

王振亚,王迪,栗晗,等,2025. 基于模糊评价法的山洪灾害气象预警方法[J]. 气象,51(6):744-755. Wang Z Y, Wang D, Li H, et al, 2025. Meteorological early warning method of mountain torrent disaster based on fuzzy evaluation method[J]. Meteor Mon, 51(6):744-755(in Chinese).

基于模糊评价法的山洪灾害气象预警方法^{*}

王振亚^{1,2} 王 迪^{1,2} 栗 晗^{1,2} 张亚春^{1,2} 马蕴琦^{1,2} 葛振飞^{1,2}

1 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003

2 河南省气象台, 郑州 450003

提 要: 以考虑土壤含水量饱和度的动态临界雨量山洪预警为基础, 提出基于模糊评价法的山洪灾害气象预警方法。该方法根据新安江水文模型建立考虑土壤含水量饱和度的山洪灾害气象预警动态临界雨量指标, 利用模糊评价法构建山洪灾害气象预警等级和模糊评分的对应关系, 采用 CMA-MESO、CMA-SH9、CMA-BJ 模式及智能网格等降水预报作为输入, 计算山洪灾害气象预警等级及其模糊评分, 分别使用等权重平均及以确定性系数、洪峰流量相对误差构建的权重算法, 计算山洪灾害气象预警综合模糊评分, 根据上述对应关系判别气象预警等级。采用该方法对 2021 年 7 月 17—22 日安阳河横水水文站以上流域的山洪灾害进行应用检验, 结果表明基于模糊评价法的山洪灾害气象预警结果命中率与 CMA-BJ 模式相当, 高于其他模式; 漏报率和空报率与 CMA-BJ 模式相当, 低于其他模式; TS 评分均高于其他模式。与采用 CMA-MESO、CMA-SH9、CMA-BJ 模式及智能网格等单一降水预报作为降水输入判别的山洪灾害气象预警相比, 基于模糊评价法的山洪灾害气象预警方法结果较好, 能够延长预见期, 提高预警精度。

关键词: 山洪灾害, 气象预警, 动态临界雨量, 模糊评价法

中图分类号: P49, P339

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.111501

Meteorological Early Warning Method of Mountain Torrent Disaster Based on Fuzzy Evaluation Method

WANG Zhenya^{1,2} WANG Di^{1,2} LI Han^{1,2} ZHANG Yachun^{1,2}
MA Yunqi^{1,2} GE Zhenfei^{1,2}

1 CMA · Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: A meteorological early warning method for mountain torrent disasters is proposed using the fuzzy evaluation method in this paper. The method is based on the dynamic critical rainfall for mountain torrent early warning that considers soil water content saturation, then a correspondence between meteorological warning levels and fuzzy scores for mountain torrent disasters is established based on the fuzzy evaluation method. Equal weight averaging and weighting algorithms constructed based on the coefficient of determination or the relative error of peak flow are respectively adopted. With this method, together with the comprehensive fuzzy scores for meteorological warning calculated by using the precipitation forecasts from CMA-MESO, CMA-SH9, CMA-BJ and intelligent grid forecasting, the meteorological early warning level is determined. The results show that the hit rate of the meteorological early warning results based on the fuzzy evaluation method is comparable to that of the CMA-BJ and higher than other models, the miss rate

^{*} 2023 年度河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(232102320027)、中国气象局气象能力提升联合研究专项(22NLTSY005)和河南省 2021 年度国家超级计算郑州中心创新生态系统建设科技专项(201400210800)共同资助

2024 年 8 月 26 日收稿; 2024 年 12 月 8 日收修定稿

第一作者: 王振亚, 主要从事水文气象和水文模型研究. E-mail: hhuwzy1981@163.com

and false alarm rate are also comparable to those of the CMA-BJ and lower than other models, the TS scores are all higher than those of other models, through the application and verification of the mountain torrent disaster in Hengshui of Anyang River from 17 to 22 July 2021. This method can extend the lead time of mountain torrent prediction and improve the accuracy of early warning.

Key words: mountain torrent disaster, meteorological early warning, dynamic critical rainfall, fuzzy evaluation method

引言

山洪是山区中小流域由强降水引起的突发性洪水(Hall, 1981; WMO, 1994),其突发性强、防御难度大,极易造成巨大的人员伤亡和财产损失。我国山丘区面积大、人口多(刘淑雅等, 2017; 杨雨亭等, 2023),加剧了山区中小河流洪水灾害对我国经济财产和人民群众生命安全的威胁(陈国阶, 2006)。我国每年因山洪灾害死亡失踪人数占洪涝灾害死亡失踪人数的70%左右(杨雨亭等, 2023; 刘海知等, 2024)。特别是近年来,全球极端天气气候事件频发、强发(WMO, 2021; IPCC, 2021; 周佰铨和翟盘茂, 2023),导致山洪灾害性、极端性、致灾性更加明显,如青海大通“8·17”山洪灾害(马伟东等, 2023)、华北“23·7”强降水(刘雨彤等, 2023; 符娇兰等, 2023)、四川冕宁“6·26”山洪灾害(陈博宇等, 2023)、河南郑州“7·20”特大暴雨灾害(孙跃等, 2021; 张哲等, 2022; 杨浩等, 2022)、2017年6月18日北京门头沟山洪泥石流灾害(刘松楠等, 2021)。因此,山洪灾害气象预警是我国山丘区防灾减灾的重要任务(刘志雨, 2012)。

目前,常用的山洪灾害气象预警方法一般有基于临界雨量的预警方法,基于降水-径流的定量预报预警方法,基于上游河道水位监测的预报方法(杨雨亭等, 2023),其中临界雨量法是目前国内用于判断山洪灾害发生与否的最为常用的方法之一(刘淑雅等, 2017)。刘志雨等(2010)研究提出了以分布式模型为基础,以动态临界雨量为指标的山洪预警预报方法,并开展了应用试验;叶金印等(2014)以新安江模型为基础,基于最小均方差准则,建立不同时间尺度的动态临界雨量判别函数;刘淑雅等(2017)采用分布式新安江模型进行临界雨量试算,得出各流域不同初始土壤含水量、不同预警时段组合条件下临界雨量。上述研究结果表明基于临界雨量的山洪灾害气象风险预警方法具有较好的应用前景。

传统的山洪灾害预警方法多以观测的降水作为输入,其预见期较短。为了延长洪水预见期,越来越多的研究在洪水预报中引入定量降水预报(崔春光等, 2010; 王振亚和郑世林, 2014; 包红军等, 2016; 田济扬等, 2019; 包红军等, 2020)。目前,可供参考使用的数值预报产品较多,其对不同类型天气的预报性能差别较大(谭政华等, 2023),很多研究从获得精准的降水预报角度来提升山洪灾害气象预警的精准度,比如中央气象台基于定量降水估测、智能网格预报和集合预报发展了山洪灾害致灾气象风险阈值技术,基于EFI指数山洪灾害气象预警技术与GMKHM分布式水文模型等方法,提升了山洪灾害气象预警精度(包红军等, 2017; 2021)。

