

王元疆, 江善虎, 凌子涵, 等. 基于降雨时空变化的山洪预警临界雨量[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 90-98. WANG Y J, JIANG S H, LING Z H, et al. Critical rainfall for flash flood warning based on rainfall uncertainty [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 90-98. (in Chinese)

基于降雨时空变化的山洪预警临界雨量

王元疆^{1,2}, 江善虎^{1,2}, 凌子涵², 陈宏新³, 张晓祥², 任立良^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098;
3. 南京南瑞水利水电科技有限公司, 南京 211000)

摘要: 为提高山洪灾害预警精度, 以彭坊小流域为例, 基于概率分布等控制条件生成随机雨型, 探究不同前期影响雨量下随机雨型对山洪预警临界雨量的影响, 进一步分析降雨空间分布对山洪预警临界雨量的影响。结果表明: 在雨峰位置偏后、雨峰峰值较大的雨型集下, 临界雨量波动较大, 有较高的不确定性; 雨型对临界雨量的影响小于前期影响雨量对临界雨量的影响, 在前期土壤较干燥时, 雨峰位置系数较小, 临界雨量值相对较大, 雨型峰值倍比较大时, 临界雨量值相对较小, 更容易致灾; 在降雨空间分布上, 当降雨集中在下游时, 临界雨量值最小, 越容易达到警戒流量, 但降雨空间分布对临界雨量的影响小于前期影响雨量的影响, 且这种影响会随前期影响雨量的增加而不断减小。

关键词: 山洪; 临界雨量; 前期影响雨量; 随机雨型; 降雨空间分布

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0011

山洪灾害一般指在山区因为降雨、融雪等引起的洪水、滑坡、泥石流等灾害^[1]。临界雨量是目前常用的山洪灾害预警指标, 即某一时段内, 当降雨量达到该值时, 流域出口断面流量将超过警戒流量, 发生致灾洪水^[2]。如何优化山洪预警、解决防洪减灾的短板问题是下一步研究的热点^[3]。

对于临界雨量, 不少学者都进行了研究。针对临界雨量计算, 国外有基于网格的山洪指导方法^[4], 国内多用统计归纳法, 如降雨-径流曲线插值法^[5]、暴雨临界曲线法^[6]、水动力学算法^[7]、比拟法^[8]等。近年来研究较多的是将临界雨量的推求与水文模型结合^[9-11]。陈宏新等^[12]依据流域产汇流原理, 充分考虑前期影响指标对复合预警指标的不同影响, 提出由临界雨量推求复合预警指标的公式, 并提出了一套完整的山洪预警方案。刘淑雅等^[13]以抚河流域 3 个山丘小流域为例, 采用分布式新安江模型对暴雨洪水进行精细化模拟, 并利用率定后的模型进行临界雨量试算, 得出不同初始土壤含水量、预警时段组合下临界雨量, 为抚河流域山洪预警工作

提供参考。在山丘区, 前期土壤含水量和降雨时空变化都会对山洪预警的临界雨量造成较大影响^[14-15]。Zhao 等^[16-17]构建了 4 种组合情景, 并结合贝叶斯方法, 将前期土壤含水量与近期降雨事件分情况组合, 通过对照它们引起和不引起滑坡的概率提出了 1 种概率阈值, 相比固定的雨量阈值, 其预测精度有所提高。原文林等^[18]针对降雨时间变化问题, 依据概率分布传递原理, 提出了基于参数控制的随机雨型生成方法, 并建立起基于随机雨型的山洪灾害临界雨量计算模型与考虑决策者风险偏好的预警模式。翟晓燕等^[19]评估前期土壤湿度和降雨对小流域山洪预警指标的影响, 发现前期土湿状况和雨型均显著影响临界雨量变化。闫宝伟等^[20]提出了降雨空间异质性指数, 论述了降雨空间分布的变化对临界雨量带来的影响, 表明考虑降雨空间分布可以显著提高洪水预警的精度。马细霞等^[1]认为雨峰位置系数对雨型具有重要代表性, 并以雨峰位置为标准, 划分出 3 种不同类型的降雨过程。宋晓猛等^[21]则认为极端降雨量对总降雨量的贡献度是降雨结构的

收稿日期: 2023-07-10 修回日期: 2023-12-11 网络出版时间: 2023-12-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231228.0854.006>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979069); 中央高校基本科研业务费项目(B200204029)

作者简介: 王元疆(1999—), 男, 江苏淮安人, 主要从事降水融合及水文预报研究。E-mail: 221301010037@hhu.edu.cn

通信作者: 江善虎(1983—), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士, 主要从事变化环境下水文响应研究。E-mail: hik0216@hhu.edu.cn

重要组成部分。然而,总体上目前综合考虑不同前期影响雨量下随机雨型和空间分布对山洪临界雨量影响的研究较少。

以彭坊小流域为研究区,基于概率分布,以综合雨峰位置系数和综合峰值倍比为控制条件生成随机雨型,探究在不同前期影响雨量下随机雨型对山洪预警临界雨量的影响,进一步分析降雨空间分布对山洪预警临界雨量的影响。研究结果对提高山洪灾害预警精度,完善预警体系具有一定指导意义。

1 研究区与数据

彭坊小流域位于赣江中游西部地区,集水面积 122 km²,流域最大坡度为 62°,土壤质地以壤土为主,土地利用以常绿阔叶林和木质稀疏草原为主。该流域年平均降水为 1 808.7 mm,年平均径流深达 1 050.5 mm;全年 4—8 月的降水量最多,占比超 70%,属于典型的湿润区。该流域山区占绝大部分面积,人类活动影响小,且雨量站点分布较多,符合新安江模型模拟径流的前提,同时也适合作为研究临界雨量的典型区域。

