

同频率法校正的缺资料中小河流洪水风险预警方法研究与应用*

王振亚^{1,2} 王 迪^{1,2} 葛振飞^{1,2} 张亚春^{1,2}

马蕴琦^{1,2} 张 霞^{1,2} 栗 晗^{1,2}

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

2 河南省气象台, 郑州 450003

提 要: 针对有较长序列降水资料但产流机制复杂、缺乏流量过程资料的流域, 采用推理公式法估算中小河流洪水风险预警时段, 并应用水文频率计算中常用的皮尔逊III型频率曲线法构建致洪临界面雨量指标, 结合黄河中游近10 a的中小河流洪峰流量资料进行校正。将该方法应用于无水文特征值的伊河东湾水文站以上流域, 对2014—2024年15场洪水进行检验。结果表明, 应用历史洪水对基于同频率法的临界阈值进行订正, 可将风险预警命中率提高至71.8%, 漏报率和空报率分别降至20%和29.4%, 其预报精度与当前北方洪水预报精度水平相当, 在无水文特征值流域的应用效果较好。总体来看, 基于同频率法校正的中小河流洪水风险预警方法, 能够解决跨区域难以获取长序列水文资料的问题, 充分发挥气象部门具有较长序列降水资料的优势。该方法可进一步推广至无水文站的中小流域, 为其他地区中小流域洪水灾害气象预警工作提供技术参考。下一步可以根据下垫面特征对中小流域分类, 或在蓄满产流占主导的流域结合土壤湿度进行分类, 建立不同的订正模型, 从而进一步提高风险预警精度。

关键词: 中小河流, 皮尔逊III型频率曲线法, 黄河中游, 风险预警

中图分类号: P49

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.010601

Research and Application of Flood Risk Early Warning Method for Data-Scarce Small- and Medium-Sized Rivers Based on Same Frequency Method Correction

WANG Zhenya^{1,2} WANG Di^{1,2} GE Zhenfei^{1,2} ZHANG Yachun^{1,2}

MA Yunqi^{1,2} ZHANG Xia^{1,2} LI Han^{1,2}

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

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: For basins characterized by long-sequence precipitation data but complex runoff generation mechanisms and a lack of flow process data, this study employed the rational formula method to estimate the early warning time window for flood risk in small- and medium-sized rivers. The Pearson Type III frequency curve, commonly used in hydrological frequency analysis,

*国家重点研发计划(2023YFC3209301)和中国气象局气象能力提升联合研究专项(22NLTSY005)共同资助
2025年7月31日收稿; 2025年10月23日收定稿
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

was applied to construct flood-triggering critical areal rainfall thresholds. These thresholds were calibrated using nearly 10 years of flood peak discharge data from small- and medium-sized rivers in the middle reaches of the Yellow River. The methodology was then applied and tested for 15 flood events occurring from 2014 to 2024 within the basin above the Dongwan hydrological station of Yi River, which lacks measured hydrological characteristics. The results demonstrate that using the rational formula to determine the warning time window is straightforward and practical. Calibrating the critical thresholds based on the same frequency method using historical flood data significantly improved the hit rate of risk warnings to 71.8%, while reducing the miss rate and false alarm rate to 20.0% and 29.4%, respectively. This forecast accuracy is comparable to the current flood forecasting standards in northern China. The method also performed well when applied in basins lacking hydrological characteristic values. Overall, the flood risk early warning method for small- and medium-sized rivers, calibrated using the same frequency approach, effectively addresses the challenge of obtaining long-sequence hydrological data across different regions. It also fully leverages the advantage of meteorological departments possessing long-term precipitation records. This method can be further extended to small- and medium-sized watersheds without hydrological stations, providing valuable technical reference for meteorological flood disaster warning efforts in similar basins. Future work could involve classifying small- and medium-sized basins based on underlying surface conditions or establishing distinct calibration models for basins dominated by saturation-excess runoff by categorizing soil moisture levels, thereby further enhancing risk warning precision.

Key words: small- and medium-sized rivers, Pearson Type III frequency distribution method, the middle reaches of the yellow river, risk early warning

引 言

洪水灾害是我国发生频繁、影响最严重的自然灾害之一(包红军, 2016; 司丽丽等, 2023)。我国流域面积在 200 km² 以上有防洪任务的中小河流近万条, 这些河流防汛标准普遍偏低, 洪涝灾害严重(水利部水利信息中心, 2016; 晁丽君等, 2022)。中小河流洪水发生快、破坏性强, 给人民生活与财产损失造成很大的威胁(叶金印等, 2014), 据统计, 我国一般年份中小河流的水灾损失占总损失的 70%~80%(水利部水利信息中心, 2016; 包红军等, 2020)。特别是在全球气候变暖背景下, 极端天气气候事件呈现出多发、频发、强发的趋势(周佰铨和翟盘茂, 2023), 我国面临越来越严重的中小河流洪水灾害, 2021—2023 年发生超警的河流分别达 571 条、626 条和 708 条(中华人民共和国水利部, 2022; 2023; 2024)。及时有效的中小河流洪水预报预警, 是目前最有效可行的防灾减灾非工程措施之一(刘志雨等, 2015)。国内外常用的预报预警方法有两种: 一是基于水文模型的预报预警方法, 例如美国的基于分布式水文模型的 HEC-DHM 预报系统(USACE, 2001), 英国、法国、丹麦三国科学家开

发的 MIKE-SHE 模型 (Abbott et al, 1986)；二是临界雨量阈值法，是目前中小河流水报预警中常用的方法 (刘淑雅等, 2017；包红军等, 2017；2020；2021)。美国国家气象局河流预报中心开发的 FFGS (Flash Flood Guidance System) 通过考虑当前土壤含水量来确定临界雨量 (Gourley et al, 2012；Zogg and Deitsch, 2013)；沈军等 (2016) 基于隐马尔可夫模型构建中小河流致灾雨量阈值；中央气象台发展了基于流域地形地貌特征的中小河流致洪动态临界雨量阈值推求方法 (包红军等, 2020；2021)；叶金印等 (2014) 以新安江模型为基础，基于最小均方差准则，建立渭河流域的动态临界雨量判别函数。上述研究结果表明，基于临界雨量的中小河流域风险预警技术具有较好的应用效果。

