

“降水(输入)—产流—调蓄—排泄(输出)”的模式进行统一评价。

② 喀斯特水系统调研究方法的发展 (甲) 将研究评价区作为一个喀斯特水系统; (乙) 采用综合技术手段研究系统的结构、系统的边界, 输入与输出状态等; (丙) 建立相适应的数学及物理模型; (丁) 应用模型预测水资源。

2. 国外

(1) 喀斯特含水介质研究

美国的 E. T. Shuster 和 W. B. White 在前人和自己的工作基础上, 于 1969 年和 1971 年提出了双重介质模型, 即喀斯特管流水与散流水共存, 前者主要起排泄功能, 而后者则起贮水功能。由于喀斯特化程度不同, 故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 至 1000:1; 而散流水则反映慢、变幅亦小, 最大与最小流量之比一般小于 4:1。故在汛期, 管流水补给围岩中的散流水, 但于中枯水季节, 散流水因滞后效应, 水位相对较高, 散流水向管道汇流。

Qwinlan 和 Ewers 1985 年在总结世界上一些著名喀斯特区研究成果的基础上, 建立了两端元含水介质及流动的特征谱(图 0-2)。1985 年 T. C. 阿特金森(英国)提出三重介质模型, 认为溶隙宽度在 10cm 以上时, 水流运动为非达西流, 因此提出三端元分类模型(图 0-3), 即喀斯特化含水岩体内存在着由孔隙、裂隙和溶道介质组成, 它们从流态上可分为达西流、混合流和紊流三类。1990, J. F. Quinlan(美国)在玛猛洞区 500 多次示踪研究和长期自动监测资料的分析基础上, 提出四重介质模型(图 0-4)。

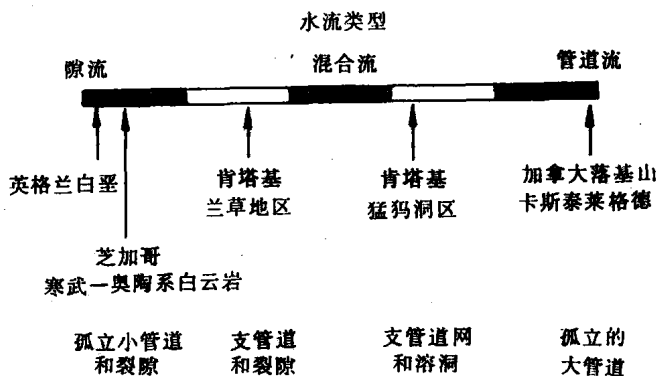


图 0-2 典型碳酸盐岩区谱系图

(据 Quinlan 和 Ewers 1985)

(2) 喀斯特水系统研究

管流水常属紊流流态, 实测流速可达 2300m/h 或更大, 它已不适合沿用达西渗流理论。

系统理论方法的引入为之提供了有效的工具, 它只着眼于输入的激发所产生的输出响应, 而不考虑含水岩体内部结构, 因而可将其视为一个黑箱。成功的模型有: Simpson 等人的离散态混合模型、Compagnon 等人的全混合模型和 Dries 的模型, 前两者以示踪剂或溶质作为输入; 而 Dries 根据密苏里州东南部两个喀斯特泉的历次暴雨期流量资料, 系用反褶积法求

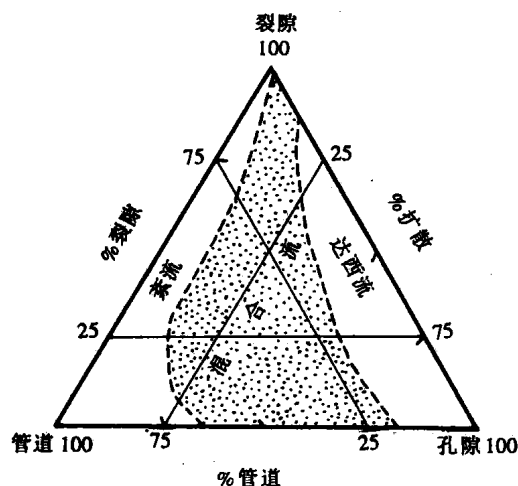


图 0-3 含水介质三端元分类
(据阿特金森 1985)

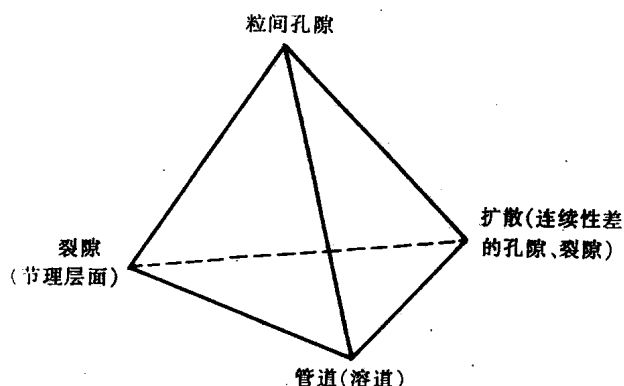


图 0-4 含水介质四端元分类
(J.F. Quinlan 1985)

