

欧阳彤, 王嘉鑫, 赵光辉, 等. 海南省万泉河流域山洪灾害预警复盘分析: 以 2024 年台风“潭美”为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(9): 60-72. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.005

OUYANG Tong, WANG Jiaxin, ZHAO Guanghui, et al. Post-event analysis of flash flood early warning in Wanquan River Basin, Hainan Province: A case study of typhoon “Trami” (2024) [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(9): 60-72. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.005

海南省万泉河流域山洪灾害预警复盘分析： 以 2024 年台风“潭美”为例

欧阳彤^{1,2}, 王嘉鑫^{1,2}, 赵光辉³, 张晓蕾^{1,2}, 肖 静⁴, 周劲松³, 刘荣华^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾技术创新中心, 北京 100038; 3. 海南省水务厅, 海南 海口 571126;
4. 海南省水文水资源勘测局, 海南 海口 570203)

摘 要:【目的】为评估极端天气背景下山洪灾害监测预警系统的响应效果, 以海南省万泉河流域为研究区, 以 2024 年第 20 号台风“潭美”残涡与冷空气共同影响引发的暴雨洪水过程为案例, 基于中国山洪水文模型(CNFF)与海南省山洪灾害监测预警平台, 构建了涵盖“预报—监测—预警发布—灾情验证”四阶段的预警评估框架。【方法】研究集成降雨监测数据、水文模型模拟结果及 96 个重点村庄的实地调研信息, 以行政村为评价单元, 对警戒(准备转移)及以上等级预警的命中情况进行分析。【结果】结果表明: 平台共发布 115 次“准备转移(警戒)”及以上等级的预警, 覆盖 70 个防治行政村, 其中 50 个村庄实际发生灾情, 对应预警命中率为 71.43%。【结论】监测预警平台在重点风险区具备较强的趋势识别能力, 但在村级响应适配性和阈值设定合理性方面存在不足。研究提出预警阈值动态调整、洪水过程模拟优化以及多源数据融合等改进方向, 以提升系统在极端气象条件下的适应性与预警效果。可为热带季风区山洪灾害监测预警系统优化及风险治理能力提升提供参考。

关键词: 山洪灾害预警; CNFF 模型; 台风暴雨; 预警体系; 预警效果评估; 预警阈值; 万泉河流域; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.005

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV877

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)09-0060-13



与作者互动
扫描二维码
获取最新资讯

Post-event analysis of flash flood early warning in Wanquan River Basin, Hainan Province: A case study of typhoon “Trami” (2024)

OUYANG Tong^{1,2}, WANG Jiaxin^{1,2}, ZHAO Guanghui³, ZHANG Xiaolei^{1,2}, XIAO Jing⁴,
ZHOU Jingsong³, LIU Ronghua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Water Security, China Institute of Water Resources and

收稿日期: 2026-01-30; 修回日期: 2026-04-15; 录用日期: 2026-04-20; 网络出版日期: 2026-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271095; 52239006)

作者简介: 欧阳彤(1994—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事山洪灾害风险及预警相关研究。E-mail: dolphin_821@163.com

通信作者: 张晓蕾(1987—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事山洪灾害风险及预警相关研究。E-mail: zhangxl@iwhr.com

刘荣华(1979—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事山洪灾害预报预警相关研究。E-mail: liurh@iwhr.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Technology Innovation Center for Flood and Drought Prevention and Disaster Reduction, Ministry of Water Resources, PRC, Beijing 100038, China; 3. Department of Water Resources of Hainan Province, Haikou 571126, Hainan, China; 4. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hainan Province, Haikou 570203, Hainan, China)

Abstract: [Objective] To evaluate the response effectiveness of the flash flood monitoring and early warning system under extreme weather conditions, the Wanquan River Basin in Hainan Province is taken as the study area, and the rainstorm flood process triggered by the combined influence of the residual circulation of Typhoon “Trami” (2024, No. 20) and a cold air mass is used as a case study. Based on the China National Flash Flood Hydrological Model (CNFF) and the Hainan Flash Flood Monitoring and Early Warning Platform, a four-stage early warning evaluation framework covering “forecasting-monitoring-warning issuance-disaster verification” is established. [Methods] Rainfall monitoring data, hydrological model simulation result, and field survey information from 96 key villages were integrated. Using the administrative village as the evaluation unit, the hit rate of warnings at the alert level (“prepare for evacuation”) and above was analyzed. [Results] The result showed that: the platform issued a total of 115 warnings at the level of “prepare for evacuation (alert)” and above, covering 70 administrative villages under prevention and control. Among them, 50 villages actually experienced disasters, corresponding to a warning hit rate of 71.43%. [Conclusion] The monitoring and early warning platform has relatively strong capability in trend identification in key risk areas, but deficiencies exist in village-level response adaptability and the rationality of threshold settings. Improvement directions are proposed, including dynamic adjustment of early warning thresholds, optimization of flood process simulation, and multi-source data fusion, so as to enhance the adaptability and early warning effectiveness of the system under extreme meteorological conditions. The findings can provide a reference for the optimization of flash flood monitoring and early warning systems and the improvement of risk governance capacity in tropical monsoon regions.

Keywords: flash flood early warning; CNFF model; typhoon rainstorm; early warning system; early warning effectiveness evaluation; early warning threshold; Wanquan River Basin; influencing factors

0 引言

海南省位于中国热带季风气候区,台风与强降雨频发,山丘区小流域山洪灾害具有突发性强、响应时间短、破坏力大的特点^[1]。在极端降雨条件下,小流域洪水往往在短时间内迅速形成并发展为山洪灾害,对沿河村庄和低洼地区居民生命财产安全构成严重威胁。据应急管理部统计,2024年我国因洪涝及地质灾害造成5344.9万人次不同程度受灾,直接经济损失2630.4亿元^[2-3]。在气候变化背景下,极端降雨事件呈增加趋势,提升山洪灾害监测预警能力已成为山区防灾减灾的重要任务。

在山洪灾害预警技术研究方面,国内外学者已开展了大量探索,相关方法主要集中于水文过程模拟和降雨阈值判别两类技术路径。一类方法以分布式水文模型为核心,通过监测降雨或预报降雨驱动模型,模拟降雨—产流—汇流过程,从而实现对洪水形成与演进过程的定量预测,并以河道控制断面的成灾水位或流量作为预警指标^[4]。已有研究基于分布式水文模型对典型暴雨洪水过程进行了模拟分析,例如通过构建小流域水文模型分析河南“21·7”与“75·8”

两场特大灾害暴雨洪水过程^[5],或结合GIS技术和SCS模型开展区域洪水风险评估^[6]。此外,也有研究基于CNFF-IFMS模型构建水文—水动力耦合模型,对极端降雨条件下的小流域山洪淹没风险进行模拟评估^[7]。另一类方法以降雨阈值为核心,通过判断降雨量或降雨强度是否超过临界值触发预警响应^[8]。在临界雨量计算方面,国内外研究提出了多种技术路径,包括基于网格的山洪指导方法^[9]、经验法、水位流量反推法、水动力学计算法等^[10]。在此基础上,部分研究通过统计方法构建区域临界雨量估算模型^[11],或基于水位—流量关系反演致灾降雨阈值^[12],也有研究利用水动力模型模拟山洪过程并推求临界降雨指标^[13]。此外,前期土壤湿度、降雨空间分布特征以及降雨结构等因素也被证明对小流域临界雨量具有显著影响^[14-16]。

然而,上述方法在实际应用中仍存在一定局限。首先,在我国大量山区小流域中,由于地形复杂和观测条件受限,监测站网仍以雨量站为主,水位和流量观测资料较为稀缺^[17-18],模型参数率定与验证难度较大。尤其是在缺乏历史洪水资料的“无资料流域”中,水文模型模拟精度和预警可靠性严重受限^[19]。

此外, 在实际业务运行中, 山洪灾害预警往往采用多阶段递进式机制, 包括气象风险预警、洪水预报预警以及雨量监测预警等环节^[20]。其中, 气象风险预警主要依据数值天气预报对未来降雨趋势进行区域尺度风险提示, 而后续洪水预报和雨量监测预警则逐步提高空间精度, 实现对村庄或小流域尺度风险的识别。近年来, 随着遥感监测、数值天气预报以及多源数据融合技术的发展, 基于分布式水文模型和多源数据驱动的山洪灾害预报预警方法逐渐成为研究热点, 并在小流域洪水模拟与预警阈值动态调整方面得到广泛应用^[21-24]。

