

王颖,翟丹华,廖要明,等,2024. 基于加密观测的重庆暴雨预警等级标准确定[J]. 气象,50(7):868-876. Wang Y,Zhai D H,Liao Y M,et al,2024. Determination of Chongqing rainstorm warning level standards based on high-density automatic observation[J]. Meteor Mon,50(7):868-876(in Chinese).

基于加密观测的重庆暴雨预警等级标准确定^{*}

王 颖^{1,2} 翟丹华³ 廖要明⁴ 康 俊^{1,2} 杨宝钢^{1,2}

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 重庆市气候中心,重庆 401147

3 重庆市气象台,重庆 401147

4 国家气候中心,北京 100081

提 要: 基于重庆市 2011—2021 年 2066 个加密观测自动气象站小时雨量和暴雨灾情数据,利用暴雨过程滑动抽样和百分位法确定区县暴雨预警信号发布标准及全市暴雨灾害风险预警等级标准,为重庆地方部门启动暴雨应急响应提供参考。结果表明:重庆设气象主管机构的 34 个区县累计发生 5363 次暴雨过程,平均每个区县每年出现 14.3 次,选取 1、3、12 h 作为暴雨过程预警信号发布参考历时;各历时雨量升序排列后按照 30%~50%、70%~80%、90%~95%、99%~99.9% 百分位区间取整,得到暴雨蓝、黄、橙、红预警等级阈值分别是:1 h-30-50-70-100 mm,3 h-50-70-100-150 mm,12 h-70-100-150-250 mm;区县不同预警信号的致灾概率随信号增强、历时增加而增大,综合各历时最高预警等级和最大致灾概率,各区县平均每年发布暴雨蓝、黄、橙、红预警 5.4、4.0、1.3、0.18 次,致灾概率分别是 30%、60%、85%、95%;全市累计出现 114 次区域暴雨过程,根据暴雨过程可能受灾区县个数发布暴雨灾害风险预警等级,平均每年发布Ⅳ级 5.3 次、Ⅲ级 3.1 次、Ⅱ级 1.6 次、Ⅰ级 0.1 次,与区县预警信号发布频次基本一致,符合预警发布规律。

关键词: 暴雨预警信号,暴雨过程滑动抽样法,百分位法,致灾概率,暴雨灾害预警

中图分类号: P49,P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.012301

Determination of Chongqing Rainstorm Warning Level Standards Based on High-Density Automatic Observation

WANG Ying^{1,2} ZHAI Danhua³ LIAO Yaoming⁴ KANG Jun^{1,2} YANG Baogang^{1,2}

1 CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147

2 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

3 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

4 National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the hourly rainfall data of 2066 automatic weather stations and rainstorm disaster information in Chongqing from 2011 to 2021, the rainstorm process slide sampling and percentile method are used to determine the rainstorm warning signal standards for counties and the disaster risk warning grades for the whole city, which is expected to provide some references for Chongqing local departments to initiate rainstorm emergency response. The main conclusions are as follows. A total of 5363 rainstorm processes occurred in 34 counties with meteorological services in Chongqing, with an average of 14.3 times per year in each county. The time lengths of 1, 3 and 12 h are selected as the reference durations for issuing

^{*} 科技创新 2030-“新一代人工智能”重大项目(2022ZD0119502)、重庆市气象局业务技术攻关项目(YWJSGG-202129、YWJSGG-202205)共同资助

2023 年 6 月 22 日收稿; 2023 年 11 月 3 日收修定稿

第一作者:王颖,主要从事气象灾害风险评估和气候可行性论证关键技术研究. E-mail:wy104_fly@163.com

rainstorm process warning signals. Rainstorm warning signal (blue, yellow, orange, and red) standard thresholds of different durations are obtained by sorting the rainfall data in ascending order to the nearest value within the 30%—50%, 70%—80%, 90%—95%, and 99%—99.9% percentile ranges, and they are 1 h-30-50-70-100 mm, 3 h-50-70-100-150 mm and 12 h-70-100-150-250 mm. The probability of disaster indicated by different warning signals increases with signal level and duration. Warning signals of blue, yellow, orange and red for each county have an average of 5.4, 4.0, 1.3 and 0.18 times per year according to the highest warning level of different durations, and the disaster probability of different warning signals are 30%, 60%, 85%, and 95% respectively. A total of 114 regional rainstorm processes occurred in the whole city of Chongqing from 2011 to 2021, and rainstorm disaster risk warning levels determined by the number of possible disaster counties have an average of 5.3 (Ⅳ), 3.1 (Ⅲ), 1.6 (Ⅱ) and 0.1 (Ⅰ) times per year. This is basically consistent with the frequency of counties and conforms to the regularity of warning releases.

