

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230716

考虑降雨空间异质性的流域洪水过程模拟研究

刘 薇¹, 贾菁菁², 刘 阳², 曹升乐², 王海军¹, 王 凯³, 王 俊²

(1. 山东省水文中心, 山东 济南 250000; 2. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061;
3. 淮河水利委员会水文局(信息中心), 安徽 蚌埠 233001)

摘要: 气候变化等因素使得降雨时空分布不均匀性增强, 研究洪水对降雨空间异质性的响应关系, 对于指导干支流不同频率暴雨组合遭遇条件下的流域洪水模拟意义重大。以山东省沂河临沂站以上流域为例, 应用新安江模型构建流域水文模型。利用 1980~2020 年 6~9 月逐小时降雨数据进行频率分析, 推求沂河流域降雨历时为 72 h 的不同重现期的设计暴雨。通过不同重现期的暴雨组合设计情景, 利用构建的水文模型模拟, 对临沂站的洪水过程进行分析, 得到降雨空间异质性对洪水过程的影响关系。结果表明, 降雨空间分布对洪峰流量的影响显著, 靠近流域出口的区域降雨量是洪峰流量的决定性因素, 降雨空间异质性高的情景下, 较小的降雨也可能产生较大的洪水峰值流量。研究结果可为降雨空间异质性导致的干支流洪水遭遇条件的下游断面洪水预报提供参考。

关键词: 降雨空间异质性; 沂河流域; 新安江模型; 设计暴雨

中图分类号: TV122⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0053-04

1 概况

沂河流域地处山东省南部, 沂河发源于山东省沂源县西部, 是鲁南地区跨省的最大山洪河道。沂河全长 386 km, 其中山东省境内河长 287.5 km, 河道平均比降 1.55‰。沂河流域临沂站以上面积约 10 026 km²。沂河流域 DEM、主要水系和水文站分布见图 1。沂河干流设有葛沟和临沂

两个水文站, 流域内有 15 个主要雨量站。掌握降雨空间分布对洪水过程的影响, 对于深入了解雨洪致灾原理和指导防洪工作有重要意义。目前, 关于洪水对于降雨时空异质性响应的研究主要为使用降雨发生器^[1-2]、卫星降水产品^[3]和雨量站资料分析^[4]等方法生成具有时空异质性的降雨, 并构建水文模型模拟流域产汇流。本文在现有研究基础上, 以临沂站以上沂河流域为例进行降雨频率分析, 构建不同的空间设计暴雨组合, 输入到率定后的流域水文模型进行模拟, 结合流域历史降雨特性, 探究考虑降雨空间异质性下的洪水过程及洪峰流量响应, 定量揭示洪峰流量对降雨空间异质性的响应规律, 以为流域防洪减灾提供参考。

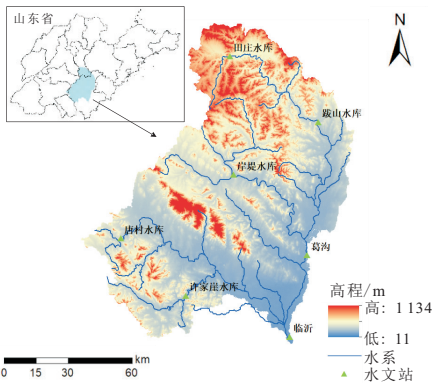


图 1 沂河流域位置及高程、水系、水文站分布情况
Fig. 1 Location and DEM of Yihe River Basin and distribution of rivers and hydrological stations

2 研究方法

2.1 水文模型

三水源新安江模型^[5]是经典的概念性半分布式水文模型, 为我国自主研发的水文模型, 在湿润

收稿日期: 2023-05-06, 修回日期: 2023-06-24

基金项目: 山东大学青年学者未来计划项目(31410082164087)

