

基于 SWAT 模型的赤水河流域径流年内分配特征及其对降水的响应研究

刘家威, 蔡宏, 郑婷婷, 唐敏

(贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: [目的] 研究赤水河流域径流年内分配的非均匀性变化特征及其对降水的响应情况, 为流域水源的开发利用及防洪治涝等研究提供决策依据。[方法] 以赤水河流域中上游为研究区, 构建 SWAT 模型相关数据库并对流域径流进行模拟。以实测逐月径流数据对模型进行率定验证。基于模型输出结果, 结合降水/径流集中度和集中期, 分析流域径流年内分配特征及其对降水的响应情况。[结果] 两个水文站率定期决定系数(R^2)与纳什效率系数(Ens)均在 0.83 以上, 验证期 R^2 与 Ens 均在 0.69 以上, 满足精度要求; 流域降水和径流年内分配不均匀性显著, 二者变化趋势较为一致, 主要集中在 6—8 月; 径流集中度的时空分布受降水集中度影响显著, 由于入渗和蒸散作用的影响, 前者通常大于后者, 但当降水集中度较低时($PCD < 0.3$), 径流集中度不再完全以降水集中度为主导; 由于流域径流对降水变化的响应存在滞后性, 径流集中期往往大于降水集中期, 短期较小幅度的降水量增加对降水集中期影响显著, 而对径流集中期影响有限。[结论] 降水是引起赤水河流域径流集中度/集中期变化的主导因素, 而在不同降水量条件下径流系数的变化, 是径流集中度/集中期对降水集中度/集中期产生不同响应特征的主要原因。

关键词: SWAT 模型; 降水; 径流; 集中度; 集中期; 赤水河

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)03-0180-08

中图分类号: P333

文献参数: 刘家威, 蔡宏, 郑婷婷, 等. 基于 SWAT 模型的赤水河流域径流年内分配特征及其对降水的响应研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 180-187. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220401.001; Liu Jiawei, Cai Hong, Zheng Tingting, et al. Annual distribution characteristics of Chishui River watershed runoff and its response to precipitation based on SWAT model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 180-187.

Annual Distribution Characteristics of Chishui River Watershed Runoff and Its Response to Precipitation Based on SWAT Model

Liu Jiawei, Cai Hong, Zheng Tingting, Tang Min

(Mining College, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: [Objective] The variation characteristics of non-uniformity for the distribution of annual runoff of Chishui River and its response to precipitation was analyzed in order to provide a basis for decision-making regarding the development and utilization of water resources and flood control in the upper and middle reaches of the Chishui River basin. [Methods] We constructed a database for the SWAT model to simulate watershed runoff. The model was calibrated and validated with measured monthly runoff data. Model output data were combined with precipitation/runoff concentration degree (PCD/RCD) and concentration period (PCP/RCP), and the characteristics of annual runoff distribution and its response to precipitation were determined. [Results] The coefficient of determination (R^2) and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (Ens) values for two hydrological stations were greater than 0.83 for the calibration period, and greater than 0.69 for the validation period, which meet the accuracy requirements. The annual distributions of precipitation and runoff was significantly uneven, and the change trends for the two were relatively consistent, with precipitation and runoff mainly concentrated in June to August. The temporal and spatial distributions of RCD were significantly affected by PCD. Due to infiltration and evapotranspiration, watershed RCD was usually greater than PCD.

收稿日期: 2021-11-10

修回日期: 2022-01-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“河流水质对岩溶山地坡面景观变化响应的时空模拟”(41901225)

第一作者: 刘家威(1996—), 男(汉族), 四川省宜宾市人, 硕士研究生, 研究方向为流域水环境遥感。Email: lijw2008@163.com。

通信作者: 蔡宏(1980—), 女(汉族), 甘肃省金昌市人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感方面研究。Email: hcai@gzu.edu.cn。

But when $PCD < 0.3$, RCD was no longer dominated by PCD. Due to the lag in the response of watershed runoff to precipitation changes, RCP was often greater than PCP, and a small, short-term increase in precipitation had a significant impact on PCP, but a limited effect on RCP. [Conclusion] Precipitation was the leading factor causing changes in RCD and RCP in Chishui River watershed. Changes in the runoff coefficient in different periods were the main reason for the different response characteristics of RCD/RCP compared with PCD/PCP.

Keywords: SWAT model; precipitation; runoff; concentration degree; concentration period; Chishui River

赤水河是长江上游的重要支流,也是经过贵州省的主要河流之一。赤水河流域降水和径流的年内分配和年际变化情况,深刻地影响着流域内的水文水资源特征、生态环境以及当地居民的生活质量与生命财产安全。川河径流是由流域内气象要素和下垫面共同作用的产物^[1],对径流影响最大的因素包括降水、气温和人类活动等^[2-4]。其中,气温主要是从两个方面对径流产生影响,一是影响蒸散发,二是影响融雪。赤水河发源于云南省镇雄县板桥镇长槽村漈水岩,发源地以林地为主,没有显著的雪山^[5]。因此相较于黑河^[4]等流域内存在雪山的河流,赤水河径流量受温度的影响只需考虑蒸散发。另外,赤水河是少数没有修建大型水坝的河流,且该地区长期注重生态保护,人类活动对赤水河流域径流量的影响较小。综上所述,相比其他河流,赤水河径流受降水影响更加显著,因此研究该流域径流对降水的响应特征显得很有必要。

