

# 南方喀斯特流域枯季退水影响因子分析<sup>\*</sup>

郝庆庆<sup>1</sup>, 陈喜<sup>2</sup>, 马建良<sup>3</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 3. 宁波市水利水电规划设计研究院, 浙江 宁波 315016)

**摘要:** 为了探讨贵州喀斯特地区枯季径流的退水规律, 选取 Depuit- Boussinesq 退水方程对流域退水进行模拟, 将退水指数与从 DEM 数据提取的各种地形因子之间进行分析。结果表明: 地形指数基本与退水指数成正比; 退水指数与基流指数成反比; 岩性和喀斯特地貌对退水指数的影响较大, 这两项指标不仅决定了径流的成分, 还决定了退水的时间与速度。

**关键词:** 贵州喀斯特; 枯季径流; 退水曲线; 退水指数; 地形因子; 地形指数

中图分类号: P332.3; P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)06-0022-04

## Analysis on Low-flow Recession Influencing Factors in South Karst Basin

HAO Qing-qing<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>2</sup>, MA Jian-liang<sup>3</sup>

(1. Department of Hydrology and Waters Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Lab. of Hydrology Water Resources and Hydraulic Eng., Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Ningbo Hydraulic & Hydroelectric Plan, Design and Research Institute, Ningbo, Zhejiang 315016, China)

**Abstract:** In order to study of the low-flow recession law in Guizhou karst area, we select the Depuit-Boussinesq equation to simulate resession flow. Then we discuss the relationship between recession index and several kinds of terrain factor extracting from DEM. The results showed that: topographic index is directly proportional to recession index; recession index is an inverse proportion to base-flow index; Lithology and karst geomorphology has large influence on recession index and both of the two indicators not only determine runoff composition, but also determine recession's duration and speed.

**Key words:** Guizhou karst; low-flow; recession curve; recession index; terrain factor; topographic index

贵州省位于我国西南部, 是我国南方喀斯特强烈发育的高原山区。虽然降水较多, 但时空分布不均匀且下垫面情况复杂, 使冬春季节经常处于枯水状态。因此, 研究喀斯特地区的枯水时空分布及退水规律对喀斯特地区生态环境系统有着重要的意义。选取贵州省内长河坝、黄猫村、火石坝、江滨、麦翁、石阡、余庆、下湾等 8 个子流域为研究对象, 选用 Depuit-Boussinesq 退水方程对各流域退水进行模拟, 并提取退水指数, 然后将退水指数与从 DEM 数据提取的各种地形因子之间进行分析, 得到了一些较为实用的成果。

### 1 退水曲线的制作及退水指数的确定

选取 1973-1983 年 8 个子流域的日平均流量

的退水段作退水曲线, 将退水过程分为 3 个阶段, 然后将 3 段退水过程分别用 Depuit-Boussinesq 退水方程进行拟合<sup>[1]</sup>, 由此可以得到各个子流域的退水方程, 以江滨流域为例拟合结果见图 1 及式(1)。

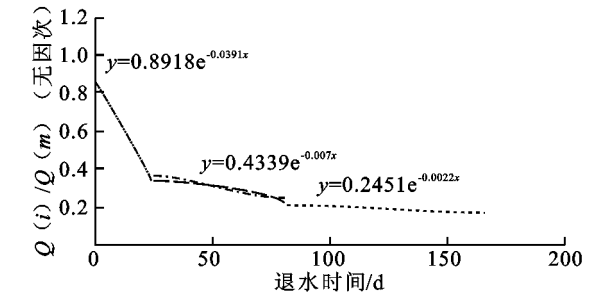
$$Q_t = Q_0 \cdot [0.891 \exp(-0.0391t) + 0.4339 \exp(-0.007t) + 0.2451 \exp(-0.0022t)] \quad (1)$$

由图 1 可以看出, 第一段的退水时间都比较快, 通常在喀斯特流域被认为是管道流的排泄, 这段退水时间快而且流量较大; 第二段的退水时间比第一段要长一倍左右, 此期间的管道或洞穴内的水已经基本被排干, 排泄主要来自连通性较好的喀斯特化裂隙; 第三段的退水时间更为持久, 比前两段的总和都要长, 表明大裂隙, 大管道的水已排完, 而来自细小裂隙系统的喀斯特水已占主要地位<sup>[2]</sup>。

\* 收稿日期: 2009-06-09

基金项目: 国家重点基础研究(973)项目(2006CB403200); 教育部科学技术研究重大项目(308012); 国家自然科学基金项目(50679025)

