Journal of Water Resources Research 水资源研究, 2026, 15(4), 408-421
Published Online August 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jwrr
https://doi.org/10.12677/jwrr.2026.154044

中小河流洪水预警误差溯源与阈值可信度分析

——以重庆市永川区为例

罗声委[1]，谢　谦[2]，余双琪[3]

[1]重庆市永川区水利局，重庆
[2]重庆市水旱灾害防御中心，重庆
[3]重庆市水文监测总站，重庆

收稿日期：2026年6月24日；录用日期：2026年8月2日；发布日期：2026年8月27日

摘　要

重庆市中小河流涨水风险提示产品在业务运行中存在较多空报、漏报。为厘清误差来源并定量评价雨量阈值可信度，本文以永川区为例，基于2023~2025年19期44次预警产品、92个雨量站逐日降水量和4个控制水文站水位资料，界定了误差溯源与阈值可信度的概念内涵，建立“降雨预报－产流条件－监测数据－阈值设定”四环节定量归因决策树，采用泰森加权面雨量和前期影响雨量指数逐事件定量复盘，并以命中率、空报率、临界成功指数及其95%置信区间开展预警检验。结果表明：总体命中率84.6%、空报率75.0%、临界成功指数23.9%；33次空报中降雨预报偏差占76% (复算面雨量平均低于阈值33.9 mm)，产流条件偏差占18%，数据支撑不足占6%，未发现可归因于阈值设定的失误；2次漏报均因实况降雨达到阈值而预报未报出。现有雨量阈值未见系统性偏差，误差主要来源于降雨预报不确定性，业务优化应优先提升降雨预报精度，并逐步探索考虑前期影响雨量的动态阈值。

关键词

中小河流，涨水风险提示，误差溯源，雨量阈值，阈值可信度，前期影响雨量，永川区

Analysis of Error Attribution and Threshold Reliability of Flood Warnings for Small and Medium-Sized Rivers

—A Case Study of Yongchuan District, Chongqing

Shengwei Luo[1], Qian Xie[2], Shuangqi Yu[3]

[1]Yongchuan District Water Resources Bureau, Chongqing
[2]Chongqing Flood and Drought Disaster Prevention Center, Chongqing
[3]Chongqing Hydrologic Monitoring Station, Chongqing

作者简介：余双琪(1995.07-)，硕士研究生，湖北宜昌人，工程师，主要从事水文情报预报工作，Email: 1042105660@qq.com

文章引用: 罗声委, 谢谦, 余双琪. 中小河流洪水预警误差溯源与阈值可信度分析[J]. 水资源研究, 2026, 15(4): 408-421.
DOI: 10.12677/jwrr.2026.154044

Received: June 24, 2026; accepted: August 2, 2026; published: August 27, 2026

Abstract

The flood-rise risk warning product for small and medium-sized rivers in Chongqing, China, suffers frequent false alarms and missed events in operational application. To clarify the sources of error and quantitatively evaluate the reliability of rainfall thresholds, taking Yongchuan District as a case study and using 44 warnings from 19 product issues during 2023~2025, daily precipitation from 92 rain gauges and water-level records from 4 control hydrological stations, this paper defines the concepts of error attribution and threshold reliability, and establishes a four-step quantitative attribution decision tree covering rainfall forecasting, runoff generation, monitoring data support and threshold setting. Each warning is re-analyzed event by event with Thiessen-weighted areal rainfall and the antecedent precipitation index, and evaluated by the probability of detection (POD), false alarm ratio (FAR) and critical success index (CSI) with 95% confidence intervals. The overall POD is 84.6%, the FAR 75.0% and the CSI 23.9%. Of the 33 false alarms, rainfall forecast bias accounts for 76% (recomputed areal rainfall averaging 33.9 mm below threshold), runoff-generation bias for 18% and insufficient data support for 6%; none is attributed to threshold setting. Both missed events occurred because the forecast failed to capture rainfall that reached the threshold. The existing rainfall thresholds show no systematic deficiency; errors mainly originate from rainfall forecast uncertainty, so operational improvement should prioritize improving the accuracy of rainfall forecasts and gradually exploring dynamic thresholds accounting for antecedent soil moisture.

Keywords

Small and Medium-Sized Rivers, Flood-Rise Risk Warning, Error Attribution, Rainfall Threshold, Threshold Reliability, Antecedent Precipitation, Yongchuan District

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

重庆市地处长江上游，境内流域面积 50 km^2 以上的河流达 510 条，其中中小河流占绝大多数。受山地地形和局地暴雨影响，中小河流洪水具有突发性强、汇流时间短、陡涨陡落的特点，洪水历时通常仅有 2~12 h，预警预报难度大[1]。受产汇流时间短、监测资料基础薄弱和降水预报不确定性等因素制约，中小河流洪水预报精度和预见期难以兼顾[2] [3]。为突破中小河流洪水预见期短、防御难度大的限制，重庆市按照雨水情监测预报“三道防线”建设要求，提出了中小河流涨水风险预警概念，建立了涨水风险等级和阈值标准，将洪水预警预见期从原来的 1~6 h 提前至 24 h 以上[4]。该模式采用气象水文耦合预报的工作方式：由水文部门根据各河流的流域特征拟定红、橙、黄、蓝四个等级的雨量预警阈值，当气象部门的降雨预报达到或超过相应阈值时，即发布涨水风险提示。该模式在 2023 年万州“7·4”极端暴雨洪水中得到成功应用，提前 41 h 发布预警[4]。

围绕中小河流洪水预警，已有研究主要集中在三个方面。一是雨量预警指标与阈值的确定方法：胡余忠等[5]基于山洪灾害调查评价成果确定了中小河流防洪特征水位与致灾临界雨量；孙东亚等[6]系统评述了经验法、水位–流量反推法、动态临界雨量法等雨量预警指标方法的适用性与不确定性来源。二是前期土壤湿度对预警指标的影响：翟晓燕等[7]定量评估表明土壤饱和率由 0.20 增至 0.80 时临界雨量减小 26.8%~31.8%；韩俊太等[8]、狄靖月等[9]分别提出了考虑前期湿润状况的动态临界雨量分级预警方法。三是预警效果检验：王振亚等[10]采用命中率、漏报率、空报率检验了缺资料中小河流预警阈值订正效果；陈睿智等[11]以漏报率、命中率、误报

