

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220051

变化环境下可能最大洪水计算研究

刘 甜¹, 梁忠民², 金路熠³, 王士武¹, 温进化¹, 王贺龙¹

(1. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 浙江 杭州 310020; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 浙江省水利信息宣传中心, 浙江 杭州 310009)

摘要: 气候变化与下垫面变化前提下, 多因素共同影响明显增加了流域可能最大洪水(PMF)估算难度。为此, 提出一种集气候模式结果后处理、气候变化情景下相应可能最大暴雨(PMP)估算及土地利用/覆被变化方案设定、基流/前期影响雨量影响分析、基于相似性的 PMP 时空展布于一体的 PMF 计算模式, 将其应用于怒江上游。结果表明, 基流/前期影响雨量及暴雨时空分布不确定性是影响流域 PMF 的重要因素, 气候与下垫面变化双重驱动对于 PMF 影响较大, 且变幅随着变化程度增强而增大。

关键词: 可能最大洪水; 可能最大暴雨; 气候变化; 土地利用/覆被变化; 基流/前期影响雨量; 怒江上游

中图分类号: TV122⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)01-0068-05

1 引言

可能最大洪水(PMF)对大型水利工程防洪安全具有重要作用。PMF 由可能最大暴雨(PMP)经过产汇流计算得到^[1], 当前全球变暖日益显著, 人类活动影响加深, 产汇流过程正深刻变化, 降水、气温、下垫面变化等可能影响 PMF, 估算变化环境下的 PMF 成为研究热点与难点。变化环境包含气候变化和下垫面变化两方面。对于气候变化, 全球气候模式(GCMs)是定量研究气候变化下暴雨洪水变化的常用工具, 但在区域尺度上, 气候模式结果与实测结果之间误差较大, 一些降差方法已被提出^[2], 其中统计回归法因其简单灵活而应用广泛, 其主要思想是通过建立实测资料的气候因子与模式预报变量间的统计关系, 并以此关系处理未来情景下 GCMs 结果以降低误差。起初简单线性回归算法被用于拟合这一关系^[3], 但效果不甚理想, 后来随着适用于非线性关系的机器学习算法应用, 拟合效果较好^[4], 但仍存在误差, 且相关研究较少, 可通过误差再校正以提高订正精度。对于下垫面, 一般认为 PMP/PMF 条件下, 暴雨/洪水非常大, 基流/前期影响雨量影响不会很大^[1], 但大流域 PMF 估算不能忽视, 现有定量取值法虽较简单但尚未考虑不同大暴雨的

前期土湿情况, 一定程度上历年大洪水作为极端洪水典型, 可为 PMF 基流/前期影响雨量提供参考; 暴雨时空分布对于洪水影响较大, 目前流域暴雨时空分布的处理方法仅均匀分布、泰森多边形法等, 同理历史暴雨典型能够为区域极端暴雨时空分布提供一些信息, 将其应用于 PMF 估算, 将使得估算更为合理。本文以怒江上游为研究区域, 统筹考虑未来气温预测、气候变化与土地利用/覆被变化, 基流/前期影响雨量及 PMP 时空分布等因素, 构建一种变化环境下 PMF 估算新模式, 以期更为合理估算 PMF。

2 研究方法

PMF 估算基本框架主要包括未来气温预测、气候变化下 PMP 估算、PMP 时空展布、基流/前期影响雨量影响分析、土地利用/覆被情景假设模块, 见图 1^[5]。

2.1 GCMs 预测气温后处理

为对比线性与非线性算法的计算效果, 应用多元线性回归(MLR)、随机森林(RF)、支持向量回归(SVR)拟合历史基准期的 GCMs 模式变量的模拟值与实测气温的关系, 选择效果较好的算法, 并分析拟合误差与拟合值, 拟定再校正关系, 以更准确预估未来气温。

