

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0016

官明虹,王根绪,李尤.不同植被覆盖流域对不同设计暴雨雨型的响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):141-151. GUAN M H, WANG G X, LI Y. Response of different vegetation cover to different design rainstorm patterns in the watersheds[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 141-151. (in Chinese)

# 不同植被覆盖流域对不同设计暴雨雨型的响应

官明虹<sup>1,2</sup>, 王根绪<sup>3</sup>, 李尤<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 四川大学水利水电学院/水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

**摘要:**为揭示山区不同植被覆盖流域对不同设计暴雨雨型的响应规律,更合理地分析山区暴雨洪水,以四川省大邑、关口、汉王场流域为研究区域,应用时空变源混合产流模型,对在不同重现期设计暴雨雨型条件下的降水在不同植被覆盖的流域上形成的水文过程进行分析。研究表明:时空变源混合产流模型在四川省 3 个流域均具有较好的适用性;四川省大邑、关口、汉王场流域林草植被覆盖率为汉王场>关口>大邑流域,径流系数、平均径流系数、洪峰模数、平均洪峰模数均为大邑>关口>汉王场流域;在不同重现期条件下,径流系数随着暴雨雨型雨峰位置后移而逐渐减小,洪峰模数则不断增大;在不同设计暴雨雨型条件下,随着重现期的不断增大径流系数先增大后逐渐减小而后趋于稳定状态,而洪峰模数则是不断增大。

**关键词:**洪水模型;设计暴雨雨型;时空变源混合产流模型;关口流域;汉王场流域

中图分类号:TV213;P933 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



由于全球气候变暖趋势的加剧,极端气候事件增加,暴雨频发。在我国,暴雨是常见的气象灾害之一,已经影响到了人民的生产生活需要<sup>[1-2]</sup>。暴雨频发不仅会导致城市内涝、江河暴涨,还会出现山洪、滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害<sup>[3]</sup>。在这些地质灾害发生过程中,雨型是除雨量、雨强之外的重要影响因素。雨型即暴雨强度在时间尺度上的分配过程<sup>[4]</sup>。文献<sup>[5]</sup>提到在设计暴雨雨型方面,苏联的包高马佐娃等提出了模式雨型,Keifer 等<sup>[6]</sup>、Huff<sup>[7]</sup>、Pilgrim 等<sup>[8]</sup>、Yen 等<sup>[9]</sup>分别采用不同的方法对短历时和长历时设计暴雨雨型进行了研究。国内学者也陆续开展了相关的研究应用,如:赵康乾等<sup>[10]</sup>分析了降雨雨型和强度对 SWMM 模型参数局部灵敏度的影响;侯精明等<sup>[11]</sup>从不同雨型对内涝积水影响角度进行数值模拟,揭示了暴雨雨型对内涝积水程度的量化研究;成丹等<sup>[12]</sup>利用同频率分析法和 Huff 雨型

分析法确定了武汉主城区历时 24 h 的设计暴雨雨型,并对比 2 种方法设计的暴雨雨型对城市排涝的影响。设计暴雨雨型的应用研究大多在城市地区,关于山区小流域的应用研究较少,然而山区暴雨更易形成山洪,因此更应该对山区小流域的设计暴雨雨型加以关注。

土地利用与土地覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)是直接影响流域水文过程的主要原因之一,对流域径流的形成有着十分重要的意义<sup>[13-15]</sup>。分布式水文模型在研究 LUCC 和气候变化对流域水循环影响方面的广泛应用<sup>[16-18]</sup>,使得 LUCC 对流域径流的影响成为水文学的研究热点之一。如:陈芬等<sup>[19]</sup>构建晋江西流域暴雨次洪分布式模型,模拟晋江西流域在 1988 年和 2006 年土地利用/覆被变化情景下的洪水响应;雷超桂等<sup>[20]</sup>应用 HEC-HMS 模型模拟分析 LUCC 对不同重现期暴雨洪水事

收稿日期:2021-05-06 修回日期:2021-10-19 网络出版时间:2021-10-22

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211022.1357.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(41790431);中国科学院战略性先导科技专项(XDA23090201)

作者简介:官明虹(1995—),女(藏族),四川小金人,主要从事洪水模型模拟与预测研究。E-mail:guanmh@imde.ac.cn

通信作者:王根绪(1965—),男,甘肃天水人,研究员,博士研究生导师,主要从事生态水文学研究。E-mail:wanggx@scu.edu.cn

件的影响,发现土地利用变化引起不同重现期洪水过程和洪水量级发生改变,对于洪量的影响较洪峰变化明显;高玉琴等<sup>[21]</sup>利用 CA-Markov 模型预测流域 2028 年土地利用情况并构建 HEC-HMS 水文模型研究秦淮河流域在高速城市化背景下土地利用变化的暴雨洪水响应机制;张国栋等<sup>[22]</sup>通过 SWAT 模型精确地模拟了汾河上游流域汛期月径流量及全年径流量。目前大多数关于 LUCC 的研究都集中在时间尺度上土地利用/覆被变化以及预测未来土地利用/覆被变化对径流的影响,对比同一空间不同流域土地利用/覆被类型对降水的响应研究相对较少,因此分析不同设计暴雨雨型对同一空间尺度上不同植被覆盖流域径流的影响具有一定的研究价值。

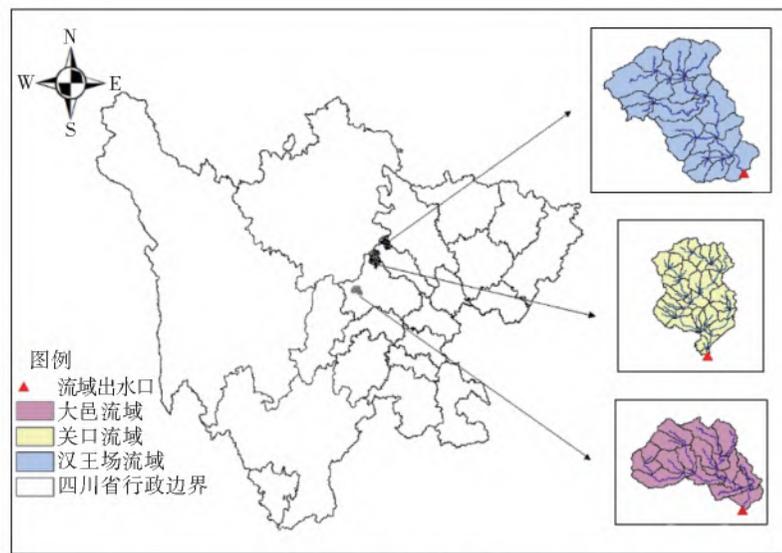
因此,以四川省大邑、关口、汉王场流域为例,采

用更适用于山区小流域的模块化小流域暴雨洪水分析软件 (flash flood modul simulation system, FFMS),将设计暴雨雨型应用于山区不同植被覆盖的小流域之上,定量地研究在不同重现期不同设计暴雨雨型条件下降水在不同植被覆盖流域上产生的径流,对于观察在不同重现期不同暴雨雨型条件下的洪水过程变化有着重要的意义,以期为山区暴雨洪水研究提供科学支撑和参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于长江上游地区的 3 个小流域,各有特点,分别为汉王场流域、关口流域、大邑流域,均属于山区小流域,流域地理位置见图 1(a)。