率评估了中小河流警戒水位拟定方案；刘泽文和熊金和[12]在山区性中小河流检验了动态临界雨量的预警成功率。在重庆本地，彭万兵等[13]基于降雨驱动指标建立了小流域山洪灾害预警模型。

在气象－水文耦合预报误差传递方面，包红军等[14]指出降水预报误差会传递甚至放大到洪水预报过程；丛琳沂等[15]发现随预见期延长，降雨量及中心范围误差显著增大；高玉芳等[16]表明不同降水产品驱动的径流模拟结果差异明显；屈博等[17]定量揭示了降水不确定性经水文过程传递后随预见期的变化规律；谷洪钦等[18]则通过综合多源不确定性的概率预报试验提升了洪水预报的可信度表达。

总体来看，已有研究多侧重于阈值拟定方法或单一环节的检验评估，针对已投入业务运行的预警产品开展全环节、逐事件、定量化的误差溯源，并在此基础上定量评价雨量阈值可信度的研究仍相对缺乏。重庆市中小河流涨水风险提示产品在长期运行中成功率偏低，常出现空报、漏报等情况，期间重庆市水文监测总站曾对雨量阈值进行动态调整，效果仍不理想。为切实提升预警产品效能，需分析厘清误差来源，为后续针对性地精进产品提供依据。从气象水文耦合预报过程来看，误差可能产生于降雨预报、产汇流计算、监测数据支撑、雨量阈值设定等多个环节。

本研究以重庆市永川区境内中小河流为案例，通过对近三年所有预警产品的逐一回溯分析，建立“降雨预报－产流条件－监测数据－阈值设定”四环节定量归因决策树，量化各类误差的占比，并基于预警检验指标及其置信区间对雨量阈值的可信度做出客观评价，以期为重庆市水文预警业务优化提供方向，并为同类预警产品的检验评估提供方法参考。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

永川区位于重庆市西部，境内中小河流均属长江水系。本研究聚焦于该区四条中小河流流域：九龙河(流域

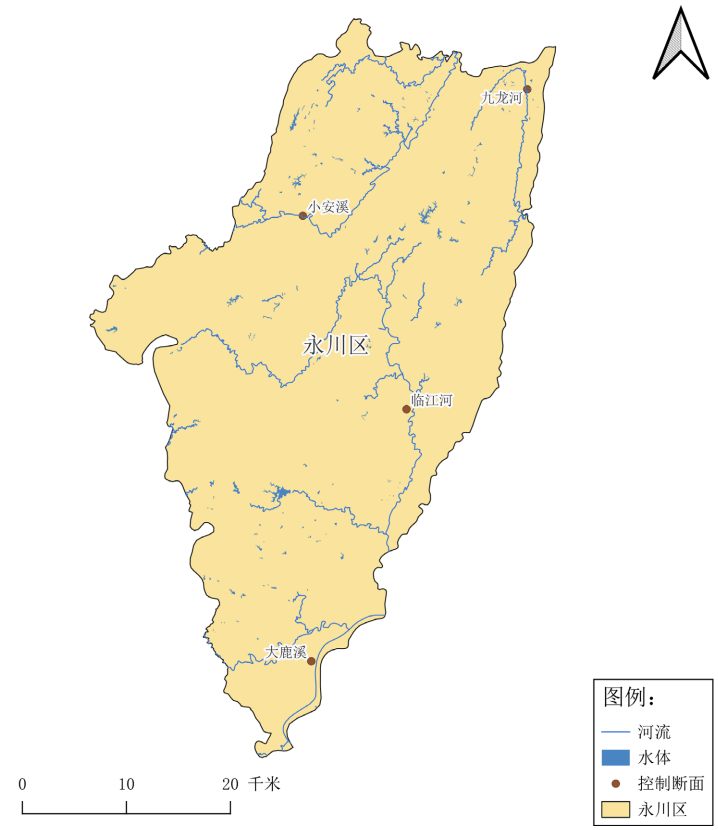


图 1. 研究区范围

面积 212 km²)、大鹿溪(流域面积 418 km²)、临江河(流域面积 733 km²)和小安溪(流域面积 1671 km²，永川境内部分)，如图 1 所示。各河流均设有水文监测站点，其中九龙河设金龙站，大鹿溪设朱沱(石碓窝)站，临江河设临江(隆顺)站，小安溪设虎峰、双石站。由于龙溪河在重庆市内流域面积较小，未设水文站与水位站，不具备涨水过程的定量验证条件，因此不纳入本次研究的误差统计样本。但从水旱灾害防御安全角度出发，该河流仍作为中小河流涨水风险提示产品的预警对象，纳入预警发布范围。

2.2. 数据来源

本研究收集了 2023 年至 2025 年期间，重庆市水文监测总站发布的全部《中小河流涨水风险提示》产品，从中筛选出“影响河流”包含上述四条河流的产品期次，共计 19 期 44 次。

《中小河流涨水风险提示》包含产品期数、预测时间、风险等级、风险区县、影响河流、影响人口、影响乡镇等信息。实测水位数据来源于区县水文监测站点，实况降雨量数据来源于流域内气象站点和水文站点的实测雨量。具体地，实况降雨采用永川区 92 个雨量站(2024 年、2025 年为 93 个)的逐日降水量资料(08 时~次日 08 时)，流域面雨量按泰森多边形权重加权计算；实测水位采用 4 个控制水文站观测资料，其中 2023 年为每日 8 时、20 时两次观测，2024 年起提升为逐小时观测。漏报事件的涨水判定以业务台账或逐小时资料记录的实际涨幅为主要依据，逐日平均水位变化仅用于辅助核查事件期间水位响应过程。降雨预报采用重庆市气象局提供的网格降水量滚动预报产品，空间分辨率 2.5 km，预见期 72 h，为《中小河流涨水风险提示》的预报依据：气象部门在滚动预报中同步对照水文部门拟定的各等级雨量阈值预测涨水风险，当全市有中小河流达到蓝色及以上风险时生成提示产品，经与重庆市水文监测总站会商后，由重庆市水利局与重庆市气象局联合发布。