尽管相关研究在预警方法和技术体系方面取得了较多进展, 但现有研究多集中于中西部山区或华南丘陵地区^[25-28], 对岛屿型流域及热带季风气候区的研究相对较少。在极端台风暴雨条件下, 小流域山洪灾害形成机制复杂, 预警模型适用性及预警指标合理性仍缺乏系统验证。因此, 有必要结合典型极端灾害事件, 对现有山洪灾害监测预警系统的运行效果开展复盘分析。

本研究以 2024 年第 20 号台风“潭美”残涡与冷空气共同影响引发的万泉河流域极端暴雨过程为研究案例。该次降雨过程导致海南岛中东部地区出现持续强降雨, 部分地区累计降水量超过 600 mm, 万泉河流域发生超过 50 a 一遇洪水, 部分乡镇农田和房屋遭受严重淹没并实施人员转移避险。

依托中国山洪水文模型(CNFF)及海南省山洪灾害监测预警平台运行数据, 结合实地灾情调查结果, 本文对山洪灾害监测预警系统在此次极端事件中的运行效果进行复盘分析。通过对气象风险预警、流量预报预警和雨量监测预警的命中情况进行对比分析, 评估系统在极端降雨条件下的适用性, 并识别影响预警效果的关键因素, 以期为热带季风区山洪灾害监测预警系统优化提供参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

万泉河位于海南岛东部, 是海南岛第三大河, 发源于琼中县营根镇五指山保护区, 至琼海市博鳌港入南海, 全长 170 km, 流域面积 3 691 km²。流域整体地形以中高山丘陵向下游平原过渡, 河网密度较高, 汇流路径短, 对短历时强降雨过程响应敏感。

万泉河流域属于热带季风气候区, 年平均降雨量约为 2 385 mm, 降雨主要集中在 5—11 月汛期, 其中

台风降雨是造成流域洪水和山洪灾害的重要诱因。受山区地形及降雨集中影响, 流域内小流域汇流时间短、洪水涨落迅速, 沿河村庄及低洼区域在极端降雨条件下易发生山洪灾害。

2024 年 10 月, 受第 20 号台风“潭美”残涡与冷空气共同影响, 海南岛于 10 月 26 日—10 月 31 日出现强度大、范围广、雨区高度重叠的极端暴雨过程。基于海南省山洪灾害监测预警平台雨量站监测数据与面雨量分析结果统计显示, 全岛降水总量约为 119.3 亿 m³, 累计面雨量达 346.6 mm, 强降雨区主要集中于海南岛中部和东部山丘区, 其中万泉河流域为本次暴雨过程的核心落区之一(见图 1)。万泉河流域上游及中游山丘区出现持续强降雨, 多个雨量站累计降水量超过 1 000 mm, 极端点雨量主要分布于琼海牛路岭(1 112 mm)、琼中思河(1 110 mm)和琼中南茂(1 062 mm)等地, 强降雨中心与流域山丘区高度重叠。

从时间分布看, 万泉河流域强降雨主要集中在 2024 年 10 月 28 日 8 时至 10 月 31 日 8 时, 该时段内流域平均降水量达 474.12 mm, 占多年平均年降水量(2 385 mm)的约 20%, 呈现出明显的“短历时、高强度、大累积”特征。琼中黎族苗族自治县和屯昌县共有 5 个乡镇累计降水量超过 600 mm, 琼海市、万宁市、琼中黎族苗族自治县和屯昌县共有 10 个乡镇累计降水量超过 500 mm, 琼海市、万宁市、琼中黎族苗族自治县和定安县共有 10 个乡镇累计降水量超过 300 mm。其中最大降水量点出现在琼海市会山镇的牛路岭水库, 累计降水量达 1 087.1 mm。在前期土壤含水量普遍偏高的背景下, 持续强降雨迅速转化为地表径流, 导致河道水位快速上涨, 流域发生超过 50 a 一遇洪水过程, 部分沿河乡镇农田及房屋严重淹没。由于该事件具有降雨强度大、影响范围广和灾情典型等特点, 为开展山洪灾害预警系统运行效果评估提供了典型研究案例。

1.2 数据来源

本研究所使用的数据主要包括流域基础数据、雨水情监测数据、水库调度数据、防治行政村基础信息、预警发布数据及灾情调查数据等。

(1)流域基础数据: 包括数字高程模型(DEM)及河网水系信息, 用于小流域划分及水文拓扑结构构建。

(2)雨水情监测数据: 来源于海南省山洪灾害监测预警平台, 收集万泉河流域及周边 206 个雨量站逐小时降雨数据以及加积水文站洪水过程资料, 用于

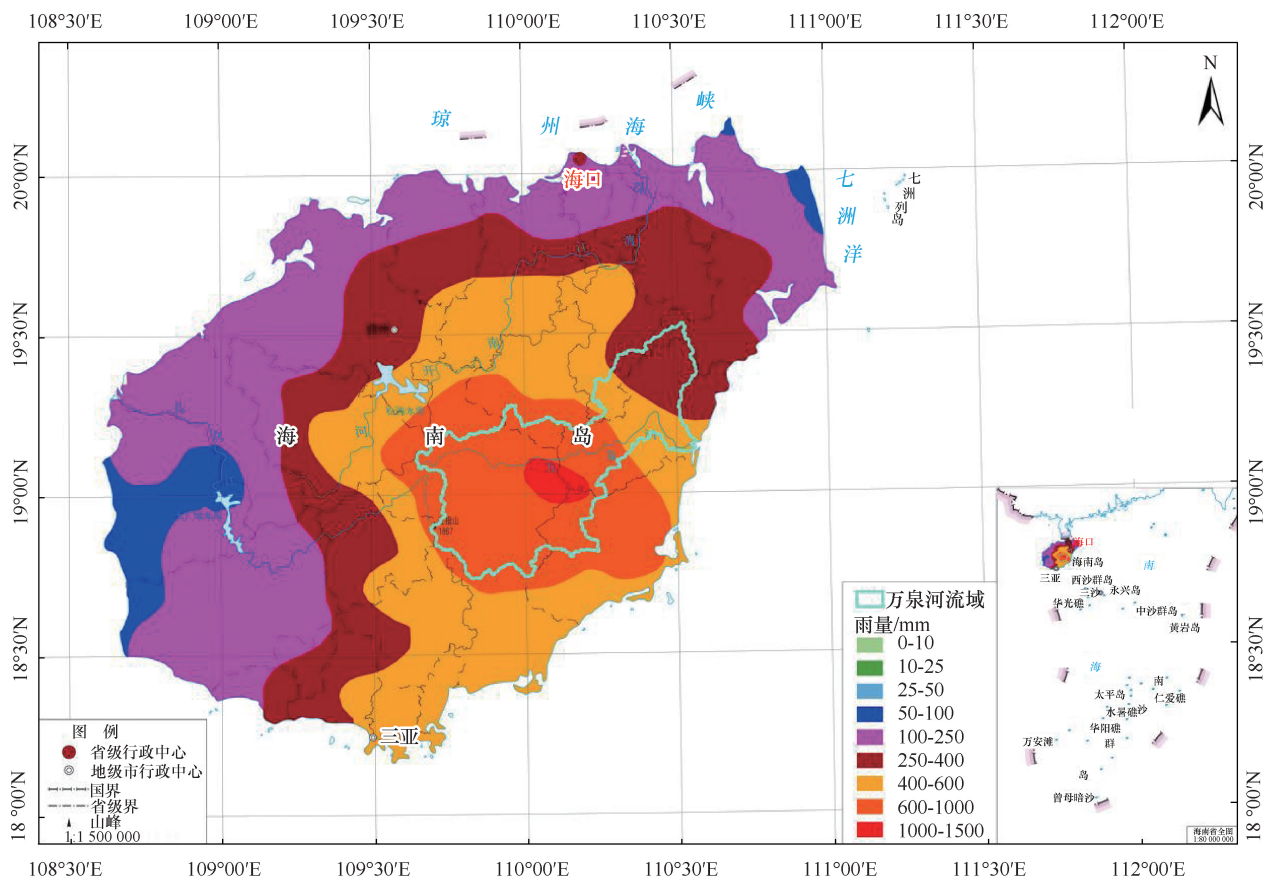


图 1 10月26—10月31日海南省累计雨量

Fig. 1 Cumulative rainfall in Hainan Province from October 26 to 31

面雨量计算及模型驱动。

(3)水库调度数据:包括红岭水库和牛路岭水库运行调度资料,用于分析水库调蓄对洪水过程的影响。

(4)防治行政村基础信息:包括行政村空间位置及其与河段、小流域、站点的关联关系,用于建立模型结果与预警对象之间的映射,以及预警指标、防洪能力等信息。

(5)预警发布数据:来源于监测预警平台生成的预警记录,包括气象风险预警、流量预报预警和雨量监测预警信息。选取2024年10月28日8时—10月31日8时期间数据,对预警级别、发布时间及涉及行政村进行统计分析。

