

HYDROGEOMORPHOLOGY OF KARST  
— THE THEORY, METHOD AND THEIR APPLICATION

Tan Ming

喀斯特水文地貌学  
——理论、方法及应用研究

谭明 著



喀斯特地貌学 2000 年 12 月第 1 版 2000 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-109-03111-1 定价：18.00 元

（地质出版社）

# 喀斯特水文地质学

理论、方法与应用研究



# 喀斯特水文地貌学

——理论、方法及应用研究

Hydrogeomorphology of Karst  
—the theory, method and their application

谭 明 著

贵州人民出版社

(黔)新登字 01 号

责任编辑:潘新显

封面设计:王才禹

技术设计:郑 鏖

**喀斯特水文地貌学**

谭明 著

贵州人民出版社出版

(贵阳市中华北路 289 号)

贵州省新华书店发行 贵州省侗学会印刷厂印刷

850×1168 毫米 1/32 5.5 印张 134 千字

1993 年 12 月第 1 版 1993 年 12 月第 1 次印刷

印数:1—1,500 册

ISBN 7-221-03344-7/K·261

---

定价:4.20 元

# 前言

该书是作者在其硕士学位论文和博士学位论文的基础上,结合作者所主持的贵州省教委自然科学基金项目“喀斯特水文地貌方法及其应用研究”、以及在贵州省“七·五”、“八·五”喀斯特攻关项目中所做的工作和参加国家自然科学基金项目 48970012 号所做的工作,并在贵州人民出版社的大力支持下撰写出版的。在此,作者要特别感谢硕士导师张英骏教授和杨明德教授、博士导师朱大奎教授和林承坤教授的培育;感谢贵州省教委和贵州人民出版社对喀斯特水文地貌理论与方法研究的支持;感谢普定县岩溶研究办公室对此项研究的大力协助;感谢潘新显先生为编辑此书所付出的辛勤劳动;感谢 M. M. Sweeting 博士为此书作序。最后还应提到的是,如果没有妻子的理解和支持,作者要进行这项研究也是不可能的。

“水文地貌”最初是相对于气候地貌、岩石地貌和构造地貌提出的,是与影响地貌形成的单个自然要素有关的一个概念(谭明,1991)。它比“流域地貌”(Horton,1932;Morisawa,1962;Schumm,1977;承继成等,1986)具有更广泛的含义,即凡是从水流运动角度所讨论的地貌形成均可称为“水文地貌”。“水文地貌学”是水文地貌概念的深化,它提出了更全面地研究水流与形态关系的任务(谭明,1993c)。由于喀斯特地区水流与形态不仅在地表、而且在地下具有全空间关联特性,因而在对喀斯特现象的研究中首先提出水文地貌学概念,在思想和方法上有其历史的原因和特殊的意义。

本书所涉及的地貌现象和水文现象,尤其是二者的关联现象,主要取材于锥状喀斯特区。因此,确切地说,它应称为“关于锥状喀斯特区水流与形态关系的水文地貌学”。但由于该书的主旨是理论与方法的探讨,目的在于开拓一个新的视角,所以仍方便地称之为