作者简介: 郝庆庆(1976-), 女, 江西九江人, 在职博士, 主要从事流域水文模拟研究。E-mail: haoqq@hhu.edu.cn



注:  $Q(i)$  ——日平均流量的退水段流量系列:  $Q(m) = \max[Q(i)]$

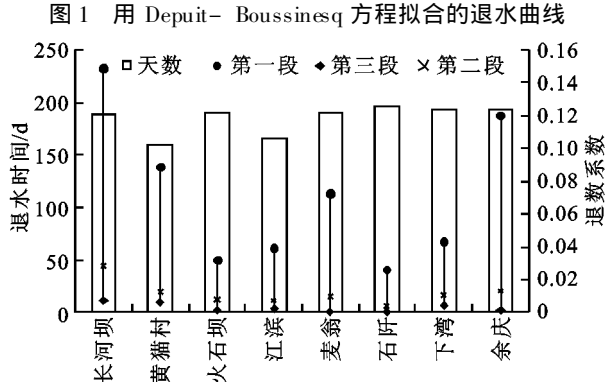


图 2 各个流域的退水指数及天数

由图 2 可以看出, 针对单个流域来说: 第 1 段退水指数要远远大于第 2 段和第 3 段, 第 2 段的退水指数与第 3 段比较接近。第 1 段与第 3 段退水指数之差也差别很大, 可以用“长度”的概念来衡量, 这个也是衡量流域调蓄能力的一个重要指标。而针对不同流域来说: 第 1 段退水指数之间差别较大, 从第 2 段开始差别开始急剧减小, 而第 3 段的退水指数, 各个流域基本趋于一致。

2 地形因子与退水指数相关分析

影响枯季退水的因素主要包括气候因素和下垫面因素。气候因素是指降雨、蒸发等, 下垫面因素包括地形、地貌、岩性、植被等。而在下垫面因素的研究中, 以数字高程模型 DEM 的利用最为广泛。因为其可以代表一个流域的地形分布而且还可以根据 DEM 提取各种地形因子。例如地形的起伏度、沟谷的切割深度、地表的沟壑密度以及坡度、坡向等因素。这些因素不仅决定了土壤蓄水能力的大小, 还对河网水系的发育及密集程度有着直接的影响。

2.1 退水指数与地形指数的关系

利用数理统计的方法, 将各个流域的地形指数值分成 30 段, 将地形指数的平均值及众数与第 1 段的退水指数进行点绘分析(图 3)。

从图 3 可以看出: 地形指数与退水指数基本呈正比关系, 反映到物理意义中是  $\ln(\alpha/\tan\beta)$  值较大的, 单元面容易达到饱和而产生坡面流, 这些单元

面积一般位于地形辐合、坡面平缓、坡脚河边地带等水平方向透水性差且汇水面积大的部位。在非喀斯特地区, 坡度平缓的地方, 应该是退水较慢的地方, 应与退水指数成反比关系。但是喀斯特流域由于水的溶蚀和侵蚀特征, 地表基岩裸露, 土壤发育比较贫瘠, 土壤的蓄水能力较差, 所以在产流的时候较为迅速, 另一方面, 地表岩石裸露, 汇流的时候阻尼系数也较小, 汇流速度加快。所以导致在贵州喀斯特流域地形指数与退水指数之间的关系是成正比的, 这也是喀斯特流域区别于其他流域的特点<sup>[2]</sup>。

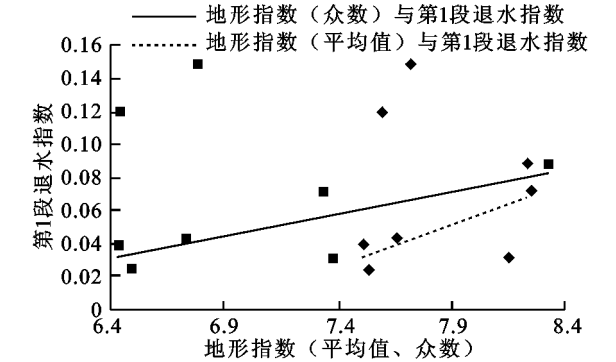


图 3 地形指数(平均值、众数)与退水指数的关系

标准差是一种重要的也是常用的离散性特征数, 它反映了一批数据对其平均数的离散程度的大小, 标准差越大, 说明数据越分散。标准差的计算公式采用如式(2)。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$
 (2)

