

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.06.002

重庆市雨洪演变及未来洪涝风险预测

金君良^{1,2}, 李文鑫³, 舒章康^{1,4}, 张建云^{2,4}, 许文涛^{1,2}, 刘翠善^{2,4}

(1. 河海大学灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西西安 710065; 4. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏南京 210029)

摘要: 全球气候变化和快速城镇化双重影响下, 城市洪涝问题日益突出, 严重威胁区域的可持续发展。本文基于1960—2019年重庆市水文气象数据和第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)的10种全球气候模式, 分析了重庆市极端降水、区域洪水的历史演变规律, 构建了适用于重庆市的VIC-Cama Flood模型, 并利用该模型对未来城市洪涝风险进行预估。主要结论如下: ①重庆市1960—2019年极端降水量增多趋强, 降水径流不均匀性上升; ②VIC-Cama Flood模型在长江上游适用性较好, 各子流域日径流过程模拟的平均纳什效率系数与相对误差绝对值分别为0.81、4.7%, 水位模拟的平均纳什效率系数与相对误差绝对值分别为0.87、0.4%; ③气候变化下重庆市未来极端降水大幅增加, 不同情景下汛期超99%分位数年累积降水量较1985—2014年增加16.9%~85.9%; 高排放情景下各站点年最大洪峰流量和年最大5日洪量的50年一遇值将缩短至20年一遇以下; ④在不考虑水利工程调度影响下, 未来气候变化将增加重庆市洪涝风险。极端降水-过境洪水-城市内涝的级联风险加剧将严重威胁城市防洪安全。

关键词: 城市洪涝; 极端暴雨; 气候变化; VIC-Cama Flood模型; CMIP6

中图分类号: P333.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)06-0877-13

全球变暖加速了水循环, 增强了大气持水能力, 导致降水变率增大、极端降水增多^[1-3]。极端雨洪事件威胁人身财产安全, 严重制约经济社会可持续发展。城市人口密集、财富集中, 是受全球气候变暖影响的敏感和脆弱地区^[4-5]。当前, 中国正处于城市化的稳定快速发展时期, 截至2023年, 中国常住人口城镇化率从2011年的51.27%提高至2023年的66.16%^[6]。城市化引起的热力作用、城市结构和冠层效应的动力作用, 以及植被覆盖减少、下垫面硬化引起的小尺度水循环过程等因素, 导致未来城市将面临更为频繁和极端的高温热浪、极端降水及洪涝灾害^[7-9]。因此, 科学评估未来降水、径流变化和内涝形势不仅是地区防洪排涝、水资源保障和管理的基础工作, 更是环境可持续发展与生态文明建设的重要支撑。

为了准确认识全球气候的历史演变及未来趋势, 联合国政府间气候变化专门委员会已启动第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)。相比以往, CMIP6提供的最新模式进一步提高了空间分辨率, 改善了云微物理过程的参数化方案, 纳入了生物地球化学循环及冰盖演变等过程^[10-11]。诸多研究表明CMIP6模式较CMIP5模式在中国极端气温、降水的模拟能力上有较大提升^[12-13]。目前, 基于CMIP6多模式预估中国未来的降水、径流等已有许多研究。例如, 舒章康等^[14]基于CMIP6发布的11种GCMs对中国未来极端天气事件进行了预估, 结果表明中国未来极端高温和极端降水事件将普遍增多增强; Zhou等^[15]基于CMIP6气候模式与VIC(Variable Infiltration Capacity)模型预估了中国主要流域径流变化趋势, 结果表明总径流深在未来呈增加趋势; Try等^[16]在渭公河流域也得出了未来年径流和洪水增加的相似结论。王国庆等^[17]基于RCCC-WBM模型预估结果表明, 在中国径流量未来将增加的可能情景下, 黄河流域未来水资源量可能会减少。总体上, 这些研究利用CMIP6和常用水文模型开展了降水径流未来预估研究, 但基于不同模型组合在不同地区的预估结果存在

收稿日期: 2024-08-27; 网络出版日期: 2024-11-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20241126.1456.002>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3200201); 国家自然科学基金资助项目(U2240203)

作者简介: 金君良(1982—), 男, 浙江金华人, 研究员, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: jjin@hhu.edu.cn

较大不确定性。并且,当前研究较少关注过境洪水和城市内涝协同影响下的城市洪涝风险。随着模型研究的发展,水文水动力耦合模型为大尺度区域洪涝风险研究提供了可能,Cama Flood模型因而得到广泛应用。Hoch等^[18]建立了GLOFRIM 2.0全球水文水动力学耦合模型,结果表明Cama-flood模型完善了水文模型的洪峰模拟精度;Wang等^[19]在澜湄流域基于VIC模型和Cama-flood模型探索了区域参数化和水库调节在洪水模拟中的作用;Zhong等^[20]结合VIC模型、Cama-flood模型与循环神经网络,建立了具有物理机制的数据驱动模型,有效提高了径流与洪水的预报精度。

重庆是中国西南地区中心城市,面积约为82 344 km²,城市化水平发展迅速,在中国超大型城市中具有代表性。重庆市地貌以丘陵、山地为主,坡地面积较大,地势起伏落差极大,受东南季风与西南季风双重影响,极易形成暴雨。此外,受长江上游来水及三峡库区水位顶托的双重影响,过境洪水与城市暴雨内涝叠加极易加剧城市洪涝风险。特殊的地理位置、地形地势、气象条件和战略地位使得重庆市成为城市洪涝研究的典型代表。

本文以重庆市为研究对象,利用CMIP6气候多模式集合与水文-水动力耦合模型,开展城市暴雨洪水内涝特征演变及未来趋势研究,以期在城市极端雨洪的应对及未来防灾减灾、城市规划等提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究资料及预处理

搜集了长江上游下垫面资料、干支流主要站点历史实测径流及气象资料,寸滩、北碚(三)和宜昌断面的水位等资料,资料来源于长江流域水文年鉴,时间系列如表1所示。下垫面资料主要包括马里兰大学开发的AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)土地覆盖类型数据、FAO(Food and Agriculture Organization)数字土壤地图、WISE(World Inventory of Soil Emission Potentials)土壤参数库及地理空间数据云提供的DEM(Digital Elevation Model)数据等,空间分辨率均为1 km。

表 1 水文资料基本信息
Table 1 Basic information of hydrological data

水文站点	控制面积/km ²	流量资料时间	水位资料时间
直门达	136 553	1956-08/1997-12	—
石鼓	208 504	1971-01/1992-12	—
屏山	432 823	1971-01/1990-12	—
雅江	63 615	1971-01/1990-13	—
朱沱(三)	630 903	1954-01/2021-01	—
寸滩	794 954	1954-01/2021-12	1961-01/1990-12
北碚(三)	150 456	1939-04/2019-12	1939-04/2019-12
宜昌	924 262	1931-01/2000-12	1931-01/2000-12