国内学者已经做了很多关于区域降水/径流变化特征的研究。Zhang 等^[6]把候降水量看作矢量,提出一种度量降水年内非均匀分配的方法,很好地反映年总降水量年内非均匀分配特性。刘贤赵等^[7]将这种方法推广到月尺度并用到径流年内分配的研究上,研究发现,月径流集中度比径流年内不均匀系数具有更高的分辨能力和敏感性,用集中度和集中期能够充分反映径流年内分配的不均匀性,具有客观准确、概念明确、适用性强的优点。但国内学者在利用集中度和集中期进行相关问题的研究时,仍存在两个问题:①相关研究仅单独对降水或径流的集中度与集中期进行讨论,少有人同时对两者进行分析,并以此探讨径流对降水的响应情况,这使得降水与径流间年内分配的特征关系难以被很好地解释;②在对径流的相关研究中,主要基于水文站点多年的实测数据进行。由于数据收集难度较大,往往只能以一两个站点的实测数据来反映流域整体状况,无法对流域内各支流的情况进行详细探究,所得结论也是各区域综合影响下的结果。这使得对各支流流域径流的年内分配特点及其对降水年内分配的响应特征描述不够细致。

SWAT 模型在大尺度流域水文过程的模拟预测方面有着广泛的应用,故本文以赤水河流域中上游为研究区,利用多源数据,建立 SWAT 模型,从而完成对

流域内各子流域降水及径流的模拟。以 SWAT 模型输出结果,结合降水和径流的集中度与集中期,研究流域降水与径流的分配和变化情况以及径流对降水变化的响应关系,以期为赤水河流域水文预报、河流水质与流域生态保护及防洪治涝等提供有效的参考。

1 数据来源

1.1 研究区概况

赤水河是长江上游的主要支流,发源自云南省镇雄县,自东向西流经云南、贵州和四川 3 省,至合江城东汇入长江。地理位置: $27^{\circ}15'2''$ — $28^{\circ}25'59''$ N, $104^{\circ}44'19''$ — $106^{\circ}58'36''$ E。本文以赤水河流域中上游为研究区,以丙安古镇作为赤水河中上游和下游的分界点。赤水河中上游河长约 258.23 km,流域集水面积约为 11 610 km²,岩溶十分发育,两岸陡峭,多险滩急流,地表坡降大,用地类型以林地、草地和耕地为主。研究区内以典型的中亚热带湿润气候为主,气温较高,降水主要表现为降雨,且集中在夏季,冬季较少,年内分配极不均匀。研究区地势特征见图 1。

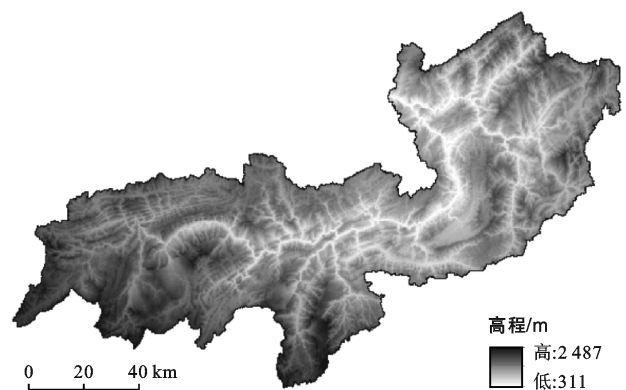


图 1 赤水河流域地势

1.2 数据来源

本次试验中所使用的数据包括赤水河流域中上游的数字高程模型(DEM),2015 年土地利用数据、土壤数据、研究区内部及周围 5 个气象站点的日值气象数据以及二郎坝站和茅台站两个水文站点的实测径流数据。其中数字高程模型(DEM)、土壤类型分布图以及土地利用类型分布图定义的投影坐标系均为 WGS_1984_UTM_Zone_48 N,各项数据详细情况及来源见表 1。

表 1 数据详情及来源

数据类型	规格	数据来源
数字高程模型	ASTER GDEM 数据 分辨率 30 m×30 m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)
土壤数据	世界土壤数据库(HWSD) 分辨率 1 000 m×1 000 m	国家青藏高原科学数据中心 (http://westdc.westgis.ac.cn/)
土地利用数据	2015 年 分辨率 30 m×30 m	中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/)
气象数据	2007—2020 年逐日气象数据 (包括降水、气温、风速、相对湿度和日照时数)	国家气象科学数据中心 (http://data.cma.cn/)
径流数据(茅台站、二郎坝站)	2010—2019 年实测逐月径流数据	贵州省水文水资源局

2 研究方法

2.1 SWAT 模型构建

SWAT(soil and water assessment tool)模型近年来已得到了广泛应用。国内部分学者在不同流域成功建立了 SWAT 模型并完成了对流域径流的模拟^[8-9]。水文响应单元(HRU)是 SWAT 模型的基本计算单元,由土地利用、土壤类型和坡度共同定义,通过阈值划分^[10]。SWAT 模型可结合给定的气象数据、水文数据以及管理措施等信息,单独计算每个 HRU 的内部循环,并在子流域进行累计汇总,再通过河网对子流域进行有机连接以模拟地表汇流。