(a) 3个流域地理位置



(b) 汉王场研究区域

(c) 关口研究区域

(d) 大邑研究区域

图 1 流域地理位置

Fig. 1 Geographical location of river basin

汉王场流域位于四川德阳市绵竹市汉旺镇万灯村,地处  $31^{\circ}44'N \sim 31^{\circ}70'N, 103^{\circ}90'E \sim 104^{\circ}18'E$ ,属于沱江水系,年平均降水量 960 mm,河长 43.93 km,集水面积 403.6  $km^2$ 。汉王场流域内雨量控制站点 2 个,分别为清平、天池雨量站点,水文控制站点为汉王场水文站,见图 1(b)。汉王场流域土壤质地类型为砂黏壤土、黏壤土、砂壤土。

关口流域位于四川成都市彭州市丹景山镇,地处  $31^{\circ}08'N \sim 31^{\circ}33'N, 103^{\circ}74'E \sim 103^{\circ}92'E$ ,属于沱江水系,年平均降水量为 867 mm,河长 64.8 km,集水面积 624.64  $km^2$ 。关口流域内雨量控制站点 2 个,分别为白果坪、大宝雨量站点,水文控制站点为关口水文站,见图 1(c)。关口流域土壤质地类型较为复杂,有砂黏壤土、砂壤土、黏壤土、粉壤

土等。

大邑流域位于四川成都市大邑县晋原镇清江村,地处 30°56'N~30°74'N,103°28'E~103°53'E,属于岷江水系,年平均降水量可达 1 000 mm 左右,河长 37.49 km,集水面积 274.83 km<sup>2</sup>。大邑流域内雨量控制站点 2 个,分别为雾山、新源雨量站点,水文控制站点为大邑水文站,见图 1(d)。大邑流域土壤质地类型主要为砂黏壤土、黏壤土等,土壤质地类型较为简单。

### 1.2 流域相似性分析

已有研究<sup>[23-25]</sup>表明,影响流域径流特征的因素较多,主要是降水与蒸散发、土壤质地、下垫面地形地貌、植被覆盖等。中国西南地区地形与地表条件十分复杂,具有独特的地理特征。四川省关口、汉王场、大邑 3 个流域均属于长江上游流域,其中,汉王场、关口流域属于沱江水系,大邑流域属于岷江水系。从降雨特征来看,汉王场流域年均降雨量为 960 mm,关口流域年均降雨量为 867 mm,大邑流域年均降雨量为 1 000 mm 左右。从蒸散发量来看,汉王场流域多年平均蒸散发量为 113.68 mm/a,关口流域多年平均蒸散发量为 128.32 mm/a,大邑流域多年平均蒸散发量为 140.27 mm/a。3 个小流域的年均降雨量、年均蒸散发量均相差不大。土壤质地方面,3 个流域内均匀分布有砂黏壤土、砂黏土、黏壤土、粉壤土等,但以砂黏壤土和黏壤土为主,两者分布面积占各流域的百分比分别为 77%、88%、89%,可认为 3 个流域土壤质地类型较为相似。从下垫面地形地貌来看,关口、汉王场、大

邑 3 个流域的平均坡度分别为 30.11°、34.90°、22.78°,平均高程为 1 210.81、1 243.66、816.38 m。汉王场与大邑流域之间平均坡度和平均高程存在一定差异,考虑到气候和下垫面条件决定了流域地形指数频率分布状态,因此对汉王场和大邑流域进行地形指数频率分析<sup>[26-28]</sup>,结果见图 2,可见大邑和汉王场流域地形指数频率分布相似,可认为大邑与汉王场流域的气候和下垫面条件相似。因此,可认为 3 个小流域对洪峰模数和径流系数的其他影响因素基本相似,径流系数和洪峰模数的变化是由地表植被的不同引起的。

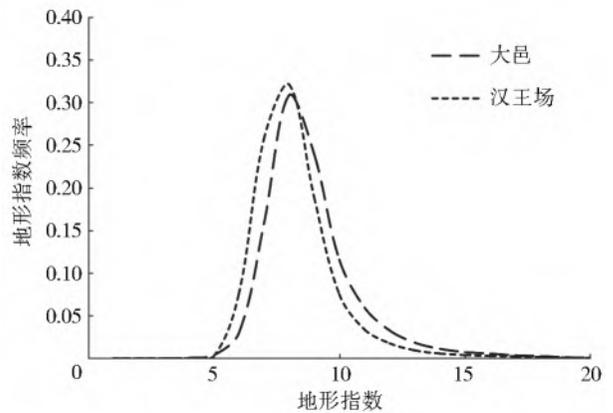


图 2 地形指数频率分布

Fig. 2 Frequency distributions of the topographic index

### 1.3 数据来源

用来构建分布式水文模型的流域数字化资料主要包括地理信息数据高程和河道数据、土壤质地及土地利用数据,水文数据作为输入数据对模型参数进行率定和验证。数据来源及说明见表 1。

表 1 原始数据来源及说明

Tab. 1 Source and description of original data

分类名称	数据内容	数据精度	数据来源
地形数据	DEM 数据	栅格数据,30 m 分辨率	地理空间数据云
河道数据		矢量数据,30 m 分辨率	由 DEM 生成
土壤质地			来自全国山洪灾害调查评价成果
土地利用			来自全国山洪灾害调查评价成果
大邑	降雨数据	1968—2012 年	来自全国山洪灾害调查评价成果
	水文数据	1968—2012 年	来自全国山洪灾害调查评价成果
关口	降雨数据	1968—2012 年	来自全国山洪灾害调查评价成果
	水文数据	1968—2012 年	来自全国山洪灾害调查评价成果
汉王场	降雨数据	1968—2012 年	来自全国山洪灾害调查评价成果
	水文数据	1968—2012 年	来自全国山洪灾害调查评价成果

### 1.4 时空变源混合产流模型

采用中国水利水电科学研究院刘昌军等<sup>[29]</sup>研发的模块化小流域暴雨洪水分析系统(FFMS)对四川省大邑、关口及汉王场流域暴雨洪水过程进行模

拟分析。该软件集成了多种国外分布式水文模型的气象、产汇流、河道侵蚀和洪水演进等 50 余个算法模块,具有参数自动率定和手动率定算法模块等多个参数全局自动优化算法。小流域暴雨洪水计算的

