

左凌峰, 邹磊, 夏军, 等. 汉江上游白河流域洪水类型辨识与模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 641-650. ZUO L F, ZOU L, XIA J, et al. Identification and simulation of flood types in Baihe basin of the upper Han River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 641-650. (in Chinese)

汉江上游白河流域洪水类型辨识与模拟

左凌峰^{1,2}, 邹磊¹, 夏军^{1,3}, 于家瑞¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 构建多维度洪水行为特征指标刻画洪水过程, 结合主成分分析、K 均值聚类和水文模型等方法, 辨识并模拟白河流域主要洪水类型及其行为特征。结果表明: 白河流域主要洪水类型可分为矮胖型中等洪水、剧烈变化型大洪水、尖瘦型中等洪水和单峰突发性小洪水 4 类; 洪水类型的空间分布具有显著的区域差异, 干流以矮胖型中等洪水类型为主, 支流以单峰突发性小洪水类型为主; 时变增益水文模型能够准确捕捉不同类型洪水的行为特征, 特别是对尖瘦型中等洪水和单峰突发性小洪水的量级、涨落变化等特征模拟效果较好。研究成果可为流域防洪减灾和水资源区域化科学管理等提供科学支撑。

关键词: 洪水; 洪水行为特征; 洪水类型; 时变增益水文模型; 白河流域

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0066

洪水事件呈现显著的时空分异性^[1], 不同流域的洪水行为特征和防洪重点存在显著差异^[2]。因此, 基于流域洪水行为特征, 辨识并模拟流域主要洪水类型, 对编制流域防洪规划和制定洪水管理政策具有重要意义。准确划分洪水事件是进行洪水行为特征分析与洪水反演^[3]的基础性工作, 其常用方法为专家判断法^[4]和流量阈值法^[5]。专家判断法数据处理效率较低; 流量阈值法对形态特征考虑不足, 难以准确识别洪水的涨落过程。构建洪水事件划分方法并选取典型洪水事件, 可为分析洪水行为特征和辨识洪水类型提供数据支撑。根据洪水事件的水文相似性进行洪水分类, 是加强洪水管理和提高洪水模拟精度的有效途径。在现有洪水分类方法中, 多数研究利用降雨指标或洪水行为特征指标进行分类。前者选取雨强、雨量、前期影响雨量等降雨指标将产汇流过程具有一定共性的洪水进行聚类^[5-7]。而降雨过程的相似性不能完全对应洪水事件的水文相似性^[8], 分类结果难以全面反映洪水过程的显著差异。基于洪水行为特征指标的分类方法, 所需资料少, 能够直接反映不同类型洪

水事件的特征差异, 确保洪水事件的水文相似性^[9-10]。然而, 现有研究重点关注量级、时间等特征, 对涨落变化、峰量关系等特征考虑不足。因此, 构建涵盖量级、时间、涨落变化、峰值分布、峰量关系和形态等多维度的洪水行为特征指标体系, 以此全面刻画洪水事件, 辨识流域主要洪水类型, 对洪水资源管理与利用具有重要意义。准确模拟不同类型洪水及其行为特征指标, 可为精准防洪和洪水分类预报提供决策依据^[11]。王璐等^[12]探讨了 5 种水文模型对不同气候区洪水量级特征的适用性; 张珂等^[13]分析了智能模型对流域洪水的量级、时间特征的模拟效果差异; 阎晓冉等^[14]结合 Copula 函数模拟了洪水的量级、时间、形态等特征。现有研究重点关注流域气象条件对洪水行为特征指标模拟效果的影响, 本研究基于构建的多维洪水特征指标体系, 进一步分析水文模型对不同类型洪水特征指标的模拟效果差异, 对洪水特征深入挖掘具有重要意义, 可为流域水资源评估与管理与防洪减灾提供决策依据。

汉江上游白河流域水资源丰富, 流域内降雨时空分配不均, 洪水灾害频发^[15], 辨识并模拟流域主

收稿日期: 2024-01-12 修回日期: 2024-04-03 网络出版时间: 2024-07-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240711.0946.014>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3006705); 国家自然科学基金项目(42101043)

作者简介: 左凌峰(2000—), 女, 湖北武汉人, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zuolingfeng22@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 邹磊(1990—), 男, 河南三门峡人, 副研究员, 博士, 主要从事流域水循环模拟研究。E-mail: zoulel@igsnr.ac.cn

要洪水类型及其行为特征,对流域防洪减灾具有重要意义。因此,以汉江上游白河流域为研究区,耦合超定量选样法和滑动方差阈值以准确划分洪水事件,构建多维洪水行为特征指标体系以全面刻画洪水事件,结合主成分分析和 K 均值聚类方法辨识流域主要洪水类型,并进一步利用时变增益水文模型模拟不同类型洪水及其行为特征。研究成果可为流域防洪减灾和水资源管理提供科学依据。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区概况

汉江是长江最大的支流,全长 1 577 km,流域面积 15.9 万 km^2 。白河水文站位于陕西省白河县,是南水北调中线工程水源地丹江口水库的入库控制站。白河站以上流域位于陕西省境内,流域面积 5.9 万 km^2 ,占汉江流域总面积的 37.1%。该流域位于北亚热带季风区,气候湿润,多年平均气温 14 $^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量 894 mm^[16],5—10 月降水量约占全年降水量的 75%,具有夏秋洪水分期特征^[17]。

本研究以汉江上游白河流域为研究区域,以位于流域干支流的汉中、石泉、安康、白河、两河口、六口和柴坪 7 个子流域为研究对象。

1.2 数据来源

气象数据为中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的 30 个气象站 2007—2020 年日尺度实测降雨资料,并利用泰森多边形法^[18]估算流域面平均降雨;研究区内 7 个水文站点 2007—2020 年逐日径流数据来源于水文年鉴。

2 研究方法

2.1 洪水事件划分

从连续的日径流数据中划分洪水事件分为 2 个步骤:挑选洪峰和确定起止时间。其中,常用的洪峰挑选方法为超定量选样法(peak over threshold, POT),该方法选取超过某一阈值的洪峰值,挑选满足阈值和独立性条件的洪峰作为洪峰序列。因此,构建耦合超定量选样法^[19]和滑动方差阈值的洪水事件划分方法,并将洪水事件起止时间限制在洪峰前后的窗口期内,以合理确定洪水事件持续时间,为辨识流域主要洪水类型提供数据支撑。

