

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.03.014

李琴, 张勇, 刘煜椿, 等. 暴雨预警标准下重庆小时降水特征与预警评估 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(3): 155-168.

暴雨预警标准下重庆小时降水特征与预警评估

李琴^{1,2}, 张勇^{1,2}, 刘煜椿^{1,2}, 张焱^{1,2}, 陈施吉^{1,3}

1. 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆 401147; 2. 重庆市气象台, 重庆 401147;
3. 重庆市气象服务中心, 重庆 401147

摘要: 基于 2014—2022 年重庆暴雨预警信号资料和 1 967 个自动气象站的逐时降水数据, 识别达到暴雨预警标准的小时降水事件(HPE-MREWS), 分析其与预警信号的时空分布特征, 并评估预警质量。结果表明: 基于站点的 HPE-MREWS 集中在 6—9 月, 夜间发生频次较高, 主要分布在东北部、东南部和合川—北碚等山区, 季节性、夜发性和区域性特征显著。黄色暴雨预警信号频繁发布, 尤其在主城区, 而红色预警信号发布不足, 与实际灾害发生概率不符。预警命中率和 TS 评分偏低, 主城区存在过度预警现象, 空报率较高, 东南部山区漏报较多, 但有效预警提前量整体较高, 除渝中区(0.7 h)外, 其余区县均超过 1 h。建议优化复杂地形区短时临近预报模型, 提升极端降水识别能力, 合理增加红色预警信号发布频率, 为防灾减灾提供决策支撑。

关键词: 暴雨; 预警信号; 质量评估; 复杂地形

中图分类号: P456.1; P457.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)03-0155-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characteristics of Hourly Precipitation and Evaluation of Early Warning Signals in Chongqing under Rainstorm Warning Standards

LI Qin^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, LIU Yuchun^{1,2},
ZHANG Yan^{1,2}, CHEN Shiji^{1,3}

1. China Meteorological Administration Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147, China;
2. Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147, China;
3. Chongqing Meteorological Service Center, Chongqing 401147, China

Abstract: Based on rainstorm early warning signal data and hourly precipitation observation data from 1 967 automatic weather stations in Chongqing during 2014 to 2022, this study identified hourly

收稿日期: 2025-03-17

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX1461); 中国气象局创新发展专项项目(CXFZ2024J013, CXFZ2021Z033)。

作者简介: 李琴, 博士, 主要从事短期天气预报和中尺度灾害性天气机理研究。

通信作者: 刘煜椿, 工程师。

precipitation events meeting rainstorm early-warning standards (HPE-MREWS). The spatiotemporal distribution characteristics of HPE-MREWS and early warning signals were analyzed, and the quality of early-warning signals was evaluated. The results indicated that station-based HPE-MREWS were concentrated from June to September, with a pronounced nocturnal peak, and were primarily distributed in mountainous areas of the northeast, southeast, and regions such as Hechuan-Beibei, which exhibited significant seasonality, nocturnal and regional characteristics. Yellow rainstorm warning signals were frequently issued, particularly in the main urban areas, whereas red warning signals were underutilized. This discrepancy does not align with the actual probability of disaster occurrence. Although the effective warning lead time exceeds 1 hour in all districts and counties except Yuzhong district (0.7 h), the warning hit rates and critical success index were low overall. Specifically, excessive warnings with a high false alarm rate were observed in the main urban areas, whereas warning shortages with numerous omissions occurred in the mountainous areas of the southeast. It is recommended to optimize very short-term forecasting models for complex terrains, enhance the capability to identify extreme precipitation events, and reasonably increase the frequency of red warning issuance, thereby strengthening decision-making support for disaster prevention and mitigation.

Key words: torrential rain; early-warning signal; quality assessment; complex terrain

在全球变暖的背景下,极端降水事件频发,近年来日尺度、次日尺度、小时尺度甚至次小时尺度的极端降水事件发生频率或强度呈增加趋势^[1-3],导致山洪、泥石流等次生地质灾害激增^[1, 4-7]。作为防灾减灾工作的“消息树”和“发令枪”,暴雨预警信号在降低灾害风险、保障生命财产安全等方面发挥着关键作用。

气象预警的社会与经济价值日益受到关注,已有研究对中国多地气象灾害预警信号的分布特征与规律进行了统计分析^[8-10],客观揭示了气象预警信号的时空分布和发布特点。然而,气象部门发布预警之后,预警信息能否实现预期的防灾减灾效果,仍受多种不确定因素影响,如实际降雨量是否达到预警等级等。因此,除关注预警发布前的天气过程精确分析与预报外,近年来气象部门也日益重视预警信息的发布效果,并通过 TS 评分、提前量等指标,从发布时机、时效性和准确性等方面开展综合评估^[11-13]。

重庆地形复杂,山地丘陵密布,江河纵横,人口稠密,城市化快速推进,地下空间开发程度高,承灾体暴露度大,生态环境较为脆弱。同时,受热带季风、副热带季风以及高原动热力作用等的综合影响^[14],重庆天气气候复杂独特,暴雨频发且呈现增长趋势^[15-16]。在复杂地形和独特气候条件综合影响下,暴雨常诱发山洪、滑坡、崩塌、泥石流等次生地质灾害^[17]。如:2019年4月19日重庆南部的局地极端短时强降雨事件引发了山洪,造成5人遇难^[17];2023年7月3-4日,万州区暴雨诱发洪涝及地质灾害,导致15人死亡和4人失踪。这些惨痛案例充分表明,暴雨预警信号的精准性直接关系到防灾减灾工作的实效。

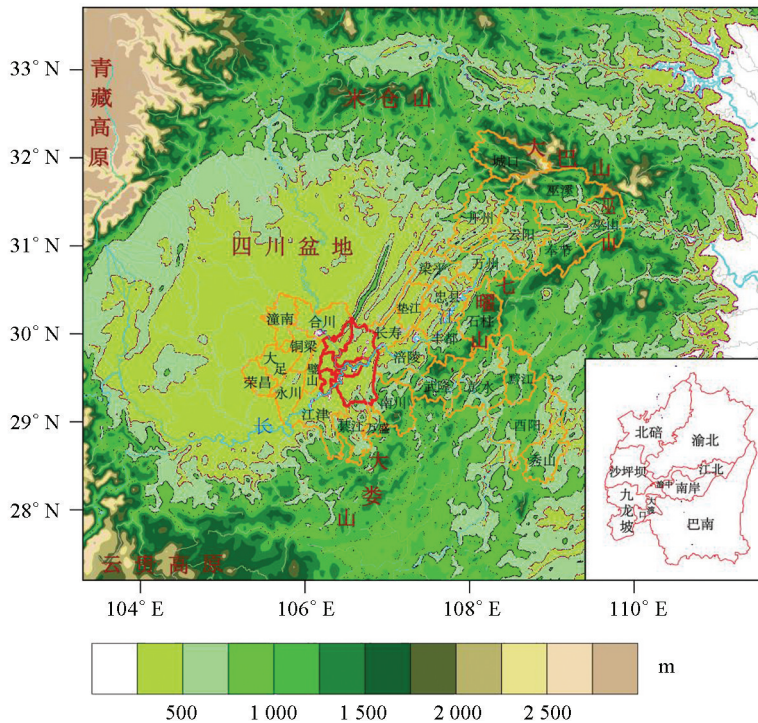
尽管已有研究对重庆日尺度、小时尺度降水的时空分布特征与变化规律,以及暴雨天气过程发展机理等方面积累了一定成果^[17-19],但专门聚焦达到暴雨预警标准的强降水,包括其时空分布特征、预警信号发布规律及质量评估等问题的研究,目前还相对薄弱。当前,重庆暴雨频发,社会对气象服务的需求不仅日益增长,也更趋于精细化。因此,开展系统、客观且定量的预警信号质量评估,对优化预警机制和提升防灾效益而言,具有重要的现实意义。基于此,本研究以2014-2022年重庆市气象观测站逐时降水数据和暴雨预警信号资料为基础,分析达到预警标准的暴雨事件的时空分布特征,统计预警信号的发布规律,并对其质量进行评估,梳理预警发布环节中存在的问题与不足,旨在为优化暴雨预警发布机制、精准制定防灾减灾政策提供科学依据。