黄河中游产流机制复杂，黄土高原北部干旱区以超渗产流为主，但近年来，汾河等流域混合产流和蓄满产流的场次洪水占比在增加 (王登, 2019)；南部的泾河、北洛河和渭河等流域以蓄满产流为主 (黄国如等, 2004)。近年来黄河中游中小河流洪水灾害多发频发，2018 年 7 月千河千阳水文站出现超保证洪峰流量 (王振亚等, 2024)，2022 年 7 月马莲河庆阳水文站出现近 50 a 一遇洪水，2025 年 7 月北洛河吴旗水文站出现超保证洪水。同时中小河流域往往很难跨区域获取长序列水文资料，所以在较大区域内采用基于数据驱动的预报模型或方法进行中小河流洪水预报预警存在较大困难 (刘志雨等, 2015)。为此，本研究采用推理公式法估算风险预警时段，应用水文频率计算中常用的皮尔逊 III 型频率曲线法构建致洪临界雨量指标，结合黄河中游近 10 a 的中小河流洪峰流量资料进行校正，并在缺乏水文特征数据的伊河东湾水文站以上流域进行应用检验，以期当前开展的中小河流洪水风险预警业务提供参考。

1 流域概况和使用资料

1.1 流域概况

自内蒙古河口镇至河南桃花峪为黄河中游，全长 1206 km，流域面积为 34.4 万 km^2 ，占黄河流域面积的 43.3%。该区域属半干旱与半湿润气候过渡带，年雨量为 320~836 mm，降水主要受东亚季风的影响，主要集中在 6—9 月，空间分布不均、年际变化大，容易引发洪涝灾害 (夏权等, 2014；董震等, 2025；Gou et al, 2019；Jia et al, 2023；丛佳敏等, 2024)。本研究选取黄河中游为研究区域，基于数字高程模型 (任立良和刘新仁, 2000) 将研究区域划分为 94 个子流域 (图 1，其中包括干流的 3 个子流域)，子流域划分精细至 2~3 级河流，其中渭河与无定河划分至 4~5 级河流。同时，计算得到各子流域主河道长度、平均坡度等水文地形参数。

伊河是黄河南岸支流洛河的支流之一，年雨量为 500~1100 mm。东湾水文站以上流域 (图 2) 位于伊河河源地区，流域面积为 2856 km^2 ，主河道长度约为 122 km，地势西高东低，林地面积大。流域内洪水陡涨陡落，洪峰流量大，对中下游的防洪安全影响较大 (李致家等, 2015)。基于数字高程模型对东湾水文站以上流域进行模拟，计算得到其主河道平均坡度为 0.57%。

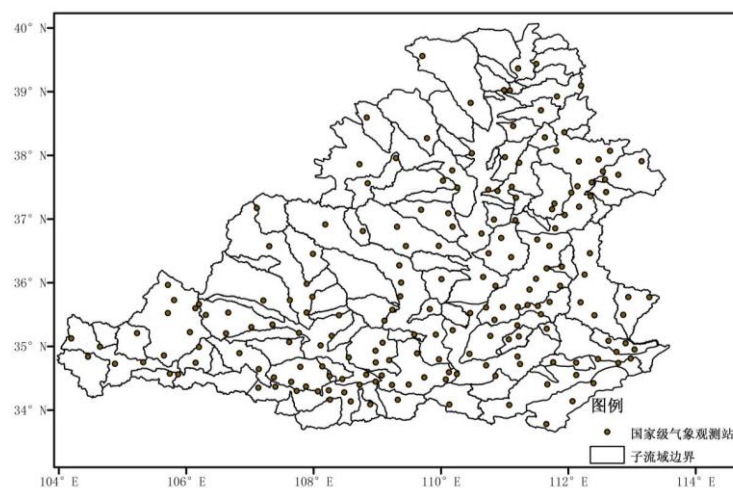


图1 黄河中游子流域划分及国家级气象观测站分布

Fig.1 Simulated sub-basins of the middle reaches of the Yellow River and distribution of national automatic observation stations

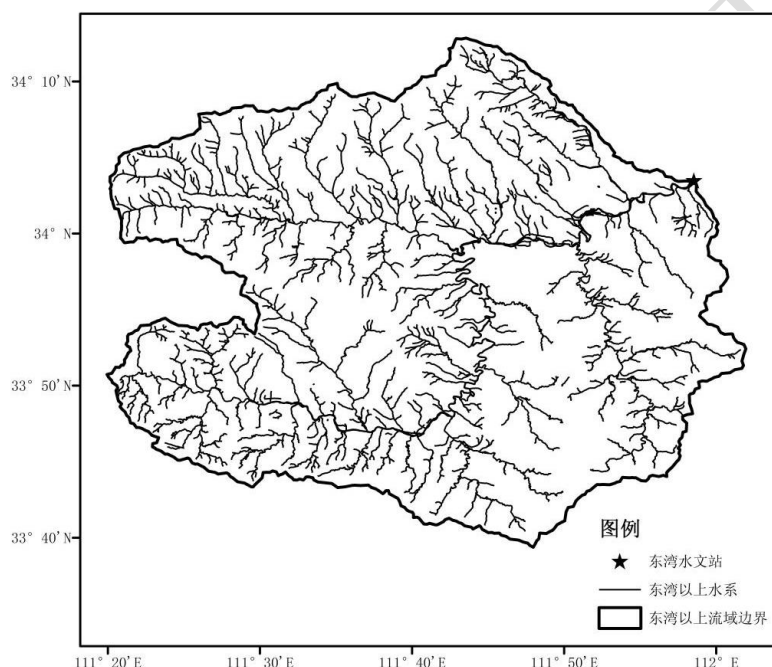


图2 东湾水文站位置和其以上流域边界、水系

Fig.2 Location of Dongwan hydrological station with its upstream watershed boundary and river system

1.2 使用资料

本研究使用的 DEM 数据空间分辨率为 90 m，来源于地理空间数据云。气象数据来源于河南省气象探测数据中心，包括 1991—2024 年黄河中游 191 个国家级气象观测站（图 1）6—9 月逐小时降水实况，以及 2014—2017 年二源降水实况数据和 2018—2024 年三源降水实况数据。水文特征数据来源于气象水文资料共享，包括 2014—2024 年 85 场黄河中游洪水资料（表 1）中所对应的洪峰流量、峰现时间及各水文站的警戒流量与保证流量，伊河东湾水文站 2014—2024 年 15 场洪水的洪峰流量和峰现时间（表 2）。本文所用时间均为北京时。