Key words: rainstorm warning signal, rainstorm process sliced sampling method, percentile method, probability of disaster, rainstorm disaster warning

引 言

受气候变化和人类活动影响,极端降水事件的频率和强度增加(Zhai et al, 2004; Zhang et al, 2013; Roxy et al, 2017; 江洁等, 2022; 欧立健等, 2022; Shen and Chui, 2021),造成的灾害损失不断加大(王艳君等, 2014; 刘雨佳等, 2017; 胡畔等, 2021)。2010年甘肃舟曲局地大暴雨、2012年北京“7·21”特大暴雨、2016年6—7月长江流域连续大暴雨、2021年河南郑州“7·20”特大暴雨等极端降水事件,均给当地造成严重的经济损失和人员伤亡(曲晓波等, 2010; 谌芸等, 2012; 孙军等, 2012; 李安泰等, 2014; 王洪等, 2015; 孙劭等, 2017; 苏爱芳等, 2021; 2022),暴雨灾害已成为造成我国重大人员伤亡和经济损失的重要自然灾害(李傲等, 2022)。通过及时有效的气象服务手段,降低或避免城市暴雨灾害,是气象防灾减灾的重要途径(连治华等, 2018)。

暴雨预警是防御暴雨气象灾害的重要手段之一,黄铃光和黄慧琳(2021)在分析福建省暴雨预警指标时指出,现行预警信号存在标准较低易造成过度响应,重过程雨量而雨强信息体现不明显,时段多样性表述不利于加强公众感知度等问题,以上问题在重庆仍然存在。为重点解决预警信号阈值标准不适应防灾减灾需求、内容不规范、针对性不强、多级重复发布等问题,完善气象灾害预警信号业务规范标准和本地化的暴雨预警信号调整,是目前亟需解

决的关键问题。李林等(2018)开展了基于短时强降水特征的北京暴雨蓝色预警指标研究。陶玮等(2021)建立基于暴雨过程的持续天数、影响范围、平均日降水量、1 h最大降水量的安徽省暴雨灾害预警等级。任智慧等(2023)在综述暴雨山洪灾害预警研究进展时指出,以临界雨量为指标的雨量预警是目前中国小流域暴雨山洪灾害预警的主要技术手段,但综合考虑预警阈值发生概率及其致灾概率,优化“多级预警、多级响应”技术方法,是未来研究的重点方向。近年来,出现越来越多突破历史极值的极端降水事件(许凤雯等, 2020; 赵娴婷等, 2020; 肖柳斯等, 2021; 杨浩等, 2022; 张芳等, 2022),一方面受到气候变化的影响,另一方面因为站点密度加大使极端降水更容易被观测到。随着气象现代化事业的不断发展,气象监测、预报和服务工作向精细化方向延伸已刻不容缓。加密观测的自动气象站数据具有较高的应用价值,但因其缺乏严格的质量控制导致应用受限。

针对重庆地区现行暴雨预警信号标准偏低、缺少小时雨量标准、市级-区县级预警信号多级重复发布、预警信号的致灾情况不明、区域自动站数据系统性应用不足等问题,本文将基于重庆2011—2021年2066个加密自动气象观测站小时雨量和灾情数据,通过质量控制建立合理的历史降水数据集,开展不同历时超定量降水频次统计和致灾概率分析,制定区县暴雨预警信号阈值和全市暴雨灾害风险预警等级标准,为重庆市暴雨预警提供数据和技术支撑。

1 资料和方法

1.1 资料

(1)重庆市2066个自动气象站(包含34个国家级气象站)2011—2021年逐小时降水数据。站点分布如图1所示。

(2)重庆市暴雨气象灾害风险普查数据,主要来源于中国气象局气象灾害管理灾情直报系统、国家气候中心历史气象灾害数据集、区县暴雨过程服务材料等,起止时间为2011—2021年。

1.2 方法

1.2.1 降水数据质量控制

小时降水的局地性、极端性更强,时间一致性和空间一致性检验常难以判读数据的正确性,考虑对日降水(20—20时)数据进行质量控制,并赋不同的质量控制码。采用空间一致检验(任芝花等,2010;2015)初步确定正确数据和可疑数据,对可疑数据进行人工确定,得到质量相对较好的逐日降水数据。

根据各站日降水数据质量控制码,将可疑和错误数据相应站点当日的小时降水设置为缺测,得到质量相对可靠的逐小时降水数据。

1.2.2 区县暴雨过程

20—20时日降水量 ≥ 50 mm定义为单站暴雨,以区县为单元统计所有单站暴雨日,根据时间是否连续划分区县暴雨过程,一次区县暴雨过程中每天至少有1个站点达到暴雨标准。

1.2.3 区域暴雨过程

业务运行采用的区域暴雨过程定义为:某区县超过四分之一观测站24 h累计降水量达50 mm,记该区县出现暴雨天气过程,全市设气象主管机构的34个区县中有7个及以上出现暴雨天气过程,记为1次区域暴雨过程。区域暴雨过程的起止时间按照实际天气过程确定,2011—2021年累计出现114次区域暴雨过程。