1 研究区域、资料与方法

1.1 研究区域

重庆位于中国西南部、长江上游地区,地貌结构复杂。北部为大巴山山区,东部、东南部和南部属巫

山、大娄山山区,区域整体地势起伏较大,地貌类型多样(图1,地形数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 <http://www.gscloud.cn>)。重庆区域内河流密布、水系发达,降水丰沛,自然生态环境相对脆弱,极易受到强降水过程影响。需要说明的是,重庆市主城区行政区划于2025年11月发生调整,撤销原江北区和渝北区,新设立两江新区,同时部分乡镇在两江新区与北碚区之间进行了划转。但本研究所使用的观测数据及预警信号资料周期为2014—2022年,均早于上述调整。在此期间,重庆市气象台负责的暴雨预警信号覆盖全市39个区县(行政区划上重庆市为38个区县,但根据气象业务实际需求,重庆市气象局将万盛经济技术开发区单独作为预警发布单元)。因此,本研究按照39个区县(单元)进行划分,该划分方式符合现行气象业务规范。基于多年气候特征、地形及行政区划的差异,重庆被划分为西部、西南部、主城区、中部、东南部和东北部6个区域^[18],其中主城包括9个区县,西部7个,西南部4个,中部4个,东南部6个,东北部9个。文中所有基于行政区划的统计分析均以此时期的数据与区划为准。



审图号:渝S(2024)027号。下同。橙色和红色实线为重庆行政边界,其中红色实线为主城区域;天蓝色实线表示一级河流,灰色实线表示二级、三级和四级河流。单位:m。

图1 重庆及周边地区地形高度

1.2 研究资料

本研究采用的逐时降水数据由重庆市气象信息与技术保障中心提供,已经通过气候界限值检验、内部一致性检查及时间一致性检验等质量控制。为保证数据可靠性,将2014—2022年缺测记录小时数与应测小时数的百分比定义为数据缺测率,将缺测率 $\geq 15\%$ 的站点剔除,并规定缺测数据不参与统计计算,最终筛选出重庆1967个地面气象观测站(图2)。需指出,这些站点的空间分布不均匀,主城区渝中仅有1个站点入选,而东北部万州多达82个。

为保证预警信号的可比性,本研究仅采用重庆市气象台发布的预警,并排除各区县发布的可能因执行标准不统一而产生差异的预警信息。根据气象业务实践,预警信号可划分为面向公众发布的实际预警和仅用于系统测试的测试预警^[20]。按发布阶段与目的,预警信号又可细分为首发、更新和解除3类^[20]。首发预警用于首次提示即将发生的灾害性天气风险,更新预警体现了随实况天气变化对原有预警做出的动态调整,而解除预警表示天气过程结束或风险消退。

本研究旨在评估预警在暴雨发生前的指示能力,因此剔除了测试预警和不具备前瞻性的解除预警。同时,所有预警数据都经过人工排重与检查,并剔除了错误发布、要素缺失等无效个案。需要明确的是,气象

预警信号是以区县为单位发布的,而非针对具体观测站点。

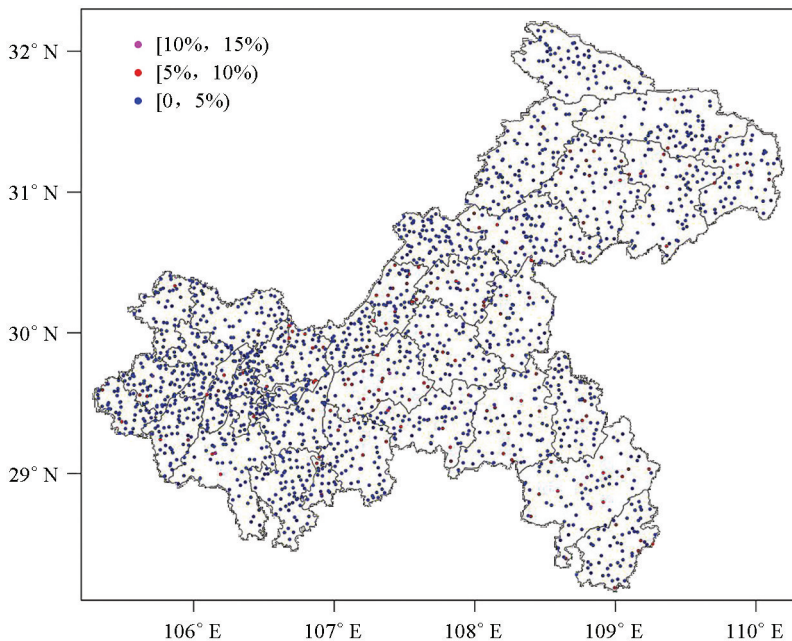


图 2 重庆气象观测站点及其逐时降水数据缺测率分布

1.3 研究方法

本研究以小时雨量 ≥ 0.1 mm 为降水判据,定义某站点连续观测到的降水过程为小时降水事件,其中允许最多 1 h 的降水间断;连续降水后若至少 2 h 无降水,则视为事件结束^[21]。根据中国气象局预警标准,重庆市暴雨预警信号分为蓝色、黄色、橙色和红色 4 级,分别对应 12、6、3、3 h 内降雨量将达 50、50、50、100 mm 以上(条件 1),或已达该值且降雨可能持续(条件 2)(表 1)。依据实况天气开始时间、预警信号发布时间与实况天气达标时间的先后顺序,本研究将实际预警信号中的首发预警和更新预警划分为提前预警、过程预警和实况预警 3 类^[9]。提前预警指降水尚未开始前即发布,体现对灾害性天气的前瞻性判断与预见性服务,旨在为防灾减灾争取准备时间;过程预警是在降水已开始但未达预警标准前发布,体现基于实况监测基础上的风险提示功能;实况预警则是在实况已达预警标准后发布,用于确认极端天气的发生,指导应急响应措施。一般而言,依据预报性标准(条件 1)发布的预警多属于提前预警或过程预警,而依据实况性标准(条件 2)发布的预警通常为实况预警。该分类方式有助于评估预警发布的时效性和气象服务的响应能力。