分布式水文模型主要包括产流计算、汇流计算、基流计算以及洪水演进计算等 4 个模块。其中:产流模块包括自主研发的基于地貌水文响应单元的时空变源混合产流模型、初损后损法、Green 和 Ampt 损失模型等;汇流计算包括 SCS 单位线法,用户自定义单位线法和克拉克单位线法;基流计算包括单月常数法和线型水库法;洪水演进包括运动波、马斯京根法和滞后演算法<sup>[30]</sup>。时空变源混合产流模型是此次研究采用的产流计算模型,该模型围绕山丘区中小流域地形地貌多样、产流机制时空变化复杂等问题,划分了山丘区山坡地貌水文响应单元,采用基于一维入渗理论的包气带土壤非线性下渗计算方法,计算湿润锋下移过程及入渗量,提出超渗、蓄满时段转化准则,建立了在平面、垂向、时段上时空变源混

合产流模型,以精确模拟山丘区中小流域产流时空分布过程。该模型在平面上提出了山坡地貌水文响应单元的划分标准,研究不同山坡地貌响应单元下垫面参数的差异,建立各类山坡地貌水文响应单元与产流机制的对应关系。垂向上综合考虑了截留、填洼、超渗产流、蓄满产流、优先流、壤中流、基流和渗漏出流等过程。

根据表 1 所收集的资料,利用模块化小流域暴雨洪水分析软件构建四川省 3 个小流域暴雨洪水过程并进行模拟分析。该模型采用的产汇流计算方法分别为时空变源混合产流模型和 SCS 单位线法;洪水演进计算选用运动波方法,计算时不考虑基流的影响。利用反距离插值的方法计算出各子单元的降雨量<sup>[31-32]</sup>。具体建模过程见图 3。

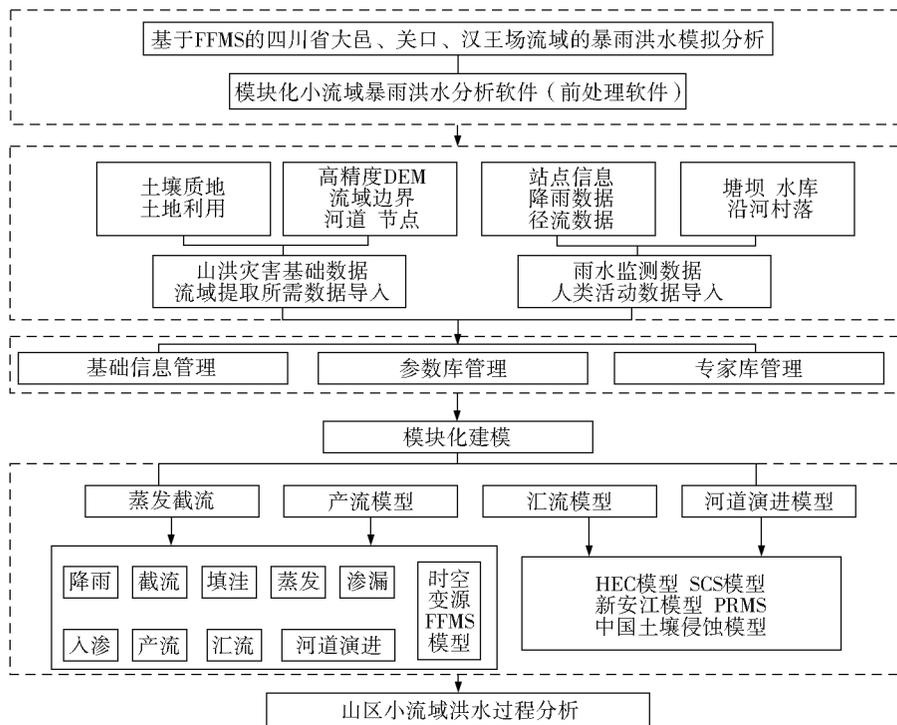


图 3 基于模块化小流域洪水分析系统(FFMS)的四川省 3 个流域暴雨洪水模拟模型

Fig. 3 Rainstorm flood simulation model of three basins in Sichuan Province based on modular small watershed flood analysis system (FFMS)

### 1.5 设计暴雨雨型

参考《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》和《四川省暴雨统计参数图集》,选取下垫面较为复杂的关口流域,设计暴雨历时为 24 h 情况下的暴雨均值  $\bar{P}$ 、变差系数  $C_v$ ,按偏态系数  $C_s = 3.5C_v$  推求设计暴雨。根据四川省 1 d 暴雨分区综合雨型表得 24 h 设计暴雨时程分配过程,暴雨频率考虑 1 a 一遇(99%)、5 a 一遇(20%)、10 a 一遇(10%)、20 a 一遇(5%)、50 a 一遇(2%)、100 a 一遇(1%) 6 种频率,设计暴雨量结果及相关参数值见表 2。在研究中被广泛采用的雨型有芝加哥雨型、三角形雨型、

Huff 雨型和模式雨型等<sup>[33]</sup>。为了对研究区的多种降雨事件进行分析,本研究选取模式雨型<sup>[34]</sup>中的三类雨峰位置不同的单峰雨型来进行雨型设计,即雨峰偏前型、雨峰居中型及雨峰偏后型。不同重现期设计暴雨雨型结果见图 4。

本文采用径流系数和洪峰模数来表征流域的产水及产洪能力。径流系数是任意时段内的径流深度与同时段内的降水深度的比值,综合反映流域下垫面对降雨-径流关系的影响。洪峰模数是洪峰流量与流域面积的比值,反映了一个流域洪峰流量的强度。

表 2 设计暴雨量  
Tab. 2 Design-storm rainfall

暴雨历时/h	变差系数	降雨均值/mm	各重现期暴雨量/mm					
			P=99%	P=20%	P=10%	P=5%	P=2%	P=1%
24	0.58	130	55.9	175.5	227.5	280.8	349.7	403.0