选取安阳河横水水文站以上集水面积为研究区域(以下简称横水站),利用新安江水文模型建立山洪灾害气象预警动态临界雨量指标,根据模糊评价法提出一种山洪灾害气象预警等级算法,为提高山洪气象预警精准度提供一种新思路。

1 流域概况和使用资料

1.1 流域概况

安阳是河南省山洪灾害风险概率较大、损失较严重地区之一,该地区山洪灾害以降水量为主导因素(朱恒楦和李虎星, 2019)。安阳河又名洹河,是海河流域漳卫河水系的第二大支流,全长约164 km,流域面积约1678.1 km²;安阳河流域属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均降水量在500~800 mm,60%~70%的降水量集中在7—9月;地势西高东低,山丘区向平原过渡地带短,洪水缺乏缓冲,且横水站以上的西部太行山区为暴雨中心,极易造成大的水灾。选取横水站以上流域为研究对象进行流域暴雨洪水过程模拟和临界雨量分析,采用数字高程模型(任立良和刘新仁, 2000)将研究区域划分为2个子流域(图1),分别为安阳河横水以上及桃园河子流域,

流域面积分别为 321.0 km² 和 249.7 km²。

1.2 使用资料

本研究选取 1976—2023 年横水站 13 场洪水(表 1)进行洪水模拟和临界雨量分析,使用资料包括降水实况、降水预报、蒸发量和流量等。由于在 2000 年以前研究流域内只有 1 个气象观测站,2000 年以后省级气象观测站开始建设。因此 2000 年以前的 7 场洪水采用水文观测资料进行洪水模拟,2000 年以后的洪水采用气象观测资料进行洪水模拟。2000 年以前降水实况、蒸发量和流量数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》,2000 年以后降水实

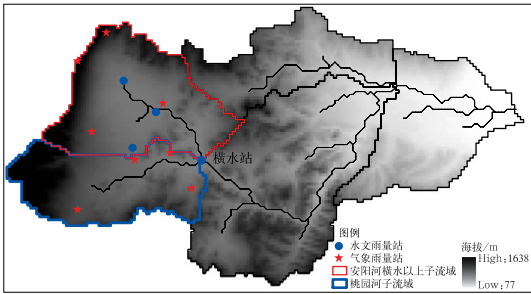


图 1 模拟的安阳河水系、子流域划分及雨量站分布
Fig.1 The simulated water system and sub-basin division of Anyang River and the distribution of rainfall stations

表 1 1976—2023 年横水站 13 场洪水模拟所使用的降水站和蒸发站资料
Table 1 Data of precipitation and evaporation stations used in 13 flood processes simulation in Hengshui Station from 1976 to 2023

序号	洪号	开始时间/BT	结束时间/BT	实测洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	雨量站数/个	蒸发站	资料类别
1	197607	1976 年 7 月 15 日 08 时	1976 年 7 月 25 日 08 时	238	4	横水	水文
2	197707	1977 年 7 月 20 日 15 时	1977 年 8 月 5 日 20 时	122	4	横水	水文
3	197807	1978 年 7 月 20 日 08 时	1978 年 8 月 1 日 20 时	204	4	横水	水文
4	198208	1982 年 7 月 20 日 08 时	1982 年 8 月 19 日 20 时	680	4	横水	水文
5	198808	1988 年 8 月 5 日 09 时	1988 年 8 月 20 日 08 时	282	4	横水	水文
6	198907	1989 年 7 月 22 日 08 时	1989 年 7 月 26 日 08 时	255	4	横水	水文
7	199608	1996 年 8 月 1 日 08 时	1996 年 8 月 1 日 20 时	1140	4	横水	水文
8	201607	2016 年 7 月 18 日 08 时	2016 年 7 月 20 日 20 时	591	7	林州	气象
9	20210711	2021 年 7 月 10 日 08 时	2021 年 7 月 13 日 08 时	134	8	林州	气象
10	20210720	2021 年 7 月 17 日 08 时	2021 年 7 月 31 日 08 时	603	8	林州	气象
11	202109	2021 年 9 月 22 日 08 时	2021 年 9 月 30 日 08 时	128	8	林州	气象
12	202207	2022 年 7 月 4 日 08 时	2022 年 7 月 7 日 08 时	162	8	林州	气象
13	202307	2023 年 7 月 27 日 08 时	2023 年 7 月 31 日 08 时	190	8	林州	气象

况、蒸发量资料来源于全国综合气象信息共享平台,降水预报下载于中国气象局业务内网,流量资料来源于气象水文资料共享。全文均为北京时。

2 研究方法

2.1 新安江模型

新安江模型(林三益,2001)是一个松散性、概念性降水径流模型,被广泛地应用于湿润和半湿润地区的水文预报与水文过程模拟(叶金印等,2014),因此本研究采用新安江模型进行洪水模拟。该模型把全流域分成若干个单元流域,对每个单元流域基于蓄满产流机制分别作产汇流计算,得出各单元流域的出口流量过程,横水站位于两个子流域出口附近,所以不考虑河道汇流,将坡地汇流在流域出口进行

叠加,即得到整个流域的出流过程,坡地汇流采用经验单位线。

土壤含水量饱和度可由新安江模型的蒸散发模块进行输出。新安江模型蒸散发模块将土壤分为上层、下层和深层,土壤含水量也做相应划分。对于特定流域来说,土壤含水量的最大值即为土壤张力水容量。土壤含水量饱和度为上层、下层和深层土壤含水量之和与土壤张力水容量的比值。

2.2 动态临界雨量确定方法

2.2.1 预警时段选定方法

对某一个流域来说,流域降水中心位置、降水强度及下垫面因子等均会对预警时段产生影响。流域汇流时间理论上为预警的最长时段,但在实际预警中会根据情况做适当调整。选取流域典型暴雨-洪水过程分析流域汇流时间,可以近似将流域最大降

水强度出现时刻到洪峰出现时刻之间的时间视为流域汇流时间,依据汇流时间来确定预警时间。经分析,表 1 的 13 场洪水流域汇流时间在 4~12 h,横水站集水面积暴雨响应时间近似为其平均值(8 h),综合上述情况结合气象预报时效,将预警时段确定为 6 h 和 12 h。

2.2.2 预警流量确定方法

研究根据横水站大断面确定上滩水位,采用实测的水位流量关系计算上滩水位对应的流量(刘淑雅等,2017)。按照《水情预警信号》(中华人民共和国水利部,2018)和《水文情报预报规范》(中华人民共和国水利部,2009),采用重现期指标,结合上滩流量,确定 5 年重现期流量、上滩流量、20 年重现期流量和 50 年重现期流量分别为蓝色预警、黄色预警、橙色预警和红色预警的阈值,其值分别为 102.1、205.6、517.0 和 916.9 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2.3 临界雨量确定方法