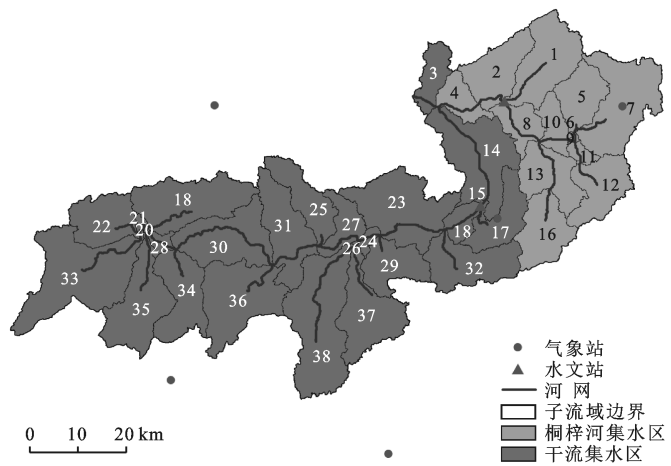
2.1.1 土地利用数据库 本研究所使用的土地利用数据来自中科院资源环境科学数据中心,研究区土地利用类型共被划分为了 18 个二级类,与 SWAT 模型内采用的由美国地质调查局指定的分类系统不一致^[11]。故根据研究区实际情况,综合考虑模型自带的土地利用属性数据库,将研究区土地利用类型重分类为 6 类,分别为:林地、耕地、草地、水域、建设用地及未利用地。

2.1.2 土壤数据库 土壤数据库中所需土壤相关的物理属性参数较多,主要存在 3 种收集途径。其中大多数参数可以直接在 HWSD 的属性数据库中查询获取;土壤层结构(TEXTURE)、土壤湿密度(SOL_BD1)、土壤可利用有效水(SOL_AWC1)以及饱和水力传导系数(SOL_K1)可利用由美国农业部与华盛顿州立大学开发的 SPAW 软件计算得到;土壤侵蚀力因子(USLE_K1)则可利用现今被普遍认可的由美国学者 Williams 提出的计算方法进行求算。

2.1.3 气象数据库 气象发生器用于当站点气象数据缺测时对缺失值进行填补^[12]。气象数据库应采用尽量长时间序列的气象数据进行构建,以使得其中的各项参数尽可能地趋近于真实值。本次试验共收集到了研究区内及周围共 5 个气象站 2000—2020 年逐日的降水、最高气温、最低气温、平均气温、平均气压、

平均风速、相对湿度以及日照时数的实测数据用以构建气象发生器。SWAT 模型气象发生器参数计算工作量大,本研究运用北京师范大学数字流域实验室杨霞等^[13]研究集成的各个参数公式建立的计算程序 SWATWeather 进行相关参数的计算。

2.1.4 子流域与水文响应单元的划分 已有研究发现子流域划分存在一个合理的水平^[14],子流域划分个数不宜过多或过少^[15]。本文参考史晓亮等^[16]的研究成果,设置最小集水面积为研究区总面积的 2% (250 km²),将研究区划分为 38 个子流域,划分结果见图 2。考虑到下垫面因素对流域水文过程的影响显著,故本文结合研究区实际情况和研究目的,分别设定土地利用、土壤与坡度的最小面积百分比阈值为 5%,10%与 5%,将研究区划分为 776 个 HRU。



注:阿拉伯数字 1—38 为子流域编号。下同。

图 2 赤水河流域中上游子流域划分结果

2.2 模型评价方法

本研究以二郎坝站和茅台站的实测逐月径流数据为参照,利用 SWAT-CUP 工具中的 SUFI-2 算法对 SWAT 模型输出结果进行率定及验证。由于研究区涉及区域较大,赤水河中上游除干流外还存在有较多支流,其中尤以桐梓河(赤水河一级支流)涉及的范围最广。在划分的 38 个子流域中,桐梓河共涉及 13

个子流域。考虑到赤水河中上游干流与桐梓河所涉及区域的各项参数可能存在差异,故本文采用先支流后干流的率定验证方法,先以二郎坝站实测径流数据对桐梓河径流模拟结果进行率定验证,再以茅台站实测径流数据对赤水河流域中上游干流径流模拟结果进行率定验证。选用决定系数(R^2)及纳什效率系数(Ens)作为模型模拟精度的评定指标,其计算公式如下:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{sa})(Q_{o,i} - Q_{oa})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{sa})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{oa})^2} \quad (1)$$

$$\text{Ens} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{oa})^2} \quad (2)$$

式中: R^2 表示确定性系数;Ens表示纳什效率系数; $Q_{s,i}$ 为第*i*个模拟值; Q_{sa} 表示模拟值的平均值; $Q_{o,i}$ 为第*i*个实际观测值; Q_{oa} 为实际观测值的平均值; n 为值的个数。 R^2 值越接近于1,表明模拟值越接近实测值,模拟效果越好;Ens用于评价模型模拟值与实测值的拟合程度,其值越接近1,说明模拟值与实测值拟合程度越高^[17]。一般来说 $R^2 \geq 0.6$, $\text{Ens} \geq 0.5$ 同时达到时,就说明结果达到模拟精度要求^[18-20]。

2.3 流域降水总量与径流总量的计算

值得注意的是,SWAT模型输出降水量模拟结果的方式是:分别输出各子流域降水量(mm)。因此在计算流域降水总量(m^3)时,不能简单地将模型输出的各子流域降水量相加,而是需将模型输出的各子流域降水量进行单位换算后,乘以对应子流域的面积,得到各子流域的降水总量,最后再相加得到流域的降水总量。类似地,SWAT模型输出的径流量模拟结果单位是(m^3/s),需乘以对应的时长,才能与流域降水总量单位统一。

2.4 集中度和集中期的计算

为方便研究流域降水和径流的时间变化规律,本文引入降水和径流的集中度与集中期两个量化指标。其中,降水集中度(PCD)是一个能反映降水量在各个月份集中程度的无量纲数,取值范围为0~1,PCD值越接近于1,说明其年降水量越集中于某一时间段;反之越接近于0,说明其各时间段的降水量分配较为均匀。降水集中期(PCP)则用来描述降水的集中时段^[21]。径流集中度(RCD)与径流集中期(RCP)同理。