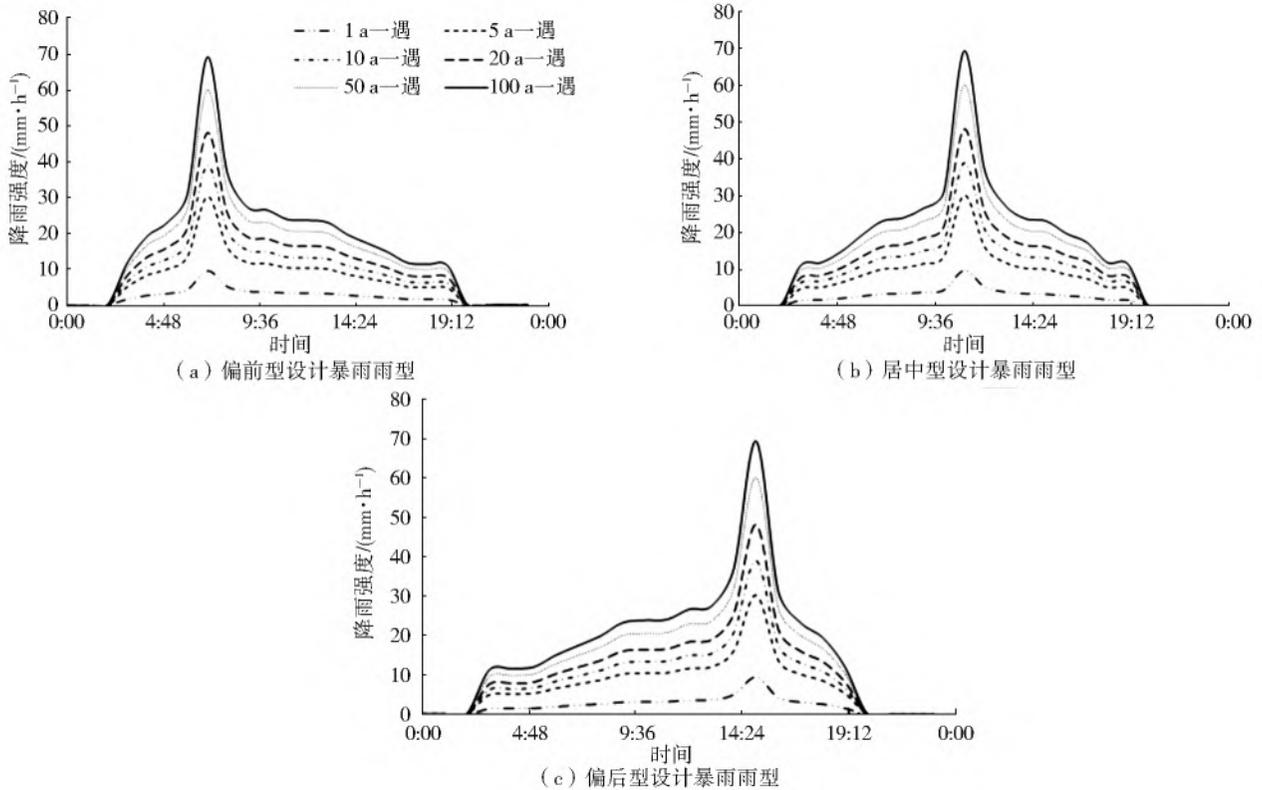


图 4 不同重现期设计暴雨雨型 (长历时  $T=24$  h)

Fig. 4 Design rainstorm patterns with different return periods (Long duration  $t=24$  h)

## 2 结果与分析

### 2.1 模型率定与验证

在使用时空变源混合产流模型对四川省 3 个流域水文站的径流过程进行模拟的过程中,采用

手动调参方法对模型参数进行敏感性分析可得最为敏感的参数见表 3,分别为饱和水力传导度、土壤初始含水率、土壤厚度、流域实际蒸散发、土壤向地下水渗漏系数、上层土壤厚度等。

表 3 时空变源混合产流模型的率定参数

Tab. 3 Calibration parameters of spatio-temporal mixed source runoff generation model

参数代码	参数含义	参数值域	参数取值		
			关口	汉王场	大邑
conductivity	饱和水力传导度	$9.00 \times 10^{-8} \sim 9.00 \times 10^{-6}$	$2.72 \times 10^{-6} \sim 4.69 \times 10^{-6}$	$2.78 \times 10^{-7} \sim 7.02 \times 10^{-6}$	$8.40 \times 10^{-8} \sim 2.78 \times 10^{-7}$
initial_water_content	土壤初始含水率	0.001~0.230	0.020~0.200	0.050~0.290	0.020~0.290
basin_actet	流域的实际蒸散发/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0~1 000.00	99.30	92.33	106.85
basin_potet	流域潜在蒸散发/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0~5 000.00	209.02	217.88	213.49
hru_imperv	HRU的不透水面百分比/%	0~100.00	0.23	0	2.64
layer_depth	土壤厚度/cm	0.50~2.00	0.52~1.57	0.12~1.51	0.12~0.90
soil2gw_max	土壤向地下水渗漏系数	0.05~1.00	0.06~0.92	0.06~0.72	0.29~0.99
layer_top_depth	上层土壤厚度/cm	0.001~0.500	0.040~0.480	0.080~0.490	0.020~0.350
pref_flow_den	优先流土壤厚度/cm	0.05~1.00	0.09~0.90	0.17~0.89	0.15~0.99
slowcoef_lin	慢速出流线性系数	0.01~1.00	0.30~0.99	0.06~0.88	0.12~0.98
fastcoef_lin	快速出流线性系数	0.01~1.00	0.02~0.97	0.22~0.87	0.57~0.98
slowcoef_sq	慢速出流平方系数	0.01~2.00	0.07~0.87	0.21~2.00	0.02~2.00
fastcoef_sq	快速出流平方系数	0.01~2.00	0.52~1.87	0.33~1.93	0.01~1.72

采用建立好的四川省 3 个小流域分布式水文模型对流域水文过程进行模拟。3 个流域的率定期与验证期见表 4。采用 Nash-Sutcliffe( $E_{ns}$ )和决定系数( $R^2$ )对模型模拟精度进行评价,计算公式为

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{o,t} - Q_{m,t})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{o,t} - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{o,t} - \bar{Q}_o)(Q_{m,t} - \bar{Q}_m)}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (Q_{o,t} - \bar{Q}_o)^2 \sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - \bar{Q}_m)^2}} \right]^2 \quad (2)$$

式中: $Q_o$  表示观测流量值,  $m^3/s$ ;  $Q_m$  表示模拟流量值,  $m^3/s$ ;  $\bar{Q}_o$  表示观测流量平均值,  $m^3/s$ ;  $\bar{Q}_m$  表示模拟流量平均值,  $m^3/s$ ;  $Q_t$  表示第  $t$  时刻的流量值,  $m^3/s$ 。

表 4 3 个流域洪水模拟结果

Tab. 4 Flood simulation results of the three basins

水文站	时间	洪水场次	$E_{ns}$	$R^2$
关口	率定期(1968—1992)	12	0.71	0.74
	验证期(1993—2012)	11	0.73	0.77
大邑	率定期(1980—1998)	17	0.84	0.85
	验证期(1999—2012)	12	0.79	0.81
汉王场	率定期(1994—2003)	6	0.85	0.85
	验证期(2004—2012)	3	0.60	0.65