以 6 h 雨量为例说明山洪灾害蓝色气象预警临界雨量的计算过程,其他气象预警等级临界阈值计算过程以此类推。

(1)以确定性系数、径流深相对误差、洪现时差和洪峰流量相对误差作为评价洪水预报精度的项

目,选取预报精度在乙等以上的洪水作为临界雨量计算的历史洪水(表 2)。如果洪水模拟的洪峰流量比实测小,说明要达到预警阈值需要更大的降水量,所以将其流量预警阈值做等比例缩小以防预警漏报。

(2)由于北方地区超警的洪水场次较少,本研究将模拟精度评价在乙等以上的洪水模拟结果看成能够反映真实的洪水过程,针对每场选择的历史洪水,对降水输入进行等比例放大或者缩小,且反复试算,直到模拟的洪峰流量刚超过蓝色预警阈值,从而构建超警的洪水数据集。

(3)将模拟的洪峰流量作为超警分类,其前 1 个时次的流量作为未超警分类,超警分类对应的是最大 6 h 累计雨量和土壤含水量饱和度组合,未超警分类对应的组合则在超警分类对应组合的基础上向前推 1 个时次。

(4)采用最小均方差准则 W-H (Windrow-Hoff)算法(孙即祥,2002),对步骤(3)中的二类问题进行线性划分,建立动态临界雨量与土壤含水量饱和度的线性关系模型,以此作为山洪灾害气象预警动态临界雨量判别函数。

表 2 预报项目精度等级表

Table 2 Accuracy level table of forecast projects

预报精度	甲	乙	丙
合格率(QR)/%	$QR \geq 85.0$	$70.0 \leq QR < 85.0$	$60.0 \leq QR < 70.0$
确定性系数(DC)	$DC > 0.90$	$0.70 \leq DC < 0.90$	$0.50 \leq DC < 0.70$

2.3 基于模糊评价法的山洪灾害气象预警等级确定

模糊评价法是一种基于模糊数据的综合评价方法,根据模糊数学的隶属度理论将定性评价转化为定量评价,具有结果清晰、系统性强的特点。本研究使用模糊评价法构建山洪灾害气象预警等级确定方法,确定方法步骤如下:

(1)确定山洪灾害气象预警为评价因素。根据预警等级将评价因素分为无预警、蓝色预警、黄色预警、橙色预警和红色预警 5 类。

(2)采用百分制确定评价因素的评价值。每类评价因素的评价值分别为 1~20 分(无预警)、21~40 分(蓝色预警)、41~60 分(黄色预警)、61~80 分(橙色预警)、81~100 分(红色预警)。

(3)计算每个模式降水预报判别的山洪灾害气象预警的模糊评分。由于山洪灾害红色气象预警为

最高等级,从防灾减灾的角度考虑,增加红色等级的分值比重,将其直接赋分为 100。其他山洪灾害气象预警等级通过式(1)计算,第 j 个模式判别山洪灾害气象预警等级为 i 级的模糊评分为 $MP(j)$:

$$MP(j) = MP_{\min}(i) + 19 \times \frac{P_j - O_i}{O_{i+1} - O_i} \quad (1)$$

式中: $MP_{\min}(i)$ 为第 i 等级山洪灾害气象预警模糊评分的最小值; P_j 为第 j 个模式的预报雨量; O_i 为第 i 等级的动态临界雨量阈值, O_{i+1} 为第 $i+1$ 等级的动态临界雨量阈值,单位:mm。

(4)计算山洪灾害气象预警的综合模糊评分 MP :

$$MP = \sum_{j=1}^N MP(j) \times W_j \quad (2)$$

式中: W_j 为评价因素的权重, N 为模式的个数。

(5)权重 W_j 采用以下三种方式进行确定,第一

种为等权重平均;第二种方法[式(3)]和第三种方法[式(4)]的权重构建方法为:分别将上 1 个时段多模式降水预报作为输入进行洪水预报,以评估洪水预报精度的确定性系数[式(5)]和洪峰流量相对误差[式(6)]来构建权重计算方法。

$$W_j = \frac{1/(1-DC_j)}{\sum_{j=1}^N 1/(1-DC_j)} \quad (3)$$

$$W_j = \frac{1/|RE_j|}{\sum_{j=1}^N 1/|RE_j|} \quad (4)$$

式中: DC_j 表示确定性系数, $|RE_j|$ 为洪峰流量相对误差的绝对值。

$$DC = 1 - \frac{\sum_{k=1}^m [y_c(k) - y_0(k)]^2}{\sum_{k=1}^m [y_0(k) - \bar{y}_0]^2} \quad (5)$$

$$RE = \frac{y_c - y_0}{y_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: y_c 为预报值, y_0 为实测值, $\bar{y}_0$ 为实测值的均值, m 为实测流量总数。

(6)将计算的山洪灾害气象预警的综合模糊评分与步骤(2)中每类评价因素的评价值进行比较,判别出山洪灾害气象预警等级。

2.4 山洪灾害气象预警检验方法

山洪灾害气象预警准确率采用命中率、漏报率、空报率和 TS 评分表示。如果山洪灾害气象预警等级为蓝色以上,在预报时段内山洪灾害气象预警等级大于等于以流量判别的预警等级,记为 1 次命中;

小于则记为 1 次漏报;以流量判别的预警等级为无,则记为 1 次空报。如果出现了山洪灾害,预报时段内未发出风险预警,也记为一次漏报。当预警等级为蓝色以上时,山洪灾害气象预警等级等于以流量判别的预警等级,记为 1 次准确预警。山洪灾害气象预警命中率 TSR、漏报率 PO、空报率 FAR 和 TS 评分分别如下:

$$TSR = \frac{NA + ND}{NA + NB + NC + ND} \times 100\% \quad (7)$$

$$PO = \frac{NC}{NA + NC} \times 100\% \quad (8)$$

$$FAR = \frac{NB}{NA + NB} \times 100\% \quad (9)$$

$$TS = \frac{NE}{NA + NB + NC + ND} \times 100\% \quad (10)$$

式中: NA 为预警命中次数, NB 为预警空报次数, NC 为预警漏报次数, ND 为无预警发布时预报正确次数, NE 为预警等级完全相同次数。

3 动态临界雨量确定

3.1 洪水过程模拟

采用新安江模型模拟 1976—2023 年横水站 13 场洪水过程(表 3),其中前 10 场洪水为率定期洪水,后 3 场洪水为验证期洪水。率定期内确定性系数有 7 场大于 0.7,预报精度为乙等及以上,合格率为 70%;径流深相对误差绝对值有 9 场小于等于 20%,合格率为 90%;洪现时差绝对值有 7 场小于等于 3 h,合格率为 70%;洪峰流量相对误差绝对值

表 3 1976—2023 年横水站 13 场洪水模拟结果

Table 3 Simulation results of 13 flood processes in Hengshui Station from 1976 to 2023

