基于洪水行为特征指标的我国山洪类型辨识与模拟

翟晓燕¹, 郭良¹, 张永勇^{2*}

1. 中国水利水电科学研究院, 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038;

2. 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

* 通讯作者, E-mail: zhangyy003@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2020-06-14; 收修改稿日期: 2021-01-06; 接受日期: 2021-01-22; 网络版发表日期: 2021-05-18

国家自然科学基金项目(批准号: 41807171)、国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0400902)和全国山洪灾害防治(中央本级)项目(编号: JZ0145B2017)资助

摘要 受地形地貌和水文气象条件的影响, 山洪过程呈现显著的时空分异性, 准确识别和模拟代表性洪水过程类型对山洪灾害防治具有重要意义. 以3个洪峰特性指标(洪峰模数、峰现时间和洪水时间尺度)和3个洪水动力学特性指标(涨洪速率、落洪速率和变差系数)刻画山洪行为过程, 采用主成分分析、动态 K 均值聚类、相似性检验和流域水文模拟(HEC和新安江模型)相结合, 识别和模拟了典型山洪类型及其行为特征指标, 并以全国不同类型区8个流域177场次小时洪水事件进行实例应用. 结果表明: 所有洪水事件共划分为3种类型, 即低强度流量、峰现早、形态尖瘦的洪水类型(类型1), 低强度流量、峰现晚、形态矮胖的洪水类型(类型2)和高强度流量、峰现晚的洪水类型(类型3). 山洪类型与流域森林覆盖率、流域面积、最大雨强出现时间、最大雨强、降雨量集中度等影响因素具有高度一致性. HEC和新安江模型模拟效果基本一致, 对于类型1~3的洪水事件, 径流深平均相对误差分别为23.25~27.98%、11.95~18.19%和8.30~18.25%, 平均Nash-Sutcliffe效率系数分别为0.39~0.54、0.76~0.85和0.86~0.91; 类型1~3的所有行为特征指标平均相对均方根误差(RMSE r)分别为0.37~0.69、0.37~0.41和0.18~0.25, 平均相关系数(r)分别为0.52~0.68、0.78~0.85和0.88~0.94; 类型2和3的洪水洪峰特性指标模拟效果最好, RMSE r 和 r 分别为0.18~0.28和0.86~0.91; 类型3的洪水动力学特性指标模拟效果最好, RMSE r 和 r 分别为0.19~0.21和0.91~0.97. 研究结果为流域洪水管理提供了详细的洪水信息支持, 也从洪水行为过程的视角为中小流域暴雨洪水模拟提供新的思路.

关键词 洪水相似性, 洪水行为特征, 统计分析, HEC和新安江模型, 湿润和半湿润流域

中文引用格式: 翟晓燕, 郭良, 张永勇. 2021. 基于洪水行为特征指标的我国山洪类型辨识与模拟. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1092–1106, doi: 10.1360/SSTe-2020-0152

英文引用格式: Zhai X, Guo L, Zhang Y. 2021. Flash flood type identification and simulation based on flash flood behavior indices in China. Science China Earth Sciences, 64(7): 1140–1154, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9727-1>

1 引言

中国是受洪水灾害威胁最严重的国家之一, 据统计1990~2017年间因灾损失约占全球损失的10% (Kundzewicz等, 2019). 山洪灾害被公认为是造成人员伤亡和经济损失的主要洪水类型, 因灾死亡人数约占洪涝灾害死亡人数的70%以上, 造成的直接经济损失高达17.2万亿元(1950~2016年)(崔鹏和邹强, 2016; 郭良等, 2018; 刘业森等, 2019). 暴雨山洪广泛发育在山丘区, 其洪水行为是给定时间尺度上流域对暴雨事件的响应行为, 反映了流域对水量的分配、调蓄等功能 (Wagener等, 2007). 受自然驱动因子(如季风气候、地质构造、地势起伏、地表覆被)和社会因素(如建筑物选址不当、开矿采石)的双重影响, 山洪事件点多面广, 且因环境而异, 具有高度的非线性、随机性和复杂性, 洪水行为呈现显著的时空分异性, 致灾性和破坏性也不尽相同(赵士鹏, 1996; Jonkman, 2005; 刘玉邦和梁川, 2011; Zhang和Zhang, 2019). 从大量山洪事件中准确识别和模拟代表性洪水行为过程可为洪水管理提供快速可靠的决策信息支持, 减轻洪水灾害损失, 对山洪灾害防治具有重要的意义.

识别代表性洪水过程应关注不同类型区一系列行为各异的洪水事件, 而不只是针对单一流域的单个洪水事件. 洪水分类是一种行之有效的方法, 可将大量时空异质性强的洪水事件识别为具有相似特征的典型洪水类型. 常用的统计分析技术包括回归分析、聚类分析和决策树等, 其中聚类分析方法因其快速收敛、易于实现而应用广泛(汪丽娜等, 2009; Nied等, 2014; Turkington等, 2016; Stein等, 2020). 已有研究多采用暴雨洪水指标(如雨强、降雨量、平均流量等)和流域静态指标(如流域面积、高程、土地利用等)进行洪水分类(Ali等, 2012), 但暴雨洪水特征、流域属性与洪水行为的相似性关系仍有待进一步探索(Oudin等, 2010). 刻画次洪行为变化的特征指标通常包括洪水量级、强度、发生时间和变化率等, 已逐渐用于山洪预警、应急响应和设计洪水分析等洪水管理领域(Bhaskar等, 2000; Ley等, 2011; Zhang等, 2020). 但基于洪水行为特征指标的山洪类型辨识相关研究仍较少, 已有研究仅关注洪水行为的某一特征(如洪水时间尺度、涨落洪速率等), 无法准确反映完整山洪过程的变化(Saharia等, 2017; Yan等, 2019).