# 目 录

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 绪论                    | (1)   |
| 第一章 概念基础              | (4)   |
| 第一节 喀斯特水              | (4)   |
| 第二节 喀斯特水通道            | (6)   |
| 第三节 参考基准              | (10)  |
| 第二章 流域形态              | (12)  |
| 第一节 形态参数              | (12)  |
| 第二节 流域形态结构            | (15)  |
| 第三节 小流域的系统发育          | (22)  |
| 第三章 水文地貌场             | (30)  |
| 第一节 形态标量场             | (30)  |
| 第二节 水流向量场             | (37)  |
| 第三节 地貌势与水文势对称         | (45)  |
| 第四节 场转换与流域的开放性        | (48)  |
| 第四章 场动力效应             | (55)  |
| 第一节 高速流场的形态过程响应       | (55)  |
| 第二节 低速流场的形态过程响应       | (74)  |
| 第三节 基于流场认识的汇流系统分析     | (83)  |
| 第四节 地貌梯度与水文梯度对称       | (90)  |
| 第五章 几个推论              | (99)  |
| 第一节 具有流水起源的锥状喀斯特      | (99)  |
| 第二节 主要发育于第四纪的中国南方喀斯特  | (105) |
| 第三节 不能作为一个发育系统的大流域喀斯特 | (114) |
| 第四节 多种赋存和运动形式的喀斯特水资源  |       |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| .....                     | (121) |
| <b>第六章 喀斯特水文地貌图</b> ..... | (130) |
| 第一节 流域地貌类型及边界的模糊判定.....   | (130) |
| 第二节 底图、主图与符号、注记.....      | (135) |
| 第三节 附图说明.....             | (136) |
| <b>参考文献</b> .....         | (138) |
| <b>英文目录及各章摘要</b> .....    | (149) |
| <b>附图与图版</b>              |       |

## 绪 论

喀斯特水文地貌学(hydrogeomorphology of karst)是一种新的边缘学科理论和方法。八十年代初,一些相关的研究思想便已出现。十多年来,经过国内外喀斯特学者的共同努力,已经形成了自己独特的学科视角,明确的概念体系和清晰的理论内涵。它的创建为我们进一步认识喀斯特营力与形态的更深层关系,解决某些喀斯特难题,提供了一个全新的透镜和一条便捷而有效的思路。

历史上,对喀斯特形态与水流关系的认识可以追溯到19世纪末南斯拉夫学者J. Cvijic的著述(Cvijic, 1893),甚至到17世纪中国大旅行家徐霞客的著述(褚绍唐等, 1980)。但直到本世纪六十年代前后,通过溶蚀动力学的研究,我们才对喀斯特的形成机理有了更深入的认识。此后,喀斯特研究分别沿着地质学,地貌学、水文学和水文地质学几个学科方向发展并取得了很大的成功。1989年, D. Ford 与 P. Williams 合著的《喀斯特地貌学和水文学》、(《Karst Geomorphology and Hydrology》)一书的出版,为80年代喀斯特学的发展水平画了一个完美的句号。

然而,喀斯特水所具有的强化学动力特性(化学侵蚀和化学沉积),使其造貌过程不但发生在地表,而且也发生在地下,喀斯特水的地下赋存、运移空间的特性,无论其起源,尺度还是边界条件,远不是传统水文地质学的“介质”、“含水层”等概念所能概括的;另一方面,由于不同尺度的各种地貌形态同时存在于地



表和地下，而它们往往就是喀斯特水的运移通道，因此，与这些形态相联系的水流无论其动力特性还是化学特性也远不是传统水文学的“地表水”和“地下水”概念所能描述的。由于这些困难的存在，自 80 年代初以来，中外喀斯特学者开始另辟蹊径，从水文与地貌联系的观点对一些特殊的喀斯特现象进行了宏观探索。

1981 年，陈治平等提出预测喀斯特地下水系的“洼地分析法”，把喀斯特地表形态作为识别地下水网的一个标志。同年，J. Gunn 在研究了喀斯特洼地的特殊水文过程后指出，降水通过洼地可转变为地表流，壤中流、皮下流、竖井流、溶管渗流和溶隙渗流等几种赋存空间与动力特性不同的水流成分，即洼地形态是一种水流转换器。1982 年，杨明德研究了喀斯特水赋存的地貌规律性，提出不仅由于水文地质成因会出现喀斯特水富集带，而且由于地貌发育原因也会出现喀斯特水富集面。1983 年，P. Williams 指出，由于形态发育而产生的皮下带对喀斯特水文过程起着重要的作用；1985 年他又进一步阐明皮下水文过程在多边形洼地发育中具有形态起源的意义。这种关于喀斯特地貌形态与水文过程互为因果的认识，是以后喀斯特水文地貌理论进一步发展的一个重要思想来源。1986 年，宋林华讨论了喀斯特地貌演化与喀斯特含水层特性的关系，指出喀斯特地貌演化阶段与一定的喀斯特含水层特性相关联。1991 年，谭明借鉴流域地貌数学模型的思想方法建立了喀斯特水文地貌数学模型，提出“水文地貌”、“开放流域”概念以及地貌势与水文势对称原理，将与同一水文过程相联系的喀斯特开放流域形态作为一个发育系统来研究，发现形态演化与动力平衡在同一水文过程中具有相同时空尺度，表现为流域形态的双层结构，从理论上确立了流域形态的最低势面  $L_m$  面，为后来水文地貌场的研究奠定了基础。1992 年，谭明对贵州一个典型的锥峰干谷系用水道统计方法进行了分析，发现其在水文地貌模型中同时满足 Horton 定律，从而证明了锥状喀斯特

