

文章编号: 1001-4179(2021)01-0056-07

# 喀斯特地区流域洪水退水过程分析

——以贵州省黄洲河流域为例

张先荣<sup>1</sup>, 曾成<sup>2</sup>, 狄永宁<sup>3</sup>, 肖时珍<sup>3</sup>, 肖华<sup>3</sup>, 何江湖<sup>3</sup>, 张莹<sup>3</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 为研究喀斯特地区流域洪水退水的过程特性, 以贵州省黄洲河流域为研究对象, 对流域径流进行基流分割, 运用指数型退水模型公式对退水过程进行模拟。结果表明: ① 黄洲河流域洪水过程的总流量变化与基流变化呈现正相关, 退水过程受降雨时长、流量大小以及流域岩性特征等因素的影响。② 地表径流退水速率大于地下径流退水速率, 流域内大量的岩溶孔隙和裂隙存在使地下径流退水加快。③ 起退流量为 11.99 ~ 381.81 m<sup>3</sup>/s, 退水系数的范围为 0.033 ~ 0.084, 退水系数越大, 暴雨洪水时间越短, 反之越长。④ 指数型退水模型能够较好地模拟黄洲河流域的退水过程。

**关键词:** 退水过程; 基流分割; 指数型退水模型; 黄洲河流域; 喀斯特地区

中图法分类号: K903

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.01.010

随着社会经济的快速发展, 生态环境逐渐引起社会的重视, 我国西南地区作为中国最大的裸露岩溶分布区, 其流域地质条件较为复杂, 有着特有的二元三维空间系统, 石漠化较为严重, 生态环境较为脆弱<sup>[1-2]</sup>。该地区对洪水预报的要求需更为精确。目前人们对洪水预报和模拟更为重视, 而对于调节水利工程而言, 洪峰之后的退水过程直接关系到水库蓄水量和调度运行方案, 因此, 有必要对该地区的退水过程进行研究。

随着水文模拟技术的发展与应用, 水文学家对水文过程的组成进行了较为系统的研究。退水过程作为水文过程研究中重要组成部分, 其演变特征通过基流分割和退水系数来进行判断, 而流域不同的土壤分布情况、植被空间分布以及地形等均会影响基流和退水系数<sup>[3-4]</sup>。基于流域水量平衡和产流机制, 水文学家通过研究提出多种关于退水过程的方法和数学模拟模型, 其中 Singh 等<sup>[5]</sup>、Anderson 等<sup>[6]</sup>研究发现基流峰值的滞后时间随地形不同特征而变化, 并强调了退水场

预测的必要性。20 世纪 80 年代建立的退水曲线模型不能充分描述河流的退水流量, 而退水径流底流衰退的时间尺度与排水密度、平均坡度、水力导度和可排水孔隙度的比值( $K/f$ )有关<sup>[7-8]</sup>。流域的水文过程并不是以单一地形为基础, 因此, 不同下垫面其退水过程变化不同, 比如喀斯特地区和平原地区流域的地表径流在降雨停止后消退速度和时间规律大不相同<sup>[9-10]</sup>。对比已有的一些退水方法和模型研究, 流域的退水影响和特征分析也出现了不同的研究, 李敬茹等<sup>[11]</sup>、肖玲等<sup>[12]</sup>研究了退水影响分析以及退水方案合理性水资源论证, 而一些流域通过 DEM 提取地形指数分析流域枯季退水影响和退水特征<sup>[13-15]</sup>。分析场次洪水退水过程, 对径流组成分割的基础研究、水文预报技术改进和防洪措施等方面具有重要意义。国外对于退水过程的研究已有很大的突破, 而国内基本停留在大流域尺度上退水过程的研究, 对一些具有典型岩性、土壤和植被特征的小流域的研究还略显不足, 故本文选择位于西南喀斯特地区的施秉黄洲河流域作为研究对象,

收稿日期: 2020-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502606-01); 国家自然科学基金项目(41673129); 贵州施秉白云岩喀斯特石漠化地区土壤侵蚀机理研究项目(GZNUD[2017]12号)

作者简介: 张先荣, 男, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特水文地质。E-mail: 1028477130@qq.com