(6)灾情调查数据:通过对万泉河流域5个市县防治行政村开展实地调查获取,主要包括房屋进水、农田淹没及人员转移等信息。本次共调查116个行政村,其中96个村庄数据较为完整,可用于预警效果评估。

1.3 研究方法

为评估山洪灾害监测预警系统在极端降雨事件中

的运行表现,本文依托海南省山洪灾害监测预警平台,结合多源监测数据与实地灾情调查资料,以多阶段预警体系为分析主线,对万泉河流域台风“潭美”暴雨过程中的预警情况开展复盘分析。

在洪水模拟方面,采用中国山洪水文模型(CNFF)对万泉河流域降雨—产流—汇流过程进行模拟。该模型以小流域为基本计算单元,通过数字高程模型(DEM)提取流域水系结构,构建由小流域、河段和节点组成的水文拓扑网络,并以实时降雨数据和初始土壤湿度为输入,对小流域径流过程及河道洪水传播进行计算。模型输出河段洪水过程,并结合河段与防治行政村之间的关联关系,对村庄流量预警进行判别。为检验模型在本次极端降雨事件中的适用性,选取万泉河流域加积水文站实测洪水过程资料,对模型模拟结果进行对比分析,并通过洪峰流量误差、峰现时间误差等指标对模型模拟精度进行评价。同时,在模型计算过程中考虑流域内红岭水库和牛路岭水库的调蓄影响,以提高洪水过程模拟结果的可靠性。

在预警信息生成方面,海南省山洪灾害监测预警平台构建了由气象风险预警、流量预报预警和雨量监

测预警组成的多阶段递进式预警体系。其中, 气象风险预警基于气象预报信息识别区域山洪风险, 流量预报预警依据水文模型模拟结果判别村庄关联河段流量是否超过预警指标阈值, 雨量监测预警则通过实时监测降雨量与村庄雨量预警指标进行对比触发。

在预警效果评价方面, 以防治行政村为评价单元, 将系统发布的预警信息与实地灾情调查结果进行逐村对比, 对预警系统运行效果进行评估。其中, 受灾情况依据实地调研中记录的房屋及农田淹没、最大淹没水深及人员转移等信息进行综合判定。本研究重点关注警戒(准备转移)及以上等级预警, 以评估预警信息在实际防御决策中的有效性。评价指标主要包括命中率和空报率, 其中命中率指发布预警且实际发生受灾情况的村庄数量占发布预警村庄总数的比例, 空报率指发布预警但未发生受灾情况的村庄数量占发布预警村庄总数的比例。由于本研究主要基于实地调研数据对已发布预警进行验证, 因此未对未发布预警但发生灾情的漏报情况进行系统统计。

在预警效果评价的基础上, 进一步开展预警合理性分析, 对不同类型预警的触发机制及其影响因素进行研究。其中, 对气象风险预警通过风险落区与实际受灾分布进行对比分析; 对流量预报预警重点从模型模拟能力、面雨量计算方法、前期降雨条件以及流量预警指标设置等方面进行分析; 对雨量监测预警重点从村庄关联雨量站设置、雨量站监测数据质量以及雨量预警指标设置等方面进行分析, 从而综合评估预警系统在本次极端降雨事件中的合理性与适用性。

1.4 技术路线

本文基于多源数据集成, 构建了以多阶段预警分析为主线的技术路线。首先, 整合流域基础数据、雨水情监测数据、水库调度数据、防治行政村基础信息、预警发布数据及灾情调查数据, 形成基础数据集; 在此基础上, 围绕山洪灾害监测预警业务流程, 分别对气象风险预警、流量预报预警和雨量监测预警三类预警信息开展分类型分析。其中, 流量预报预警基于中国山洪水文模型(CNFF)模拟结果进行判别, 并通过实测资料对模型适配性进行验证; 进一步以防治行政村为单元, 对不同类型预警的命中情况进行对比分析, 评估预警效果; 最后, 从预警触发机制及其影响因素出发, 开展预警合理性分析, 并提出预警指标优化及系统改进建议, 形成“数据集成—预警分析—效果评估—合理性分析—优化建议”的技术路线(见图 2)。

2 山洪灾害预警复盘分析

在台风“潭美”残涡和冷空气共同影响期间, 海南省山洪灾害监测预警系统依托多源监测数据和模型计算结果, 先后发布了山洪灾害气象风险预警、流量预报预警和雨量监测预警。为系统评估多阶段预警在本次极端暴雨过程中的合理性, 重点关注警戒(准备转移)及以上级别预警, 通过对比预警村庄与实际受灾村庄的对应关系, 分析不同类型预警的命中、空报及其成因, 并结合预警指标与村庄防洪能力的匹配情况, 对预警合理性进行综合判断。

此外, 预警流程中的时效性也是影响预警效果的重要因素。从降雨监测数据获取、水文模型计算到预警触发与信息发布, 整个流程的时间延迟直接影响预警信息的实用价值。结合本次事件的业务运行情况, 监测数据更新周期为 5 min, 模型计算及预警判别过程通常在较短时间内完成, 整体具备较好的实时响应能力。然而, 由于本研究缺乏受灾发生的精确时间记录, 难以对预警发布与实际受灾过程之间的时间匹配关系开展定量分析, 因此未对预警时效性进行系统评估。在极端暴雨条件下, 降雨过程变化快、响应时间短, 对预警信息时效性提出了更高要求。未来有必要进一步优化监测数据更新频率和模型计算效率, 并结合业务运行过程开展预警时效性分析, 以提升预警信息发布的及时性与有效性。

2.1 气象风险预警

山洪灾害气象风险预警以未来 24 h 内的降雨预报为核心, 综合考虑前期降雨影响和土壤湿度, 对区域山洪灾害发生的可能性进行风险分级判断, 其主要作用在于提前识别高风险区域, 为后续防御部署提供时间窗口。气象风险预警以区域性风险提示为主, 其预警落区通常以乡镇或网格形式呈现。

2.1.1 预警落区与实际受灾分布对比

在台风“潭美”残涡和冷空气共同影响期间(2024 年 10 月 28 日 8 时—2024 年 10 月 31 日 8 时), 海南省水务厅联合海南省气象局共发布省级山洪灾害气象风险预警 3 期(其中黄色 2 期、蓝色 1 期), 分别为 10 月 28 日 20 时(见图 3)、29 日 8 时和 29 日 20 时。以 10 月 28 日 20 时发布的黄色预警为例, 万泉河流域内琼海市、万宁市、琼中黎族苗族自治县、定安县和屯昌县多个乡镇被划入风险预警落区(见表 1)。