1.2.4 暴雨过程滑动抽样法

根据暴雨过程的起止时间,滑动计算过程内对应空间范围最大小时降水量,得到若干次暴雨过程不同历时最大降水数据集,定义为暴雨过程滑动抽样法。

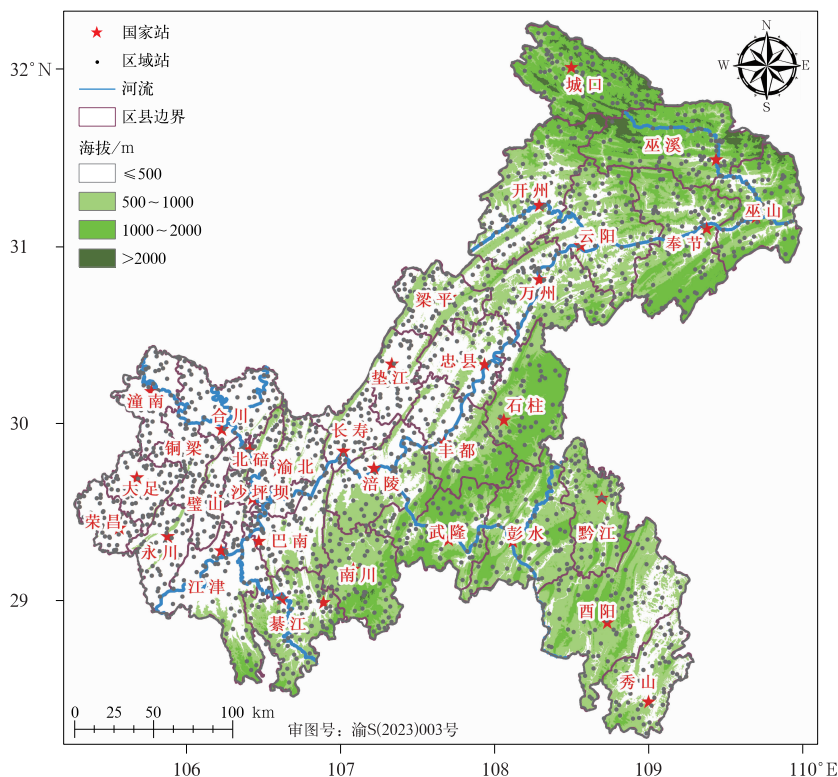


图1 重庆地区气象站空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in Chongqing

2 结果与分析

2.1 暴雨预警等级阈值确定

全市设气象主管机构的 34 个区县 2011—2021 年共计出现 5363 次暴雨过程,每个区县平均每年发生 14.3 次。不同历时降水量随百分位的变化如图 2 所示,1 h 和 3 h 降水差异与 3 h 和 12 h 降水差异相当,梯度合理,6 h 和 24 h 降水与 12 h 接近。因此,选用 1、3、12 h 作为暴雨过程预警信号发布的参考历时。蓝色、黄色、橙色、红色预警信号按不同百分位区间(30%~50%、70%~80%、90%~95%、99%~99.9%)结合实际业务取整、且兼顾变化规律得到。

不同历时暴雨预警信号的阈值和对应百分位如表 1 所示。从不同阈值百分位来看,3 h 预警信号等级的标准更宽松,但过去红色预警信号的发布标准为:3 h 降水量将达到 100 mm 以上,或者已达 100 mm 以上且降水可能持续,新阈值标准已然强

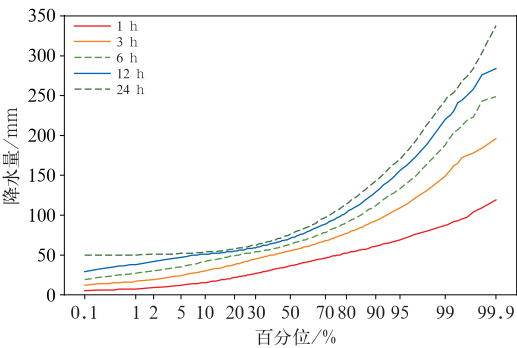


图 2 2011—2021 年重庆区县暴雨过程
各历时不同百分位对应降水量
Fig. 2 Precipitation corresponding to different
percentiles of county's rainstorm processes for
each duration in Chongqing from 2011 to 2021

表 1 2011—2021 年重庆暴雨预警信号阈值
和百分位统计

预警信号	阈值/mm、百分位/%		
	1 h	3 h	12 h
蓝色	30、36	50、38	70、49
黄色	50、76	70、73	100、78
橙色	70、95	100、93	150、94
红色	100、99.6	150、99	250、99.6

于过去预警信号标准。因此,调整后的预警信号阈值较过去暴雨预警信号的发布标准更加严格。

2.2 暴雨预警信号应发频次统计

针对不同历时暴雨预警信号等级划分标准,按照一次暴雨过程只取最高预警等级作为综合等级标准,统计重庆暴雨预警信号应发频次(表 2)。按照不同等级发布标准,每个区县平均每年应发布蓝色、黄色、橙色、红色预警 5.72、2.76、0.61、0.13 次(1 h 发布标准),4.95、2.83、0.91、0.18 次(3 h 发布标准),4.25、2.30、0.76、0.14 次(12 h 发布标准),5.36、4.02、1.34、0.22 次(综合等级发布标准)。从各历时和综合各历时发布来看,预警等级越高,发布次数越少,符合预警信号的实际发布规律。从发布预警信号的总次数来看,历时越长,发布暴雨预警信号的次数越少,表明短历时标准更容易达到,且综合标准的总次数大于任意历时的总次数,符合实际情况。蓝色预警信号下,综合标准发布次数较 1 h 发布次数偏少,从数据源头分析得到,1 h 降水量为蓝色预警标准的暴雨过程共计 2140 次,其中 3 h 或 12 h 降水量达到黄色、橙色、红色预警标准的次数分别是 584、93、1 次,表明小时雨强一般但持续时间较长的暴雨过程,将通过其他历时实现预警信号的升级。综合标准的暴雨预警信号发布起到了综合考虑、最