作者简介: 刘薇(1980-), 女, 博士、高级工程师, 研究方向为水文预报、防汛抗旱, E-mail: 16828452@qq.com

通讯作者: 王俊(1989-), 男, 博士、副研究员、硕导, 研究方向为城市雨水控制与利用, E-mail: wangjunwater@sdu.edu.cn

和半湿润地区有较好应用。新安江模型包含蒸散发、蓄满产流、水源划分、汇流计算 4 个模块。模型采用三层蒸散发公式计算蒸散发量,利用蓄满产流及蓄水容量曲线计算总径流量,并根据自由蓄水容量曲线将总径流量划分成地面、壤中和地下径流,其中壤中流和地下径流通过线性水库计算流入河网,地面径流直接流入河网,采用滞后演算法计算河网汇流,采用马斯京根法计算河道汇流。

2.2 设计暴雨

在缺乏实测洪水数据的地区,采用设计暴雨方法模拟洪水,进行干支流洪水遭遇分析。根据《山东省沂沭河流域联合调度方案编制试点》^[6]中提供的沂河雨型进行时程分配,见表 1(表 1 中, H_{3d} 为最大 72 h 降雨量; H_{24h} 为最大 24 h 降雨量)。

表 1 沂河流域设计雨型表

Tab. 1 Design storm hyetographs of Yihe River Basin

时程 分配	日程分配		
	$(H_{3d} - H_{24h}) \times 35\%$	$(H_{3d} - H_{24h}) \times 65\%$	H_{24h}
1			
2			
3	3.6		1.0
4	23.3	3.0	0.5
5	31.3	3.6	1.2
6	8.2	9.4	1.1
7	2.3	2.6	3.0
8	3.8		2.4
9			3.6
10			3.3
11			3.4
12			1.5
13			5.1
14		2.4	8.8
15		5.3	5.5
16		0.8	13.7
17			18.8
18			1.0
19			4.5
20			3.0
21			3.2
22		0.9	3.0
23			3.2
24			

2.3 考虑空间异质性的洪水模拟分析方法

在设计暴雨的基础上,洪水模拟分析方法就是将流域分为三个子区域,选择 T1、T2、T3 作为典型重现期,对子区域的降雨重现期进行组合,在水文模型中进行模拟,即可分析降雨空间异质性对洪水过程的影响。2020 年沂河流域发生强降水,选取 8 月 12 日 8:00~8 月 15 日 7:00 共计 72 h 作为研究时段,反推上、中、下游 72 h 降雨量频率,即计算出上、中、下游 72 h 的总降雨量,在 P-III 型分布适线图中读取 72 h 降雨量对应的频

率。结果发现 2020 年沂河流域强降水在空间上有明显重现期差异,中游发生了约 180 年一遇的降雨,而上游和下游的降雨不足 2 年一遇。沂河流域 2020 年强降水频率分析见表 2。

表 2 沂河流域 2020 年强降水频率分析

Tab. 2 Frequency analysis of the heavy rainstorm in Yihe River Basin in 2020

区域	72 h 降雨量/mm	频率/%	重现期/a
上游	88.0	75.21	1.33
中游	317.0	0.55	181.81
下游	94.3	78.60	1.27

3 模型构建

3.1 沂河临沂站以上流域产汇流模型构建

综合考虑现有雨量站分布、主要水库及控制性水文站等信息,利用 12.5 m 精度的 DEM 划分沂河流域的子流域。提取流域河网,经过 DEM 填洼、流向流量累积计算、汇流累积阈值试验等步骤进行子流域划分试验,得到当汇流累积阈值设为 20 km² 时,提取的河网与沂河现状河网分布情况最为接近。将沂河临沂站以上流域 15 个雨量站的降雨数据和临沂水文站的径流数据输入模型,并设置河网节点属性,使得上下游子流域中相连接河段通过水库或水文站进行链接。

3.2 模型率定与验证

选取 2000~2017 年中的 5 场暴雨洪水过程进行模型率定,选择 2018~2020 年中的 3 场洪水过程(2018 年 8 月 18 日、2019 年 8 月 5 日和 2020 年 8 月 13 日的典型暴雨场次)进行验证。模型参数率定结果见表 3,验证结果见表 4。认为符合《水文情报预报规范(GB/T 22482-2008)》^[7]对洪水预报的精度要求,即相关系数 ≥ 0.6 ,确定性系