收稿日期: 2022-01-07, 修回日期: 2022-04-12

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2019YFC0408805); 国家自然科学基金重点项目(41730750)

作者简介: 刘甜(1990-), 男, 博士, 研究方向为工程水文及水文气象学, E-mail: liutian_2009@126.com

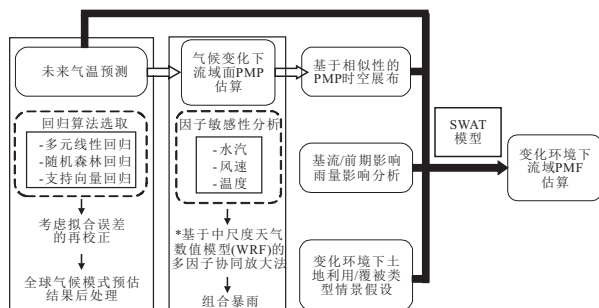


图 1 变化环境下 PMF 估算模式

Fig. 1 PMF estimation model in a changing environment

2.2 SWAT 模型

采用 SWAT 模型推求怒江源区 PMF^[6]。

2.3 PMP 相似性分析

借鉴暴雨洪水相似性理论,从历史暴雨资料寻求与长历时 PMP 相似的典型暴雨,基于水量平衡进行典型放缩,从而得到子流域 PMP。与实测暴雨不同,PMP 暴雨量级罕见,难以在有记录的几十年实测资料中找到类似样本,本文从以下两方面寻找相似场次暴雨:①暴雨发生季节分析。考虑不同季节的暴雨环流形势成因一般不同,若两场暴雨发生季节不同,则相似可能性较低。②雨“型”相似分析。对于一定历时 PMP,当历史典型降雨时序与其大致相似时,洪水过程将大致相似,引入“雨型”相似指标^[7]分析历史典型暴雨与长历时 PMP 的时序相似性。设 $T_{\text{trend}}(t) = (X_t - X_{t+1}) / (Y_t - Y_{t+1})$, 则 PMP 暴雨过程 X 与历史典型暴雨 Y 在 t 时刻相似性可用单位阶跃函数 $\text{score}(t)$ 描述:

$$\text{score}(t) = \begin{cases} 0 & T_{\text{trend}}(t) \leq 0 \\ 1 & T_{\text{trend}}(t) > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $T_{\text{trend}}(t)$ 为从 t 时刻演变为 $t+1$ 时刻降雨的增减趋势性。

若典型暴雨与 PMP 暴雨在 t 至 $t+1$ 时刻的降雨增减趋势一致,则 $T_{\text{trend}}(t) > 0$, 并记 $\text{score}(t)$ 为 1。因此,历史典型暴雨与 PMP 的趋势相似性可用累计单位阶跃指数 $\sum_{t=1}^{T-1} \text{score}(t)$ 表示,其中 T 为降雨历时,该值越大,则两场暴雨的趋势性越一致,即“雨型”越相似。

3 应用实例

3.1 流域概况及数据

怒江上游(嘉玉桥水文站以上流域)流域面积为 73 484 km²,流域平均高程为 4 769 m,北部分水岭为唐古拉山脉,南部分水岭为念青唐古拉山脉^[6]。

实测降雨为 1961~2018 年逐日面降雨,其基于中国国家气象信息中心提供的日降水实测插值格点数据集(CGDPD)(图 2)通过泰森多边形法计算得到。历史气温为欧洲中期天气预报中心的 ERA-Interim 全球再分析资料(0.75°×0.75°, 1979~2018 年)。实测洪水资料为 1997~2010 年嘉玉桥水文站的逐日平均流量。