模型模拟结果见表 4。由表 4 可知,大邑、关口、汉王场流域洪水模拟结果在率定期与验证期均

较理想,除汉王场流域在验证期的 NASH 系数和确定性系数为 0.60 和 0.65 以外,其余均达 0.7 以上。

## 2.2 土地利用分布特征

本文采用的四川省 3 个小流域的土地利用数据均为 2010 年土地利用数据。为分析不同土地利用/覆被流域对于不同设计暴雨雨型的时空响应,运用 ArcGIS 软件计算出四川省 3 个小流域的各土地利用类型占比及土地利用类型图,结果见表 5 和图 5。可以看出:四川省 3 个小流域均以有林地为主,关口流域有林地占流域总面积的 57.01%,大邑流域有林地占流域总面积的 65.62%,汉王场流域有林地占流域总面积的 48.17%。其次是草地,关口流域草地占流域总面积的 25.70%,大邑流域草地占流域总面积的 13.65%,汉王场流域草地占流域总面积的 42.06%。耕地、沼泽地、水域、水利设施用地等次之。汉王场和关口流域草地面积占比较大,对于流域径流减少具有一定的贡献作用<sup>[35]</sup>。因此,为综合考虑有林地、草地及耕地对不同设计暴雨雨型的响应,参考水土保持措施分为林草地、梯田、坡耕地和其他用地。3 个流域各自的土地利用占比为:关口流域林草植被覆盖率为 82.71%,沼泽地及其他土地利用类型为 17.29%;大邑流域林草植被覆盖率为 79.29%,沼泽地及其他土地利用类型为 20.71%;汉王场流域林草植被覆盖率为 90.23%,沼泽地及其他土地利用类型为 9.77%。

表 5 3 个流域土地利用类型

Tab. 5 Land use types of the three watersheds

流域	土地利用类型						
	有林地/%	草地/%	耕地/%	沼泽地/%	水域及水利设施用地/%	房屋建筑(区)/%	流域总面积/ $km^2$
关口	57.01	25.70	16.65	0.38	0.03	0.23	624.64
四川 大邑	65.62	13.67	18.00	0	0.07	2.64	274.83
汉王场	48.17	42.06	9.77	0	0	0	403.60

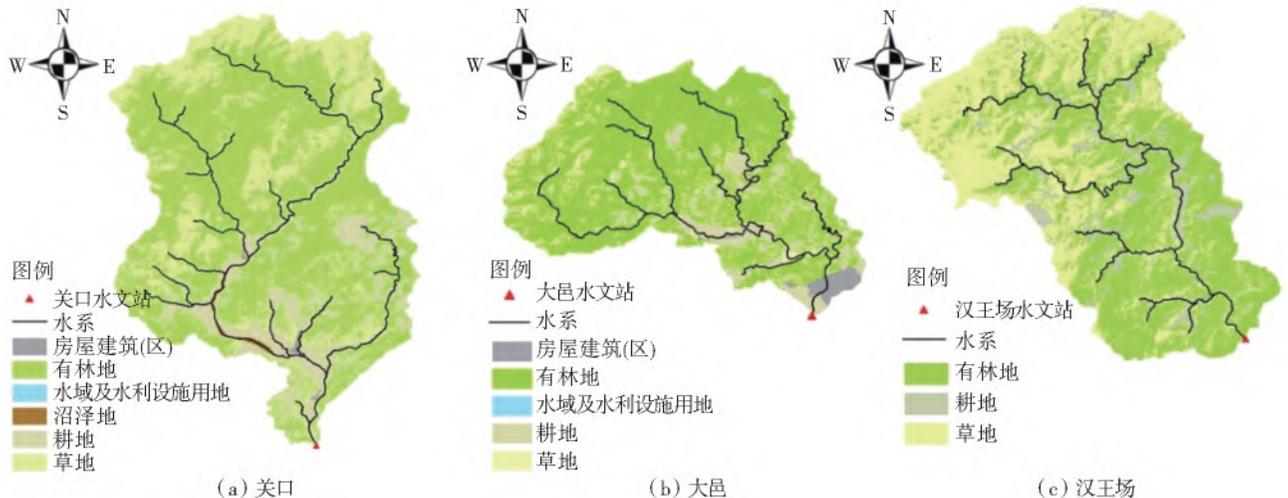


图 5 3 个流域土地利用类型

Fig. 5 Map of land use types of the three watersheds

### 2.3 不同植被覆盖流域对不同暴雨雨型的响应

由第 2.2 节土地利用分布特征分析可知四川省 3 个流域各自的土地利用占比。由此可见,林草地占流域总面积的比例排序依次为,汉王场>关口>大邑流域。利用时空变源混合产流模型率定好的 3 个流域的参数数据,输入不同重现期设计暴雨雨型数据,可以得到在不同重现期设计暴雨雨型下的径流量,并对在不同重现期设计暴雨雨型下的径流量进行径流系数和洪峰模数分析,结果见表 6 和表 7。

表 6 不同重现期设计暴雨雨型下的径流系数

Tab. 6 Runoff coefficients under design rainstorm patterns with different return periods

流域	雨型	重现期					
		1 a	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a
大邑	偏前型	0.17	0.29	0.31	0.32	0.31	0.31
	居中型	0.16	0.28	0.30	0.31	0.31	0.30
	偏后型	0.16	0.27	0.29	0.30	0.30	0.30
	均值	0.16	0.28	0.30	0.31	0.31	0.30
关口	偏前型	0.17	0.24	0.24	0.23	0.22	0.22
	居中型	0.16	0.23	0.23	0.22	0.22	0.21
	偏后型	0.16	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21
	均值	0.16	0.23	0.23	0.23	0.22	0.21
汉王场	偏前型	0.11	0.13	0.15	0.15	0.15	0.15
	居中型	0.11	0.13	0.14	0.15	0.14	0.14
	偏后型	0.11	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13
	均值	0.11	0.13	0.14	0.15	0.14	0.14

表 7 不同重现期设计暴雨雨型下的洪峰模数

Tab. 7 Flood peak modulus under design rainstorm patterns with different return periods

流域	雨型	重现期					
		1 a	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a
大邑	偏前型	3.05	18.29	27.12	34.90	45.12	53.65
	居中型	3.35	21.52	30.95	40.90	53.74	63.98
	偏后型	3.72	24.11	34.97	45.72	59.21	69.93
	均值	3.37	21.31	31.01	40.51	52.69	62.52
关口	偏前型	3.28	20.49	26.67	33.49	43.30	50.76
	居中型	3.44	23.11	31.00	38.22	49.28	57.11
	偏后型	3.68	25.90	33.93	40.01	50.44	58.92
	均值	3.47	23.17	30.53	37.24	47.67	55.60
汉王场	偏前型	1.75	8.68	13.06	17.59	22.61	24.41
	居中型	1.81	9.73	14.70	19.72	23.81	25.74
	偏后型	1.90	11.11	17.00	22.39	24.39	26.67
	均值	1.82	9.84	14.92	19.90	23.60	25.61

由表 6 和表 7 可知,大邑、关口和汉王场流域在各重现期及雨型条件下的径流系数分别为 0.16~0.32、0.16~0.24、0.11~0.15,洪峰模数分别为 3.05~69.93、3.288~58.920、1.75~26.67  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ,平均径流系数分别为 0.16~0.31、0.16~0.23、0.11~0.15,平均洪峰模数分别为 3.37~62.52、3.47~55.60、1.82~25.61  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。3 个流域在各重现期及各雨型条件下径流系数和平均径流系数均为大邑>关口>汉王场流域,洪峰模数和平均洪峰模数也均为大邑>关口>汉王场流域,说明随着 3 个流域林草植被覆盖率增加,其径流系数、洪峰模数、平均径流系数、平均洪峰模数总体上均呈现减小特征。