式中:  $S$  ——流域地形指数的标准差;  $X_i$  ——每个网格的地形指数;  $\bar{X}$  ——流域的平均地形指数;  $n$  ——网格数目。反映到流域的性质上来, 标准差越大, 说明流域的地貌类型越丰富多样, 产流面积在空间上更加不均匀, 产流机制也更为多样性。

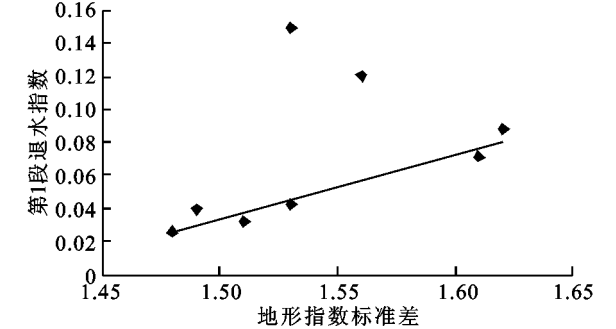


图 4 地形指数标准差与退水指数的关系

从图 4 可以看出, 地形指数的标准差对流域的退水有着极大的影响。标准差比较大的两个流域都有一种岩石成分超过了 50%, 且流域岩性类型比较少, 而且地貌类型比较单一。由此也能说明, 岩性成分种类少, 地貌类型较单一, 对流域的产汇流有较大

的影响<sup>[2]</sup>。

## 2.2 退水指数与流域面积的关系

从国外研究成果来看, 无论该地区的地质条件如何复杂, 流域面积都是影响枯季退水的一个重要因素。本文研究中, 选取流域的面积在 185~ 2 500 km<sup>2</sup> 之间, 因为流域面积过大会将流域的其他特征坦化, 不易表现出流域的特点。

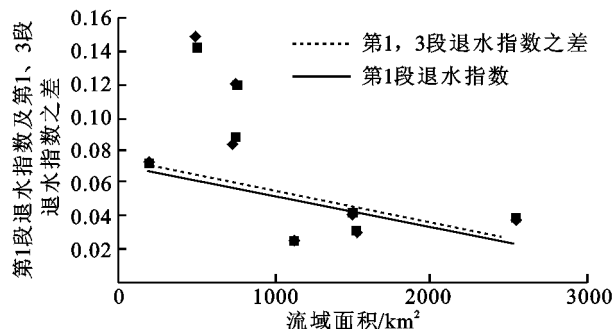


图 5 流域面积与退水指数及第 1, 3 段退水指数之差

由图 5 可以看出, 流域面积越大, 退水指数越小。这是因为面积大汇流时间就会变长, 相应的退水过程也会变的比较坦化。而且流域面积大, 流域的蓄水能力也会加强, 对来水具有很强的调节能力,

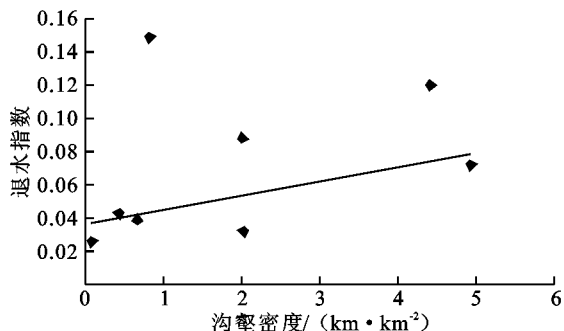


图 6 沟壑密度与退水指数关系

## 3 退水指数与基流指数

基流指数 BFI (base flow index) 对枯季退水研究至关重要。其包括年平均基流量和长期日平均基流量。Lvovich<sup>[4]</sup> 首先介绍了这个概念, 英国水文研究所于 1980 年进一步健全了这个概念。Beran 和 Gustard<sup>[5]</sup> 把它当作可靠性指标, 将它表示为基流量和总流量的比值。Gustard 等人用全部观测期的年资料来估算 BFI。在地下水产流较大的流域, BFI 值可能接近于 1, 但对季节性河流来说, BFI 值可能等于 0。Smakhtin 和 Watkins 列出了一些河流的 BFI 特征值。BFI 也可以很好地反映地形学对枯水的影响, 它广泛地应用于一些区域的枯水研究。本文采用数字滤波法分割基流, 得出的基流指数与退水指数的关系, 如图 7 所示。从图 7 可看出基流指