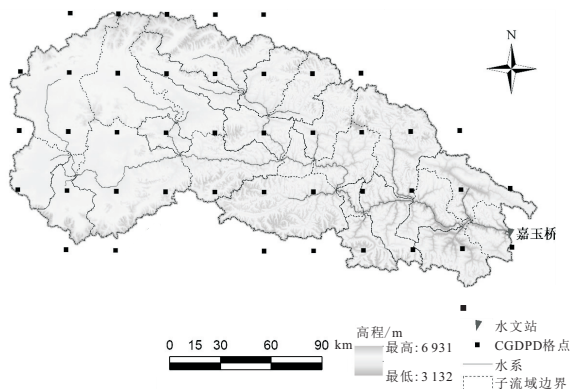


图 2 流域地形、水文站及 CGDPD 格点示意图

Fig. 2 Map of watershed topography, hydrological station and CGDPD

3.2 未来气温预估

怒江上游暴雨主要发生在汛期,影响 PMP 气温尺度为日尺度,首先基于基准期汛期月均气温的 GCMs 模拟值与实测值的回归校正关系预估汛期月气温,进而采用同倍比缩放法预估汛期日气温。本文通过对政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五阶段耦合模式提供的 GCMs 模式结果进行后处理预估未来气温,未来气候情景设定与其相同,即根据温室气体、气溶胶等排放浓度由低到高依次设定 RCP26、RCP45、RCP60、RCP85 四种情景(RCPs),IPCC 提供多种 GCMs 模式,选取中国区气温模拟较好的两种模式(BCC_CSM1.1(m)、CCSM)。气温校正关系率定期、验证期分别为 1979~2000、2001~2005 年。

GCMs 预估精度随预见期增长而下降,但近百年全球变暖相对可信(2100 年前)^[8]。根据 IPCC 报告,气温升高幅度随时间推移将不断增加,但近未来气温变幅相对较小,远未来气温变幅较大^[9],本文重点考虑远未来气温变化,定义 2061~2100 年为远未来。

(1)回归算法确定。采用 MLR、RF、SVR 分别拟合 GCMs 模式月均气温模拟与实测关系。拟合指标包括相关系数(R)、纳什效率系数(N_{NSE})、平均绝对误差(M_{MAE})及均方根误差(R_{RMSE})。结果表明,RF 拟合效果最好。

(2)误差再校正。虽然随机森林的线性相关拟合效果最好,但拟合趋势线与 45°线差别较大,

分析拟合值与拟合误差的关系,存在一定的线性负相关,基于此对拟合值进行再校正。结果表明,再校正后,虽然 R 不变,但 N_{NSE} 有所提高,且 M_{MAE} 、 R_{RMSE} 有所减少。因此,考虑误差校正的随机森林回归模型进一步降低了模式误差,可用于未来气温预估。

分别用订正模型对两模式 2061~2100 年汛期月气温进行后处理,继而同倍比缩放得到日气温,并对两模式结果进行简单算术平均,统计最高、平均、最低日气温的多年均值。结果(表 1)表明,随着温室气体排放增加,气温增幅逐渐变大。

表 1 远未来汛期最高、平均、最低日气温的多年均值

Tab.1 Annual mean maximum, average and minimum daily temperature in flood season in far-future °C

排放情景	RCP26			RCP45			RCP60			RCP85		
	最高	平均	最低	最高	平均	最低	最高	平均	最低	最高	平均	最低
汛期气温	17.6	13.0	4.9	17.6	13.0	4.9	17.6	13.0	4.9	17.6	13.0	4.9
基线期	17.6	13.0	4.9	17.6	13.0	4.9	17.6	13.0	4.9	17.6	13.0	4.9
远未来	18.4	14.2	8.4	18.7	14.6	8.8	18.9	14.8	9.3	19.2	15.2	9.8
升高幅度	0.8	1.2	3.5	1.1	1.5	3.9	1.3	1.7	4.4	1.6	2.2	4.9

选定汛期最低日气温的变幅估算气候变化下 PMP,考虑如下:①长历时 PMP 发生时气温在整个汛期时段中相对较低;②三种气温中,汛期最低日气温增幅最大,研究表明,升温幅度越大,极端降雨变化越大^[10],而 PMP 为最不利暴雨情景下最大降水。