将气象风险预警落区与实际受灾村庄分布进行对比发现, 大部分受灾村庄位于黄色或蓝色风险预警

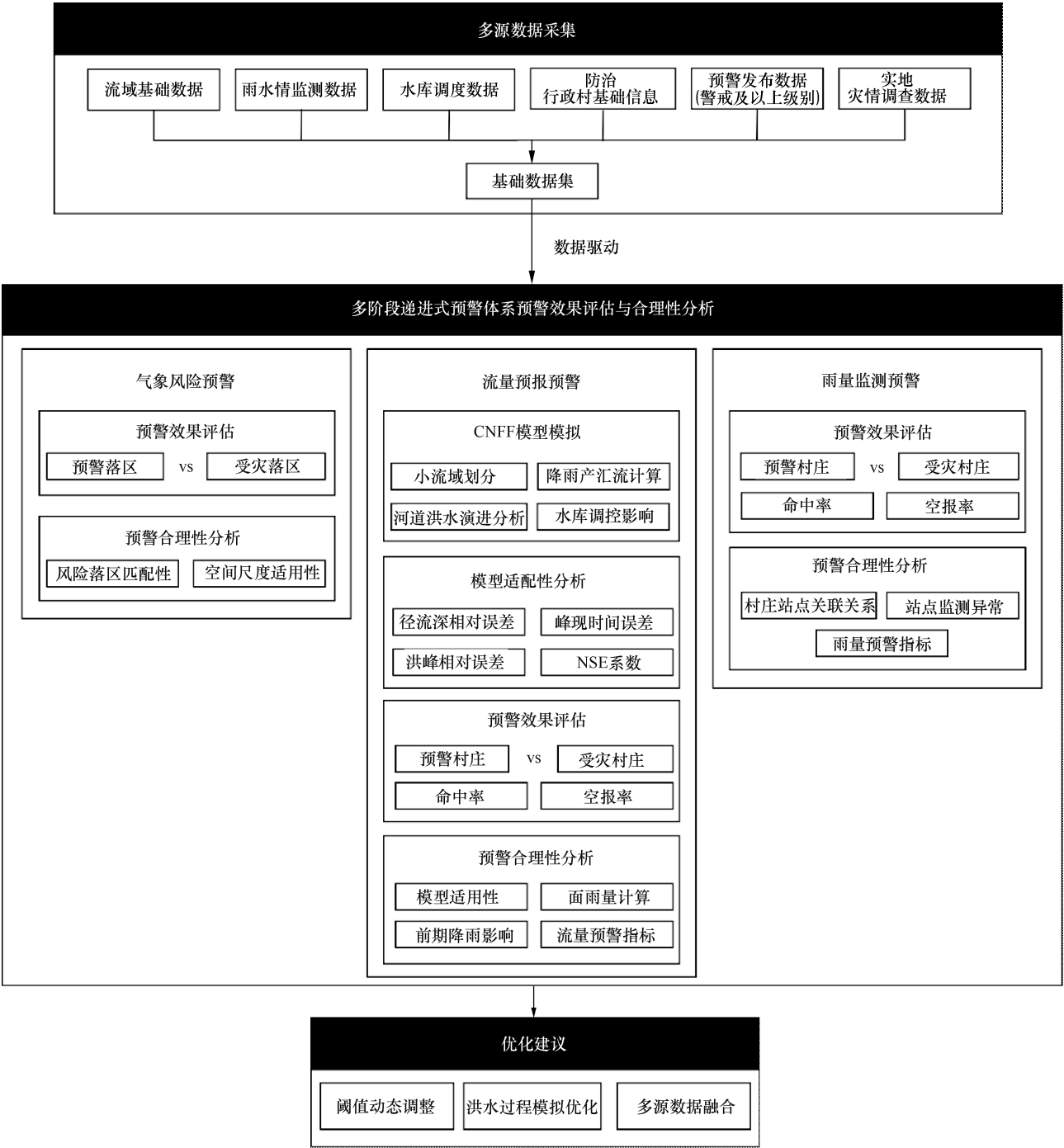


图 2 山洪灾害预警复盘分析技术路线

Fig. 2 Technical framework for post-event analysis of flash flood early warning

表 1 万泉河流域黄色预警区域

Table 1 Areas under yellow-level early warning in Wanquan River Basin

市县名称	乡镇名称
琼海市	万泉镇、石壁镇、阳江镇、龙江镇、会山镇
万宁市	长丰镇、北大镇、南桥镇、三更罗镇
琼中黎族苗族自治县	和平镇、营根镇、湾岭镇、黎母山镇、长征镇、红毛镇、中平镇、吊罗山乡、上安乡
定安县	翰林镇
屯昌县	枫木镇、乌坡镇、南吕镇、南坤镇、坡心镇

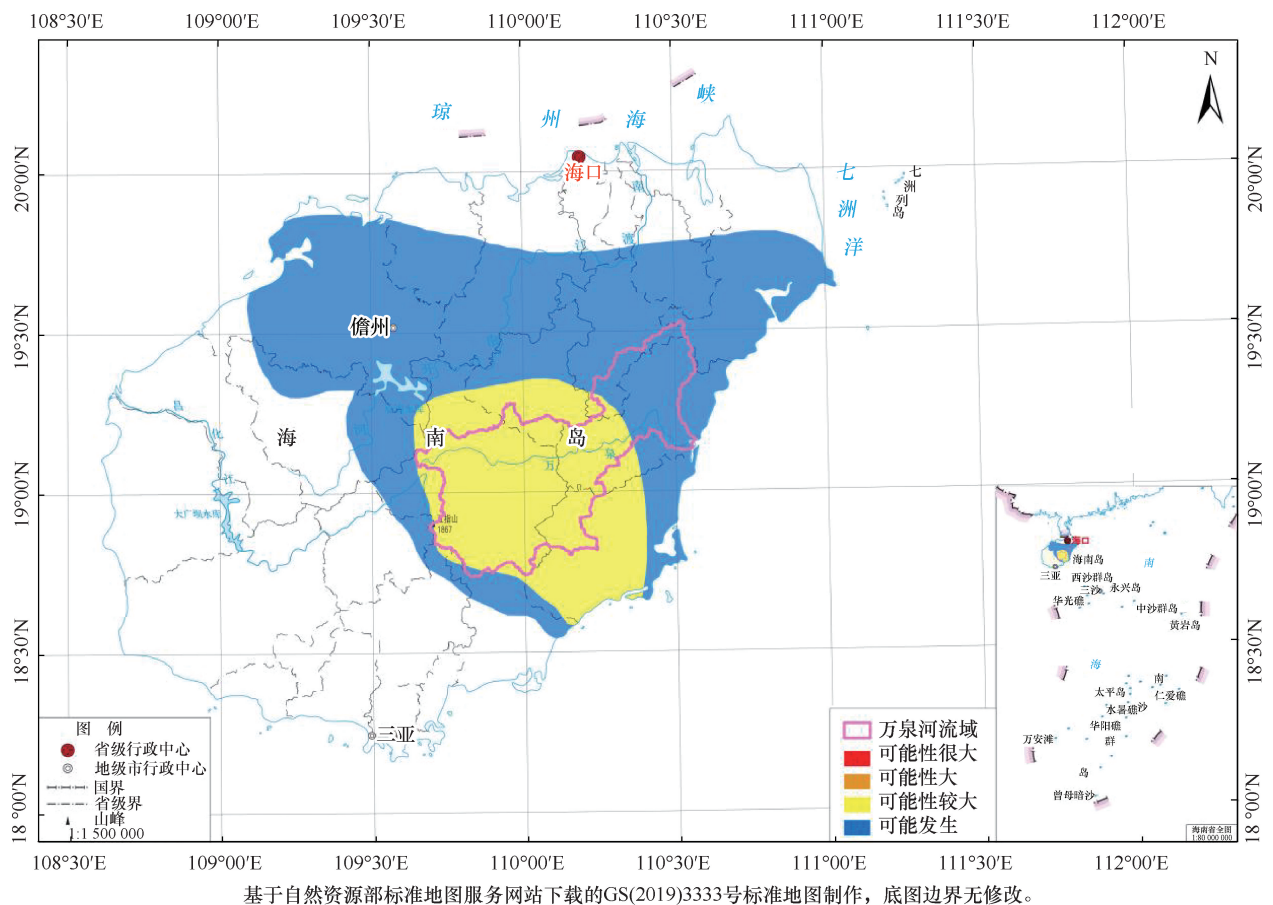


图 3 2024 年 10 月 28 日 20 时山洪灾害气象风险预警图

Fig. 3 Meteorological risk warning map of flash flood at 20 : 00 on October 28, 2024