注:朱沱(三)站1977-01/1970-12、1998-01/1998-03观测流量缺失。

图1给出了长江上游水系、子流域划分、气象站点及水文站点分布情况。实测气象数据来源于再分析气象数据集CN05.1,该数据集使用了中国2 400多个气象台站的逐日观测资料进行插值处理,共有307个气象台站位于研究流域,空间分辨率为0.5°×0.5°。水文气象资料用于水文模型的率定和验证。为便于开展分布式水文模拟,将流域划分为与气象数据空间分辨率相同的网格。

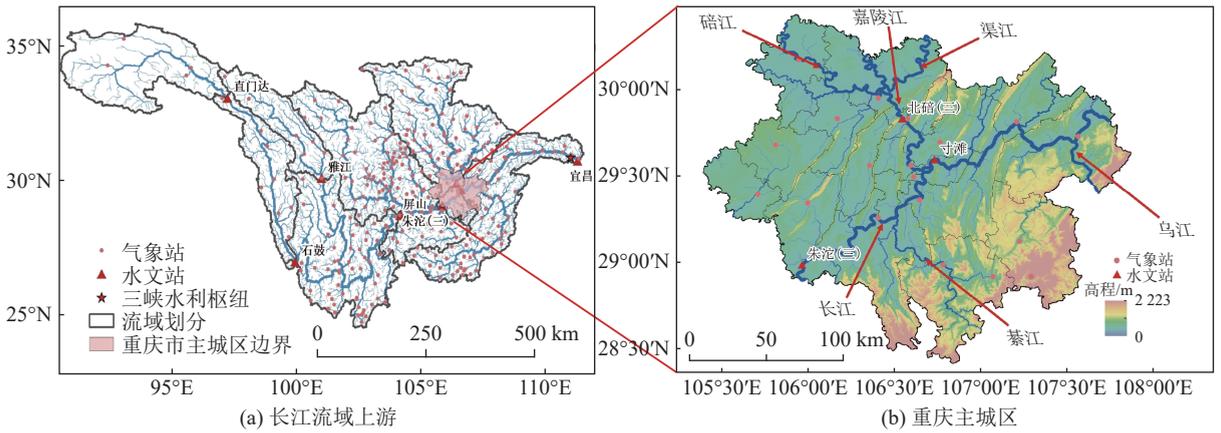


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

气候模式数据选取 CMIP6 计划中常用的 10 个气候模式, 包括 BCC-CSM2-MR、CanESM5、EC-Earth3、GFDL-ESM4、INM-CM4-8、KACE-1-0-G、MIROC6、MPI-ESM1-2-HR、NorESM2-LM 和 UKESM1-0-LL。以 1985—2014 年作为基准期, 以 2021—2080 年作为预估期, 对比分析 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 等 3 种不同社会经济发展以及碳排放情景(简称为低、中、高排放情景)下的未来径流变化趋势。采用双线性插值将气象数据分辨率统一到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 采用日偏差校正(Daily basis correction, DBC)方法对气候模式数据进行偏差校正, DBC 方法考虑了日平移和局部强度缩放 2 种矫正原理, 可同时矫正日尺度气象变量的频率和强度, 相比分位数映射法更稳健^[21]。

1.2 VIC-Cama Flood 水文水动力学模型

基于 VIC 水文模型耦合 Cama Flood 水动力学模型, 以开展长江上游和嘉陵江上游的过境洪水与极端降水、城市内涝对重庆市洪水风险的影响研究。

水文模型产流以 VIC 模型为核心, 其输入包括下垫面和气象数据(降水量、最高气温、最低气温), 输出为土壤含水量、蒸散发及产流量等^[22], 本研究主要对模型的 6 个敏感参数进行率定, 包括可变下渗曲线指数 (B)、非线性基流占最大基流速率的比 (D_3)、最大基流速度 (D_m)、底层土壤含水量与最大土壤含水量的比值 (W_s)、第二层土壤厚度 (D_2) 和第三层土壤厚度 (D_3) (表 2)。率定时, 考虑子流域上下游关系, 由上游逐个向下游率定, 上游站点率定后, 网格参数不再变动, 以此考虑敏感参数在子流域的空间异质性。本研究产流模型参数的率定通过先与 Routing 汇流模块耦合, 以子流域出口断面观测径流为标准进行, 此方式可以简化直接耦合水动力模型进行率定所带来的巨大计算负担问题。Routing 模型是专为 VIC 模型开发的汇流模块, 采用单位线进行坡面汇流, 利用线性圣维南方程进行河网汇流, 以流域流向和 VIC 产量为输入, 在 VIC 模型相关研究中被广泛使用。

模型汇流选用大尺度水动力学模型 Cama Flood, 将流域河网离散为 0.05° 网格, 按照河道和洪泛区地形参数基于网格蓄水量计算水位与淹没范围。网格蓄水量时间演变通过水量平衡方程求解, 河道流量及流速等通过局部惯性方程计算。模型输入为网格产流量, 可由 VIC 产流模型输出得到, 模型输出包括网格水位、流量、流速、淹没深度及面积等。Cama Flood 将世界范围内的河网划分为“单位流域”矩形网格, 每个网格具有独立的河道和洪泛区的地形参数, 形成了“网格-矢量河网图”。高分辨率的 DEM 数据确保网格参数计算合理, 也便于数据的处理, 有效提高了模型精度; 同时较大的计算网格、局部惯性方程及水平平衡方程的使用保证了模型运行效率^[23]。VIC-Cama Flood 模型也被众多研究者用于流域洪旱监测系统(干旱、河道洪水、山

洪), 并在澜沧江-湄公河流域等流域取得成功应用^[19]。

表 2 模型参数及率定结果

Table 2 Model parameters and calibration results

水文站点	B	D_s	$D_m/(mm/d)$	W_s	D_2/m	D_3/m
直门达	0.50	0.07	9.00	0.96	0.58	1.60
石鼓	0.84	0.95	9.00	0.55	0.35	1.00
雅江	0.62	1.00	9.90	0.23	0.58	0.35
屏山	0.62	0.51	9.00	0.55	0.35	2.50
北碚(三)	0.50	0.01	6.00	0.42	0.11	0.31
朱沱(三)	0.73	0.92	8.10	0.55	0.10	0.63
寸滩	0.73	0.92	8.10	0.55	0.10	0.63
宜昌	0.55	0.06	9.00	0.68	0.23	2.09

2 结果与分析

2.1 水文水动力过程模拟

以纳什效率系数(E_{NS})和多年平均相对误差(E_r)为评估指标, 基于均匀设计表法及模式搜索法^[24]进行参数优化。鉴于资料原因, 选取1961—1990年的水文气象资料进行参数优化率定, 其中模型预热期、率定期及验证期分别设置为1961—1970年、1971—1980年、1981—1990年。

表3给出了VIC-Cama Flood模型在长江上游站点模拟的统计效果, 图2给出了寸滩站日和月尺度径流、水位模拟结果。可以看出, VIC-Cama Flood模型在长江上游各站点模拟结果均较好, 各站点日径流过程模拟平均纳什效率系数与相对误差绝对值分别为0.81、4.70%。不同时间尺度及不同站点的模拟效果有所差异,