流域	子流域	水文站	洪水场次/次	警戒流量/ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	保证流量/ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
窟野河流域	皇甫川流域	皇甫	1	2000	—
	秃尾河流域	高家川	2	1000	—
偏关河流域	湫水河流域	林家坪	5	2000	—
无定河流域	大理河流域	绥德	2	800	1350
	清涧河流域	延川	2	2300	4000
北洛河流域	葫芦河流域	张村驿	2	300	—
	沮河流域	黄陵	1	130	200
渭河流域	灞河流域	马渡王	13	800	1500
	沔河流域	秦渡镇	16	500	700
	黑河流域	黑峪口	10	500	1500
	黑河流域(泾河)	张河	2	500	—
	马连河干流流域	庆阳	5	1190	2900
	千河流域	千阳	7	400	600
	石头河流域	鸛鸽	7	200	600
	通关河流域	凤阁岭	1	200	—
伊洛河流域	洛河流域陕西段	灵口	9	1000	2000

洪现时间	洪峰流量/ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	6 h		12 h		24 h		总体预 警级别	流量 预警 级别
		最大累计雨 量/mm	预警 级别	最大累计 雨量/mm	预警 级别	最大累计 雨量/mm	预警 级别		
2014年9月 15日 05:24	550	22.4	无	32.8	无	41.4	无	无	无
2017年9月 10日 14:30	344	9.4	无	10.1	无	10.1	无	无	无
2017年10 月4日 22:00	428	10.8	无	14	无	14.2	无	无	无
2021年7月 23日 02:15	507	24.4	无	28.5	无	28.7	无	无	无
2021年8月 23日 04:03	301	44.3	黄色	51	黄色	53	蓝色	黄色	无
2021年8月 29日 17:24	1440	32.3	无	55.2	黄色	91.8	蓝色	黄色	无
2021年8月 30日 15:48	1460	35	蓝色	46.8	蓝色	50.4	无	蓝色	无
2021年9月 1日 20:00	1160	32.2	无	42.2	无	50.6	无	无	无
2021年9月 19日 12:48	2810	52.3	黄色	85.1	橙色	93.5	橙色	橙色	黄色

2021年9月 25日 07:30	1540	25.5	无	34.1	无	53.5	蓝色	蓝色	蓝色
2021年9月 28日 20:24	1010	31.2	无	42	蓝色	49.8	无	蓝色	无
2022年10 月5日 23: 00	455	18	无	28	无	35.8	无	无	无
2023年8月 27日 14:00	532	25.6	无	44.7	蓝色	56.6	蓝色	蓝色	无
2023年9月 27日 04:12	203	2.9	无	3.9	无	4.3	无	无	无
2024年7月 16日 23:12	216	10.9	无	14.8	无	17.8	无	无	无

2 研究方法

2.1 预警时段估算

推理公式法是由暴雨资料推求小流域设计洪水的一种简化方法。针对设有水文站的中小流域选用推理公式法估算流域汇流时间 τ （山西省水利厅，2011）：

$$\tau = \frac{0.278L}{mJ^{1/3}Q^{1/4}} \quad (1)$$

式中： L 为主河道长度（km）， Q 为设计流量（ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ）， J 为主河道平均坡度， m 为流域汇流参数。

对于流域汇流参数，山西省通过查询表3获得，河南省则根据流域所在的水文分区查询综合 $\theta \sim m$ 关系图获得， θ 计算公式为：

$$\theta = \frac{L}{J^{1/3}F^{1/4}} \quad (2)$$

式中 F 为流域面积（ km^2 ）。

表3 单一地类流域汇流参数

Table 3 Watershed flow concentration parameters of a single land type

地类	一般值	上限值	下限值
黄土丘陵	0.35	0.45	0.33
草坡山地	0.26	0.35	0.23
灌丛山地	0.15	0.25	0.10
森林山地	0.08	0.12	0.05

对某一流域来说，流域汇流时间理论上为预警的最长时段，但实际上预警时段受流域降水中心位置、降水强度及下垫面等因子的影响。王振亚等（2025）的研究表明不同预警时段的洪水灾害气象预警的级别和提前量不尽相同。因此，本研究结合气象预报的时间分辨率，从1、3、6、12、24、36、48、60、72 h共9个时段中，选择3个与汇流时间相近的时段作为预警时段。

2.2 临界面雨量指标构建

2.2.1 站点雨量频率分析

皮尔逊III型频率曲线法成为当前水文计算中常用的方法（詹道江和叶守泽，2000）。因此，本研究采用该方法计算站点雨量频率，以推求该站点不同重现期的雨量。由于该计算方法与中小河流洪水预警等级计算方法一致，故称为同频率法。

2.2.2 临界面雨量初值计算

采用Cressman空间插值方法（张宇彤等，2016；张云济等，2022），将某一流域内所有国家级气象观测站同一重现期下的雨量进行降尺度处理，生成覆盖整个流域、空间分辨率为5 km的网格雨量。基于该网格雨量，采用算术平均法计算流域面雨量，作为该流域对应重现期的临界面雨量初值。在确定流域临界面雨量的重现期后，结合2.1节的预警时段，即可确定中小流域不同等级洪水风险所对应的各预警时段雨量阈值指标。

2.2.3 临界面雨量校正

选取超过阈值的洪水样本，计算洪峰出现前的各预警时段对应的最大累计面雨量与临界面雨量的比值。剔除比值大于1的样本，对剩余比值求取平均值，作为临界面雨量的校正系数。利用该系数对2.2.2节的临界面雨量初始值进行校正，得到最终的临界面雨量阈值。