通讯作者: 狄永宁, 女, 高级工程师, 研究方向为喀斯特水文地质、环境地质与地貌学。E-mail: 21435980@qq.com

分析黄洲河流域夏季降雨后的洪水退水过程,揭示喀斯特流域退水过程的特征。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区黄洲河流域位于中国贵州省东部施秉县境内,为典型的喀斯特流域,隶属于中国南方喀斯特世界自然遗产地施秉境内的杉木河。黄洲河流域位于中国阶梯地势第二级与第三级过渡地区,即云贵高原东部边缘向湘西低山丘陵过渡的山原斜坡地带<sup>[16]</sup>。该流域的气候特点是四季如春、降水丰沛、春暖夏凉,属于典型的中亚热带季风湿润气候;年平均温度 16 °C,年平均降水量约为 1 220 mm。

黄洲河流域面积约为 49.20 km<sup>2</sup>,大部分地区的海拔在 600 ~ 1 250 m 之间,平均海拔 912 m,地势呈现出东北高西南低。流域内没有外源水,河流深切,沟谷纵深发育,形成一个地形破碎的中亚热带峡谷区。该流域有 8% 的面积出露石灰岩,92% 的面积出露白云岩,出露地层为寒武系高台组、娄山关组和石冷水组以及少量的清虚洞组。

### 1.2 研究数据

本文所用的水位数据来源于黄洲河口安置的 2 台高时间分辨率的水位自动记录仪,记录的数据有每 15 min 的相对水位数据以及水温数据,根据水位数据计算出流量数据。降雨数据由黄洲河流域境内的云台山水文站提供,本文截取 2015 ~ 2016 年中 4 次降雨和测得的水位数据对降雨后的退水过程进行分析。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 数字滤波法

数字滤波法属于基流分割方法的一种,来源于信号分析,通过滤波函数将径流分为基流(低频信号)和快速径流(高频信号)<sup>[17-19]</sup>,数字滤波法具有可重复性,计算方程如下:

$$b_k = a b_{k-1} + \frac{1-a}{2}(y_k + y_{k-1}) \quad (1)$$

式中:  $b_k$  表示  $k$  时刻的基流,  $m^3/s$ ;  $y_k$  表示  $k$  时刻的总径流量,  $m^3/s$ ; 滤波系数  $a$  值经过大量的实践研究证明<sup>[17,20-21]</sup>,当  $a$  取 0.925 时,使用数字滤波法能让基流分割达到最好的效果。

#### 1.3.2 退水模型方法

采用常用的指数型退水曲线公式对退水过程中的参数进行描述<sup>[19,22-23]</sup>:

$$Q_t = Q_0 \times e^{-\beta t} \quad (2)$$

式中:  $Q_t$  表示退水过程  $t$  时刻的流量,  $m^3/s$ ;  $Q_0$  表示开始退水时的流量,  $m^3/s$ ;  $\beta$  表示退水系数;  $t$  表示退水所用时间。

根据已知实测流量数据推求退水系数  $\beta$ ,将公式(2)变形得到公式(3):

$$\ln Q_t = \ln Q_0 - \beta t \quad (3)$$

计算退水过程实测流量数据得到若干  $\beta$  值,然后取其平均值,作为该模型的退水系数。

Nash Sutcliffe 效率系数被广泛应用于水资源部门来评估水文模型的性能<sup>[24]</sup>。选用 Nash Sutcliffe 效率系数以及模拟相对误差目标函数对退水阶段进行退水流量模拟和模拟效果判定<sup>[25-26]</sup>,目标函数分别为

$$NS = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_i^*)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \right] \times 100\% \quad (4)$$

$$RE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_i - Q_i^*}{Q_i} \right| \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $NS$  表示 Nash Sutcliffe 效率系数;  $RE$  表示模拟相对误差;  $Q_i$  表示实际流量;  $Q_i^*$  表示模拟流量;  $\bar{Q}_i$  表示每场洪水退水流量的平均值;  $N$  表示洪水场次个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 洪水过程基流变化情况

由慢速壤中流、浅层地下径流和深层地下径流组成的径流称之为基流,一般流域的深层地下径流相对浅层地下径流所占比例很少,所以基流主要表现为浅层地下径流,也是水流的地下水排泄成分<sup>[19,21]</sup>。

本研究选取了黄洲河流域 2015 ~ 2016 年 4 场洪水过程水文资料,黄洲河流域流量和降雨变化见图 1。由图 1 可以看出:黄洲河流域的降雨主要集中在 5,6 月份,冬季降雨明显减少,因此截取 5,6 月份 4 次降雨量最多的暴雨洪水退水过程进行分析,分析 4 场洪水过程中基流的变化情况,得到表 1。4 场洪水以 20150610 次降雨量最多,流量最大峰值达到 381.81  $m^3/s$ 。20150602 次、20150511 次、20150519 次洪水的流量依次减小,20150519 次洪水流量最小,其峰值是 11.99  $m^3/s$ 。最大基流值出现在 20150610 次洪水过程,最大值是 159.7  $m^3/s$ ,由表 1 可以看出 20150610 次洪水的流量明显大于其他 3 次洪水的流量。根据 4 场洪水的流量与基流的相关性(见图 2),20150511, 20150519,20150602,20150610 次洪水流量与基流的相