2.3. 雨量预警阈值

根据重庆市中小河流涨水风险等级划分标准，涨水风险按照预报水位的涨幅大小以及与警戒保证水位的关系分为四个等级：涨幅 1~3 m 且不超警戒水位为蓝色(有一定风险)、涨幅 3~5 m 且不超警戒水位为黄色(风险较高)、涨幅 5~8 m 或超警戒水位为橙色(风险高)、涨幅 8 m 以上或超保证水位为红色(风险很高) [2]。在此基础上，由水文部门根据各河流的流域特征及历史洪水资料拟定各风险等级对应的雨量预警阈值。永川区四条中小河流的最新雨量预警阈值如表 1 所示。

表 1. 永川区中小河流雨量预警阈值(单位：mm/d)

河流	蓝色	黄色	橙色	红色
九龙河	60	80	100	130
大鹿溪	40	60	120	150
临江河	75	100	120	150
小安溪	40	70	90	110

2.4. 基本概念界定

1) 误差溯源。本文所称误差溯源，是指对每一次预警失误(空报或漏报)，沿“降雨预报→产流条件→监测数据→阈值设定”四个环节，依据可复核的定量判据逐级排查，将误差归因于首个被证实失配环节的过程。与定性复盘相比，误差溯源要求每一环节的判定均有明确的量化指标、数据来源和判别标准，使归因过程可复核、归因结果可统计。

2) 阈值可信度。本文所称阈值可信度，是指在排除降雨预报偏差、产流条件异常和监测数据不足等环节的影响后，雨量阈值判定与实况涨水的一致程度，采用预警检验指标(命中率、空报率、临界成功指数)及其 95%置

信区间定量度量。若排除其他环节后仍存在阈值失配案例，或其占比的置信区间显著大于零，则表明阈值设置可能存在问题；反之，在现有样本下认为阈值设置总体可信。

2.5. 误差归因方法

2.5.1. 流域面雨量计算

流域面雨量采用泰森多边形加权法计算：

$$P = \frac{\sum W_i P_i}{\sum W_i} \tag{1}$$

式中：$\bar{P}$ 为流域面雨量(mm)；P_i 为第 i 个雨量站的日降水量(mm)；W_i 为第 i 站的泰森权重，各流域控制断面雨量站权重由永川区水利局整编(表 2)。

表 2. 各流域面雨量计算站点及泰森权重

流域(控制站)	雨量站(权重)
九龙河(金龙)	大安云峰(人头冲) 0.038、大安云峰 0.110、大安石庙 0.103、金龙金鼎 0.129、金龙金鼎(马鞍) 0.550、大安茶山 0.010、板桥大桥 0.060
大鹿溪(朱沱(石碓窝))	朱沱(石碓窝) 0.137、吉安石松 0.038、吉安黄沙 0.257、朱沱滩子口 0.568
临江河(临江(隆顺))	来苏磨心 0.18、南大高新 0.16、陈食王家岩 0.12、来苏大松林 0.10、陈食莲花塘 0.09、五间友胜 0.08、胜利犀牛 0.08、宝峰泸永桥 0.07、双竹小竹溪 0.06、大安云峰(人头冲) 0.04、临江隆顺 0.03
小安溪(双石)	双石中心桥 0.21、邮亭天福 0.19*、双石五龙桥 0.14、红炉红石 0.14、红炉会龙桥 0.06、红炉新店 0.05、红炉龙井口 0.05、三教新观音 0.05、红炉会龙桥(金银坡) 0.04、永荣云谷(金平) 0.04、直升燕儿 0.03*

注：*为缺测站点，计算时不参与加权，其余站点权重归一化。

2.5.2. 前期影响雨量计算

对无墒情站、蒸发站的流域，采用前期影响雨量指数 P_a 表征土壤含水量的逐日变化：

$$P_{a,t} = \min\left[I_{\max}, K\left(P_{a,t-1}, P_t\right)\right] \tag{2}$$

式中：$P_{a,t}$ 为第 t 日的前期影响雨量(mm)；P_t 为第 t 日流域面雨量(mm)；K 为逐日折减系数，取 0.9；$I_{\max}$ 为流域最大初损，取 60 mm。计算自 2023 年 1 月 1 日起逐日连续递推(初始值取 0)，至汛期(4 月以后)初始条件影响已消除。

判别标准：预警开始前 P_a < 20 mm，或连续 10 日以上无有效降雨(日面雨量 < 5 mm)，判定为前期土壤偏干。前期土壤偏干时，降雨被土壤截留偏多、净雨量减少，同等降雨条件下产流偏小。

2.5.3. 预警检验判据

1) 降雨达标判据：预警时段内最大日面雨量达到或超过预警等级对应的雨量阈值，判定为降雨达标；当降雨过程跨越多个水文日且单日雨量略低于阈值时，以过程累计面雨量不低于阈值作为辅助判据。

2) 涨水判定：以控制站实测水位为依据，预警时段内水位涨幅达到 1 m 及以上(对应蓝色风险)判定为发生相应涨水过程；2023 年水位为每日 8 时、20 时两次观测，2024 年起为逐小时观测。

3) 检验结论：发布预警且发生相应涨水为正确；发布预警但未发生相应涨水为空报；未发布预警但实际降雨达到阈值且发生相应涨水为漏报。

2.5.4. 定量归因决策树

对每一次空报，按以下步骤逐级归因：

降雨预报环节：按 2.5.3 节判据比较实况面雨量与预警等级对应的雨量阈值。若实况降雨未达标，判定为降雨预报偏差(预报偏大导致空报)；若达标，进入第二步。

产流条件环节：按 2.5.2 节方法计算预警开始前的 P_a 及连续无有效降雨日数。若判定前期土壤偏干，判定为产流条件偏差；否则进入第三步。

监测数据环节：检查控制站水位观测频次与完整性。若因每日两次观测等频次不足无法证实或证伪涨水过程，判定为数据支撑不足(统计上按空报处理)；若数据完整可靠，进入第四步。

阈值设定环节：在降雨达标、前期产流条件正常且监测数据可靠的前提下预警仍然失误，判定为阈值设定问题。

漏报单独归因：实况面雨量达到阈值且发生相应涨水而未发布预警的，检查降雨预报是否报出该场降雨；预报未报出则归因为降雨预报偏差。定量归因决策树的流程及各环节归因结果如图 2 所示。