2.2.4 中小河流洪水风险预警检验

中小河流洪水风险预警准确率采用命中率（TSR）、漏报率（PO）和空报率（FAR）进行评估，检验对象为各中小河流流域的出口断面。具体判别规则如下：

（1）若在某一预报时段内，对某条中小河流发布了IV级及以上风险预警，且该流域实际发生了中小河流洪水，则记为预警服务产品发布正确一次。

（2）若在上述情况下，该流域未发生洪水，则记为空报一次。

（3）若在某一预报时段内未发布气象风险预警，但该流域实际发生了中小河流洪水，则记为漏报一次。

（4）若未发布预警，同时该流域也未发生洪水，则记为无预警服务产品预报正确一次。

中小河流洪水风险预警TSR、PO和FAR分别为：

$$TSR = \frac{NA+ND}{NA+NB+NC+ND} \times 100\% \quad (3)$$

$$PO = \frac{NC}{NA+NC} \times 100\% \quad (4)$$

$$FAR = \frac{NB}{NA+NB} \times 100\% \quad (5)$$

式中：NA为预警服务产品发布正确次数，NB为空报次数，NC为漏报次数，ND为无预警服务产品预报正确次数。

3 应用结果分析

3.1 预警时段估算

在黄河中游划分的91个子流域中（剔除3个干流子流域），有64个子流域设有水文站，

这些流域的汇流时间采用推理公式法进行估算，设计流量可选用保证流量、警戒流量或2014年以来最大流量；其余24个子流域没有水文站，其汇流时间采用在同一个流域内选取主河道平均坡度相近的中小流域，根据主河道长度的比值进行估算。在1、3、6、12、24、36、48、60、72 h共9个时段中，首先选取相邻的两个时段作为预警时段1（较小）和预警时段2（较大），再根据河长和流域面积，选择小于预警时段1且与之相邻或者大于预警时段2且与之相邻的时段为预警时段3（表4）。

表4 渭河和伊洛河部分子流域汇流时间和预警时段结果

Table 4 Results of the concentration time and warning period for partial sub-basins in the Wei River and Yi-Luo River basins

一级支流	子流域	汇流时间/h	预警时段 1/h	预警时段 2/h	预警时段 3/h
渭河流域	元城川	12.42	6	12	24
	九龙河	12.93	6	12	24
	黑河流域(泾河)	16.92	12	24	36
	散渡河流域	11.02	6	12	24
	牛头河流域	10.21	6	12	24
	通关河流域	8.07	6	12	24
	千河流域	19.08	12	24	36
	籍河流域(渭河)	6.82	3	6	12
	石头河流域	5.21	3	6	12
	泮河流域	9.72	6	12	24
	石川河	22.01	12	24	36
	涧河	20.25	12	24	36
伊洛河流域	伊河流域	19.80	12	24	36
	洛河流域陕西段	14.97	12	24	36

3.2 黄河中游中小河流洪水临界雨量确定

基于1991—2024年黄河中游191个国家级气象观测站6—9月逐小时降水观测资料，计算国家级气象观测站1、3、6、12、24、36、48、60、72 h各时段雨量的年最大值并进行排序，采用皮尔逊III型曲线进行频率分析。根据相关标准规范（中国气象局，2019；中华人民共和国水利部，2018；中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会，2009），将蓝色、黄色、橙色、红色风险预警阈值分别设定为3（接近5 a一遇）、5、20和50 a重现期对应的雨量值。

本研究采用Cressman插值方法，将黄河中游191个国家级气象观测站不同重现期、不同累计时段雨量插值为覆盖整个研究区域、空间分辨率为5 km的网格雨量（图3~图6）。采用算术平均法，计算各中小流域在重现期和累计时段的面雨量，确定中小流域洪水气象风险面雨量阈值指标的初值。

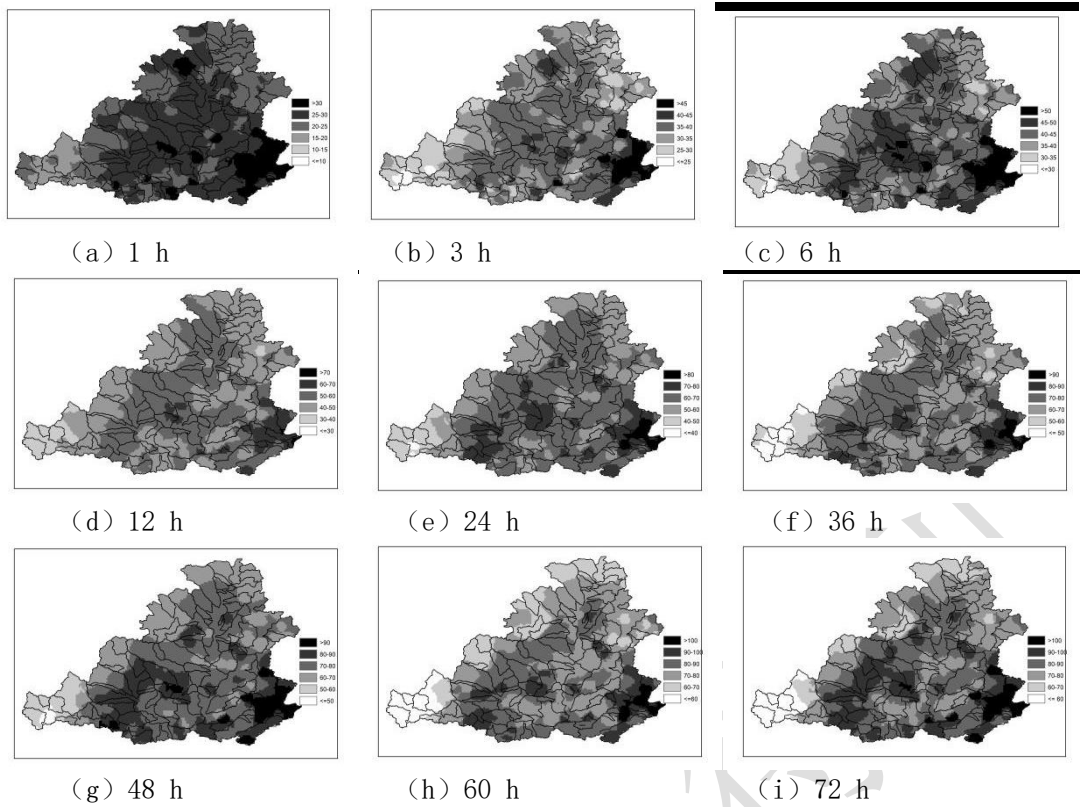


图3 1991—2024年黄河中游3 a重现期1、3、6、12、24、36、48、60、72 h雨量分布

Fig.3 Precipitation distribution for 1,3,6,12,24,36,48, 60,and 72 h under a 3-year return period in the Middle Reaches of the Yellow River from 1991 to 2024

