Vol. 20 No. 4 Dec. 2001

文章编号:1001-4810(2001)04-0269-05

路南石林喀斯特流域水文特征初探^①

梁 虹,杨明德,彭 建,程 星,王在高

(贵州师范大学资源与环境科学系,贵阳 550001)

摘 要:本文运用水文地貌系统耦合分析的方法,对路南石林喀斯特流域水文特 征进行了探讨,对喀斯特完全入渗式流域和完全漏渗式流域的特性进行了初步研 究,揭示了侵蚀基面的变化对流域地表地下水系结构的影响,认为石林发育区水 文特征有其自身的特点。

1 问题的提出

收稿日期:2001-07

- 29

路南石林位于云南省昆明市东南部,是世界著名 的石林喀斯特地貌典型区,由于其发育规模大、形态 类型多、成因机理及演化过程复杂而倍受国内外喀斯 特学者的关注,特别是在石林风景管理处的大力支持 下,路南石林成了近年来世界喀斯特研究的热点之 一。可以认为,峰林溶原、峰丛洼地和石林喀斯特是世 界湿热带三大地表喀斯特地貌。

早在 20 世纪 30 年代,我国学者就对路南石林进 行了研究^[1],并在随后的半个多世纪,国内外学者分 别就与路南石林发育相关联的地质、地貌、溶蚀、洞 穴、环境变迁等进行了广泛深入的研究,出版和发表 了大量的有关论文^[2~10],但对于石林喀斯特流域的 水文地貌结构,流域的汇流过程特性等研究相对较 少,石林喀斯特流域的水文地貌响应过程与峰林溶 原、峰丛洼地喀斯特流域的水文地貌响应过程是否存 在差异还未见及报道。1997 年石林研究组发表了《中 国路南石林研究》专著^[11],其中对路南石林区地下水 系结构进行了系统研究,1998 年云南地理研究所和 斯洛文尼亚喀斯特研究所发表了《South China Karst》专著^[12],其中对路南石林区水文也进行了系 统深入的研究,特别是通过地下连通试验,很好地揭 示了地下水体运动路径特征和地下水系结构。

本文从喀斯特流域水文地貌系统的角度,以流域 水文和地貌耦合分析为基础,探讨路南石林喀斯特流 域水文地貌空间趋势与水系发育的关系,利用天生关 大坑崖断面实测的长期观测水文资料以及黑龙潭实 测径流特征值等资料对路南石林喀斯特流域水文特 征进行分析,并与其它喀斯特地貌类型的水文特征进 行对比研究。

2 自然地理特征

路南石林喀斯特流域位于南盘江支流巴江的上 中游地带,以路南县城处巴江河流断面计控制流域面 积约 471km²,以巴江下游黄家庄水文站(控制面积 772km²)计,年径流系数为 0.48。该流域属北亚热带 季风气候,具有冬暖夏凉、四季如春的特点。年平均气 温 15.6C,多年平均降雨量 946mm,最大日降雨量 可达 135mm 以上。流域干湿季分明,雨季集中在 5 ~ 10月,11月至次年 4 月为旱季。

区域构造上位于扬子准地台西南缘滇东台褶带 西南隅,曲靖台褶束—牛头山隆起之西南端,夹持于 师宗—弥勒断裂与小江断裂之间,东侧为华南褶皱系 之滇东南褶皱带,西侧为川滇台背斜。构造变形以破

① 基金项目:石林研究基金项目(No. 200007)和国家自然科学基金项目(40061001)资助,研究生焦树林、马文翰参加部分计算,石林风景管理处给予了大力支持; 作者简介:梁虹(1959-19),男,教授,1985年陕西机械学院工程水文及水资源专业硕士研究生毕业。

裂折断变形为主,褶皱次之。构造线主要为南北向及 北东一南西向。出露地层主要是下石炭系、下二叠系 的碳酸盐岩和老第三系砂砾岩、泥岩,及少量零星分 布的二叠系峨嵋山玄武岩和寒武系。

本流域海拔高度在 1800~2000m 间,地势东高 但起伏较小,西低但起伏稍大,以剥夷面遭受解体的 缓丘洼地为主,剥夷面上残留一定厚度的红色风化 壳,且洼地、盆地、溶丘、石林、石牙、喀斯特湖和溶洞 分布普遍。地表水网和地下水网交替分布,水系自东 向西和西南方向汇集,但由于巴江自南向北的溯源侵 蚀,使流域内地表水系开始解体,而向地下水系转化 和发育(图1)。