表 3 模拟结果统计

Table 3 Statistics of simulation results

项目	站点	VIC模型				VIC-Cama Flood模型	
		率定期		检验期		1971—1990年	
		E_{NS}	$E_r/\%$	E_{NS}	$E_r/\%$	E_{NS}	$E_r/\%$
流量	直门达	0.74	-6.40	0.66	3.30	0.69	-6.10
	石鼓	0.87	8.10	0.81	7.50	0.75	9.80
	雅江	0.82	15.80	0.84	9.80	0.73	7.30
	屏山	0.90	-2.50	0.90	-0.50	0.84	0.10
	北碚(三)	0.86	-8.10	0.89	0.20	0.87	-6.10
	朱沱(三)	0.84	10.00	0.85	8.40	0.88	-4.10
	寸滩	0.91	-3.30	0.91	-1.30	0.84	-3.80
	宜昌	0.83	-2.70	0.83	0.30	0.87	-0.60
水位	北碚(三)					0.81	0.30
	寸滩			—		0.91	0.30
	宜昌					0.90	-0.60

其中模型对于大部分站点径流模拟效果较好, $E_{NS} > 0.73$, 模拟径流量和实测径流量的 E_r 小于 10%。其中北碚(三)站、朱沱(三)站、寸滩站及宜昌站日径流模拟 E_{NS} 在 0.84~0.87 之间, E_r 位于 -6.10%~-0.60%, 效果较好。月尺度效果明显优于日尺度, VIC-Cama Flood 模拟效果略差于 VIC 模型, 但基本达到了模拟要求。一方面 VIC-Cama Flood 模型中河道汇流路径受网格划分大小的影响, 流域较大时, 概化的汇流路径导致洪水遭遇时间提前或滞后, 因而对洪峰的模拟结果相较实际值偏小; 另一方面, 模型本身汇流模块未经参数率定, 难以获得最优效果。VIC-Cama Flood 模型对于流域北碚(三)、寸滩和宜昌站水位模拟效果较好, 平均纳什效率系数与相对误差绝对值分别为 0.87、0.40%。模型对于干流水位模拟(寸滩站、宜昌站)略优于支流站点(北碚(三)站), 对于寸滩站及宜昌站日水位的模拟达到了 0.90 以上, 因此可用于洪水淹没影响评价分析。

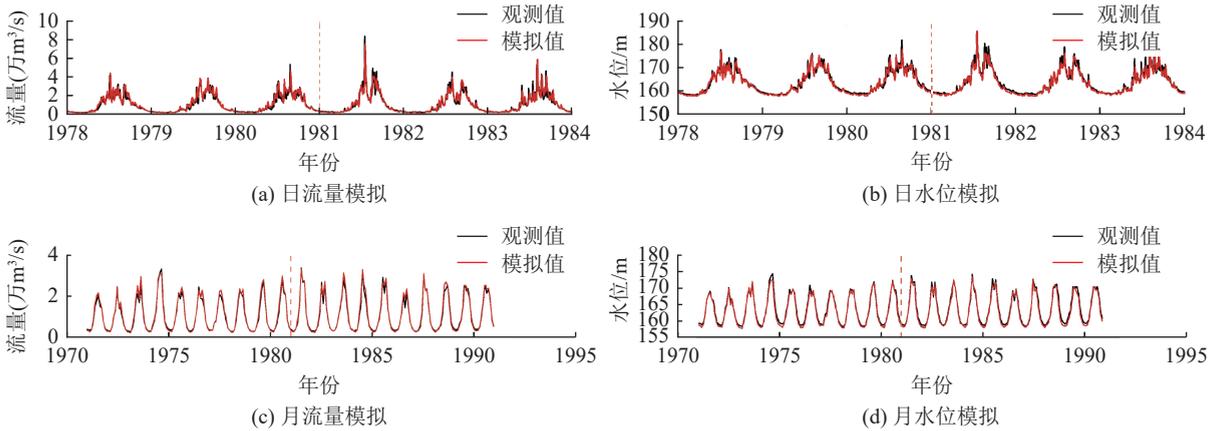


图2 寸滩站 VIC-Cama Flood 流量和水位模拟结果

Fig. 2 Simulation of discharge and water level based on VIC-Cama Flood model at Cuntan station

2.2 雨洪演变规律

2.2.1 历史极端降水分析

由于重庆市地理条件差异大, 城市化发展极不均匀, 区域降水变化大, 极端降水是城市暴雨洪涝的主要驱动因子, 若采用统一绝对阈值法计算极端降水指标, 代表性较差。因此研究选取汛期超 95% 分位数年累积降水量(R95TOT)、超 99% 分位数年累积降水量(R99TOT) 2 个指标作为极端降水评价指标, 分析极端降水及贡献度(极端降水总量相较于年降水量的占比)演变特征, 同时借助 Mann-Kendall(MK)趋势分析检验显著性。由图 3 可以看出, R95TOT、R99TOT 序列降水量及贡献度均呈不显著上升趋势, MK 值均未超过 1.96, 其中 R99TOT 的上升趋势略高于 R95TOT, 其降水量及贡献度线性倾向率(k)分别为 2.35 mm/(10 a) 与 0.23%/(10 a), MK 值分别为 0.53 和 0.51, 表明随着气候变化影响, 主城极端降水增多趋强, 且极端降水的增加主要集中于超 99% 阈值的部分。

2.2.2 历史洪水淹没分析

以历史实测气象数据驱动 VIC-Cama Flood 模型, 网格空间分辨率为 3', 模拟长江上游日尺度洪水淹没形势, 分析 1961—2018 年汛期平均洪泛区淹没面积比例。从图 4 中可以看出, 水文水动力模型能较好地模拟河谷区及低洼地区等易洪涝地区, 如长江、嘉陵江及其支流碚江、渠江、綦江和乌江等河流沿岸及河流交汇点, 易涝地区汛期多年平均淹没面积均值达 5.0%~20.0%。

图 5 给出了模拟的重庆市 1961—2018 年汛期淹没面积。多年平均汛期淹没面积均值为 295.5km²。重庆市汛期淹没形势无明显增长趋势, MK 值为 0.11, 但年际变幅较大, 年最大淹没面积和年最小淹没面积差异

达 110 km²。模型对于主要洪涝年份捕捉较为准确，如重庆市典型洪涝年份 1981 年、1998 年、2013 年等，干旱年份 2006 年汛期淹没面积平均值仅为时段最大值的 67.9%。