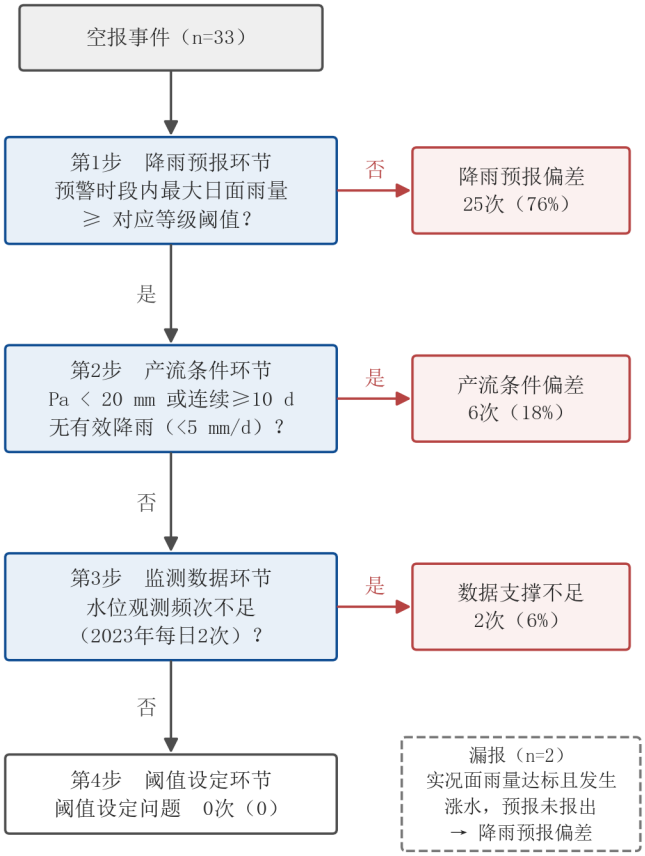


图 2. 空报误差定量归因决策树

2.6. 检验指标与置信区间

参照中小河流预警检验的常用做法[10] [11]，设 n_a 为正确次数、n_b 为空报次数、n_c 为漏报次数，定义：

命中率：

$$POD = \frac{n_a}{n_a + n_c} \times 100\% \tag{3}$$

空报率：

$$FAR = \frac{n_b}{n_a + n_b} \times 100\% \tag{4}$$

临界成功指数：

$$CSI = \frac{n_a}{n_a + n_b + n_c} \times 100\% \tag{5}$$

考虑到样本量有限，点估计波动较大，采用 Wilson score 方法估计命中率和空报率的 95%置信区间：

$$CI = \frac{p + \frac{z^2}{2n} \pm z\sqrt{\frac{p(1-p)}{n} + \frac{z^2}{(2n)^2}}}{1 + \frac{z^2}{n}} \tag{6}$$

式中：p 为样本比率(命中率或空报率)；n 为相应的样本量(计算命中率时 $n = n_a + n_c$，计算空报率时 $n = n_a + n_b$)；$z = 1.96$，为 95%置信水平对应的标准正态分布分位数。置信区间给出了比率估计的不确定范围，用于在小样本条件下客观评价预警效果与阈值可信度。

3. 结果

3.1. 总体预警效果与检验指标

2023~2025 年，涉及永川区的《中小河流涨水风险提示》产品共计 19 期，风险预警涉及研究河流 44 次，其中正确 11 次，空报 33 次，漏报 2 次，总体成功率 25%，空报率 75%，漏报率 15%。按年份统计(表 3)，各年成功率均处于较低水平，空报率普遍偏高；定量检验结果如图 3 所示。

3.2. 空报误差定量归因

采用 2.5 节所述定量归因决策树，对 33 次空报逐事件归因，结果如表 4、图 4 所示，各流域逐事件最大日面雨量与对应阈值比较见图 5，逐事件定量明细见附表 1。

从定量归因结果可以看出：降雨预报偏差是 33 次空报中的主要误差来源，占比 76%。该类事件的复算最大日面雨量均低于对应阈值，且平均低于阈值 33.9 mm，说明这 25 次空报多为实况雨量明显未达到预警等级条件的事件，并非接近阈值的临界误差。需要说明的是，该结论是对空报事件内部的归因结果，不能据此推断一般意义上降雨预报误差以偏大为主；漏报事件仍单独统计和归因。产流条件偏差占 18%，其前期影响雨量和连续无雨日数定量特征明显；数据支撑不足占 6%，反映的是低频水位资料不能证实短历时涨水过程的不确定性；阈值设定问题为 0。在本研究样本范围内，预警误差主要源于气象降雨预报偏差，雨量阈值设定未见明显问题。

表 3. 永川区预警效果统计与检验指标

年份	预警次数	正确	空报	漏报	成功率/%	命中率 POD/% (95% CI)	空报率 FAR/% (95% CI)
2023	15	4	11	0	27	-	73.3 (48.0~89.1)
2024	15	3	12	2	20	-	80.0 (54.8~93.0)
2025	14	4	10	0	29	-	71.4 (45.4~88.3)
蓝色预警	32	7	25	1	22	87.5 (52.9~97.8)	78.1 (61.2~89.0)
黄色预警	12	4	8	1	33	80.0 (37.6~96.4)	66.7 (39.1~86.2)
合计	44	11	33	2	25	84.6 (57.8~95.7)	75.0 (60.6~85.4)

注：临界成功指数 CSI = 23.9% (合计)、21.2% (蓝色预警)、30.8% (黄色预警)，其分母为正确、空报与漏报次数之和，故略大于该级预警次数；分年命中率因样本量过小而未列出。