图 1 路南石林喀斯特流域结构图 Fig. 1 The karst drainage basin in Lunan stone forest

3 石林喀斯特流域水文结构

路南石林喀斯特流域地处滇东南盘江上游巴江 支流上中游区起伏不大的高原剥夷面上,由于碳酸盐 岩的大范围出露和巴江溯源侵蚀,使地表水漏陷化强 度增大,地表水系解体,地下水系加强。地下水系单元 多,埋藏浅,规模小,与发育在深切峡谷两侧大斜坡地 带喀斯特峰丛洼地流域埋藏深且规模大的地下水系 形成鲜明的对比,从而形成了平缓分水岭型地下水系 的水文结构特征。

长期以来人们对地下水系结构的认识大多采用 水文地质学方法中的钻孔勘测和连通试验途径加以 研究。1981年陈治平等提出了识别地下水系的"洼地 分析法"^[13],把喀斯特地表形态(洼地底部高程沿地 下径流方向的变化)作为识别地下河的一个标志,

-万方数据-

① 梁虹,姚思勇.贵州龙宫喀斯特流域水文地貌空间趋势分析.1991.

1991 年谭明建立了洼地高程沿径流方向的统计数学 模型^[14],同年,笔者完成了洼底高程和峰顶高程在三 维空间流域的耦合分析,并建立了统计数学模型^①, 较好地揭示了地表水系演化与地下水系之间的关 系^[15]。

为了有效揭示石林喀斯特流域地表特征与地下 水系的关系,本文仍采用流域水文地貌系统的耦合分 析方法,利用1:10000 地形图量测路南石林喀斯特 流域内各微小单元(以 1km² 为一个单元)的地面最 高高程和最低高程,并建立流域这两个地貌特征高程 的统计数学模型。由喀斯特流域水文地貌学我们可以 知道,微小单元最低高程往往是洼地的底部高程,最 高高程往往是石峰的峰顶高程。因此,最低高程的空 间变化常常反映现代地下水系的空间结构,最高高程 的空间变化又常常代表过去地表水系的空间特征。根据地形图量测资料首先计算出各特征高程一次空间 趋势面方程为:

最高高程:z1=1722.88+9.89x+2.583y

最低高程: z_2 =1669.48+10.00x+2.869y

由此空间趋势面方程作投影如图 2 所示。从图 2 可以看出,最高高程趋势面倾向为 SWW 255.37°,而 最低高程趋势面倾向为 SWW 253.88°,与最高高程 趋势面相比,最低高程趋势面向南旋转了 1.49°。这 充分地说明了过去路南石林流域水体总体上是由东 向西及西南方向运动,以后受巴江下游由南向北溯源 侵蚀的影响,路南石林喀斯特水系进一步开始向南偏 转运动。这种水系的演化首先在地下水系的结构中得 到反映,然后逐步使地表水系漏陷化:洼地开始发育, 地表水系开始解体,斗淋(Doline)大量出现,高原剥 夷面逐渐向喀斯特浅丘洼地转化,像清水塘、黑龙潭 以东的地貌就具有这种特征。又如从流域的闭合性来 看,地处路南石林喀斯特流域下游西南角的黑龙潭喀 斯特泉域其地表控制面积仅 2 km²,地下控制面积达 175km²,径流模数 17.68 l/s · km²,形成了典型的非 闭合型盈水流域;而地处上游东北角的大坑崖地下河 流域其地表控制面积约 25 km²,根据控制断面 1993 - 1995 年三年实测水文资料分析,径流系数高达 0.7,径流模数为 16.81 l/s · km²,故认为大坑崖地下 河流域为闭合型的平衡流域。可见流域的不闭合或水 量的不平衡程度是由西南向东北推进的。通过以上流 域特征高程空间水文地貌系统的耦合分析,较好地揭 示了流域水系的演变趋势。