表 1 中国气象局暴雨预警标准

预警级别	条件 1	条件 2
暴雨蓝色	12 h 内降雨量将达 50 mm 以上	已达 50 mm 以上且降水可能持续
暴雨黄色	6 h 内降雨量将达 50 mm 以上	已达 50 mm 以上且降水可能持续
暴雨橙色	3 h 内降雨量将达 50 mm 以上	已达 50 mm 以上且降水可能持续
暴雨红色	3 h 内降雨量将达 100 mm 以上	已达 100 mm 以上且降水可能持续

研究步骤如下:首先,基于暴雨预警标准,筛选满足预警条件的站点小时降水事件,并确定其对应的最高预警级别。将筛选出的基于站点、达到暴雨预警标准的小时降水事件(HPE-MREWS)与气象业务中发布的预警信号进行对比,开展不分级检验,判定事件的命中或漏报情况。在不分级检验中,若在任一级别暴雨预警信号(包括实况预警中的提前预警和过程预警)发布期间,站点小时降水事件达到预警标准,则判为预警命中;若站点小时降水事件达到预警标准,但未发布任一级别暴雨预警信号,则该事件判为漏报。

其次, 统计各区县的 HPE-MREWS, 识别区域性达标事件, 并判定其命中或漏报情况。同时, 分析暴雨预警信号的命中或空报情况。对于区域性降水过程, 若区域内至少有一站的小时降水事件命中, 即判定为命中; 若区域内所有基于站点的 HPE-MREWS 均为漏报, 则视为该区域降水过程漏报。对于预警信号而言, 若在发布期间对应区域内至少有一个站点小时降水事件达标, 则判定预警信号命中, 否则判定为空报。

最后, 对暴雨预警信号质量进行评估。根据中国气象局《气象灾害预警信号质量检验办法(试行)》要求, 本研究将对暴雨预警信号的准确性和时效性开展不分级检验。准确性指标包括命中率 POD 、空报率 FAR 以及能综合评价命中、误报和漏报能力的 TS 评分(又叫临界成功指数 CSI)^[22], 如公式(1-3)所示, 其中 NA 、 NB 和 NC 分别为命中、空报与漏报次数。预警时效 C 是指预警信号发布时间 A 与实况降水达到预警标准时间 B 之间的差值(公式 4)。

本研究采用了准确预警时间提前量(T_1)、预警时间提前量(T_2)和有效预警时间提前量(T_3)3 个指标(公式(5-7)), 评估预警信号在不同情境下的时效性。具体而言, T_1 反映预警信号在命中情况下的时效表现, T_2 衡量的是预警信号对对应报事件的整体响应及时性, T_3 评估预警信号在考虑命中、漏报与空报情况下的整体预警效能。据此, 本研究试图从命中质量、应报响应能力和系统整体表现等维度, 量化预警信号的时效性能。漏报或空报样本的 C 定义为 0。

$$POD = \frac{NA}{NA + NC} \times 100\% \quad (1)$$

$$FAR = \frac{NB}{NA + NB} \times 100\% \quad (2)$$

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

$$C = B - A \quad (4)$$

$$T_1 = \frac{\sum C}{\sum NA} \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{\sum C}{\sum (NA + NC)} \quad (6)$$

$$T_3 = \frac{\sum C}{\sum (NA + NB + NC)} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 达到暴雨预警标准的小时降水事件时空分布特征

2014-2022 年, 重庆 1 967 个站点共记录 HPE-MREWS 52 586 次。其中, 蓝色、黄色、橙色和红色 HPE-MREWS 分别为 18 802、16 510、16 322 和 952 次。从空间分布来看, HPE-MREWS 高频区集中在重庆东北部偏北地区, 尤以巫溪最为显著(81 次), 这与方德贤等^[18]和 Li 等^[19]的研究结果一致。次高频区分布在东南部酉阳和合川—北碚山区(图 3e)。蓝色 HPE-MREWS 频次中心位于重庆东北部偏北地区(开州—巫溪)(图 3a)。黄色 HPE-MREWS 频次分布模态与蓝色等级大致相似(图 3b)。橙色 HPE-MREWS 的频次中心位于东北部偏东地区(开州)、合川及石柱, 次中心分布在綦江及东南部偏南地区(图 3c)。红色 HPE-MREWS 较少, 主要分布在东南部和合川—北碚局部地区(图 3d)。尽管蓝色、黄色和橙色 HPE-MREWS 在空间分布上呈现相似的频次分布模态(图 3a-c), 但其所占比例分布差异较为显著(图 4a-c)。蓝色 HPE-MREWS 在东北部地区, 尤其是沿大巴山脉一带占比最高, 达 45%~65%。橙色 HPE-MREWS 在偏南地区的比例较高, 主要集中于重庆西部、中部及东南部地区, 局地达 30%~45%。红色 HPE-MREWS 在重庆的发生概率较小, 比例高值区位于东南部、中部偏北和西南部偏南地区, 最高约为 7%(图 4d)。