表 3 模型参数率定结果

Tab. 3 Results of model parameter calibration

符号	含义	取值	单位
K	蒸散发能力折算系数	1.18	
B	张力水蓄水容量曲线指数	0.49	
C	深层蒸散发系数	0.10	
IM	非渗透区系数	0.002	
UM	上层张力水容量	1.01	mm
LM	下层张力水容量	23.62	mm
DM	深层张力水容量	50.22	mm
SM	流域平均自由水容量	59.80	mm
EX	自由水蓄水容量曲线指数	0.50	
KI	壤中流产流日出流系数	0.47	
KG	地下径流产流日出流系数	0.19	
CS	地表径流时段消退系数	0.39	
CI	壤中流时段消退系数	0.87	
CG	地下径流时段消退系数	0.83	

表 4 模型验证结果

Tab. 4 Model validation results

洪水场次	洪峰流量			峰现时间		绝对误差	相关系数	确定性系数
	实测值	模拟值	相对误差/%	实测值	模拟值			
20180818	3 220	2 693	16.40	2018-08-20 9:00	2018-08-20 10:00	1 h	0.871	0.728
20190805	7 300	7 648	-4.80	2019-08-11 16:00	2019-08-11 18:00	2 h	0.945	0.909
20200813	10 700	10 803	-0.90	2020-08-14 20:00	2020-08-14 17:00	3 h	0.915	0.821

注:洪峰流量实测值、模拟值单位均为 m³/s。

数 ≥ 0.5, 相对误差 ≤ 20%, 沂河临沂站以上流域模型模拟径流和实测径流接近, 模型精度合格, 可以用于进一步研究。

4 结果与分析

4.1 沂河流域设计降雨值及时程分配

根据流域水系情况及雨量站分布, 将沂河流域临沂站以上 12 个子流域进一步分为上、中、下游三个计算单元(图 2), 子流域及计算单元面积统计见表 5。将 15 个雨量站进行重新分配, 计算单元雨量数据可直接根据雨量站在空间上的分布特征, 采用算术平均值法计算。将 15 个雨量站 1960~2020 年逐小时降水数据进行统计处理, 计算逐年最大 72 h 降雨量, 采用 P-III 型曲线进行拟合适线。得到不同重现期下上、中、下游计算单元 72 h 降雨量设计值, 见表 6。

表 5 子流域及计算单元面积统计表

Tab. 5 Summary of the areas for each computing zone

子流域	面积 /km ²	计算单元	子流域	面积 /km ²	计算单元	子流域	面积 /km ²	计算单元
1	418.9	上游	5	61.4	中游	6	87.7	下游
2	1 376.3	3 099.9 km ²	8	1 623.3	3 184.2 km ²	7	333.1	3 742.2 km ²
3	260.5		9	811.7		10	2 745.4	
4	1 044.2		12	687.8		11	576.0	

4.2 设计暴雨组合

沂河流域面积较大, 考虑降雨在空间上分布不均匀性特点, 流域从上游到中游、下游及西侧支流(东汶河、沭河等)与沂河干流的空间位置相对

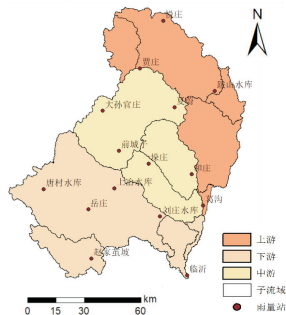


图 2 沂河流域雨量站分布及子流域与计算单元划分情况

Fig. 2 Maps of rain gauge stations, sub-catchments and computing unit zones for Yihe River Basin

表 6 72 h 降雨量设计值

Tab. 6 Depths of the 72-hr design storms

频率/%	重现期 /a	设计值/mm		
		上游	中游	下游
1	100	241.13	295.49	240.65
2	50	223.05	269.72	224.19
5	20	197.57	233.79	200.86
10	10	176.57	204.54	181.50
20	5	153.13	172.41	159.72
50	2	114.18	120.52	122.98