表 2 2011—2021 年重庆暴雨预警信号发布频次统计

预警信号	暴雨频次[次/(区县·年)]			
	1 h	3 h	12 h	综合各历时 最高等级
	30-50-70-100 mm	50-70-100-150 mm	70-100-150-250 mm	
蓝色	5.72	4.95	4.25	5.36
黄色	2.76	2.83	2.30	4.02
橙色	0.61	0.91	0.76	1.34
红色	0.13	0.18	0.14	0.22
总次数	9.22	8.87	7.45	10.94

强发布的预警效果。

以综合等级为基础,各区县 2011—2021 年应发暴雨预警信号频次如图 3 所示。各区县平均每年有 1.7~4.8 次不能达到预警信号发布标准。蓝色预警信号发布次数在 4.0~7.5 次,预警次数在 6 次以上的区县包括:渝东北大部、东南部酉阳和石柱、西

部的南川。黄色预警信号发布次数在 2.4~6.0 次,预警次数在 5.5 次以上的区县包括:西部的合川、东北部开州和巫溪、东南部的酉阳。橙色预警信号发布次数在 0.4~2.5 次,预警次数在 2 次以上的区县包括:东北部的云阳、东南部的彭水和酉阳。红色预警信号发布次数小于 0.5 次,2011—2021 年未达到红色预警标准的区县有:东北部的巫山、奉节、城口,东南部的黔江,中心城区的渝北,西部的綦江。总体而言,各区县以蓝色预警和黄色预警信号最多,平均每年发布橙色预警 1~2 次,每 2~10 年发布 1 次红色预警。

2.3 暴雨预警信号致灾概率分析

根据 2011—2021 年暴雨灾情数据,匹配查找 5363 次区县暴雨过程是否出现暴雨灾情,统计不同暴雨预警等级下的暴雨次数、受灾次数,进而计算不同预警信号等级的致灾概率(表 3)。随着预警等级的升高,暴雨致灾概率不断增加。同级预警信号中除蓝色预警外,其余信号随历时延长而致灾概率升高。暴雨过程的预警信号的致灾概率大小取各历时最大致灾概率,整体而言,暴雨历时越长,预警等级越高,致灾概率越大,长历时暴雨更容易致灾。由表 3 可知,各预警信号蓝、黄、橙、红四级对应的致灾概率最高分别为 28.7%、57.0%、86.6%、100.0%。从预警防御角度考虑,红色预警表示出现灾害的概率极高,起警示作用,如果提前做好防御可以减轻或避免灾害的发生。因此,为了体现预警无绝对和方便计算,致灾概率分别取近似值 30%、60%、85%、95%。

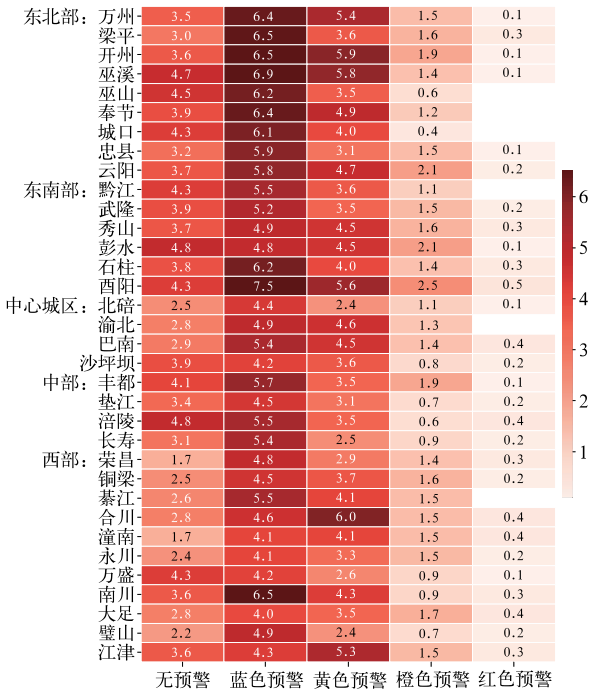


图 3 2011—2021 年重庆各区县暴雨预警信号年均应发次数统计(单位:次·a⁻¹)

Fig. 3 The annual average number of rainstorm warning signals issued by each county in Chongqing from 2011 to 2021 (unit: times per year)

表 3 2011—2021 年重庆区(县)暴雨预警信号的致灾概率统计

Table 3 Disaster probability of rainstorm warning signals in Chongqing from 2011 to 2021

降水历时/h	等级阈值/mm	预警信号	暴雨次数/次	受灾次数/次	致灾概率/%
1	30	蓝色	2140	618	28.9
	50	黄色	1032	419	40.7
	70	橙色	227	144	63.4
	100	红色	20	15	75.0
3	50	蓝色	1850	442	23.9
	70	黄色	1059	461	43.5
	100	橙色	341	253	74.2
	150	红色	54	53	98.1
12	70	蓝色	1591	457	28.7
	100	黄色	861	491	57.0
	150	橙色	284	246	86.6
	250	红色	22	22	100.0

2.4 全市暴雨灾害风险预警等级标准

当全市达到区域暴雨过程标准时,发布全市暴雨灾害风险预警等级。根据区域暴雨过程起止时间,按区县统计历次过程最大1、3、12 h降水量,全市预警等级发布基于区域暴雨过程中可能受灾区县数确定(记为 $N_{\text{受灾}}$)。具体如下:

$$N_{\text{受灾}} = N_{\text{蓝}} \times 30\% + N_{\text{黄}} \times 60\% + N_{\text{橙}} \times 85\% + N_{\text{红}} \times 95\%$$