近年来, 完整洪水过程已广泛用于洪水管理领域, 为山洪预警和防洪减灾提供了及时有效的信息支持 (Kundzewicz等, 2018). 分布式水文模型为暴雨山洪响应尤其是洪水过程线的模拟和预报提供了有效的途径, 已有学者针对不同水文模型开展了应用研究, 如HEC-HMS、TOPModel、中国山洪水文模型、时变增益水文模型等(Zhai等, 2018; 刘松等, 2019). McMillan等(2016)基于TopNet模型评估了485个流域的日雨洪模拟过程, 对于面积大、湿润度中等、季节变化小的流域模拟效果较好. Zhai等(2021)基于TOPModel、HEC-HMS和CNFF评估了13个湿润和半湿润山区流域(14~622km²)的213场小时雨洪模拟过程, 模拟效果与流域面积、森林覆盖率、坡度等有关. 已有研究主要针对具有不同气候特性和流域属性的洪水事件进行模型适用性评价, 进一步开展不同类型洪水及其行为特征指标的模拟研究, 可为快速诊断山洪的发生、危险性和风险等提供决策信息支持.

本文基于洪水洪峰特性指标和动力学特性指标刻画洪水行为过程, 采用主成分分析法、动态 K 均值聚类法和相似性检验辨识典型山洪类型, 基于流域水文模型(HEC模型和新安江模型)评估不同类型区典型山洪类型及其行为特征指标的模拟效果. 本研究可为流域洪水管理提供详细的洪水信息支持, 促进流域水文模型在中小流域暴雨洪水模拟和预报预警领域的应用.

2 研究方法

2.1 典型洪水类型识别

2.1.1 洪水行为特征指标

基于径流情势基本特征和水文情报预报规范(Poff等, 1997; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2002; Zhang等, 2015), 选取6个洪水行为特征指标描述山洪过程的变化特征, 包括洪峰特性指标和洪水动力学特性指标, 具体见表1. 洪峰特性指标用于刻画洪水过程的严重程度, 包括描述洪峰强度和时特性的洪峰模数 K_m 、峰现时间 T_m 和洪水时间尺度 T_S . 其中 K_m 和 T_m 是我国洪水预报重点关注的洪水基本要素, 已广泛用于确定山洪预警指标(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2002; Miao等, 2016). T_S 是洪水成因和频率分析的重要指标, 通过洪水过程的峰

表 1 选取的洪水行为特征指标^{a)}

类别	洪水指标	公式
洪峰特性指标	洪峰模数 K_m ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$)	$K_m = \frac{Q_m}{A}$
	峰现时间 $T_m(\text{h})$	$T_m = T(Q_m)$
	洪水时间尺度 $TS(\text{h})$	$TS = \frac{V}{Q_m}$
动力学指标	涨洪速率 $RQ(\text{s}^{-1})$	$RQ = \frac{3600(Q_m - Q_0)}{(T_m - T_0) \sum_{i=1}^N Q(t)}$
	落洪速率 $DQ(\text{s}^{-1})$	$DQ = \frac{3600(Q_m - Q_{\text{end}})}{(T_{\text{end}} - T_m) \sum_{i=1}^N Q(t)}$
	变差系数 CV	$CV = \frac{\sigma[Q(t)]}{Q_{\text{av}}}$

a) Q_m 为次洪洪峰流量; V 为次洪洪量; $Q(t)$ 为次洪过程; Q_0 和 Q_{end} 分别为次洪起涨流量和终止流量; $\sigma[Q(t)]$ 为次洪过程标准差; Q_{av} 为次洪过程的平均流量; A 为流域面积; N 为次洪过程的系列长度。

量关系描述洪水过程的集中程度, 取值越小, 洪水能量越集中, 短时间内破坏性越大(彭为等, 2018; Yan等, 2019)。洪水动力学特性指标用于刻画洪水过程的变化率(涨洪速率 RQ 、落洪速率 DQ)和形态(变差系数 CV), 取值越大, 洪水过程涨落洪越快, 过程变化越剧烈, 极易在短时间内形成灾害性洪水, 反之亦然。

2.1.2 主成分分析法

洪水事件的不同行为特征指标间可能存在相关性, 采用主成分分析法对行为特征指标进行降维, 转换为相互独立的综合指标, 同时尽可能地保留原始行为特征指标的洪水信息。 n 场洪水事件的 p 个洪水行为特征指标构成初始矩阵 $X_{np} = \{x_{ij}\}_{np}$, 为避免不同指标量纲的影响, 对洪水行为特征指标进行标准化处理得到标准化矩阵 $Y_{np} = \{y_{ij}\}_{np}$ 及其相关矩阵 $R_{pp} = \{r_{jl}\}_{pp}$ 。

$$\begin{cases} y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}, \\ r_{jl} = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ij} y_{il}}{n-1}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, x_{ij} 和 y_{ij} 分别为标准化处理前后的第 i 场洪水第 j 个洪水行为特征指标, $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq p$; $\bar{x}_j$ 和 σ_j 分别为第 j 个洪水行为特征指标的均值和标准差, $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})^T$; r_{jl} 为洪水行为特征指标间的相关系数, $1 \leq l \leq p$ 。

根据特征方程 $|R - \lambda I| = 0$ 确定相关矩阵的特征值 ($\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_p > 0$), 相应特征向量为 $\mathbf{c}_j = (c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{pj})^T$ 。按累积方差贡献率 M_m 达到 85% 以上的准则, 筛选前 m ($m \leq p$) 个主成分和样本矩阵 $Z_{nm} = \{z_{ij}\}_{nm}$ 。

$$\begin{cases} M_m = \sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i, \\ z_{ij} = \sum_{q=1}^p y_{iq} c_{qj}, \end{cases} \quad (2)$$

式中, λ 为特征值; z_{ij} 为新的指标变量, $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq m$, $m \leq p$; c_{qj} 为特征向量元素。