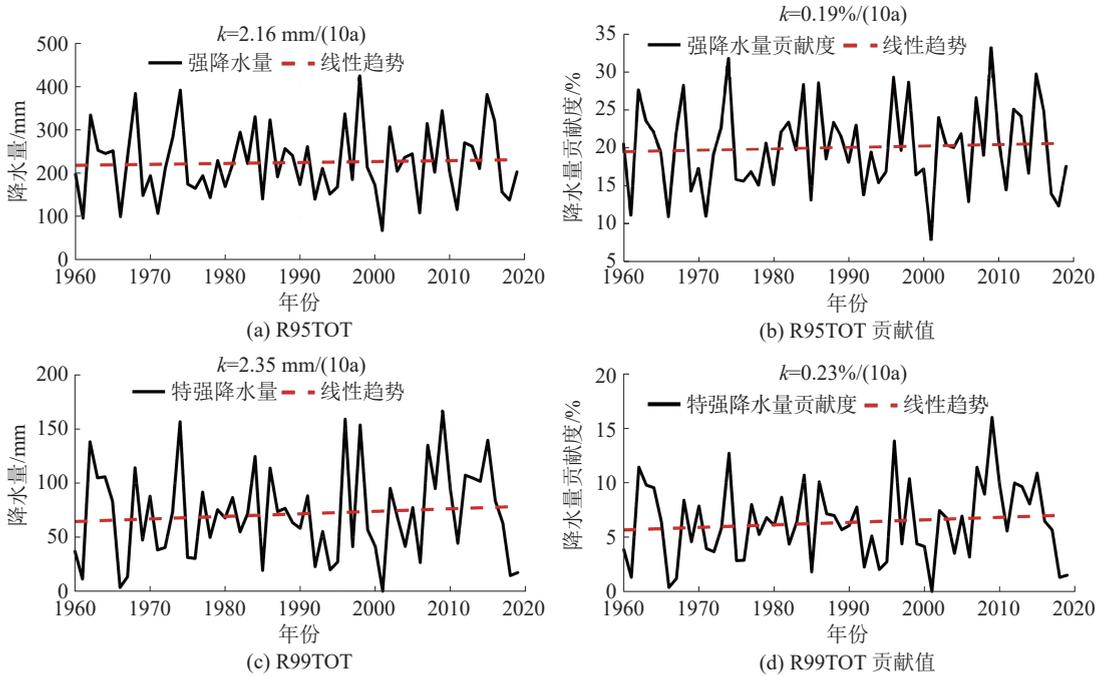


图3 重庆市极端降水量及贡献度变化

Fig. 3 Variation of extreme precipitation and contribution in Chongqing City

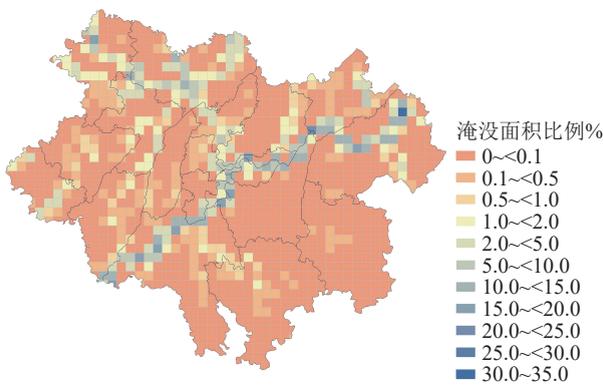


图4 重庆市汛期多年平均洪泛区淹没面积比例

Fig. 4 Proportion of floodplain inundation area in Chongqing City during the flood season, multi-year average

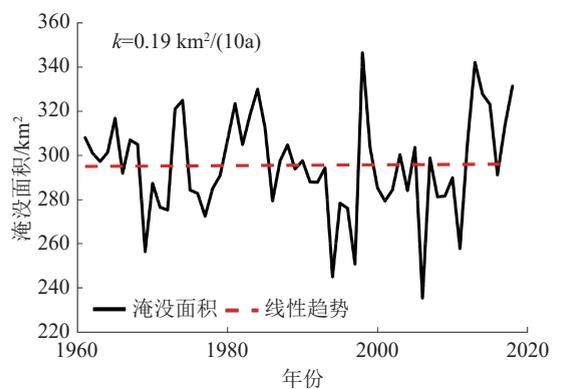


图5 重庆市汛期多年平均洪泛区淹没面积

Fig. 5 Multi-year average floodplain inundation area in Chongqing City during flood season

2.3 未来雨洪变化趋势

2.3.1 极端降水未来预估

本研究基于 10 个气候模式 3 种排放情景预估未来极端降水指标 R95TOT、R99TOT 的变化趋势。图 6 给出了 3 种排放情景下未来极端降水指标 R95TOT 及 R99TOT 的变化。从图 6 中可以看出，未来 R95TOT

和 R99TOT 较基准期整体变化以增加为主; 远期极端降水增加幅度高于近期, 高排放情景下极端降水增加幅度明显高于中低排放情景。高排放情景下, 温升水平更高, 大气持水能力越强, 发生极端暴雨的可能性增加^[25]。

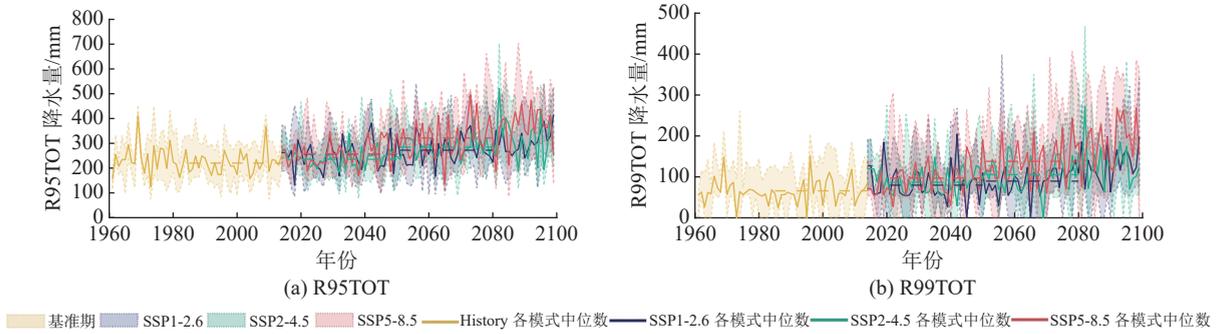


图6 重庆市未来极端降水预估

Fig. 6 Projections of future extreme precipitation in Chongqing City

表4给出了各气候模式对重庆市未来极端降水量变化预估统计结果。可以看出, 大多数模式预估未来极端降水量变化以增加为主; 在低、中、高排放情景下, 近期 R95TOT 较基准期分别增加了 9.9%[- 0.7%, 16.8%]、8.6%[- 1.7%, 18.6%] 和 17.3%[- 12.8%, 41.7%](分别表示中位数、25%分位点和 75%分位点), 在远期 R95TOT 较基准期分别增加了 19.6%[9.4%, 39.6%]、21.8%[13.8%, 34.3%] 和 39.4%[25.6%, 66.5%], 随着温升水平的升高及预测期延长, R95TOT 预估的不确定性逐渐增大。R99TOT 在近期, 低、中、高排放情景下较基准期分别增加了 16.9%[- 13.8%, 56.1%]、38.8%[2.1%, 56.9%] 和 49.0%[- 17.7%, 89.3%], 在远期, 低、中、高排放情景下 R99TOT 较基准期分别增加了 23.9%[1.5%, 64.2%]、42.6%[20.7%, 86.3%] 和 85.9%[46.8%, 118.3%]。相比于 R95TOT, R99TOT 的变化幅度更大, 并且在未来更高排放情景下, R99TOT 的变化会愈发敏感, 这意味着未来更极端的降水事件会愈发频繁, 洪涝灾害威胁加剧。