关系数依次为 0.800 4,0.861 0,0.739 4,0.661 0,这表明河流处于洪水时期的流量与基流呈现正相关。由于在白云岩流域存在溶洞、漏斗、岩溶孔隙和裂隙,当河流流量增大时,地表径流迅速补给地下径流,导致地下径流量增大,基流值增大。同时可以发现河流流量越大,流量与基流的相关系数越小,表明降雨量越大,地表径流量增大的速率越快于地下径流量增大的速率。在降雨过程中,随着流量的变化,基流值也在变化,如图 3 所示。由于 4 场洪水降雨的强度不同,流量变化范围也不相同,导致图中总径流量值和基流值胖瘦不一。从 4 场洪水过程的流量和基流的变化曲线图可以看出:当流域迎来强降雨的时候,河流流量迅速增大,而几乎同一时刻基流值也在增大。但基流值增大的速率小于流量增大的速率,这是因为地表径流迅速增加,然后通过下渗的方式,补给地下径流。而白云岩喀斯特流域有着大量的地下溶洞、暗河等,且白云岩的主要组成成分白云石是属于多孔性石材,会增大下渗径流量,导致基流值迅速增大。但在下渗的过程中,由于土壤的性质以及植被根系等阻挡因素,导致基流值的增大速率减小,流量比基流先达到最大值。在退水过程中,当流量减小到与基流最大值相等时,地下径流开始补给地表径流。退水过程中,流量和基流值出现波动下降是由于流域内出现再一次或多次的降雨。

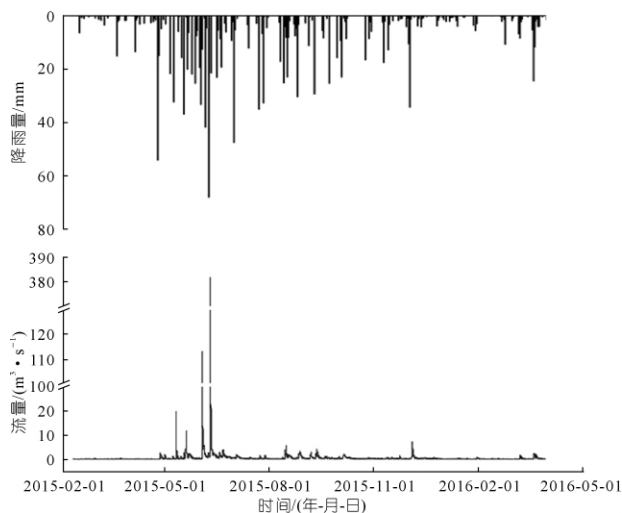


图 1 黄洲河口流量和降雨变化

Fig. 1 Flow and rainfall changes at the mouth of Huangzhou River

表 1 洪水过程降雨量及最大流量和基流

Tab. 1 Rainfall, maximum discharge and base flow in flood process

洪水场次	降雨量/mm	最大流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	最大基流/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
20150511	51.6	19.98	13.56
20150519	36.9	11.99	8.37
20150602	65.3	113.05	44.37
20150610	114.4	381.81	159.70

