

西南喀斯特山区三水转化与 水资源过程及合理利用

王腊春, 史运良

(南京大学城市与资源学系, 江苏 南京 210093)

摘要: 中国西南喀斯特山区由于地质背景和地貌结构的特殊性, 致使三水转化与水资源形成过程不同于非喀斯特山区。文章探讨该区三水转化机理、水资源补给方式和形成过程, 得出喀斯特流域对于相同或相似降雨过程的响应, 不同的流域结构决定了补给方式、三水转化、径流调蓄和输移特征。提出喀斯特山区水资源合理利用模式应按照因地制宜、因土制宜、因水制宜及因需制宜原则, 采用以小微型为主的水资源开发利用模式, 实施分散拦蓄、分散供水, 以化整为零方式解决喀斯特山区的整体性干旱缺水。

关键词: 喀斯特山区; 三水转化; 水资源合理利用

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2006)02-0173-06

广义水资源是指地球水循环中可供生态环境和人类社会利用的淡水, 其补给来源是大气降水, 赋存形式是地表水、土壤水和地下水^[1]。狭义水资源是指河川径流, 目前多数国家对水资源的界定以河川径流为代表, 其中包括浅层地下径流。中国采用河川径流量与地下径流量相加, 并扣除两者重复计算部分, 作为水资源总量^[2]。

河川径流是气候降水过程与流域下垫面综合作用的水文物理过程。其过程表示流域由降水作为总补给源的坡面流、壤中流及浅层地下径流的时序组合和水资源的时程分布。不同特性的流域对于同样降水过程有着不同的响应, 即反映出不同特征的水资源过程。西南湿润地区的喀斯特峰丛山区的水资源过程, 是峰丛山区流域降雨过程与喀斯特流域特殊的下垫面综合作用的水文物理过程, 不同于相同气候下的非喀斯特流域。峰丛山区的地质背景和地貌结构决定了流域下垫面的特殊性。

1 地质背景

西南喀斯特峰丛山区以连座锥状峰丛——洼地、峡谷为主要地貌类型景观, 主要分布在长江、珠江上游的桂、黔、滇、川、渝及湘的山区, 以云贵高原为主体, 贵州为核心, 分布面积约 $55 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[3]。云贵高原自中新世以来的间歇性抬升, 形成大娄山

期 and 山盆期二级夷平面^[4]。地壳抬升作用, 形成叠置地形, 加速喀斯特的垂向作用, 地表、地下水系发育及其相互袭夺, 长江、珠江上游众多支流水系强烈下切, 使云贵高原为峡谷所分割的不连续高原面。喀斯特作用的间歇性和继承性, 发育了连片分布的峰丛山区, 形成独特的喀斯特地貌组合类型和地表、地下水系格局^[5]。

2 喀斯特流域功能特征

以贵州为核心的西南喀斯特峰丛山区属于高原喀斯特和山原喀斯特类型区, 主要分布于大江、大河主要支流的分水岭区, 形成众多面积不等的喀斯特小流域。其对雨水、地表及地下水的三水转化的功能和水资源过程调控均有别于非喀斯特流域。其功能特征如下。

2.1 流域非闭合性

流域闭合程度取决于边界条件, 而边界条件则受控于岩性和构造。喀斯特流域碳酸盐岩层不同组合, 形成非均匀、透水性能不一的含水介质, 加之复杂的构造和断裂, 使地表分水岭和地下分水岭不重叠一致, 甚至随来水量大小而发生迁徙, 从而导致流域的非闭合具有普遍性, 而且流域面积越大, 其闭合性越差。流域闭合性影响着水资源补给来源的多少。

收稿日期: 2004-12-16 修订日期: 2005-04-09

基金项目: 国家科技部“西部开发”重大基金项目(批准号: 2003BA901A12)。

作者简介: 王腊春(1963-), 男, 江苏金坛人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源方面的科学研究。E-mail: wang6312@263.net.cn