序号	确定性系数	径流深相对误差/%	洪现时差/h	模拟洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	实测洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰流量相对误差/%
1	0.92	1	2	227	238	-5
2	0.18	-19	-4	130	122	6
3	0.19	-28	-8	97	204	-52
4	0.72	-19	3	518	680	-24
5	0.10	-20	77	284	282	1
6	0.73	-4	3	296	255	16
7	0.97	1	1	1225	1140	7
8	0.80	13	-3	450	591	-24
9	0.77	16	0	147	134	10
10	0.92	20	-2	720	603	20
11	0.88	-4	1	151	128	18
12	0.82	2	4	159	162	-2
13	0.74	22	1	215	190	13

有 7 场小于等于 20%, 合格率为 70%。验证期内确定性系数全部介于 0.7~0.9, 预报精度为乙等, 合格率为 100%; 径流深相对误差有 2 场小于等于 20%, 合格率为 66.7%; 洪现时差有 2 场小于等于 3 h, 合格率为 66.7%; 洪峰流量相对误差全部小于等于 20%, 合格率为 100%。从模拟结果可以看出, 新安江模型在横水站洪水模拟效果较好, 具有较好的适用性。

3.2 临界雨量确定

选取 10 场模拟效果较好的洪水场次按照 2.2

节方法建立研究流域 6 h(图 2)和 12 h(图 3)山洪灾害各等级气象预警动态临界雨量阈值。分析动态临界雨量阈值判别函数, 动态临界雨量阈值与前期土壤含水量饱和度呈负相关, 前期土壤含水量饱和度越大, 则动态临界雨量阈值越小, 符合实际产流规律; 比较 6 h 和 12 h 的动态临界雨量阈值判别函数, 随着时间尺度的增大, 斜率绝对值变大, 说明时间尺度越大, 临界雨量阈值受前期土壤含水量饱和度的影响越显著, 与叶金印等(2014)的研究结果相符。

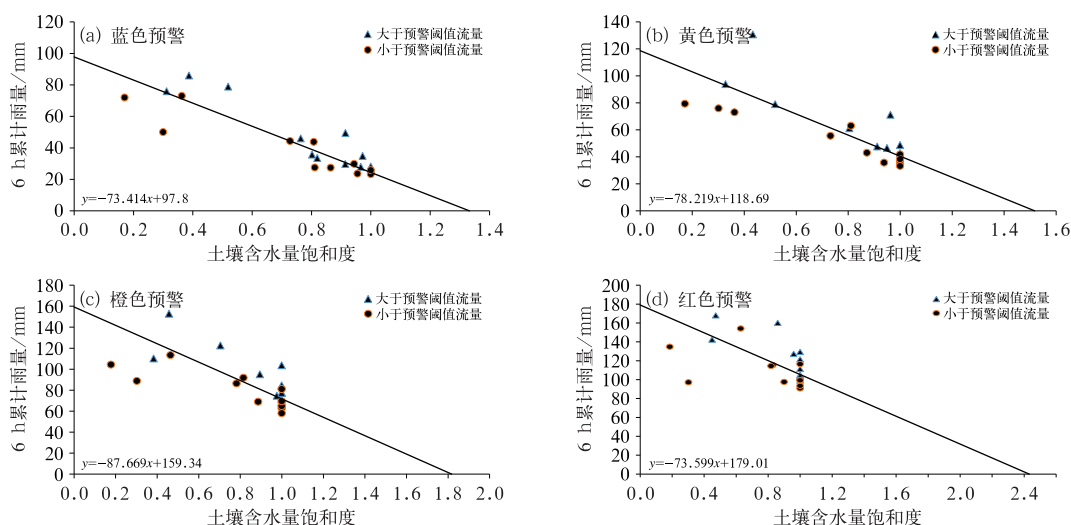


图 2 1976—2023 年横水站山洪灾害各等级气象预警的 6 h 动态临界雨量阈值

Fig. 2 Dynamic critical 6 h rainfall threshold of the various levels of meteorological early warning for mountain torrent disasters in Hengshui Station from 1976 to 2023

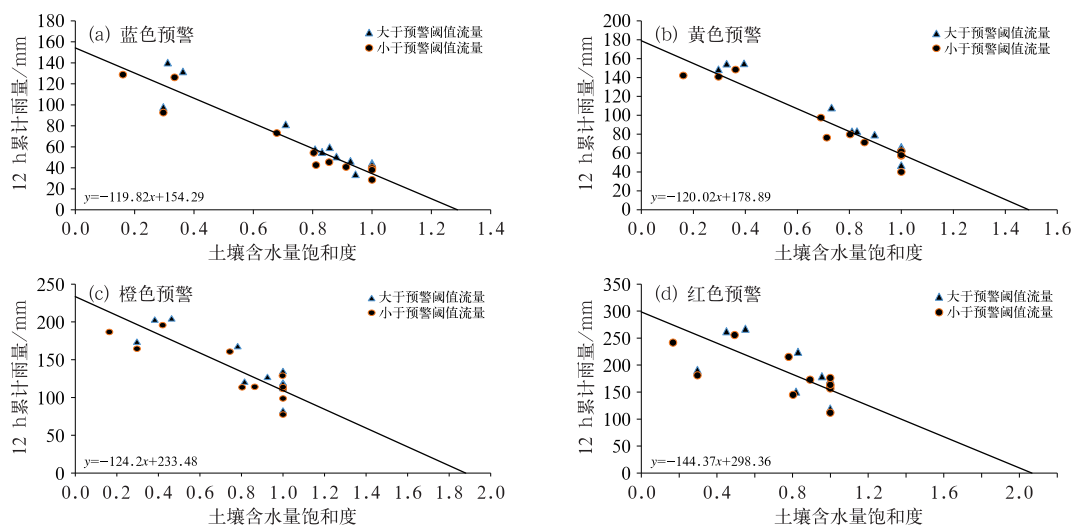


图 3 1976—2023 年横水站山洪灾害各等级气象预警的 12 h 动态临界雨量阈值

Fig. 3 Dynamic critical 12 h rainfall threshold of the various levels of meteorological early warning for mountain torrent disasters in Hengshui Station from 1976 to 2023

3.3 结果检验分析

由于横水站的洪水资料较少,仍采用表 1 的 13 场洪水进行检验分析。由于土壤含水量饱和度为模拟结果,采用洪峰流量出现前最近的 08 时或 20 时的土壤含水量饱和度计算临界雨量。将洪峰出现前最大 6 h 或 12 h 降水量与临界雨量比较判别山洪灾害气象预警等级,取 6 h 和 12 h 中较高的预警等级作为判别预警结果,与以洪峰流量判别的预警等级对比,验证预警临界雨量的合理性。