覆盖范围内,表明气象预警能够有效识别本次极端降雨过程中的高风险区域。但同时也存在预警落区范围相对偏宽、部分预警区域内未发生明显灾情的情况,反映出区域性风险指标在空间精细化表达方面仍存在一定局限。

2.1.2 气象风险预警适用性分析

气象风险预警主要基于气象预报降雨信息,对区域尺度山洪灾害风险进行提前识别,为地方防御部门开展前置部署和风险研判提供参考。由于气象预警通常以县域或更大空间尺度发布,其空间分辨率相对较低,难以直接满足小流域或村庄尺度的精细化防御需求。因此,在山洪灾害监测预警业务体系中,气象风险预警更多作为趋势性提示,需要与流量预报预警和雨量监测预警等手段结合使用,形成多阶段递进式预警体系。

在本次台风“潭美”暴雨过程中,气象风险预警总体能够识别出万泉河流域存在较高的山洪灾害风险,为防御部门提前关注该区域的灾害风险提供了重要参考。从风险落区分布来看,气象预警覆盖范围整体大于实际受灾范围,说明该类预警在区域尺度上具

有一定的风险识别能力,但在具体受灾村庄定位方面仍存在一定偏差。其主要原因可能为气象预警产品通常以较大空间尺度发布,难以反映小流域降雨的空间差异,而山洪灾害往往具有突发性强、空间尺度小等特点。因此,在实际业务运行中,需要将气象风险预警与流量预报预警和雨量监测预警相结合,通过逐级细化预警信息,实现从区域风险识别到村庄级精细化预警的逐步递进。

2.2 流量预报预警

2.2.1 预报模型构建

本文采用中国水利水电科学研究院自主研发的中国山洪水文模型(CNFF)对万泉河流域降雨—径流过程进行模拟。CNFF 模型以小流域为基本计算单元,通过数字高程模型(DEM)提取流域水系结构,构建由小流域、河段和节点组成的水文拓扑网络,实现降雨—产流—汇流过程的模拟计算^[29-30]。

万泉河流域共划分为 261 个小流域单元(见图 4),模型降雨输入采用流域及周边 206 个雨量站的实时监测数据。模型参数主要依据区域水文特性及历史洪水资料确定,并选取 35 场具有代表性的历史洪水

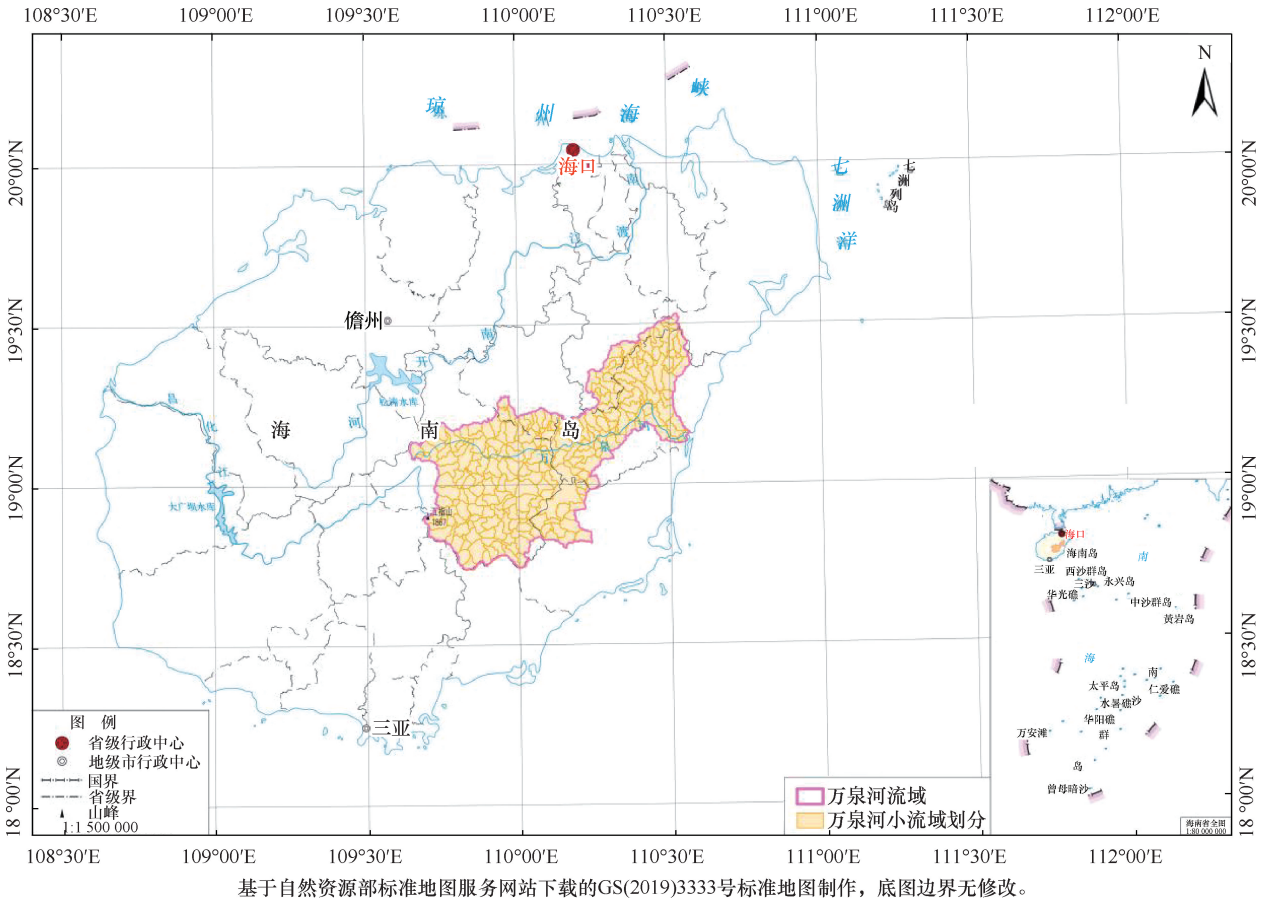


图 4 万泉河 261 个小流域单元

Fig. 4 261 sub-basin units of Wanquan River Basin

过程开展参数率定,率定结果如表 2 所列。

表 2 分布式水文模型参数

Table 2 Parameters of distributed hydrological model

参数符号	参数名	参数数值	参数下限	参数上限
B	蓄水容量分布曲线指数	0.2	0.0	1.0
IMP	不透水面积比例	0.01	0.00	1.00
WUM	上层土壤蓄水容量	20	0	20
WLM	下层土壤蓄水容量	60	0	90
WDM	深层土壤蓄水容量	40	0	90
EX	自由水蓄水容量曲线指数	1.2	1.0	2.0
SM	自由水蓄水库容量	80	0	100
KS	壤中流日出流系数	0.5	0.0	1.0
KG	地下径流日出流系数	0.1	0.0	1.0
KKS	壤中流日消退系数	0.3	0.0	1.0
KKG	地下径流日消退系数	0.1	0.0	1.0

率定结果表明,模型整体拟合效果较好,平均径流深相对误差为 15.5%,平均洪峰流量相对误差为 5.5%,平均峰现时间误差为 0.5 h,平均纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency, *NSE*)为 0.77。结果表明模型参数具有较好的稳定性和适用性,能够较好反映

万泉河流域洪水演进过程,为后续流量预报预警分析提供可靠的模拟基础。

2.2.2 流量预警触发机制

流量预报预警依托海南省山洪灾害监测预警平台中山洪水文模型(CNFF)输出的河段洪水过程,结合河段关联防治行政村的流量预警指标,对村庄开展预警研判。

以琼中黎族苗族自治县和平镇为例。10 月 29 日 9 时平台针对和平镇的 4 个防治行政村(新兴村委会、什介村委会、贝湾村委会、长沙村委会)发出立即转移(危险、极危险)级别流量预警。

平台根据 CNFF 模型模拟得到的河段洪水过程,判断对应防治村关联河段流量是否超过预警阈值,从而触发相应等级的流量预警。10 月 29 日 9 时,和平镇长沙村委会所在河段模拟预报洪峰流量为 166 m³/s,超村庄危险级别预警指标 152 m³/s(见表 3),触发立即转移(危险)级别预警。