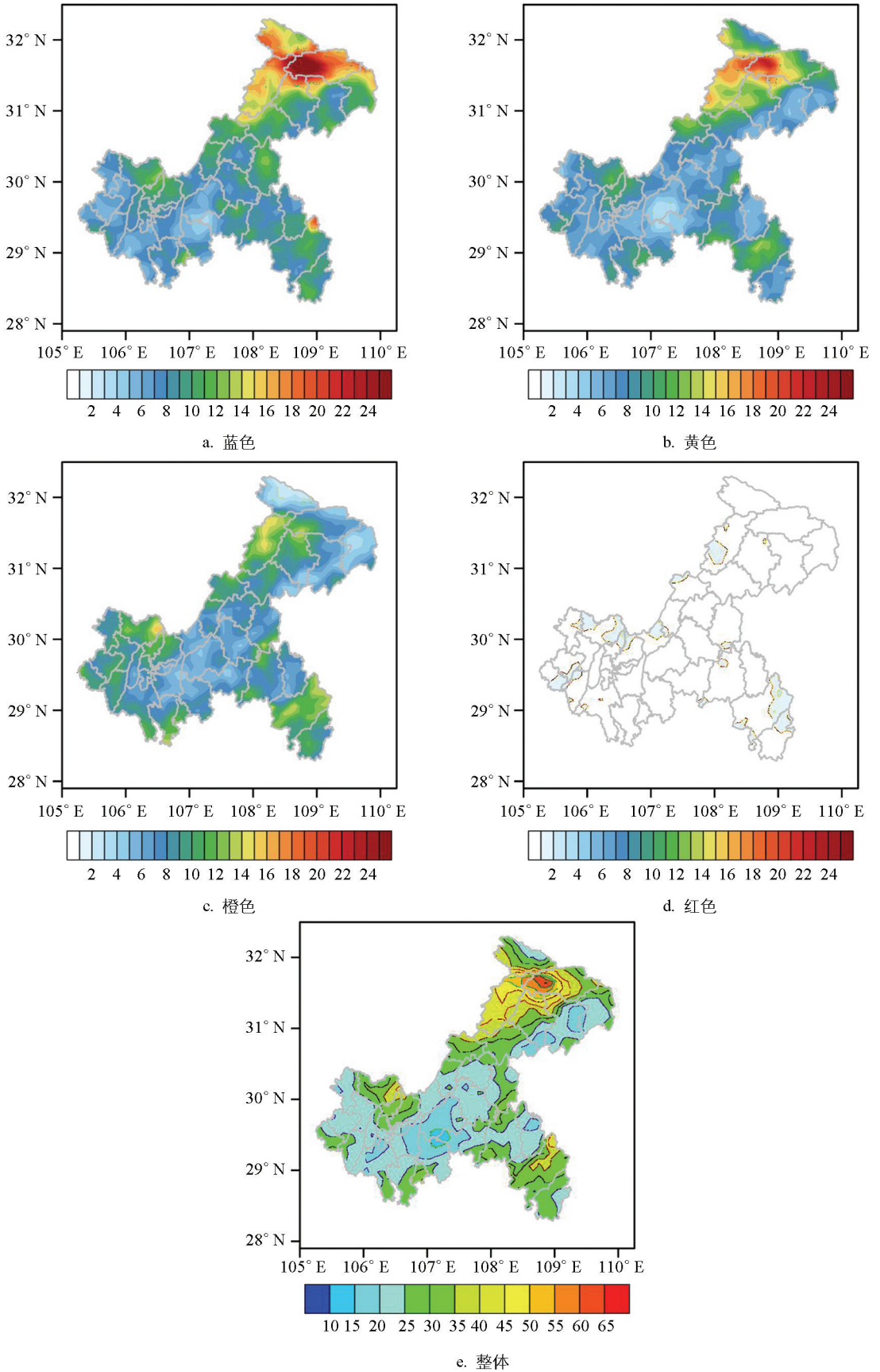


图 3 重庆基于站点的达到蓝色、黄色、橙色和红色暴雨预警标准的小时降水事件个数(a-d)及其整体(e)空间分布, (a-e)中灰色线表示重庆行政边界

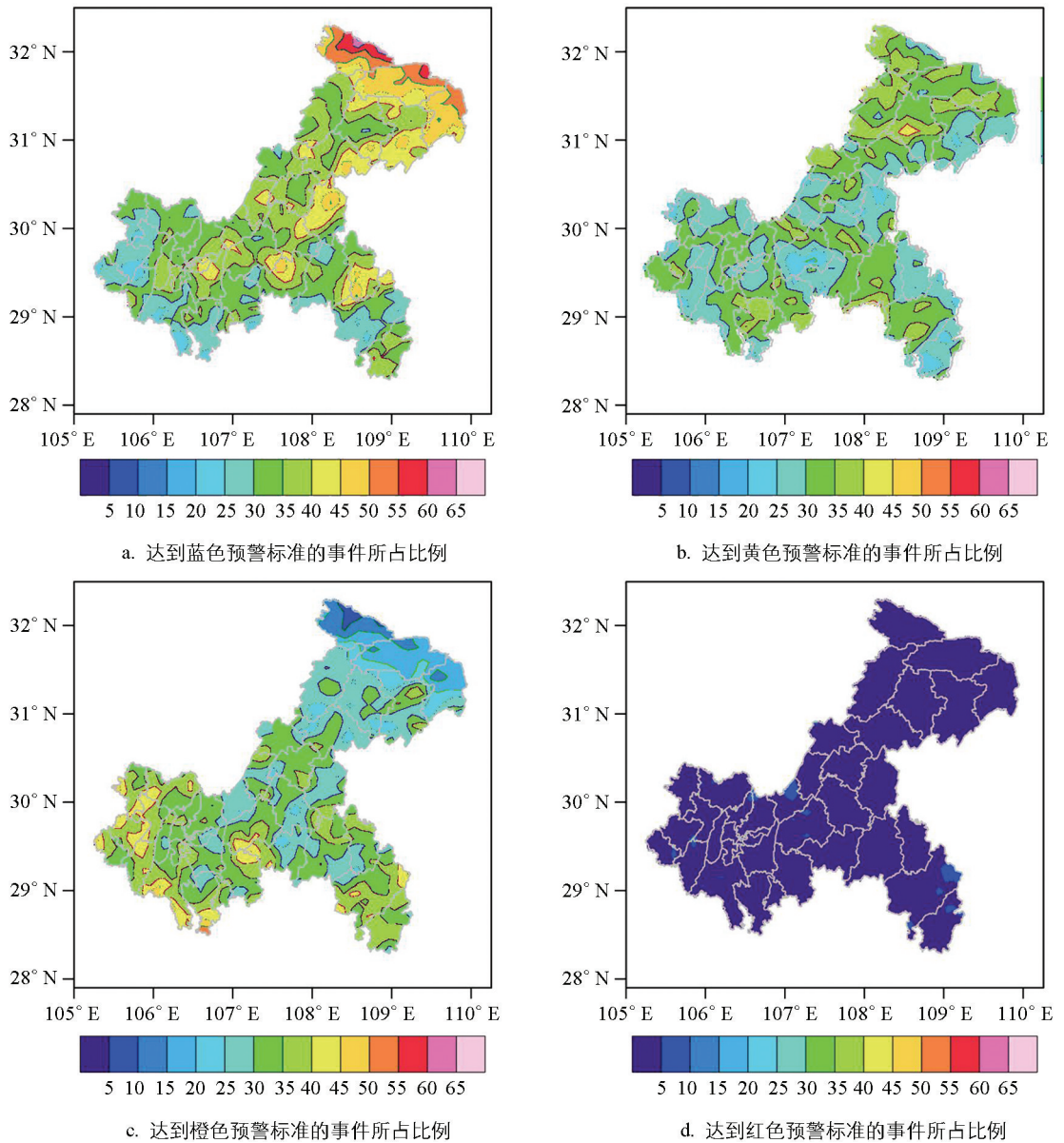


图 4 暴雨蓝(a)、黄(b)、橙(c)、红(d)色预警标准达成的站点小时降水事件个数所占比例, (a-d)灰色线表示重庆行政边界

在时间分布上, 各等级基于站点的 HPE-MREWS 表现出显著的月变化特征(图 5)。蓝色和黄色 HPE-MREWS 呈双峰分布, 主峰在 6 月, 次峰在 9 月。这主要与 6 月冷暖空气频繁交汇形成连续阴雨天气有关^[16]。橙色和红色 HPE-MREWS 呈单峰分布, 分别高发于 7 月和 6 月。需要注意的是, 7 月的橙色事件数量超过蓝色和黄色事件, 可能是因为此时重庆位于副热带高压的西北侧, 水汽和不稳定能量条件较好, 易发生强降水。8 月低等级 HPE-MREWS 显著减少, 但橙色事件数量多于蓝色与黄色事件。这是因为 8 月重庆大部分时间受副热带高压控制, 多晴热天气, 尽管区域性降水较少, 但局地强对流天气仍时有发生。整体上, 基于站点的 HPE-MREWS 在全年均有发生, 但主要集中在 6—9 月和 3—5 月, 10 月时有发生, 11 月至次年 2 月相对较少。由于蓝、黄色 HPE-MREWS 数量占优, 整体呈现双峰型月变化特征。基于站点的 HPE-MREWS 也具有显著的日变化特征(图 6)。蓝色和黄色 HPE-MREWS 日变化呈单峰特征, 峰值出现在夜间; 而橙色 HPE-MREWS 则表现为双峰分布, 主峰在夜间, 次峰位于午后, 表明尽管午后降水持续时间短, 但强度较大, 易触发较高等级 HPE-MREWS。红色事件日变化呈三