收集彭坊小流域 8 个雨量站 1980—2013 年的逐日降雨量数据和时段暴雨数据,1 个水文站 1980—2013 年的逐日流量数据、洪水要素摘录信息、相应时段水位流量数据和蒸发皿所测蒸发量数据。

2 研究方法

2.1 随机雨型生成

2.1.1 降雨研究信息提取

采用划分准则从研究区历史降雨资料中提取出不同历时的场次降雨,然后再进行降雨信息提取^[18],具体如下:

确定分析降雨时采用的时间步长 t ,然后运用短历时划分准则从研究区相应时间步长的历史降雨资料中提取场次降雨,最后按降雨总历时 T 分类,即得到不同历时的场次降雨。

统计降雨总历时为 T 的 j 场降雨的 i 个时段雨量(其中 $i=T/t$),再分别按式(1)、式(2)和式(3)计算降雨时程分配比例 r ,雨峰位置系数 p 和峰值倍比 r_{\max} ,最后构建降雨信息矩阵集,即降雨时程分配比例矩阵 \mathbf{R} 、雨峰位置系数矩阵 \mathbf{P} 和峰值倍比矩阵 \mathbf{R}_{\max} ,见式(4)。

$$r_{ji} = \frac{w_{ji}}{w_j} \quad (1)$$

$$p_j = \frac{T_{ji}}{T_j} \quad (2)$$

$$r_{j,\max} = \frac{w_{j,\max}}{w_j} \quad (3)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1i} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{j1} & \cdots & r_{ji} \end{bmatrix} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_j \end{bmatrix} \mathbf{R}_{\max} = \begin{bmatrix} r_{1,\max} \\ \vdots \\ r_{j,\max} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: r_{ji} 为第 j 场降雨某 i 时段雨量占降雨总量的比例; p_j 为第 j 场降雨的雨峰位置系数; $r_{j,\max}$ 为第 j 场降雨的峰值倍比; T_{ji} 为第 j 场降雨雨峰出现在第 i 个时段, h ; T_j 为第 j 场降雨的持续时间, h ; w_{ji} 为第 j 场降雨某 i 时段的雨量, mm ; $w_{j,\max}$ 为第 j 场降雨最大时段降雨量, mm ; w_j 为第 j 场降雨的总降雨量, mm 。

按式(5)和(6)计算综合雨峰位置系数 p_z 和综合峰值倍比 $r_{z,\max}$ 。

$$p_z = \frac{\sum_{j=1}^n p_j}{n} \quad (5)$$

$$r_{z,\max} = \frac{\sum_{j=1}^n r_{j,\max}}{n} \quad (6)$$

式中: p_j 为第 j 场降雨的雨峰位置系数; $r_{j,\max}$ 为第 j 场降雨的峰值倍比; n 为降雨总场次。

2.1.2 基于概率分布等控制条件生成随机雨型

概率分布主要表达了某随机变量在取值上的一种规律,一般来说,在拟合一组样本数据的最佳分布时,其数据量最好大于 20 个,可以采用均方根误差或 K-S 检验等判断其拟合效果。均方根误差主要用来衡量观测值和理论值的偏差^[22],均方根误差值越小,代表偏差越小,越趋于符合。其中, K-S 单样本检验可以用来判别一组样本数据的实际分布是否与一特定理论分布相符合,基本原理是将理论分布下累计频数分布与实际数据计算的累计频数分布相比较,找出它们之间相差最大的点^[23],并记最大偏差为 D_n ,其检验步骤如下:

假设样本数据服从某理论分布。

计算检验统计量(最大偏差) D_n ,表达式为

$$D_n = \max \{ |F(x) - F_n(x)| \} \quad (7)$$

式中: $F_n(x)$ 表示样本量为 n 的随机样本实测值的累计分布函数, $F(x)$ 表示理论分布的累计概率分布函数。

比较判断。当 D_n 小于样本容量 n 和显著性水平 α 下的临界值 D_p (可查表得), 即 $D_n < D_p$ 时, 则接受原假设, 认为拟合是可以的。

研究采用概率分布等控制条件生成随机雨型, 其实是依据随机变量密度函数的信息传递原理^[24]。即根据实测资料拟合出随机变量 x (本研究指降雨的时程分配) 的最优分布函数 $F(x)$ (认为研究区某个时段的雨量在该场次短历时连续降雨的占比大概率服从最优分布), 再根据最优分布生成一系列伪随机变量 x' , 为了更好地反映变量的分布规律, 再依据实测资料给出变量的边界条件和需要满足的条件, 最终建立基于概率分布等控制条件的随机雨型生成方法^[18], 具体如下:

对于降雨时程分配比例矩阵 R , 基于时间步长 t 共可以得到 i 组列矩阵, 即不同场降雨同一时间段的降雨时程分配组成一个信息集, 构成矩阵 R_i 。

选用多组分布函数对 R_i 序列数值拟合, 先根据均方根误差和 K-S 单样本检验判断各分布函数的拟合效果, 选取一拟合度最优的分布函数, 然后将样本数据的经验分布函数图与最优理论分布函数图相比较, 验证拟合效果, 最终每个 R_i 均能得到一拟合度最优的分布函数 $F_i(r)$ 。

对于每个 R_i 序列, 将 $\min\{r_{1i}, r_{2i}, \dots, r_{ji}\}$ 作为下限值, $\max\{r_{1i}, r_{2i}, \dots, r_{ji}\}$ 作为上限值, 即构建出 R_i 序列的边界条件 $[r_{i,\min}, r_{i,\max}]$ 。