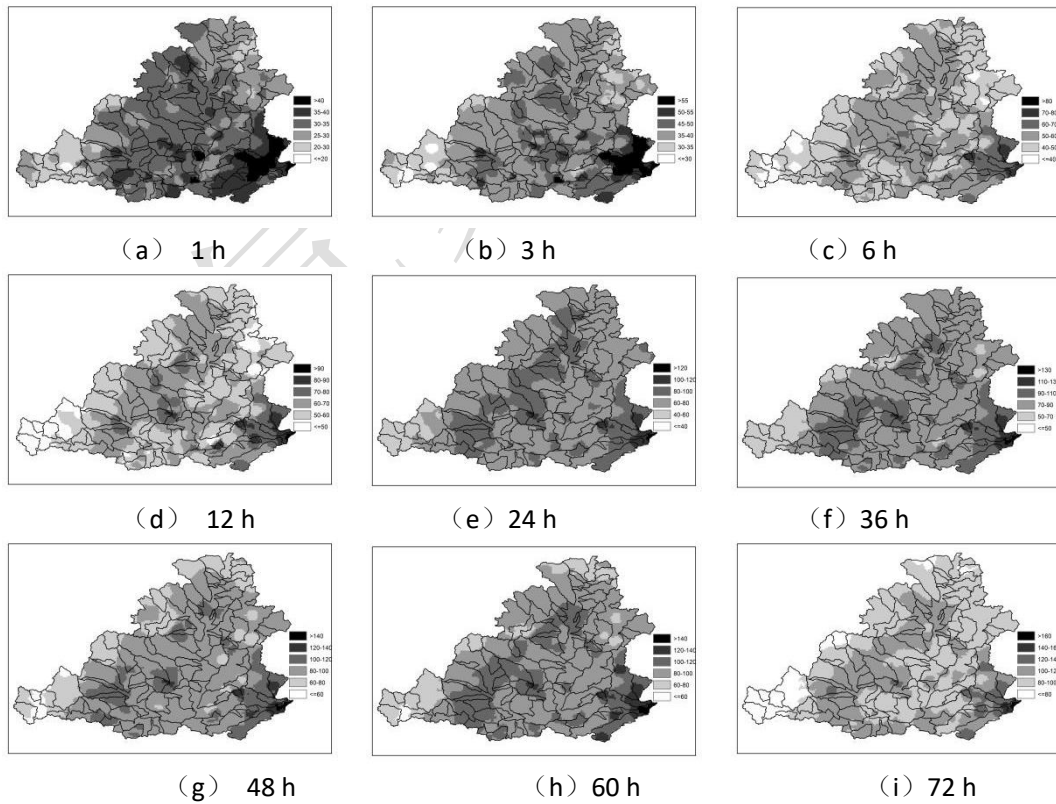


图4 1991—2024年黄河中游5 a重现期1、3、6、12、24、36、48、60、72 h雨量分布

Fig.4 Precipitation distribution for 1,3,6,12,24,36,48, 60,and 72 h under a 5-year return period in the Middle Reaches of the Yellow River from 1991 to 2024

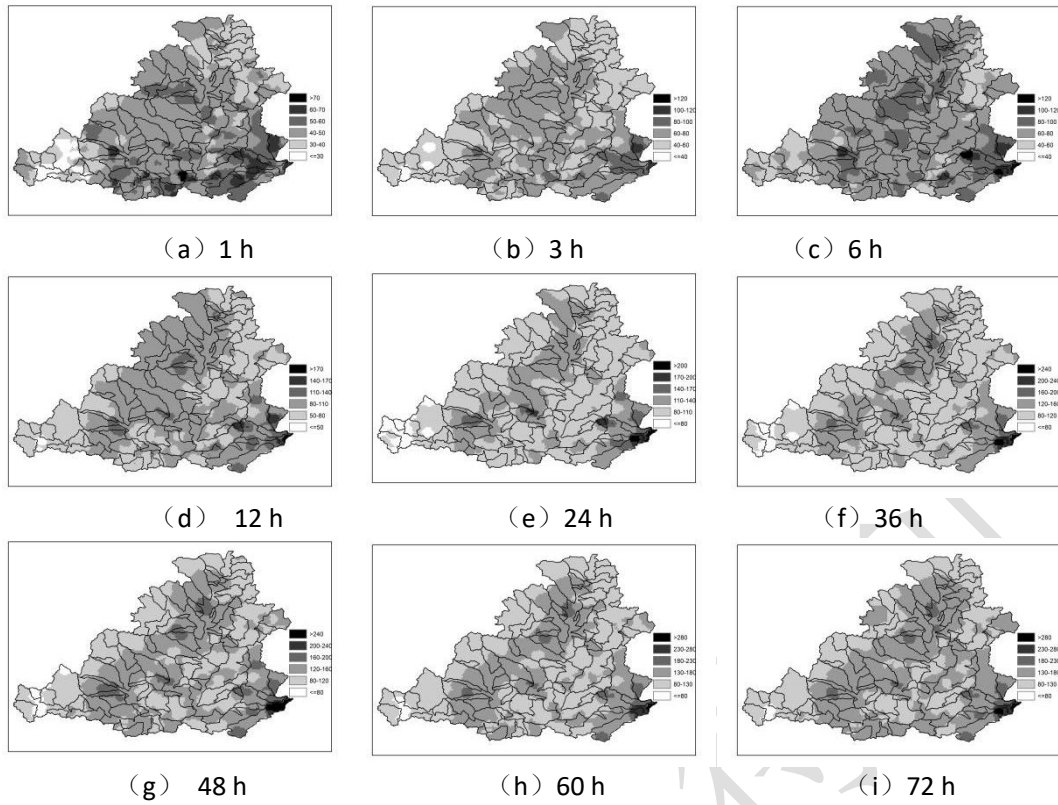


图5 1991—2024年黄河中游20 a重现期1、3、6、12、24、36、48、60、72 h雨量分布

Fig.5 Precipitation distribution for 1 ,3,6,12,24,36,48, 60,and 72 h under a 20-year return period in the Middle Reaches of the Yellow River from 1991 to 2024