#### 2.3.1 不同植被覆盖度流域在不同重现期条件下对洪水的作用

在不同重现期条件下的径流系数在流域内随着设计暴雨雨型的雨峰位置后移而逐渐减小,在不同植被覆盖度流域上随着林草植被覆盖度的增加逐渐减小。以 10 a 一遇的重现期为例:大邑流域偏前型径流系数为 0.31,居中型径流系数为 0.30,偏后型径流系数为 0.29,大邑流域在 3 种雨型下径流系数均值为 0.30;关口流域偏前型径流系数为 0.24,居中型径流系数为 0.23,偏后型径流系数为 0.22,关口流域在 3 种雨型下的径流系数的均值为 0.23;汉王场流域偏前型径流系数为 0.15,居中型径流系数为 0.14,偏后型径流系数为 0.14,汉王场流域在 3 种雨型下的径流系数均值为 0.14。由此可知,在同一重现期条件下,大邑、关口、汉王场流域的径流系数为大邑>关口>汉王场流域,偏前型雨型>居中型雨型>偏后型雨型。林草植被覆盖率的增加导致蒸散发量增加,使得其形成的径流量呈现减少特征,且偏前型雨型由于其较早出现雨峰,降雨强度大于土壤入渗速率,形成的超渗产流更多,而偏后型雨型因其前期降雨强度较为均匀,几乎等于土壤入渗率,其产流方式为蓄满产流,降雨量更易于渗漏和用于土壤储水,形成的径流量相对偏前型雨型而言较少,居中型雨型则介于偏前型雨型和偏后型雨型之间。5 a 一遇、20 a 一遇等重现期具有同样的趋势。

在不同重现期条件下的洪峰模数在流域内随着暴雨雨型的雨峰位置的后移而不断增大,在不同植被覆盖度流域上随着林草植被覆盖度的增加而减小。以 20 a 一遇为例,大邑流域偏前型雨型的洪峰模数为 34.90  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ,居中型雨型的洪峰模数为 40.90  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ,偏后型雨型的洪峰模数为 45.72  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。流域内洪峰模数从偏前

型、居中型到偏后型呈现增加的趋势,即偏后型雨型形成的洪峰流量大于居中型和偏前型雨型。关口、汉王场流域具有同样的趋势。在不同植被覆盖度流域上,大邑、关口、汉王场流域其洪峰模数均值分别为40.51、37.24、19.90  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ,洪峰模数均值为大邑>关口>汉王场,即在各重现期条件下的洪峰流量为大邑>关口>汉王场。

### 2.3.2 不同植被覆盖度流域在不同设计暴雨雨型条件下对洪水的作用

在不同设计暴雨雨型条件下径流系数随着重现期的增大先增大后微弱减小。以居中型雨型为例,大邑流域1、5、10、20、50、100 a一遇的径流系数分别为0.16、0.28、0.30、0.31、0.31、0.30,关口流域1 a一遇到100 a一遇的径流系数分别为0.16、0.23、0.23、0.22、0.22、0.21,汉王场流域1 a一遇到100 a一遇的径流系数分别为0.11、0.13、0.14、0.15、0.14、0.14。可以看出,在同一雨型下,3个小流域随着重现期的增大,径流系数并不是一直增大的,而是在达到一定的峰值之后呈现轻微减小的特征。如大邑流域20 a一遇和50 a一遇的降水,径流系数最大,说明大邑流域在居中型雨型下20 a一遇和50 a一遇的降水相对于1 a一遇、5 a一遇、10 a一遇、100 a一遇而言,其降水更多地形成了径流。

在不同设计暴雨雨型条件下洪峰模数随着重现期的增大而不断增大。同样以居中型雨型为例,大邑流域1 a一遇到100 a一遇的洪峰模数分别为3.35、21.52、30.95、40.90、53.74、63.98  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ,关口流域1 a一遇到100 a一遇的洪峰模数分别为3.44、23.11、31.00、38.22、49.28、57.11  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ,汉王场流域1 a一遇到100 a一遇的洪峰模数分别为1.81、9.73、14.70、19.72、23.81、25.74  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。随着重现期的增大,3个流域的洪峰模数是呈现持续增大的趋势,说明随着重现期增大,在各重现期下的洪峰流量也逐渐增大。

在不同流域植被覆盖之下,随着林草植被覆盖度增加,径流系数、平均径流系数、洪峰模数和平均洪峰模数均减小。植被可以改变流域产汇流的过程,同时,植物根系可以增大土壤中大孔隙的比例,使得土壤含水量增加。随着3个流域林草植被覆盖度增加,流域径流量相应减少,土壤的蓄水能力逐渐增大。这与刘元昊等<sup>[36]</sup>的研究结果基本相同,洪峰模数与林草地、梯田比例呈显著的负相关关系,随着3个流域林草植被覆盖度增加,对径流形成的削减作用也就越强烈,形成的径流量也就越少。但在不同重现期条件下和不同设计暴雨雨型条件下,径流

系数和洪峰模数呈现出不同的趋势。在不同重现期条件下,流域内雨型由偏前型到居中型再到偏后型,径流系数呈现减小趋势,洪峰模数则呈增大的趋势。在不同设计暴雨雨型下,径流系数随着重现期的增加先增大后微弱减小,洪峰模数随着重现期的增加而逐渐增大。

## 3 结论

本文将模块化小流域分布式水文模型时空变源混合产流模型应用于四川省3个山区小流域,构建3个流域分布式水文模型对流域水文过程进行模拟,并从不同重现期设计暴雨雨型角度分析3个不同土地利用/植被覆盖度流域的水文过程,结论如下。

3个流域的模拟精度评判指标值均在许可范围内,表明时空变源混合产流模型对于小流域的洪水模拟具有一定的适用性。

3个流域在各重现期及各雨型条件下径流系数和平均径流系数、洪峰模数和平均洪峰模数均为大邑>关口>汉王场流域,与流域林草覆盖度大小相反。

在不同重现期条件下,流域内雨型由偏前型、居中型到偏后型,径流系数呈现减小趋势,洪峰模数则是增大的趋势。在不同设计暴雨雨型条件下,径流系数随着重现期的增大先增大后微弱减小,洪峰模数随着重现期的增大而不断增大。

由于我国降雨具有多变性,极端降水事件频发,掌握在不同设计暴雨雨型和不同重现期条件下降雨对不同植被覆盖的山区小流域的影响,有助于分析山区暴雨洪水规律,为山洪灾害预警技术提供支撑。本研究仍然存在很多的不确定性,包括时空变源混合产流模型的不确定性对结果产生的误差,以及本文采用的设计暴雨雨型为模式雨型,未将其他雨型应用于该流域,因此分析不同类别雨型所形成的洪水过程的差异还有待进一步的研究。