超定量选样法的洪峰独立性判别条件采用美国水资源协会提出的连续洪峰判别标准^[20]。洪水窗口期参考 Zhang 等^[21]结合流域汇水面积和洪水独

立性提出的判别条件确定:

$$\Delta T_{\text{rise}} \leq \alpha \left[5 + \ln \left(\frac{A}{1.609^2} \right) \right] \quad (1)$$

式中: ΔT_{rise} 为洪水涨水持续时间, d; A 为流域面积, km^2 ; α 为取值范围 (1,2) 的经验参数,取推荐值为 1.5^[21]。

洪水事件起止时间是结合量级特征和形态特征综合确定的,即划分的洪水事件需同时满足流量序列和流量滑动方差序列的阈值判别条件,以确保划分的洪水事件径流量大且涨落变化迅速。其中,滑动方差阈值采用 Fischer 等^[22]用于识别数据集中数值偏差的 Sigma 阈值:

$$Q_s \geq b Q_{\text{Peak}} \quad (2)$$

$$\begin{cases} V_{d_v}(s) \geq T_v \\ V_{d_v}(i) = V(Q_{i-(d_v-1)}, \dots, Q_i) \\ T = \overline{V_{d_v}} + c \sqrt{V(V_{d_v})} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_{Peak} 、 Q_s 分别为洪峰流量和洪水开始日期的流量, m^3/s ; b 为取值范围 (0,1) 的经验参数,取推荐值为 0.5^[5]; d_v 为计算滑动方差的天数,受流域面积和径流变化特点影响,取值范围为 (3,7), d; V_{d_v} 为多日流量的滑动标准差, m^6/s^2 ; T_v 为流量方差的 Sigma 阈值, m^6/s^2 ; $\overline{V_{d_v}}$ 为滑动方差序列的平均值, m^6/s^2 ; c 为取值范围 (0,1) 的经验参数,取推荐值为 0.25^[22]。

2.2 洪水行为特征指标体系

从量级、时间、涨落变化、峰值分布、峰量关系和形态 6 个维度的洪水行为特征中筛选了 9 项指标(表 1)以全面刻画洪水事件。量级特征和时间特征是洪水过程的基本特征,常用于洪水分析及洪水灾害评估^[23]。涨落变化特征可反映洪水演变规律,引入上升、下降变化率表征洪水的涨、退水速率,以衡量洪水风险的不确定性^[24]。峰值分布特征可反映高峰流量的分布与历时,高脉冲历时越长,洪水破坏性越强^[25]。峰量关系特征可反映洪水能量的集中程度,洪峰占比越大,表明洪水能量越集中,容易在短时间内形成灾害性洪水。形态特征常用于评估流域防洪风险,本研究选取离差系数和偏态系数,以反映洪水过程的变化幅度和对称程度。

2.3 洪水类型辨识

结合主成分分析和 K 均值聚类算法以辨识流域洪水类型。其中:主成分分析是为减少相关性较强的指标对聚类结果的干扰,形成几个相互独立的指标; K 均值聚类算法是基于独立指标对流域洪水进行聚类分析,辨识流域主要洪水类型。

表 1 洪水行为特征指标

Tab. 1 Indicators of the behavioral characteristics of floods

类别	指标名称	计算公式
量级特征	洪水总量 Q_{total}/m^3	-
	洪峰流量 $Q_{peak}/(m^3 \cdot s^{-1})$	-
时间特征	持续时间 T/d	-
涨落变化特征	上升变化率 $R_{Q_{rise}}/h^{-1}$	$R_{Q_{rise}} = \frac{\Delta Q_{rise}}{\Delta T_{rise} \times Q_{peak}}$
	下降变化率 $R_{Q_{down}}/h^{-1}$	$R_{Q_{down}} = \frac{\Delta Q_{down}}{\Delta T_{down} \times Q_{peak}}$
峰值分布特征	高脉冲历时 $T_{0.75p}$	$T_{0.75p} = \frac{T(Q > 75\% \times Q_{peak})}{T}$
峰量关系特征	洪峰占比 P_{peak}	$P_{peak} = \frac{Q_{peak}}{Q_{total}}$
形态特征	离差系数 C_v	$C_v = \frac{\sigma(Q(t))}{\bar{Q}}$
	偏态系数 C_s	$C_s = \sum \frac{Q(t) - \bar{Q}}{\sigma^3(Q(t)) \times T}$

注: ΔQ_{rise} 、 ΔQ_{down} 分别为洪水事件开始、结束时流量与洪峰流量的差值, m^3/s ; ΔT_{rise} 、 ΔT_{down} 分别为洪水涨水、退水持续时间, d ; $\sigma(Q(t))$ 为洪水流量序列的标准差, m^3/s ; \bar{Q} 为洪水平均流量, m^3/s 。

2.3.1 主成分分析法

多个洪水行为特征指标之间可能存在信息重叠, 导致某一维度的洪水特征被强调。为去除冗余信息的影响, 本研究运用主成分分析法^[26], 对洪水特征指标进行标准化和正交变换处理, 形成几个独立的综合指标, 以尽可能保留原始指标信息。本研究通过累计贡献率确定主成分个数, 当累计贡献率达到 85% 时, 认为所提取的综合指标能够反映原始指标的信息。

2.3.2 K 均值聚类方法

K 均值聚类方法^[27]以距离为相似性指标, 将样本点划分为若干个主要类型, 具有简单高效、局部搜索能力强等优点, 是一种常用的聚类分析方法。本研究利用手肘法、邓恩指数 (Dunn Validity index, DVI) 和戴维森堡丁指数 (Davies-Bouldin index, DBI)^[28], 评价聚类质量并确定最佳聚类数。其中: 手肘法认为误差平方和下降幅度最大处对应最佳聚类数; 当 D_{VI} 越大、 D_{BI} 越小时, 表明类内聚敛性越好、类间差异性越大, 聚类质量越好。 D_{VI} 和 D_{BI} 的计算公式为

$$D_{VI} = \frac{\min_{0 < m \neq n \leq K} \left\{ \begin{array}{l} \min_{\forall x_i \in \Omega_m} \left\{ \|x_i - x_j\| \right\} \\ \forall x_j \in \Omega_n \end{array} \right\}}{\max_{0 < m \leq K} \max_{\forall x_i, x_j \in \Omega_m} \left\{ \|x_i - x_j\| \right\}} \quad (4)$$

$$D_{BI} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \max_{j \neq i} \left(\frac{\bar{S}_i + \bar{S}_j}{\|w_i - w_j\|} \right) \quad (5)$$