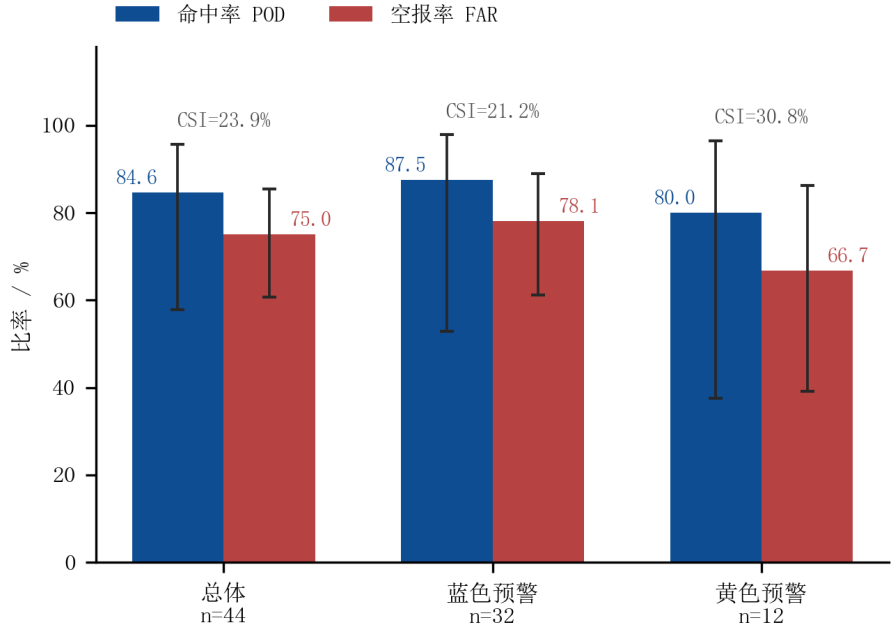
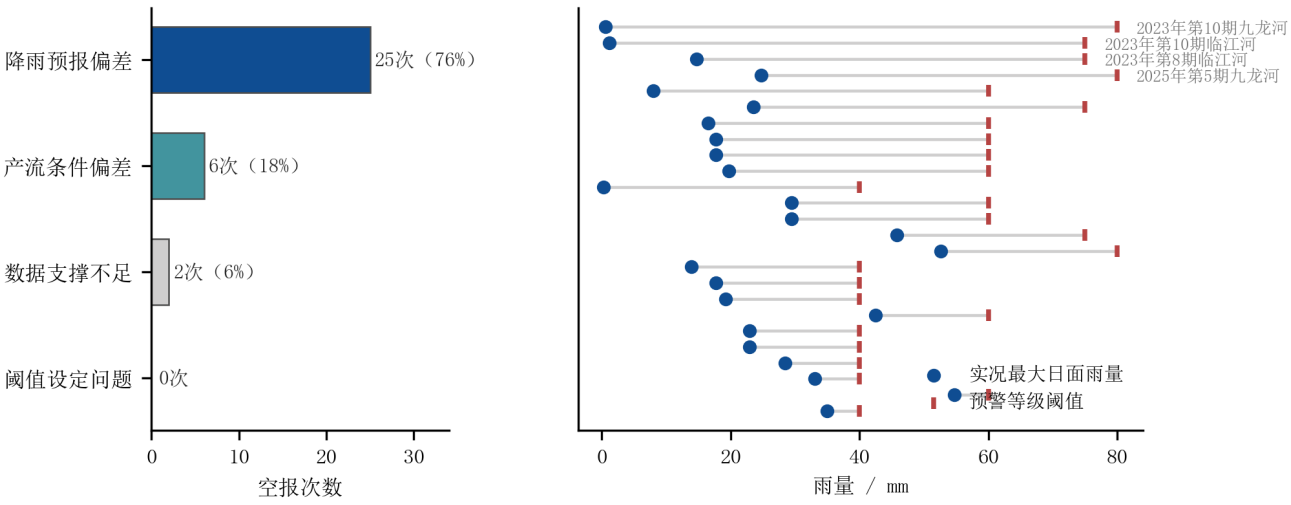


图 3. 预警检验指标及其 95%置信区间

表 4. 永川区预警空报误差归因及定量判据统计

误差原因	次数	占比	定量判据汇总
降雨预报偏差	25	76%	复算最大日面雨量均低于对应阈值，平均偏低 33.9 mm (相对阈值平均偏低 56.5%，中位数 30.6 mm)
产流条件偏差	6	18%	前期影响雨量平均 11.5 mm (4.7~22.0 mm)，连续无有效降雨日平均 13.7 d (7~17 d)；其中 4 次面雨量达到阈值，2 次(黄色等级)面雨量未达阈值但前期明显偏干，属过渡情形
数据支撑不足	2	6%	水位仅每日 8 时、20 时两次观测；九龙河面雨量 65.4 mm 达蓝色阈值、大鹿溪 32.1 mm 接近蓝色阈值，涨水过程无法由低频水位资料证实或证伪
阈值设定问题	0	0%	排除其他环节后预警与实况无不匹配案例
合计	33	100%	-