的流水起源;并用水文地貌模型分析了贵州一些坡立谷的成因,指出,流水谷地与峰丛洼地之间的坡立谷是特殊喀斯特水文地貌现象在流域演化过程中的表现。同年,梁虹等分析了利用喀斯特形态参数建立汇流模型的可能性,把常态流域的相应方法推广到喀斯特流域。1992年底,国际专业检索系统《GEOGRAPHICAL ABSTRACTS: PHYSICAL GEOGRAPHY》在其年度索引中将“水文地貌学”(hydrogeomorphology)作为一个独立主题正式收录。1993年,《科学通报》发表了题为“喀斯特水文地貌学——它的历史形成与最新进展”的专题评述(谭明,1993c)。至此,一门独立的喀斯特边缘学科——喀斯特水文地貌学宣告诞生。

在本书中,喀斯特水文地貌学的理论体系是按照结构主义对理论自我满足要求构造的,即一个研究领域要具有能够不向外面寻求解释说明的规律,能够建立起自己说明自己的逻辑结构,并能够将这些结构形式化,作为公式演绎(Piaget, 1968)。建立该理论所采用的方法是利用最方便的物理概念和最简捷的数学语言,按照归纳——演绎的逻辑模式进行推理。地貌学家将地貌研究归纳为对形态的形成历史和形成作用进行研究(Chorley et al., 1984)。喀斯特水文地貌学在这两个方面的研究基础之上,进一步提出过程的研究以及对形态在这个过程中所起的功能作用进行研究。而它的核心思想是用喀斯特水文地貌场的特性说明喀斯特水文地貌系统是一个对称系统,从而证明形态与水流的互可测度性。全书包括理论基础部分(第一章),引论部分(第二章),论证部分(第三、四章)、推论部分(第五章)和图综合表达部分(第六章)。当然,这个体系仅是一种研究方式和写作风格,只是一块引玉之砖。作者希望看到,不久的将来,会有更好的喀斯特水文地貌学理论专著问世。

# 第一章 概念基础

## 第一节 喀斯特水

### 一、喀斯特水界说的困难

按通常水文地质学的定义，喀斯特水指“赋存和运移于喀斯特化地层中的地下水”（王大纯等，1980）或“存在于可溶性岩层的溶蚀空隙中的地下水”（地质辞典，地质出版社，1986）。就是说，都认为喀斯特水是一种地下水。该认识在学术界已成定论，但实际存在几个无法阐释的问题。其一，在喀斯特区，尤其是以管道流和地下河发育为主的中国南方喀斯特区，降水或外源水进入喀斯特化地块或流域后，其在喀斯特化垫面上的滞蓄、径流和排泄，往往由于水文地质条件的改变或地貌发育的原因（谭明，1991）频繁地转变于地表和地下，在这种情况下，地表水和地下水的概念是模糊的。这可用无数实例中的一个简单例子加以说明。图 1.1 是贵阳南明河天生桥顺河纵剖面，若按通常的说法，水流在进入洞腔以前是地表水即不是喀斯特水，进入洞腔后成为地下水即变成了喀斯特水；但当河水流出天生桥后又变成了地表水即又不是喀斯特水。这种模糊概念使得我们无论是以喀斯特水还是