2 2 流域含水介质

喀斯特流域含水介质有三类,一为喀斯特发育最为强烈的石灰岩组成的含水介质,以发育管道为主;二是喀斯特发育较弱的白云岩组成的网状裂隙为主的含水介质;三是由岩性不一的可溶岩发育的管道和网状裂隙共同的含水介质。不同含水介质的空间结构控制三水转化和水资源形成过程。发育于含水介质中的地下河常为中小径流的输移通道,地表河仅为雨季暴雨时的排洪通道。

2 3 流域的二元三维空间结构系统

喀斯特流域由可溶岩组成的非均匀含水介质,构成了特有的二元三维流域空间系统^[6],该系统在岩性和构造控制之下,由水流的差异溶蚀和侵蚀作用产生的地表、地下两子系统组成。地表子系统主要由溶沟、溶隙、石芽、峰丛、天窗、漏斗、溶水洞及溶洼等组成;地下子系统主要由溶洞、管道、伏流及地下河等组成。地表是喀斯特径流的形成场和分配场,地下是喀斯特径流的输移场和调蓄场。最终由地表河或地下河以较大落差流入峡谷河流,如贵州的南北盘江、红水河、清水江及乌江等汇集喀斯特径流流出山区。喀斯特流域二元三维空间结构系统特征,表征了流域下垫面的“三维”立体性,不同于非喀斯特流域的下垫面的“平面性”。

3 雨水、地表水及地下水的三水转化

喀斯特流域三水转化受控于流域空间结构系统。西南峰丛山区的众多中小流域,大多为峰丛洼地地貌景观,详分有峰丛洼地、峰丛谷地和峰林盆地组合类型区。据在贵州普定岩溶试验站多年研究^[7],峰丛洼地多为裸露型喀斯特,峰丛谷地和峰林盆地仅形态不一,同属覆盖型喀斯特,以峰丛谷地组合型代之(图 1)。

3 1 峰丛洼地组合类型区

土层覆盖范围及厚度均小,基本上为裸露喀斯特区,其垂直剖面上有 3 个主要水文作用带^[8]:即皮下带、渗流带和管流带,各具不同水文特性;皮下带发育于包气带上部;渗流带位于包气带下部,皮下带之下,管流带之上;管流带为地下河系的组成部分,同落水洞、漏斗和溶隙相通,为地下径流的排泄通道。上述 3 个水文作用带,在降雨过程中对雨水起不同的分配和调蓄作用。当雨水降落地表后,皮下带入渗能力大,大部分雨水渗入该带;只有出现暴雨时,部分超渗雨水沿坡面侧向运动,形成坡

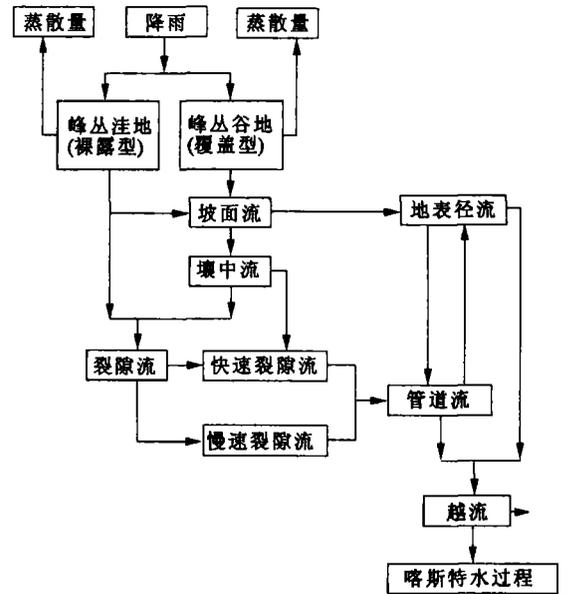


图 1 西南喀斯特峰丛山区水资源过程

Fig 1 Formation processes of water resources in karst mountainous area in Southwest China