关系使得流域不同地理位置同时发生的设计暴雨频率可能不一致, 存在不确定性的组合情景, 可能导致上、下游和支、干流产生的洪水在河道演进过程中会发生不同频率的洪水过程线叠加。因此在模型率定合格的基础上, 对沂河流域不同暴雨组合下的洪水预报进行模拟。

根据划分的计算单元, 以不同频率的降雨出现在上、中、下游的不同组合情况作为不同情景。选取 2、10、50、100 年一遇作为典型重现期, 设置降雨时间一致、降雨空间存在异质性的 6 种降雨情景, 见表 7。通过对 1980~2020 年 6~9 月沂河流域上、中、下游最大 72 h 降雨量进行分析计算, 见图 3。从历史数据统计结果可以看出, 沂河流域上、中、下游同时发生两年以内重现期降雨的次数最多, 根据统计结果, 本文所设计的水文模型率定合格的基础上, 对沂河流域不同暴雨组合下的洪水预报进行模拟。

表 7 重现期设计情景组合

Tab. 7 Scenarios of combined return periods of design storms

序号	上游重	中游重	下游重	序号	上游重	中游重	下游重
	现期/a	现期/a	现期/a		现期/a	现期/a	现期/a
A	100	10	2	D	50	50	50
B	2	10	100	E	2	100	2
C	100	100	100	F	2	2	2

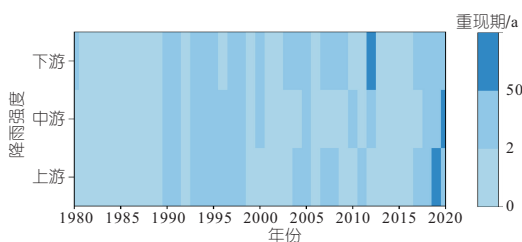


图 3 1980~2020 年沂河流域年降雨遭遇热图

Fig. 3 Heat map of annual rainfall concurrence in Yihe River Basin from 1980 to 2020

利用率定后的水文模型分别模拟 6 种情景的降雨, 将设计暴雨数据输入模型雨量站进行产汇流模拟, 得到临沂站的洪水过程线。

4.3 洪水过程对降雨空间异质性的响应

临沂站模拟洪水过程见图 4, 各情景下总降雨量及洪峰流量对比见图 5。由图 4、5 可得以下

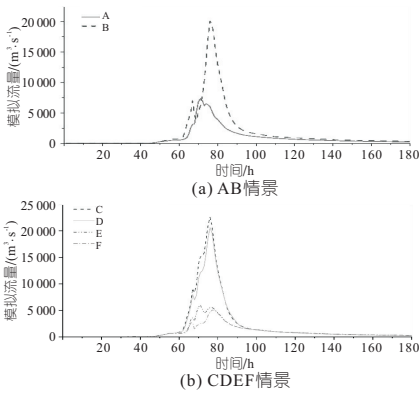


图 4 6 种不同设计暴雨组合情景下临沂站模拟洪水过程

Fig. 4 Flood simulation results at Linyin Station in six scenarios of different design storms