2.1.3 动态 K 均值聚类法

采用动态 K 均值聚类法将新的样本矩阵 Z_{nm} 分为 k ($k \leq n$) 个互斥的洪水类型, 使聚类组内的洪水行为特征比较接近, 聚类组间的洪水行为特征差异较大。以欧式距离法度量各样本与 k 个聚类中心的相似性, 将 n 场洪水事件逐个归入 k 个聚类中心, 直至两次聚类完全一致或聚类间的差异小于某阈值, 即得到最终聚类结果。各次迭代中, 新的聚类中心为聚类组内所有洪水事件的平均值。目标函数 J 为最小化聚类组的离差平方和。

$$\begin{cases} J(\mathbf{P}^*, \mathbf{c}^*) = \min\{J(\mathbf{P}, \mathbf{c})\} = \min\left\{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k w_{ij} (d_{ij})^2\right\}, \\ d_{ij} = d(z_i - c_j) = \sqrt{\sum_{p=1}^m (z_{ip} - c_{jp})^2}, \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{c}$ 分别为分割矩阵和聚类中心矩阵; $\mathbf{P}^*$ 和 $\mathbf{c}^*$ 为相应矩阵的最优值; w_{ij} 表示第 i 个洪水事件是否属于第 j 个聚类中心, $w_{ij} = 0$ 或 1 ; d_{ij} 为第 i 个洪水事件与第 j 个聚类中心的欧式距离; c_{jp} 为第 j 个聚类中心的第 p 个要素, $c_{jp} = \sum_{i=1}^n w_{ij} z_{ip} / \sum_{i=1}^n w_{ij}$ 。

采用轮廓系数评估聚类的凝聚度与分离度(Rousseeuw, 1987), 轮廓系数取值范围为 $-1 \sim 1$, 值越大说明聚类越合理、聚类组内凝聚度越强、聚类组间分离度越高, 轮廓系数小于 0 说明聚类效果不佳。平均轮廓系数最大值所对应的 k 值即为最优聚类组数。

$$\begin{cases} \bar{s}(k) = \sum_{i=1}^n s(i) / n, \\ s(i) = \frac{f(i) - g(i)}{\max\{g(i), f(i)\}}, \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\bar{s}(k)$ 为 k 个聚类组的平均轮廓系数; $s(i)$ 为第 i 场洪水事件的轮廓系数, $-1 \leq s(i) \leq 1$, $1 \leq i \leq n$; $g(i)$ 为第 i 场洪水事件与其所在聚类组内所有洪水事件的平均欧式距离; $f(i)$ 为第 i 场洪水事件与其最邻近聚类组的平均欧式距离。

采用非参数Kruskal-Wallis检验分析各聚类组的洪水行为特征指标之间是否存在显著差异(Theodorsson-Norheim, 1986). 原假设为各聚类组间不存在差异, 即各洪水类型的特征指标来自均值相同的总体. 统计量 $K-W$ 服从自由度为 $k-1$ 的卡方分布, 若显著性水平 $p < 0.01$, 认为各聚类组内的特征指标分布存在显著差异.

2.1.4 相似性检验

流域属性(如面积、坡度、植被覆盖)和降雨特性(如量级、强度、时间等)等因子对山洪过程的时空分布具有较大影响. 选取洪水行为过程的可能影响因子(Ali等, 2012), 具体见表2. 采用相似性分析法(ANOSIM, Zhang等, 2016)检验各山洪聚类组内影响因子的相似性, 用以评估典型山洪聚类的物理相关性. 检验统计量 R_{ANOSIM} 取值范围为 $-1 \sim 1$, 值越大说明聚类组内的影响因子越相似, 分组是有效的. 若统计量 R_{ANOSIM} 为正值且显著性水平 $p < 0.01$, 说明各山洪聚类组内影响因子存在显著相似性. 进一步采用Pearson相关系数(r)和 t 检验评估显著相似的影响因子与洪水行为特征指标之间的相关程度及其显著性, 若显著性水平 $p < 0.05$, 说明两者间存在显著相关性.

2.2 洪水类型和行为特征指标模拟

2.2.1 水文模型

采用HEC水文模型(Hydrologic Engineering Center hydrologic modeling system, HEC模型)和三水源新安江模型(简称新安江模型)进行洪水类型和行为特征指标的模拟评估. HEC模型是由美国陆军工程师团水资源研究中心研发的分布式降雨径流模型, 已被广泛用于山洪预报预警(胡国华等, 2017; Zhang等, 2019). 本研究采用初损稳下渗率法进行产流计算, 采用Snyder单位线法计算直接径流量, 采用运动波法进行河道洪水演进计算. Snyder单位线的三个特征值计算公式如下:

表 2 选取的可能影响因子指标

影响因子	指标	说明
流域属性	流域面积(km ²)	描述流域调蓄作用
	森林覆盖率	描述流域调蓄作用
	平均坡度	描述流域动力学作用
	多年平均降雨量(mm)	描述流域气候背景
降雨特性	场次降雨总量(mm)	降雨量级指标
	平均降雨量(mm)	降雨量级指标
	最大雨强(mm h ⁻¹)	降雨强度指标
	最大雨强出现时间(h)	降雨时间指标
	降雨历时(h)	降雨时间指标
	降雨集中度	降雨集中度指标, 为场次降雨量最大值与降雨总量之比

$$\begin{cases} t_p = CC_t(LL_c)^{0.3}, \\ Q_p = C \frac{AC_p}{t_p}, \\ t_b = 3 + 3 \left(\frac{t_p}{24} \right), \end{cases} \quad (5)$$

式中, t_p 为单位线洪峰滞时, Q_p 为单位线洪峰流量, t_b 为单位线底宽, L 为流域主河道长度, L_c 为流域形心点到出口距离, C_t 和 C_p 分别为无量纲常数, A 为流域面积, C 为单位转换常数.

新安江模型是由河海大学赵人俊教授提出的概念性水文模型, 已被广泛用于湿润和半湿润地区降雨径流模拟和山洪预报预警. 本研究采用流域蓄水容量曲线和自由水蓄水容量曲线进行三水源蓄满产流计算, 采用线性水库法进行坡面汇流计算, 采用马斯京根分段连续演算法进行河道洪水演进计算.

2.2.2 模拟效果评估

将各流域的所有场次雨洪过程等分为3份, 以前2/3的场次雨洪过程进行模型参数率定, 后1/3的场次雨洪过程进行模型检验. 采用多目标遗传算法进行参数优选(Deb等, 2002), 径流深相对误差(RER)和Nash-Sutcliffe效率系数(NSE)评估山洪事件的模拟精度(Moriasi等, 2007; GB/T 22482-2008, 2008), 各评估指标最优值分别为0和1. 计算公式如下:

$$RER = \frac{\bar{R}_s - \bar{R}_o}{\bar{R}_o}, \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}, \quad (7)$$

式中, $\bar{R}_s$ 和 $\bar{R}_o$ 分别为模拟和实测平均径流深(mm); $Q_{o,i}$ 和 $Q_{s,i}$ 分别为*i*时刻实测和模拟流量($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); $\bar{Q}_o$ 为实测平均流量($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); *N*为洪水序列长度.