面流,直接向洼地内落水洞或漏斗汇集注入,以集中方式补给地下河。渗入皮下带的水量中,满足该带持水量后,剩余水量中部分水量继续向下部渗流带供水入渗;部分水量形成侧向流动皮下带流,流速较快称为快速裂隙流。如遇该带不发育地段,常溢出地表成泉,同坡面流一起流入落水洞或漏斗,补给地下河。渗流带常在饱和状态,水量损失极小,渗漏水沿垂向裂隙、节理缓慢地向管流带渗漏,称为慢裂隙流。当雨强度很大时,形成大量超渗坡面流,洼地内漏斗,落水洞消水不及,出现积水,此时补给水流具有承压性质。当超渗坡面流补给地下河道水量过大,其补给强度超过裂隙流补给的强度时,管道迅速充水,可临时反补给管壁周围的裂隙;雨止或雨强小时,管道流泄出部分水量,裂隙流补给管道,形成管道流和裂隙在雨洪过程中相互补给和交换过程。雨后,贮蓄在皮下带的水量,部分以蒸散发形式返回大气。峰丛洼地组合类型喀斯特径流补给,以裂隙流分散补给和落水洞、漏斗集中灌入补给为主。

3 2 峰丛谷地组合类型区

部分落水洞,漏斗直接出露于地表;部分落水洞漏斗和洼地土层覆盖,区内土层厚度大、分布广,该区基本上为覆盖型喀斯特区。垂直剖面上有 4 个水文作用带:即土层带、皮下带、渗流带和管流带,其水文作用较前类型区复杂。包气带顶部的土

层与其下的皮下带的持水能力和入渗能力绝然不同,形成土层与皮下带间一介面,土层持水容量大,下渗能力小,入渗水量受其控制。当雨水降落到地面,满足土层持水量后,土层内部分水量侧向运动形成壤中流,部分水量向皮下带供水;雨量稍大时,易出现坡面流。渗入皮下带水量,满足该带持水量后,部分水量仍垂向渗透,向渗流带供水;部分水量形成侧向运动的皮下带流;遇到较大裂隙及节理时,又继作垂向渗透,渗流带内水量向管流带供水。坡面超渗雨水所形成的坡面流同样向出露于地表的落水洞、漏斗汇集,以集中方式补给其中,最后由地下河调蓄排泄,或直接由地表河调蓄排泄。同样,地下河管道水流和管壁周围裂隙互相补给和交换过程。雨后,贮蓄在土层,皮下带及带渗流带内水量,以蒸散发形式返回大气。峰丛谷地组合类型区喀斯特的补给是以分散渗透和集中灌入的补给方式为主。

4 水资源形成过程

喀斯特流域的不同地貌类型区,有着不同的水文作用带,该作用带起“过滤器”作用控制着不同的三水转化形式和水资源补给方式,加之地表、地下河系展布格局,最终决定了水资源形成过程。具代表性,并有水文资料可分析论证是贵州普定后寨地下河流域(图2)。该流域集水面积 80.65 km^2 ,主河长约 12 km 。早在 20 世纪 80 年代,在地下河自上而下设置母猪洞、老黑谭、六谷及冒水等水文观测站。母猪洞站以上为上游,为裸露型峰丛洼地区;母猪洞站至老黑谭站、六谷站为中游,为覆盖型峰丛谷地区;六谷站以下至冒水坑站为下游区,为覆盖型峰林盆地区,冒水坑为地下河的最终出口。

后寨地下河流域上中下游区的不同结构系统影响,对于同一降雨过程有着不同响应和不同的水资源过程。兹以 1989 年 8 月 26 日和 2000 年 7 月 14 日降雨径流过程为例分析。

4.1 母猪洞站

为上游站,集水面积 4.7 km^2 ,源头有 3 条短小地下河支流汇集,伏流 2.3 km ,在母猪洞泄出转为地表河。集水区属裸露型峰丛洼地类型,边界封闭无越流;区内垂向落水洞、漏斗遍布,并与横向管道、溶洞,以及复杂众多的大小溶隙组成互有水力联系的空间结构系统。垂向落水洞、漏斗深达几十米,水位变幅可达 30 m ,地下空间大,据实测可达