式中: $N_{\text{蓝}}$ 、 $N_{\text{黄}}$ 、 $N_{\text{橙}}$ 、 $N_{\text{红}}$ 分别代表一次区域暴雨过程中发布蓝、黄、橙、红预警信号的区县数,所有区县中的最高预警等级记为 $W_{\text{最高}}$ 。将 $N_{\text{受灾}}$ 按照99%、90%、60%百分位阈值取整,划分暴雨灾害预警等级标准,分别如下:

当 $N_{\text{受灾}} \in [20, 34]$ 且 $W_{\text{最高}}$ 为红色时,发布全市暴雨灾害Ⅰ级预警;

当 $N_{\text{受灾}} \in [15, 20]$ 且 $W_{\text{最高}}$ 为橙色及以上时,发布全市暴雨灾害Ⅱ级预警;

当 $N_{\text{受灾}} \in [10, 15]$ 且 $W_{\text{最高}}$ 为黄色及以上时,发布全市暴雨灾害Ⅲ级预警;

当 $N_{\text{受灾}} \in [2, 10]$ 时,发布全市暴雨灾害Ⅳ级预警。

根据不同的阈值区间,2011—2021年全市应发布Ⅰ~Ⅳ级预警各1、18、34、58次,每年发布次数分别约0.1、1.6、3.1、5.3次,与区县预警频次基本一致且符合实际发布规律。

根据区域暴雨过程的起止时间,匹配灾情数据,统计历次过程的实际受灾区县数。历次区域暴雨过程可能受灾区县数与实际受灾区县数具有较好的一致性(图4),114次区域暴雨过程的实际受灾区县数平均为9.9个,略少于可能受灾区县数(10.0个),基本一致,且符合预警略高于实况灾害防御需求。

全市发布Ⅰ级预警的过程为2020年“7·15”区域暴雨,降水实况如下:7月14日20时至18日14时,13个区县84个雨量站累计降水量超过250 mm,32个区县797个雨量站超过100 mm,最大降水量464.8 mm,最大小时降水量95.5 mm。按照最新阈值统计,发布预警信号的区县数共计31个,其中:蓝色预警5个、黄色预警9个、橙色预警13个、红色预警4个,可能受灾区县数为22.6个。

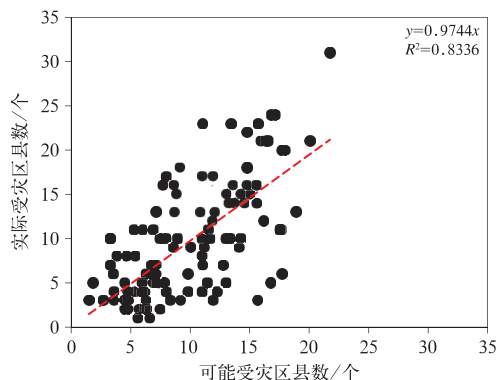


图4 2011—2021年重庆区域暴雨过程可能受灾与实际受灾区县数对比

Fig. 4 Comparison of the county numbers between potentially-affected and actually-affected areas by the regional rainstorm process in Chongqing from 2011 to 2021

本次过程实际造成31个区县受灾,直接经济损失超14亿。达到预警发布标准的区县有3个未受灾,分别是沙坪坝(黄色预警)、璧山(蓝色预警)、万盛(蓝色预警),未达到预警标准的3个区县受灾(渝东北巫山、渝东南黔江、中部长寿),但直接经济损失排后5位,相对其他区县较轻。经济损失排名前10的区县均为橙色以上预警等级,直接经济损失在4300万元以上。灾害损失与预警等级存在较好的对应关系,同时受地形地貌、地方防灾减灾能力等因素的影响,不可能为简单的线性相关。

与5363次区县暴雨过程相关且来源于气象灾害风险普查成果的暴雨灾情数据,其时间分布特点如图5所示。2011—2019年灾情次数较少,西部(璧山、大足、潼南)和东南部(武隆、酉阳、黔江)部分区县灾情总体较少,可能存在灾情数据遗漏情况。如2015年“8·17”暴雨过程,重庆市璧山区的12 h最大降水量为255.6 mm,达到红色预警等级,但无上报灾情记录。通过多方调查,最终在璧山区档案馆查到公路管理所关于“8·17”挡水墙毁维修费用的请示,交通委员会关于补助健龙镇“8·17”洪灾道路毁损资金的请示,丁家街道办事处关于“8·17”洪灾损毁生产便道恢复的函,实际上该过程已造成较为严重的洪涝灾害,灾情记录缺漏可能是由于当时灾情统计或报送等环节出现了问题,现经过“气象灾害风险普查”补充。