基于土壤含水量饱和度的 6 h 和 12 h 临界雨

量检验结果如表 4 所示。在 13 场洪水中,动态临界雨量和洪峰流量均判别出有预警等级的洪水有 11 场,其中等级相同的有 7 场,动态临界雨量的山洪灾害气象风险预警等级较低的有 1 场,较高的有 3 场;以动态临界雨量未判别出预警而以洪峰流量判别出山洪预警的有 2 场。从检验结果可以看出,预警命中的场次有 10 场,漏报的场次有 3 场,空报的场次有 0 场,完全准确的有 7 场,预警的命中率、漏报率、空报率和 TS 评分分别为 76.9%、23.1%、0% 和 53.8%,说明在横水站以上集水面积应用动态临界雨量进行山洪灾害气象预警是可行的。

表 4 1976—2023 年横水站基于土壤含水量饱和度的 6 h 和 12 h 临界雨量检验结果

Table 4 Validation of 6 h and 12 h critical rainfall based on soil moisture saturation in Hengshui Station from 1976 to 2023

序号	6 h 临界雨量/mm				12 h 临界雨量/mm				最大累计雨量/mm		预警结果	
	蓝色	黄色	橙色	红色	蓝色	黄色	橙色	红色	6 h	12 h	临界阈值	洪峰流量
1	28.2	44.6	76.2	109.3	40.7	65.1	115.8	161.5	60.6	110.6	黄色	黄色
2	36.9	53.8	86.6	117.9	54.8	79.3	130.4	178.5	26.4	26.8	无	蓝色
3	26.9	43.2	74.7	108.0	38.6	63.0	113.6	159.0	14.1	24.1	无	黄色
4	24.4	40.5	71.7	105.4	34.5	58.9	109.3	154.0	77.1	98.5	橙色	橙色
5	24.4	40.5	71.7	105.5	34.6	59.0	109.4	154.1	37.4	50	蓝色	黄色
6	63.2	81.8	118.0	144.3	97.8	122.3	175.0	230.3	94.9	175	橙色	黄色
7	80.8	100.6	139.0	161.9	126.5	151.1	204.7	264.9	185.7	323.2	红色	红色
8	25.7	41.9	73.3	106.8	36.7	61.1	111.6	156.7	80.21	141.9	橙色	橙色
9	76.0	95.5	133.3	157.2	118.7	143.3	196.6	255.5	80.2	141.9	蓝色	蓝色
10	24.4	40.5	71.7	105.4	34.5	58.9	109.3	154.0	104.3	141.6	橙色	橙色
11	24.4	40.5	71.7	105.4	34.5	58.9	109.3	154.0	35.2	53.9	蓝色	蓝色
12	38.9	56.0	89.0	120.0	58.2	82.6	133.9	182.6	61.9	72.2	黄色	蓝色
13	27.4	43.7	75.3	108.4	39.4	63.8	114.4	159.9	48.3	84.4	黄色	蓝色

4 基于模糊评价法的山洪灾害气象预警方法应用

选取 2021 年 7 月 17—22 日横水站洪水过程为研究对象,首先利用实况雨量分析预警提前量,然后利用 CMA-MESO、CMA-SH9、CMA-BJ 模式及智能网格降水预报产品每日 08 时或 20 时计算研究区域滚动 6 h 或者 12 h 雨量,最后基于模糊评价法判别山洪灾害气象预警等级。

4.1 水 情

2021 年 7 月 17—22 日横水站出现 2 次明显涨水过程(图 4)。19 日 16 时,横水站出现 $137\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的洪峰流量,超过蓝色山洪预警阈值,通过流量插值可以得出 19 日 14 时前后达到蓝色山洪预警阈值;第

二次涨水过程从 21 日 05 时开始,10 时前后达到蓝色山洪预警阈值,23 时流量为 $198\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,接近黄色山洪预警阈值,22 日 04 时流量为 $532\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,超过橙色山洪预警阈值,07 时左右出现 $607\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的洪峰流量。

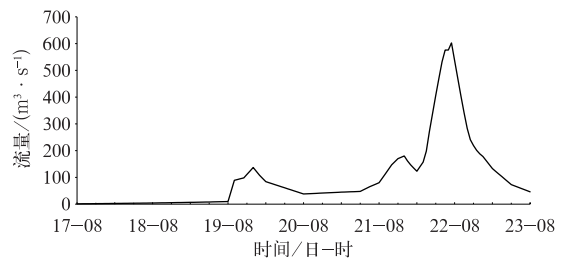


图 4 2021 年 7 月 17 日 08 时至 23 日 08 时横水站实测流量过程线

Fig. 4 Process curve line of flow observation in Hengshui Station from 08:00 BT 17 to 08:00 BT 23 July 2021

4.2 以实况雨量作为输入的山洪灾害气象预警结果分析

结合横水站 2021 年 7 月 18—22 日 6 h 和 12 h 滑动雨量和临界雨量(表 5)进行分析,针对第一次洪水过程,19 日 08 时之前的 6 h 和 12 h 最大累计雨量分别为 36.4 mm、49.7 mm,未超临界雨量,山洪预警结果为无;19 日 08—16 时,6 h 累计雨量只有 08 时大于临界雨量,其他时次小于临界雨量,12 h 最大累计雨量大于蓝色临界雨量小于黄色临界雨量,预警结果为蓝色,与流量预警结果相符,提前量为 8 h。

针对第二次洪水过程,21 日 03 时 6 h 和 12 h 累计雨量均大于蓝色临界雨量,预警结果为蓝色,提前量为 7 h;21 日 10 时 12 h 累计雨量大于黄色临界雨量,预警结果为黄色,提前量为 13 h,22 时 6 h 累计雨量大于黄色临界雨量,预警结果为黄色,提前量为 1 h;22 日 00 时 6 h 累计雨量大于橙色临界雨量,预警结果为橙色,提前量为 7 h,02 时 12 h 累计雨量大于橙色临界雨量,预警结果为橙色,提前量为 5 h;此后的累计雨量均小于红色临界雨量。上述分析结果表明采用不同预警时段的临界雨量判别出的山洪预警的级别和提前量不尽相同,所以基于临界阈值进行山洪预警时建议选择多个预警时段,以避免山洪灾害气象预警漏报和延长山洪预警预见期。

表 5 2021 年 7 月 18—22 日横水站基于土壤含水量饱和度的 6 h 和 12 h 临界雨量和最大累计雨量

Table 5 The 6 h and 12 h critical rainfall and maximum accumulated rainfall based on soil moisture saturation in Hengshui Station from 18 to 22 July 2021