集中度、集中期是以矢量圆均等分圆周角为辨别区间,角度指示降水集中在某一时间段,集中程度的量化可以从集中度的矢量模数量值体现^[22]。当采用月为计算时段时,每个月的天数是不同的,因此,必须做一定程度的概化处理,即不考虑月大、月小,均视为

同一个时段长^[2]。降水集中度与集中期计算公式如下:

$$\text{PCD}_i = \frac{\sqrt{R_{xi}^2 + R_{yi}^2}}{R_i} \quad (3)$$

$$\text{PCP}_i = \tan^{-1} \left(\frac{R_{xi}}{R_{yi}} \right) \quad (4)$$

$$R_{yi} = \sum_{j=1}^{12} r_{ij} \times \cos \theta_j \quad (5)$$

$$R_{xi} = \sum_{j=1}^{12} r_{ij} \times \sin \theta_j \quad (6)$$

式中: PCD_i , PCP_i 分别为研究区第*i*年的降水集中度和集中期; R_i 为研究区在第*i*年内的降水总量; r_{ij} 为研究区第*i*年第*j*月的降水量; θ_j 为第*j*月对应的方位角(一年的方位角为一个圆周,即 360°)。

3 结果与分析

3.1 模型参数率定验证

本次研究以2007—2009年作为模型的预热期,将收集到的两个水文站10a实测逐月径流数据分为两个部分,其中2010—2017年部分用于模型率定,2018—2019年部分用于模型验证。模型率定验证的结果见表2。水文站逐月径流量实测值与模拟值对比见图3。从表2和图3中可以看出模型模拟结果较好,基本达到精度要求。

表2 赤水河流域二水文站径流模拟结果评价

项目	率定期(2010—2017年)		验证期(2018—2019年)	
	R^2	Ens	R^2	Ens
茅台站	0.85	0.83	0.82	0.80
二郎坝站	0.86	0.84	0.78	0.69

3.2 径流年内年际分配情况及对降水的响应

基于模型模拟结果计算得到研究区2010—2019年月降水和月径流总量,结果见图4。从图4可知,总体上赤水河流域中上游月径流总量受月降水总量影响显著,两者变化趋势基本一致,且年内降水与径流分配极不均匀。研究时段内月降水量与月径流量最大值均出现在2014年7月,该月降水量达 $3.09 \times 10^9 \text{ m}^3$,约占全年降水总量的21.1%;月径流量达 $1.74 \times 10^9 \text{ m}^3$,约占全年径流总量的31.5%。而月降水量与月径流量最小值均出现在2010年2月,该月平均降水量为 $9.95 \times 10^7 \text{ m}^3$,平均径流量为 $1.52 \times 10^7 \text{ m}^3$,分别占全年平均降水量与径流量的0.93%与0.55%。各年降水与径流主要集中在夏季的6—8月。就降水而言,6—8月降水总量占多年年均降水总量的45.4%,最大降水月的降水量是最小降水月降水量的9.8倍。而6—8月径流总量占多年年均径流总量的