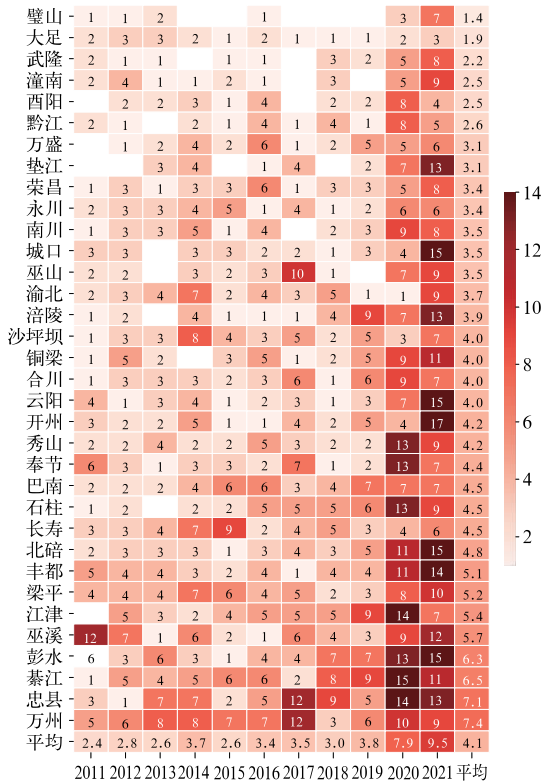


图 5 2011—2021 年重庆区县暴雨过程
中灾情记录次数统计(单位:次)

Fig. 5 Disaster record frequency of all county
rainstorm processes in Chongqing from
2011 to 2021 (unit: times)

3 讨 论

实际应用中常采用其他方法计算暴雨预警信号阈值:首先构建不同时效的历史雨量数据集,包括

1 h 雨量序列,滚动 3、6、12 h 累计雨量序列,计算各时效升序降水量序列中不同百分位等级(如 90%、95%、99%等)对应的雨量值,根据实际情况确定合适的暴雨预警等级阈值。将以上方法记为滚动样本百分位法。

该方法涉及样本截断值、单站纵向时间百分位、多站横向空间百分位等取值问题。小时降水量属于高偏态序列,零值居多,不同的截断值将导致百分位计算结果差异很大,如沙坪坝国家站 1 h 降水量分别选取 0.1、1、5、10、20 mm 以上样本时,得到的 95%百分位降水量分别是 8.4、19.7、33.4、43.0、52.7 mm,差异明显。时间纵向百分位阈值在空间横向对比中存在一定的波动范围,如当截断阈值取 10 mm、时间百分位取 95%条件下,1 h 降水 90%、95%、99%的空间百分位值分别在 17~48、19~57、20~90 mm 变化,空间百分位值的选取亦会对统计结果造成影响。

此外,除 1 h 数据集是独立样本外,其他历时(3、6、12 h 等)滚动样本之间存在交叉重复,如连续 12 h 出现较大降水,但 12 个样本隶属于同一场降水过程,必然影响统计结果。为保证统计样本的独立性,不同历时按照零值截断划分为若干降水过程,选取过程最大降水量作为基础样本统计百分位阈值。预警信号与滚动样本百分位法阈值的关系显示(表 4),当截断值为 10 mm 时,蓝色阈值时间×空间百分位总体在 80%~90%,黄色、橙色、红色阈值分别在 93%~95%、96%~98%、98.5%~99%,但截断阈值、时间百分位、空间百分位可以有多种组合,不确定性较大。

表 4 2011—2021 年重庆各历时预警等级阈值与滚动样本百分位法的百分位结果(截断值=10 mm)

Table 4 Rainstorm warning thresholds and traditional percentile results for each duration in Chongqing from 2011 to 2021 (truncated precipitation value = 10 mm)

降水历时	蓝色	黄色	橙色	红色
1 h	时 80%-空 99%	时 95%-空 99%	时 98.5%-空 99%	时 99.9%-空 99%
3 h	时 90%-空 97%	时 96.5%-空 97%	时 99%-空 97%	时 99.7%-空 99%
12 h	时 90%-空 99%	时 96%-空 99%	时 99%-空 99%	时 99.7%-空 99%

总体而言,在滚动样本百分位法中,不同历时的基础样本长度不同、偏度不同,以相同的百分位取临界阈值时,极端性不同,存在诸多不确定性,故还需要进一步研究确定,暂不推荐使用。暴雨预警信号发布只会在可能发生暴雨过程的条件下进行,采用暴雨过程滑动抽样法是相对合适的,能够有效保证不同历时的基础样本长度一致,百分位阈值的极端

性一致,便于统计受灾情况,故使用该方法更符合致灾机理,更科学合理。

4 结 论

本文根据 2011—2021 年加密自动气象站逐小时降水观测数据和暴雨灾情资料进行回算,确定了

重庆区县暴雨预警信号发布标准和全市暴雨灾害风险预警等级标准,具体结论如下:

(1)各历时蓝-黄-橙-红暴雨预警信号阈值如下:1 h-30-50-70-100 mm、3 h-50-70-100-150 mm、12 h-70-100-150-250 mm,区县暴雨过程预警信号发布取各历时最高等级,每个区县平均每年发布蓝色、黄色、橙色、红色预警各5.4、4.0、1.3、0.18次。

(2)区县暴雨预警信号的致灾概率随等级升高、历时增加而增大,暴雨蓝、黄、橙、红预警信号的致灾概率分别是25%~30%、45%~60%、75%~90%、80%~100%,按最高致灾概率和考虑预警防御取值依次是30%、60%、85%、95%。