得喀斯特水系统的核函数,利用已求得特征函数重现了输出信息,根据不同单位的计算误差,判断补给区的位置和范围,精度较好。C. Fabian 研究了构造—地层子系统、水循环子系统、化学反应系统和地形、洞穴、地貌子系统的相互作用。White 研究了喀斯特地下水系统的输入、输出及内部结构的相互关系。W. Dreybyodt 研究了喀斯特水系统中反馈环的作用。

1972—1973 年, J. W. Herr 和 W. B. White 对美国肯塔基州中南部的 owl 洞泉应用自计水位器开展了微动态观测,并较早地探讨了隙流水与管流水的转化关系。

(3) 喀斯特塌陷研究

各国研究者们已深入研究了塌陷的原因、类型和分布特征,主要原因是人类工程流动所导致的水文地质结构的变化。除了研究成因机理外,国外学者尤为重视对塌陷的探测、监测和防治。

遥感技术和地理信息系统均成功地用于塌陷区的探测、预测和预报。定位探测方面,曾采用多种地球物理方法,包括:重力、电磁、电阻率、测井、地下透视雷达、高精度的地震波反射技术、跨孔地震、瞬变电磁测深等先进仪器。定点探测溶洞、土洞的存在部位,并提前处理;根据地质、塌陷调查、实际探测等综合信息,建立计算二维、三维数学模型。通过多源信息拟合,对研究区的塌陷危险性做出评价。

对于地面的塌陷,国外多采用监测孔观察、定位监测、钻孔伸缩仪、声波发射测试仪、时间域反射仪等仪器监测塌陷的进一步演化,预报再次塌陷的可能性。相比之下,我国由于监测仪器落后,对塌陷动态过程的了解尚感欠缺。

三、本专著的研究特色

专著为笔者毕生的理论研究与实践经验的系统总结,其主要特色体现在以下几个方面:

1. 微观溶蚀机理研究

众所周知,宏观现象是由无穷多的微观现象组成的,而微观现象又常反映宏观现象的本质。电子显微镜的广泛应用,为研究喀斯特化的微观机理提供了有力工具。

喀斯特化现象是地壳表层最重要的化学动力学作用之一。几十年来,化学动力学与地球化学家们从各自的角度对其过程进行了系统研究,加深了人们对其作用特征的认识。但如何从微观上定点或定位地、直观地研究其机理特征,这方面工作尚属少见。本书第二章就弥补了这一缺陷,通过对溶蚀试验和天然风化可溶岩试样的点扫描、线扫描和面扫描分析,定点、定位地分析了化学成分与微观形态之间、不同水动力条件及岩石结构与微观形态之间、不同反应方式(选择溶蚀、扩散溶蚀)与微观形态之间的关系,从而揭示了喀斯特多重含水介质的微观演化特征。

第三章选用“压泵仪”系统地、定量地研究了喀斯特化岩石的空隙结构和组成形式及其与渗透性、钻孔涌水量的关系。

学术界已认识到,并非所有的可溶岩体均属喀斯特化含水体,因为其内部还夹含相对隔水层。但对两者之间以什么定量指标划分?本章通过对钻孔不同层段岩心的空隙率、空隙结构特征的分层抽水研究,探讨用“空隙率和空隙结构参数”来定量确定两者的界线问题。不仅要考虑岩芯的空隙率高低,而且还要考虑全部空隙中大空隙所占的比例关系。

2. 碳酸盐岩多重空隙介质研究

笔者从单项溶蚀机理研究得出纯碳酸盐岩的溶蚀速度大小顺序为:

粒屑结构灰岩
泥-微晶结构灰岩 ($K_v = 1.0 - 1.20$) $\Rightarrow$ 重结晶(灰岩)大理岩 ($K_v = 1.0$) $\Rightarrow$
结晶结构灰岩
粉-微晶结构白云岩 ($K_v = 0.7 - 1.0$) $\Rightarrow$ 细-中晶白云岩 ($K_v = 0.5 - 0.6$) $\Rightarrow$ 中-粗晶白云岩 ($K_v \leq 0.5$)。

在喀斯特作用的全过程中,溶蚀作用表现出三个阶段:化学溶解作用 $\rightarrow$ 差异溶蚀作用 $\rightarrow$ 物理破坏作用。这三个过程在各类碳酸盐岩中的表现程度又显不同,这就导致喀斯特化岩体内“多重空隙”介质的形状、规模差异极大。

(1) 灰岩类 泥晶灰岩以化学溶解为主,粒屑及生物屑灰岩初始时以溶解作用为主,后期转为物理破坏作用。

(2) 白云岩类 粉-微晶白云岩与中粗晶白云岩在溶蚀机理及水理性质上有差异。前者的孔隙率大于后者,这是前者溶蚀强度大于后者的原因之一,它的水理性质类似于灰岩。中粗晶及不等粒白云岩的晶粒多呈铰嵌结构,常表现为孤立的晶间孔隙;它的初期以渗透-溶蚀为主,后期则以分解-淋滤为主,尤其是物理破坏量大于灰岩。这种微观溶蚀机理(扩散溶蚀)导致发育溶孔、溶穴、溶隙而难以构成暗河。