运用编程语言随机生成满足分布函数 $F_i(r)$ 和边界条件的伪随机数序列 R'_i , 再以 $r_{j1} + r_{j2} + \dots + r_{ji} = 1$ 为控制条件生成随机雨型, 最后根据雨峰位置系数 p 和峰值倍比 r_{\max} 划分不同的随机雨型集 $[p, r_{\max}]$ 。

2.2 临界雨量计算

采用试算法计算临界雨量, 即在某一情景下假定一个初始雨量值, 按雨型的时程分配将雨量分配到各个时段, 将此降雨过程作为栅格型新安江模型 (GRIDXAJ) 输入, 得到一定时段内的径流过程^[13]。然后找到该次流量过程的洪峰值, 如果该值与警戒流量值的误差在合理范围内, 则认为此时的雨量为该情景下的临界雨量。反之, 根据模拟流量与警戒流量的大小调整初值, 再次分配并输入模型, 反复比较, 直到模拟的洪峰流量接近警戒流量值为止。

为得到警戒流量, 需由水文站大断面图获取上滩水位, 再根据水文站实测水位-流量关系曲线确定上滩水位对应的流量, 最后将该流量与不同设计频

率下的洪峰流量做比对, 最终确定断面警戒流量。

3 结果分析

3.1 模型选取及警戒流量确定

考虑彭坊小流域位于湿润区, 且分布式模型在模拟小流域时有较高的精度, 故采用 GRIDXAJ 模型推求临界雨量。利用彭坊小流域 1989—2013 年 8 场洪水过程对 GRIDXAJ 模型参数进行率定, 并用 5 场典型洪水对参数进行合理性检验。

8 场率定期洪水模拟径流深和洪峰流量满足相对误差在 $\pm 20\%$ 以内, 峰现时差在 ± 2 h 以内, 且确定性系数全都大于 0.80, 最高达 0.94; 5 场验证期洪水模拟径流深和洪峰流量满足相对误差在 $\pm 20\%$ 以内, 峰现时差在 ± 2 h 以内, 且确定性系数全都大于 0.70, 最高达 0.93, 模拟效果比较理想, 率定的参数基本合理, 可用于模型计算。图 1 给出了 20110612 号洪水过程, GRIDXAJ 模型能较准确模拟彭坊小流域次洪过程。

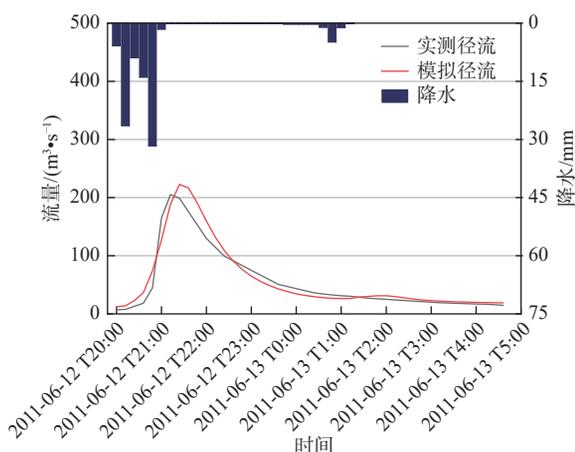


图 1 GRIDXAJ 模型模拟彭坊验证期 20110612 号洪水过程
Fig. 1 The validation of the Pengfang flood event on June 12, 2011 simulated by the GRIDXAJ model

同时通过前述方法确定警戒流量, 彭坊小流域水文站控制断面上滩水位为 45.30 m, 上滩流量为 $181 \text{ m}^3/\text{s}$, 5 年一遇洪水为 $199 \text{ m}^3/\text{s}$, 综合确定警戒流量为 $199 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.2 不同前期影响雨量下随机雨型对临界雨量的影响

3.2.1 研究区随机雨型计算

以彭坊小流域实测降雨资料作为降雨数据库进行降雨历时特征分析, 其中降雨历时为 1~6 h 的降雨较多, 占总降雨历时分布的 89%, 说明彭坊小流域以短历时降雨为主。同时彭坊小流域控制流域

面积小, 汇流时间经计算约 5 h, 为尽量包括临界流量推算过程中的不确定性, 实际工作中流域汇流时间取得比计算值略长^[25], 这里取 6 h。据此, 考虑上述条件, 并结合分析雨型的需要, 降雨历时过短不利于雨型的分析, 最终选取 6 h 降雨资料作为雨型研究的基础资料。

降雨基本信息的提取。对流域内降雨进行统计分析, 共挑选了 21 场总历时 T 为 6 h 的典型降雨过程, 时段间隔 t 为 1 h。经计算得雨峰位置系数 p 的变化范围为 0.17~1.00, 峰值倍比 r_{\max} 的变化范围为 0.21~0.52, 综合雨峰位置系数 p_z 为 0.50, 综合峰值倍比 $r_{z,\max}$ 为 0.32, 故本次研究以 $(0.50, r_{\max})$ 、 $(p, 0.32)$ 作为随机雨型集的筛选条件。

分布函数确定。针对降雨时程分配比例矩阵 B 提取各场次降雨共 6 个时段下的降雨时程分配值, 构成 6 组列矩阵 $B_1 \sim B_6$, 然后采用正态(Normal)分布、指数(Exponential)分布、伽马(Gamma)分布、对数正态(Lognormal)分布、三角形(Triangular)分布、威布尔(Weibull)分布、均匀(Uniform)分布等分布函数分别对其拟合, 最后以均方根误差和 K-S 检验判断其拟合精度。拟合结果见表 1。各时段下拟合出的最优分布函数其均方根误差值都较小, 最大只有 0.026 7, 最小仅 0.001 3; 表中依据式(7)算出的检验统计量值(最大偏差 D_n)最小为 0.080 5, 最大为 0.204 0, 均小于临界值。因此 6 个时段下的最优分布函数均满足拟合要求。