2.2.3 流量预报预警命中情况分析

2024 年 10 月 28 日 8 时—10 月 31 日 8 时期间,万泉河流域内共产生流量预报预警 64 村次,涉及

表 3 长沙村委会关联河段流量预警指标

Table 3 Discharge warning thresholds for river reaches associated with Changsha Village Committee

危险等级	预警阈值/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
关注(提醒注意)	71.5
警戒(准备转移)	89.4
危险(立即转移)	152.0
极危险(立即转移)	186.0

4 个市县, 分别为琼海市、琼中黎族苗族自治县、屯昌县和定安县。全流域流量预报预警统计情况如表 4 所列, 立即转移(危险、极危险)级别预警涉及防治行政村 29 个, 准备转移(警戒)级别预警涉及防治行政村 34 个。

2.2.4 流量预报预警适用性分析

流量预报预警适用性主要受模型模拟能力、面雨量计算精度、前期降雨条件和流量预警指标设置等因素影响, 本文从上述 4 个方面开展分析。

(1)在模型模拟能力方面, 海南省山洪灾害监测预警平台构建的山洪水文模型 CNFF 用于模拟降雨入渗、径流过程以及洪水传播等过程。若水文模型的参

表 4 万泉河流域流量监测预警情况表

Table 4 Discharge monitoring and early warning status in Wanquan River Basin

序 号	预警级别	涉及市县/个	涉及乡镇/个	涉及防治行政村/个
1	立即转移(危险、极危险)	4	12	29
2	准备转移(警戒)	4	17	34
3	提醒注意(关注)	1	1	1

数选择不合理, 则会导致模拟结果与实际情况存在较大偏差。本次强降雨过程基于万泉河流域 206 个雨量结合调研的实际受灾情况, 重点关注防治行政村的警戒及以上级别预警, 命中率为 71.43%, 空报率为 28.57%。

站的实时监测数据对流域内的河段进行洪水预报, 考虑流域内两座大型水库(红岭水库、牛路岭水库)的调度影响, 选取有实测流量数据的加积水文站与模型模拟流量进行分析对比, 分析结果表明模拟洪峰与实测洪峰流量接近, 但模拟洪峰出现时间更早(见图 5)。其中, *NSE* 系数为 0.45, 表明模型在模拟洪峰过程中具有中等以上的拟合能力, 但峰值出现

场 景			考虑上游两座大型水库影响(红岭水库+牛路岭水库)							
场次起止时间			2024/10/26 12:00—2024/11/02 12:00							
累计降雨量/mm	净雨/mm	基流/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	实测径流深/mm	计算径流深/mm	径流深相对误差/%	实测洪峰流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	计算洪峰流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	洪峰相对误差/%	峰现时间误差/h	<i>NSE</i> 系数
736.9	686.8	0	496.7	385.44	-22.4	8 400	8 419.3	0.2	-21	0.45

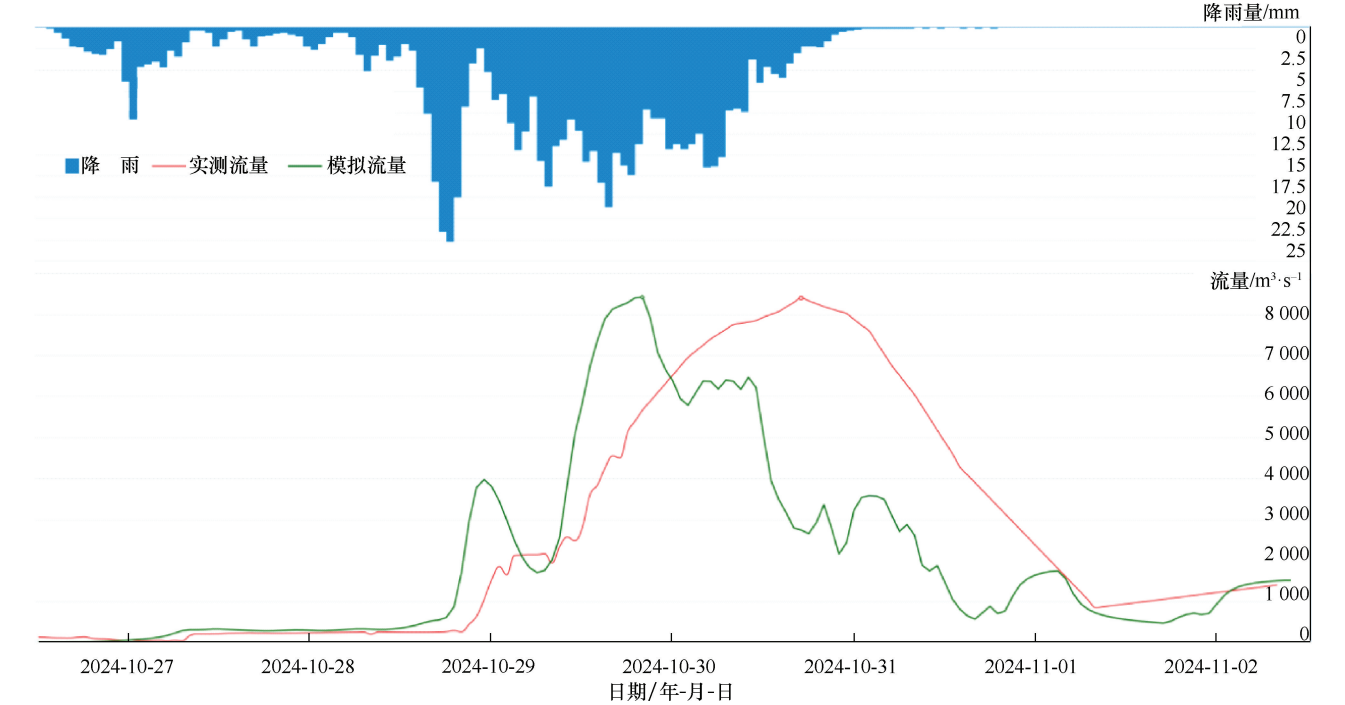


图 5 加积水文站洪水模拟评价结果

Fig. 5 Evaluation results of flood simulation at Jiaji hydrological station

偏早 21 h, 这主要与中小型水库蓄水调节过程未被充分纳入模型有关。此外, 径流深相对误差为-22. 4%, 显示在强降雨集中区间内模型可能存在产流量低估现象, 后续可通过参数予以优化。

(2)在面雨量计算方面, 比较了万泉河流域内 23 个乡镇 28 日 8 时—31 日 8 时 72 h 累计雨量上游站点平均值与面雨量的差值, 结果表明仅 10 个乡镇的差值均小于 30 mm, 结合流域范围考虑的乡镇面雨量计算方法有待优化。在复杂地形和强降雨条件下, 泰森多边形方法难以反映降雨空间差异。相比之下, 反距离加权(IDW)方法能够增强对局地极端降雨的响应能力, 而克里金插值方法能够更好地刻画降雨空间结构特征, 从而提高小流域尺度面雨量的代表性。未来可结合流域地形特征和站网密度, 探索多种插值方法的组合应用, 以提高面雨量计算精度。

(3)在前期降雨影响方面, 考虑洪水起涨前的模拟土湿, 收集预警村 28 日 8 时土壤湿度以及前三天降雨量、前十天降雨量数据, 结果显示所有预警村 28 日 8 时的土湿均大于 80%(见表 5), 较为合理。

表 5 前期影响雨量及土湿

Table 5 Antecedent rainfall and soil moisture

市 县	乡 镇	前 3 d 降 雨/mm	前 10 d 降 雨/mm	28 日 8 时土 壤湿度/%
琼海市	嘉积镇	4. 3	4. 7	92. 66
	石壁镇	5. 8	6. 0	89. 84
	博鳌镇	1. 0	1. 2	86. 46
	大路镇	9. 5	9. 7	99. 99
	龙江镇	0. 0	0. 0	94. 43
	塔洋镇	6. 2	6. 6	97. 62
	万泉镇	5. 4	6. 4	83. 34
	长坡镇	1. 8	1. 8	88. 78
琼中黎族苗 族自治县	吊罗山乡	36. 3	60. 5	100. 00
	和平镇	51. 0	69. 2	100. 00
	上安乡	28. 2	42. 1	100. 00
	湾岭镇	26. 3	30. 2	99. 81
	营根镇	32. 2	40. 9	99. 81
	长征镇	54. 0	67. 8	99. 97
	中平镇	42. 9	52. 9	99. 81
定 安	翰林镇	17. 4	19. 7	95. 38
	岭口镇	0. 0	0. 0	93. 22
屯 昌	枫木镇	16. 9	20. 4	98. 81
	乌坡镇	3. 3	4. 0	98. 18
	南吕镇	15. 8	19. 2	99. 70