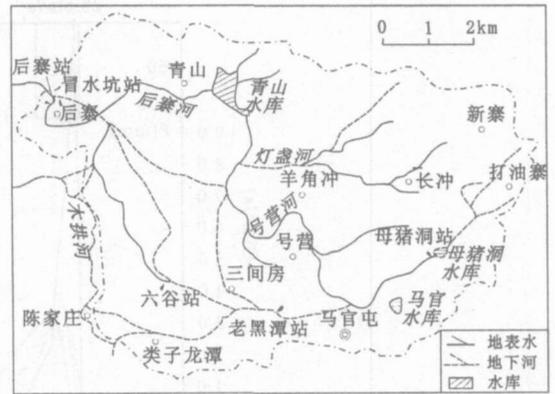


图 2 后寨地下河流域示意图

Fig. 2 Sketch of Houshai subterranean basin

$10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上。该区管道发育,输水能力大,在“三水”转化关系上表现为降水到地面经坡地汇流后,直接集中灌入落水洞,经地下空间结构系统贮存、调蓄及输移而成。由于水源多、流程短,渗流快及管道畅通,对水源补给过程调蓄不大,从而形成陡涨陡落的尖瘦型水资源过程(图3)。

4.2 老黑谭站、六谷站

为中游站,区间集水面积分别为 15.8 km^2 和 24.1 km^2 ,属覆盖型峰丛谷地类型。地下河在母猪洞泄出成地表河,地表河床为透水性能不一的灰岩地层,地表河流程不远即渗入地下转为地下河,伏流至老黑谭站溢出地表,继而再次潜入地下直到六谷站。该两站径流过程同属陡涨陡落型,其水资源过程除母猪洞来水过程外,同时有区间降水集中灌入和分散渗透补给的水量,陡涨但峰不高,洪峰流量远小于母猪洞站的峰值,其因是边界不封闭,峰前涨洪段越流,大部分洪水量另由地表河分泄。峰后段水量受地下河调蓄、输移,消落缓慢。在“三水”转化关系上表现为地表水、地下水交替转化。

4.3 冒水坑站

为地下河控制站,集水面积 80.65 km^2 ,区间集水区属覆盖型峰林盆地类型,地表、地下河系散乱,转化频繁,穿越叠置,呈网络状,地下河空间调蓄能力大。在“三水”转化关系上表现为坡面流成峰,裂隙流(包括壤中流)水量较大。因此,该站水资源过程呈陡涨平退型,但洪峰流量不高,远低于上中游站峰值,大部分涨洪水量越流注入后寨地表河。2000 年 7 月 14 日后寨地下河各测站(六谷站 1997 年撤消)降雨径流过程,其形态特征与 1989 年相似(图 4 表 1)。说明对于相同或相似降雨过

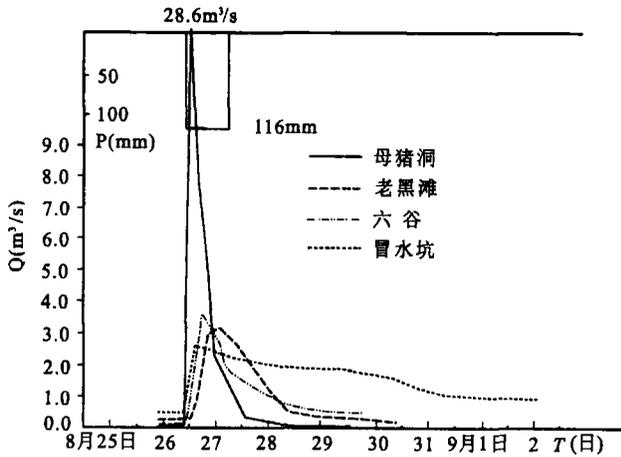


图 3 1989年 8月后寨流域各站雨洪过程

Fig 3 Rainfall and hydrologic processes at representative stations in Houzhai basin in 1989

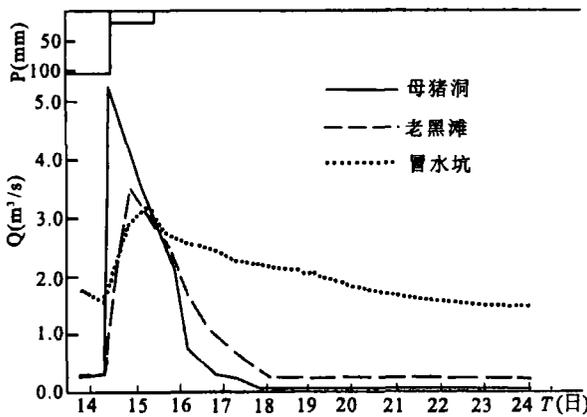


图 4 2000年 7月后寨流域各站雨洪过程

Fig 4 Rainfall and hydrologic processes at representative stations in Houzhai basin in 2000