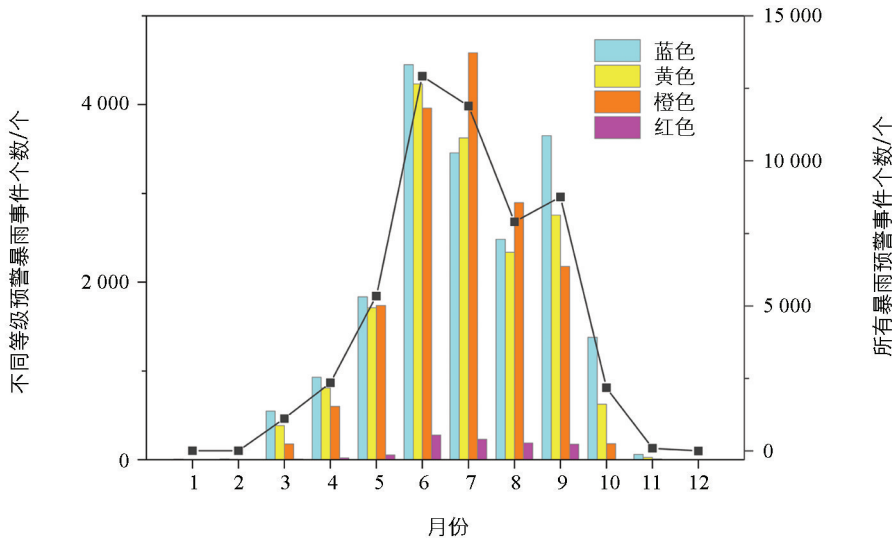


图 5 达到暴雨蓝、黄、橙、红色预警标准的站点小时降水事件个数的月变化

峰分布,主峰在黎明(3—5点),次峰出现在午夜与下午。由于蓝色和黄色事件数量占比高,整体 HPE-MREWS 的日变化表现为夜间峰值的单峰分布。

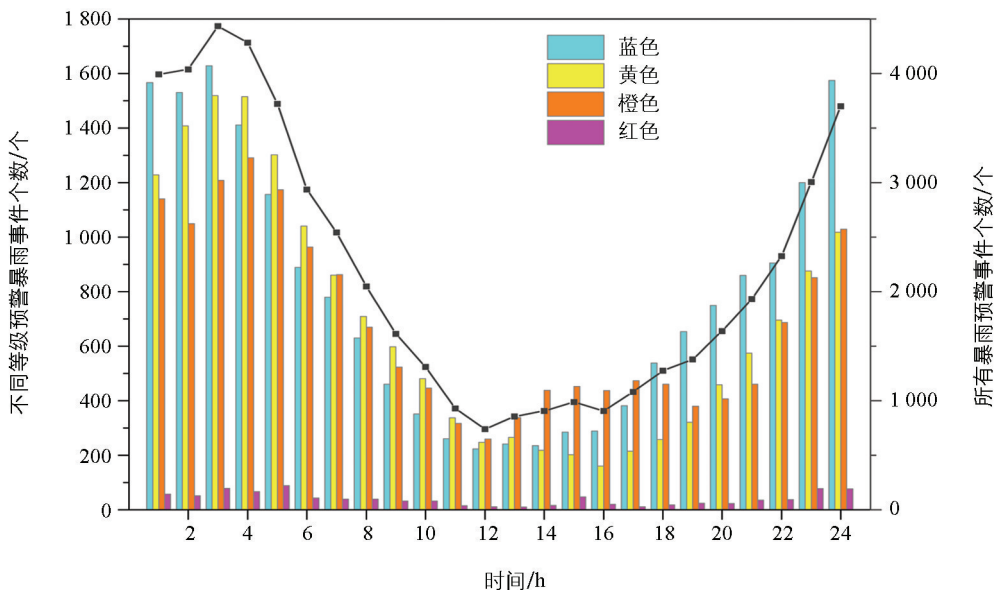


图 6 达到暴雨蓝、黄、橙、红色预警标准的站点小时降水事件个数的日变化

2.2 暴雨预警信号的发布特征

2014—2022 年间,重庆市气象部门共发布暴雨预警信号 3 963 次,覆盖 39 个区县。其中,暴雨黄色预警信号最多(2 663 次,占 67.2%),其次为蓝色(700 次)、橙色(583 次)和红色(仅 17 次)。总体来看,黄色暴雨预警信号发布频率较高,但与实际暴雨发生概率存在一定偏差。黄色预警信号主要集中在 2019—2022 年发布,而全部 17 次红色暴雨预警信号均发布于 2015 年,2016—2022 年未再发布红色暴雨预警信号(图 7)。尽管发布红色暴雨预警信号需格外谨慎,但 2016—2022 年间,几乎每年均有符合红色预警标准的暴雨事件,例如 2022 年 5 月 9 日的大范围区域性暴雨。因此,面对日益增多的极端天气^[23],有必要更加审慎而及时地启动暴雨红色预警信号,以切实保障公众安全。从区县分布来看(图 8),暴雨蓝色预警信号在各区县的发布次数均少于 26 次;而黄色预警信号发布最频繁,占比为 60.32%~71.81%,其中主城区的比例均超过 67.41%;红色预警信号主要针对西部

和主城区的区县发布, 但次数非常少。

2.3 暴雨预警信号质量评估

前文已指出, 气象业务中暴雨预警信号是以区县为发布单元, 而降水观测基于单个站点, 这种观测与预警发布之间的尺度差异, 是理解预警质量问题的基础。统计数据表明, 2014—2022 年间, 基于 1 967 个自动站数据共统计出 52 586 次站点尺度的 HPE-MREWS, 而同期重庆市发布的区县级暴雨预警信号仅 3 963 次, 二者数量悬殊, 表明站点级事件与区县预警之间存在明显的尺度不匹配问题。这种不匹配可能影响预警信号的覆盖范围与响应效率, 进而直接影响暴雨预警信号的命中率、空报率及 TS 评分等质量评估结果。