3.3 气候变化下 PMP 估算

根据怒江上游 1997~2010 年 14 场年最大洪水进行分析,洪水历时约 15 d,而形成一场洪水的降雨过程一般为 8~12 d,平均约 10 d,推求流域 15 d PMF 需流域 10 d PMP 数据。首先基于 WRF 模式的多因子协同放大法^[5]结合本文气温预估,确定气候变化下 3 d PMP,借助于组合暴雨极大化法^[10]确定 10 d PMP。结果见表 2。

表 2 怒江上游四种情景下 3、10 d PMP

Tab.2 3 d PMP and 10 d PMP for four emission scenarios in the upper Nujiang River Basin mm

情景	3 d PMP		10 d PMP		情景	3 d PMP		10 d PMP	
	最高	平均	最高	平均		最高	平均	最高	平均
现状气候	127.4	196.8	158.8	261.8	RCP60	158.8	261.8	158.8	261.8
RCP26	149.6	225.7	169.1	274.5	RCP85	169.1	274.5	169.1	274.5
RCP45	154.0	242.8							

3.4 SWAT 模型构建

以 1997~2005 年为率定期,2006~2010 年为验证期, N_{NSE} 为目标函数,利用 SWAT-CUP 的 SUFI-2 算法进行参数自动率定。对于日径流过程模拟, N_{NSE} 率定期达 0.718 以上,验证期达 0.685 以上,表明 SWAT 模型在怒江上游具有良好适用性,基本能够模拟流域洪水特性,可用于 PMF 计算。

3.5 PMF 影响因素分析

(1)PMP 时空展布,主要体现在:①暴雨发生季节。怒江上游大暴雨多集中于 6~9 月,在确定相似暴雨时,选取 6~9 月的典型暴雨;②雨型相似性。计算典型降雨与 PMP 降雨的“雨型”相似指数,即累计单位阶跃指数。综合选取 10 场历史暴雨作为 PMP 时空展布典型(图 3),在时程分配上,典型暴雨的变化趋势与 10 d PMP 大致相似。

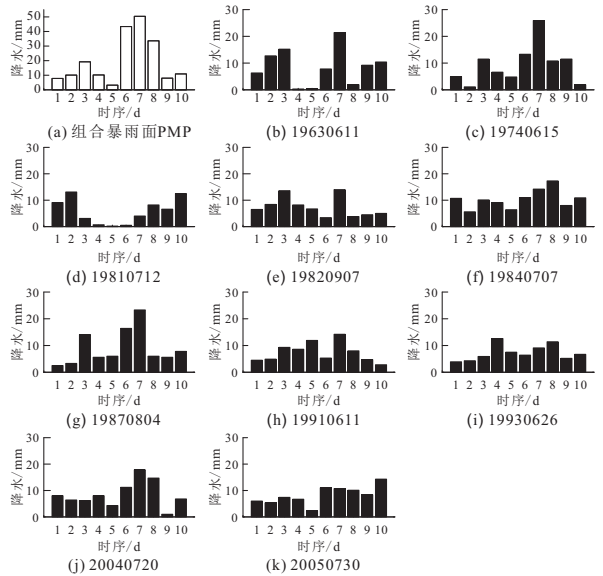


图 3 10 场相似典型暴雨的时程分配

Fig.3 Temporal distribution of 10 similar typical rainstorms

(2)基流/前期影响雨量、PMP 时空分布影响分析。基流代表地下水,前期影响雨量代表土壤水,两者往往难以分离,本文将二者作为整体考虑。假设 PMP 暴雨前地下水及土壤水状态与历史典型年相似,即采用历史典型年(1997~2010 年)替换法代表 PMF 基流/前期影响雨量。根据 10 场典型暴雨时空分布对面 10 d PMP 进行同倍比缩放,加上均匀分布(子流域 PMP 与面 PMP 相同),共 11 种 PMP 时空分布。