对于研究时段内所有的洪水事件, 采用相对均方根误差(RMSEr)和相关系数(*r*)评估某洪水类型下各洪水行为特征指标的模拟精度, 各评估指标最优值分别为0和1. 计算公式如下:

$$RMSEr = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (O_i - S_i)^2}{M}} / \bar{O}, \quad (8)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O}) \cdot (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^M (S_i - \bar{S})^2}}, \quad (9)$$

式中, O_i 和 S_i 分别为实测和模拟的洪水行为特征指标; $\bar{O}$ 和 $\bar{S}$ 分别为实测和模拟洪水行为特征指标平均值; *M*为某洪水类型下的洪水事件数.

3 研究区和数据

以湿润地区(裴河、司前、安和、上流、杜头)和半湿润地区(下河村、栾川、告成)的8个中小流域为例开展应用研究, 研究区位置及其基本信息如图1和表3所示. 研究区均位于山洪灾害防治区, 涉及4个流域片和3个径流带, 流域水文气象和下垫面条件差异较大. 各流域多年平均降雨量为600mm(下河村)至1864mm

(司前), 流域面积为22 km^2 (裴河)至622 km^2 (告成), 平均坡度为0.07(告成)至0.20(司前). 告成流域主要土地利用类型为耕地(72%)和林地(22%), 其余7个流域主要土地利用类型均为林地(78~99%). 主要土壤质地类型包括粘壤土、砂质黏土和砂壤土.

研究区收集的数据源包括空间数据和场次雨洪数据. 空间数据主要用于子流域划分和属性特征提取, 包括数字高程模型(25m×25m)、水系(1:1000000)、土地利用类型(1:250000)和土壤质地类型(1:500000)等, 数据来源为国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn>). 收集了8个流域177场次小时尺度雨洪资料, 主要用于流域水文模型参数率定(112场次)和验证(65场次), 以及洪水行为特征指标分析.

4 结果与分析

4.1 山洪事件聚类评估

研究区各洪水行为特征指标间的相关系数矩阵如表4所示. 除洪峰模数*Km*外, 洪水时间尺度*TS*与其他所有洪水行为特征指标间均存在显著的线性相关性($|r| > 0.50$, $p < 0.05$). 此外, 涨洪速率*RQ*与落洪速率*DQ*、峰现时间*Tm*间也存在显著的线性相关性($|r| > 0.50$, $p < 0.05$).

通过主成分分析将各洪水行为特征指标降维, 研究区177场次洪水事件的6个洪水行为特征指标综合为4个独立的主成分, 可解释93.73%的洪水行为特征指标变化. 第一主成分包括洪水时间尺度*TS*、涨洪速率*RQ*、落洪速率*DQ*、峰现时间*Tm*和变差系数*CV*, 可解释52.03%的指标变化; 第二主成分包括洪峰模数*Km*

表3 研究区基本信息^{a)}

序号	流域	集水面积(km^2)	平均坡度	场次数	雨量站数	所属流域	径流带	干旱指数
1	裴河	22	0.19	15	2	淮河流域	多水带	0.69
2	司前	128	0.20	34	4	东南诸河流域	丰水带	0.48
3	上流	173	0.19	17	6	长江流域	丰水带	0.49
4	下河村	217	0.12	15	6	黄河流域	过渡带	1.51
5	安和	251	0.15	31	8	长江流域	多水带	0.65
6	栾川	343	0.16	22	7	黄河流域	过渡带	1.04
7	杜头	432	0.12	27	9	长江流域	多水带	0.64
8	告成	622	0.07	16	5	淮河流域	过渡带	1.49

a) 干旱指数为多年平均潜在蒸散发量与降雨量的比值, 流域干旱指数小于1为湿润流域, 介于1~3之间为半湿润流域

图 1 研究区位置和流域属性分布

流域属性分布采用标准化处理的流域属性, 即 $\frac{Y - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}}$, 取值范围为 0~1. Y 为流域属性取值 (流域集水面积、多年平均降雨量、流域平均坡度和森林覆盖率), $Y_{\min}$ 和 $Y_{\max}$ 分别为研究区所有流域属性取值的最小值和最大值

等, 可解释 18.21% 的指标变化; 第三主成分包括落洪速率 DQ 和变差系数 CV 等, 可解释 13.42% 的指标变化; 第四主成分包括峰现时间 Tm 等, 可解释 10.07% 的指标变化。

对主成分因子进行聚类, 聚类组数 k 为 2~6 类时, 洪水事件聚类评估结果如表 5 所示, 随着聚类组数的增加, 各组内的最小分类数逐渐减少 (3~50 场), 对于组内典型洪水事件的代表性逐渐减弱; 聚类组数为 3 时, 平均轮廓系数最大 (0.42), 聚类凝聚度最强。因此, 本研究将所有洪水事件分为 3 种洪水类型, 各类型分别包含 14、144 和 19 场洪水事件。对 3 种洪水类型的洪水行为特征指标进行 Kruskal-Wallis 检验, Km 、 Tm 、 TS 、

RQ 、 DQ 和 CV 的 $K-W$ 统计量分别为 50.95、30.35、70.20、53.12、60.35 和 26.03, 显著性水平均小于 0.01, 各指标在不同洪水类型间的分布均存在显著差异。

4.2 各类型洪水行为特征辨识

各类型洪水的行为特征指标分布如图 2 所示。洪水类型 1 的 Km 、 Tm 、 TS 、 RQ 、 DQ 和 CV 的中值分别为 $0.58 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ 、5.5h、5.9h、 121.61 s^{-1} 、 16.72 s^{-1} 和 1.70, 主要特征为低强度流量、峰现早、涨落洪快、洪量集中、洪水形态偏尖瘦型; 洪水类型 2 的各指标中值分别为 $0.68 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ 、18h、24h、 9.70 s^{-1} 、 1.25 s^{-1} 和 1.17, 主要特征为低强度流量、峰现晚、涨