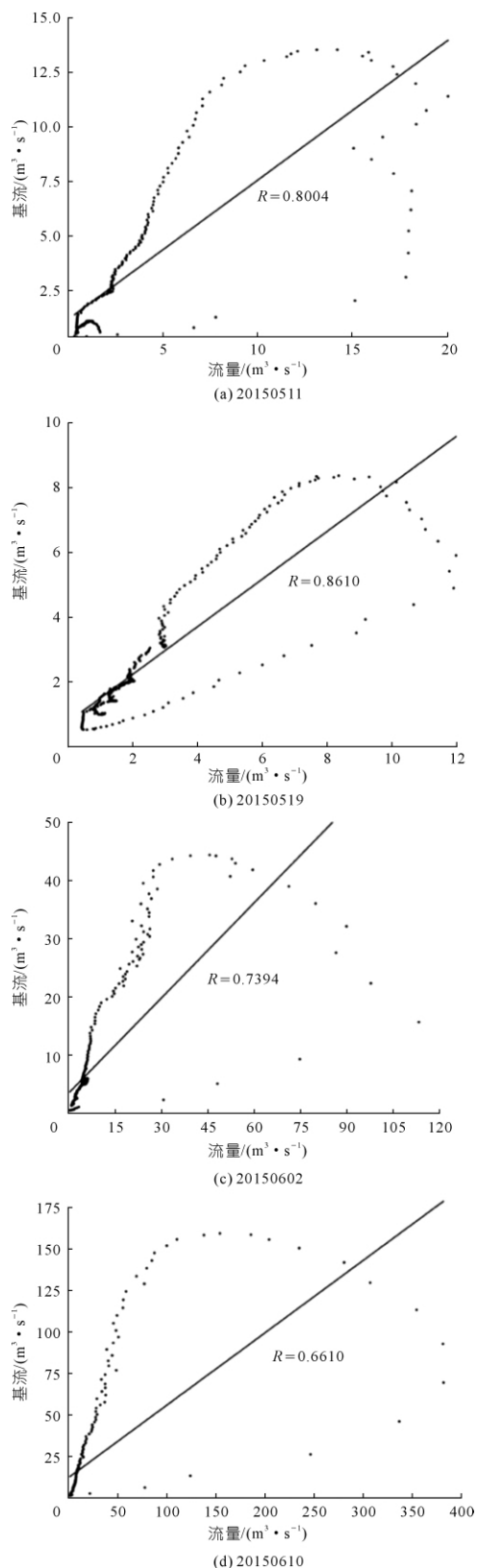


图 2 流量与基流的相关性

Fig. 2 Correlation between flow rate and base flow

## 2.2 退水过程分析

### 2.2.1 退水曲线分析

根据 4 场洪水退水资料,计算出退水流量的自然

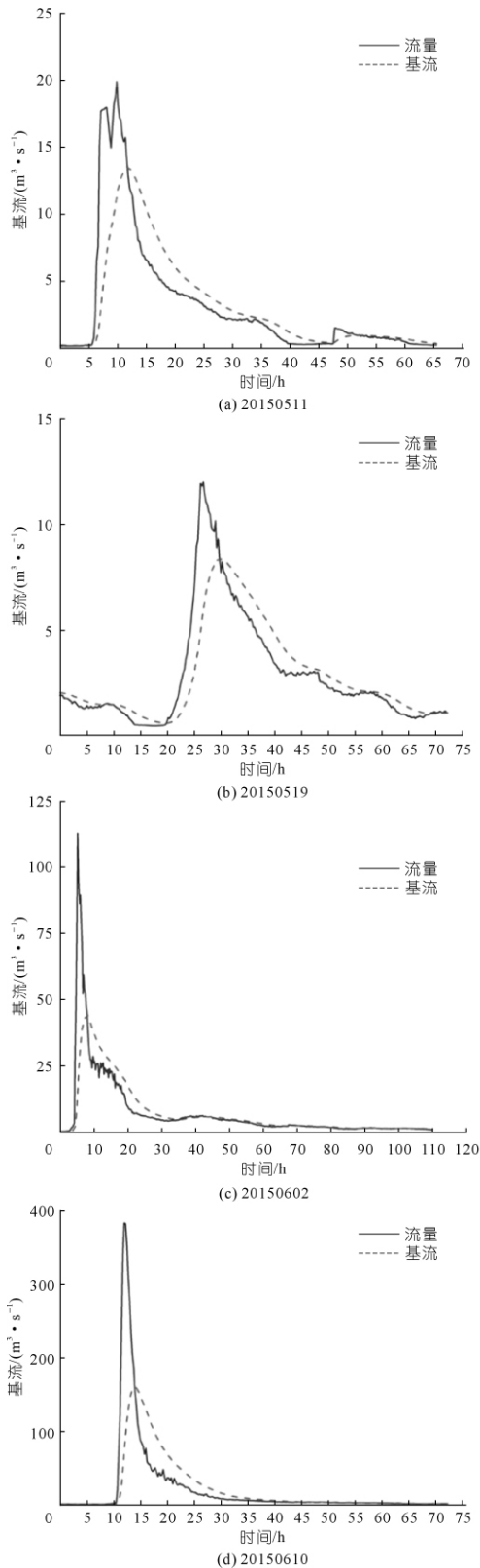


图 3 基流分割

Fig. 3 Base flow segmentation

对数,在对数坐标上作出 4 场洪水的退水曲线,如图 4 所示。由图 4 上可以看出:在退水时间达到 30 h 的时候,4 条退水曲线均出现了拐点(实测数据显示

20150610 场次和 20150519 场次的退水过程在 25 ~ 32 h 的时间段内流量均有变化,但是变化不明显),退水速度下降。说明此时地下径流开始参与退水过程,同时体现了地下径流对流域的水文过程的调蓄作用。20150602, 20150610 两次退水曲线与 20150511, 20150519 两次退水曲线具有明显的间距,是因为洪水的起退流量具有很大的差值,4 次的退水曲线走势相同,说明对于同一流域在自然规律下洪水过后的退水规律与起退流量的大小关系不大。