由图 2 可以看出, 各个流域的退水指数第 1 段与第 3 段之差各不相同, 这也是反映一个流域的调蓄作用的重要指标, 通过图 5 流域面积与退水指数及第 1, 3 段退水指数之差可以看出, 流域面积越大的, 其第 1, 3 段退水指数之差就越小。也说明了流域面积大其退水曲线一般都比较平缓, 而流域面积小的, 退水曲线第一段都比较快<sup>[2]</sup>。

## 2.3 退水指数与沟壑密度

沟壑密度 (gully density)<sup>[3]</sup> 是指在一个特定的区域内, 地表单位面积内沟壑的总长度。沟壑密度是反映当地气候、地质、地貌的一个基本指标, 同时也是地形发育阶段、降水量或地势高差、土壤渗透能力和地表抗蚀能力的重要特征值, 对于枯季退水而言, 地表支离破碎程度越大, 对枯季时期基流的释放越有利。将沟壑密度与退水指数点绘成图 6, 可以看出退水指数与沟壑密度基本呈正比例关系, 沟壑密度越大, 地表支离破碎程度越高, 退水指数也就越大。破碎的地面必然起伏不平, 多斜坡。这样一方面使地表物质稳定性降低, 另一方面易形成地表径流。沟壑密度越大, 地面径流和土壤冲刷越快, 沟蚀发展越快。

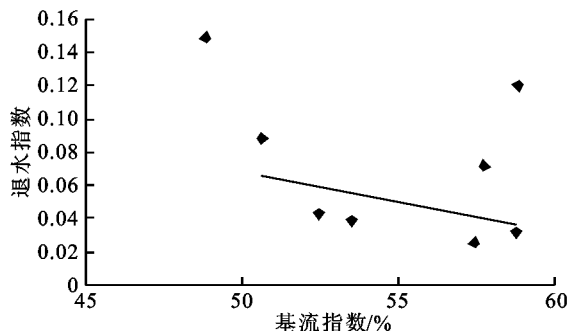


图 7 退水指数与基流指数关系

数与退水指数成反比的关系, 原因之一可能是因为基流指数大的流域其含水介质的溶通性较好, 具备大量的次生溶孔、溶隙和溶道, 从而构成了一个复杂的、有机结合的、空间分布不均一的贮水空间。或者是流域内有大型的洞穴或溶盆起到一个小蓄水体的作用, 对枯季的退水具有补充的作用。所以说基流指数大的流域其特点是具有很强的调蓄能力。而调蓄能力强的流域流量过程线是比较均匀坦化的, 其退水指数并不会很高, 所以, 退水指数与基流指数之间是呈反比关系的。

## 4 退水指数与岩性指数

喀斯特地区岩性是很重要的一个指标。本文采用了贵州省 1: 175 万水文地质图做底图, 该图将贵州省内岩石成分按照含水岩组及富水程度进行划分, 利用 ArcGIS 将流域面积与水文地质图进行叠

加后对其进行数字化, 并对每种岩石成分所占的比例进行计算, 应用 Wright 提出的地质指数的概念, 将各种地质岩石根据透水性予以量化, 在一个流域范围内, 按其不同岩类相对应的水文地质指数所占面积, 进行加权计算得到该流域面积的综合水文地质指数, 然后与退水指数进行比较, 如图 8 所示。

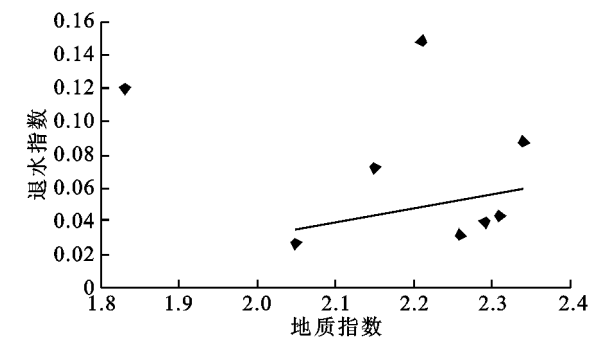


图 8 地质指数与退水指数关系

由图 8 可以看出, 除了 1 号点和 2 号点外, 其他点群基本呈正比关系。喀斯特流域内, 各流域样区内的岩性基本是碳酸岩、碳酸岩夹碎屑岩、碎屑岩夹碳酸岩等, 岩性与构造决定了岩石孔隙、裂隙、溶隙发育状况, 影响含水层的给水性、透水性等物理性质从而制约枯季退水速度的快慢和时间的长短。