表 4 洪水行为特征指标相关系数^{a)}

指标	RQ	DQ	CV	Km	Tm	TS
RQ	$r=1.00$ $p<0.05$
DQ	$r=0.78$ $p<0.05$	$r=1.00$ $p<0.05$
CV	$r=0.45$ $p<0.05$	$r=0.21$ $p<0.05$	$r=1.00$ $p<0.05$
Km	$r=0.10$ $p\geq 0.05$	$r=0.27$ $p<0.05$	$r=0.30$ $p<0.05$	$r=1.00$ $p<0.05$
Tm	$r=-0.52$ $p<0.05$	$r=-0.36$ $p<0.05$	$r=-0.25$ $p<0.05$	$r=0.00$ $p\geq 0.05$	$r=1.00$ $p<0.05$
TS	$r=-0.62$ $p<0.05$	$r=-0.59$ $p<0.05$	$r=-0.56$ $p<0.05$	$r=-0.30$ $p<0.05$	$r=0.63$ $p<0.05$	$r=1.00$ $p<0.05$

a) r 为相关系数, p 为显著性水平, RQ 、 DQ 、 Km 、 Tm 和 TS 单位分别为 s^{-1} 、 s^{-1} 、 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ 、 h 和 h .

表 5 洪水事件聚类评估指标

聚类组数 k	平均轮廓系数 $\bar{\sigma}(k)$	最小分类数(场)	最大分类数(场)
2	0.31	50	127
3	0.42	14	144
4	0.36	14	85
5	0.35	9	81
6	0.35	3	103

落洪慢、洪量不集中、洪水形态偏矮胖型;洪水类型3的各指标中值分别为 $3.00m^3 s^{-1} km^{-2}$ 、13h、8.2h、 $33.72s^{-1}$ 、 $15.29s^{-1}$ 和1.35, 主要特征为高强度流量、峰现晚、涨落洪速率和洪水形态均处于洪水类型1和

类型2之间. 各类型洪水行为特征指标差异显著, 可较好地反映不同类型洪水的行为变化.

研究区各流域洪水类型分布组合包括4种, 如图3所示. 2个流域(裴河和下河村)分布有3种洪水类型, 其中裴河以洪水类型3为主(80%), 下河村以洪水类型2为主(88%). 告成流域分布有洪水类型1和类型2, 场次洪水占比分别为56%和43%. 3个流域(司前、上流和栾川)分布有洪水类型2和类型3, 且均以洪水类型2为主(88~95%). 2个流域(安和和杜头)仅分布有洪水类型2. 随着干旱指数的增加, 流域洪水类型逐渐以类型2和类型3为主, 转变为以类型1和类型2为主, 上述变化与流域气候特征和地理特征密切相关(陈发虎等, 2019). 南方湿润地区水汽补给充足, 场次暴雨变化过程较为

图 2 不同类型洪水的洪水行为特征指标分布

图 3 不同类型洪水相应的流域数和场次数分布

平坦, 降雨量集中度(η)的平均值为16.7%, 次降雨量较大(平均值为126mm), 而且场次径流系数较高(平均值

为0.70). 华中半湿润地区洪水成因机制复杂, 受东亚季风北进和前期土壤湿度等因子的影响, 流域气候和下面空间异质性强(Yang等, 2020). 场次暴雨过程较为集中, η 的平均值为25.8%, 次降雨量较小(平均值为76mm), 而且场次径流系数较低(平均值为0.43).

4.3 各类型洪水影响因子分析

大部分流域属性($R_{\text{ANOSIM}}=0.14\sim0.45$, $p<0.01$)和降雨特性指标($R_{\text{ANOSIM}}=0.17\sim0.50$, $p<0.01$)在各洪水类型聚类组内具有显著的相似性, 山洪分类与影响因子间具有物理相关性, 如表6所示. 山洪类型与流域森林覆盖率、流域面积等具有高度的一致性($R_{\text{ANOSIM}}\geq 0.40$, $p<0.01$). 其中森林覆盖率与洪水类型1和2的 Km 变化显著相关($r=0.57$ 和 0.19 , $p<0.05$), 与洪水类型3的 CV 变化显著相关($r=-0.46$, $p<0.05$). 流域面积与洪水类型1和2的 Km ($r=-0.64$ 和 -0.56 , $p<0.05$)变化均显著相关, 与洪水类型3中除 Km 、 CV 外的其他4个洪水行为特征指标

表 6 山洪聚类影响因子相似性检验结果

指标	R_{ANOSIM}	p	指标	R_{ANOSIM}	p
流域面积	0.40	0.001	平均降雨量	0.02	0.309
森林覆盖率	0.45	0.001	最大雨强	0.38	0.001
平均坡度	0.22	0.001	最大雨强出现时间	0.50	0.001
多年平均降水量	0.14	0.002	降雨历时	-0.09	0.963
场次降雨总量	0.17	0.005	降雨集中度	0.30	0.001

图 4 不同类型洪水相应的降雨特性指标分布

降雨特性指标(Y)分布采用标准化处理的降雨特性指标, 即 $\frac{Y-Y_{\min}}{Y_{\max}-Y_{\min}}$, 取值范围为0~1

均显著相关, r 为 $-0.70(DQ) \sim 0.65(Tm)(p < 0.05)$.

各类型洪水的大部分降雨特性指标分布差异显著(图4), 山洪类型与最大雨强出现时间、最大雨强、降雨量集中度等具有高度的一致性($R_{ANOSIM} \geq 0.30$, $p < 0.01$). 其中最大雨强出现时间与洪水类型1的TS变化显著相关($r = 0.68$, $p < 0.05$); 与洪水类型2中除CV之外的其他5个洪水行为特征指标均显著相关, 相关系数为 $-0.46(RQ) \sim 0.83(Tm)(p < 0.05)$; 与洪水类型3中除Km之外的其他5个洪水行为特征指标均显著相关, 相关系数为 $-0.76(RQ) \sim 0.99(Tm)(p < 0.05)$. 最大雨强与洪水类型1的RQ和CV变化显著相关($r = 0.60$ 和 0.53 , $p < 0.05$); 与洪水类型2的所有洪水行为特征指标变化均显著相关, r 为 $-0.42(TS) \sim 0.41(RQ)(p < 0.05)$; 与洪水类型3的Km变化显著相关($r = 0.80$, $p < 0.05$). 降雨量集中度与洪水类型1的TS变化显著相关($r = -0.64$, $p < 0.05$); 与洪水类型2中除CV之外的其他5个洪水行为特征指

标均显著相关, 相关系数为 $-0.54(Tm和TS) \sim 0.66(RQ)(p < 0.05)$; 与洪水类型3的TS、RQ、Tm和DQ变化显著相关, 相关系数为 $-0.76(TS) \sim 0.55(DQ)(p < 0.05)$.