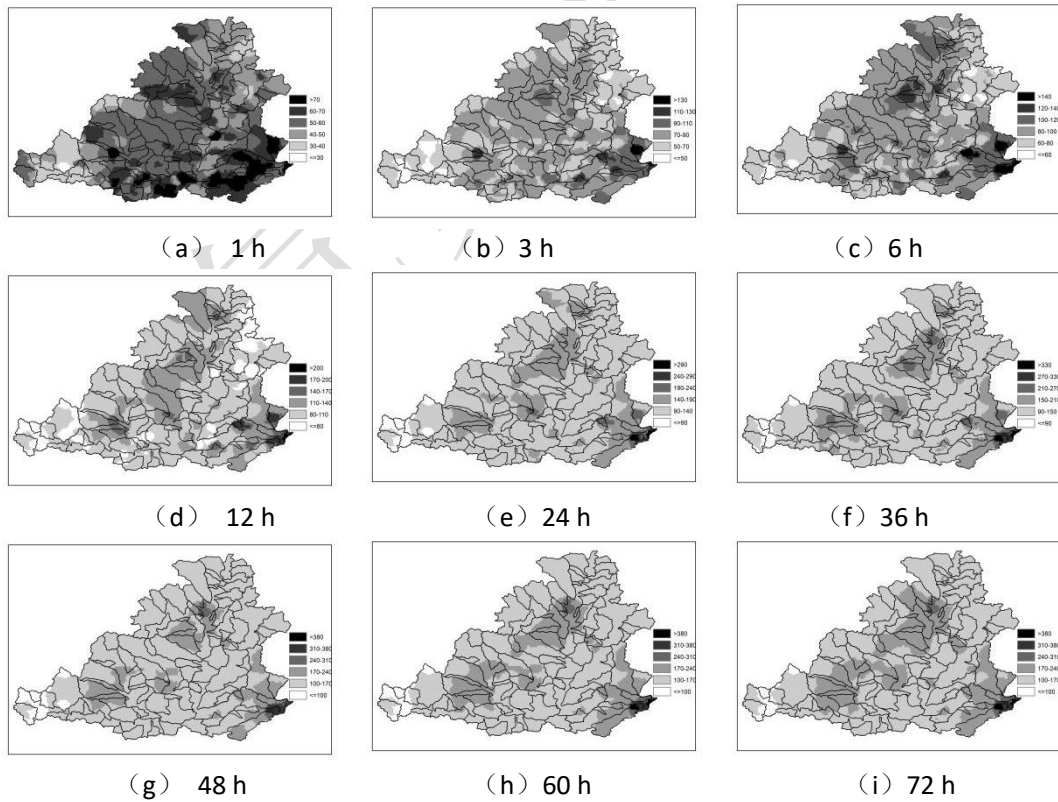


图6 1991—2024年黄河中游50 a重现期1、3、6、12、24、36、48、60、72 h雨量分布

Fig.6 Precipitation distribution for 1,3,6,12,24,36,48, 60 and 72 h under a 50-year return period in the Middle Reaches of the Yellow River from 1991 to 2024

选用表1的85场洪水资料进行结果检验。受资料限制，将洪水蓝色预警的分级阈值定为警戒流量或5 a一遇洪峰流量的0.8倍，暂不进行洪水红色预警分类，洪水黄色、橙色预警的分级阈值分别为警戒流量和保证流量，将洪峰流量超过相应分级阈值的洪水，视为对应等级的风险预警实况，若所有等级均未超过，则记为无。每个子流域的每个等级有3个时段的临界阈值，如果预警时段为1、3、6或12 h则计算洪水峰现时间前24 h内的滑动预警时段的累计雨量最大值为预警雨量，预警时段大于等于24 h，则计算洪水峰现时间前预警时段内的累计雨量为预警雨量。将预警雨量与临界雨量进行比较，超过相应等级的临界雨量则为洪水气象风险预警的预报等级，取3个预警时段最高等级为本次中小河流洪水风险预警等级，若均未超过，则记为无。结果显示，中小河流洪水气象风险预警命中率、漏报率、空报率分别为55.3%、66.7%、34.8%。从检验结果来看，当前方法下气象风险预警命中率较低、漏报率较高。

进一步选取85场洪水中41场超过洪水蓝色、黄色、橙色的分级阈值的洪水进行分析，计算预警雨量与临界雨量的比值，剔除比值大于1的数值，取各场洪水最高预警等级对应的最大比值，如果该值 ≤ 0.5 ，则取上一等级的最大值。最后计算所有比值的平均值为0.7，利用该平均值对临界雨量初始值进行订正，得到最终的临界阈值。订正后的中小河流洪水气象风险预警命中率、漏报率、空报率分别为71.8%、20.0%、29.4%，与当前北方地区洪水预报精度水平相当（中华人民共和国水利部，2024），与订正前相比，订正后气象风险预警命中率明显提高，漏报率和空报率明显降低，预警效果得到改善。说明订正后的临界阈值在黄河中游中小河流洪水气象风险预警中具有较好的适用性。

3.3 临界雨量在伊河东湾水文站以上流域应用

由于东湾水文站未设定保证流量和警戒流量，根据伊洛河防洪预案，东湾水文站 5、20、50 a 一遇流量分别为 1900、3620 和 4760 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ，相应确定蓝色、黄色、橙色和红色洪水预警流量阈值分别为 1520（5 a 一遇流量的 0.8 倍）、1900、3620 和 4760 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ，选用 50 a 一遇流量作为设计流量。伊河东湾水文站流域属于伏牛山深山区，根据式（1）、（2）估算汇流时间为 8.6 h，据此选取 6、12 和 24 h 作为其预警时段，按照 2.2.3 节的方法计算各级面雨量临界阈值（表 5）。

2014—2024 年伊河东湾水文站 15 场洪水的检验结果（表 2、表 6）显示，总体预警情况预警命中率为 66.7%，无漏报，空报率为 71.4%；从不同预警时段的预警效果来看，6 h 和 24 h 临界阈值判断的预警命中率达到 80.0%，12 h 临界阈值判断的预警命中率为 60.0%；6 h 和 12 h 漏报率为 50.0%，24 h 无漏报；空报率均较高，为 60.0%~83.3%。从防灾减灾的角度来看，应尽可能减少漏报，而采用多个预警时段有助于降低漏报率，这与王振亚等（2025）的研究结果相符。

根据 2021 年 8 月 23 日和 2023 年 8 月 27 日的洪水情况对预警空报进行进一步分析，这两场洪水洪峰流量与预警流量阈值差别较大，但实况面雨量超过临界阈值。两次洪水出现前