### 参考文献(References):

- [1] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):3-8. (DING Y H, REN G Y, SHI G Y, et al. National assessment report on climate (I): The history and future trend of climate change in China[J]. Climate Change Research, 2006, 2(1): 3-8. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.z1.001.
- [2] 李刚,张鹭.基于微波探测资料的全球大气亮温长期变化趋势研究[J].气象科学,2016,36(1):10-19. (LI G, ZHANG L. Long-term trends of brightness tempera-

- ture based on microwave sounding data[J]. Journal of the Meteorological Science, 2016, 36(1): 10-19. (in Chinese) DOI:10.3969/2015jms.0074.
- [3] 侯精明,康永德,李轩,等.西安市暴雨致涝成因分析及对策[J].西安理工大学学报,2020,36(3):1-6. (HOU J M, KANG Y D, LI X, et al. Cause and countermeasure of urban flood inundation caused by heavy storm in Xi'an City[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(3): 1-6. (in Chinese) DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.001.
- [4] 唐明,许文斌,尧俊辉,等.基于城市内涝数值模拟的设计暴雨雨型研究[J].中国给水排水,2021,37(5):97-105. (TANG M, XU W B, YAO J H, et al. Design rainstorm patterns based on numerical simulation of urban flooding[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5): 97-105. (in Chinese) DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.05.015.
- [5] 张晓婧.北京市暴雨特性及对设计暴雨时程的影响分析[D].南京:南京信息工程大学,2015. (ZHANG X J. The features of summer precipitation and the influence of design storm in Beijing area[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015 (in Chinese))
- [6] KEIFER C J, CHU A A. Synthetic storm pattern for drainage design[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1957, 83(4): 1-25. DOI:10.1061/JYCEAJ.0000104.
- [7] HUFF F A. Time distribution of rainfall in heavy storms [J]. Water Resources Research, 1967, 3(4): 1007-1010. DOI:10.1029/wr003i004p01007.
- [8] PILGRIM D H, CORDERY I. Rainfall temporal patterns for design floods[J]. American Society of Civil Engineers, 1975, 101(1): 81-95. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0004557.
- [9] YEN B C, CHOW V T. Design hyetographs for small drainage structures[J]. American Society of Civil Engineers, 1980, 106(6): 1055-1076. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0005442.
- [10] 赵康乾,颜合想,王荫茵,等.降雨雨型和强度对 SWMM 模型参数局部灵敏度的影响分析[J].净水技术, 2018, 37(3): 95-101. (ZHAO K Q, YAN H X, WANG Y Y, et al. Effects of rainfall pattern and intensity on local sensitivity of parameters in storm water management model (SWMM)[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(3): 95-101. (in Chinese) DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2018.03.017.
- [11] 侯精明,郭凯华,王志力,等.设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J].水科学进展,2017,28(6):820-828. (HOU J M, GOU K H, WANG Z L, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 820-828. (in Chinese) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2017.06.003.
- [12] 成丹,陈翠珍,陈正洪,等.武汉市暴雨的雨峰和历时及其排水防涝的分析[J].暴雨灾害,2020,39(5):532-538. (CHENG D, CHEN C Z, CHEN Z H, et al. Analysis of rainfall peak and duration of rainstorm for drainage and waterlogging prevention in Wuhan[J]. Torrential Rain and Disasters, 2020, 39(5): 532-538. (in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.012.
- [13] ZHANG L, NAN Z, YU W, et al. Comparison of baseline period choices for separating climate and land use/land cover change impacts on watershed hydrology using distributed hydrological models[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622: 1016-1028. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.055.
- [14] 郭军庭,张志强,王盛萍,等.应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J].生态学报,2014,34(6):1559-1567. (GUO J T, ZHANG Z Q, WANG S P, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on streamflow in a watershed of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1559-1567. (in Chinese) DOI:10.5846/stsb201304190746.
- [15] 张翔,邓志民,李丹,等.汉江流域土地利用/覆被变化的水文效应模拟研究[J].长江流域资源与环境, 2014, 23(10): 1449-1455. (ZHANG X, DENG Z M, LI D, et al. Simulation of hydrological response to land use/cover change in Hanjiang basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(10): 1449-1455. (in Chinese) DOI: 10.11870/cjlyzy-hj201410016.
- [16] 王莺,张强,王劲松,等.基于分布式水文模型(SWAT)的土地利用和气候变化对洮河流域水文影响特征[J].中国沙漠,2017,37(1):175-185. (WANG Y, ZHANG Q, WANG J S, et al. Applying SWAT model to explore the impacts of land use and climate changes on the hydrological characteristics in Taohe River basin. [J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 175-185. (in Chinese) DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00189.
- [17] 孟现勇,王浩,雷晓辉,等.基于 CMDAS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析[J].生态学报,2017,37(21):7114-7127. (MENG X Y, WANG H, LEI X H, et al. Simulation, validation, and analysis of hydrological components of Jingbo River basin based on the SWAT model driven by CMADS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7114-7127. (in Chinese) DOI:10.5846/stxb201608231719.
- [18] WANG H, SUN F, XIA J, et al. Impact of LUCC on