52.0%，最大径流月的径流量是最小径流月径流量的 14 倍。由此可见，相对降水而言，径流的年内变化更

为剧烈，不稳定性更强，其年内分配的不均匀性更为突出。

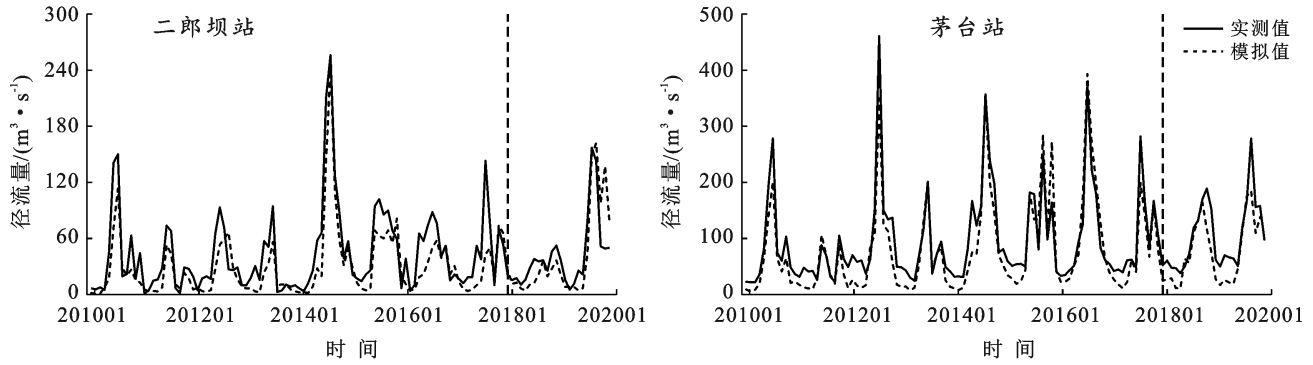


图 3 二郎坝站和茅台站的径流实测值与模拟值

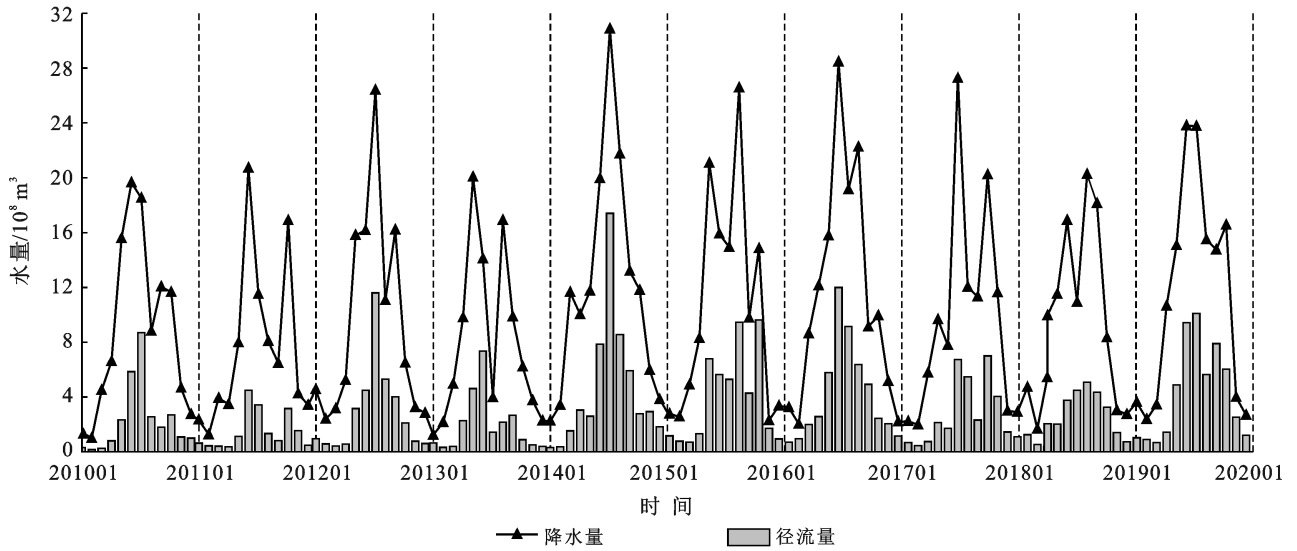


图 4 赤水河流域中上游多年月降水/径流总量变化

3.3 研究区降水/径流集中度

2010—2019 年赤水河流域中上游降水集中度与径流集中度计算结果见图 5。由图 5 可知，研究区径流集中度与降水集中度多年变化趋势基本一致，降水集中度对径流集中度影响较为显著；同时，径流集中度显著高于降水集中度。

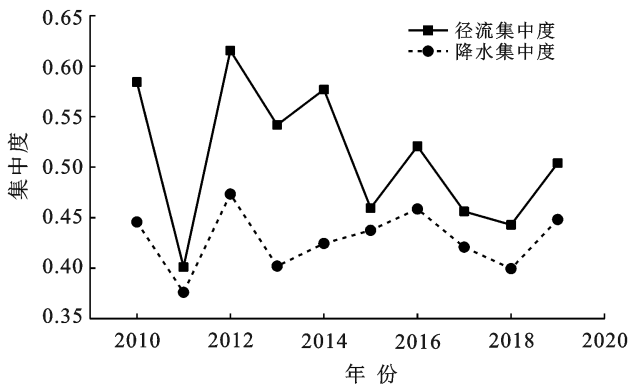


图 5 赤水河流域多年降水/径流集中度

为探究以上规律的普适性，本文计算了研究区 13 个支流流域 2010—2019 年年均径流/降水集中度，其空间分布情况见图 6(通过自然断点法划分等级)。其中，西南部各支流降水/径流集中度较大，西北部各支流降水/径流集中度较小，径流与降水集中度空间分布高度一致，进一步证明研究区径流集中度受降水影响显著。13 个支流流域 2010—2019 年共 130 组降水/径流集中度计算结果见图 7。其中径流集中度大于降水集中度的有 119 组，径流集中度小于降水集中度的仅有 11 组。

经计算，赤水河流域中上游年平均径流系数约为 0.31，这意味着流域降水中大部分通过蒸散发或被下垫面截留等方式损失，少部分转化为径流。图 8 为赤水河流域中上游 2010—2019 年各年旱季(1—4 月及 11, 12 月)与雨季(5—10 月)径流系数。其中，各年雨季径流系数均大于同年旱季径流系数，这使得径流集中度往往大于降水集中度。