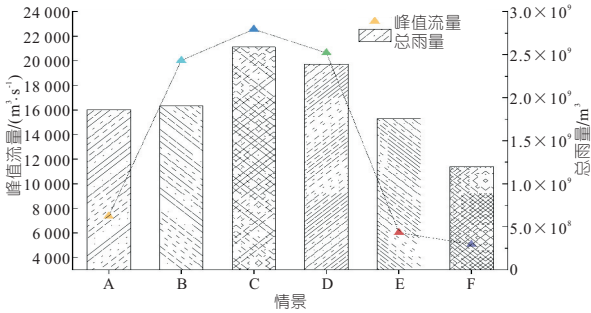


图 5 6 种暴雨情景下总雨量和峰值流量对比

Fig. 5 Comparison of total rainfall and peak flows in six design storm scenarios

结论:①分析 A、B 两种情景可知,百年一遇的暴雨发生在上游时,临沂站洪峰流量为 7 368.89 m³/s,而百年一遇的暴雨发生在下游时,临沂站洪峰流量为 20 031.69 m³/s,偏大 165%;而这两种情景下全流域降雨总量非常接近。说明暴雨的空间分布对于洪水过程特别是洪峰流量有重要影响,下游发生明显大于上游的高强度暴雨,造成汇流时间短,峰值流量大。根据 B、E 两种情景,总雨量相对接近,但峰值流量相差 70%,下游即靠近流域出水口的区域雨量是决定洪峰流量的关键因素。②分析 C、D、F 三种情景可知,当上、中、下游均发生百年一遇的暴雨时,临沂站洪峰流量为 22 564.66 m³/s;均发生 50 年一遇的暴雨时,临沂站洪峰流量为 20 641.77 m³/s;均发生 2 年一遇暴雨时,临沂站洪峰流量为 5 066.10 m³/s。全流域发生均匀暴雨情况下,洪峰流量与降雨总量呈相同增减趋势。③对比 C、E 两种情景可知,在全流域均发生百年一遇暴雨时,临沂站洪峰流量为 22 564.66 m³/s,而只有中游发生百年一遇洪水时,临沂站洪峰流量为 6 030.4 m³/s,偏小 73%,因此整个流域的强降水比流域部分区域的同等频率强降水更有可能导致下游洪水。④根据 B、D 两种情景,情景 B 雨量远小于 D,但峰值流

量接近,原因是情景 B 下降雨空间异质性高于情景 D 的降雨空间异质性,降雨量较小的情况下,也可能产生较大的径流峰值。⑤本文研究的流域面积较大,上游和中游发生降雨时,径流汇流到流域出口临沂站所需时间较长,受流域调蓄作用影响,上游和中游的降雨量对流域出口的洪峰流量及洪水总量影响较下游降雨量对其影响小。虽然情景 E 的总雨量和降雨峰值均大于情景 F 的值,情景 E、F 模拟得到的洪峰流量的差距(16%)和洪水总量的差距(13%)与降雨总量的差距(31.7%)相比均相对较小。

5 结论

- a. 通过对历史降雨资料的分析发现临沂站以上沂河流域上、中、下游同时发生 2 年一遇以内降雨的频率最大,为设计暴雨组合提供了依据。
- b. 降雨空间异质性显著影响洪水过程,尤其是洪峰流量值。当降雨空间存在异质性的情况下,较小的降雨总量也可能导致较大的洪峰流量,靠近流域出水口的区域降雨量是决定洪峰流量的关键因素。
- c. 未来可考虑暴雨中心移动对洪水过程的影响。

参考文献:

[1] 杨悦莹,朱志华,蔡宴朋,等. 城市流域径流峰值对降雨时空异质性的响应[J]. 水资源保护, 2021, 37(6):27-33,66.

[2] PELEG N, BLUMENSAAT F, MOLNAR P, et al. Partitioning the impacts of spatial and climatological rainfall variability in urban drainage modeling[J]. Hydrol. earth syst. sci., 2017, 21(3):1559-1572.

[3] SHAH H L, MISHRA V. Uncertainty and bias in satellite-based precipitation estimates over Indian subcontinental basins; Implications for real-time streamflow simulation and flood prediction[J]. Journal of hydrometeorology, 2016, 17(2): 615-636.

[4] GIRES A, ONOF C, MAKSIMOVIC C, et al. Quantifying the impact of small scale unmeasured rainfall variability on urban runoff through multifractal downscaling: A case study[J]. Journal of hydrology, 2012, (442/443):117-128.

[5] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6):2-9.

[6] 杨令强. 山东省沂沭河流域联合调度方案编制试点[R]. 济南:济南大学, 2021.

[7] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范:GB/T 22482-2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.