- streamflow based on the SWAT model over the Wei River basin on the Loess Plateau in China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(4): 1929-1945. DOI: 10.5194/hess-21-1929-2017.
- [19] 陈芬, 陈兴伟, 陈莹. 晋江西流域不同暴雨过程 LUCC 的洪水响应[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2015, 10(4): 63-68. (CHEN F, CHEN X W, CHEN Y. Simulation of effects of LUCC on flood evolution in Xixi watershed, Jinjiang River[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2015, 10(4): 63-68. (in Chinese)) DOI: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2015.04.010.
- [20] 雷超桂, 许有鹏, 张倩玉, 等. 流域土地利用变化对不同重现期洪水的影响: 以奉化江皎口水库流域为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5017-5026. (LEI C G, XU Y P, ZHANG Q Y, et al. Impacts of land-use change on flood process and frequency of various return periods: A case study of Jiaokou reservoir watershed in Fenghua River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5017-5026. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201501220183.
- [21] 高玉琴, 王怀志, 陆晓华, 等. 基于 LUCC 的秦淮河流域暴雨洪水响应分析[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(6): 47-52. (GAO Y Q, WANG H Z, LU X H, et al. Simulation of rainstorm flood response in Qinhuai River drainage basin under land use cover changes[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(6): 47-52. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20171082.
- [22] 张国栋, 张照玺, 余韵, 等. 汾河上游土地利用变化对径流的影响研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(10): 29-33. (ZHANG G D, ZHANG Z X, YU Y, et al. Effects of land use change on runoff in the typical areas in upper Fenhe River basin[J]. *Yellow River*, 2020, 42(10): 29-33. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.10.006.
- [23] 张钰荃, 高成, 陈旭东, 等. 西江上游流域年径流系数变化规律及其影响因素分析[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(5): 37-41. (ZHANG Y Q, GAO C, CHEN X D, et al. Variation of runoff coefficient and its influencing factors in upper reaches of Xijiang River basin[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(5): 37-41. (in Chinese))
- [24] 韩雁, 张士锋. 海河流域径流变异特征及其影响因素研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(1): 7-13. (HAN Y, ZHANG S F. Characteristics of runoff variations and their influencing factor in Haihe River basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(1): 7-13. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.01.02.
- [25] 王庆明, 姜珊, 李森, 等. 大清河流域山区径流量衰减影响因素[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 669-679. (WANG Q M, JIANG S, LI S, et al. Influencing factors of surface runoff attenuation in mountainous areas of the Daqing River basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(4): 669-679. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0070.
- [26] 刘利峰. 基于地形指数的蔡家川流域水文相似性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006. (LIU L F. A research on the hydrological comparability of the Caijiachuan basin based on the topographic index[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006. (in Chinese))
- [27] 孔凡哲, 芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性[J]. *地理研究*, 2003(6): 709-715. (KONG F Z, RUI X F. Hydrological similarity of catchments based on topography[J]. *Geographical Research*, 2003(6): 709-715. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2003.06.005.
- [28] 祝冰洁. 流域水文相似性初步研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2020. (ZHU B J. Preliminary study on hydrological similarity of watershed[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020. (in Chinese))
- [29] 刘昌军, 文磊, 周剑, 等. 小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019, 17(4): 262-270. (LIU C J, WEN L, ZHOU J, et al. Comparative analysis of hydrological and hydrodynamic calculation method for flash flood in small watershed[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2019, 17(4): 262-270. (in Chinese)) DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.04.003.
- [30] 马珊, 刘昌军, 何秉顺, 等. 温德河流域暴雨洪水时空特征及模拟分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(6): 78-84. (MA S, LIU C J, HE B S, et al. Analysis on temporal and spatial characteristics of rainstorm and flood simulation in Wendehe watershed[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(6): 78-84. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.06.010.
- [31] 龙海峰, 熊立华, 万民. 基于 DEM 的分布式水文模型在清江流域的应用[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(1): 71-78. (LONG H F, XIONG L H, WAN M. Application of DEM based distributed hydrological model in Qinjiang River basin[J]. *Resources and Environment in The Yangtze Basin*, 2012, 21(1): 71-78. (in Chinese))
- [32] 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 168-

173. (WANG Z G, LIU C M, WU X F. A review of the studies on distributed hydrological model based on DEM[J]. *Journal of Nature Resources*, 2003, 18(2): 168-173. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-3037. 2003. 02. 007.
- [33] 冯萃敏,米楠,王晓彤,等. 基于雨型的南方城市道路雨水径流污染物分析[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(3): 418-426. (FENG C M, MI N, WANG X T, et al. Analysis of road runoff pollutants in northern city based on the typical rainfall[J]. *Ecology and Environment*, 2015, 24(3): 418-426. (in Chinese)) DOI: 10. 16258/j. cnki. 1674-5906. 2015. 03. 008.
- [34] 岑国平,沈晋,范荣生. 城市设计暴雨雨型研究[J]. *水科学进展*, 1998, 9(1): 41-46. (CEN G P, SHEN J, FAN R S. Research on rainfall pattern of urban design storm[J]. *Advances in Water Science*, 1998, 9(1): 41-46. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 1998. 01. 007.
- [35] 窦小东,黄玮,易琦,等. LUCC及气候变化对澜沧江流域径流的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(13): 4687-4696. (DOU X D, HUANG W, YI Q, et al. Impacts of LUCC climate change on runoff in Lancang River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(13): 4687-4696. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201811302610.
- [36] 刘元昊,韩剑桥,焦菊英,等. 极端暴雨下小流域洪峰对植被和梯田的响应:以山东临朐台风“利奇马”暴雨为例[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 20-25. (LIU Y H, HAN J Q, JIAO J Y, et al. Response of small watershed flood peak to vegetation and terraces under extreme rainstorm: A case study of rainstorm of typhoon "Lekima" in Linqu, Shandong Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 20-25. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stbcbx. 2020. 05. 003.

### Response of different vegetation cover to different design rainstorm patterns in the watersheds

GUAN Minghong<sup>1,2</sup>, WANG Genxu<sup>3</sup>, LI You<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China;*

*2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;*

*3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)*

**Abstract:** The global warming trend has intensified, increasing the frequency of heavy rain disasters in China, making the mountain watershed easy to produce flash floods. Rain pattern was one of the influencing factors of mountain torrent disaster. Applying the designed rainstorm pattern to watersheds with different vegetation coverage rates in mountainous areas may help to analyze the impact of design rainstorm patterns in different return periods in watersheds. Thus it is important to reveal the response law of different vegetation coverage basins in mountainous areas to different rainstorms, and provide technical support for a more reasonable analysis of mountain rainstorms and floods.

The Dayi, Guankou, and Hanwangchang watersheds in Sichuan Province were taken as the study area, and the spatio-temporal variable source mixed runoff generation model was used. The runoff coefficient, flood peak modulus, average runoff coefficient, and average flood peak modulus were used to design rainstorms for different return periods. Analysis of the hydrological process was formed by precipitation under different vegetation coverage in the watershed under different vegetation conditions.

In the three small watersheds of Sichuan Province simulated by the spatio-temporal variable source mixed runoff generation model, the simulation accuracy evaluation index values were within the allowable range, indicating that the spatio-temporal variable source mixed runoff generation model was suitable for flood process simulation in small mountain basins. The runoff coefficient and flood peak modulus showed different characteristics under different return periods and different design rainstorm conditions. Under different return period conditions, the rainfall patterns in the basin show a decreasing trend from the front type, the middle type to the rear type, and the flood peak modulus is increasing. Under different rainstorm designs conditions, the runoff coefficient first increases and then decreases slightly and then tends to a stable state under increase of the return period, and the flood peak modulus increases with the increase of the return period.

The watersheds with different vegetation coverage respond differently to the designed rainstorm patterns in different return periods, and the watersheds with higher vegetation coverage have smaller runoff coefficients and flood peak modulus. Under different return periods and different design rainstorm conditions, the runoff coefficient and flood peak modulus present different characteristics, which have a certain impact on the formation of runoff in the basin. In the Guankou basin, its peak discharge and peak emergence time show a certain trend with the increase of the return period and the different design rainstorm patterns. Observing the changes in the flooding process under different recurrence periods and different design rainstorm conditions is of great significance for mastering the law of storm floods in mountainous areas.

**Key words:** flood model; design rainstorm type; spatio-temporal variable source mixed runoff; Guankou basin; Hangwangchang basin