对于 14 种典型基流/前期影响雨量,由同一时空分布(19630611)PMP 驱动 SWAT 模型时,结果(图 4(a))显示,PMF 洪峰流量差别较大。

对于典型年 2003 年基流/前期影响雨量(下称“2003 典型”),由 11 种时空分布的 PMP 驱动 SWAT,虽然 PMF 洪峰量级差别不大,但洪水过程差别较明显(图 4(b)),究其原因,流域调蓄作用对洪水过程影响较大,进而 PMP 时空分布影响流域 PMF。

将 11 种 PMP 时空分布与 14 种基流/前期影响雨量两两组合,得到 154 种 PMF。结果显示,当 2003 典型配以 19630611 暴雨时空分布典型时,洪峰流量最大(10 850 m³/s);当 2003 典型配

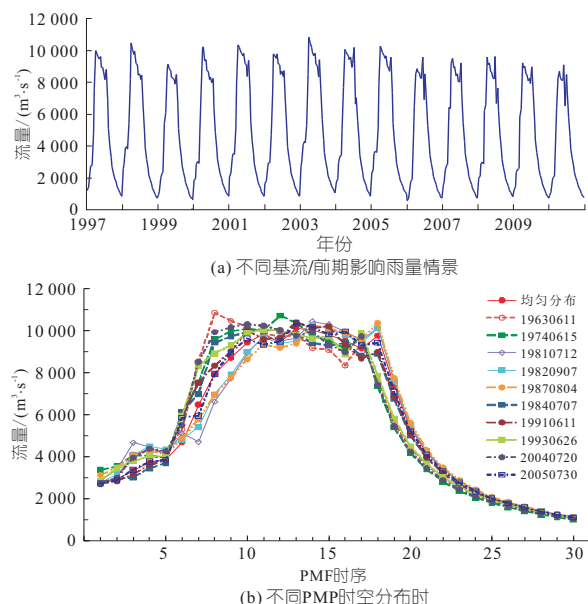


图 4 不同基流/前期影响雨量及不同 PMP 时空分布情景 嘉玉桥站 PMF 过程

Fig. 4 PMF of Jiayuqiao station under different base flow/ antecedent rainfall and under different spatio-temporal distribution

以 19910611 时空分布典型时, 15 d 洪量最大 ($112.1 \times 10^8 \text{ m}^3$)。

(3)下垫面变化。根据 2000 年 1 : 10 万中国土地利用数据库集,怒江上游土地利用/覆被类型以草地为主(69.18 %),裸土面积占比 20.72 %,林地面积较少(7.30 %),人类活动影响区面积占比较少(耕地、城乡居民点等),仅 0.55 %,因此该区域产汇流特性主要受草地、裸土、林地三种土地利用/覆被类型控制,分析下垫面变化对洪水影响时,应予以重点考虑。

采用情景假设法构建未来下垫面变化情景。分为正趋势和反趋势两种情景假设,正趋势即随着温度升高、降雨增加,且该地区人类活动相对较弱,综合作用结果促进了高原植被生长,固碳量增加,从而使得草地向疏林地方向转变^[11];反趋势即全球气候变暖和人类活动的共同影响导致草地严重退化,甚至沙化^[12]。目前尚不能证明两种结论正确性,为研究正反两种趋势对 PMF 影响,分别假设 4 种情景,见表 3。

将 8 种土地利用/覆被情景替换现状土地利用,同时配以不同时空分布(11 种)及基流/前期影响雨量(14 种)的 10 d PMP 重新驱动 SWAT 模型,得到不同情景的 PMF。结果表明,正趋势导致 PMF 洪峰流量和最大 15 d 洪量不变甚至减少,反趋势对于 PMF 起正向增加作用。正趋势下垫面变化将产生更大的拦蓄和削峰作用,表明以现状条件下 PMF 为设计值的工程相对安全,