(4)在流量预警指标设置方面, 通过对比村庄防洪能力、设计洪水和预警指标值, 分析表明部分村庄的流量预警指标和现状防洪能力不匹配, 存在防洪能力 100 a 一遇的村庄在 20 a 一遇的设计洪水下预警命中受灾等情况, 说明防洪评估体系与预警指标之间存

在脱节问题。这类偏差可能由地形变化、工程设施老化或预警指标滞后于风险变化所致, 未来应推动动态化更新机制与人工校验机制共同介入。

2. 3 雨量监测预警

2. 3. 1 雨量监测预警触发机制

雨量监测预警以关联雨量站实测降雨量为依据, 将不同时段累计雨量与防治行政村静态雨量预警指标进行对比, 当降雨量超过相应阈值时触发不同等级的预警。该方法具有响应快、操作性强的特点。

以琼中黎族苗族自治县和平镇为例。10 月 29 日 11 时平台针对和平镇的 4 个防治行政村(贝湾村委会、玺队村委会、新兴村委会、干碌村委会)发出立即转移(危险、极危险)级别雨量预警。

平台根据关联雨量站实时监测降雨过程, 结合各防治村静态雨量预警指标, 判定是否触发雨量监测预警。台风“潭美”强降雨期间, 和平镇触发雨量预警、发布立即转移预警的 4 个防治村均由关联的同一测站—乘坡站触发, 乘坡站在 10 月 28 日 8 时—31 日 8 时期间, 最大 1 h 降雨量 119. 5 mm(10 月 28 日 19 时至 20 时), 超 4 个防治村的静态预警指标(危险级别)(见表 6)。

表 6 静态雨量预警指标

Table 6 Static rainfall early warning thresholds

村 庄	时间/h	提醒注意	准备转移	立即转移	
		关注/mm	警戒/mm	危险/mm	极危险/mm
贝湾村委会	1	64	80	106	122
玺队村委会	1	65	81	107	123
新兴村委会	1	65	81	108	124
干碌村委会	1	64	81	107	122

2. 3. 2 雨量监测预警命中情况分析

2024 年 10 月 28 日 8 时至 10 月 31 日 8 时期间, 万泉河流域内共产生雨量监测预警 230 村次, 涉及 5 个市县, 分别为琼海市、万宁市、琼中黎族苗族自治县、屯昌县和定安县。全流域雨量监测预警统计情况如表 7 所列, 立即转移(危险、极危险)级别预警涉及防治行政村 4 个, 准备转移(警戒)级别预警涉及防治行政村 48 个。

表 7 万泉河流域雨量监测预警情况表

Table 7 Rainfall monitoring and early warning status in Wanquan River Basin

序 号	预警级别	涉及市 县/个	涉及乡 镇/个	涉及防治 行政村/个
1	立即转移(危险、极危险)	1	1	4
2	准备转移(警戒)	5	13	48
3	提醒注意(关注)	3	15	72

结合调研的实际受灾情况, 重点关注防治行政村的警戒及以上级别预警, 命中率为 71.43%, 空报率为 28.57%。

2.3.3 雨量监测预警适用性分析

雨量监测预警适用性主要受村庄关联雨量站设置、雨量站监测数据质量和雨量预警指标设置等因素影响, 本文从上述 3 个方面开展分析。

(1) 在村庄关联雨量站设置方面, 当前关联关系主要依据村庄周边 5 km 范围及其上游小流域内雨量站分布确定。通过分析受灾村庄与关联站点的空间位置关系, 现有村庄—雨量站关联关系总体较为合理。

(2) 在雨量站监测数据质量方面, 雨量站点通常用于监测降雨情况, 并根据一定的阈值进行预警, 若雨量站点存在异常, 雨量计可能无法准确地记录降雨量, 会导致预警系统误判或延迟预警。在本次强降雨过程中, 通过对比触发预警站点与周边站点的监测数据, 无明显冒大数现象, 个别站点存在冒小数现象, 但对雨量预警无明显影响。

(3) 在雨量预警指标方面, 通过对比村庄防洪能力、预警指标和关联测站的设计暴雨值, 分析表明部分村庄的雨量预警指标和现状防洪能力不匹配, 存在防洪能力 100 a 一遇的村庄在 10 a 一遇的设计暴雨下仍然预警等情况, 因此海南省的村庄防洪能力评估与雨量预警指标设置仍需进一步优化。

3 结论与建议

基于 2024 年第 20 号台风“潭美”残涡和冷空气共同影响引发的万泉河流域极端暴雨与山洪灾害过程, 结合海南省山洪灾害监测预警平台运行数据与实地灾情调查结果, 对山洪灾害监测预警系统的运行效果及其关键影响因素进行了复盘分析, 得到以下主要结论。

(1) 在台风“潭美”引发的极端暴雨过程中, 海南省山洪灾害监测预警平台总体具备较好的风险识别与预判能力, 但在村庄尺度的预警命中精度方面仍存在明显提升空间。台风“潭美”强降雨期间, 平台共发布气象风险预警 3 次、流量预警 64 次、雨量预警 230 次, 其中准备转移及以上级别的预警 115 次, 涉及 70 个防治行政村。经与调研数据核实, 有效命中预警村庄为 50 个, 命中率达 71.43%, 在总体趋势识别和信息发布方面具有一定有效性。但在村庄尺度上, 仍存在一定比例的空报现象, 表明预警结果与实际受灾分布之间尚未完全匹配。

(2) 流量预报预警中模型模拟精度并非制约预警

效果的唯一因素, 预警指标与防洪能力之间的匹配程度是影响预警命中的关键约束条件。基于 CNFF 模型的洪水模拟结果表明, 模型在洪峰量级刻画方面具有中等以上的适用性, 但在洪峰时序和产流量估计方面仍存在一定偏差。进一步分析发现, 即便在模型模拟结果总体合理的情况下, 部分防治行政村仍出现防洪能力评估较高但在相对低重现期洪水条件下发生预警命中并实际受灾的情况, 说明防洪能力评估成果与流量、雨量预警阈值之间存在脱节, 是造成预警偏差的重要原因。

(3) 单一依赖静态阈值的山洪灾害预警方式难以适应极端气候背景下快速变化的风险环境。现有预警指标体系在反映地形变化、工程条件演变及暴露要素调整等方面存在一定滞后性, 限制了预警系统在极端事件中的适应性。

基于上述研究, 提出以下改进建议: 一是建立预警阈值动态更新机制, 结合实时降雨条件和流域状态对预警指标进行滚动修正; 二是加强水库调度及工程措施影响的建模刻画, 提高洪水过程模拟精度; 三是依托数字孪生小流域技术和多源数据融合手段, 提升山洪灾害监测预警系统的精细化水平与实战支撑能力; 四是关注预警流程时效性对预警效果的影响, 并在后续研究中结合业务运行过程开展进一步分析。

参考文献 (References):

[1] 马强, 李青, 郝思佳, 等. 四川汉源“7·20”山洪泥石流灾害复盘分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 204-215.
MA Q, LI Q, HAO S J, et al. Review and analysis of “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan, Sichuan [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 204-215.

[2] 中华人民共和国应急管理部. 2024 年全国自然灾害基本情况发布[R]. 北京: 中华人民共和国应急管理部, 2025.
Ministry of Emergency Management of the People’s Republic of China. Overview of Natural Disasters in China in 2024[R]. Beijing: Ministry of Emergency Management of the People’s Republic of China, 2025.

[3] 中华人民共和国应急管理部. 2024 年全国十大自然灾害发布[R]. 北京: 中华人民共和国应急管理部, 2025.
Ministry of Emergency Management of the People’s Republic of China. Top Ten Natural Disasters in China in 2024[R]. Beijing: Ministry of Emergency Management of the People’s Republic of China, 2025.