洪水类型1的降雨事件主要特征为主雨峰现早且强度小、雨量集中、量级小和历时短. 此外, 洪水类型1所在流域森林覆盖率和面积均值分别为46%和450km², 主要为人类活动扰动剧烈的大流域, 土地利用类型以农田用地为主, 流域产流强度低, 对洪水的调蓄能力弱, 所形成的洪水峰现时间早、强度低、过程集中且涨落洪快, 雨洪特性基本一致. 洪水类型2的降雨事件主要特征为主雨峰现晚且强度小、雨量不集中和历时长. 此外, 洪水类型2所在流域森林覆盖率和面积均值分别为80%和278km², 主要为植被覆盖良好的中等流域, 水源涵养能力强, 产流强度低, 对洪水的调蓄能力强, 可坦化洪峰、滞蓄洪水, 所形成的洪水峰现晚、强度低、涨落洪慢、过程变化平缓. 洪水类型3

的降雨事件主要特征为主雨峰现晚且强度大、雨量较不集中和量级大。此外,洪水类型3所在流域森林覆盖率和面积均值分别为95%和79km²,主要为植被覆盖良好的山丘区小流域,水源涵养能力强,但流域地形陡峭,汇流时间短,削弱了流域的调蓄能力,所形成的洪水峰现稍晚、强度高、涨落洪稍慢、过程变化稍平缓。

4.4 各类型洪水事件模拟

研究区8个流域率定期和验证期的评估指标见表7。对于HEC模型而言,研究区内各流域率定期和验证期的径流深平均相对误差(RER)分别为9.93~43.73%和8.58~54.63%,平均Nash-Sutcliffe效率系数(NSE)分别为0.48~0.88和0.27~0.88。率定期和验证期8个流域的平均RER分别为16.59%和21.42%,平均NSE分别为0.79和0.73。新安江模型模拟效果与HEC模型基本一

致,率定期和验证期8个流域的平均RER分别为17.63%和20.39%,平均NSE分别为0.77和0.70。两个模型对于告成流域部分场次洪水水量平衡偏差较大,HEC模型和新安江模型约40%的次洪径流深相对误差分别在10%以内(平均值为4.48%)和15%以内(平均值为7.32%),平均Nash-Sutcliffe效率系数均为0.65。总体而言,HEC模型和新安江模型均能较好地再现不同类型区流域的小时尺度雨洪过程。

不同类型洪水事件模拟的评估指标如图5所示,典型次洪模拟过程如图6所示。对于HEC模型而言,洪水类型1~3的平均RER绝对值分别为27.98%、11.95%和8.30%,平均NSE分别为0.54、0.85和0.91。对于新安江模型而言,洪水类型1~3的平均RER绝对值分别为23.25%、18.19%和18.25%,平均NSE分别为0.39、0.76和0.86。洪水类型1所在流域以短历时低强度集中降雨为主,平均径流系数仅0.24,洪水过程陡涨陡落,

图5 不同洪水类型模拟评估指标分布

(a)和(b)为HEC模型的RER和NSE指标分布; (c)和(d)为新安江模型的RER和NSE指标分布

表 7 研究区洪水模拟评估指标

流域	HEC模型				新安江模型			
	率定期		验证期		率定期		验证期	
	RER(%)	NSE	RER(%)	NSE	RER(%)	NSE	RER(%)	NSE
安和	15.98	0.85	15.53	0.88	14.40	0.90	15.82	0.89
杜头	11.44	0.78	19.10	0.73	14.90	0.88	19.61	0.92
告成	43.73	0.48	54.63	0.27	25.43	0.21	35.75	0.13
栾川	17.62	0.79	31.29	0.43	29.52	0.73	24.91	0.64
裴河	14.74	0.83	17.77	0.87	14.67	0.82	20.75	0.83
上流	12.63	0.86	15.20	0.85	21.80	0.85	15.77	0.94
司前	15.41	0.88	13.62	0.88	9.77	0.95	12.65	0.92
下河村	9.93	0.69	8.58	0.78	14.79	0.48	25.97	0.14
平均	16.59	0.79	21.42	0.73	17.63	0.77	20.39	0.70

图 6 不同洪水类型典型场次洪水实测和模拟过程

雨洪时空变化异质性强, 但降雨驱动时空分布精度不足, 尤其是告成流域雨量站网密度仅124km²/站, 难以准确反映降雨量及强度等变化, 加之洪水场次数偏少、模型结构与参数不确定性问题, 导致该类型洪水的模拟精度偏低(Xu等, 2013), 两个模型对类型1的场次洪水模拟能力有待进一步提高. 类型2和3所在流域雨洪过程变化均偏平缓, 两个模型均能较好地模拟相应场次洪水的水量平衡和变化过程.