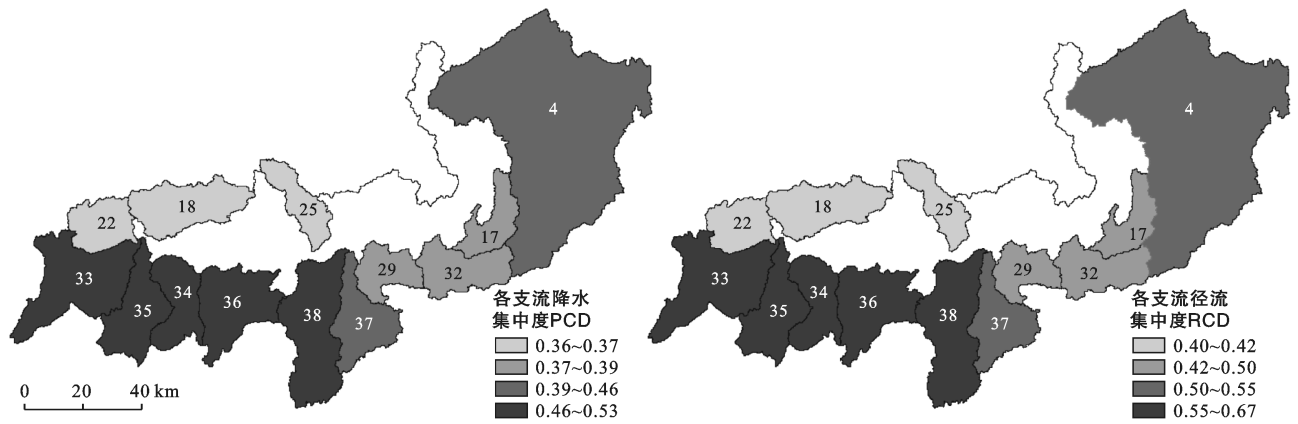


图 6 赤水河流域各支流多年平均降水/径流集中度空间分布特征

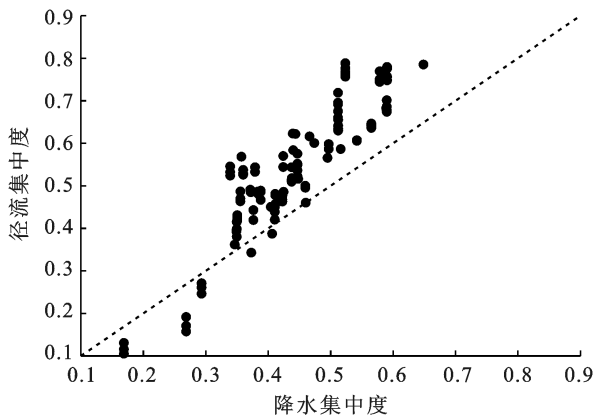


图 7 赤水河流域各支流流域多年降水/径流集中度

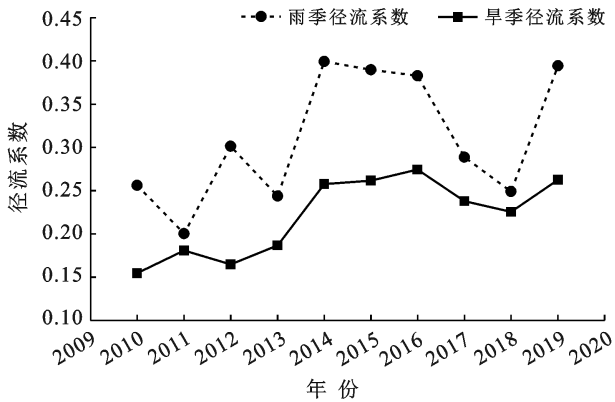


图 8 赤水河流域多年旱季与雨季径流系数

已有研究发现,土壤、土地利用及流域地质条件的变化对径流系数影响较小,而降水量变化对径流系数的影响较大^[23]。根据水量平衡原理,在任意时段内,流域降水量等于产生的径流量、蒸散发量及蓄水变化量之和。一方面,当流域发生降雨事件时,降雨在地表主要有两个分流过程(由于降雨时间短暂,降雨蒸发量忽略不计),即入渗和径流^[24]。当降雨强度小于或等于土壤入渗率时不产流,并以降雨强度向下入渗;当降雨强度大于入渗率时,则形成超渗产流;当

土壤最大蓄水量小于累积入渗量时,则形成蓄满产流^[25]。因此,当降雨强度大于入渗强度时,降雨强度越大,则入渗造成的损失占比越低,尤其是当累积入渗量大于土壤最大蓄水量后,入渗作用将不再显著,此时降水损失比例最小,大部分降水将直接转化为径流。另一方面,由于潜在蒸散发为在充分供水条件下的区域蒸散发能力,当未满足充分供水条件时,区域的实际蒸散发小于潜在蒸散发,此时实际蒸散发随供水量增加而增加;当满足充分供水条件时,则实际蒸散发等于潜在蒸散发,并不再随降水量增加而继续增加。

由此可知,当降水量较小时,由于入渗和蒸散作用,其变化对径流量的影响并不显著,此时径流系数较小。当降水量足够大时,入渗量和蒸散发量不再随降水量增加而增加,此时降水量越大,则径流系数越大。因此研究区雨季径流系数通常大于同年旱季径流系数。Norbiato D 等^[26]在对意大利北部 14 个集水区进行研究时也发现,径流系数随降水总量的增加而增加,且径流系数的空间变异性可以被降水量较好地解释。

进一步观察 11 组径流集中度小于降水集中度 ($RCD \leq PCD$) 的数据发现,当降水集中度较大时 ($PCD > 0.3$), PCD 与 RCD 的差值均在 0.03 以内;仅当降水集中度较小时 ($PCD < 0.3$),才会出现 RCD 显著小于 PCD 的情况。这是由于当降水集中度较小时,该地区降水的年内分配比较均匀且整体处于较低水平。此时,年内降水的小幅变化对径流集中度的影响极小,而气温、人类活动等因素对径流集中度的影响也变得更为显著。因此当降水集中度较小时,径流集中度不再完全以降水集中度为主导,可能出现径流集中度显著大于降水集中度的情况。

3.4 研究区降水/径流集中期

2010—2019 年赤水河流域中上游降水/径流集

中期计算结果见图 9。研究区降水与径流集中期多年变化趋势基本一致,前者对后者影响显著。研究区多年平均降水集中期与径流集中期分别为 179 和 188,其对应日期分别约为 6 月 29 日和 7 月 8 日,相差约 9 d。由于绝大部分降水需流经下垫面才能汇入河道,使得流域径流对降水变化的响应存在滞后效应^[27],故径流集中期往往大于降水集中期。