表 3 未来土地利用/覆被类型变化的情景设定

Tab. 3 Scenario of land use and cover in future

趋势	情景	土地利用/覆被类型变化	面积百分比/%		
			草地	裸地	林地
	现状		69.18	20.72	7.30
正趋势	A1	山地草甸→疏林地	63.88	20.72	12.60
	B1	夏季牧场→疏林地	53.71	20.72	22.77
	C1	山地草甸→疏林地,夏季牧场→疏林地	48.41	20.72	28.07
	D1	牧场→疏林地	20.77	20.72	55.71
反趋势	A	山地草甸→裸土地	63.88	26.03	7.30
	B	夏季牧场→裸土地	53.71	36.19	7.30
	C	山地草甸→裸土地,夏季牧场→裸土地	48.41	41.49	7.30
	D	山地草甸→裸土地,夏季牧场→裸土地	51.71	41.49	4.00
		疏林地→牧场,灌木林→牧场			

反之,反趋势下垫面变化需提高 PMF 设计值,即未考虑反趋势下垫面变化的工程防洪标准可能不够,偏于工程安全考虑,PMF 估算应重点考虑反趋势。

(4)不同情景下升温 and PMP。采用不同排放情景的升温与 PMP 驱动 SWAT 模型,计算得到 PMF。结果显示:①随着排放情景的变化,PMF 变大;②同一排放情景,不同基流/前期影响雨量与 PMP 时空分布下产生的 PMF 存在不确定性。

3.6 变化环境下 PMF 估算

下垫面受气候变化和人类活动双重影响,作为考虑人类活动产生的温室气体排放浓度的情景,RCPs 四种情景对人类活动的影响由弱到强,温室气体排放由弱到强,下垫面变化正、反趋势的受影响程度均由弱到强,因此本文设定的变化范围逐渐增大的下垫面情景与 RCPs 情景对应,加之 PMF 估算需重点考虑反趋势,即 RCP26、RCP45、RCP60、RCP85 分别对应 A、B、C、D,记为 R26、R45、R60、R85 情景。同样,对 14 种基流/前期影响雨量典型与 11 种 PMP 时空分布典型两两组合前提下,得到不同情景的最大洪水,取其外包值即 PMF(表 4)。

表 4 怒江上游 PMF 估算结果

Tab. 4 PMF estimation for the upper Nujiang River Basin

项目	现状环境	变化环境							
		仅气候变化				(气候变化与下垫面变化)			
		RCP26	RCP45	RCP60	RCP85	R26	R45	R60	R85
洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	10 850	12 430	13 730	15 160	16 430	12 450	13 760	15 230	16 500
15 d 洪量/(10^8 m^3)	112.1	128.8	138.5	148.5	156.8	129.0	138.7	148.8	157.3

4 结论

a. 考虑误差校正的随机森林算法能够更为准确地预测未来气温,能够为变化环境下 PMP/PMF 估算提供参考依据;基流/前期影响雨量、PMP 时空分布的不确定性均可影响流域 PMF,需重点考虑。

b. 作为变化环境的两部分,气候变化与下垫面变化在该模式中均予以体现,可望为变化环境下 PMF 估算提供一种新思路。

参考文献:

[1] World Meteorological Organization (WMO). Manual for estimation of probable maximum precipitation[M]. Geneva: WMO, 2009.

[2] WOOD A W, LEUNG L R, SRIDHAR V, et al. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs [J]. Climatic change, 2004,62(1-3):189-216.

[3] FAN L J. Statistically downscaled temperature scenarios over China[J]. Atmospheric and oceanic science letters, 2009, 2(4): 208-213.

[4] TRIPATHI S, SRINIVAS V V, NANJUNDIAH R S. Downscaling of precipitation for climate change scenarios: A support vector machine approach[J]. Journal of hydrology, 2006, 330(3/4): 621-640.

