

专题评述

喀斯特水文地貌学

——它的历史形成与最新进展*

谭 明**

(南京大学大地海洋科学系, 南京 210008)

喀斯特水文地貌学 (hydrogeomorphology of karst) 作为一种新的边缘学科方法, 经过 80 年代初一些相关研究思想的提出, 以及近十年来国内外喀斯特学者的共同努力, 已经初步形成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、解决某些喀斯特学难题, 将能提供一个全新的透镜和一条简捷而有效的思路。

1 学科方法的历史形成

历史上对喀斯特形态与水流的关系认识可以追溯到 19 世纪末南斯拉夫学者 Cvijic 的著述^[1], 甚至 17 世纪中国大旅行家徐霞客的著述^[2]。但直到本世纪 60 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深刻的认识。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, Ford 与 Williams 合著的《喀斯特地貌学与水文学》一书的出版^[3]为 80 年代喀斯特学的发展水平画了一个完美的句号。然而, 由于喀斯特水具有化学动力特性(化学侵蚀和化学沉积), 使得其造貌过程不仅发生在地表, 而且更多地发生在地下。因此, 喀斯特水在地下赋存、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”^[4], 把喀斯特地表形态作为识别地下水网的一个标志。该方法在以后的野外勘察中得到了应用并取得了一些成果。同年, Gunn 研究了喀斯特洼地的特殊水文过程^[5], 指出降水通过洼地可转变为地表流、壤中流、皮下流、竖井流、快速渗流和慢速渗流等几种动力特性不同的水流成分。1982 年, 杨明德

1992-12-10 收稿, 1993-07-14 收修改稿。

* 贵州省教委自然科学基金资助项目。

** 参加此项研究工作的还有杨明德、梁虹、李婷。

研究了喀斯特水赋存的地貌规律性^[6]指出,不但由于水文地质原因会出现喀斯特水富集带,而且由于地貌发育原因会出现喀斯特水富集面。1983年,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控制作用^[7],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^[8]。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^[9],认为喀斯特地貌的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^[10],提出“水文地貌”概念和“开放流域”概念,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两个过程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;并提出地貌势与水文势对称的原理,确立了流域形态最低势面 L_m 面,为以后水文地貌场的研究奠定了基础。1992年,水文地貌学(hydrogeomorphology)一词作为一个主题为国际专业检索系统 GAPG 正式收录^[11]。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^[12],把常态流域的相应方法^[13]推广到喀斯特流域;同年,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^[14],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^[15],指出这种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。于是,作为一种区别于传统水文学、地貌学、水文地质学研究方法的喀斯特水文地貌学方法逐步形成。

2 理论研究的最新进展

喀斯特地貌与喀斯特水文是喀斯特现象最重要的两个方面。上述研究线索向我们展示了中外喀斯特学者从水文学角度阐明喀斯特形态的起源和发育,同时也从地貌学角度阐明喀斯特水流的形成和规律所作的努力。目前,在国家自然科学基金和贵州省教委自然科学基金的资助下,在所有上述研究的基础上,通过典型样本分析,我们已建立起具有自身概念体系、方法论基础和应用目标的喀斯特水文地貌耦合系统理论框架¹⁾,采用“分形系数”、“势对称”、“梯度对称”、“场转换”等概念和方法将一些实际的水文地貌系统处理为简单线性系统,为进一步全面、深入地研究该系统的结构、过程和关联特征提供了多个支撑点。当国外喀斯特学者正开展对多边形喀斯特以水文地貌学思想研究其水流与形态的确定性关系时²⁾,我们同时提出了中国锥状喀斯特区的水文地貌场特性、喀斯特开放流域特性等,使我国的喀斯特水文地貌学理论位于学科研究的前沿。

2.1 对喀斯特水流特征的认识

一般地说,喀斯特水是赋存和运移于喀斯特化岩体中的水流。但喀斯特水既不是普通定义的“地表水”,因为它的赋存空间主要在地下;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象地表水(如在地下河中)。这是由于喀斯特水流是全空间造貌营力,是对地质实体(岩石、构造)产生积极的化学和机械作用,不但在地表而且在地下塑造出自身赋存、运移空间的水流。因此,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

1) 谭明等,典型地区喀斯特水文地貌耦合系统——理论、方法及应用研究,1992年11月第三届全国喀斯特地貌与洞穴学术讨论会大会报告,地理学报(待刊)。

2) 据 Williams 私人通信,1992年10月。

Ca 型或 Mg 型等);另一方面,其动力特性(如间歇流特性)和动态化学类型(如饱和或不饱和)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确定。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一般地讨论喀斯特水流特征。但我们可以有把握地说喀斯特水流是具有岩石和形态双重规定性的水流。对前一种规定性,水文地质学已作了详尽的研究;对后一种规定性,水文地貌学应给出满意的解答。

2.2 对喀斯特形态特征的认识

喀斯特形态为喀斯特水流所塑造,不但存在于地表,而且存在于地下。喀斯特水溶蚀、侵蚀所塑造的水流得以赋存和运移的地表、地下负地貌形态——为蚀余形态所围限的蚀出空间(如为岩壁所围限的溶隙、管道、洼地中的消水洞等)是喀斯特水流通道的。据现有资料表明,喀斯特水流通道的横截面线性尺度为 10^{-3} — 10^2 m 数量级。它与传统水文地质学中内涵为原生孔隙、非溶蚀成因裂隙等先于地下水存在,且基本不随地下水作用而扩大的地下水介质概念有起源和尺度的根本差异。对于某些较复杂的通道空间(如喀斯特虹吸周期泉)其主要形态特征和水动力响应,我们已能在实验室进行概括和模拟^[16]。蚀余岩体是水流的约束边界,可溶岩能否渗漏(这时边界消失)取决于形态发育阶段,而水文地质意义的隔水层在高水头的不断作用下也会被击穿。因此,隔水边界概念不能独立于时间。