5 退水指数与喀斯特地貌

研究中采用了贵州省 1: 150 万水文地质图做底图, 该图纸将贵州省内地貌按照喀斯特发育程度分为溶蚀类型、溶蚀- 侵蚀类型、侵蚀- 溶蚀类型和非喀斯特类型。利用 ArcGIS 将流域面积与喀斯特地貌图进行叠加后对其进行数字化, 并对每种地貌成分所占的比例进行计算, 得到各个流域的喀斯特地貌图和喀斯特地貌比例。由于喀斯特地貌具有其复杂性和不规则性, 所以不能用指数形式来进行量化, 研究中采用系统聚类法来说明喀斯特地貌对流域退水的影响。王在高等<sup>[7]</sup>曾用该法对喀斯特流域进行划分, 但是并没有加入地表高程和地表切割深度等地形指标, 而这两项指标也是地形地貌的一个重要体现。按照系统聚类法的基本思想: 首先, 将 8 个流域看成 8 类, 然后按照性质最接近的两类合并成一个新类, 这样得到 7 类流域, 再从 7 类中找出性质最接近的两类加以合并, 变成 6 类, 如此继续下去, 直到所有流域都合并为同一类为止。将上述过程画成聚类图, 根据它便可以决定分多少类, 每类各有什么样的流域, 结果见表 1。

由表 1 可以看出: (1) 非喀斯特流域比例高的流域(第 4 类)平均退水指数要大于喀斯特流域(第 2 类和第 3 类)。这个可能是因为喀斯特地区由于其

岩石裂隙的发育比较发达, 表面形态特征多样, 溶洞、洼地的数量要远大于非喀斯特比例高的流域。而这些地貌特征对汇流的速度会产生一定的阻碍作用, 所以会导致其退水指数较小。而第 1 类地形的退水指数偏高可能是因为长河坝流域受到人类活动影响而退水指数偏高, 导致总体平均指数高。(2) 山地为主的流域退水指数要大于以洼地、谷地为主的流域。这个可能是因为山地为主的流域其流域总体坡度较陡峭, 降雨到达地面后汇流速度比较快导致的。(3) 各种地貌类型比较平均的流域, 其退水指数最小。这是因为没有一个主要地貌类型占主导因素, 其它多种地貌并存的情况下, 其产流、汇流的机制比较复杂、多元化。导致其流域的调蓄能力比较强, 所以退水指数也比较小。

表 1 各类流域喀斯特地貌与退水指数

流域		第 1 类	第 2 类	第 3 类	第 4 类
溶丘地形	溶丘洼地	11.57	17.58	0	0
	溶丘谷地	10.44	0	0	2.82
	峰林谷地	33.35	12.30	0	0
	峰丛浅洼	0	26.37	9.46	12.14
	峰丛谷地	0	0	6.01	4.79
溶蚀侵蚀地形	垅岗槽谷	2.07	0	0	0
	峰丛槽谷	0	0	0	22.36
	溶丘低中山	0	0	14.28	0
	溶丘中山	0	14.16	0	0
	喀斯特中山	0	0	2.03	0
	喀斯特低中山	0	21.22	0	0
	喀斯特低山	0	0	17.79	0
侵蚀溶蚀地形	侵蚀溶蚀山地	37.39	8.37	38.13	22.55
	喀斯特断块山地	0	0	12.30	0
非喀斯特地形		5.18	0	0	35.34
平均高程/ m		1117.82	984.7	1399.35	1159.69
切割深度/ m		285.15	264.7	348.35	269.35
平均退水指数		0.103	0.0319	0.0391	0.0629

6 结论

(1) 在地形因子中, 退水指数与地形指数的关系比较密切。地形指数基本与退水指数成正比例关系。因为地形指数不仅反映出了一个流域的地势是否平坦, 还反映了流域的产汇流的特性, 所以退水指数也是一个内容很丰富的指标, 也可以反映出流域的产汇流能力的大小。

(下转第 29 页)

岩一般以变形为主也是对此很好的说明。

由此可见,针对砂岩和泥岩,由于其微观结构特征存在明显差别,其软化特性、抗冲击特性、以及波的传播特性等方面存在明显差异,而这种差异是与其宏观特征相一致的。

### 3 启示

(1) 砂岩、泥岩的微观结构特征与宏观结构特征有一定的一致性,如宏观上砂岩中裂隙发育而泥岩中裂隙一般不发育。因此,深入研究岩石的微观结构特征,可获得更多宏观特征方面的认识。