以地表水或地下水来计算水资源都会造成思想上的混乱。在我国某些地方的水资源评价与开发利用中,这也是使资源量计算重复,开发相互干扰的原因(韩行瑞,1993)。其二,喀斯特地表形态,从大到小,从石峰到溶痕的发育,无疑都与喀斯特水动力有关。但如果所有地表喀斯特形态全都解释为地下水的作用(因喀斯特水已定义为地下水),确实是很难理解的,而事实也并非如此。其三,在喀斯特区,某些类型的喀斯特水虽然形式上赋存和运动在地下,但其动力特性、化学特性以及对降水的响应特性与地表河水基本是一致的(中国科学院地质研究所岩溶研究组,1979),因此,其物理和化学内涵不具有通常的地下水特性。

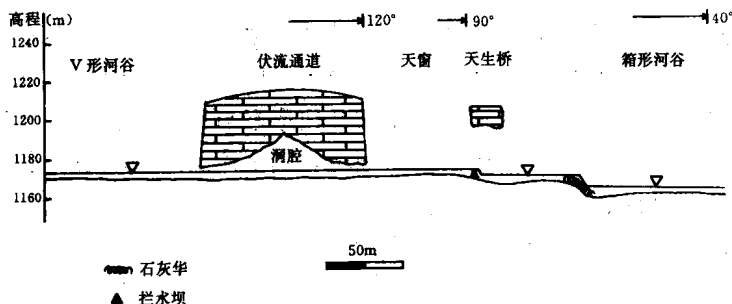


图 1.1 贵阳南明河天生桥纵剖面图

Fig. 1.1 Longitudinal section of the nature bridge on Nanming river near Guiyang

由于“喀斯特水”是难以定义的概念,因此即使是《喀斯特地貌学与水文学》(Ford and Williams, 1989)这样的权威著作,也极少采用这一术语。

## 二、喀斯特水在水文地貌学中的含义

喀斯特水文地貌学是关于喀斯特水流与喀斯特形态关系的一门学科，喀斯特水是这一学科的主要研究对象之一，而且该学科特别关注于喀斯特水流的形态意义。从这点出发，喀斯特水文地貌学提出了自己的“喀斯特水”定义。

喀斯特水是赋存和运移于喀斯特化地块或流域上的水流，它是全空间造貌营力，是对地质实体产生化学和机械作用、不但在地表而且在地下塑造出自身赋存和运移空间的水流。但喀斯特水既不是普通定义的地表水，因为它的行为空间主要在地下；也不是普通定义的地下水，因为它的水运动和水化学特性常常更像地表水（尤其在地下河中）。一方面，喀斯特水流所流经的岩石类型决定其静态化学类型（如  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型或  $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$  型等），另一方面，其动力特性如特殊地下地貌所形成的周期虹吸动力特性（杨明德等，1992b），在很大程度上为自身塑造并赋存和运移其间的喀斯特水通道的空间几何形态与尺度所决定。因为不同形态、不同尺度的喀斯特水通道，其水流的运动状态、运动速度和交换能力截然不同。所以，我们不能离开具体的基质条件和形态约束条件来讨论喀斯特水的定义，但可以有把握地说，喀斯特水是赋存和运移于喀斯特化流域地表和地下全空间，具有岩石和形态双重规定性的水流。对前一种规定性，水文地质学已做了详尽的研究；对后一种规定性，水文地貌学应给出满意的解释。

## 第二节 喀斯特水通道

### 一、通道空间

对喀斯特水的行为空间作统一命名是一件困难的事。在一些裂隙密度较大的白云岩上发育的溶原或溶盆中，喀斯特水较均匀地赋存在第四系松散层下面的岩层中，岩石中的水通道以网状裂隙为主，其容水性、持水性、给水性、透水性与其它均匀状含水岩层相似。在这种情况下，以“含水层”来定义喀斯特水的行为空间是合适的。但在更多的情况下，喀斯特水在喀斯特化地块中或流域上的赋存极不均匀，往往以孤立流的形式运动，因此，水文地质学家也认为在这种情况下用“含水层”这一概念是不恰当的（王大纯等，1980）。