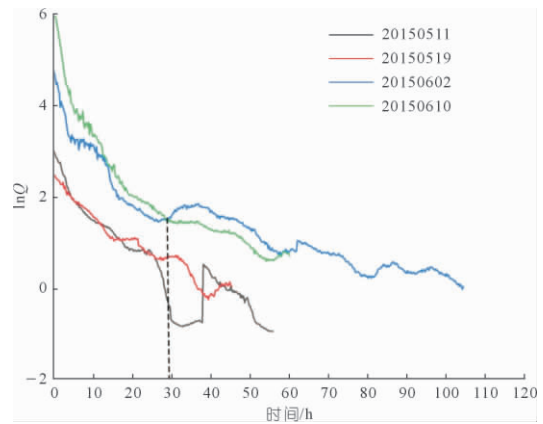


图 4 黄洲河流域退水曲线

Fig. 4 Regression curve of Huangzhou River basin

从拐点 30 h 处将每次整个退水过程分为两段,并对各自两段退水曲线进行线性拟合和一元回归分析,得出图 5。由拟合后的图形和数据得出,在所有 4 次退水过程的第一段退水曲线与各自相对应的趋势线的相关性都比较高, $R$  的范围为 0.900 06 ~ 0.943 14,拟合度较高,表明第一段退水曲线划分比较合理,属于地表退水过程,退水速度快。而第二段的退水曲线与相应的趋势线拟合度差异较大,属于地下径流退水,主要原因是在第二段退水过程中出现不同强度的降雨,在 A 场洪水的第一次退水时间达到 38 h 时流域迎来一次降雨,使流域水位增加,流量增大,导致图 5(a) 的退水曲线突变。表 2 可以得出:4 场洪水的第一段退水曲线的趋势线斜率  $k_1$  的大小范围为 0.058 76 ~ 0.128 71,平均值是 0.093 495,第二段退水曲线的趋势线斜率  $k_2$  的大小范围为 0.023 64 ~ 0.084 77,平均值是 0.045 553。第一段的斜率大约是第二段斜率的 2.05 倍,说明 4 场洪水的第一段退水速率均比第二段的退水速率快,这是由于第一段退水过程基本为地表径流退水,阻挡因素少,速率快。在喀斯特流域,由于岩溶空隙和岩溶间隙的大量存在,地下径流退水前期比后期退水快,但有部分空隙和间隙存在泥土与植被根系堵塞情况,地下径流退水时通过岩溶空隙和间隙,导致退水速率较慢。