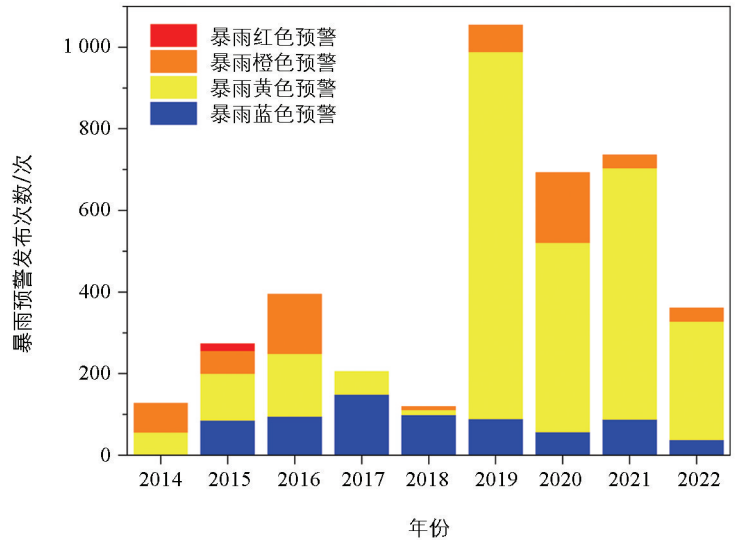


图 7 2014—2022 年重庆蓝色、黄色、橙色和红色暴雨预警信号发布次数的年变化

为厘清上述尺度不匹配的具体表现及其对预警质量的影响, 结合各区县的自动站数量、站点 HPE-MREWS 总数与平均达标频次、区域性暴雨事件次数及预警信号发布情况展开分析(图 8)。结果显示, 强降水事件在区县尺度上的分布特征存在明显差异。其中, 开州与巫溪的站点 HPE-MREWS 频次最高, 分别为 3 410 次和 3 017 次, 站点平均频次也最高, 分别为 43.7 次和 43.1 次, 且对应的自动站数量较多(分别为 78 个和 70 个), 对应的区域性暴雨事件次数分别为 191 次和 198 次。相比之下, 酉阳的站点 HPE-MREWS 共 2 275 次, 自动站 72 个, 站点平均 31.6 次, 但其区域性暴雨事件次数以 223 次位列全市第一。

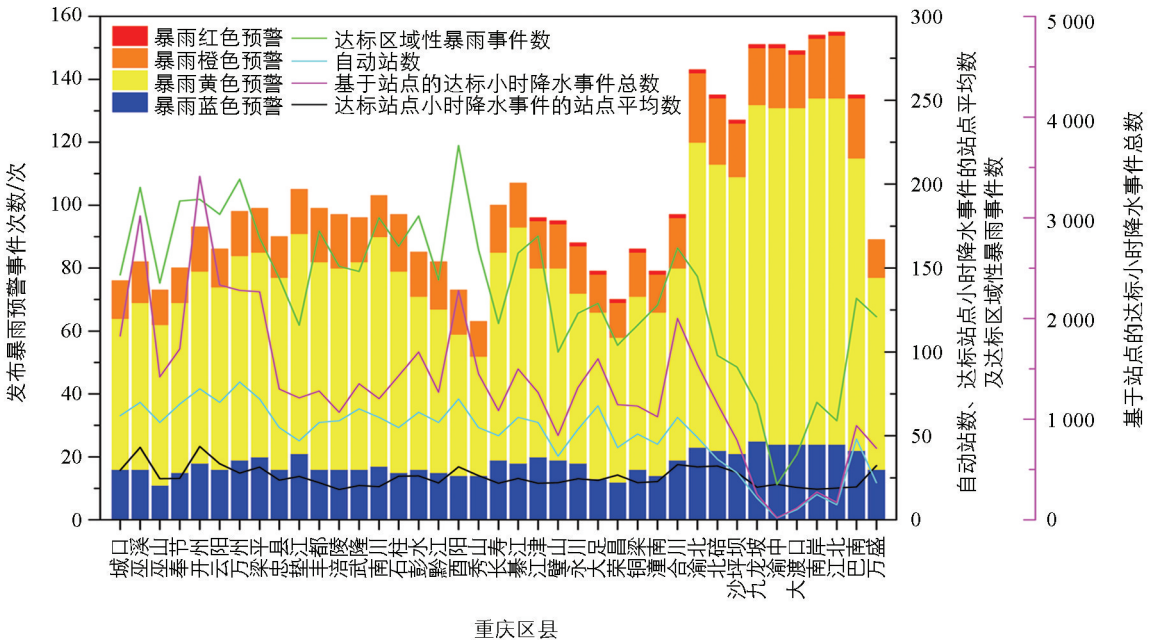
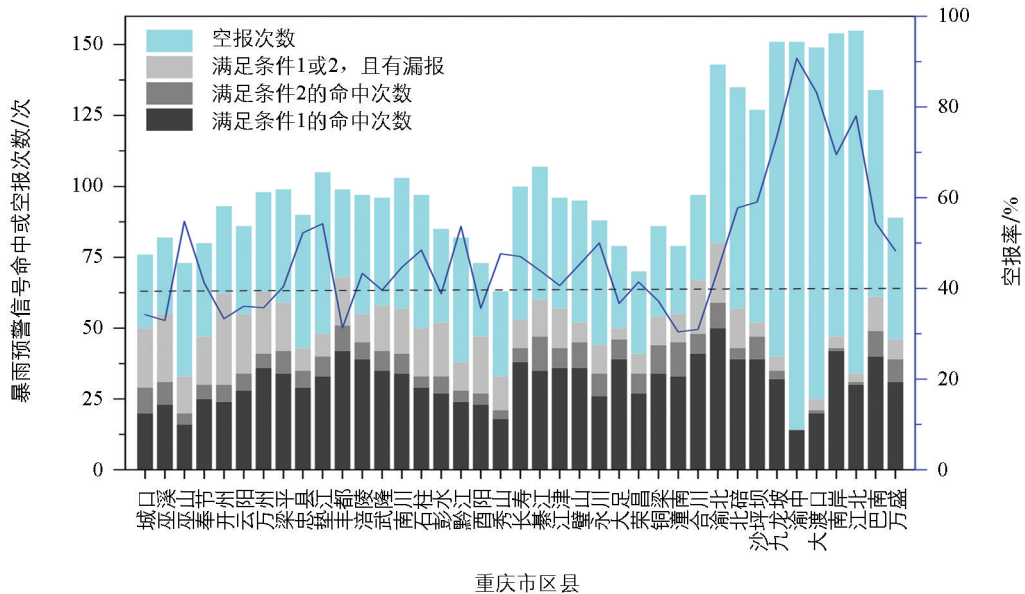


图 8 2014—2022 年重庆各区县暴雨预警信号次数与达标降水事件数统计

柱状堆叠图表示各区县预警信号次数; 折线分别表示各区县自动站数(天蓝色)、达标站点小时降水事件的站点平均数(黑色)、达标区域性暴雨事件数(绿色)和基于站点的达标小时降水事件总数(洋红色), 前三者对应右侧黑色 y 轴, 第四项对应右侧洋红色 y 轴。