表4 未来极端降水较基准期的变化

Table 4 Future changes in extreme precipitation relative to the baseline period

单位: %

气候模式	R95TOT						R99TOT					
	近期(2021—2050年)			远期(2051—2080年)			近期(2021—2050年)			远期(2051—2080年)		
	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5									
BCC-CSM2-MR	-0.3	6.9	41.7	12.9	33.9	66.5	-15.1	2.1	68.5	0.2	32.7	101.2
CanESM5	9.1	-1.7	-15.8	7.3	13.8	26.6	17.0	9.8	-17.7	14.0	21.7	56.0
EC-Earth3	-4.5	18.6	5.2	22.5	34.3	44.7	-4.1	56.9	45.8	52.1	86.3	106.6
GFDL-ESM4	10.7	-3.2	14.5	39.6	25.2	46.5	-13.8	-30.9	-19.6	1.5	9.3	20.8
INM-CM4-8	0.7	-32.8	-18.5	-0.5	9.6	25.6	-22.4	-71.4	-22.2	-25.9	-34.3	-11.0
KACE-1-0-G	84.0	97.4	120.1	114.2	112.4	126.8	158.6	133.3	201.1	188.2	203.0	304.9
MIROC6	6.1	17.9	-12.8	16.7	18.4	21.3	16.8	44.3	2.0	66.8	52.5	46.8
MPI-ESM1-2-HR	16.8	24.4	20.2	24.9	7.9	34.0	27.6	76.5	52.2	5.5	20.7	70.6
NorESM2-LM	12.8	4.0	25.1	9.4	16.4	19.3	64.7	33.3	89.3	33.7	64.3	118.3
UKESM1-0-LL	30.5	10.3	45.1	40.3	53.1	85.6	56.1	47.9	110.4	64.2	123.9	244.1

2.3.2 极端径流未来预估

结合10个未来气候变化模式和3种气候情景,采用VIC-Cama Flood水文水动力学模型,预估重庆市主要水文站点(寸滩、朱沱(三)及北碚(三))未来径流量变化趋势,采用GEV分布拟合年最大洪峰流量(Q_{\max})及年最大5日洪量(W_{5d}),取各全球气候模型(GCMs)模拟 Q_{\max} 与 W_{5d} 序列各重现期中位数值用于分析,图7为基于频率分布计算结果所绘制的 Q_{\max} 和 W_{5d} 频率(P)分布,图7中各颜色区域上、下边界代表了对应排放情景下各模式不同重现期75%分位值与25%分位值计算结果。

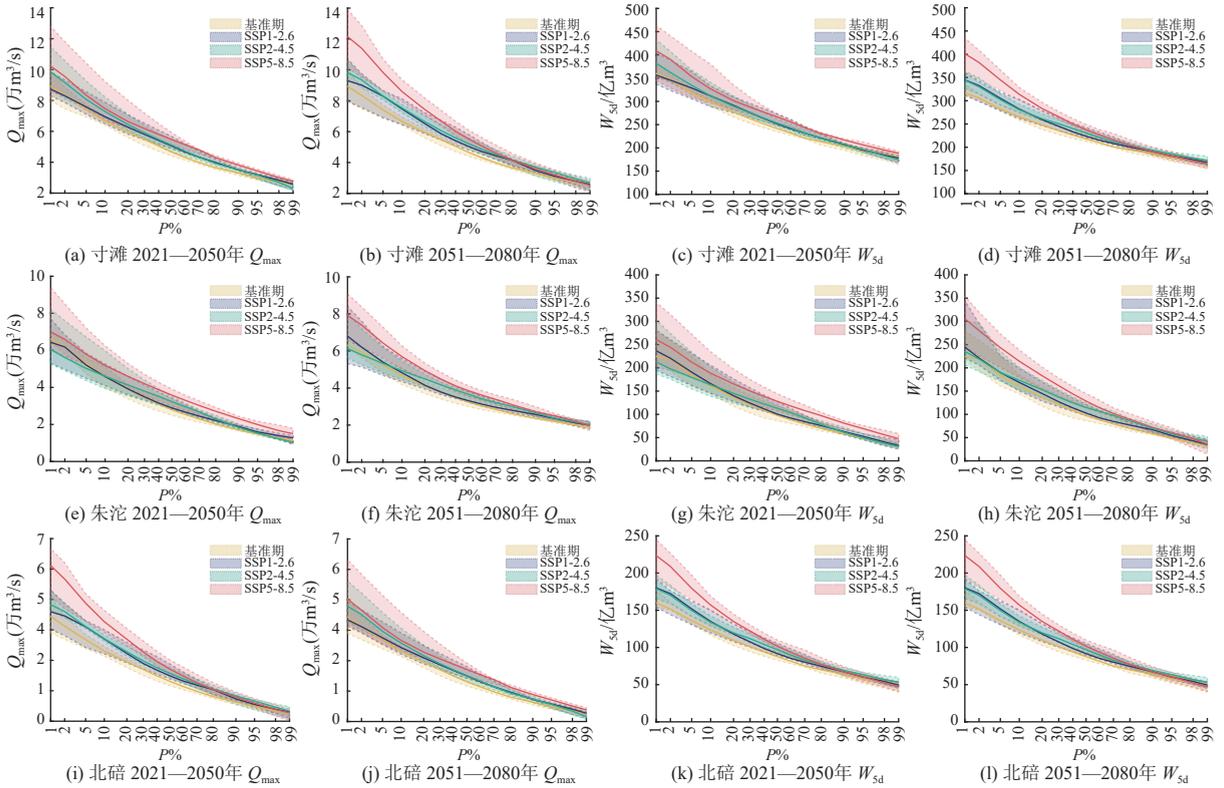


图7 重庆市主要水文站点未来年最大洪峰及年最大5日洪量频率分布

Fig. 7 Frequency distribution of future annual maximum flood peaks and annual maximum 5-day flood volumes at major hydrological stations in Chongqing City

从图7可以看出,多数模式预估未来极端水文事件强度增大。以北碚(三)站为例,在近期,低、中、高排放情景下 Q_{\max} 和 W_{5d} 的50年一遇值相较基准期均呈上升趋势。其中, Q_{\max} 的上升幅度分别为10.1%、2.2%、14.4%, W_{5d} 的上升幅度分别为14.9%、9.8%、6.7%。在远期,低、中、高排放情景下 Q_{\max} 和 W_{5d} 的50年一遇值均呈升高趋势,其中,中排放情景下极端水文强度最低,增幅分别为6.6%和21.1%,高排放情景下极端水文强度最高,增幅分别为31.5%和42.4%。总体上,高排放情景下各站点远期极端水文强度明显升高,寸滩站、朱沱(三)站、北碚(三)站 Q_{\max} 和 W_{5d} 的50年一遇值将均缩短至低于20 a。结果表明,未来重庆市极端水文事件将更加频繁,过境洪水压力风险加剧。同时随着未来径流量增加,流域极端水文事件强度增速将明显加快。