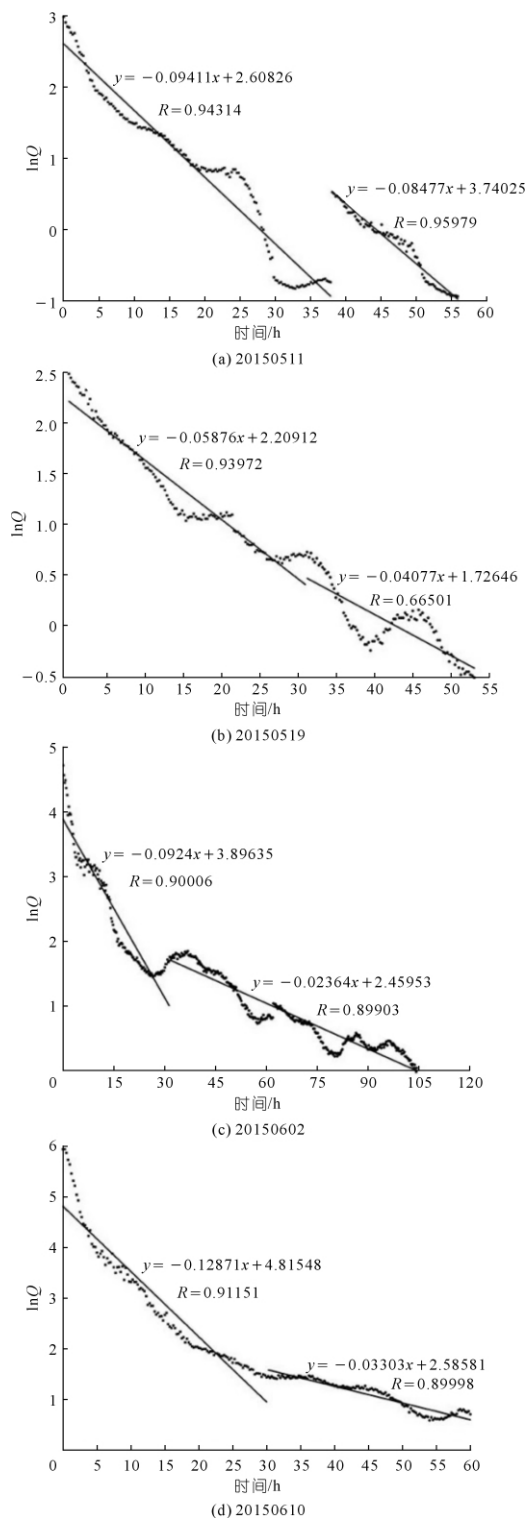


图5 4次退水曲线及分段

Fig. 5 Four regression curves and segments

表2 退水曲线斜率

Tab. 2 Slope of regression curve

洪水场次	第一次退水		第二次退水	
	$k$	$R$	$k$	$R$
20150511	0.09411	0.94314	0.08477	0.95979
20150519	0.05876	0.93972	0.04077	0.66501
20150602	0.0924	0.90006	0.02364	0.89903
20150610	0.12871	0.91151	0.03303	0.89998
平均值	0.093495	0.923608	0.045553	0.855953

## 2.2.2 退水参数及模拟效果分析

根据流域实测数据、退水指数模型公式及模拟效果得出表3。由表3可知:4场洪水的起退流量范围为11.99~381.81 m<sup>3</sup>/s,退水系数范围为0.033~0.084;经计算退水系数平均值为0.060,退水过程用时最长的是20150602次洪水104.25 h,最短用时是20150519次洪水退水45.25 h,平均退水时长是66.31 h。本次研究的退水时间包含了地表径流和地下径流的总共退水时间。总的来说,在黄洲河流域,退水系数越大,总径流量变化越剧烈,退水时间越长。这与喀斯特白云岩流域独特的岩性结构有关。喀斯特白云岩流域的地下径流退水过程中,大部分退水是通过岩溶管道和岩溶裂隙排泄,因此流量越大的洪水过程地下径流被补给越充分,就会导致退水时间越长。4场洪水的模拟流量选取是在退水30 h过后的退水模拟流量,4场洪水退水模拟 Nash Sutcliffe 效率系数范围是86.7%~93.2%,最小的效率系数是86.7%,计算得平均值为89.7%,模拟相对误差在3.7%~6.3%,平均值是4.9%,整体的模拟相对误差在5%以内,最大模拟相对误差仅为6.3%,说明流域的实测退水曲线与模拟退水曲线吻合度较高。

表3 退水参数及模拟效果

Tab. 3 Recession parameters and simulation results

洪水场次	起退流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	退水时长/h	退水系数	NS/%	RE/%
20150511	19.98	55.75	0.069	86.7	6.3
20150519	11.99	45.25	0.053	93.2	3.7
20150602	113.05	104.25	0.033	90.2	4.5
20150610	381.81	60.00	0.084	88.6	5.1
平均值	131.71	66.31	0.060	89.7	4.9

## 3 讨论

黄洲河流域夏季4次洪水退水过程研究表明:地表径流的突然变化对基流的变化影响很大,对于典型的喀斯特白云岩流域,含水层发育于裂隙和可溶性岩石中,具有不同的孔隙类型和含水层性质<sup>[27]</sup>,导致地下径流的变化比较活跃,因此影响基流的变化。在基流达到最大值之前,总径流量的变化速率比基流的变化速率大;基流达到最大值之后,流域有不同强度的降雨,导致总径流量值和基流值都出现波动,但整体趋势都在向流域平水期流量值靠近。退水过程的第一段退水曲线与相应的趋势线拟合度较高,因为在第一段退水曲线对应的退水过程是地表径流在消退,退水速率快且变化均匀。在退水过程的第二段退水曲线,处于地下径流补给地表径流,地下径流退水分为快速地下径流和慢速地下径流<sup>[28]</sup>,并且在第二段退水曲线过程中流域出现了降雨,导致第二段退水曲线与趋势线的