式中: $\|x_i - x_j\|$ 为两点之间的距离; $\|w_i - w_j\|$ 为两聚类中心之类的距离; \bar{S}_i 为类内所有点到聚类中心的平均距离; K 为聚类数。

2.4 时变增益水文模型

时变增益水文模型是夏军基于水文非线性系统理论提出的一种非线性水文模型, 具有结构简单、所需参数少等优点, 被广泛应用于半湿润半干旱地区中小流域洪水过程模拟^[29]。

在时变增益水文模型中, 时变增益因子并非常数, 而是与土壤湿度、流域下垫面特性和气候特性有关, 表现出地球水文系统固有的指数关系^[30]。土壤湿度资料匮乏时, 可用土壤前期影响雨量作为替代指标。多水源时变增益水文模型^[31]将产流分为地表产流和地下产流, 使用考虑损失函数的时变增益因子模拟产流过程。地表汇流过程利用纳什瞬时单位线推求, 地下汇流应用线性水库模型计算。

利用 SCE-UA 算法分别率定子流域的模型参数, 利用纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE) 和洪峰误差综合评价模型的模拟精度, 纳什效率系数越接近 1, 表明模型整体模拟效果越好。

3 结果与分析

3.1 洪水事件划分与聚类分析

基于构建的洪水事件划分方法,在汉江上游白河流域共划分了 249 场洪水事件。以汉中国站为例,选取代表性洪水事件划分结果见图 1。该方法能够准确识别单峰、多峰洪水的涨、退水过程:确定的洪水事件开始时间与流量迅速上涨时刻相对应,结束时间前包含完整的退水过程,洪水划分效果较好。

利用主成分分析法提取洪水行为特征指标的 4 个主成分,累计贡献率达到 88.3%。其中:第一主成分主要反映洪峰占比、离差系数、偏态系数等峰量关系及形态特征指标,可解释 45.2% 的指标变化;

第二主成分主要反映洪峰流量、洪水总量等量级特征指标,可解释 21.5% 的指标变化;第三主成分主要反映高脉冲历时、持续时间等峰值分布及时间特征指标,可解释 13.9% 的指标变化;第四主成分主要反映上升、下降变化率等涨落变化特征指标,可解释 7.7% 的指标变化。

不同聚类数对应的簇内误差平方和、 D_{VI} 和 D_{BI} 值,见图 2。手肘法肘点处对应的最佳聚类数为 4 类,且 D_{VI} 最大、 D_{BI} 最小,聚类质量最好。因此,将白河流域洪水事件分为 4 种主要洪水类型,第一至四类洪水类型分别包含 102、10、58 和 79 场洪水事件,分别占总洪水事件的 41.0%、4.0%、23.3% 和 31.7%,划分的洪水类型具有一定代表性。