表 1 6 h 降雨各时段最优概率分布拟合结果

Tab. 1 Optimal probability distribution fitting results for 6-hour rainfall periods

时段	分布函数	表达式	均方根误差	检验统计量
1	Normal	NORM(0.187 0, 0.081 1)	0.026 7	0.106 0
2	Normal	NORM(0.172, 0.120)	0.010 7	0.141 0
3	Exponential	EXPO(0.15)	0.001 3	0.187 0
4	Normal	NORM(0.183, 0.100)	0.004 5	0.080 5
5	Exponential	EXPO(0.14)	0.008 6	0.204 0
6	Gamma	GAMM(0.036 7, 4.560 0)	0.002 2	0.102 0

随机雨型确定。统计各时段下降雨时程分配比例的最大值和最小值可知: 第 1 时段降雨时程分配比例值的边界条件为(0.08, 0.41); 第 2 时段降雨时程分配比例值的边界条件为(0, 0.52); 第 3 时段降雨时程分配比例值的边界条件为(0.01, 0.44); 第 4 时段降雨时程分配比例值的边界条件为(0.01, 0.39); 第 5 时段降雨时程分配比例值的边界条件为(0.02, 0.36); 第 6 时段降雨时程分配比例值的边界条件为(0.04, 0.35)。先以分布函数和边界条件作为约束, 并以 $r_{j_1} + r_{j_2} + \dots + r_{j_6} = 1$ 作为目标函数生成随机雨型, 再以 $(0.50, r_{\max})$ 、 $(p, 0.32)$ 作为随机雨型集的控制条件, 得出 $(0.50, 0.32)$ 、 $(0.50, 0.42)$ 、 $(0.50, 0.52)$ 、 $(0.17, 0.32)$ 、 $(0.83, 0.32)$ 共 5 种随机雨型集(对应图 2(a)、2(b)、2(c)、2(d)、2(e)), 其中, 每类雨型集下又包含了 RT_1 、 RT_2 、 \dots 、 RT_{10} 共 10 种不同雨型。

3.2.2 研究区临界雨量计算及分析

计算临界雨量时, 假定 4 种不同情景的前期影响雨量(P_a)作为 GRIDXAJ 模型的初始条件, 即

$P_a = 1.0W_m$ (湿润)、 $P_a = 0.8W_m$ (较湿)、 $P_a = 0.5W_m$ (一般)、 $P_a = 0.2W_m$ (较干), W_m 为土壤饱和含水量。参照随机雨型的降雨时程分配, 输入不同雨量的降雨过程进行产汇流计算, 如果其洪峰流量接近警戒流量值, 则假定的初值就是该情景下的临界雨量, 反之, 则重复之前的步骤反复试算, 直到模拟的洪峰流量接近警戒流量值。

针对随机雨型对临界雨量的影响, 着重确定 6 h 临界雨量。采用 $(p, 0.32)$ 随机雨型集计算不同前期影响雨量下对应临界雨量波动区间见表 2。

由表 2 可知, 在相同前期影响雨量的前提下, 不同雨峰位置系数对应的临界雨量值波动幅度不同: 对于雨峰位置偏前, 其临界雨量的平均波动幅度为 5.77 mm; 对于雨峰位置居中, 其临界雨量的平均波动幅度为 5.92 mm; 对于雨峰位置偏后, 其临界雨量的平均波动幅度为 7.22 mm。可见, 在雨峰位置偏后($p=0.83$)的雨型集下, 临界雨量波动较大, 致灾情景多变, 有较高的不确定性。