拟合度差异较大。

黄洲河流域4次洪水退水系数变化范围在0.033~0.084之间,退水系数的变化提供了粗略的流量限制来定义流动状态<sup>[29]</sup>。流域形态、地貌、土地覆盖、土壤和地质等指标属于降雨属性,是确定基流退水系数的最佳因子<sup>[30]</sup>,在整个黄洲河流域,白云岩分布达到92%<sup>[16]</sup>,因此整个流域具有典型的喀斯特地貌。流域地下结构复杂多变,岩溶孔隙和岩溶裂隙遍布流域地下结构,在洪水过程中黄洲河流域的地下径流被补给,且流量越大,地下径流被补给量越大,基流值越大。而在流域退水过程中,地下径流被补给量越大,退水所需时间就更长。黄洲河流域退水曲线 Nash Sutcliffe 效率系数平均值为89.7%,Nash Sutcliffe 效率系数越接近1,表示模拟的效果越好<sup>[24]</sup>,虽然对小部分模拟流量略微低估,但模拟相对误差平均值低于5%,表明黄洲河流域洪水的实测退水曲线与模拟退水曲线吻合度高。同时,模拟效果好,验证了指数型退水模型能够较好模拟黄洲河流域的退水过程。

#### 4 结论

(1) 黄洲河流域洪水时期的总流量变化与基流变化呈现正相关,地表径流量增大的速率大于基流值增大的速率。退水过程中,由于再一次或多次降雨出现,导致总流量值和基流值呈波动下降。

(2) 4场洪水退水过程均以退水时间达到30h出现拐点。4次退水过程第一段曲线与趋势线的相关系数的范围0.90006~0.94314。4次退水过程中出现不同强度的降雨导致第二段退水曲线与趋势线拟合度差异较大。4次退水过程第一段退水曲线的趋势线斜率平均值 $k=0.093495$ ,第二段平均值 $k=0.045553$ ,4场洪水的第一段退水速率均比第二段的退水速率快。

(3) 4场洪水起退流量最小的是20150519次退水,起退流量最大的是20150610次退水,分别为 $11.99\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $381.81\text{ m}^3/\text{s}$ 。退水系数的范围为0.033~0.084,退水系数越大,暴雨洪水时间越短,退水时间越长;退水系数越小,暴雨洪水历时越长,退水时间越短。最小 Nash Sutcliffe 效率系数是86.7%,最大 Nash Sutcliffe 效率系数是93.2%,平均模拟相对误差4.6%,尽管小部分模拟流量值偏低估,但整体黄洲河流域实测退水曲线与模拟退水曲线吻合度较高。

喀斯特流域的洪水退水过程与总径流量和基流值有关,退水时间和速率与流域降雨强度有关。洪水起退流量与暴雨洪水历时共同影响着喀斯特流域退水过程。

#### 参考文献:

- [1] LAND L S. The origin of massive dolomite [J]. Journal of Geological Education, 1985, 33(2): 112-125.
- [2] WARREN J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth - Science Reviews, 2000, 52(1): 1-81.
- [3] MAO T, WANG G, ZHANG T. Impacts of climatic change on hydrological regime in the Three - River headwaters region, China, 1960 - 2009 [J]. Water Resources Management, 2016, 30(1): 115-131.
- [4] 代军臣, 王根绪, 宋春林, 等. 三江源区径流退水过程演变规律 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1342-1350.
- [5] SINGH K P, STALL J B. Derivation of base flow recession curves and parameters [J]. Water Resources Research, 1971, 7(2): 292-303.
- [6] ANDERSON M G, BURT T P. Interpretation of recession flow [J]. Journal of Hydrology, 1980, 46(1-2): 89-101.
- [7] JONES P N, MCGILCHRIST C A. Analysis of hydrological recession curves [J]. Journal of Hydrology, 1978, 36(3-4): 365-374.
- [8] ZECHARIAS Y B, BRUTSAERT W. Recession characteristics of groundwater outflow and base flow from mountainous watersheds [J]. Water Resources Research, 1988, 24(10): 1651-1658.
- [9] 魏玲娜, 丁颖, 陈喜, 等. 淮河上游紫罗山流域枯水频率及退水规律分析 [J]. 人民长江, 2020, 51(2): 86-90.
- [10] 闫丹丹, 王树谦, 张智超, 等. 邯郸东部典型平原区的径流退水过程模拟研究 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(21): 107-113.
- [11] 李敬茹. 青海某水库工程退水影响分析 [J]. 河南水利与南水北调, 2018, 47(11): 35-36.
- [12] 肖玲, 雷双超, 杨刚. 马蹄水库取用水及退水方案合理性水资源论证 [J]. 中国水能及电气化, 2018, 23(7): 7-10.
- [13] 金亦, 张文平, 刘金涛, 等. 地形指数与流域退水特征的关系分析 [J]. 人民长江, 2017, 48(13): 23-25, 53.
- [14] LYON S W, DESTOUNI G, GIESLER R, et al. Estimation of permafrost thawing rates in a sub - arctic catchment using recession flow analysis [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(5): 595-604.
- [15] 郝庆庆, 陈喜, 马建良. 南方喀斯特流域枯季退水影响因子分析 [J]. 水土保持研究, 2009, 16(6): 22-25, 29.
- [16] 何江湖, 肖时珍, 曾成, 等. 湿润亚热带典型白云岩流域的化学剥蚀速率: 以贵州施秉黄洲河流域为例 [J]. 地球与环境, 2018, 46(3): 274-281.
- [17] NATHAN R J, MCMAHON T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses [J]. Water Resources Research, 1990(26): 1030-1042.
- [18] 周星, 沈忱, 倪广恒, 等. 结合退水曲线的数字滤波基流分割方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(3): 318-323, 330.
- [19] 徐榕榕, 王小刚, 郑伟. 基流分割方法研究进展 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 352-359.
- [20] AHIABLA M L, CHAUBEY I, ENGEL B, et al. Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana USA [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2013(476): 13-27.
- [21] PARTINGTON D, BRUNNER P, SIMMONS C T, et al. Evaluation of outputs from automated baseflow separation methods against simulated baseflow from a physically based, surface water - groundwater flow model [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2012(458-459): 28-39.