程的响应,不同的流域结构决定了补给方式、三水转化、径流调蓄和输移特征,此可为喀斯特水资源评价、合理开发利用方式、水资源合理配置、供水工程设计及有效保护提供科学决策依据。

5 水资源合理利用

5.1 西南喀斯特峰丛山区不是富水区,是缺水区

西南喀斯特峰丛山区位于中国亚热带湿润季风气候区。雨量丰沛,多年平均雨量 850~ 1 600 mm;气候温暖,多年平均气温 8~ 20℃。但湿热气候区还出现干旱缺水现象,为特有的“喀斯特干旱”。究其原因:一是地高水低,云贵高原为深切河流所分割,人口、耕地集中的峰丛洼地、谷地及盆地同深切河流相邻,地形高差 300~ 700 m,建造

表 1 后寨地下河流域降雨径流统计分析

Table 1 Statistical analysis of rainfall and runoff at Houzhai subterranean basin

日期	站名	雨量 (mm)	洪峰流量 (m ³ /s)	径流量 (10 ⁴ m ³)	径流系数	还原总径流量 (10 ⁴ m ³)	越流量 (10 ⁴ m ³)	越流比 (%)
1989- 08- 27	母猪洞	116	29.6	42.3	0.65	538.7	458.9	85.0
	老黑潭		2.9	25.1				
	六谷		3.6	31.3				
	冒水坑		2.6	79.8				
2000- 07- 15	母猪洞	114.8	5.5	58.0	0.90	735.8	689.9	91.5
	老黑潭		3.5	42.0				
	冒水坑		3.2	45.9				

高扬程泵站提水,投入大于产出,经济上不可行。二是雨多地漏,峰丛山区流域的二元三维空间结构对于丰沛雨水,由于越流与地漏难以汇集和贮蓄,

多数河流在地势较低的盆地边缘或峡谷流出,最终由长江、珠江支流的深切河流汇集流出区外,导致地表水匮乏、地下水不易开采;如贵州 1999年入境

水量 $154.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 出境水量为 $1.361 \times 10^8 \text{ m}^3$, 出境水量约为入境水量的 10 倍。三是石多土少, 坡地多, 平地少, 旱地多, 水田少; 土地贫瘠, 土地覆被不连续, 成斑状分布; 加之地形崎岖, 难以建规模较大的和完整的供水系统, 有效灌溉面积仅占总耕地的 13% ~ 30%。四是土薄易旱, 坡陡水土流失严重, 加之成土过程缓慢, 坡耕地瘠薄^[9], 土层田间持水能力特低。根据普定长观资料分析, 田间持水量大多为 10~30 mm, 最少仅为 5 mm (峰丛洼地), 远低于非喀斯特湿润区的 100~130 mm 的田间持水量。

基于上述原因, 决定了峰丛山区天然水资源量大, 但可利用水量少。按照国家水资源评价指标, 西南喀斯特峰丛山区水资源总量大, 人均、亩均水资源占有量均列全国首位^[10], 如贵州人均、亩均水资源占有量分别为全国平均数的 1.3 倍和 2.0 倍, 如按可利用水量计算, 则其人均、亩均占有量均远低于全国平均; 如按可供水量统计则更少, 贵州人均、亩均可供水量分别仅为全国平均的 53.8% 和 42.0%。