- 行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91-99.
- [3] 王槐, 苏超, 吕超洋, 等. 蟠龙抽水蓄能电站地下厂房区初始地应力场反演[J]. 水力发电, 2019, 45(8): 42-46.
- [4] 郭怀志, 马启超, 薛玺成, 等. 岩体初始应力场的分析方法[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 64-75.
- [5] 张乐文, 张德永, 邱道宏. 径向基函数神经网络在地应力场反演中的应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 799-804.
- [6] 郭运华, 朱维申, 李新平, 等. 基于 FLAC^{3D} 改进的初始地应力场回归方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 892-898.
- [7] 谢学斌, 罗海霞, 杨承祥, 等. 基于遗传单纯形算法与 RBF 网络的地应力场反演方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(1): 72-78.
- [8] 王金安, 李飞. 复杂地应力场反演优化算法及研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 189-205.
- [9] 付成华, 汪卫明, 陈胜宏. 溪洛渡水电站坝区初始地应力场反演分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2305-2312.
- [10] 刘允芳, 尹健民, 刘元坤, 等. 地应力测量方法和工程应用[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2014.
- [11] HAIMSON B C, CORNET F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2003, 40(7/8): 1011-1020.

Inversion of Initial Stress Field in Large Underground Plant Area of Pumped Storage Power Station

ZHENG Wei-feng¹, WANG Le-hua¹, LUO Sheng², HAN Xiao-yu², ZHANG Xin-hui², DONG Zhi-hong²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of MWR, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The characteristics and distribution of in-situ stress field have an important influence on the stability and engineering design of the surrounding rock of underground power house. According to the deep surface drilling hole and engineering geological conditions of the underground power house of a pumped storage power station, a three-dimensional numerical analysis model was established, and the inversion reconstruction of the initial in-situ stress field was realized through multiple linear regression analysis. The results show that the maximum horizontal principal stress measured in deep holes is 6.7-17.6 MPa. The magnitude and direction of the inversion model are in good agreement with the measured value, and the horizontal stress in the underground workshop area is dominant, and the maximum horizontal principal stress is 16.2-17.4 MPa. The maximum principal stress azimuth of the stress field in the plant area is less than 30°, and the stress distribution and azimuth angle meet the design requirements. The research results provide a reference for similar large-scale underground projects.

Key words: initial in-situ stress field; deep hole in-situ stress test; multiple linear regression; main plant axis

(上接第 56 页)

Simulation of Flood Processes in Watersheds Considering Spatial Heterogeneity of Rainfall

LIU Wei¹, JIA Jing-jing², LIU Yang², CAO Sheng-le², WANG Hai-jun¹, WANG Kai³, WANG Jun²

(1. Hydrologic Center of Shandong Province, Jinan 250000, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Hydrology Bureau of Huaihe Water Conservancy Commission (Information Center), Bengbu 233001, China)

Abstract: Factors such as climate change have increased the spatial-temporal distribution heterogeneity of rainfall, it is thus important to study the response of hydrograph to the influence of the spatial heterogeneity of rainfall, which is of great importance to provide guidance to the hydrologic simulation of the flooding under conditions that the rainfall of the mainstream and tributary streams have different occurrence frequencies. The watershed above Linyi station of the Yihe River in Shandong Province was selected as an example. The watershed hydrological model was established using the Xinanjiang model. Hourly rainfall data from June to September from 1980 to 2020 were used for frequency analysis to obtain the design storms with different return periods in the Yihe river basin with a duration of 72 h. The flood process at Linyi station was analyzed by considering combined design scenarios of design storms with different return periods. Simulations were run using the established hydrologic model to obtain the response of flood process to the spatial heterogeneity of rainfall. The results show that the spatial distribution of rainfall has a significant impact on peak flows, with rainfall in areas close to the basin outlet being the determining factor for peak flood flows, and that smaller amounts of rainfall can produce larger peak flows in scenarios with high spatial heterogeneity of rainfall. The results can provide reference for the flood forecasting of downstream cross-sections under conditions that the mainstream and tributary floods have different occurrence frequencies due to spatial heterogeneity of rainfall.

Key words: spatial heterogeneity of rainfall; Yihe River Basin; Xinanjiang model; design storm