[5] 刘甜, 金路熠, 梁忠民, 等. 基于多因子协同放大的可能最大暴雨估算[J]. 水电能源科学, 2022, 40

(9):6-9,5.

[6] 刘甜, 梁忠民, 华家鹏, 等. 基于 SWAT 模型的高寒区可能最大洪水计算方法研究[J]. 水力发电, 2016,42(11):24-28.

[7] 肖章玲, 梁忠民, 刘晓伟, 等. 基于相似性理论的洪水超前预报预警研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(6):20-23,28.

[8] 王芳, 葛全胜, 陈泮勤. IPCC 评估报告气温变化观测数据的不确定性分析[J]. 地理学报, 2009, 64(7):828-838.

[9] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the IPCC [M]. New York: Cambridge University Press, 2015.

[10] 王国安. 可能最大暴雨和洪水计算原理与方法 [M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

[11] 刘军会, 高吉喜, 王文杰. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. 山地学报, 2013(2): 234-242.

[12] 毛飞, 张艳红, 侯英雨, 等. 藏北那曲地区草地退化动态评价[J]. 应用生态学报, 2008,19(2):278-284.

Calculation of Probable Maximum Flood in Changing Environment

LIU Tian¹, LIANG Zhong-min², JIN Lu-yi³, WANG Shi-wu¹, WEN Jin-hua¹, WANG He-long¹

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310020, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Zhejiang Water Conservancy Information & Publicity Center, Hangzhou 310009, China)

Abstract: Under the influence of climate change and land use/land cover (LULC) change, the combined influence of multiple factors has significantly increased the difficulty of probable maximum flood (PMF) estimation. A PMF estimation framework was proposed, integrating post-processing of climate model results, probable maximum precipitation (PMP) estimation and future LULC change setting under climate change scenarios, impact analysis of base flow/antecedent rainfall, and similarity-based PMP spatio-temporal distribution. This new framework was applied to the Upper Nujiang River Basin. The results show that the uncertainty of base flow/antecedent rainfall and PMP spatio-temporal distribution are important factors affecting PMF for basins, and the dual-drive of climate change and LULC change has a greater impact on PMF, and the amplitude of change increases with the degree of change.

Key words: probable maximum flood; probable maximum precipitation; climate change; land use/land cover change; base flow/ antecedent rainfall; upper Nujiang River Basin

(上接第 123 页)

Study on Energy Dissipation Characteristics of Staggered Stepped Energy Dissipaters in Spillway

CHEN Run¹, LI Yong-ye¹, ZHANG Le-yuan², TIAN Yu¹

(1. College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Yuncheng City River and Lake Affairs Management Center, Yuncheng 044099, China)

Abstract: In order to study the hydraulic characteristics of staggered stepped energy dissipaters with different slopes, the flow pattern, flow field, pressure field and energy dissipation characteristics of staggered stepped and rectangular stepped energy dissipaters with slope of 1:2.0 and 1:2.5 under different flow rates were compared and studied by using the method of numerical simulation and model test. The results show that with the increase of the slope of the staggered step dissipator, the three-dimensional vortex scale formed at the step groove increases, the water flow is violent and the water depth is large. The absolute value of the vertical pressure of the step is larger, and the range of negative pressure zone increases. The horizontal pressure distribution of the step under the two slopes is similar, and the closer the step is, the smaller the pressure is. The energy dissipation rate of stepped energy dissipaters with a slope of 1:2.0 is larger. The energy dissipation rate of energy dissipaters with the same slope has a nonlinear relationship with the flow rate. The larger the flow rate is, the slower the energy dissipation rate changes. The staggered stepped energy dissipater is more fully aerated and has higher energy dissipation rate than the rectangular stepped spillway. The conclusions can provide a theoretical basis for the structural optimization of staggered stepped energy dissipater.

Key words: step energy dissipator; energy dissipation rate; dissipation characteristics; hydraulic characteristics