5.2 水资源合理利用

西南喀斯特峰丛山区缺水, 论其性质应当属工程型缺水, 解决缺水的途径是增加可利用水量和可供水量, 根据峰丛山区流域地貌类型、三水转化规律、水资源过程特性、土地分布特征和居民分散聚居, 建议采取因地(形)制宜、因土(地)制宜、因水(量)制宜和因需(水)制宜原则和适宜的水资源利用模式。上游峰丛洼地区建地下水库、溶洼水库或天窗泵站提水, 中下游峰丛谷地和峰林盆地建拦河低坝蓄水工程和泵站提水工程。峰林坡地的皮下游带流和快速裂隙流溢出处建水窖和水柜等集流、集雨工程。供水工程以小微型为主, 实施分散拦蓄、分散供水, 以化整为零的方式解决喀斯特峰丛山区整体性干旱缺水。

6 结 论

1) 西南喀斯特峰丛山区众多中小流域, 具有

不同于非喀斯特流域的二元三维空间结构, 控制着三水转化规律和水资源形成过程。

2) 喀斯特流域对于相同或相似降雨过程的响应, 不同的流域结构决定了补给方式、三水转化、径流调蓄和输移特征。

3) 喀斯特山区的地高水低、雨多地漏、石多土少及土薄易旱等原因, 致使湿热气候下出现特有的“喀斯特干旱缺水”。论其性质当属工程型缺水, 究其原因是丰富的天然水资源中可利用水量少, 可供水量更少。

4) 根据峰丛山区三水转化规律, 水资源过程、土地资源分布和经济社会情况, 按照因地制宜、因土制宜、因水制宜及因需制宜原则, 采用以小微型为主的水资源开发利用模式, 实施分散拦蓄、分散供水, 以化整为零方式解决喀斯特峰丛山区的整体性干旱缺水。

参考文献:

- [1] 张永勤, 缪启龙, 何毓意, 等. 区域水资源量的估算及预测分析 [J]. 地理科学, 2001, 21(5): 457~462.
- [2] 陈家琦, 钱正英. 关于水资源评价和人均水资源指标的一些问题 [J]. 中国水利, 2003, 11(A刊): 42~44.
- [3] 李阳兵, 侯建琦, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展 [J]. 地理科学, 2002, 22(3): 365~370.
- [4] 王飞燕. 高原喀斯特地貌及其流域结构的关系 [J]. 南京大学学报(自然科学, 地理学专辑), 1992 总(13): 112~121.
- [5] 李阳兵, 王世杰, 容 丽. 西南岩溶山区生态危机与反贫困的可持续发展文化反思 [J]. 地理科学, 2004, 24(2): 157~162.
- [6] 杨明德. 峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用 [J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 44~51.
- [7] 史运良, 王腊春. 岩溶水概念分布模型 [J]. 南京大学学报(自然科学, 地理学专辑), 1992 总(13): 134~161.
- [8] 王腊春, 许有鹏, 张立峰, 等. 贵州普定后寨地下河流域岩溶水特征研究 [J]. 地理科学, 2000, 20(6): 557~562.
- [9] 苏维词. 贵州喀斯特山区的土壤侵蚀性退化及其防治 [J]. 中国岩溶, 2000, 19(3): 217~222.
- [10] 钱正英, 张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

Formation Process and Rational Use of Water Resources and Transform of Rainfall Surface Water and Underground Water in Karst Mountainous Area in Southwest China

WANG La-Chun, SHI Yun-Liang

(Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093)

Abstract Because of the particularity of geological and geomorphologic structure in karst mountainous area in Southwest China, the formation processes of water resources and the transform of rainfall surface water and underground water are different from other areas. In this paper, the transform mechanisms of rainfall surface water and underground water are discussed and the replenishment models of water resources and the formation of karst water are analyzed. As a conclusion, the responses of rainfall-runoff in different karst basins under the homology or similar rainfall processes are different. The replenishment models of water resources, the transform mechanisms of rainfall surface water and underground water, the storage of water resources and the runoff transportations dominate the karst basin structures. For reasonably using water resources and settling the lack of water in karst mountainous area, the models of water use are put forward. According to the principles of water supply, there are different models of water resources use in different instances. The small water supply projects are primary models in karst mountainous area. The separate water obstructs and storage, the separate water supply and breaking up the whole into parts are recommended models of water resources use in karst mountainous area.

Key words karst mountainous area, transform of rainfall surface water and underground water, reasonable use of water resources