20 d 左右, 东湾以上流域无明显降水过程, 空报的可能原因是未考虑前期土壤湿度的影响。2021 年 8 月 29 日和 30 日的洪水洪峰流量与蓝色预警流量阈值相差较小, 且在 8 月 30 日流量再次超过 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 黄河水利委员会针对伊洛河发布了蓝色预警, 表明在洪水风险预警发布时可能需要综合考虑水情、对下游的影响等因素。2021 年 9 月 28 日 20:24 洪水的洪峰流量出现前 12 h, 最大累计雨量 (42 mm) 与临界阈值 (40.4 mm) 相差较小, 在误差范围内。综合来看, 基于同频率法校正的风险预警方法在缺乏水文特征值的流域应用效果较好。

表5 东湾水文站以上流域各预警时段各级别临界阈值
Table 5 Critical thresholds for different warning levels and time periods
in the upstream basin of Dongwan hydrological station

预警时段/h	临界阈值/mm			
	蓝色	黄色	橙色	红色
6	33.2	40.9	60.7	73.1
12	40.4	49.7	73.2	88.0
24	51.6	62.8	90.8	108.3

表6 2014—2024年东湾水文站洪水气象风险预警结果检验
Table 6 Verification of meteorological risk Warning results for floods
at Dongwan Hydrological Station from 2014 to 2024

预警时段/h	命中率/%	漏报率/%	空报率/%
6	80	50	66.7
12	60	50	83.3
24	80	0	60
总体	66.7	0	71.4

5 结论与讨论

本研究采用推理公式法估算中小河流洪水风险预警时段, 基于水文频率计算常用的皮尔逊III型频率曲线法构建致洪临界面雨量指标, 结合黄河中游近10 a的中小河流洪峰流量资料进行校正, 并在缺乏水文特征值的伊河东湾水文站以上流域针对2014—2024年15场洪水进行应用检验, 得到如下结论。

(1) 采用推理公式法估算中小流域汇流时间, 结合气象预报的时间分辨率确定预警时段的方法具有简单易行、需要资料较少的特点。同时, 为了降低漏报率, 建议在开展中小河流洪水风险预警时, 选取与流域汇流时间相近的多个时段作为预警时段。

(2) 利用历史洪水资料对基于同频率法的临界阈值进行订正后, 气象风险预警命中率提高至71.8%, 漏报率和空报率分别降至20.0%和29.4%, 该预报精度与当前北方洪水预报精度水平相当, 表明订正后的临界阈值在黄河中游中小河流洪水气象风险预警中适用性较好。

(3) 该方法在伊河东湾水文站以上流域2014—2024年15场洪水的应用检验表明, 不同预警时段临界阈值判断的预警级别并不完全一致, 其中24 h临界阈值判断的预警命中率最高,

达到83.3%。结合实际汛情分析,其在缺乏水文特征值的流域应用效果较好。

(4) 基于同频率法校正的中小河流洪水风险预警方法,能够有效应对难以跨区域获取长序列水文资料的问题,并能够充分发挥气象部门长序列降水资料的优势,可将该方法进一步推广至无水文站的中小流域,为其他中小流域洪水灾害气象预警工作提供技术参考。

(5) 受限于洪水场次资料,本研究在黄河中游采用同一模型对临界阈值初始值进行订正,且未考虑前期土壤湿度的影响。随着洪峰资料的不断积累,后续可以从以下两方面深化研究,一是根据植被等下垫面特征对中小流域进行分类;二是在蓄满产流为主的流域将土壤湿度分为较干、适中和较湿3种情形,分别建立订正模型,从而进一步提高气象风险预警的精度。

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,许凤雯,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).
- 晁丽君,张珂,陈新宇,等,2022.基于多源降水融合驱动的WRF-Hydro模型在中小河流洪水预报中的适用性[J].河海大学学报(自然科学版),50(3):55-64. Chao L J, Zhang K, Chen X Y, et al, 2022. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small- and medium-sized watersheds[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 50(3): 55-64(in Chinese).
- 丛佳敏,孙建,陈伟,等,2024.2000—2020年间黄河中游不同地貌区城镇建设用地扩张过程及其影响因素[J].地理研究,43(8):2121-2140. Cong J M, Sun C J, Chen W, et al, 2024. Unrevealing the process and driving factors of urban construction land expansion in the middle reaches of the Yellow River, 2000—2020[J]. Geogr Res, 43(8): 2121-2140 (in Chinese).
- 董震,杨高,邓荣鑫,等,2025.1993—2023年黄河中游岸线利用时空变化分析[J].人民黄河,47(4):100-105. Dong Z, Yang G, Deng R X, et al, 2025. Analysis on temporal and spatial changes of the embankment-line utilization of the Middle Yellow River during 1993—2023[J]. Yellow River, 47(4): 100-105 (in Chinese).
- 黄国如,芮孝芳,石朋,2004.泾洛渭河流域产汇流特性分析[J].水利水电科技进展,24(5):21-23. Huang G R, Rui X F, Shi P, 2004. Analysis of rainfall-runoff characteristics of Jing-Luo-Wei River Basin[J]. Adv Sci Technol Water Resour, 24(5): 21-23 (in Chinese).
- 李致家,黄鹏年,张永平,等,2015.半湿润流域蓄满超渗空间组合模型研究[J].人民黄河,37(10):1-6,34. Li Z J, Huang P N, Zhang Y P, et al, 2015. Study on spatial combination model of infiltration-excess and saturation-excess runoff in semi-humid watersheds[J]. Yellow River, 37(10): 1-6, 34 (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).