根据图7的预测区间也可看出,模型对于流域极端水文事件的模拟仍具有一定的不确定性,不确定性来源主要包括:①气候模式本身对未来气候预估的不确定性;②VIC-Cama Flood模型因模型概化和网格划分影响,概化的汇流路径导致洪水遭遇时间提前或滞后,因而对水文极端事件的模拟可能存在一定低估;③极端水文序列的非一致性及所服从的统计学分布选取带来的不确定性。尽管如此,多模式集合结果仍表明未

来重庆市极端水文事件将更加频繁。除此之外, 随着未来径流量增加, 流域极端水文事件强度增速将明显加快, 高排放情景下寸滩站远期多年平均径流量低于低、中排放情景, 而 Q_{\max} 的 50 年一遇值较低、中排放情景分别高出了 24.4% 与 22.1%。

2.3.3 未来洪泛区水深形势

重庆市洪水形势未来演变趋势结果如图 8—图 9 所示。从图 8(a) 与图 9(a) 可以看出, 未来汛期洪水淹没面积将大幅增加, 在近期, 低、中、高排放情景下洪泛区汛期最大淹没面积较基准期分别增长了 92、98 和 112 km^2 ; 在远期, 低、高排放情景下洪泛区汛期最大淹没面积将进一步增长, 较基准期增幅分别为 107、146 km^2 , 中排放情景下洪泛区汛期最大淹没面积较基准期增幅为 67 km^2 , 并且, 大部分气候模式模拟结果均显示未来重庆市汛期淹没面积将明显增长。此外, 洪水极端性也有所增加, 基准期时段中年最大淹没面积为 832 km^2 , 近期低、中、高排放情景下该值分别为 962、986、981 km^2 , 远期该值进一步增长为 976、876 和 1 013 km^2 , 低、中排放情景下洪水淹没形势远期相对近期进一步增长的趋势较小, 而高排放情景下洪水淹没形势将更加严峻。高排放情景下, 温室气体浓度更高对应着更高的温升水平, 根据 Clausius-Clapeyron 定理, 大气饱和水汽压随温度升高而增加, 速率达到 $7\%/^{\circ}\text{C}$ ^[26]。一方面, 大气持水能力因全球变暖而增加, 从而导致未来极端降水发生强度和频率增大, 加剧未来极端洪涝风险; 另一方面, 在未来全球洪水加剧的背景下, 重庆市过境洪水也会因升温和下垫面变化而加剧, 干支流洪水遭遇会进一步增加城市极端内涝, 因而在高排放情景下, 极端内涝的危害也会愈发严重。

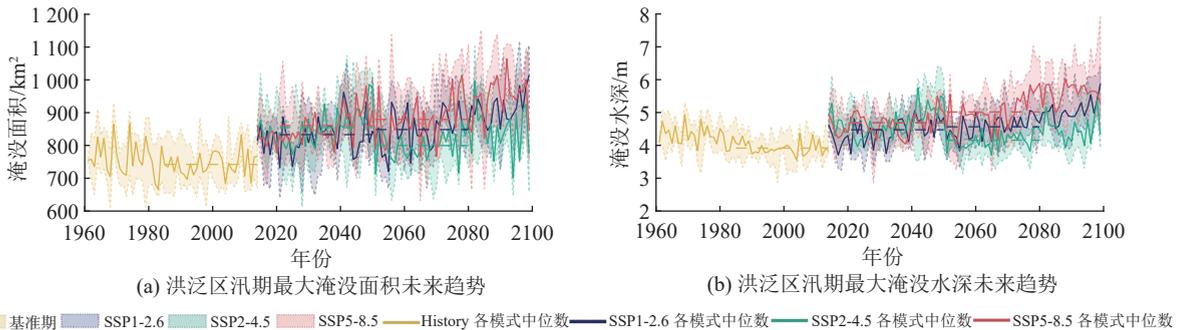


图 8 重庆市洪水淹没形势未来预估

Fig. 8 Future prediction of flood inundation situation in Chongqing City

从图 8(b) 与图 9(b) 可以看出, 随着降水量增加及洪水淹没面积的增长, 未来重庆市汛期洪水淹没水深将大幅增加, 在近期, 低、中、高排放情景下洪泛区汛期最大淹没水深较基准期分别增长了 0.55、0.71 与 0.42 m; 在远期, 低、高排放情景下洪泛区汛期最大水深将进一步增长, 较基准期增幅分别为 0.67、1.03 m, 中排放情景下洪泛区汛期最大淹没水深较基准期增幅为 0.27 m。极端洪水危险性将显著增长, 近期低、中、高排放情景下最大淹没水深较基准期分别增加 0.56、0.74 和 0.71 m, 远期该值进一步增长为 0.70、0.25 和 0.95 m, 中排放情景下, 洪水形势远期相对近期有所缓解, 高排放情景下洪泛区最大淹没水深显著增长。

图 10 给出了低、中、高排放情景下未来汛期最大淹没深度较基准期的变化情况。可以看出, 重庆市未来汛期淹没水深将增加, 近期低排放情景下水深增长较高, 远期高排放情景下洪水水深增长较高。与洪水淹没面积增长的地区相似, 涪江及嘉陵江河谷与沿岸地区是洪水水深增长的敏感区域, 低排放情景下将增长 2.0 m 以上, 高排放情景下增长 1.0~3.0 m, 中排放情景下增幅最小, 仅为 0.5~1.0 m。长江沿岸地区洪水水位增长明显, 其中近期低、高排放情景下水位的的增长主要贡献为嘉陵江径流的增加, 长江汇入重庆前部分无明显变化, 寸滩站下游及乌江汇江口水位大幅增加, 增幅达 1.0~3.0 m, 远期将进一步增长至 3.0 m 及以

上，中排放情景下嘉陵江沿岸水位变化不大，长江上游水位增长高于下游，整体将增长 1.0~3.0 m，远期较近期洪水水深明显下降；值得注意的是，各排放情景下，长江右岸城市东南部区域未来增长不明显，究其原因，高程变异度是洪水风险发生区域的重要因素，城市东南部地形起伏较小，难以汇集洪水。