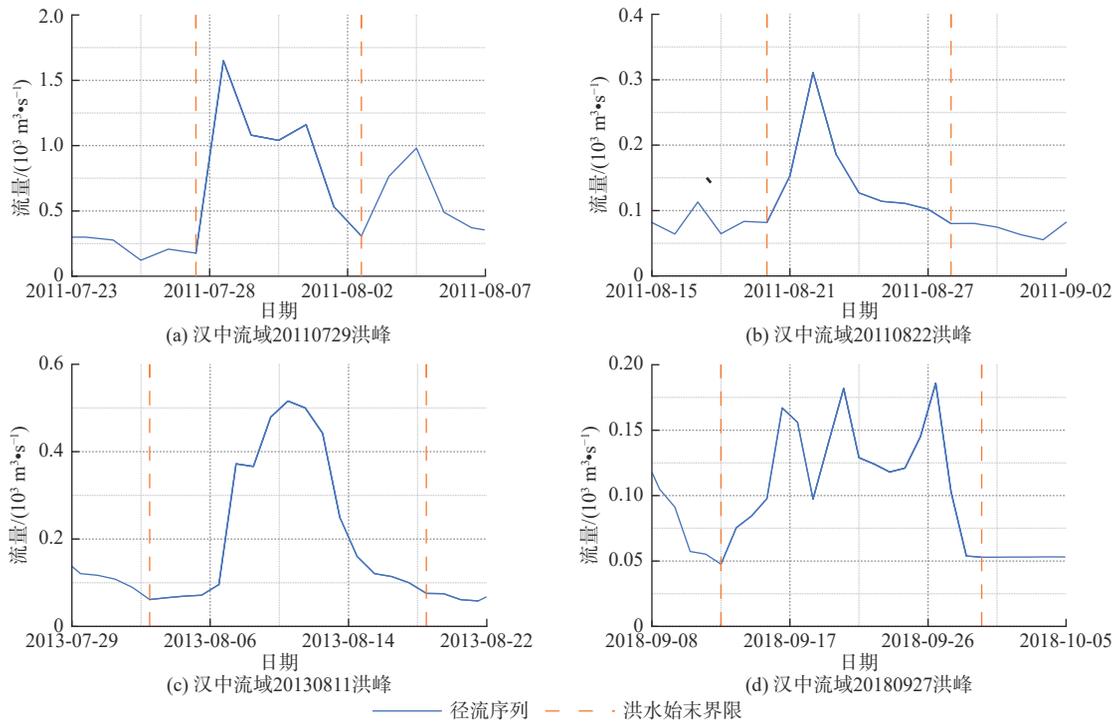


图 1 洪水事件划分结果

Fig. 1 Classification of flooding events

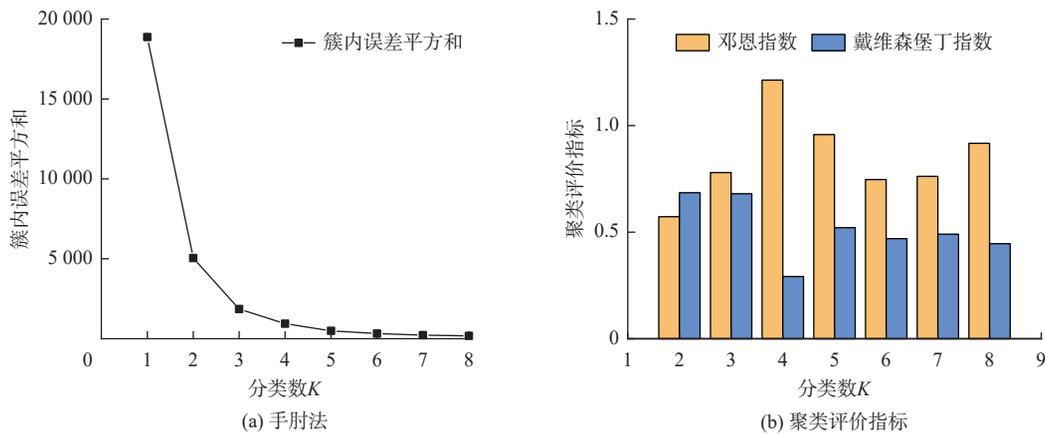


图 2 聚类质量评价

Fig. 2 Evaluation of clustering quality

3.2 不同类型洪水特征分析

不同类型的洪水过程和峰量关系具有显著差异(图3)。不同类型洪水行为特征指标,见图4。第一类洪水的洪峰流量较小、洪水总量较大,其平均值分别为 $845 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $6.58 \times 10^8 \text{ m}^3$;持续时间最长,平均值为 15.04 d ;涨落变化率最小,平均值分别为 0.15 和 0.08 ;高脉冲历时最长,平均值为 0.41 ;洪峰占比最小,平均值为 0.13 ;洪水过程变异性最小,部分场次呈负偏态,变异系数平均值为 0.41 ,偏态系数平均值为 -0.03 ,其洪水峰型以双峰、多峰为主。第一类洪水过程线平缓、峰腰较宽,属于长历时的矮胖型中等洪水。第二类洪水的量级远大于其他类型洪水,其洪峰流量和洪水总量的平均值分别为 $1.08 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $3.36 \times 10^9 \text{ m}^3$;持续时间较长,平均值为 10.37 d ;涨落水速率均较快,涨落变化率的平均值分别为 0.22 和 0.17 ;高脉冲历时最大,平均值为 0.20 ;洪峰占比的平均值为 0.29 ;洪水过程变异性最大,变异系数、偏态系数平均值为 0.84 和 0.99 。第二类洪水在量级上呈现峰高量大的特征,洪水涨落变化剧烈,破坏性最强,属于过程剧烈变化的大洪水。第三类洪水为中等量级洪水,其洪峰流量和洪水总量的平均值分别为 $1462 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $3.80 \times 10^8 \text{ m}^3$;持续时间最短,平均值为 8.64 d ;涨水速率中等但落水速率最快,分别为 0.21 和 0.19 ;高脉冲历时的平均值为 0.23 ;洪峰占比最大,平均值为 0.32 ;洪水过程变异性较大,变异系数、偏态系数平均值为 0.75 和 0.80 。第三类洪水的量级中等,持续时间最短、落水速率较快,洪水能量集中,属于致灾性较强的尖瘦型中等洪水。第四类洪水为小量级洪水,其洪峰流量和洪水总量的平均值分别为 $630 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.78 \times 10^8 \text{ m}^3$,持续时间中等、平均值为 9.57 d ;涨水速率最快而落水速率中等,平均值分别为 0.40 和 0.12 ;高脉冲历时和洪峰占比的平均值分别为 0.20 和 0.28 ;洪水过程变异性较小,变异系数、偏态系数平均值分别为 0.69 和 0.97 。第四类洪水的量级最小,持续时间短,涨落变化迅速但流量变化较小,以单峰洪水为主,属于突发性小洪水。总的来看,白河流域主要洪水类型可分为4类:矮胖型中等洪水、剧烈变化型大洪水、尖瘦型中等洪水和单峰突发性小洪水,这与 Yu 等^[32] 辨识的长江流域主要洪水类型较相似。

流域不同类型洪水分布见图5。其中:干流洪

水以第一类洪水为主,在相对上游的汉中、石泉流域占比超过 35% ,安康、白河流域占比达到 65% ;第三、四类洪水数量较少,且主要分布在汉中、石泉流域。即第一类洪水为汉江干流上游流域的常规型洪水,其行为特征基本符合李玉荣等^[33] 发现的汉江流域多发洪水特征,如长历时、洪峰较小但洪量较大等。这可能是受降雨时空分布特征、汇流时间等影响,易引起多峰、小洪峰的长历时洪水出现。从源区至白河流域下游,第一、二类洪水数量呈递增趋势,第三、四类洪水数量呈递减趋势,尖瘦型中等洪水和单峰突发性小洪水逐步转化为矮胖型中等洪水,与黄君瑶^[34] 揭示的汉江上游干流洪水变化规律相吻合。这可能是由于流域面积增大,汇流时间增加,且存在干支流洪水遭遇^[35],常遇洪水的量级增大。同时,白河流域水电资源丰富,流域内有多个水电站^[36],其中安康水电站总库容最大,受水利工程调蓄作用影响,安康和白河流域的洪水过程更为平缓。支流洪水类型较为相似,均以第四类单峰突发性小洪水为主,占支流洪水总数的 45.0% ;在中等量级洪水中,第一类洪水略多于第三类洪水,分别占比 30.3% 和 24.7% ;没有第二类洪水分布。即支流洪水相比干流洪水量级更小,持续时间更短,洪水过程变化相对剧烈。这可能是因为支流流域面积较小,河道坡度大、河谷狭窄,洪水响应时间短,且水利工程的调蓄能力较弱,容易形成涨落变化迅速、短历时的突发性小洪水,难以形成超标准的稀遇洪水。在中等量级洪水中,第三类洪水为洪峰集中、致灾性较强的山洪,主要由短时强降雨导致,相比于第一类洪水其重现期更长、出现频率更低。