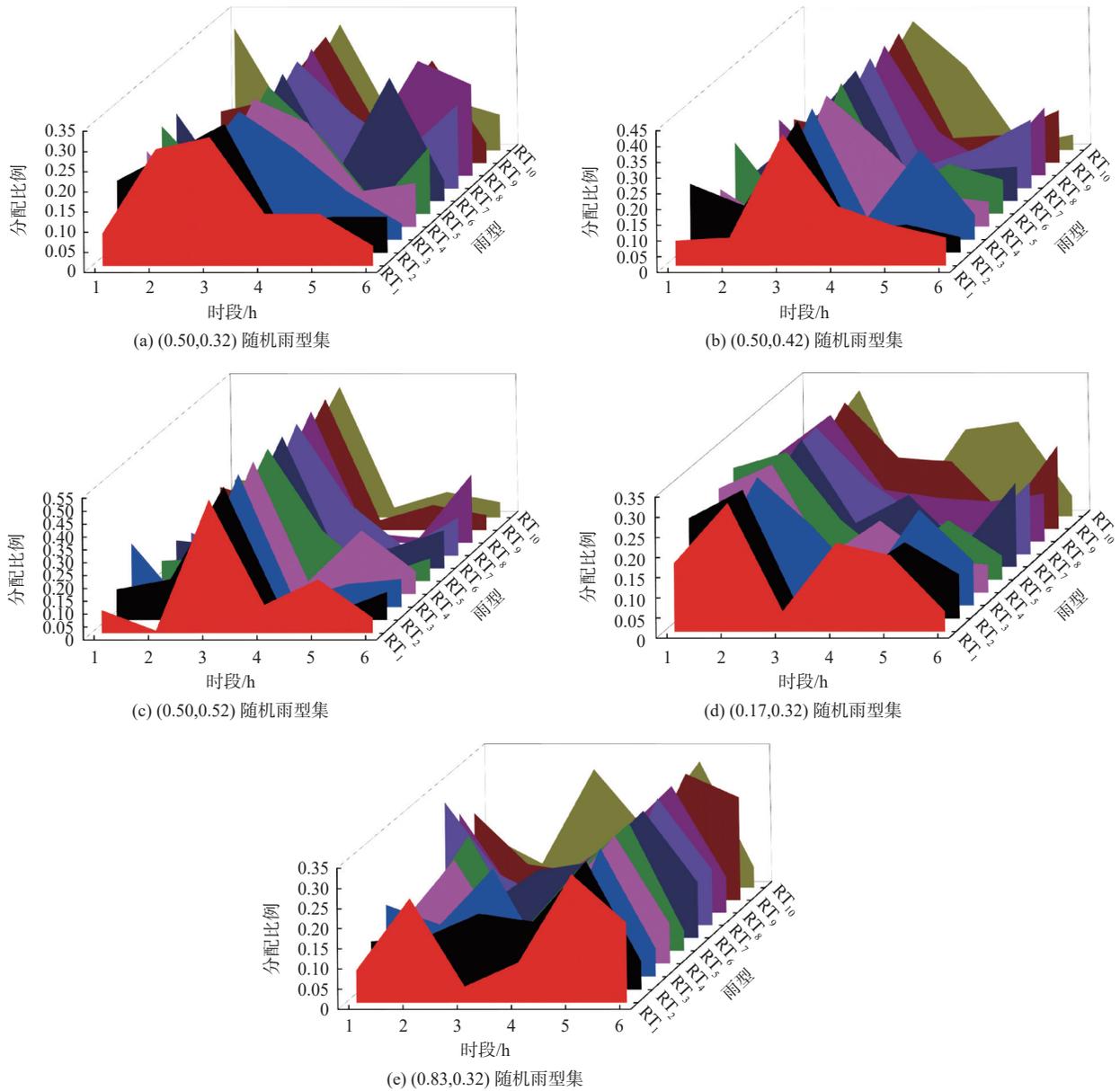


图 2 5 种随机雨型集

Fig. 2 Five sets of random rainfall patterns

表 2 彭坊流域不同雨峰位置系数下 6 h 临界雨量值

Tab. 2 Different critical rainfall values for 6-hour periods with varied rain peak position coefficients in Pengfang watershed

单位: mm

前期影响雨量	雨峰位置系数		
	$p=0.17$	$p=0.50$	$p=0.83$
湿润($P_a=1.0W_m$)	78.72~85.58	77.32~81.48	79.35~84.73
较湿($P_a=0.8W_m$)	111.20~115.36	108.27~112.99	109.01~115.25
一般($P_a=0.5W_m$)	141.67~146.72	137.50~142.99	137.70~145.18
较干($P_a=0.2W_m$)	168.12~175.13	162.19~171.49	161.04~170.82

表 3 是采用 $(0.5, r_{max})$ 随机雨型集计算出的不同前期影响雨量下对应临界雨量波动区间。

由表 3 可知,在相同前期影响雨量下,不同峰值比对应的临界雨量波动幅度也不相同。随着峰

值倍比的不断增大,其临界雨量的平均波动幅度分别为 5.92、7.58、7.96 mm。这表明在雨峰峰值比较大的雨型集下,临界雨量波动较大,有较高的不确定性。但当雨峰峰值比增大到一定程度时,其

对临界雨量值波动幅度的影响将变小。

图3是不同前期影响雨量下各雨型集临界雨量分布箱线图,总体来看,雨型对临界雨量的影响小于前期影响雨量对临界雨量的影响。当前期影响雨量较小时,雨峰位置系数较小,临界雨量值相对较大,这是因为雨峰出现在早期,初期经植被截留、填洼、土壤下渗等作用,降雨损失较大,造峰雨量偏

小,使得达到警戒流量所需的雨量偏大。当前期土壤湿润时,初期降雨损失大大减小,临界雨量随着雨峰位置的变化也减小。同时,当峰值倍比较大时,临界雨量值相对较小,即短时间降雨来得较大,容易超过地表植被和土壤的调蓄作用,这时达到警戒流量所需的雨量偏小,致灾概率大。

表3 彭坊流域不同峰值倍比下6h临界雨量值

Tab. 3 Different critical rainfall values for 6-hour periods with various peak value ratio in Pengfang watershed

单位: mm

前期影响雨量	峰值倍比		
	$r_{max}=0.32$	$r_{max}=0.42$	$r_{max}=0.52$
湿润($P_a=1.0W_m$)	77.32~81.48	75.62~81.57	74.71~81.50
较湿($P_a=0.8W_m$)	108.27~112.99	106.25~112.16	105.97~111.25
一般($P_a=0.5W_m$)	137.50~142.99	133.80~141.65	131.66~139.28
较干($P_a=0.2W_m$)	162.19~171.49	159.03~169.65	155.65~167.80