(2) 泥岩微观结构显示胶结松散,有大量孔隙和空洞,在浸水条件下,水很容易进入孔隙,对粒间力造成一定影响,加之碎屑状或团粒状和片状结构更容易被压密和滑动,使岩石强度降低较大;而砂岩结构致密,水不易进入岩石内部。因此,水对泥岩的影响程度较砂岩大。

(3) 砂岩中发育有微观裂隙,在外力作用下,特别是如爆破等强度很大持续时间短的冲击力作用下,微观裂隙极易扩展、延伸贯通,造成岩石结构强度的下降,同时,由于波的传播能量损失小,其影响范围较大;与之对应,泥岩较松软,内部的空隙可以消散冲击力作用,波向外传播时能量迅速降低,岩石受的局部影响较大,但影响范围有限,说明泥岩自身的强度受损程度迅速减小。

(4) 考虑到爆破冲击对硬岩(如砂岩)强度的负面作用,与爆破施工类似或相关的工程建设中应注意对硬岩做到控制药量,减少由于爆破引起设计开挖面以外(如洞室围岩、开挖边坡面岩石)岩石强度

大大降低,造成不必要的影响(如洞室拱顶及拱肩部位的失稳、边坡的局部失稳及未来的大变形)。对于软岩(如泥岩)则应在施工中注意防排水,阻止水进入其内部引起强度的大大降低,造成洞室围岩、边坡等稳定性的迅速下降。针对这方面可结合更多的岩类进行大范围的深入研究,获取系统性的研究规律,从而更好指导施工。

(5) 根据地震中大量硬脆岩体的大规模崩塌、崩滑破坏事实,且破坏的岩体一般变得很破碎,建议可从硬脆岩石的微观结构特征上做进一步的研究,结合其对波的传播特性,可能会获得进一步的合理解释和认识。

参考文献:

- [1] 史瑾瑾. 岩石冲击损伤特性的试验研究[D]. 四川 绵阳: 西南科技大学, 2006.
- [2] 张建文. 岩石微观结构分析在陷落柱导水性识别中的应用[J]. 山西焦煤科技, 2003 (增刊): 17-18.
- [3] 赵永红, 黄杰藩, 王仁. 岩石微破裂发育的扫描电镜即时观测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(3): 284-294.
- [4] 赵永红, 黄杰藩, 王仁. 裂带发展的扫描电镜实验研究及其对地震前兆的启示[J]. 地球物理学报, 1993, 36(4): 453-462.
- [5] 秦跃平, 张金峰, 王林. 岩石损伤力学理论模型初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 646-650.
- [6] 黄明利, 唐春安, 朱万成. 岩石单轴压缩下破坏失稳过程 SEM 即时研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1999, 20(4): 426-429.
- [7] 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 岩石损伤扩展力学特性的 CT 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 250-254.

(上接第25页)

(2) 退水指数与基流指数的关系也比较密切。因为基流反映了一个流域稳定出流的能力。基流指数也可以反映出该流域内地下径流的比例, 从一个侧面反映出该流域的蓄水能力, 而退水指数反映的是流域退水能力。所以两者间呈反比的关系。

(3) 岩性和喀斯特地貌对退水指数的影响较大。岩性的不同决定了地貌类型的差异, 而这两项指标对退水的影响在下垫面因子中尤为重要, 不仅决定了径流的成份, 还决定了退水的时间与速度。

参考文献:

- [1] Kiraly L. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers [J]. Karstification and Ground Flow, 2003, 1(3): 1-26.
- [2] 马建良. 南方喀斯特流域枯季退水规律及对新安江模

型的改进[D]. 南京: 河海大学, 2008.

- [3] 王秀云. 基于 DEM 的地貌分析研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2006
- [4] Lvovich M L. Hydrologic budget of continents and estimate of the balance of global fresh water resources [J]. Hydrology, 1972, 4: 41-45.
- [5] Beran M A, Custard A. A study into the low-flow characteristics of British rivers [J]. Journal Hydrology, 1977, 35: 147-157.
- [6] Smakhtin V Y, Watkins D A. Low-flow estimation in South Africa[R]. Water Research Commission Report No. 494/1/97, Pretoria, South Africa.
- [7] 王在高. 喀斯特流域枯水及其枯水资源承载力研究 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 1999: 6-7.