4 大坑崖地下河喀斯特流域水文特性

大坑崖地下河流域位于路南石林喀斯特流域上 游平缓分水岭地带剥夷面上,地下水埋藏浅,石林发 育程度相对较弱,地表水系不发育,出露地层主要为 下石炭统碳酸盐岩,地貌以溶蚀浅洼地为主,地形起 伏不大,流域控制面积约 25 km²,降水通过大量的地 表浅洼地以及从一些覆盖有残积红土的地表沿垂直 裂隙渗漏入地下,汇集于大坑崖地下河测流断面,其 流域类型基本上为完全入渗式闭合型平衡流域。

为了揭示大坑崖裸露喀斯特地下河流域的降水 与径流的响应关系,根据路南县水电局实测三年 (1993-1995年)水文资料,计算了日降雨与日径流 的互相关函数值(表 1),其最大互相关函数值的滞时 为1天,说明此流域漏陷化强度较大,具有我国南方 力力数据 同流域尺度喀斯特峰丛洼地气象水文型暴雨洪水特 点,而对于贵州普定冒水坑地下河出流,由于地表存 在大量的漏斗竖井,日降雨和日流量的互相关函数值 是当滞时为0时达到最大(见表2)。

另外,大坑崖地下河流域除 1995 年 9 月 30 日由 普定县水电站观测计算的日平均最大流量达 6.28m³/s(本场暴雨最大日降雨量仅 45mm,估计观 测计算有误)外,1993 年至 1995 年三年中十几场最 大日降雨量在 55~75mm 的暴雨洪水最大实测洪峰 流量都在 4.2m³/s 左右(见图 3),说明流域地下地貌 形态结构(非岩石的含水介质结构)对不同的降水存 在不同的阈值,并且形成的洪水过程由上部不对称的 三角形尖峰过程和下部平缓出流过程迭加组合;而喀 斯特峰丛洼地小流域当降雨超过阈值时,洪水过程的 上部常表现为近似对称的三角形洪峰^[16]。洪水过程 表 1 大坑崖地下河流域降水量与径流量互相关函数值

Tab. 1 Mutual-correlation coefficient of runoff and precipitation in the Dakengya underground river basin

滞时(天)	$R(\tau)$								
0	0.247	6	0.218	12	0.094	18	0.199	24	0.197
1	0.528	7	0.153	1	0.096	19	0.179	25	0.239
2	0.338	8	0.124	14	0.133	20	0.177	26	0.200
3	0.261	9	0.111	15	0.152	21	0.223	27	0.143
4	0.237	10	0.088	16	0.101	22	0.215	28	0.154
5	0.223	11	0.106	17	0.129	23	0.208	29	0.131

表 2 冒水坑地下河流域降水量与径流量互相关函数值(据詹炳善,1991)

Tab. 2 Mutual-correlation coefficient of runoff and precipitation in the Maoshuikeng underground river basin

滞时(天)	$R(\tau)$								
0	0.389	6	0.246	12	0.123	18	0.128	24	0.106
1	0.256	7	0.195	1	0.150	19	0.124	25	0.135
2	0.274	8	0.190	14	0.130	20	0.137	26	0.104
3	0.180	9	0.139	15	0.115	21	0.145	27	0.088
4	0.129	10	0.116	16	0.121	22	0.111	28	0.072
5	0.123	11	0.095	17	0.136	23	0.115	29	0.069



图 3 1994 年 6—8 月大坑崖地下河实测洪水过程(每隔 6 小时观测一次)

Fig. 3 The hydrograph of the Dakengya underground river from July to August, 1994

的这种差异,说明天生关这种完全入渗型喀斯特溶原 浅洼地流域与类似于贵州普定冒水坑地下河这种完 全漏渗型喀斯特峰丛洼地流域在导水结构上还有一 定的差异,因为在典型的峰丛洼地流域中,常发育有 规模较大的漏斗竖井,这种导水极强的漏斗竖井能快 速排泄来自地表坡面流的洪水,在峰后形成快速的退 水,形成地貌形态结构流^[17]。

我们将大坑崖地下河观测断面实测洪峰后的消 退流量过程点绘在半对数坐标图上,可以看出有很典 型的三段直线退水过程(图 4),但与贵州水城箐口喀 斯特峰丛洼地暗河出口的实测流量过程相比(图 5), 第一亚动态退水系数为 0.28,较箐口的小,而第二、 三亚动态退水系数则二者属同一数量级,从而说明石 林喀斯特流域地貌形态结构对洪水的调蓄较峰丛洼