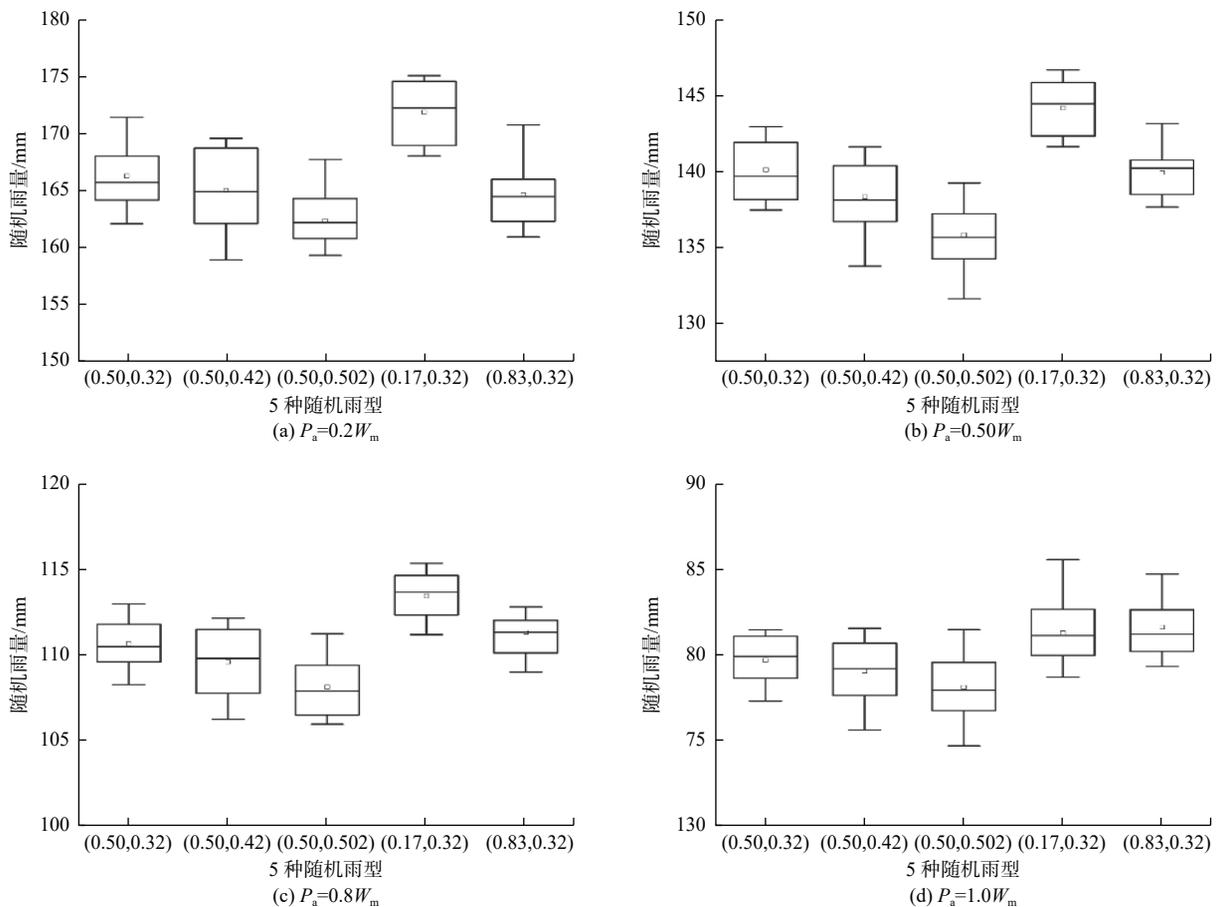


图3 不同雨型集临界雨量箱线

Fig. 3 Boxplot of critical rainfall for different rainfall type sets

3.3 降雨空间分布对临界雨量的影响

降雨雨型的改变代表了降雨随时间的不同变化,而在现实中降雨的空间分布也极其不均匀。降雨可能集中在流域上游或下游,2种不同空间分布的

降雨在流域出口断面形成的流量过程也会有所区别^[26]。前面针对临界雨量的研究是在假设流域降雨空间均匀的前提下进行的,本次研究还将讨论降雨空间分布的变化对临界雨量的影响,这里以雨量站

降雨量的不同代表降雨在空间上的不同。其中, 坪江头站和龙下站在流域上游, 官田站、炎里站和寄岭站在流域中游, 由路站、老洲站、深坳站和彭坊站在流域下游。以降雨集中在下游为例, 即认为 60% 的降雨落在下游, 并假设在下游的降雨是均匀的, 即区域内各雨量站降雨相等。

从 (0.50, 0.32)、(0.50, 0.42)、(0.50, 0.52)、(0.17, 0.32)、(0.83, 0.32) 5 种随机雨型集中各选一个雨型, 在不同的前期影响雨量下, 分别得出降雨集中在下游、中游和上游时的临界雨量, 其结果见