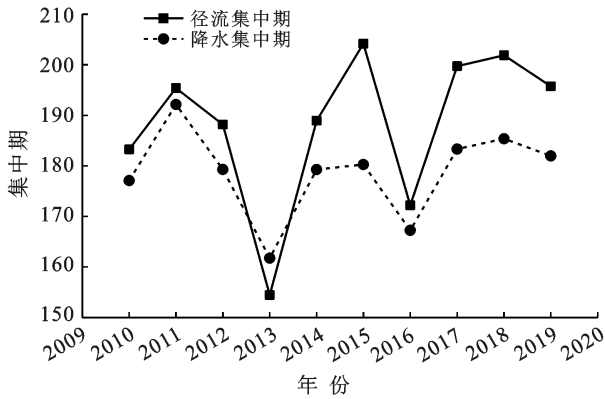


图 9 赤水河流域多年降水/径流集中期

针对图 9 中研究区 2013 年 $PCP < RCP$ 的情况做进一步分析。如图 10 所示为赤水河流域中上游各

支流流域 2013 年 PCP 与 RCP 计算结果。各支流编号为对应的子流域编号,桐梓河支流由于涉及多个子流域,故以桐梓河下游汇入口处的 4 号子流域为其编号。其中 17, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 号支流流域降水集中期均大于同年径流集中期。

对比以上支流流域 2013 年逐月降水和径流,结果如图 11 所示。各支流流域年内降水量均存在两个峰值,分别为 5 月和 8 月;而径流量仅在 6 月有一个峰值,部分支流径流量在 8 月有小幅上升,但并不明显,这使得以上支流流域径流集中期小于同年降水集中期。

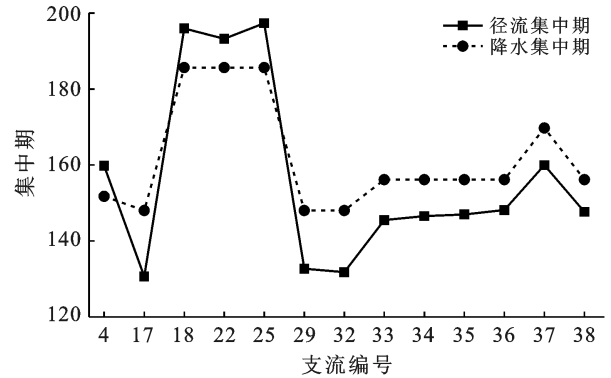


图 10 赤水河流域各支流 2013 年降水/径流集中期

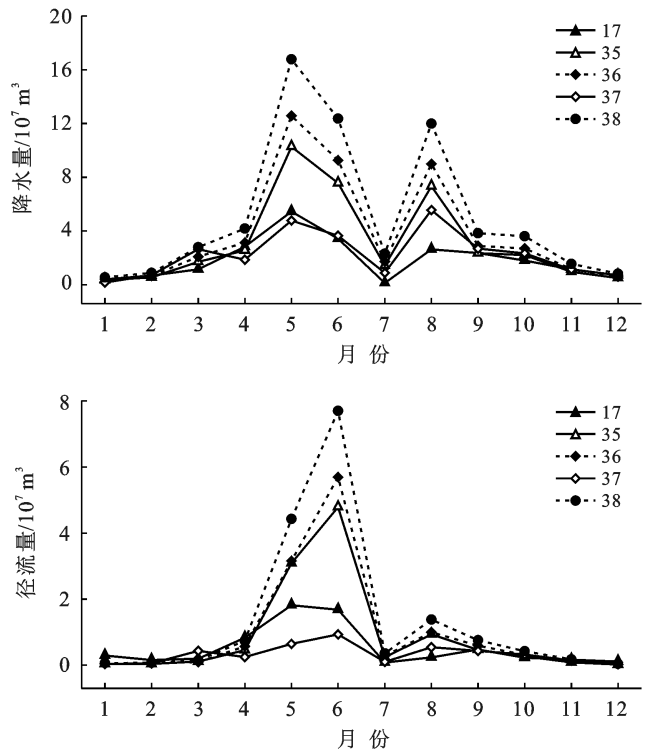
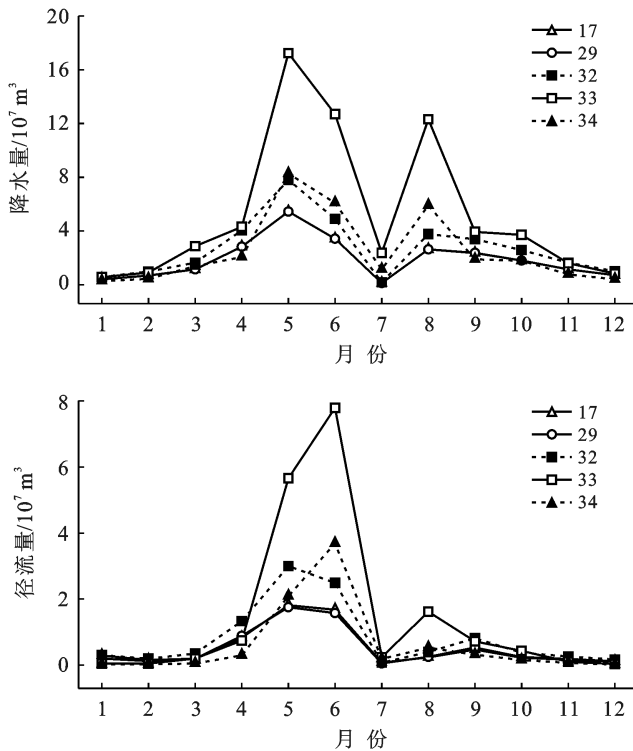


图 11 赤水河流域各支流 2013 年逐月降水和径流

对比两个降水峰值,各支流 5 月降水量均大于 8 月,6 月降水量也维持在较高水平,而 9 月降水量大幅下降。经计算,5,6 月各支流平均降水总量是 8,9 月的 1.73 倍,而 5,6 月各支流平均径流总量是 8,9 月

径流总量的 4.97 倍。结合前述分析,说明 5,6 月降水总量足够大,使得降水损失远低于 8,9 月,而降水的损失比例在不同降水量条件下的变化,是各支流径流量在两个降水峰值期间有着不同响应的原因。