[4] 李姣, 王丽荣, 王洁, 等. 基于动态临界雨量的山洪灾害预警技术研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(5): 235-242.
LI J, WANG L R, WANG J, et al. Research on early warning technology of mountain flood disasters based on dynamic critical rainfall[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(5): 235-242.

- [5] 刘昌军,吕娟,翟晓燕,等. 河南“21·7”暴雨洪水风险模拟及对比分析[J]. 水利水电快报, 2021, 42(9): 8-14.
LIU C J, LYU J, ZHAI X Y, et al. Risk simulation and comparative analysis of “21·7” heavy rainfall and flood in Henan Province[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(9): 8-14.
- [6] 马进. 基于SCS模型和分布式水文模型的小流域山洪灾害研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)自然科学, 2022(4): 214-216.
MA J. Study on flash flood disasters in small watersheds based on the SCS model and distributed hydrological model[J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full-text Edition) Natural Science, 2022(4): 214-216.
- [7] 翟晓燕,郭良,刘荣华,等. 中国山洪水文模型研制与应用:以安徽省中小流域为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(5): 1018-1036.
ZHAI X Y, GUO L, LIU R H, et al. Development and application of China flash flood hydrological model: Case study in small and medium-sized catchments of Anhui Province[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(5): 1018-1036.
- [8] 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.
LIU Z Y, YANG D W, HU J W. Dynamic critical rainfall-based torrential flood early warning for medium-small rivers[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3): 317-321.
- [9] 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.
- [10] 孙东亚,翟晓燕,郭一君,等. 山洪灾害雨量预警指标分析方法评述与展望[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(5): 1-7.
SUN D Y, ZHAI X Y, GUO Y J, et al. Review and outlook on the analysis methods of rainfall warning indicators for flash flood early warning[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(5): 1-7.
- [11] 陈桂亚,袁雅鸣. 山洪灾害临界雨量分析计算方法研究[J]. 人民长江, 2005, 36(12): 40-43.
CHEN G Y, YUAN Y M. Research on analysis and computation method of critical precipitation amount of torrential flood[J]. Yangtze River, 2005, 36(12): 40-43.
- [12] 张连成,司嘉怡,胡列群,等. 基于两种降水数据的苏巴什水库暴雨山洪淹没模拟及致灾临界雨量阈值研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(7): 1147-1155.
ZHANG L C, SI J Y, HU L Q, et al. Simulation of storm flood inundation and critical rainfall threshold for disaster in subash reservoir based on two types of precipitation data[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(7): 1147-1155.
- [13] 林志强,洪健昌,尼玛吉,等. 基于HBV模型的尼洋曲流域上游洪水致灾临界面雨量研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 22-26.
LIN Z Q, HONG J C, NI M J, et al. Critical rainfall inducing flood disaster of nyang river based on HBV model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(4): 22-26.
- [14] 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.
ZHAI X Y, GUO L, LIU R H, et al. Impact assessment of antecedent soil moisture conditions and rainfall variability on flash flood warning index at catchment scale[J]. Geographical Research, 2019, 38(12): 2957-2965.
- [15] 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.
YAN B W, LIU Y, JIANG H N, et al. Study on dynamic critical rainfall warning index considering spatial heterogeneity of rainfall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(3): 342-348.
- [16] 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.
MA X X, WANG H L, CHENG X, et al. Mountain torrent disaster three-level warning model based on rainfall uncertainty[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2): 297-307.
- [17] 訾丽,杨文发,袁雅鸣,等. 基于临界雨量的山洪灾害预警技术试验研究[J]. 人民长江, 2015, 46(11): 10-14.
ZI L, YANG W F, YUAN Y M, et al. Experimental study of forecasting and early-warning technology for mountain torrent disasters based on rainfall threshold[J]. Yangtze River, 2015, 46(11): 10-14.
- [18] 龙丹丹,李明,储茵,等. 巢湖典型流域水文模拟及缺资料地区参数移用研究[J]. 水利发展研究, 2026, 26(5): 97-108.
LONG Dandan, LI Ming, CHU Yin, et al. Hydrological simulation of typical watershed in Chaohu Lake and parameter extrapolation to an ungauged basin[J]. Water Resources Development Research, 2026, 26(5): 97-108.
- [19] 邢子康,马苗苗,文磊,等. HEC-HMS模型在缺资料地区山洪预报的应用研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(1): 54-61.
XING Z K, MA M M, WEN L, et al. Application of HEC-HMS model in mountain flood forecasting in data deficient areas[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(1): 54-61.
- [20] 雷声,刘业伟. 递进式山洪灾害风险预警研究与实践[J]. 水电能源科学, 2020, 38(7): 87-90.
LEI S, LIU Y W. Risk early warning research of progressive-type mountain torrent disaster and practice[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(7): 87-90.
- [21] 耿蔚,崔甲,杨杰,等. 融合遥感与大数据技术对四川盆地城市洪涝灾害时空动态监测与评估的应用[J]. 高原山地气象研究, 2025, 45(S1): 69-74.
GENG W, CUI J, YANG J, et al. Application of integrated remote

sensing and big data technologies for spatiotemporal monitoring and assessment of urban flood disasters in the Sichuan Basin[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2025, 45(S1): 69-74.

[22] 詹昌洵, 张挺, 蒋嘉伟. 基于多源数据的山区小流域降水融合模型[J]. 水科学进展, 2024, 35(1): 74-84.

ZHAN C X, ZHANG T, JIANG J X. Multi-source data-based precipitation fusion model for small mountainous watersheds [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1): 74-84.

[23] 王燕婷, 杨耘, 刘艳, 等. 多源异构遥感影像的半干旱区洪涝水体识别与变化监测[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(2): 45-58.

WANG Y T, YANG Y, LIU Y, et al. Flood water body identification and change monitoring in semi-arid areas using multi-source heterogeneous remote sensing images [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(2): 45-58.

[24] 董林, 贾莉, 王月冬, 等. 气候变化背景下极端天气的新特征与防御技术对策[J]. 中国工程科学, 2026, 28(2): 275-286.

Dong L, Jia L, Wang Y D, et al. New characteristics of extreme weather in the context of climate change and defense countermeasures [J]. Strategic Study of CAE, 2026, 28(2): 275-286.

[25] 刘子霞, 王红旗, 邹毅, 等. 涉水工程影响下的寨岗河流域山洪灾害多情景模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 15-31.

LIU Z X, WANG H Q, ZOU Y, et al. Multi-scenario simulation study on flash floods in the Zhaigang River Basin under the influence of hydraulic engineering [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 15-31.

[26] 苏广利, 孙秀珍. 府谷县黄土高原山洪灾害预警指标探析[J]. 陕西水利, 2024(11): 70-72.

SU G L, SUN X Z. Discussion on early warning indicators of flash flood disasters in the loess plateau of Fugu County[J]. Shaanxi Water Resources, 2024(11): 70-72.

[27] 湛芸, 曾智琳, 王协康, 等. 华南丘陵区马贵河小流域暴雨山洪灾害强降水特征[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(3): 158-164.

CHEN Y, ZENG Z L, WANG X K, et al. Characteristics of torrent-causing heavy rainfalls in Magui hilly watershed of South China[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(3): 158-164.

[28] 张梦园, 解建仓, 杨雪. 陕西省山洪灾害时空异质特征及驱动力研究[J]. 人民黄河, 2025, 47(2): 67-73.

ZHANG M Y, XIE J C, YANG X. Spatial-temporal heterogeneity and driving forces of flash flood disasters in Shaanxi Province[J]. Yellow River, 2025, 47(2): 67-73.

[29] ZHAI X Y, GUO L, LIU R H, et al. Rainfall threshold determination for flash flood warning in mountainous catchments with consideration of antecedent soil moisture and rainfall pattern[J]. Natural Hazards, 2018, 94(2): 605-625.

[30] WANG Y L, LIU R H, GUO L, et al. Forecasting and providing warnings of flash floods for ungauged mountainous areas based on a distributed hydrological model[J]. Water, 2017, 9(10): 776.

(责任编辑 王海锋)