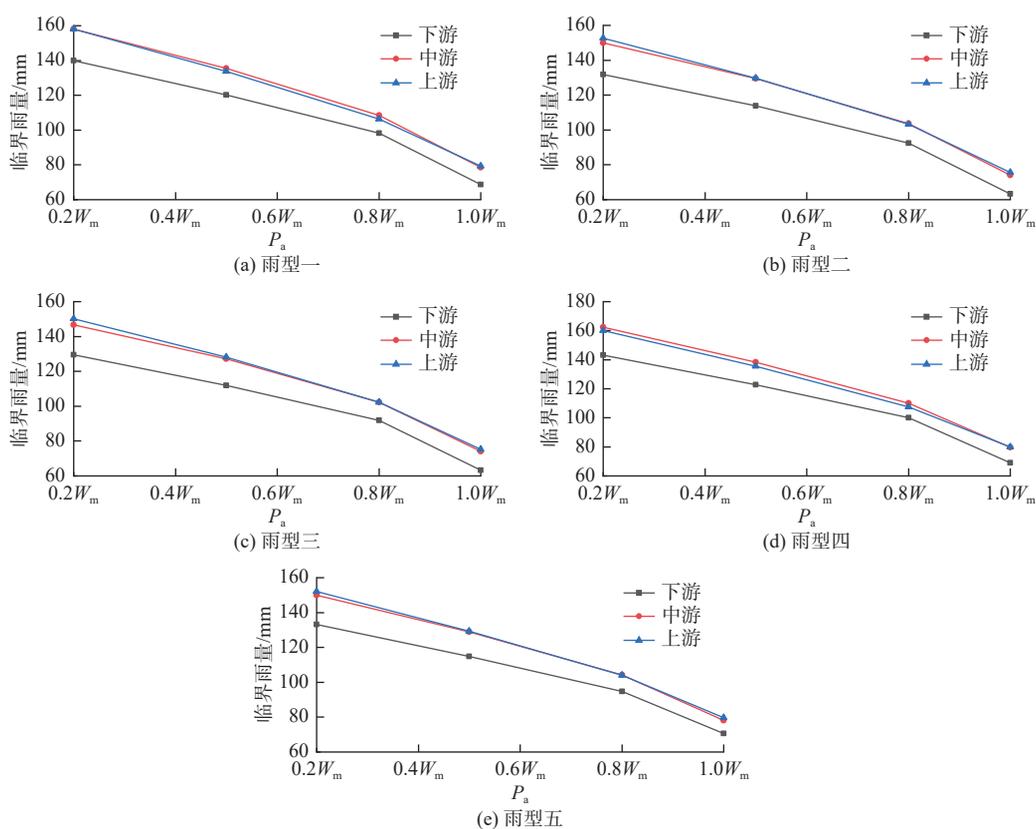


图 4 不同降雨空间分布下临界雨量变化

Fig. 4 Variation in critical rainfall under different rainfall spatial distributions

最后给出 4 种不同前期影响雨量下, 5 种随机雨型不同空间分布下的临界雨量区间: 当 $P_a=0.2W_m$ 时, 临界雨量区间为 129.5~162.4 mm; 当 $P_a=0.5W_m$ 时, 临界雨量区间为 111.9~138.4 mm; 当 $P_a=0.8W_m$ 时, 临界雨量区间为 91.9~110.0 mm; 当 $P_a=1.0W_m$ 时, 临界雨量区间为 63.2~79.8 mm。

4 结论与展望

本研究基于随机雨型计算了彭坊流域不同雨型集、不同初始土湿组合条件下 6 h 临界雨量, 同时基于降雨空间分布分别计算了彭坊流域降雨集中在上、中和下游时不同雨型、不同初始土湿组合条件

图 4。当降雨集中在下游时, 受到流域的调蓄作用小, 临界雨量值最小, 越容易达到警戒流量。当降雨集中在上游和中游时, 临界雨量之间的变化规律并不明显, 这可能是由于流域面积偏小, 且中上游雨量站点相对偏少, 简单以站点雨量的不同代表降雨空间分布不同时产生较大误差。同时, 分析图表可知降雨空间分布对临界雨量的影响小于前期影响雨量的影响, 且随着前期影响雨量的增加, 降雨空间分布对临界雨量的影响不断减小。

下 6 h 临界雨量, 得到以下结论:

在雨峰位置偏后的雨型集和雨峰峰值较大的雨型集下, 临界雨量波动较大, 致灾情景多变, 有较高的不确定性。

雨型对临界雨量的影响小于前期影响雨量对临界雨量的影响。在前期土壤较干燥时, 雨峰位置系数较小, 临界雨量值相对较大; 在前期土壤湿润时, 临界雨量随着雨峰位置的变化减小。当雨型峰值比较较大时, 临界雨量值相对较小, 更容易致灾。

在降雨空间分布上, 当降雨集中在下游时, 临界雨量值最小, 越容易达到警戒流量, 但降雨空间分布对临界雨量的影响小于前期影响雨量的影响, 且

随着前期影响雨量的增加,降雨空间分布对临界雨量的影响不断减小。

基于随机雨型分析研究 6 h 临界雨量的变化,但仅仅对不同雨型集之间做了定性分析,后续可考虑扩大样本容量,构建基于雨峰位置和峰值倍比的临界雨量阈值空间。同时,对于部分小流域山洪预警,6 h 临界雨量过于滞后。因此,在考虑雨型对临界雨量的影响后,如何结合流域特性实现预警随时间的连续动态变化值得后续进一步探讨。

参考文献:

- [1] 马细霞,王慧丽,程旭,等. 基于降雨时空不确定性的山洪灾害三级预警模式[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 297-307. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0031.
- [2] 周琳,邹振华,章光,等. 基于“情景-应对”的随县柳林镇“8·12”山洪灾害推演[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(1): 14-23. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.01.002.
- [3] 郝思佳,王文川,马强,等. 基于水文水动力模型的山洪灾害复盘策略:以河南王宗店村“7·20”山洪为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(6): 1-11. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.06.001.
- [4] HAPUARACHCHI H A P, WANG Q J, PAGANO T C. A review of advances in flash flood forecasting[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(18): 2771-2784. DOI: 10.1002/hyp.8040.
- [5] 徐少军,江炎生,毛北平,等. 基于降雨径流关系曲线插值法的山洪临界雨量计算[J]. *中国防汛抗旱*, 2015, 25(6): 30-35. DOI: 10.16867/j.cnki.cfdm.2015.06.010.
- [6] 江锦红,邵利萍. 基于降雨观测资料的山洪预警标准[J]. *水利学报*, 2010, 41(4): 458-463. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.04.003.
- [7] 张大伟,权锦,马建明,等. 基于Godunov格式的流域地表径流二维数值模拟[J]. *水利学报*, 2018, 49(7): 787-794, 802. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180388.
- [8] 刘艳辉,董力豪,黄俊宝,等. 基于RF和概率分级的滑坡临界降水阈值的确定方法[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(10): 177-185. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.10.014.
- [9] 刘志雨,杨大文,胡健伟. 基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应用[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 317-321. DOI: CNKI:SUN:BSDZ.0.2010-03-014.
- [10] 叶金印,李致家,常露. 基于动态临界雨量的山洪预警方法研究与应用[J]. *气象*, 2014, 40(1): 101-107. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.012.
- [11] 陈瑜彬,杨文发,许银山. 不同土壤含水量的动态临界雨量拟定方法研究[J]. *人民长江*, 2015, 46(12): 21-26. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.12.006.
- [12] 陈宏新,江善虎,李国芳,等. 基于临界雨量推求复合预警指标的方法及应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 46-53. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0083.
- [13] 刘淑雅,江善虎,任立良,等. 基于分布式水文模型的山洪预警临界雨量计算[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(5): 384-390. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2017.05.002.
- [14] 张平. 考虑降雨不确定性的南欧江乏资料地区洪水预报方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [15] 张李川. 小流域雨型对山洪灾害临界雨量的影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [16] ZHAO B, DAI Q, HAN D, et al. Antecedent wetness and rainfall information in landslide threshold definition[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2019, 150: 1-26. DOI: 10.5194/hess-2019-150.
- [17] ZHAO B, DAI Q, HAN D, et al. Probabilistic thresholds for landslides warning by integrating soil moisture conditions with rainfall thresholds[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 276-287. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.04.062.
- [18] 原文林,宋汉振,刘美琪. 基于随机雨型的山洪灾害预警模式[J]. *水科学进展*, 2019, 30(4): 515-527. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.04.007.
- [19] 翟晓燕,郭良,刘荣华,等. 前期土壤湿度和降雨对小流域山洪预警指标的影响评估[J]. *地理研究*, 2019, 38(12): 2957-2965. DOI: 10.11821/dlyj020181338.
- [20] 闫宝伟,刘昱,江慧宁,等. 考虑降雨空间异质性的动态临界雨量预警指标推求[J]. *水利学报*, 2020, 51(3): 342-348. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200024.
- [21] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等. 北京地区降水极值时空演变特征[J]. *水科学进展*, 2017, 28(2): 161-173. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.02.001.
- [22] 舒章康,汪琳,金君良,等. TIGGE多模式降水预报产品检验与集成研究[J]. *水利水运工程学报*, 2021(2): 10-19. DOI: 10.12170/20210105004.
- [23] 余敦先,夏军,张永勇,等. 近50年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1200-1210. DOI: 10.11821/xb201109005.
- [24] 段春青,陈晓楠,许新勇,等. 基于SPEI和信息扩散加权一阶局域法的旱涝特征分析[J]. *人民黄河*, 2022, 44(9): 149-154. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.09.027.
- [25] 李青,王雅莉,李海辰,等. 基于洪峰模数的山洪灾害雨量预警指标研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(12): 1643-1652. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.01643.
- [26] 程旭. 缺资料小流域山洪灾害动态预警方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022. DOI: 10.27466/d.cnki.gzzdu.2022.000523

Critical rainfall for flash flood warning based on rainfall uncertainty

WANG Yuanjiang^{1,2}, JIANG Shanhu^{1,2}, LING Zihan², CHEN Hongxin³, ZHANG Xiaoxiang², REN Liliang^{1,2}

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Nanjing Nanrui Electric Technology Co., Ltd, Nanjing 211000, China*)

Abstract: Mountain flood disasters generally refer to floods, landslides, and debris flows hazards caused by rainfall and snowmelt. They are characterized by their suddenness and devastating impact. Critical rainfall is a commonly used indicator for mountain flood disaster early warning, indicating that when the rainfall reaches a certain threshold within a certain period, the flow at the outlet of the watershed will exceed the warning flow, resulting in disastrous flooding. These disasters have caused severe social problems. It poses a significant threat to people's lives and property. So optimizing mountain flood early warning and addressing the shortcomings in flood control and disaster reduction are crucial steps in social development. Critical rainfall, as the most commonly used indicator for mountain flood early warning, has been studied by numerous scholars both domestically and internationally. However, there is limited research on the comprehensive consideration of the influence of random rainfall patterns and spatial distribution under different antecedent rainfall conditions on the critical rainfall for mountain flood early warning.

To address these issues, the Pengfang small watershed is focused on as the research area and random rainfall patterns are generated, based on control conditions such as probability distribution functions. Based on the historical rainfall data from the Pengfang small watershed, the optimal distribution functions for the five sets of random rainfall patterns were as follows: Normal, Normal, Exponential, Normal, Exponential and Gamma distributions. The control conditions for these distribution functions were (0.50, 0.32), (0.50, 0.42), (0.50, 0.52), (0.17, 0.32), and (0.83, 0.32) respectively. The influence of different sets of random rainfall patterns is explored, considering different antecedent rainfall conditions, on the 6-hour critical rainfall for mountain flood early warning. Furthermore, the impact of rainfall spatial distribution on the 6-hour critical rainfall is also analyzed.

The results are as follows: (1) Under rainfall patterns with a later peak position and larger peak values, critical rainfall exhibits significant fluctuations, leading to diverse disaster scenarios with higher uncertainty. (2) The influence of rainfall patterns on critical rainfall is smaller compared to the influence of antecedent rainfall. When the soil is relatively dry in the antecedent period and the coefficient of the peak position of the rainfall pattern is small, the critical rainfall value is relatively large. The change in the peak position has a smaller effect on the critical rainfall when the soil is moist in the antecedent period. While the peak value ratio of the rainfall pattern is larger, the critical rainfall value is relatively small, indicating a higher likelihood of causing mountain flood disasters. (3) In terms of rainfall spatial distribution, the rainfall is concentrated downstream, and the critical rainfall value is the smallest, indicating a higher likelihood of reaching the warning flow. However, the impact of rainfall spatial distribution on the critical rainfall is less significant compared to the impact of antecedent precipitation. Furthermore, as antecedent precipitation increases, the impact of rainfall spatial distribution on the critical rainfall gradually diminishes.

The findings have significant implications for improving the accuracy of mountain flood disaster early warning and enhancing the early warning system. These research results can provide a scientific basis for the optimization and improvement of the mountain flood early warning system, aiming to better protect people's lives and properties and effectively respond to the challenges posed by mountain flood disasters.

Key words: flash flood; critical rainfall; antecedent rainfall; random rainfall pattern; rainfall spatial distribution