3.3 各类型洪水行为特征指标模拟

利用 SCE-UA 算法率定时变增益水文模型相关参数,模拟流域内 249 场洪水事件,并以纳什效率系数评估洪水过程模拟效果。其中,各流域的率定、验证期纳什效率系数分别为 $0.75 \sim 0.84$ 和 $0.72 \sim 0.79$ 。不同类型洪水过程模拟结果见表2。模型对不同类型洪水过程模拟精度较高,洪水行为特征指标模拟结果见图6。不同类型洪水的各项指标集中于 $1:1$ 线附近,模型能准确捕捉白河流域内不同类型的洪水行为特征指标。其中,第二类洪水过程模拟的纳什效率系数较高,对涨落变化、峰量关系、形态等特征拟合最优,平均相关系数达 0.91 ,表明模型能够较好捕捉洪水变化特征,而对持续时间、洪峰流量、峰

值分布等特征考虑不足。这可能是由于白河流域洪水以中小型洪水为主,第二类稀遇特大洪水占比仅为 4.0%,极端水文气象条件影响了流域产汇流过程,模型难以捕捉极端洪水的行为特征。在中小型洪水中,第一类洪水的指标相关系数为 0.69~0.97,模型能准确拟合量级、时间等特征,而对下降变化率、峰值分布等特征拟合较差。这可能是由于部分流域气象站点较少,难以准确反映小强度降雨的变化;该类洪水为长历时洪水,且基流占比较大、降雨径流相关性较差,模型难以准确模拟其变化过程;存在双峰、多峰洪水,现有模型对其主次洪峰判断不足,难以准确确定。模型对第三、四类洪水的整体过程和洪峰流量模拟效果最好,其指标相关系数

分别为 0.78~0.98 和 0.80~0.99,特别是对量级、时间、涨落变化等特征指标拟合较好。这可能是由于第三、四类洪水主要分布于干流源区和支流的山区中小流域,受水利工程影响较小;洪水持续时间较短,基流占比小,降雨径流相关性较好;洪水以单峰洪水为主,涨落变化迅速。结果表明,时变增益模型对山区中小流域多发的尖瘦型小洪水的行为特征模拟效果较好,与相关研究的结论^[37]相吻合。模型对各类型洪水的量级、涨落变化等特征拟合较好,相关系数分别为 0.90~0.99 和 0.78~0.98,这主要是由于量级等特征是评价模拟精度的重要常见指标,而时变增益模型综合流域下垫面等特征合理考虑了产汇流过程,模拟结果与实际情况相符。

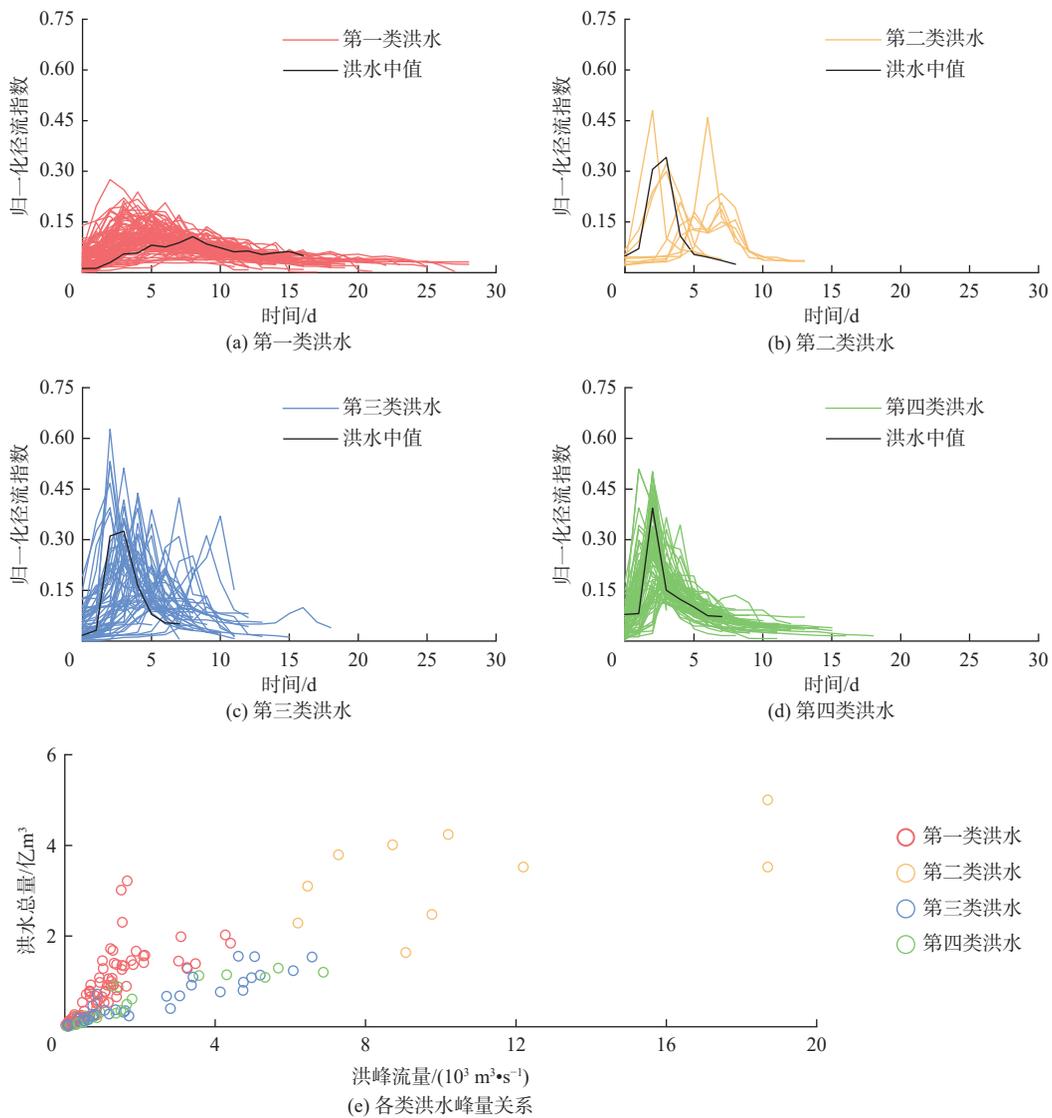


图 3 不同类型的洪水过程和峰量关系(归一化径流指数为日径流量与洪水总量之比)

Fig. 3 Different types of flood events and peak-volume relationships (Normalized discharge index is the ratio of daily discharge to flood volume)