(3)全市暴雨灾害风险预警等级按照可能受灾区县数($N_{\text{受灾}}$)和区县最高预警等级($W_{\text{最高}}$)发布,当 $20 \leq N_{\text{受灾}} \leq 34$ 且 $W_{\text{最高}}$ 为红色,发布Ⅰ级预警,当 $15 \leq N_{\text{受灾}} < 20$ 且 $W_{\text{最高}}$ 为橙色及以上,发布Ⅱ级预警,当 $10 \leq N_{\text{受灾}} < 15$ 且 $W_{\text{最高}}$ 为黄色及以上,发布Ⅲ级预警,当 $2 \leq N_{\text{受灾}} < 10$,发布Ⅳ级预警。全市平均每年发布Ⅰ~Ⅳ级预警的次数为0.1、1.6、3.1、5.3次,与区县暴雨预警信号发布次数相当。区域暴雨过程的可能受灾区县数总体大于实际受灾区县数,符合预警略高于实况的灾害防御要求。

(4)滚动样本百分位法涉及样本独立性、序列截断值、时间百分位、空间百分位等多重问题,存在较大的不确定性。暴雨过程滑动抽样法,可使不同历时对应暴雨过程一致,样本序列长度一致、百分位阈值的极端性一致,保证了各历时样本的独立取值,较滚动样本百分位法更优。

参考文献

- 湛芸,孙军,徐珺,等,2012.北京721特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J].气象,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1255-1266(in Chinese).
- 胡畔,陈波,史培军,2021.中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J].地理学报,76(5):1148-1162. Hu P, Chen B, Shi P J, 2021. Spatiotemporal patterns and influencing factors of rainstorm-induced flood disasters in China[J]. Acta Geogr Sin, 76(5):1148-1162(in Chinese).
- 黄铃光,黄慧琳,2021.福建省短时强降水分布特征及暴雨预警指标分析[J].海峡科学,(9):11-15. Huang L G, Huang H L, 2021. Characteristics of short-term heavy precipitation and analysis of rainstorm warning index in Fujian Province[J]. Straits Sci, (9):11-15(in Chinese).

- 江洁,周天军,张文霞,2022.近60年来中国主要流域极端降水演变特征[J].大气科学,46(3):707-724. Jiang J, Zhou T J, Zhang W X, 2022. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years[J]. Chin J Atmos Sci, 46(3):707-724(in Chinese).
- 李安泰,王亚明,何宏让,等,2014.耦合不同陆面方案的WRF模式对“8.8”舟曲暴雨过程的模拟[J].气象与减灾研究,37(1):21-28. Li A T, Wang Y M, He H R, et al, 2014. Numeric simulations of rainstorm in Zhouqu County on 8 August 2010 using the WRF model with different land surface schemes[J]. Meteor Disaster Reduct Res, 37(1):21-28(in Chinese).
- 李傲,高媛,崔春光,2022.暴雨灾害预警信息传播渠道及社会管理机制分析[J].暴雨灾害,41(3):348-354. Li A, Gao Y, Cui C G, 2022. Analysis on the dissemination way and social management strategy of early warning information of rainstorm disaster[J]. Torr Rain Dis, 41(3):348-354(in Chinese).
- 李林,张子曰,范雪波,等,2018.基于短时强降水特征的北京暴雨蓝色预警指标研究[J].气候与环境研究,23(3):268-274. Li L, Zhang Z Y, Fan X B, et al, 2018. A study on the blue rainstorm warning index based on characteristics of short-period heavy rainfall in Beijing[J]. Climatic Environ Res, 23(3):268-274(in Chinese).
- 连治华,王维国,王莉萍,等,2018.城市暴雨灾害影响及气象服务技术综述与案例分析[J].防灾科技学院学报,20(4):60-67. Lian Z H, Wang W G, Wang L P, et al, 2018. Review of urban rainstorm disaster effects and meteorological service technology and its case analysis[J]. J Inst Disaster Prev, 20(4):60-67(in Chinese).
- 刘雨佳,张强,余予,2017.华南地区1961—2014年暴雨及典型暴雨事件统计分析[J].暴雨灾害,36(1):26-32. Liu Y J, Zhang Q, Yu Y, 2017. Analysis of heavy rain and typical torrential rain event in southern China during 1961—2014[J]. Torr Rain Dis, 36(1):26-32(in Chinese).
- 欧立健,余锦华,钟校尧,等,2022.海表温度的增暖趋势和自然变率对长江中下游夏季极端降水强度的影响[J].大气科学,46(6):1595-1606. Ou L J, Yu J H, Zhong X Y, et al, 2022. Impacts of the SST warming trend and natural variability on the summer extreme precipitation intensity of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chin J Atmos Sci, 46(6):1595-1606(in Chinese).
- 曲晓波,张涛,刘鑫华,等,2010.舟曲“8·8”特大山洪泥石流灾害气象成因分析[J].气象,36(10):102-105. Qu X B, Zhang T, Liu X H, et al, 2010. Analysis on the meteorological causes for the 8 August 2010 massive mudslide in Zhouqu, Gansu Province[J]. Meteor Mon, 36(10):102-105(in Chinese).
- 任芝花,张志富,孙超,等,2015.全国自动气象站实时观测资料三级质量控制系统研制[J].气象,41(10):1268-1277. Ren Z H, Zhang Z F, Sun C, et al, 2015. Development of three-step quality control system of real-time observation data from AWS in China[J]. Meteor Mon, 41(10):1268-1277(in Chinese).
- 任芝花,赵平,张强,等,2010.适用于全国自动站小时降水资料的质