4 结论

(1) 本研究实现了 SWAT 模型对赤水河流域中上游月径流量的有效模拟。模型率定验证时采用了先支流后干流的方式,茅台站与二郎坝站在率定期的 R^2 与 Ens 均大于 0.83,验证期的 R^2 与 Ens 均大于 0.69,说明 SWAT 模型能很好地模拟赤水河流域中上游的径流量。

(2) 赤水河流域中上游径流量变化趋势与降水量变化趋势基本一致,径流量受降水量影响显著。降水和径流年内分配均主要集中于 6—8 月,但相对于降水,径流年内分配的不均匀程度更高。

(3) 研究区径流集中度的时空分布受降水集中度影响显著。同时,由于入渗和蒸散作用的影响,径流系数在旱季和雨季有着不同的表现。旱季径流系数低,而雨季径流系数高,因此流域径流集中度往往大于降水集中度。但当降水集中度较低时($PCD < 0.3$),径流集中度不再完全以降水集中度为主导。

(4) 研究区径流集中期受降水集中期影响显著。同时,流域径流对降水变化的响应存在滞后性,径流集中期往往大于降水集中期。但由于入渗和蒸散作用的影响,径流对短期较小幅度的降水量增加并不敏感。故短期较小幅度的降水量增加会对降水集中期产生较为显著的影响,但对径流集中期影响有限。

【参 考 文 献】

- [1] 刘小园,刘扬,王芳.近 60 年青海湖流域径流特征及演变规律研究[J].中国农村水利水电,2020(11):1-7.
- [2] 崔豪,肖伟华,周毓彦,等.气候变化与人类活动影响下大清河流域上游河流径流响应研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):54-62.
- [3] 陈启会,张俊,侯雨坤,等.近 60 年气候与土地利用变化对金沙江径流的影响[J].人民长江,2018,49(23):47-53.
- [4] 罗开盛,陶福祿.黑河径流对 LUCC 和气候变化的敏感性分析[J].干旱区研究,2018,35(4):753-760.
- [5] 汪舒.赤水河源密码[J].中华儿女,2019(2):56-64.
- [6] Zhang Lujun, Qian Yongfu. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003,17(2):146-163.
- [7] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等.基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J].地理科学,2007,27(6):791-795.
- [8] 张爱玲,王韶伟,汪洋,等.基于 SWAT 模型的资水流域径流模拟[J].水文,2017,37(5):38-42.
- [9] 周璐,唐仲华,陈敏知.基于 SWAT 模型的江汉—洞庭平原径流模拟研究[J].人民长江,2015,46(S1):1-5.
- [10] 李硕.GIS 和遥感辅助下流域模拟的空间离散化与参数化研究与应用[D].江苏 南京:南京师范大学,2002.
- [11] 秦振雄,彭涛,王继保,等.基于 SWAT 模型的淮河流域设计洪水修订[J].湖泊科学,2021,33(2):595-606.
- [12] 许自舟,周旭东,隋伟娜,等.基于 SWAT 模型的碧河流域入海径流模拟研究[J].海洋环境科学,2020,39(2):216-222.
- [13] 杨霞,贾尔恒·阿哈提,邱秀云,等.乌伦古河流域 SWAT 模型基础数据库构建[J].水资源与水工程学报,2013,24(6):74-78.
- [14] Romanowicz A A, Vancloster M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: A case study in the Thyle catchment, Belgium [J]. Ecological Modelling, 2005, 187(1):27-39.
- [15] 陈肖敏,郭平,彭虹,等.子流域划分对 SWAT 模型模拟结果的影响研究[J].人民长江,2016,47(23):44-49.
- [16] 史晓亮,李颖,赵凯,等.流域离散化对分布式水文模型径流模拟的影响[J].中国农业气象,2013,34(1):30-36.
- [17] Abbaspour K C, Johnson C A, van Genuchten M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure [J]. Vadose Zone Journal, 2004,3(4):1340-1352.
- [18] 陈亮,董晓华,李英海,等.基于 SWAT 模型的黄柏河东支流域气候变化的水文响应研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(2):1-5.
- [19] 丁洋,赵进勇,徐征和,等.基于 SWAT 模型的平原河湖水网区小流域径流过程模拟[J].水生态学杂志,2019,40(2):7-13.
- [20] Schuol J, Abbaspour K C, Srinivasan R, et al. Estimation of freshwater availability in the West African subcontinent using the SWAT hydrologic model [J]. Journal of Hydrology, 2008,352(1/2):30-49.
- [21] 高颖会,顾斌贤,柳一玲,等.山东省降水集中程度及其与旱涝的关系[J].水电能源科学,2021,39(1):18-21.
- [22] 王飞.基于降水相态识别的锡林河流域降雪集中度与集中期特征分析及融雪径流模拟研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [23] Merz R, Blöschl G. A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria [J]. Water Resources Research, 2009,45(1):1-19.
- [24] 吴希媛,张丽萍.降水再分配受雨强、坡度、覆盖度影响的机理研究[J].水土保持学报,2006,20(4):28-30.
- [25] 张丽萍,张妙仙.土壤侵蚀正态模型试验中产流畸变系数[J].土壤学报,2000,37(4):449-455.
- [26] Norbiato D, Borga M, Merz R, et al. Controls on event runoff coefficients in the eastern Italian Alps [J]. Journal of Hydrology, 2009,375(3/4):312-325.
- [27] 董才文,张正栋,杨传训,等.1960—2013 年广东省梅江流域径流特征及其对降水的滞后效应[J].水土保持通报,2016,36(3):38-45.