- 刘志雨, 侯爱中, 王秀庆, 2015. 基于分布式水文模型的中小河流洪水预报技术[J]. 水文, 35(1): 1-6. Liu Z Y, Hou A Z, Wang X Q, 2015. Flood forecasting for small- and medium-sized rivers based on distributed hydrological modeling[J]. J China Hydrol, 35(1): 1-6 (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).
- 山西省水利厅, 2011. 山西省水文计算手册[M]. 郑州: 黄河水利出版社. Shanxi Provincial Department of Water Resources, 2011. Hydrological Computation Manual of Shanxi Province[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press (in Chinese).
- 沈军, 聂作先, 吴贤云, 等, 2016. 基于隐马尔可夫模型的中小河流致灾雨量阈值研究[J]. 气象, 42(7): 865-874. Shen J, Nie Z X, Wu X Y, et al, 2016. Research of critical precipitation threshold in small rivers based on hidden Markov model[J]. Meteor Mon, 42(7): 865-874 (in Chinese).
- 司丽丽, 赵亮, 魏铁鑫, 等, 2023. 基于共享社会经济路径的洪水灾害风险评估——以雄安新区上游中小河流域为例[J]. 气象, 49(6): 745-756. Si L L, Zhao L, Wei T X, et al, 2023. Risk assessment of flood disaster based on shared socioeconomic pathways: A case study of the small-and medium-sized river basins in the upper reaches of Xiong'an new area[J]. Meteor Mon, 49(6): 745-756 (in Chinese).
- 王登, 2019. 黄河中游产流机制变化综合判别指标构建研究[D]. 郑州: 郑州大学. Wang D, 2019. Study on the construction of comprehensive discriminant indexes for the change of runoff mechanism in the Middle Yellow River[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University (in Chinese).
- 王振亚, 王迪, 董俊玲, 等, 2024. 多源融合降水和智能网格预报在渭河一次洪水预报中的应用[J]. 气象与环境科学, 47(5): 9-16. Wang Z Y, Wang D, Dong J L, et al, 2024. Application of multi-source precipitation merged products and intelligent grid weather forecast in a flood forecasting in Weihe River basin[J]. Meteor Environ Sci, 47(5): 9-16.
- 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).
- 夏权, 吴芳蓉, 陈少勇, 2014. 近50年黄河上中游降水多时间尺度特征分析[J]. 气候变化研究快报, 3(3): 154-163. Xia Q, Wu F R, Chen S Y, 2014. Multiple time scales characteristic of precipitation in recent 50 years of upper and middle reach of Yellow River[J]. Climate Change Res Lett, 3(3): 154-163 (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).
- 詹道江, 叶守泽, 2000. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社. Zhan D J, Ye S Z, 2000. Engineering Hydrology[M]. Beijing: China Water & Power Press (in Chinese).
- 张宇彤, 矫梅燕, 陈静, 等, 2016. 基于贝叶斯方法的极端降水概率预报试验[J]. 气象, 42(7): 799-808. Zhang Y T, Jiao M Y, Chen J, et al, 2016. Probabilistic forecasting of extreme precipitation experiment based on Bayesian theory[J]. Meteor Mon, 42(7): 799-808 (in Chinese).
- 张云济, 于慧珍, 张慕容, 等, 2022. 河南“21·7”极端暴雨预报的不确定性和误差增长机制[J]. 中国科学: 地球科学, 52(10): 1929-1947. Zhang Y J, Yu H Z, Zhang M R, et al, 2022. Uncertainties and error growth in forecasting the record-breaking rainfall in Zhengzhou, Henan on 19-20 July 2021[J]. Sci China Earth Sci, 65(10): 1903-1920.
- 中国气象局, 2019. QX/T 451-2018 暴雨诱发的中小河流洪水气象风险预警等级[S]. 北京: 中国气象出版社. China Meteorological Administration, 2019. QX/T 451-2018 Meteorological risk warning levels of small and medium-sized rivers flood induced by torrential rain[S]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 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, 2009. GB/T 22482-2008 水文情报预报规范[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2009. GB/T 22482-2008 Standard for hydrological information and hydrological forecasting[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).

- 中华人民共和国水利部, 2018. SL 758-2018 水情预警信号[S]. 北京: 中国水利水电出版社. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2018. SL 758-2018 Signals for hydrologic information warning[S]. Beijing: China Water & Power Press (in Chinese).
- 中华人民共和国水利部, 2022. 2021 中国水文年报[M]. 北京: 中国水利水电出版社. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2022. 2021 China Hydrological Yearbook[M]. Beijing: China Water & Power Press (in Chinese).
- 中华人民共和国水利部, 2023. 2022 中国水文年报[M]. 北京: 中国水利水电出版社. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2023. 2022 China Hydrological Yearbook[M]. Beijing: China Water & Power Press (in Chinese).
- 中华人民共和国水利部, 2024. 2023 中国水文年报[M]. 北京: 中国水利水电出版社. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2024. 2023 China Hydrological Yearbook[M]. Beijing: China Water & Power Press (in Chinese).
- 中华人民共和国水利部, (2024-06-18). 实现延长洪水预见期和提高预报精度相统一[EB/OL].
<https://news.cctv.cn/2024/06/18/ARTIb0QXE32ZiHNv70uUCjPR240618.shtml>. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, (2024-06-18). Unifying the Extension of Flood Forecasting Lead Time with Improved Forecast Accuracy[EB/OL]. <https://news.cctv.cn/2024/06/18/ARTIb0QXE32ZiHNv70uUCjPR240618.shtml>(in Chinese).
- 中华人民共和国水利部水利信息中心, 2016. 中小河流洪水预警指标确定与预报技术研究[M]. 北京: 科学出版社. Water Resources Information Center of Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2016. Research on Determination of Early Warning Indicators and Forecasting Techniques for Floods in Small and Medium-Sized Rivers[M]. Beijing: Science 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).
- Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al, 1986. An introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: history and philosophy of a physically-based, distributed modelling system[J]. J Hydrol, 87(1-2): 45-49.
- Gou L F, Jin Z D, von Strandmann P A E P, et al, 2019. Li isotopes in the middle Yellow River: Seasonal variability, sources and fractionation[J]. Geochim Cosmochim Acta, 248: 88-108.
- Gourley J J, Erlingis J M, Hong Y, et al, 2012. Evaluation of tools used for monitoring and forecasting flash floods in the United States[J]. Wea Forecasting, 27(1): 158-173.
- Jia Y W, Sun C J, Wu H X, et al, 2023. Spatiotemporal distribution characteristics of land resources in the middle reaches of the Yellow River in China from 1980 to 2018: an asset perspective based on multi-source data[J]. Nat Resour Res, 32(4): 1823-1838.
- USACE, 2001. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual[M]. Davis: Hydrologic Engineering Center.
- Zogg J, Deitsch K, 2013. The Flash Flood Potential Index at WFO Des Moines, Iowa[R]. Glasgow: WFO.