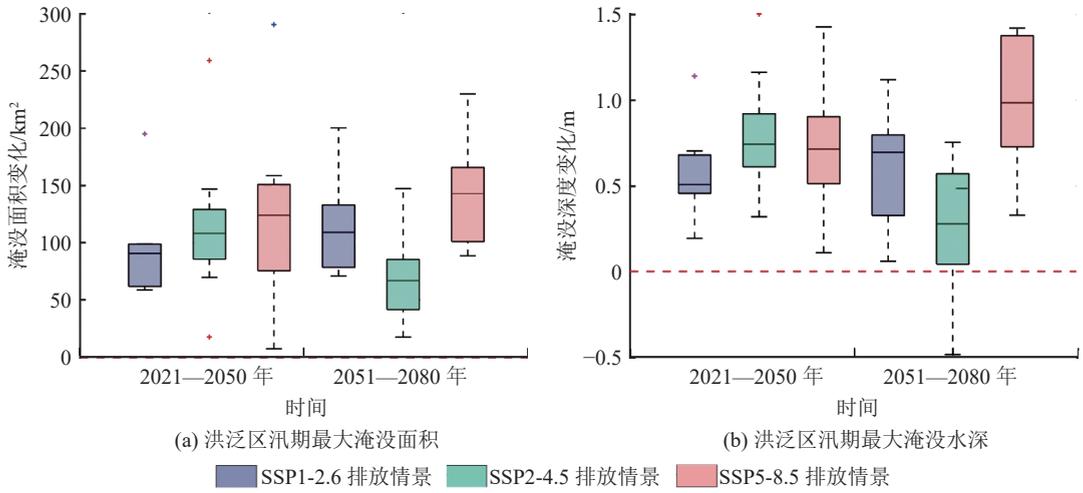


图 9 重庆市洪水淹没形势未来预估箱线图

Fig. 9 Boxplot of future estimates of flood inundation situation in Chongqing City

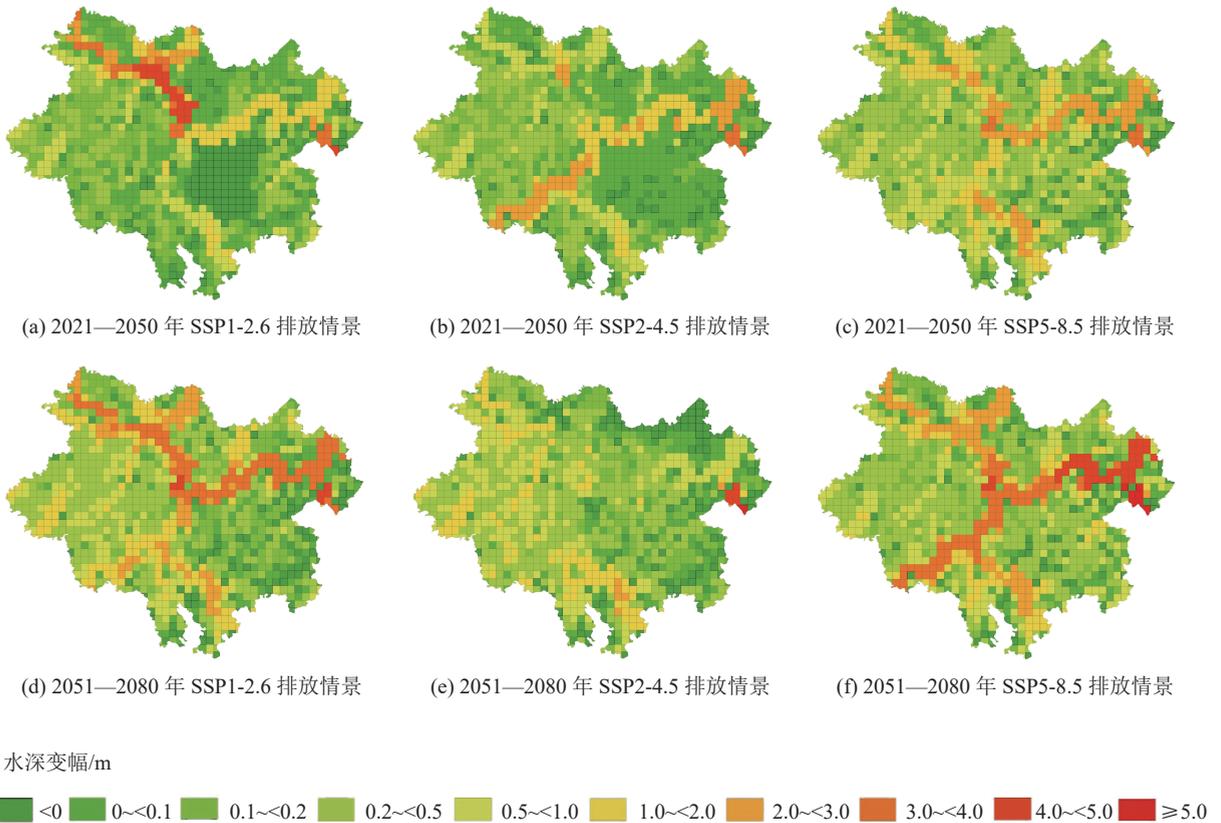


图 10 重庆市未来汛期洪泛区淹没深度预估空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of floodplain inundation depth predictions during the flood season in Chongqing City

3 结 论

本文构建了长江流域宜昌站上游区域 VIC-Cama Flood 水文水动力学模型,研究了重庆市历史洪涝形势演变特征,基于 CMIP6 气候模式预估了重庆市 2021—2080 年未来极端降水量、极端径流量及洪水淹没形势。主要研究结论如下:

(1) VIC-Cama Flood 模型在长江上游流域适用性较好,大多数水文站点日径流模拟纳什效率系数大于 0.73,模拟径流量和实测径流量的多年平均相对误差小于 8%。对于水位模拟,模型对流域干流的模拟略优于支流站点(北碚(三)站),干流寸滩站及宜昌站的日水位模拟纳什效率系数达到 0.90 以上。本研究所构建模型适用于流域未来径流、洪水事件变化趋势预估及洪水形势分析。

(2) 重庆市历史和未来极端降水量均呈增多趋势。多模式预估显示,气候变化下重庆市未来极端降水大幅增加,超 95% 分位数年累积降水量和超 99% 分位数年累积降水量整体增幅明显,2021—2080 年较基准期分别增加 8.6%~39.4% 与 16.9%~85.9%。特别是在高排放情景下,因极端降水引发的极端洪水的频率和强度将大幅上升,对城市防洪构成严峻挑战。

(3) 在不考虑增加水利工程等人工调蓄作用影响下,未来气候变化将增加重庆市的洪涝风险。气候变化下未来城市洪泛区淹没面积及深度将增加,2021—2080 年洪涝淹没面积较基准期(1985—2014 年)将增长 46~181 km²,水深较基准期将增加 0.27~1.03m,涪江、嘉陵江、綦江、乌江入江口及长江沿岸地区、城市西北部山区是洪涝形势扩张的敏感区域。

参考文献:

- [1] 胡婷,孙颖. IPCC AR6 报告解读:人类活动对气候系统的影响[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 644-651. (HU T, SUN Y. Interpretation of IPCC AR6 on human influence on the climate system[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 644-651. (in Chinese))
- [2] BLÖSCHL G, HALL J, VIGLIONE A, et al. Changing climate both increases and decreases European river floods[J]. *Nature*, 2019, 573(7772): 108-111.
- [3] 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等. 气候变化科学方面的几个最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 629-635. (ZHAI P M, ZHOU B Q, CHEN Y, et al. Several new understandings in the climate change science[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 629-635. (in Chinese))
- [4] 张建云,王银堂,刘翠善,等. 中国城市洪涝及防治标准讨论[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(1): 1-6. (ZHANG J Y, WANG Y T, LIU C S, et al. Discussion on the standards of urban flood and waterlogging prevention in China[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(1): 1-6. (in Chinese))
- [5] 宋晓猛,徐楠涛,张建云,等. 中国城市洪涝问题:现状、成因与挑战[J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 357-373. (SONG X M, XU N T, ZHANG J Y, et al. Urban flooding in China: current status, causes and challenges[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(3): 357-373. (in Chinese))
- [6] 杨保军,陈明. 中国城镇化发展特征和转型趋势[J]. 中国房地产金融, 2024(4):9-18. (YANG B J, CHEN M. The Characteristics and transformation trends of China's urbanization[J]. *China Real Estate Finance*, 2024(4):9-18. (in Chinese))
- [7] WANG Y J, WANG A Q, ZHAI J Q, et al. Tens of thousands additional deaths annually in cities of China between 1.5 °C and 2.0 °C warming[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3376.
- [8] 史军,梁萍,万齐林,等. 城市气候效应研究进展[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(6): 942-951. (SHI J, LIANG P, WAN Q L, et al. A review of the progress of research on urban climate[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(6): 942-951. (in Chinese))
- [9] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 713-724. (XU Z X,

- CHEN H, REN M F, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese))
- [10] EYRING V, BONY S, MEEHL G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1937-1958.
- [11] EYRING V, COX P M, FLATO G M, et al. Taking climate model evaluation to the next level[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 102-110.
- [12] ZHU H H, JIANG Z H, LI L. Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(24): 2528-2537.
- [13] LUO N, GUO Y, GAO Z B, et al. Assessment of CMIP6 and CMIP5 model performance for extreme temperature in China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, 13(6): 589-597.
- [14] 舒章康, 李文鑫, 张建云, 等. 中国极端降水 and 高温历史变化及未来趋势 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 116-125. (SHU Z K, LI W X, ZHANG J Y, et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 116-125. (in Chinese))
- [15] ZHOU J Y, LU H, YANG K, et al. Projection of China's future runoff based on the CMIP6 mid-high warming scenarios[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(3): 528-546.
- [16] TRY S, TANAKA S, TANAKA K, et al. Comparison of CMIP5 and CMIP6 GCM performance for flood projections in the Mekong River basin[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 40: 101035.
- [17] 王国庆, 乔翠平, 刘铭璐, 等. 气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析 [J]. *水利水电工程学报*, 2020(2): 1-8. (WANG G Q, QIAO C P, LIU M L, et al. The future water resources regime of the Yellow River basin in the context of climate change[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(2): 1-8. (in Chinese))
- [18] HOCH J M, EILANDER D, IKEUCHI H, et al. Evaluating the impact of model complexity on flood wave propagation and inundation extent with a hydrologic-hydrodynamic model coupling framework[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(8): 1723-1735.
- [19] WANG J, YUN X B, POKHREL Y, et al. Modeling daily floods in the Lancang-Mekong River basin using an improved hydrological-hydrodynamic model[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(8): e2021WR029734.
- [20] ZHONG M, ZHANG H R, JIANG T, et al. A hybrid model combining the cama-flood model and deep learning methods for streamflow prediction[J]. *Water Resources Management*, 2023, 37(12): 4841-4859.
- [21] MARAUN D. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: revisiting the inflation issue[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(6): 2137-2143.
- [22] 李文鑫, 金君良, 舒章康, 等. 气候变化对嘉陵江流域水资源和极端水文事件的影响 [J]. *水利水电工程学报*, 2024(2): 20-33. (LI W X, JIN J L, SHU Z K, et al. Assessing the impact of climate change on water resources and extreme hydrological events in the Jialing River basin[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2024(2): 20-33. (in Chinese))
- [23] YAMAZAKI D, SATO T, KANAE S, et al. Regional flood dynamics in a bifurcating mega delta simulated in a global river model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(9): 3127-3135.
- [24] 方开泰. 均匀试验设计的理论、方法和应用: 历史回顾 [J]. *数理统计与管理*, 2004, 23(3): 69-80. (FANG K T. Theory, method and application of uniform experimental design: historical review[J]. *Application of Statistics and Management*, 2004, 23(3): 69-80. (in Chinese))
- [25] MISZUK B. Climate water balance in the warm half-year and its circulation conditions in the sudetes mountains and their foreland (Poland and czechia)[J]. *Water*, 2023, 15(4): 795.
- [26] TRENBERTH K E, DAI A G, RASMUSSEN R M, et al. The changing character of precipitation[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(9): 1205-1218.

Evolution of rain-flood characteristics and projection of future flood risk in Chongqing City*

JIN Junliang^{1,2}, LI Wenxin³, SHU Zhangkang^{1,4}, ZHANG Jianyun^{2,4}, XU Wentao^{1,2}, LIU Cuishan^{2,4}

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210098, China*; 2. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China*; 3. *Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China*; 4. *Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Urban flooding, exacerbated by the dual impacts of global climate change and rapid urbanization, poses a significant threat to the sustainable development of cities. Using hydrometeorological data from 1960 to 2019 in Chongqing and projections from ten global climate models from the Sixth Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), this study examines trends in extreme precipitation and regional flooding in the city. A large-scale VIC-Cama Flood coupled model was developed to simulate and forecast future climate, hydrology, and flood scenarios in Chongqing. The findings are as follows: ① From 1960 to 2019, extreme precipitation in Chongqing showed an increasing trend, with growing variability in precipitation and discharge distribution. ② The VIC-Cama Flood model, which is well-suited for the Upper Yangtze River, demonstrated good performance, with Nash efficiency coefficients of 0.81 for discharge simulations and 0.87 for water level simulations, and relative errors of 4.7% and 0.4%, respectively, across sub-basins. ③ Under future climate change scenarios, extreme precipitation in Chongqing is projected to increase significantly, with the annual cumulative precipitation exceeding the 99th percentile during the flood season increasing by 16.9% to 85.9% compared to the 1985—2014 period. Extreme hydrological events are expected to intensify, with the 50-year return period for maximum discharge and five-day maximum flood volume potentially shortening to less than 20 years under high-emission scenarios. ④ In the absence of water conservation projects, future climate change will exacerbate the risk of urban flooding. The cascading effects of extreme precipitation, cross-boundary flooding, and urban waterlogging under climate change will pose serious challenges to urban planning and sustainable development in Chongqing.

Key words: urban flooding; extreme rainfall; climate change; VIC-Cama Flood model; CMIP6

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFC3200201) and the National Natural Science Foundation of China (No. U2240203).