(3) 不纯灰岩与白云岩 在溶样的电镜图像上,见有一层残留粘土网膜,这反映化学溶解表现在初期。尔后非溶物质充填在隙缝内又减弱了溶蚀作用,在溶解的全过程中,物理破坏占优势。此类岩石常表现出其相对隔水性。

显而易见,各种结构成因类型的碳酸盐岩,其孔隙与裂隙的发育各异,溶蚀机理和过程亦不同,最终导致发育多重空隙介质(从溶隙到各种规模的溶道或溶洞)。

3. 含水介质类型研究

当前研究水流运动仍从雷诺数(Re)为准则,从而笔者划分含水介质类型亦以 Re 为思

考基础。笔者采用“汇流理论”的研究思路,并将多重空隙介质归纳为两大类:

(1) 小双重含水介质 直径小于 5cm 的溶孔、溶隙、溶穴, $u_i < 180\text{m/d}\cdot\text{m}$, 属线性层流流态。我国北方各类碳酸盐岩基本上归属此类,我国南方中粗晶白云岩、泥灰岩(白云岩)亦归属此类,我国南方Ⅳ水动力带的灰岩亦归属此类含水介质。

(2) 大双重含水介质 由溶隙、溶管、溶道或溶洞组成的含水岩体, $u_i > 180\text{m/d}\cdot\text{m}$, 喀斯特水流已不符合线性层流范畴。我国南方灰岩发育此类含水介质,我国北方有些涌泉溢出带亦属此类。

这就是笔者提出的“小双重介质”与“大双重介质”概念的由来,它对研究隙流水与管流水运动有实际意义。

4. 喀斯特发育的时空演化问题

喀斯特是在自然界时间与空间领域内发育和演化的,它具有由量变到质变的阶段性,同时又具有空间上的有序分带性,从而构成了在时空领域内喀斯特组合形态的总格局。第五章从宏观环境因素探讨了喀斯特的生成与演化问题。

地质构造(断裂、褶皱)、新构造运动、气象、生物活动和水文因素是喀斯特发生与发展的内外营力。喀斯特发生的动力是水动力作用和水化学作用,降水是溶蚀作用的工具。而温度则在一定范围内影响着生物活动。

(1) 地质构造因素 断层是岩体在构造应力作用下形成的破裂构造形迹,然而在不同应力条件下所产生的断层,其水文地质意义不同。中国学者应用地质力学理论与中国地质实体相结合的观点,自 60 年代以来,发展了“构造水文地质学”,它在生产实践口已起到令人信服的作用,并体现了中国的学术特色并丰富了水文地质内容。

我国新构造水文地质现象表现在以下几个方面:① 活动断裂促使深部地下水运动 如太原断陷盆地内沿汾河深断裂存在低温异常带,反映地下水迳流深度可达 600—800m(太原盆地标高为 810m);大量钻孔资料揭示,太原地区普遍存在地下水的深部迳流;新华夏活动断裂带沟通了太原凹陷内部的水力联系,它可谓新构造隆起区的一个独特的水文地质现象,实属罕见。② 河流基准面变化与喀斯特水作用的不适应性 我国西南各省,峡谷两侧暗河出口常高出河水面数十米呈瀑布飞泄。分水岭区的水化学垂直分带与河水面亦不适应。③ 水系袭夺现象 这是由于低基准面的河流或暗河,发生强烈的溯源侵蚀后,逐渐袭夺了流向高基准面的河流或暗河所致,于云贵高原和湘鄂西山地屡见不鲜。

(2) 喀斯特演化遵循“量变到质变”的阶段性

① 喀斯特演化遵循“量变到质变”的阶段性 它是时空演化的核心。中国大陆上两级剥蚀面是存在的,在其上所发育的喀斯特也必然出现“新与老”的时间差异。

② 喀斯特组合形态空间的有序分带性 喀斯特组合形态的配置(时空四维关系)归纳四类(邹成杰等 1995): I. 不同期同型 II. 不同期异型 III. 同期同型 IV. 同期异型,它们的存在体现了“时态”与“形态”配置的复杂性,其中 II、IV 类更具普遍性。喀斯特组合形态的配置具水平分带性,这首先决定某些影响因素(气候、新构造、地貌结构)具有有序性。从而组合形态的配置当然也呈现出明显的有序性,但它们属同期异形(IV 类)的产物。如贵州高原是由高原区和峡谷区组成的高原峡谷地貌类型,因此地貌结构具双向演化系统。(甲)高原区溯源侵蚀尚未波及,喀斯特地貌演化顺序是:峰丛山地或峰丛洼地→峰林洼地或谷地→峰林盆地或残丘坡地(相当于准平原)。(乙)峡谷区因河流强烈地从下游向中上游溯源