(a) 空报误差归因构成（n=33）　(b) 25次降雨预报偏差事件：实况面雨量与阈值差距

图 4. (a) 空报误差归因构成与(b) 25 次降雨预报偏差事件的实况面雨量 - 阈值差距

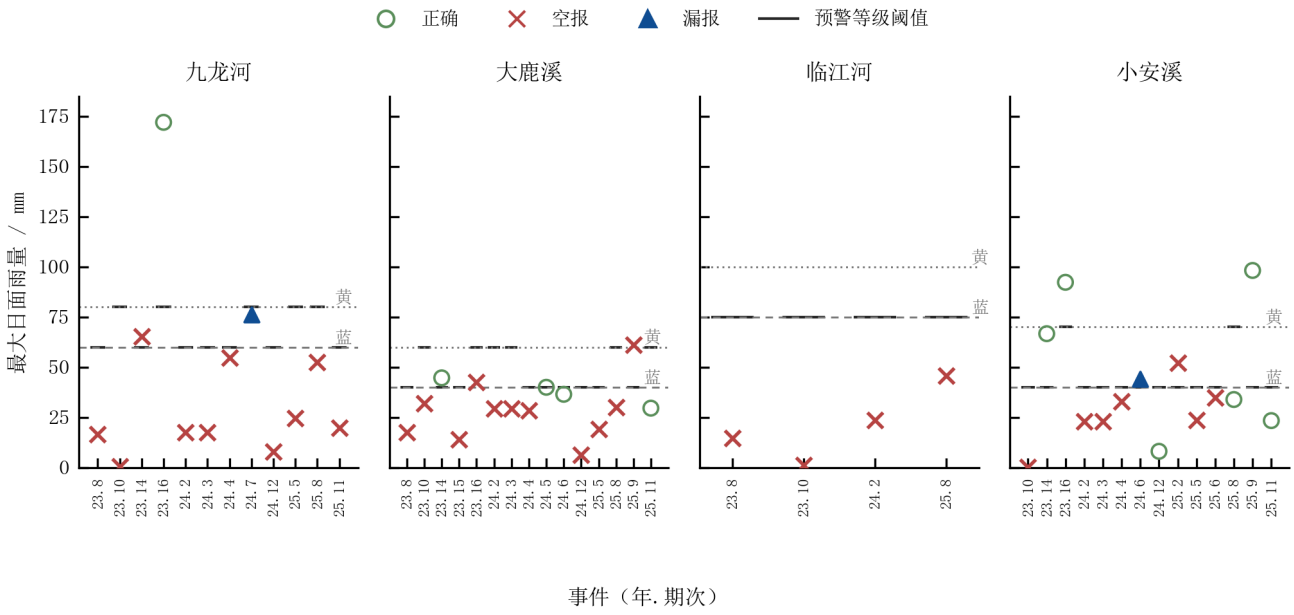


图 5. 各流域逐事件最大日面雨量与预警等级阈值比较

3.3. 漏报事件复核

2023~2025 年期间，永川区四条中小河流共发生漏报 2 次，复核结果见表 5。两次漏报的判定主要依据为实况面雨量达到蓝色阈值且业务台账或逐小时资料记录到相应涨水过程；逐日平均水位变化仅作为辅助复核。其中，2024 年 6 月 26~29 日小安溪：复算最大日面雨量 44.1 mm，达到蓝色阈值(40 mm)，双石站逐小时资料记录水位涨幅 1.04 m，逐日平均水位变幅 0.68 m、峰现时间 6 月 27 日，与涨水过程相互印证；2024 年 7 月 13 日九龙河：最大日面雨量 76.3 mm，超过蓝色阈值(60 mm)、接近黄色阈值(80 mm)，金龙站 7 月 13 日 23 时超警、涨幅 2.56 m，逐日平均水位峰现 7 月 13~14 日。两次漏报均为实况降雨达到阈值而降雨预报未报出，归因为降雨预报偏差。这一结果与空报归因中“降雨预报偏差是主要误差来源”的结论相互印证，进一步说明降雨预报不确定性是制约该预警产品成功率的关键因素。

表 5. 永川区漏报事件定量复核

涉及河流	时间	最大日面雨量/mm	蓝色阈值/mm	实际涨幅/m	水位过程辅助复核	漏报原因
小安溪	2024 年 6 月 26~29 日	44.1	40	1.04	逐日平均水位变幅 0.68 m，峰现 6 月 27 日	预报降雨未达蓝色阈值
九龙河	2024 年 7 月 13 日	76.3	60	2.56	逐日平均水位峰现 7 月 13~14 日	预报降雨未达蓝色阈值

4. 讨论

4.1. 降雨预报误差主导作用与已有研究的印证

本研究定量归因结果表明，降雨预报偏差占空报的 76%，且复算面雨量平均低于阈值 56.5%，是最主要的误差来源。这一结论与已有研究相互印证：包红军等[14]指出降水预报误差会传递甚至放大到洪水预报过程；从琳沂等[15]在漳河流域发现随预见期延长，降雨量及中心范围面积误差显著增大；屈博等[17]进一步定量揭示了降水不确定性随预见期的传递规律。该预警产品将预见期由 1~6 h 延长至 24 h 以上，预见期延长不可避免地增大了降雨预报误差：当前 24 h 暴雨预报准确率仅 20%左右[3]；从技术层面看，气象降雨预报成果对中小流域降

雨落区和量级的刻画仍存在不确定性[4]。王振亚等[10]、陈睿智等[11]、刘泽文和熊金和[12]对同类中小河流预警产品的检验同样显示空报率偏高是共性问题，说明本研究结论具有一定的普遍性。

需要指出的是，即便在降雨预报准确的条件下，预警成功率仍存在一定提升空间。关键原因在于该预警产品面向全市所有中小河流同时发布，无法像单站预报那样精细化考虑各流域的前期影响雨量等局部条件，只能采用固定的面雨量阈值来界定风险。这种全市统一发布的预警模式本身存在一定的局限性，准确率难以达到单站预报的水平。

4.2. 雨量阈值可信度评价

在排除降雨预报偏差、产流条件异常和监测数据不足三个环节后，33 次空报中未发现可归因于阈值设定的失误，其占比的 95%置信区间上限约为 10.4% (Wilson 法)。这表明在现有样本下，阈值设定问题的真实占比不超过约 10.4%，雨量阈值设置未见系统性偏差，阈值总体可信。

已有研究表明，雨量阈值的可信度与前期土壤湿度密切相关：翟晓燕等[7]发现土壤饱和率由 0.20 增至 0.80 时临界雨量减小 26.8%~31.8%；韩俊太等[8]、狄靖月等[9]据此提出了动态临界雨量方法。本研究中 6 次产流条件偏差均发生在前期明显偏干(P_a 平均 11.5 mm、连续无雨日平均 13.7 d)的情景下，正是上述机制在业务运行中的具体体现：固定阈值未能反映前期偏干条件下实际产流能力的下降，导致“雨够水不涨”型空报。这提示阈值体系存在按前期影响雨量分情景动态优化的空间，但此类优化需以不增加漏报风险为前提。

与同类产品的检验结果相比，王振亚等[10]报道订正后预警命中率 71.8%、空报率 29.4%，刘泽文和熊金和[12]报道动态临界雨量预警成功率 71.4%~90.0%，均明显优于本产品的检验指标。差异的主要来源并非阈值设定，而是本产品面向全市统一发布、预见期更长、降雨预报误差更大；这也说明单纯调整阈值难以根本改善预警效果，提升降雨预报精度才是关键。

4.3. 各环节误差的成因与改进方向

1) 降雨预报偏差。这是气象水文耦合预报中最常见的误差来源。提升路径包括：发展面向中小流域的网格预报降尺度与偏差订正技术，建立预报员对中小河流预警产品的反馈机制，以及在预警业务中引入集合预报以表达降雨预报的不确定性。