最低(30.38%), 但过半数区县空报率高于 40%。主城区空报问题尤为突出, 渝中区空报率最高, 达 90.73%, 空报次数(137 次)也最多, 而命中次数仅 14 次。从预警信号空报次数的分布可以看出(图 10), 主城区存在明显的“预警过度”现象。尽管主城区人口密集、防灾需求迫切, 但过度发布预警不仅会造成人力资源与防灾物资的浪费, 还可能引起社会恐慌, 进而削弱公众对后续预警的信任与响应积极性^[29], 形成常说的“cry wolf”效应^[30]。因此, 在提高全市预警质量的过程中, 预报员需要协同应对山区漏报多、主城区过度预警这两个难题。



柱状堆积图表示命中次数与空报次数, 蓝色实线为空报率(单位: %)

图 10 2014—2022 年重庆各区县暴雨预警信号的准确性评估

预警时间提前量对公众防灾避险至关重要, 及时发布预警能有效规避风险。整体来看, 重庆各区县的准确预警时间提前量较高, 江北达到 10.98 h, 巫山和秀山也均超过 9.5 h, 荣昌最低为 5.79 h(图 11)。然而, 从单个区县的角度来看, 非主城区的区县因漏报较多, 导致整体预警时间提前量和准确预警时间提前量均显著下降。主城区则因暴雨预警空报频繁, 导致有效预警的时间提前量偏低, 渝中区仅为 0.7 h, 为全市最低; 其他区县均大于 1 h, 其中丰都最高, 可达 2.66 h。从 TS 评分来看, 重庆各区县的 TS 评分整体不高, 其中璧山最高, 但也仅为 35%; 渝中最低, 仅为 8%, 这主要归因于渝中的空报次数远高于命中次数。总之, 非主城区主要受漏报影响, 预警发布相对滞后; 主城区则空报问题突出, 预警效果不佳。这两方面因素均制约了全市预警信号的质量提升。

综合上述分析来看, 重庆各区县的 TS 评分普遍不高, 但预警质量的空间差异较为明显。渝中区属于预警过度的情况, 其命中率不低, 但空报率也高, 这就导致其 TS 评分最低; 而酉阳则表现为另一种情况, 主要是预警不足, 由于漏报较多, 导致命中率偏低, 但其空报次数相对较少, 空报率较低。尽管强降雨本身的复杂性和预报难度显著影响了重庆各区县的预警质量, 但总体来看, 有效预警的时间提前量仍然比较可观。除了渝中区只有 0.7 h, 其余区县的有效预警提前量均超过 1 h, 这为防灾应对留出了宝贵时间。此外, 命中率、空报率及 TS 评分均受到区域性强降雨特征及“站点—区县”尺度转换问题的显著影响。由此, 在后续预警系统优化的研究中, 重心之一就在于解决尺度适配性问题。这不仅是提升重庆乃至类似复杂地形区域暴雨预警有效性的核心难点, 也是未来需要重点突破的方向。

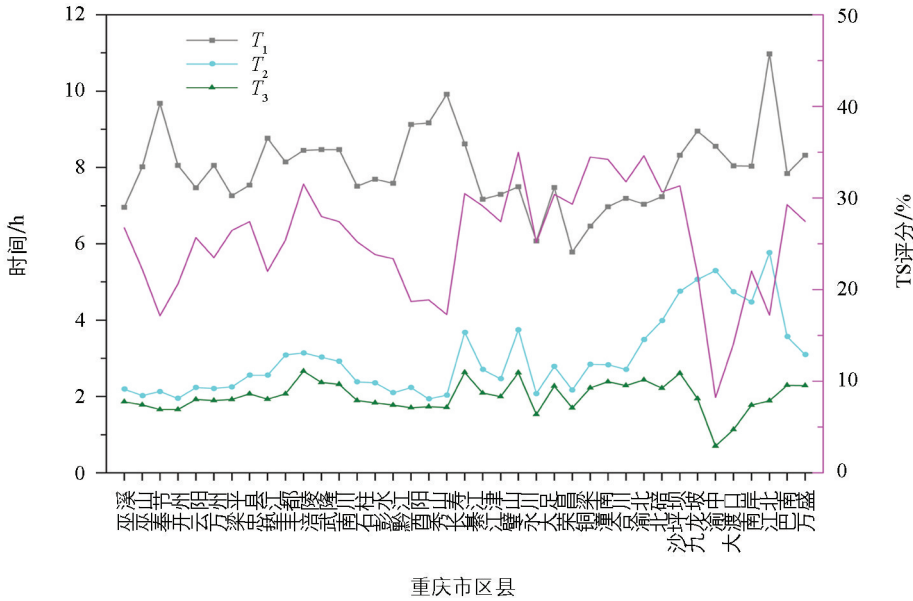


图 11 2014—2022 年重庆各区县暴雨预警信号的时效性指标(T_1 、 T_2 和 T_3)与 TS 评分的区域差异

3 结论与讨论

结合 2014—2022 年重庆市自动气象观测站逐时降水数据与暴雨预警信号资料,本研究先完成 HPE-MREWS 的识别,进一步分析其与暴雨预警信号对应的时空分布特征,并对预警信号发布质量开展了检验评估,主要结论如下:

1) 基于站点的 HPE-MREWS 时空分布特征显著。识别出的 52 586 次此类事件主要集中分布在东北部、东南部和合川—北碚等山区。不同等级事件的集中区域也不相同。蓝色事件在东北部尤其是大巴山脉区域占比最高,橙色事件则在西部偏西偏南、中部偏南及东南地区比例较高,红色事件发生次数少且空间分布零散。在时间上,事件整体呈现 6 月与 9 月的双峰型月变化特征,而橙色、红色事件则分别为 7 月、6 月单峰结构;在日变化特征上,蓝色、黄色事件多在夜间发生,橙色、红色事件在夜间和午后存在双峰值,且夜间峰值更突出。

2) 预警信号存在等级失衡问题,一定程度上表现为预警等级与实际灾害风险脱钩。研究期间共发布 3 963 次暴雨预警信号,其中黄色预警占 67.2%,且高度集中在主城区,而红色预警占比极低。这种“黄色偏多、红色偏少”的情况,与观测资料反映的各级强降水实际发生概率存在明显差异。这表明当前预警业务在处置极端事件时,预警发布策略可能受到空报风险控制等因素的影响,在一定程度上表现出发布趋于谨慎的特征,从而可能导致预警信号未能客观反映真实的灾害风险等级。

3) 预警质量存在显著空间差异,呈现“主城过度预警”与“山区预警不足”并存的现象。预警效能在全市范围内表现不均,整体 TS 评分偏低,核心原因在于站点观测与区县尺度的预警适配性不足。具体而言,主城区渝中区预警过度,预警频率高,但其准确性受到一定影响,本质上是通过高空报率来维持高命中率。而东南部山区酉阳则预警不足,漏报问题突出,直接导致命中率偏低。值得一提的是,从时效性来看,虽然绝大多数区县的平均预警提前时间都超过 1 h,为启动防灾响应争取了宝贵的时间窗口,但预警的最终效能,仍受限于降水识别精度与预警等级设置的合理性。