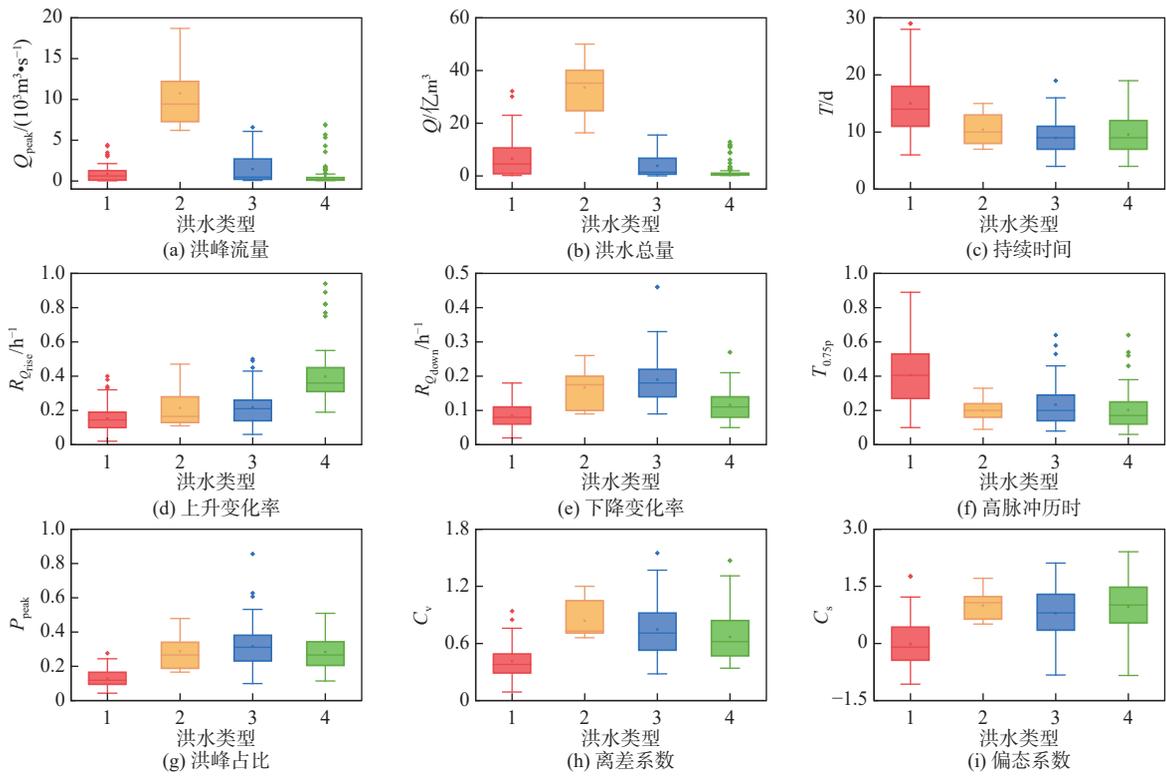


图 4 不同类型洪水行为特征指标箱线图

Fig. 4 Indicators of behavioral characteristics of different types of flood events

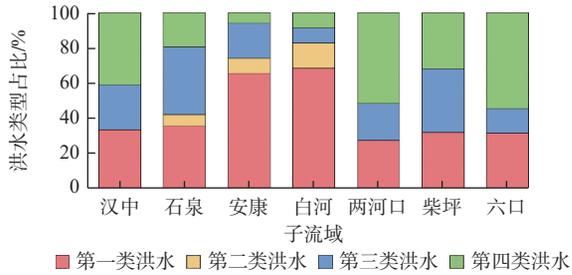


图 5 流域不同类型洪水分布

Fig. 5 Distribution of different types of flood events in basins

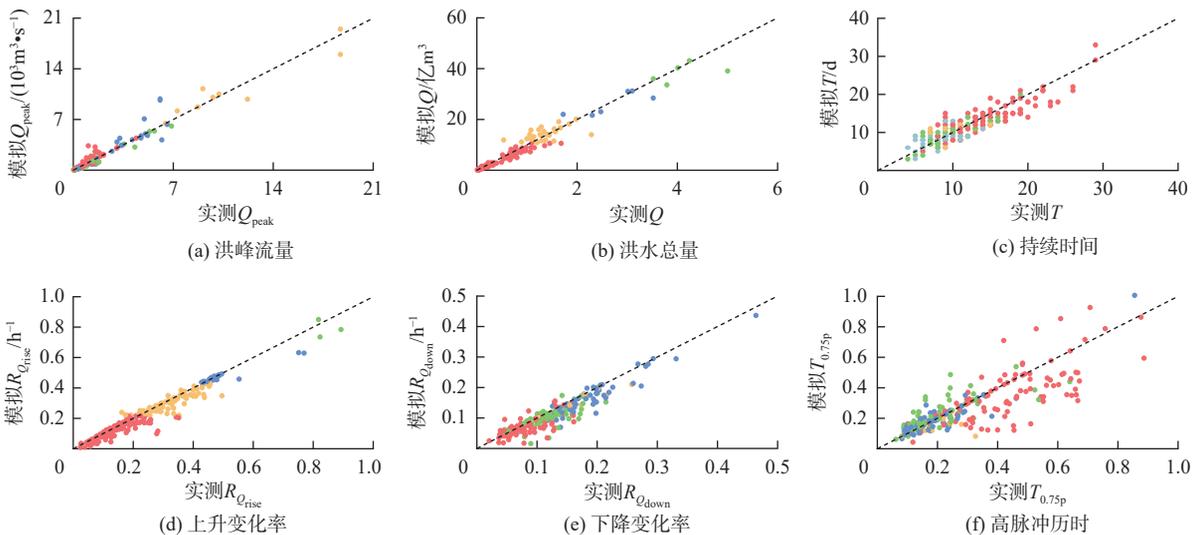
时变增益水文模型能够准确捕捉不同类型洪水过程的主要特征, 特别对多发于汉江源区和支流中