喀斯特水文地貌学采用“水通道”这一普通术语描述喀斯特水的行为空间。这是因为“通道”这一概念可以不受起源、形态、尺度的限制，而喀斯特水通道正是为喀斯特水流所塑造，不但存在于地表、而且存在于地下，水流得以赋存和运移的各种地貌形态——为蚀余形态所围限的蚀出空间（如溶隙、管道、河槽、消水洞等）。喀斯特水通道实际上具有不同于水文地质学中“含水介质”实体的特殊起源，其空间具有形态特性和时间属性两大特点。

由于水流运动受基面变化的控制，因此在构造运动性质不同的地区，不同的基面变化引起不同的水流运动方式，从而导致不同的形态发育倾向。在地貌回春的峰丛化洼地过程中，地表流转变为地下流并发育垂直通道；在地貌均夷的孤峰化夷平过程中，地下流转变为地表流并发育水平通道（谭明，1991，1992）；而在快速下切的喀斯特河谷区，常有周期动态的虹吸通道发育（邹成杰，1993）。另一方面，由于形态发育有一个发生、发展、最终衰亡的历史，因此，喀斯特水通道从理论上说是时空四维的，因为除了它的三维空间形态特性外，它还会随着水流运动状态变化而改变其原有的形态特征以适应新的水动力条件，或因受水流的机械和化学沉积作用而被充填，即喀斯特水通道的空间形态属性不能独

立于时间之外。

## 二、通道边界

毫无疑问,喀斯特水通道的边界在一些情况下就是水文地质边界,即为相对隔水层,或阻水断层等。但水文地质边界对含水层具有普遍意义,而对喀斯特水通道并不具有普遍意义,因为更多的野外实例说明大量的溶蚀裂隙,地下水管道和地下河槽是发育在岩性单一均匀的碳酸盐岩地块中,而蚀余岩体本身就是水通道的边界。这类通道边界所产生的有趣结果之一,即为在排泄基面以上,在同一喀斯特化地层中,位于不同高度的数条邻近水平管道同时发育,如贵州普定喀斯特水试验场老黑潭水文站在中三迭统关岭组  $T_2^{3-1}$  石灰岩层中同时有三条水平通道出流。根据对高差为 0.12m、平距为 45m 的中、下层水的水位动态(图 1.2-a)。和 Ca 离子动态(图 1.2-b)分析,发现它们的水位动态和离子动态具有极大的相似性。这表明它们水源相同,通道结构相同,也说明虽然没有隔水层,但差异溶蚀和侵蚀完全可以在均匀的碳酸盐岩层面裂隙中形成不同的通道空间,而蚀余岩体本身就是通道边界(本书封面照片中的两个水文站即为老黑潭中、下层水文站)。在这类通道中,运动的喀斯特水的动力特性和化学特性具有相似性,其物理机制是排泄基面以上的水流可通过不同的途径向基面汇流,只要这些途径符合重力法则,基面对水流就没有唯一的规定性。实际上,它比我国北方厚层均匀碳酸盐岩层中的双层水位(田开铭,1985。何宇彬,1991)更带普遍性,也更容易理解。

如果通道渗漏(如喀斯特地表河床的渗漏),则意味着有新的通道发育,这时原来的通道边界条件就被破坏了。因此,通道边界一般地说也不能独立于时间之外,同样受制于形态发育。