时间/BT	土壤含水量饱和度	6 h 临界雨量/mm				6 h 最大累计雨量/mm	12 h 临界雨量/mm				12 h 最大累计雨量/mm
		蓝色	黄色	橙色	红色		蓝色	黄色	橙色	红色	
18 日 08 时	0.7200	44.9	62.4	96.2	126.0	17.3	68.0	92.5	144.1	194.4	22.0
18 日 20 时	0.7981	39.2	56.3	89.4	120.3	15.3	58.7	83.1	134.4	183.1	28.6
19 日 07 时	0.7981	39.2	56.3	89.4	120.3	36.4	58.7	83.1	134.4	183.1	49.7
19 日 08 时	0.9891	25.2	41.3	72.6	106.2	27.8	35.8	60.2	110.6	155.6	47.0
19 日 16 时	0.9891	25.2	41.3	72.6	106.2	24.4	35.8	60.2	110.6	155.6	59.8
19 日 20 时	0.9995	24.4	40.5	71.7	105.4	5.0	34.5	58.9	109.3	154.1	26.5
20 日 08 时	1	24.4	40.5	71.7	105.4	14.5	34.5	58.9	109.3	154.0	24.4
20 日 20 时	1	24.4	40.5	71.7	105.4	18.4	34.5	58.9	109.3	154.0	31.2
21 日 03 时	1	24.4	40.5	71.7	105.4	25.6	34.5	58.9	109.3	154.0	43.2
21 日 08 时	1	24.4	40.5	71.7	105.4	35.9	34.5	58.9	109.3	154.0	49.3
21 日 10 时	1	24.4	40.5	71.7	105.4	33.7	34.5	58.9	109.3	154.0	61.1
21 日 20 时	1	24.4	40.5	71.7	105.4	37.2	34.5	58.9	109.3	154.0	68.7
21 日 22 时	1	24.4	40.5	71.7	105.4	44.4	34.5	58.9	109.3	154.0	61.2
22 日 00 时	1	24.4	40.5	71.7	105.4	78.6	34.5	58.9	109.3	154.0	94.1
22 日 02 时	1	24.4	40.5	71.7	105.4	99.9	34.5	58.9	109.3	154.0	121.7
22 日 08 时	1	24.4	40.5	71.7	105.4	104.3	34.5	58.9	109.3	154.0	139.0

4.3 基于模糊评价法的山洪灾害气象预警结果分析

CMA-MESO、CMA-SH9、CMA-BJ 模式和智能网格降水预报的预报时效统一采用 36 h,各模式和基于模糊评价法判别的山洪灾害气象预警结果分别如表 6 和表 7 所示。

以确定性系数和洪峰流量相对误差构建的权重是以过去 24 h 洪水预报结果为基础进行计算,比如 2021 年 7 月 19 日 08 时起报的权重计算采用 18 日 08 时以各模式降水量为输入的洪水预报精度指标评估,所以前 2 个时次权重计算仍采用等权重平均。分别采用等权重平均及以确定性系数、洪峰流量相

对误差构建权重的方法,基于模糊评价法计算山洪灾害气象预警结果(表 7)。采用三种方式计算的综合模糊评分比较接近,且其判别的山洪预警级别均相同,所以计算综合模式评分时可以直接采用等权重平均,本研究采用等权重平均结果进行分析。

针对第一次洪水过程,分析 2021 年 7 月 18 日 08 时、20 时及 19 日 08 时 3 个起报时次,其中 18 日 20 时起报时次只分析前 24 h,19 日 08 时起报时次只分析前 12 h。18 日 08 时起报的预警级别均为无;20 时起报的预警级别 CMA-MESO 为黄色,高于流量预警级别,CMA-SH9 和基于模糊评价法的预警级别为蓝色,与流量预警级别相符,CMA-BJ 和

智能网格降水预报为无,低于流量预警级别;19 日 08 时起报的预警级别为无。分析降水实况可以看出,导致此次山洪的强降水时段主要集中在 19 日 01—05 时,累计雨量达 31.4 mm。结果分析表明,若考虑降水预报,18 日 20 时起报的时次对山洪预警参考性效果最好,CMA-SH9 和基于模糊评价法的预警级别为蓝色,与流量预警级别相符,其提前量可以达到 18 h,大于以实况雨量作为输入的山洪灾害气象预警提前量;19 日 08 时起报的预警结果说明预警时需要综合考虑实况和预报累计雨量情况。

针对第二次洪水过程,分析 2021 年 7 月 20 日 08 时、20 时及 21 日 08 时、20 时 4 个起报时次。20 日 08 时起报的预警级别显示 CMA-MESO 和智能网格降水预报为黄色,CMA-SH9 和基于模糊评价法的为橙色,CMA-BJ 为红色,均高于流量预警级别(21 日 20 时前以流量判别预警级别为蓝色);20 日 20 时起报的智能网格降水预报预警级别为黄色,低于流量预警级别,CMA-MESO、CMA-BJ 和基于模糊评价法的气象预警级别为橙色,与流量预警级别

相符,CMA-SH9 为红色,高于流量预警级别;21 日 08 时起报的预警级别 CMA-MESO 和 CMA-SH9 为黄色,低于流量预警级别,基于模糊评价法的预警级别为橙色,与流量预警级别相符,CMA-BJ 和智能网格降水预报为红色,高于流量预警级别;21 日 20 时起报的预警级别 CMA-MESO、CMA-SH9、智能网格降水预报和基于模糊评价法的预警级别为黄色,低于流量预警级别,CMA-BJ 为橙色,与流量预警级别相符。结果分析表明可以在 20 日 20 时发布山洪灾害橙色等级预警,其提前量可达 32 h,大于以实况雨量作为输入的山洪灾害气象预警提前量。

由山洪灾害气象预警结果结果检验(表 8)可见,基于模糊评价法采用多模式降水预报判别的气象预警命中率与 CMA-BJ 模式相当,高于其他模式,漏报率和空报率与 CMA-BJ 模式相当,低于其他模式,TS 评分均高于其他模式。综合来看,与采用单一降水预报结果判别的山洪灾害气象预警结果相比,基于模糊评价法的山洪灾害气象预警结果较好,能够延长预见期,提高预警精度。

表 6 2021 年 7 月 18—21 日横水站基于多源预报方法的降水预报的山洪灾害气象预警验证

Table 6 Verification of mountain torrent disaster meteorological early warning results based on the precipitation forecasts by multi-source forecasting methods in Hengshui Station from 18 to 21 July 2021

起报时间/BT	山洪灾害预警级别				流量预警级别
	CMA-MESO	CMA-SH9	CMA-BJ	智能网格	
18 日 08 时	无	无	无	无	蓝色
18 日 20 时	黄色	蓝色	无	无	蓝色
19 日 08 时	无	无	无	无	蓝色
19 日 20 时	蓝色	橙色	黄色	黄色	无
20 日 08 时	黄色	橙色	红色	黄色	蓝色
20 日 20 时	橙色	红色	橙色	黄色	橙色
21 日 08 时	黄色	黄色	红色	红色	橙色
21 日 20 时	黄色	黄色	橙色	黄色	橙色

表 7 2021 年 7 月 18—21 日横水站基于模糊评价法的山洪灾害气象预警验证

Table 7 Verification of mountain torrent disaster meteorological early warning results based on fuzzy evaluation methods in Hengshui Station from 18 to 21 July 2021