小流域的尖瘦型中等洪水和单峰突发性小洪水的量级、涨落变化等特征模拟效果最好, 也能较好模拟相对平缓的长历时、矮胖型洪水的洪水行为特征。

表 2 不同类型洪水过程模拟结果

Tab. 2 Simulation of flood events of different types

洪水类型	纳什效率系数	洪峰误差/%
第一类	0.72	11.5
第二类	0.82	14.8
第三类	0.75	8.7
第四类	0.80	9.8



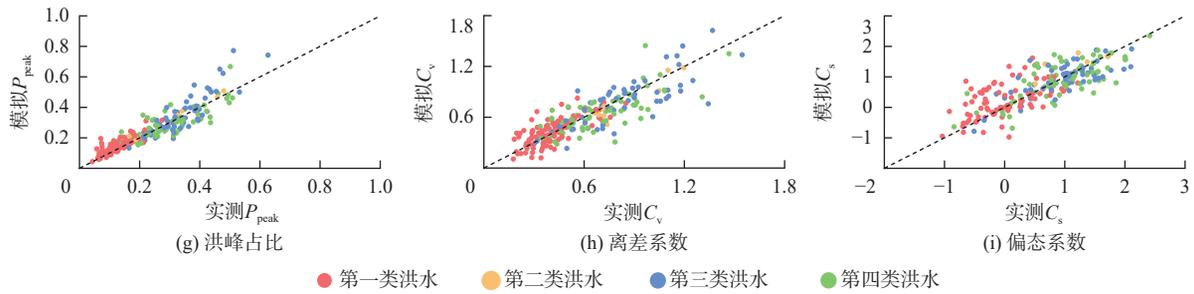


图 6 洪水行为特征指标模拟

Fig. 6 Simulation of indicators of behavioral characteristics

4 结论

本研究构建了多维洪水行为特征指标体系以全面刻画洪水事件,利用主成分分析和 K 均值聚类方法辨识流域主要洪水类型,并进一步探究时变增益水文模型对不同类洪水行为特征模拟的适用性,主要结论如下:

汉江上游白河流域主要洪水类型可分为 4 类:第一类为长历时的矮胖型中等洪水、第二类为剧烈变化型大洪水、第三类为洪峰集中的尖瘦型中等洪水、第四类为涨落迅速的单峰突发性小洪水。

洪水类型的空间分布具有显著的区域差异。其中:干流洪水以矮胖型中等洪水类型为主,支流洪水以单峰突发性小洪水类型为主;从源区到白河流域下游,尖瘦型洪水逐渐转化为矮胖型洪水。

时变增益水文模型可准确捕捉不同类型洪水过程的主要特征,纳什效率系数达 0.72~0.82。其中,模型对尖瘦型中等洪水和单峰突发性小洪水的模拟效果最好,特别是对量级、时间、涨落变化等特征指标拟合较好。

今后应进一步对流域主要洪水类型进行归因分析,挖掘不同类型洪水行为特征差异的影响因子,进一步明确洪水行为特征的变化规律及其机理,为流域洪水管理提供详细的信息支持。

参考文献:

- [1] 张永勇,陈秋潭. 淮河中上游流域洪水主要类型及其时空分布特征 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(4): 627-635. DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.04.009.
- [2] 管新建,刘源,孟钰,等. 中国洪涝灾害农业致灾性时空分布规律 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 21-25.
- [3] 沙永兵,黄迎春,石彬,等. 五强溪水库近坝区洪水预报方法研究 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(4): 58-65.
- [4] 李建柱,李磊菁,冯平,等. 基于深度学习的雷达降雨临近预报及洪水预报 [J]. *水科学进展*, 2023, 34(5):

673-684. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.05.003.

- [5] TOSUNOGLU F, GÜRBÜZ F, İSPIRLI M N. Multivariate modeling of flood characteristics using Vine copulas[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(19): 459. DOI: 10.1007/s12665-020-09199-6.
- [6] 王海军,衣学军,黄一昕,等. 暴雨洪水相似性判别及外推预估方法 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(5): 886-894. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0086.
- [7] 张谱,张豪,孔锋,等. 基于微博数据的暴雨洪涝灾害舆情特征研究:以 2021 年中国三场暴雨洪涝为例 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(2): 47-59. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.02.005.
- [8] 王东升,胡关东,袁树堂. 基于水文相似性的预报误差修正 [J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(2): 140-145. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0044.
- [9] CHEN S, XUE Z, LI M. Variable sets principle and method for flood classification[J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2013, 56(9): 2343-2348. DOI: 10.1007/s11431-013-5304-4.
- [10] 米胤瑜,孔锋. 气候变化背景下城市洪水风险管理体系国际比较与启示:以伦敦、纽约、郑州为例 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(3): 21-34. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.03.002.
- [11] 孙娜,周建中,张海荣,等. 新安江模型与水箱模型在柘溪流域适用性研究 [J]. *水文*, 2018, 38(3): 37-42. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2018.03.006.
- [12] 王璐,叶磊,吴剑,等. 山丘区小流域水文模型适用性研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2018(2): 78-84. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2018.02.018.
- [13] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 28-35. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.005.
- [14] 阎晓冉,王丽萍,张验科,等. 考虑峰型及其频率的洪水随机模拟方法研究 [J]. *水力发电学报*, 2019, 38(12): 61-72. DOI: 10.11660/slfdx.20191207.
- [15] 夏军,陈进. 长江大保护实践与对策 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 625-630. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0064.