4) 不同区域的降水类型差异直接影响预警效能,提升质量需推行“分区施策”。开州—巫溪一带多为覆盖范围广、过程集中的区域性暴雨,天气系统组织性强,其预报先兆信号更清晰明确,当前以区县为单元

的预警体系对该类过程的捕捉能力强,命中率较高,在实际预警业务中更适宜发布覆盖面广的区域性预警。相反,酉阳等地多为局地性、突发性强的离散型暴雨,区县尺度预警的适用性有限,难以实现精准捕捉,亟需进一步研发更精细的临近预警技术。这说明提升预警质量需采取“分区施策”的思路,根据不同区域的降水类型特征制定针对性的预警方案。

以上结论表明,当前重庆暴雨预警业务的核心问题,是相对固化的预警发布规则与复杂多变的实际灾害风险之间存在不匹配情况。要切实改善预警质量,在业务工作中需要建立预警等级与实时致灾风险的动态挂钩机制,以从制度上缓解潜在的等级失真问题。同时,可结合重庆各地地形条件和暴雨分布规律,综合考虑致灾因素、脆弱环境以及承载能力等^[31],探索建立分区预警标准。此外,还需要加强对复杂地形区强降水过程物理机制的研究,在此基础上研发适配本地的短时临近预报模型,以提升对强降水的识别与研判能力。

参考文献:

- [1] WESTRA S, FOWLER H J, EVANS J P, et al. Future Changes to the Intensity and Frequency of Short-Duration Extreme Rainfall [J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 522-555.
- [2] BARBERO R, FOWLER H J, LENDERINK G, et al. Is the Intensification of Precipitation Extremes with Global Warming Better Detected at Hourly than Daily Resolutions? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(2): 974-983.
- [3] KENDON E J, BLENKINSOP S, FOWLER H J. When Will we Detect Changes in Short-Duration Precipitation Extremes? [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(7): 2945-2964.
- [4] LI X, ZHANG K, BAO H J, et al. Climatology and Changes in Hourly Precipitation Extremes over China during 1970-2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 839: 156297.
- [5] 崔慧慧, 李荣, 郜彦娜, 等. “7·20”郑州极端特大暴雨降水细节特征和成灾过程研究 [J]. *灾害学*, 2023, 38(2): 114-120, 149.
- [6] 程娅娅, 高玉琴, 刘云苹, 等. 极端暴雨情景下的城市脆弱性评价 [J]. *灾害学*, 2024, 39(1): 222-227, 234.
- [7] 王佳津, 王皓, 王春学, 等. 四川省汛期小时极端降水精细化特征 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(10): 167-176.
- [8] 顾孝天, 李宁, 周扬, 等. 北京“7·21”暴雨引发的城市内涝灾害防御思考 [J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(2): 1-6.
- [9] 黄归兰, 赵宇, 马继华, 等. 广西气象灾害预警信号分布特征及发布 [J]. *气象科技*, 2015, 43(2): 343-348.
- [10] 陈妮娜, 张玉书, 张硕, 等. 2004—2013年辽宁省主要气象灾害分布及预警服务分析 [J]. *自然灾害学报*, 2017, 26(3): 176-184.
- [11] 李海鹰, 徐宁军. 预警信号发布中的一些问题 [J]. *气象*, 2005, 31(6): 83-86.
- [12] 陆小玉, 李佳颖, 梁维亮. 近年广西气象灾害预警信号质量评估 [J]. *气象研究与应用*, 2018, 39(4): 80-82.
- [13] 周伟东, 韩宁, 戴建华, 等. 上海地区暴雨预警评估及不同天气型暴雨预警差异分析 [J]. *暴雨灾害*, 2022, 41(4): 405-412.
- [14] 刘德. 重庆市天气预报技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 2012: 151-153, 237-238.
- [15] 靳军英, 王林, 金铁生, 等. 基于REOF的不同量级降雨侵蚀力时空变化——以重庆市为例 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2025, 47(1): 163-177.
- [16] 刘晓冉, 李国平, 李永华, 等. 一次引发重庆大暴雨的西南低涡动力诊断分析 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(5): 160-169.
- [17] 李琴, 邓承之. 重庆一次弱天气系统强迫下的极端短时强降水事件分析 [J]. *气象*, 2021, 47(9): 1073-1085.

- [18] 方德贤,董新宁,邓承之,等. 2008—2016 年重庆地区降水时空分布特征 [J]. 大气科学, 2020, 44(2): 327-340.
- [19] LI Q, WU F, YANG S, et al. Statistics of Warm-Season Hourly Extreme Precipitation in the Sichuan Basin, China during 2002-2021 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2024, 155(6): 4465-4480.
- [20] 孙崇智,李有华,王振国. 广西气象灾害预警信号时空分布特征 [J]. 气象研究与应用, 2022, 43(2): 87-92.
- [21] ZHU X D, ZHANG Q, SUN P, et al. Impact of Urbanization on Hourly Precipitation in Beijing, China: Spatiotemporal Patterns and Causes [J]. Global and Planetary Change, 2019, 172: 307-324.
- [22] SCHAEFER J T. The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill [J]. Weather and Forecasting, 1990, 5(4): 570-575.
- [23] BOLAN S, PADHYE L P, JASEMIZAD T, et al. Impacts of Climate Change on the Fate of Contaminants through Extreme Weather Events [J]. Science of the Total Environment, 2024, 909: 168388.
- [24] 肖伟军,刘运策. 暴雨预警信号发布策略与技巧初探 [J]. 广东气象, 2004, 26(3): 28-29.
- [25] LI H Q, CUI X P, ZHANG D L. On the Initiation of an Isolated Heavy-Rain-Producing Storm near the Central Urban Area of Beijing Metropolitan Region [J]. Monthly Weather Review, 2017, 145(1): 181-197.
- [26] 杨东. 暴雨公众预报准确率检验的评分方案设计与优化 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [27] 申莉莉,张迎新,隆璘雪,等. 1981—2016 年京津冀地区极端降水特征研究 [J]. 暴雨灾害, 2018, 37(5): 428-434.
- [28] ZHANG D L. Rapid Urbanization and More Extreme Rainfall Events [J]. Science Bulletin, 2020, 65(7): 516-518.
- [29] WOLSHON B, URBINA E, WILMOT C, et al. Review of Policies and Practices for Hurricane Evacuation. I: Transportation Planning, Preparedness, and Response [J]. Natural Hazards Review, 2005, 6(3): 129-142.
- [30] LECLERC J, JOSLYN S. The Cry Wolf Effect and Weather-Related Decision Making [J]. Risk Analysis, 2015, 35(3): 385-395.
- [31] XIAO T G, WANG Y Q, ZHAO Y B, et al. The Hazard Risk Assessment of Regional Heavy Rainfall over Sichuan Basin of China [J]. Natural Hazards, 2017, 88(2): 1155-1168.

责任编辑 崔玉洁