- [22] 李建柱,冯平,王勇. 地下径流退水过程规律[J]. 天津大学学报, 2010,43(5):400-405.
- [23] BRUTSAERT W, NIEBER J L. Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau [J]. *Water Resources Research*, 1977, 13(3): 637-643.
- [24] JAIN S K, SUDHEER K P. Fitting of hydrologic models: a close look at the Nash-Sutcliffe index [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2008, 13(10): 981-986.
- [25] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1: A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [26] 翟然,王国庆,万思成,等. 清流河流域场次洪水的退水特征及过程模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 1-4.
- [27] FATCHUROHMAN H, ADJI T N, HARYONO E, et al. Baseflow index assessment and master recession curve analysis for karst water management in Kakap Spring, Gunung Sewu [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018(148): 012029.
- [28] 陈立华,杨开鹏,黄都熠. 平治河岩溶流域退水规律分析与降雨径流模拟[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 238-244.
- [29] DOCTOR D H. Geologic controls on karst aquifer function as reflected in hydrographs and chemographs: relating recession coefficients to flow regimes, chemical loads, and fractal dimensions [J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 2007, 39(6): 516.
- [30] ARANCIBIA J, VAN D A I J M, MULLIGAN M, et al. The role of climatic and terrain attributes in estimating baseflow recession in tropical catchments [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(11): 2193-2205.

(编辑:江文)

引用本文: 张先荣,曾成,狄永宁,等. 喀斯特地区流域洪水退水过程分析:以贵州省黄洲河流域为例[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 56-62.

## Analysison flood recession progress in karst watershed: case of Huangzhou River Basin in Guizhou Province

ZHANG Xianrong<sup>1</sup>, ZENG Cheng<sup>2</sup>, DI Yongning<sup>3</sup>, XIAO Shizhen<sup>3</sup>, XIAO Hua<sup>3</sup>, HE Jianghu<sup>3</sup>, ZHANG Ying<sup>3</sup>  
(1. School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. School of Karst Science, Guizhou Normal University State Engineering Technology, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** In order to study flood recession in karst watershed, flood recession in Huangzhou River Basin of Guizhou province was simulated by exponential model formula and baseflow separation method. The results showed that: ① There was a correlation between total flow variation and baseflow variation in flood process of Huangzhou River Basin, and the flood recession was effected by rainfall duration, flow size and lithologic characteristics of the basin. ② Recession rate of surface runoff was faster than that of underground runoff, large number of karst pores and cracks in the basin accelerated the drainage of underground runoff. ③ Initial recession flow was between 11.99m<sup>3</sup>/s and 381.81m<sup>3</sup>/s, and recession coefficient ranged from 0.033 to 0.084. The larger the recession coefficient was, the shorter the duration of rainstorm and flood was, and vice versa. ④ Exponential model for flood recession could simulate the flood regression in Huangzhou River Basin.

**Key words:** flood recession; baseflow separation; exponential model for flood recession; Huangzhou River Basin; karst area