起报时间/BT	等权重平均		确定性系数构建的权重		洪峰流量相对误差构建的权重		流量预警级别
	综合模糊评分	模糊评价法预警级别	综合模糊评分	模糊评价法预警级别	综合模糊评分	模糊评价法预警级别	
18 日 08 时	10.8	无	10.8	无	10.8	无	蓝色
18 日 20 时	28.4	蓝色	28.4	蓝色	28.4	蓝色	蓝色
19 日 08 时	8.0	无	8.4	无	8.0	无	蓝色
19 日 20 时	45.7	黄色	43.4	黄色	42.9	黄色	无
20 日 08 时	71.2	橙色	71.0	橙色	71.1	橙色	蓝色
20 日 20 时	72.4	橙色	71.5	橙色	72.4	橙色	橙色
21 日 08 时	77.3	橙色	79.0	橙色	79.4	橙色	橙色
21 日 20 时	54.8	黄色	53.7	黄色	54.1	黄色	橙色

表 8 2021 年 7 月 18—21 日横水站山洪灾害气象预警结果检验(单位: %)
Table 8 Validation of mountain torrent disaster meteorological early warning results
in Hengshui Station from 18 to 21 July 2021 (unit: %)

气象预警判别方式	命中率	漏报率	空报率	TS 评分
CMA-MESO	37.5	57.1	25.0	12.5
CMA-SH9	37.5	57.1	25.0	12.5
CMA-BJ	50.0	42.9	20.0	25.0
智能网格	25.0	71.4	33.3	0.0
模糊评价法	50.0	42.9	20.0	37.5

5 结论与讨论

本文以考虑土壤含水量饱和度的动态临界雨量山洪预警为基础,构建基于模糊评价法的山洪灾害气象预警方法,采用该方法对 2021 年 7 月 17—22 日安阳河横水站以上流域的山洪灾害进行应用检验,结论如下:

(1)北方地区达到高级别预警的洪水场次较少,本文根据水文气象耦合模型模拟结果,针对模拟结果较好的历史洪水,对降水输入进行等比例的放大或者缩小,以模拟的洪峰流量刚超过山洪预警阈值为标准构建洪水过程集,为建立山洪灾害气象预警动态临界雨量指标提供支撑。

(2)基于动态临界雨量的山洪灾害气象预警方法在横水站以上集水面积的应用检验结果显示,预警的命中率、漏报率、空报率和 TS 评分分别为 76.9%、23.1%、0%和 53.8%,总体精度较高,表明该方法应用于山洪灾害气象预警是可行的,可以为其他小河流山洪灾害气象预警工作提供技术参考。

(3)本文采用 6 h 和 12 h 两个预警时段的临界雨量进行山洪灾害气象预警,其判别出的山洪预警的级别和提前量不尽相同,所以基于动态临界雨量进行山洪预警时建议选择多个预警时段,以避免山洪预警漏报和延长预警预见期。

(4)分别采用等权重平均及以确定性系数、洪峰流量相对误差构建权重的方法计算的综合模糊评分比较接近,且其判别的山洪预警级别均相同,所以计算综合模糊评分时可以直接采用等权重平均。

(5)本文采用模糊评价法构建基于多模式降水预报的山洪灾害气象预警算法,其预警命中率与 CMA-BJ 模式相当,高于其他模式,漏报率和空报率与 CMA-BJ 模式相当,低于其他模式,TS 评分均高

于其他模式。综合来看,与采用单一降水预报结果判别的山洪灾害气象预警结果相比,基于模糊评价法的山洪灾害气象预警结果较好,能够延长预见期,提高预警精度,为山洪灾害气象预警业务提供客观化的科学支撑。该研究成果为我国小流域山洪灾害气象预警业务提供了一种新的思路。

参考文献

包红军,李致家,王莉莉,等,2017. 基于分布式水文模型的小流域山洪预报方法与应用[J]. 暴雨灾害,36(2):156-163. Bao H J, Li Z J, Wang L L, et al, 2017. Flash flood forecasting method based on distributed hydrological models in a small basin and its application[J]. Torr Rain Dis, 36(2):156-163(in Chinese).

包红军,林建,曹爽,等,2020. 基于流域地貌的中小河流致洪动态临界雨量阈值研究[J]. 气象,46(11):1495-1507. Bao H J, Lin J, Cao S, et al, 2020. Topography-based dynamic critical area-rainfall threshold for small to middle-sized river flood warning [J]. Meteor Mon, 46(11):1495-1507(in Chinese).

包红军,王莉莉,沈学顺,等,2016. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. 气象,42(9):1045-1057. Bao H J, Wang L L, Shen X S, et al, 2016. A review: advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology[J]. Meteor Mon, 42(9):1045-1057(in Chinese).

包红军,张恒德,许风雯,等,2021. 国家级水文气象预报业务技术进展与挑战[J]. 气象,47(6):671-684. Bao H J, Zhang H D, Xu F W, et al, 2021. Progress and challenge of national level operational technology for hydrometeorological forecasting[J]. Meteor Mon, 47(6):671-684(in Chinese).

陈博宇,谌芸,孙继松,等,2023. 诱发四川冕宁“6·26”山洪灾害的突发性暴雨特征及其形成机制[J]. 大气科学,47(1):1-19. Chen B Y, Chen Y, Sun J S, et al, 2023. Characteristics and formation mechanism of the sudden rainstorm inducing the “6·26” mountain torrent disaster in Mianning, Sichuan Province[J]. Chin J Atmos Sci, 47(1):1-19(in Chinese).

陈国阶,2006. 中国山区发展研究的态势与主要研究任务[J]. 山地学报,24(5):531-538. Chen G J, 2006. The trend and main task of study on the development of mountain areas in China [J]. Mountain Res, 24(5):531-538(in Chinese).