- 量控制方法[J]. 气象, 36(7):123-132. Ren Z H, Zhao P, Zhang Q, et al, 2010. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China[J]. Meteor Mon, 36(7):123-132(in Chinese).
- 任智慧, 桑燕芳, 杨默远, 等, 2023. 暴雨山洪灾害预警方法研究进展[J]. 地理科学进展, 42(1):185-196. Ren Z H, Sang Y F, Yang M Y, et al, 2023. Progress of research on the methods for the early warning of mountain flash flood disasters[J]. Prog Geogr, 42(1):185-196(in Chinese).
- 苏爱芳, 吕晓娜, 崔丽曼, 等, 2021. 郑州“7·20”极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴雨灾害, 40(5):445-454. Su A F, Lv X N, Cui L M, et al, 2021. The basic observational analysis of “7. 20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Torr Rain Dis, 40(5):445-454(in Chinese).
- 苏爱芳, 席乐, 吕晓娜, 等, 2022. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析[J]. 气象, 48(5):556-570. Su A F, Xi L, Lyu X N, et al, 2022. Analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan[J]. Meteor Mon, 48(5):556-570(in Chinese).
- 孙军, 湛芸, 杨舒楠, 等, 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 38(10):1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1267-1277(in Chinese).
- 孙劭, 李多, 刘绿柳, 等, 2017. 2016 年全球重大天气气候事件及其成因[J]. 气象, 43(4):477-485. Sun S, Li D, Liu L L, et al, 2017. Global major weather and climate events in 2016 and the possible causes[J]. Meteor Mon, 43(4):477-485(in Chinese).
- 陶玮, 郭婷, 吴瑞姣, 等, 2021. 安徽省暴雨灾害预警等级的划分及其应用[J]. 暴雨灾害, 40(2):174-181. Tao W, Guo T, Wu R J, et al, 2021. Classification of early warning levels for rainstorm disaster and its application in Anhui Province[J]. Torr Rain Dis, 40(2):174-181(in Chinese).
- 王洪, 王东海, 万齐林, 2015. 多普勒雷达资料同化在“7. 21”北京特大暴雨个例中的应用[J]. 气象学报, 73(4):679-696. Wang H, Wang D H, Wan Q L, 2015. Application of assimilating Doppler weather radar data in the “7. 21” Beijing excessive storm[J]. Acta Meteor Sin, 73(4):679-696(in Chinese).
- 王艳君, 高超, 王安乾, 等, 2014. 中国暴雨洪涝灾害的暴露度与脆弱性时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 10(6):391-398. Wang Y J, Gao C, Wang A Q, et al, 2014. Temporal and spatial variation of exposure and vulnerability of flood disaster in China[J]. Climate Change Res, 10(6):391-398(in Chinese).
- 肖柳斯, 张华龙, 张旭斌, 等, 2021. 基于 CMA-TRAMS 集合预报的“5·22”极端降水事件可预报性分析[J]. 气象学报, 79(6):956-976. Xiao L S, Zhang H L, Zhang X B, et al, 2021. Predictability analysis of the extremely heavy rainfall in the Pearl River Delta on 22 May 2020 using CMA-TRAMS-based ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 79(6):956-976(in Chinese).
- 许凤雯, 狄靖月, 李宇梅, 等, 2020. 北京“7·16”暴雨诱发地质灾害成因分析[J]. 气象, 46(5):705-715. Xu F W, Di J Y, Li Y M, et al, 2020. Cause analysis of the geological hazards induced by the 16 July 2018 rainstorm in Beijing[J]. Meteor Mon, 46(5):705-715(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).
- 张芳, 张芳华, 孔期, 等, 2022. 2018 年 5 月 21 日四川盆地极端暴雨的中尺度成因和预报偏差分析[J]. 气象, 48(6):691-704. Zhang F, Zhang F H, Kong Q, et al, 2022. Mesoscale mechanisms and forecast bias of the extreme rainstorm in Sichuan Basin on 21 May 2018[J]. Meteor Mon, 48(6):691-704(in Chinese).
- 赵娟婷, 王晓芳, 王珏, 等, 2020. 2016 年 7 月 18—20 日湖北省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 气象, 46(4):490-502. Zhao X T, Wang X F, Wang J, et al, 2020. Analysis of mesoscale characteristics of torrential rainfall in Hubei Province during 18—20 July 2016[J]. Meteor Mon, 46(4):490-502(in Chinese).
- Roxy M K, Ghosh S, Pathak A, et al, 2017. A threefold rise in widespread extreme rain events over central India[J]. Nat Commun, 8(1):708.
- Shen M X, Chui T F M, 2021. Characterizing the responses of local floods to changing climate in three different hydroclimatic regions across the United States[J]. Adv Water Resour, 150:103885.
- Zhai P M, Chao Q C, Zou X K, 2004. Progress in China's climate change study in the 20th century[J]. J Geogr Sci, 14(1):3-11.
- Zhang Q, Li J F, Singh V P, et al, 2013. Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes; implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle[J]. Global Planet Change, 111:57-76.

(本文责编:俞卫平)