- [16] 王栋, 吴栋栋, 解效白, 等. 汉江流域汛期径流时空变化特征研究 [J]. 人民珠江, 2020, 41(4): 10. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2020.04.005.
- [17] 邹振华, 郭含, 尹志. 汉江流域洪水资源利用约束机制及调控模式研究 [J]. 人民长江, 2023, 54(7): 8-13. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.07.002.
- [18] 张润庆, 何蒙, 姚成, 等. 新安江-海河模型在烟台市典型流域的径流模拟 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(6): 78-84. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0117.
- [19] 张丽娟, 陈晓宏, 叶长青, 等. 考虑历史洪水的武汉超定量洪水频率分析 [J]. 水利学报, 2013, 44(3): 268-275. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.03.013.
- [20] 赵玲玲, 陈子桑, 刘昌明, 等. 基于广义 Pareto 分布的洪水序列频率分析 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(3): 32-39. DOI: 10.13471/j.cnki.acta.snus.2019.03.004.
- [21] ZHANG Q, ZHANG L, SHE D, et al. Automatic procedure for selecting flood events and identifying flood characteristics from daily streamflow data [J/OL]. Environmental Modelling & Software, 2021, 145: 105180. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105180.
- [22] FISCHER S, SCHUMANN A, BÜHLER P. A statistics-based automated flood event separation [J/OL]. Journal of Hydrology X, 2021, 10: 100070. DOI: 10.1016/j.hydroa.2020.100070.
- [23] 何朝飞, 王晓云, 陈伏龙, 等. 玛纳斯河不同峰量组合下的融雪洪水风险分析 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1): 15-21. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2023.01.003.
- [24] 刘攀, 郭生练, 李响, 等. 基于风险分析确定水库汛限水位动态控制约束域研究 [J]. 水文, 2009, 29(4): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2009.04.001.
- [25] 彭为, 刘丙军, 廖叶颖, 等. 基于强度与形态指标的洪水分类研究 [J]. 水文, 2018, 38(6): 7-11. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2018.06.002.
- [26] 闫宝伟, 潘增, 薛野, 等. 论水文计算中的相关性分析方法 [J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1039-1046. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20161280.
- [27] 尤烽骅, 余玉聪, 刘招, 等. 基于联合改进人工蜂群及 K 均值聚类算法的洪水分类研究 [J]. 水文, 2021, 41(4): 40-47. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200315.
- [28] GAGOLEWSKI M, BARTOSZUK M, CENA A. Are cluster validity measures (in) valid? [J/OL]. Information Sciences, 2021, 581: 620-636. DOI: 10.1016/j.ins.2021.10.004.
- [29] 王强, 夏军, 余敦先, 等. 时变增益模型在辽宁干旱半干旱流域的适用性研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 35-41. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0094.
- [30] 刘慧媛, 夏军, 邹磊, 等. 基于时变增益水文模型的实时预报研究 [J]. 中国农村水利水电, 2019(6): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.06.004.
- [31] 万蕙, 夏军, 张利平, 等. 淮河流域水文非线性多水源时变增益模型研究与应用 [J]. 水文, 2015, 35(3): 14-19. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2015.03.003.
- [32] YU J, ZOU L, XIA J, et al. Investigating the spatial-temporal changes of flood events across the Yangtze River basin, China: Identification, spatial heterogeneity, and dominant impact factors [J]. Journal of Hydrology, 2023, 621: 129503. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129503.
- [33] 李玉荣, 张俊, 张潇. 2017 年汉江秋季洪水特性及预报调度分析 [J]. 人民长江, 2017, 48(24): 1-5. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.24.001.
- [34] 黄君瑶. 浅析陕西省境内汉江干流洪水变化规律 [J]. 地下水, 2013, 35(4): 126-128. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2013.04.050.
- [35] 夏军, 陈进, 王纲胜, 等. 从 2020 年长江上游洪水看流域防洪对策 [J]. 地球科学进展, 2021, 36(1): 1-8. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.003.
- [36] 梁艺缤, 郭爱军, 畅建霞. 汉江上游石泉-安康梯级水库联合防洪调度研究 [J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(3): 294-299. DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.004.
- [37] 刘松, 张利平, 余敦先, 等. 干旱半干旱地区流域水文模型的适用性 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(5): 384-390. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2019-05-002.

Identification and simulation of flood types in Baihe basin of the upper Han River

ZUO Lingfeng^{1,2}, ZOU Lei¹, XIA Jun^{1,3}, YU Jiarui¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: As climate change and human activities intensify, the frequency and intensity of heavy rainfall events keep rising, resulting in increased occurrences of extreme flood disasters. Due to the influence of climate change and

topography, the flood processes exhibit significant spatial heterogeneity. The Baihe River basin in the upper reaches of the Han River is rich in water resources, but experiences uneven spatial and temporal distribution of rainfall, leading to frequent occurrences of flood disasters. Identifying and simulating representative flood types in the Baihe River basin are of great significance for regional flood management.

The daily runoff processes of seven hydrological stations in the Baihe River basin were analyzed for the period from 2007 to 2020. In order to accurately separate flood events by comprehensively considering their magnitude and morphological characteristics, a method that couples with the Peaks Over Threshold and the Sliding Variance Threshold was constructed. A system of behavioral characteristic indicators was constructed to comprehensively describe flood events, considering six dimensions: magnitude, duration, fluctuation variation, peak distribution, peak volume relationship, and morphology. Using this system of behavioral characteristic indicators, the types of floods in Baihe River basin were identified by combining principal component analysis and the *K*-mean clustering algorithm. Finally, flood events and their behavioral characteristics in the Baihe River basin were simulated by the Time Variant Gain Model.

Based on the constructed flood event separation method, 249 flood events were accurately identified in the Baihe River basin. These flood events in the Baihe River basin were classified into four representative types, accounting for 41.0%, 4.0%, 23.3%, and 31.7% of the total flood events, respectively. The four flood types are characterized as follows: continuous short and fat medium floods, extreme variable large floods, sharp and thin medium floods with strong catastrophic effects, and single-peaked flash floods. The spatial distribution of the flood types varied significantly. While floods in mainstreams were dominated by short and moderate-magnitude floods, floods in tributaries were dominated by single-peaked flash floods. This distribution pattern could be attributed to several factors in the tributaries, including smaller basin areas, steep channel slopes, narrow valleys, short flood response times, and the relatively weaker water storage capacity of water control projects. These conditions make it easier for the tributaries to generate rapidly changing, short-duration, and small flash floods, which are challenging to evolve into rare and extreme floods. The Time Variant Gain Model demonstrates high accuracy in capturing diverse characteristics of different flood types. It is particularly effective in simulating the characteristics of sharp and thin medium floods and single-peaked flash floods prevalent in the source and tributaries of the Han River basin. The correlation coefficients of indicators for these two flood types range from 0.78 to 0.98 and 0.80 to 0.99, respectively. The accuracy of results can be attributed to the model, which comprehensively considers basin characteristics, aligning well with the actual conditions.

In conclusion, the multidimensional flood behavioral characteristic indicator system can comprehensively depict flood events and the main flood types in the basin. The Time Variant Gain Model performs high accuracy in simulating the behavioral characteristics of different flood types. Valuable insights into the mechanisms of flood formation and the dynamics of flood process changes are provided. The findings are crucial for informing the development of effective flood control planning and management policies.

Key words: flood ; flood behavior characteristics; flood type; time variant gain model; Baihe River basin