- 崔春光,彭涛,沈铁元,等,2010. 定量降水预报与水文模型耦合的中小流域汛期洪水预报试验[J]. 气象,36(12):56-61. Cui C G, Peng T, Shen T Y, et al, 2010. The flood forecast test on QPF coupling with hydrological model in flood season in medium and small catchment[J]. Meteor Mon, 36(12):56-61(in Chinese).
- 符娇兰,权婉晴,麦子,等,2023. “23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J]. 气象,49(12):1435-1450. Fu J L, Quan W Q, Mai Z, et al, 2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12):1435-1450(in Chinese).
- 林三益,2001. 水文预报[M]. 北京:中国水利水电出版社. Lin S Y, 2001. Hydrologic Forecasting[M]. Beijing: China Water & Power Press(in Chinese).
- 刘海知,徐辉,包红军,等,2024. 基于数据驱动的山区暴雨山洪水沙灾害易发区早期识别方法研究[J]. 气象学报,82(2):257-273. Liu H Z, Xu H, Bao H J, et al, 2024. Early recognition of the mountainous areas susceptible to flash flood and sediment disasters during rainstorms: data-driven methods[J]. Acta Meteor Sin, 82(2):257-273(in Chinese).
- 刘淑雅,江善虎,任立良,等,2017. 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),45(5):384-390. Liu S Y, Jiang S H, Ren L L, et al, 2017. Calculation of critical rainfall for early-warning of mountain flood based on distributed hydrological model[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 45(5):384-390(in Chinese).
- 刘松楠,汪君,王会军,2021. 多源降水在门头沟山洪模拟中的应用及比较[J]. 气象,47(7):817-829. Liu S N, Wang J, Wang H J, 2021. Application and comparison of multi-source rainfall data in the simulation of flash flood in Mentougou of Beijing[J]. Meteor Mon, 47(7):817-829(in Chinese).
- 刘雨彤,梁世强,刘艳,等,2023. “23·7”特大暴雨洪水北京山洪灾害风险预报复盘分析[J]. 北京水务, (6):22-26. Liu Y T, Liang S Q, Liu Y, et al, 2023. “23·7” extremely heavy rainstorm flood: a review of Beijing mountain flood disaster risk forecast[J]. Beijing Water, (6):22-26(in Chinese).
- 刘志雨,2012. 山洪预警预报技术研究与应[用]. 中国防汛抗旱, 22(2):41-45, 50. Liu Z Y, 2012. Research and application of mountain flood warning and forecasting technology[J]. China Flood Drought Manag, 22(2):41-45, 50(in Chinese).
- 刘志雨,杨大文,胡健伟,2010. 基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应[用]. 北京师范大学学报(自然科学版), 46(3):317-321. Liu Z Y, Yang D W, Hu J W, 2010. Dynamic critical rainfall-based torrential flood early warning for medium-small rivers[J]. J Beijing Norm Univ (Nat Sci), 46(3):317-321(in Chinese).
- 马伟东,费杜秋,刘峰贵,等,2023. 基于灾害系统理论的青海大通“8·17”山洪灾害成因分析[J]. 人民黄河, 45(12):41-46. Ma W D, Fei D Q, Liu F G, et al, 2023. Analysis of the causes of the Datong August 17 mountain flood disaster in Qinghai Province based on disaster system theory[J]. Yellow River, 45(12):41-46(in Chinese).
- 任立良,刘新仁,2000. 数字时代水文模拟技术的变革[J]. 河海大学学报(自然科学版), 28(5):1-6. Ren L L, Liu X R, 2000. Transformation of hydrological modeling techniques in the digital era[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 28(5):1-6(in Chinese).
- 孙即祥,2002. 现代模式识别[M]. 长沙:国防科技大学出版社. Sun J X, 2002. Information Analyzing Mathematics[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press(in Chinese).
- 孙跃,肖辉,杨慧玲,等,2021. 基于遥感数据光流场的2021年郑州“7·20”特大暴雨动力条件和水凝物输送特征分析[J]. 大气科学, 45(6):1384-1399. Sun Y, Xiao H, Yang H L, et al, 2021. Analysis of dynamic conditions and hydrometeor transport of Zhengzhou superheavy rainfall event on 20 July 2021 based on optical flow field of remote sensing data[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6):1384-1399(in Chinese).
- 谭政华,陆忠艳,林海峰,等,2023. 2020年辽宁省汛期多模式降水预报评估[J]. 气象与环境学报, 39(1):10-16. Tan Z H, Lu Z Y, Lin H F, et al, 2023. Verification for precipitation forecasted by NWP models in Liaoning Province during the summer of 2020[J]. J Meteor Environ, 39(1):10-16(in Chinese).
- 田济扬,刘佳,严登华,等,2019. 双校正模式下的大清河流域陆气耦合洪水预报研究[J]. 水文, 39(3):1-7, 57. Tian J Y, Liu J, Yan D H, et al, 2019. Flood forecast in using a coupled atmospheric-hydrologic modeling system with dual correction models in Daqinghe Basin[J]. J China Hydrol, 39(3):1-7, 57(in Chinese).
- 王振亚,郑世林,2014. 气象水文模型耦合在黄河三花间洪水预报中的应用[J]. 气象与环境科学, 37(2):8-13. Wang Z Y, Zheng S L, 2014. Application of the meteorological and hydrological models coupling in the flood forecasting in Sanmenxia-Huayankou Reach of the Yellow River[J]. Meteor Environ Sci, 37(2):8-13(in Chinese).
- 杨浩,周文,汪小康,等,2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象, 48(5):571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):571-579(in Chinese).
- 杨雨亭,杨大文,韩俊太,等,2023. 小流域山洪灾害风险预警方法与应用[M]. 北京:科学出版社. Yang Y T, Yang D W, Han J T, et al, 2023. Risk Warning Methods and Applications for Small Watershed Flood Disasters[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 叶金印,李致家,常露,2014. 基于动态临界雨量的山洪预警方法研究与应用[J]. 气象, 40(1):101-107. Ye J Y, Li Z J, Chang L, 2014. Research and application of flash flood early warning method based on dynamic critical precipitation[J]. Meteor Mon, 40(1):101-107(in Chinese).
- 张哲,戚友存,李东欢,等,2022. 2021年郑州“7·20”极端暴雨雨滴

- 谱特征及其对雷达定量降水估测的影响[J]. 大气科学, 46(4): 1002-1016. Zhang Z, Qi Y C, Li D H, et al, 2022. Raindrop size distribution characteristics of the extreme rainstorm event in Zhengzhou 20 July, 2021 and its impacts on radar quantitative precipitation estimation[J]. Chin J Atmos Sci, 46(4): 1002-1016 (in Chinese).
- 中华人民共和国水利部, 2009. 水文情报预报规范: GB/T 22482—2008[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2009. Standard for hydrological information and hydrological forecasting: GB/T 22482 — 2008[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- 中华人民共和国水利部, 2018. 水情预警信号: SL 758—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2018. Signals for hydrologic information warning: SL 758 — 2018 [S]. Beijing: China Water & Power Press(in Chinese).
- 周佰铨, 翟盘茂, 2023. 未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J]. 气象, 49(3): 257-266. Zhou B Q, Zhai P M, 2023. The future projections of extreme weather, climate and water events and strategic responses[J]. Meteor Mon, 49(3): 257-266(in Chinese).
- 朱恒楙, 李虎星, 2019. 河南省历史山洪灾害分布特征研究[J]. 中国防汛抗旱, 29(6): 40-45. Zhu H K, Li H X, 2019. Study on the distribution characteristics of historical flash floods in Henan Province[J]. China Flood Drought Manag, 29(6): 40-45(in Chinese).
- Hall A J, 1981. Flash flood forecasting, operational hydrology report No. 18[R]. Geneva: WMO.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: the Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- WMO, 1994. Guide for hydrological practices[R]. Geneva: WMO.
- WMO, 2021. State of the Global Climate 2020[R]. Geneva: WMO.

(本文责编: 何晓欢)