2) 产流条件偏差。本研究中 6 次产流条件偏差表现为降雨达标但未出现预期涨水，主要原因是前期土壤含水量偏低。从业务角度看，空报的代价远小于漏报。若为减少此类空报而增加复杂的判断条件，可能延误快速涨水过程的预警发布，增加漏报风险。因此，建议维持现有阈值体系，暂不增加额外修正条件；中长期可参考动态临界雨量方法[8] [9]，探索按前期影响雨量分档的阈值动态调整方案。此外，目前该预警产品仅积累三年数据，阈值体系尚处于动态调整优化阶段，对此类空报可通过后续更多数据的积累和复盘分析，逐步优化阈值。

3) 数据支撑不足。本研究中 2 次数据支撑不足的误差均发生在 2023 年，表现为大鹿溪朱沱(石碓窝)站和九龙河金龙站仅有“早 8 晚 8”水位数据，可能漏记了短时快速涨水过程，因此被记为“空报”。自 2024 年起，重庆市水文监测总站已下达逐小时报汛任务，各站点水位数据传输频次提升至小时级，此类问题已得到有效解决。建议持续做好监测设施运行维护，保障数据质量，为预警决策提供更可靠的数据支撑。

值得注意的是，部分“数据支撑不足”所对应的空报，并非源于预警本身的失误，而是受限于监测能力。山区中小河流洪水具有陡涨陡落的特点，一次涨水过程往往在几小时内完成，由于水位数据时间分辨率不足，无法获知两次记录之间是否发生过涨水过程，在此条件下，只能依据现有数据将其认定为“未涨水”，并计入空报。但这并不代表预警本身一定错误——实际情况可能是涨水发生在数据记录间隔之中，预警实际成功，但因监测能力有限而无法被证实。

4.4. 研究局限性与展望

本研究存在以下局限：1) 样本量有限。44 次预警、2 次漏报的样本规模较小，检验指标的置信区间较宽，

阈值可信度的评价结论统计功效有限，后续可扩展至全市范围开展大样本检验。2) 面雨量代表性。面雨量按永川区境内站网计算，小安溪、大鹿溪上游跨境部分(大足区、铜梁区境内)代表性不足；如 2024 年第 12 期小安溪本地面雨量仅 8.1 mm 仍发生涨水，表明上游跨境降雨的影响不可忽略，后续宜采用覆盖全流域的站网资料复核。3) 资料时间分辨率。逐日雨量难以刻画短历时暴雨过程，2023 年每日两次水位观测亦限制了涨水判定，部分归因需结合业务系统逐小时资料综合判断。4) 归因的过渡情形。归因决策树存在边界案例，如 2025 年第 8 期大鹿溪(黄色预警)面雨量未达黄色阈值与前期偏干并存，归因结果依赖于环节排查顺序；此类案例不影响降雨预报偏差占主导的总体结论。5) 可推广性。本文结论基于重庆丘陵区 4 条河流、特定阈值体系和气象降雨预报成果，向其他气候区、地形区或其他预警产品推广时，应重新开展本地化检验；但本文建立的定量归因决策树与阈值可信度评价框架可移植至同类预警产品的检验评估。此外，气象–水文耦合预报的误差传递机制尚需结合数值模式开展更深入的定量分析[15]-[17]。

5. 结论

1) 2023~2025 年，永川区《中小河流涨水风险提示》产品共发布涉及该区域中小河流的预警 19 期 44 次，总体命中率 84.6% (95%置信区间 57.8%~95.7%)，空报率 75.0% (60.6%~85.4%)，临界成功指数 23.9%，预警效果整体偏低且估计不确定性较大。

2) 基于四环节定量归因决策树，33 次空报中降雨预报偏差 25 次(占 76%，复算面雨量平均低于阈值 33.9 mm)、产流条件偏差 6 次(占 18%，前期影响雨量平均 11.5 mm、连续无雨日平均 13.7 d)、数据支撑不足 2 次(占 6%)、阈值设定问题 0 次；2 次漏报均因实况降雨达到阈值而降雨预报未报出。预警误差主要源于降雨预报环节的不确定性。

3) 排除其他误差环节后，未发现可归因于阈值设定的失误，其占比 95%置信区间上限约为 10.4%，表明现有雨量阈值未见系统性偏差、总体可信；6 次产流条件偏差提示阈值存在按前期影响雨量动态优化的空间。

4) 建议预警业务优化优先聚焦降雨预报精度提升，逐步探索考虑前期影响雨量的动态阈值，并持续做好监测设施运行维护、保障数据质量。

参考文献

[1] 刘志雨, 侯爱中, 王秀庆, 等. 基于分布式水文模型的中小河流洪水预报技术[J]. 水文, 2015, 35(1): 1-6.

[2] 李红霞, 王瑞敏, 黄琦, 等. 中小河流洪水预报研究进展[J]. 水文, 2020, 40(3): 16-23, 50.

[3] 刘志雨, 刘玉环, 孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 1-6.

[4] 黎春蕾, 邱鹏, 刘娇, 等. 重庆市雨水情监测预报“三道防线”建设与应用[J]. 水利水电快报, 2024, 45(10): 44-49.

[5] 胡余忠, 汪朝霞, 周斌, 等. 中小河流防洪特征水位与雨量预警阈值分析方法研究[J]. 水文, 2019, 39(1): 27-32.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 韩俊太, 王政荣, 杨雨亭. 基于动态临界雨量的小流域山洪灾害分级预警[J]. 水力发电学报, 2022, 41(9): 67-76.

[9] 狄靖月, 许凤雯, 包红军, 等. 引发山洪的降水特征及动态阈值研究[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(6): 655-663.

[10] 王振亚, 王迪, 葛振飞, 等. 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[J]. 气象, 2026, 52(4): 432-442.

[11] 陈睿智, 吴钢坚, 刘壮添. 中小河流警戒水位拟定方法探讨[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(1): 52-56.

[12] 刘泽文, 熊金和. 动态临界雨量确定方法在山区性中小河流中的应用[J]. 人民长江, 2021, 52(S2): 27-30.

[13] 彭万兵, 赵东, 黄尔, 等. 重庆市复兴河小流域山洪灾害降雨驱动指标预警模型研究[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(7): 1-4.