4.5 洪水行为特征指标模拟

不同洪水类型6个洪水行为特征指标的实测和模拟散点分布如图7所示, 对于HEC模型和新安江模型而言, 各洪水类型大多数行为特征指标散点均围绕在1:1线周围, 实测值与拟合值吻合较好. 洪水行为特征指标评估结果如图8所示, 对于各洪水类型的所有行为特征指标而言, HEC模型(图8a)模拟的类型1各指标的RMSEr为0.35(*Tm*)~1.44(*TS*), 类型2为0.24(*CV*)~0.75

图 7 实测和模拟洪水行为特征指标

(a) HEC模型; (b) 新安江模型

(RQ), 类型3为0.06(Tm)~0.51(TS), 各洪水类型的平均 $RMSEr$ 分别为0.69、0.41和0.25。类型1各指标的 r 为0.30(TS)~0.93(Km), 类型2为0.55(CV)~0.91(Km), 类型3为0.73(Km)~0.99(Tm), 各洪水类型的平均 r 分别为0.52、0.78和0.88。新安江模型的模拟效果与HEC模型基本一致(图8b), 各洪水类型的平均 $RMSEr$ 分别为0.37、0.37和0.18, 平均 r 分别为0.68、0.85和0.94。与各类型洪水事件模拟结果类似, HEC模型和新安江模型均对类型3的洪水行为特征指标模拟误差最小、相关程度最高, 对类型1的洪水行为特征指标模拟误差最大、相关程度最低。

对于描述洪水洪峰特性的指标而言, HEC模型对类型2和类型3的模拟效果最好, 平均 $RMSEr$ 和平均 r 分别为0.28和0.86; 新安江模型对类型3的模拟效果最好($RMSEr=0.18$, $r=0.91$); HEC模型($RMSEr=0.78$, $r=0.51$)和新安江模型($RMSEr=0.42$, $r=0.64$)均对类型1的模拟效果最差。对于描述洪水动力学特性的指标而言, 两个模型均对类型3的模拟效果最好, 平均 $RMSEr$ 分别为0.21和0.19, 平均 r 分别为0.91和0.97; 对类型1的模拟效果最差, 平均 $RMSEr$ 分别为0.61和0.31, 平均 r 分别为0.52和0.72。

对于不同洪水类型而言, 两个模型模拟效果基本一致, HEC模型对类型2的 Km 和 TS 指标模拟误差最小(0.27), 类型3的其余4个指标模拟误差最小(0.06~0.23); 类型1的 Km 指标相关程度最高(0.93), 类型3的其余5个指标相关程度最高(0.80~0.99)。新安江模型对类型2的 Km 指标模拟误差最小(0.26), 类型3的其余5个指标模拟误差最小(0.08~0.30); 类型1和类型2的 Km 指标相关程度最高(0.90), 类型3的其余5个指标相关程度最高(0.94~0.99)。

5 结论

采用多元统计分析和流域水文模型相结合的方法, 基于洪水行为特征指标的相似性辨识和模拟典型洪水行为过程。在湿润区和半湿润区的8个中小流域开展实例应用, 主要结论如下。

(1) 基于6个洪水行为特征指标将177场次洪水事件分为3种洪水类型: 类型1为低强度流量、峰现早、涨落洪快、洪量集中、形态偏尖瘦型洪水; 类型2为低强度流量、峰现晚、涨落洪慢、洪量不集中、形态

图8 不同洪水类型下的洪水行为特征指标模拟评估指标分布

(a)和(b)分别表示HEC模型和新安江模型模拟结果; 圆圈大小与各指标的平均相对均方根误差成正比, 圆圈颜色代表各指标的平均相关系数

偏矮胖型洪水; 类型3为高强度流量、峰现晚、涨落洪速率和洪水形态均处于洪水类型1和类型2之间的洪水。山洪类型与流域森林覆盖率、流域面积、最大雨强出现时间、最大雨强、降雨量集中度等影响因子具有高度一致性。

(2) HEC模型和新安江模型均能较好地模拟研究区小时尺度雨洪过程, 率定期和验证期的径流深平均相对误差均在22%以内, 平均Nash-Sutcliffe效率系数均在0.70以上; 均对洪水类型2和类型3的水量平衡和洪水过程线模拟效果较好, HEC模型的平均径流深相对误差分别为11.95%和8.30%, 平均Nash-Sutcliffe效率系数分别为0.85和0.91, 新安江模型分别为18.19%和18.25%、0.76和0.86。

(3) HEC模型和新安江模型对洪水行为特征指标的模拟效果基本一致, 均对洪水类型3的所有行为特征指标模拟效果最好, 平均相对均方根误差 $RMSEr$ 分别为0.25和0.18, 平均相关系数 r 分别为0.88和0.94; 洪水类型2(仅HEC模型)和3的洪水洪峰特性指标模拟效果最好, $RMSEr$ 分别为0.28和0.18, r 分别0.86和0.91; 洪水类型3的洪水动力学特性指标模拟效果最好, $RMSEr$ 分别为0.21和0.19, r 分别0.91和0.97。