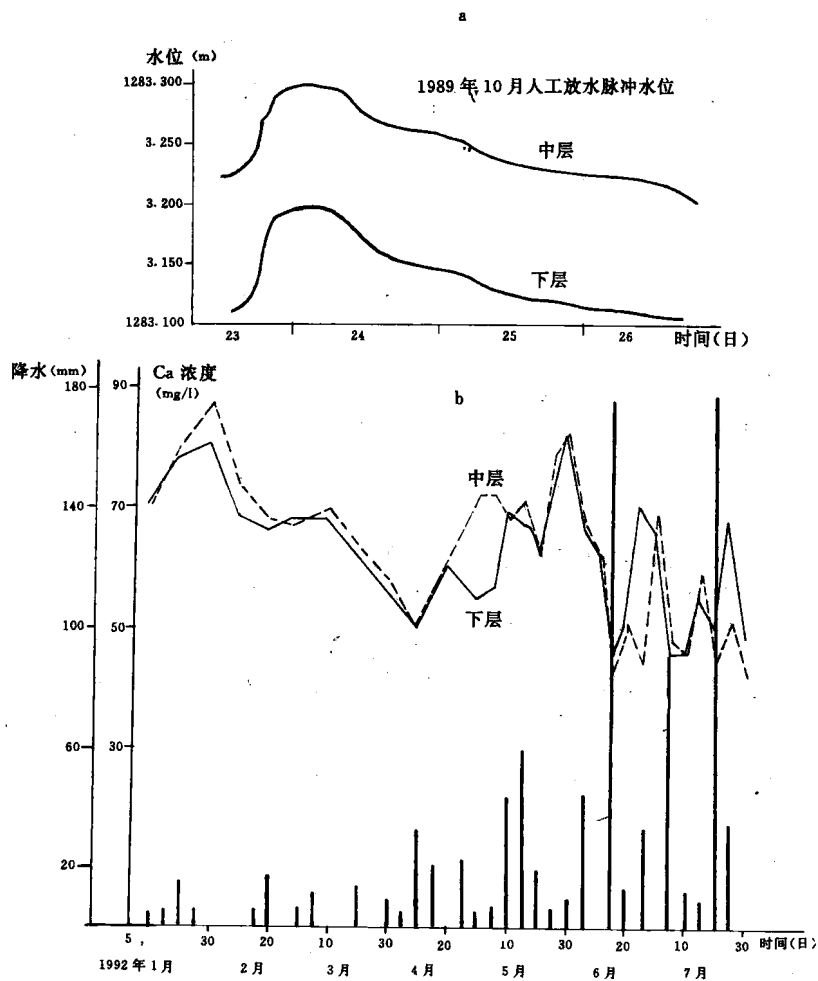


图 1.2 普定试验场老黑潭站中、下层水位动态 (a) 及 Ca 离子动态 (b)  
 Fig. 1.2 Hydrograph and chemograph forms of Laohei Tan Springs in Puding



### 三、通道发育

已经喀斯特化的岩体，其渗透性在有溶蚀通道部位和无溶蚀通道部位的差异当然是不可比拟的。而我们关心的是造成这种差异的初始条件是什么。野外观察说明相同序次的构造裂隙在地质体上通常是等距分布的，但有的裂隙很快就会被溶蚀营力（包括水流作用，生物作用等）打开成为喀斯特水通道，而有的裂隙却

始终紧闭以至于水流只能在包含这些裂隙的碳酸盐岩表面刻蚀出流水沟。我们假设前者是张性裂隙而后者是压性裂隙，但这并不是最后的答案。用石膏板所做的洞道形成试验（Waterman, 1975; Ewers, 1982）是均匀物质被压力水作用的结果。而被多期构造应力作用过的碳酸盐岩块体可能并不完全按照这个实验所表达的模式去接纳水流。然而相当多的实际例证表明具有汇流功能的喀斯特水通道的确是首先由具有一定压力的上游水头将开张较好的裂隙自上而下打开而形成的。

与地表喀斯特溶蚀形态的规模受制于裂隙尺度一样（即溶痕不可能进一步发育为溶沟，溶沟也不可能进一步发育为溶槽），水通道发育的另一个重要的限制因素是原生裂隙的尺度。深长的裂隙可以发育出大规模的水通道，细小的裂隙只能发育小规模的水通道。而既然紧闭的裂隙尚且不能被溶蚀打开，则完整的岩块将会长期作为通道边界存在。

### 第三节 参考基准

控制喀斯特发育的基准是多样的（张英骏等，1985）。在喀斯特水文地貌学中，基准首先是控制一定区域水流运动的一个空间