[14] 包红军, 王莉莉, 沈学顺, 等. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. 气象, 2016, 42(9): 1045-1057.

[15] 丛琳沂, 高玉芳, 彭涛, 等. WRF/WRF-Hydro 气象-水文耦合模式的误差传递特征——以漳河流域径流预报为例[J]. 热带气象学报, 2023, 39(6): 955-964.

[16] 高玉芳, 吴雨晴, 彭涛, 等. 基于不同降水产品的 WRF-Hydro 模式径流模拟——以漳河流域为例[J]. 热带气象学报, 2020, 36(3): 299-306.

[17] 屈博, 马红亮, 俞彦, 等. 基于 TIGGE 资料的降水预报不确定性传递研究[J]. 节水灌溉, 2022(5): 14-19.

[18] 谷洪钦, 刘开磊, 刘玉环, 等. 综合多源不确定性的洪水概率预报试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 99-104.

附　录

附表 1. 逐预警事件定量归因明细表

期次	河流	等级	阈值/mm	最大日面雨量/mm	过程面雨量/mm	P_a/mm	无雨日/d	结论	归因
23-08	九龙河	蓝	60	16.5	20.2	22.3	2	空报	降雨预报偏差
23-08	大鹿溪	蓝	40	17.7	20.0	19.7	4	空报	降雨预报偏差
23-08	临江河	蓝	75	14.7	21.8	22.3	2	空报	降雨预报偏差
23-10	九龙河	黄	80	0.6	0.7	37.1	0	空报	降雨预报偏差
23-10	大鹿溪	黄	60	32.1	32.1	18.9	10	空报	数据支撑不足
23-10	临江河	蓝	75	1.2	1.9	40.2	0	空报	降雨预报偏差
23-10	小安溪	蓝	40	0.3	0.5	32.9	1	空报	降雨预报偏差
23-14	九龙河	蓝	60	65.4	69.1	54.0	0	空报	数据支撑不足
23-14	大鹿溪	蓝	40	44.7	44.8	22.5	0	正确	不适用
23-14	小安溪	蓝	40	66.7	69.0	35.5	0	正确	不适用
23-15	大鹿溪	蓝	40	13.9	25.2	43.8	3	空报	降雨预报偏差
23-16	九龙河	黄	80	172.0	269.1	55.1	1	正确	不适用
23-16	大鹿溪	黄	60	42.5	56.4	45.5	0	空报	降雨预报偏差
23-16	小安溪	黄	70	92.3	153.7	46.0	1	正确	不适用
23-20	四河流域	蓝	40~75	10.2~19.2	39.9~58.6	36.4~55.3	0	空报	降雨预报偏差
24-02	九龙河	蓝	60	17.7	17.9	39.7	3	空报	降雨预报偏差
24-02	大鹿溪	黄	60	29.4	30.5	45.4	3	空报	降雨预报偏差
24-02	临江河	蓝	75	23.5	23.7	45.2	3	空报	降雨预报偏差
24-02	小安溪	蓝	40	22.9	22.9	44.0	3	空报	降雨预报偏差
24-03	九龙河	蓝	60	17.7	17.9	39.7	3	空报	降雨预报偏差
24-03	大鹿溪	黄	60	29.4	30.5	45.4	3	空报	降雨预报偏差
24-03	小安溪	蓝	40	22.9	22.9	44.0	3	空报	降雨预报偏差
24-04	九龙河	蓝	60	54.7	54.7	12.2	13	空报	降雨预报偏差
24-04	大鹿溪	蓝	40	28.4	28.4	10.7	13	空报	降雨预报偏差
24-04	小安溪	蓝	40	33.0	33.0	12.4	6	空报	降雨预报偏差
24-05	大鹿溪	蓝	40	40.0	52.0	40.4	0	正确	不适用
24-06	大鹿溪	蓝	40	36.5	54.0	42.8	4	正确	不适用
24-06	小安溪	蓝	40	44.1	62.1	39.9	1	漏报	降雨预报偏差
24-07	九龙河	黄	80	76.3	76.3	52.1	2	漏报	降雨预报偏差
24-12	九龙河	蓝	60	8.0	8.0	6.8	17	空报	降雨预报偏差
24-12	大鹿溪	蓝	40	6.3	12.3	9.1	18	空报	产流条件偏差
24-12	小安溪	蓝	40	8.1	9.4	2.8	17	正确	不适用
25-02	小安溪	蓝	40	52.2	52.2	10.7	13	空报	产流条件偏差

续表

25-05	九龙河	黄	80	24.7	45.1	5.4	15	空报	降雨预报偏差
25-05	大鹿溪	蓝	40	19.1	46.7	4.7	15	空报	产流条件偏差
25-05	小安溪	蓝	40	23.7	55.0	8.5	15	空报	产流条件偏差
25-06	小安溪	蓝	40	35.0	35.0	35.4	3	空报	降雨预报偏差
25-08	九龙河	黄	80	52.6	55.7	22.7	7	空报	降雨预报偏差
25-08	大鹿溪	黄	60	29.9	38.5	22.0	7	空报	产流条件偏差
25-08	临江河	蓝	75	45.8	56.7	25.2	7	空报	降雨预报偏差
25-08	小安溪	黄	70	33.9	40.5	27.1	7	正确	不适用
25-09	大鹿溪	蓝	40	61.1	68.0	14.0	14	空报	产流条件偏差
25-09	小安溪	蓝	40	98.2	104.3	13.0	17	正确	不适用
25-11	九龙河	蓝	60	19.7	31.5	29.7	3	空报	降雨预报偏差
25-11	大鹿溪	黄	60	29.6	43.3	24.0	3	正确	不适用
25-11	小安溪	蓝	40	23.4	38.9	25.7	3	正确	不适用

注：期次格式为“年份后两位–产品期数”；P_a为预警开始前一日的前期影响雨量；无雨日为预警开始前日面雨量 <5 mm 的连续天数；2023 年第 20 期产品预警时段长(9 月 20~30 日)，四流域面雨量均明显低于阈值，按原统计口径计空报 1 次(河流在原始台账中未标注)。归因列为“不适用”者为正确预警事件，无误差归因。