今后应进一步收集不同类型区暴雨山洪资料, 增加场次雨洪过程样本容量, 检验山洪分类的合理性, 以及流域水文模型对不同类型山洪事件和洪水行为特征指标模拟的可靠性。

致谢 感谢河南省、福建省和江西省水文局在场次雨洪资料收集过程中提供的支持和帮助。

参考文献

- 崔鹏, 邹强. 2016. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法. 地理科学进展, 35: 137–147
- 陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 吴铎, 吴绍洪, 张镱锂, 孙航, 刘禹, 方小敏, 秦伯强, 李新, 张廷军, 刘宝元, 董治宝, 侯书贵, 田立德, 徐柏青, 董广辉, 郑景云, 杨威, 王鑫, 李再军, 王飞, 胡振波, 王杰, 刘建宝, 陈建徽, 黄伟, 侯居峙, 蔡秋芳, 隆浩, 姜明, 胡亚鲜, 冯晓明, 莫兴国, 杨晓燕, 张东菊, 王秀红, 尹云鹤, 刘晓晨. 2019. 近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 1659–1696
- 郭良, 丁留谦, 孙东亚, 刘昌军, 何秉顺, 刘荣华. 2018. 中国山洪灾害防御关键技术. 水利学报, 49: 1123–1136
- 胡国华, 陈肖, 于泽兴, 顾庆福, 李彤, 邹杨. 2017. 基于HEC-HMS的郴江流域山洪预报研究. 自然灾害学报, 26: 147–155
- 刘松, 张利平, 余敦先, 王强, 胡辰, 夏军. 2019. 干旱半干旱地区流域水文模型的适用性. 武汉大学学报(工学版), 52: 384–390
- 刘业森, 杨振山, 黄耀欢, 刘昌军. 2019. 建国以来中国山洪灾害时空演变格局及驱动因素分析. 中国科学: 地球科学, 49: 408–420
- 刘玉邦, 梁川. 2011. 基于天气成因和主成分投影分析的暴雨洪水分级研究. 水利学报, 42: 98–104
- 彭为, 刘丙军, 廖叶颖, 邱江潮. 2018. 基于强度与形态指标的洪水分类研究. 水文, 38: 7–11, 76
- 汪丽娜, 陈晓宏, 李粤安, 林凯荣. 2009. 基于人工鱼群算法和模糊C-均值聚类的洪水分类方法. 水利学报, 40: 743–748, 755
- 赵士鹏. 1996. 中国山洪灾害系统的整体特征及其危险度区划的初步研究. 自然灾害学报, 5: 93–99
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2008. GB/T 22482-2008. 水文情报预报规范. 北京: 中国标准出版社
- Ali G, Tetzlaff D, Soulsby C, McDonnell J J, Capell R. 2012. A comparison of similarity indices for catchment classification using a cross-regional dataset. *Adv Water Resour*, 40: 11–22
- Bhaskar N R, French M N, Kyiamah G K. 2000. Characterization of flash floods in Eastern Kentucky. *J Hydrol Eng*, 5: 327–331
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE T Evolut Comput*, 6: 182–197
- Jonkman S N. 2005. Global perspectives on loss of human life caused by floods. *Nat Hazards*, 34: 151–175
- Kundzewicz Z W, Hegger D L T, Matczak P, Driessen P P J. 2018. Flood-risk reduction: Structural measures and diverse strategies. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 12321–12325
- Kundzewicz Z W, Su B, Wang Y, Xia J, Huang J, Jiang T. 2019. Flood risk and its reduction in China. *Adv Water Resour*, 130: 37–45
- Ley R, Casper M C, Hellebrand H, Merz R. 2011. Catchment classification by runoff behaviour with self-organizing maps (SOM). *Hydrol Earth Syst Sc*, 15: 2947–2962
- McMillan H K, Booker D J, Cattoën C. 2016. Validation of a national hydrological model. *J Hydrol*, 541: 800–815
- Miao Q H, Yang D W, Yang H B, Li Z. 2016. Establishing a rainfall threshold for flash flood warnings in China's mountainous areas based on a distributed hydrological model. *J Hydrol*, 541: 371–386
- Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *T ASABE*, 50: 885–900
- Nied M, Pardowitz T, Nissen K, Ulbrich U, Hundecha Y, Merz B. 2014. On the relationship between hydro-meteorological patterns and flood types. *J Hydrol*, 519: 3249–3262
- Oudin L, Kay A, Andréassian V, Perrin C. 2010. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? *Water Resour Res*, 46: W11558
- Poff N L R, Allan J D, Bain M B, Karr J R, Prestegard K L, Richter B D, Sparks R E, Stromberg J C. 1997. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47: 769–784
- Rousseeuw P J. 1987. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *J Comput Appl Math*, 20: 53–65
- Saharia M, Kirstetter P E, Vergara H, Gourley J J, Hong Y. 2017. Characterization of floods in the United States. *J Hydrol*, 548: 524–535
- Stein L, Pianosi F, Woods R. 2020. Event-based classification for global study of river flood generating processes. *Hydrol Process*, 34: 1514–1529
- Theodorsson-Norheim E. 1986. Kruskal-Wallis test: BASIC computer program to perform nonparametric one-way analysis of variance and multiple comparisons on ranks of several independent samples. *Comput Meth Prog Bio*, 23: 57–62
- Turkington T, Breinl K, Ettema J, Alkema D, Jetten V. 2016. A new flood type classification method for use in climate change impact studies. *Weather Clim Extremes*, 14: 1–16
- Wagener T, Sivapalan M, Troch P, Woods R. 2007. Catchment classification and hydrologic similarity. *Geogr Compass*, 1: 901–931
- Xu H L, Xu X Y, Chen H, Zhang Z X, Li L. 2013. Assessing the influence of rain gauge density and distribution on hydrological model performance in a humid region of China. *J Hydrol*, 505: 1–12
- Yan L, Xiong L H, Ruan G S, Xu C Y, Yan P T, Liu P. 2019. Reducing uncertainty of design floods of two-component mixture distributions by utilizing flood timescale to classify flood types in seasonally

- snow covered region. *J Hydrol*, 574: 588–608
- Yang W C, Yang H B, Yang D W. 2020. Classifying floods by quantifying driver contributions in the Eastern Monsoon Region of China. *J Hydrol*, 585: 124767
- Zhang S D, Zhang D D. 2019. Population-influenced spatiotemporal pattern of natural disaster and social crisis in China, AD1–1910. *Sci China Earth Sci*, 62: 1138–1150
- Zhai X Y, Guo L, Liu R H, Zhang Y Y. 2018. Rainfall threshold determination for flash flood warning in mountainous catchments with consideration of antecedent soil moisture and rainfall pattern. *Nat Hazards*, 94: 605–625
- Zhai X Y, Guo L, Liu R H, Zhang Y Y, Zhang Y Q. 2021. Comparing three hydrological models for flash flood simulations in 13 humid and semi-humid mountainous catchments. *Water Resour Manag*, 35: 1547–1571
- Zhang Y, Wang Y, Chen Y, Liang F G, Liu H P. 2019. Assessment of future flash flood inundations in coastal regions under climate change scenarios—A case study of Hadahe River basin in north-eastern China. *Sci Total Environ*, 693: 133550
- Zhang Y Y, Chen Q T, Xia J. 2020. Investigation on flood event variations at space and time scales in the Huaihe River Basin of China using flood behavior classification. *J Geogr Sci*, 30: 2053–2075
- Zhang Y Y, Zhai X Y, Shao Q X, Yan Z Q. 2015. Assessing temporal and spatial alterations of flow regimes in the regulated Huai River Basin, China. *J Hydrol*, 529: 384–397
- Zhang Y Y, Zhou Y J, Shao Q X, Liu H B, Lei Q L, Zhai X Y, Wang X L. 2016. Diffuse nutrient losses and the impact factors determining their regional differences in four catchments from North to South China. *J Hydrol*, 543: 577–594

(责任编辑: 汤秋鸿)