图 4 大坑崖地下河消退的流量过程

Fig. 4 The recession curve of discharge in the Dakengya underground river







地大,而岩石的含水介质结构效应差异不大。

5 结 论

(1)巴江由南向北溯源侵蚀极大地影响了路南石林喀斯特流域的水系结构及演化方向,使滇东平缓 岩溶高原剥夷面上的地表水系逐渐解体,洼地及地下水系开始发育。

(2)完全入渗式的喀斯特石林流域与完全漏渗 式的峰丛洼地流域具有不同的水文特征,由于后者具 有大型的漏斗竖井结构,第一亚动态的退水较前者更 快,而第二、三亚动态的退水则与峰丛洼地属同一数 量级,说明地貌形态结构流和含水介质结构流对洪水 过程的组成都是有影响的。

(3)流域地貌特征高程的空间趋势面分析能较 好地揭示地表水系与地下水系之间的演化关系。

参考文献:

- [1] 马希融. 云南石林地形学上初步之观察[J]. 理科论丛, 1936, 1(1).
- [2] 中国科学院地质研究所岩溶研究组.中国岩溶研究[M].科学出版社,1979.
- [3] 俞锦标,王雪瑜,王宗汉.路南石林形成时代及古地理环境的初步分析[J].南京大学学报,1983,(2).
- [4] **张寿越. 路南石林发育及其演进[J]. 中国岩溶**,1984,3(2).
- [5] 王富昌,李忠德,耿弘,等.中国路南石林开发历史初考[A].喀 斯特与洞穴风景旅游资源研究[C].地震出版社,1994.
- [6] Song Linhua. Origination of stone forest in China-International [J]. Journal of Speleology 1986,15(1-4).
- [7] Chen Zhiping, Song Linhua and M. M. Sweeting. The pinnacle karst of the Stone Forest, Lunnan, China; an example of a subject karst[A]. In: K. Paterson and M. M. Sweeting. New Directions In Karst., Geo Books[C]. 1986.
- [8] Song Linhua, Wang Fuchang. Lunnan Shilin Landscape in China[A]. Proceedings of 12th International Congress of Speleology. Vol. 1, Symposium[C]. LaChaux-de-Fonds, 1997.
- [9] 梁福源,宋林华,王富昌,等.路南石林地区土壤空气中 CO₂ 浓 度分布规律与土下溶蚀形态研究[J].中国岩溶,2000,19(2).
- [10] 刘宏,黄楚兴,周燕.云南石林洞穴发育特征初析[J].云南地理 环境研究,2001,(1).
- [11] 云南石林研究组.中国路南石林喀斯特研究[M].云南科技出版社,1997.
- [12] Chen Xiaoping et al. South China Karst [M]. ZRC SAZU, 1998.
- [13] 陈治平,等. 预测岩溶地下水系的洼地分析法[A]. 地理集刊. 13 号(地貌)[C]. 1981.
- [14] 谭明.贵州喀斯特水文地貌模型及其应用初步研究[J].地理学报,1991,(4).
- [15] 彭建,梁虹,王剑.后寨喀斯特流域水文地貌耦合分析[J].贵州 师范大学学报,2000,(2).
- [16] 杨明德,谭明,梁虹.喀斯特流域水文地貌系统[M].地质出版 社,1998.
- [17] 梁虹,杨明德.喀斯特流域水文地貌系统汇流分析——以喀斯 特峰丛洼地谷地流域为例[J].中国岩溶,1995,14(2).
- [18] 何宇彬,等.中国喀斯特水[M].同济大学出版社,1998.

THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE KARST BASIN IN LUNAN STONE FOREST

LIANG Hong, YANG Ming-de, PENG Jian, CHENG Xing, WANG Zai-gao (Department of Resource and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: The authors probe into the hydrological characteristics of the karst basin in Lunan stone forest by means of the coupling analysis of hydrologic and geomorgraphic systems. Some karst properties of the completely permeating basin and completely leaking basin are studied. And the effect of the change of erosional level on the surface and underground river systems is revealed. Finally it is concluded that the hydrological characteristics in stone forest is unique.

Key word 新方数据 stone forest; Karst basin; Hydrological characteristics