2.3 对喀斯特水流与形态关系的认识

喀斯特水流的一些特征现象如分布极不均匀等实际上与其形态规定性有关。我们已很难再用“含水层”概念真实地描述喀斯特水流的赋存和运动。在这种情况下,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。

喀斯特流域中,所有形态特征值(如峰顶高程、垭口高程、洼底面高程等)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流域互为因果,而在流域形态结构中对流域水运动作出明确响应的形态标量场是最低势面 L_m 面^[10,14],根据地貌势与水文势对称原理^[10],我们可将 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界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¹⁾,从而证实了喀斯特流域的开放特性^[10]。

3 对未来研究方向的展望

两个不同学科的理论、方法相互交融、彼此结合,不但能开拓新的研究领域而且促进了科学的共同发展。喀斯特水文地貌学着重研究水流与形态在喀斯特流域上的联结关系,一方面,揭示了喀斯特小流域的系统发育特征,已在理论上解决了喀斯特地貌类型间的关系^[17];另一方面,阐明了喀斯特大流域的非系统发育特征^[18],从而对中国南方喀斯特发育时限的传统认识提出了质疑,预示了喀斯特的第四纪地质研究方向。

1) Tan Ming, A sample of karst open catchment identified with hydrogeomorphology method Poster to Third International Geomorphology Conference.

根据对国内外实际资料的分析,喀斯特小流域或汇水块段的地貌梯度(地势的空间改变率)与水文梯度(流量的时间改变率)具有线性对称的特征。进一步分析这种关联特征与流域大系统的制约关系,可望建立用喀斯特地貌信息推测喀斯特水文过程的有效方法。

喀斯特水文地貌学还应进一步研究水文记录中的流量平台与地下库容结构的关系问题,溶隙网汇流与坡面汇流是否等效的问题,流量上升段微动态与喀斯特化垫面产流特性的关系问题。

利用地表地下各种天然库(洼地和洞穴)对水资源进行调蓄以解决喀斯特水时空分布不平衡,是具有重大社会效益和经济效益的实践。这类工作现在已有很多成功的实例。喀斯特水文地貌学应对此作系统总结,以丰富自己的理论并提高其实用价值。

4 结 语

一般而论,宏观喀斯特现象是特定的垫面材料(岩石-构造)对一定环境动力(气候-水文)的响应。因此,地貌学将水流作为形态塑造的动力源,水文学和水文地质学将水流作为认识流域或地下结构的信息源。但由于形态是气候-水文动力在地质时间尺度内长期作用的结果,而作为一种边界条件短期内形态对水流具有确定的规定性,所以,水文地貌学进一步将形态作为水流形成的动力源和识别的信息源,这是水文地貌学的主要特点。与利用 Horton 定律建立地貌瞬时单位线^[19,20]的常态流域相似,喀斯特水文地貌学的理论方法也建立在对流域形态结构的定量分析基础之上。

参 考 文 献

- [1] Cvijic, J., *Geog. Abhandl. Wien*, 1893, 5(3): 218—329.
- [2] 徐宏祖,徐霞客游记,上海古籍出版社,1980,182.
- [3] Ford, D. C., Williams, P. W., *Karst Geomorphology and Hydrology*, Unwin Hyman Ltd., London, 1989, 601.
- [4] 陈治平、顾钟熊、林钧枢等,地理集刊(第13号),地貌,1981,62—72.
- [5] Gunn, J., *Z. Geomorph.*, 1981, 25(3): 313—331.
- [6] 杨明德,中国岩溶,1982,1(2): 81—91.
- [7] Williams, P., *Journal of Hydrology*, 1983, 61(1/3): 45—67.
- [8] Williams, P., *Z. Geomorph.*, 1985, 29(4): 463—482.
- [9] 宋林华,地理研究,1986,5(4): 68—77.
- [10] 谭明,地理学报,1991,46(4): 460—469.
- [11] Clayton, K., *Geographical Abstracts: Physical Geography, Annual Index*, Elsevier, 1992, 377.
- [12] 梁虹、杨明德,贵州师范大学学报(自然科学版),1992,10(1): 10—17.
- [13] Rodriguez-Hurbe, I., Valdes, J. B., *Water Resources Research*, 1979, 6(15): 1409—1420.
- [14] Tan Ming, *Z. Geomorph.*, 1992, 36(1): 37—51.
- [15] 谭明,中国岩溶,1992,11(2): 149—154.
- [16] 杨明德、谭明,中国岩溶,1992,11(2): 141—147.
- [17] 宋林华,地理学报,1993,48(3): 286—287.
- [18] 谭明,中国岩溶,1993,12(2): 103—110.
- [19] Valdes, J. B., Fiallo, Y., Rodriguez-Hurbe, I., *Water Resources Research*, 1979, 6(15): 1421—1434.
- [20] Rodriguez-Hurbe, I., Deroto, G., Valdes, J. B., *Water Resource Research*, 1979, 6(15): 1435—1444.