

凯里市城市内涝防治设计重现期降雨量阈值研究

袁芳菊^{1*}, 张仁忠²

¹黔东南州气象局, 贵州 凯里

²锦屏县气象局, 贵州 锦屏

收稿日期: 2025年10月6日; 录用日期: 2025年11月6日; 发布日期: 2025年11月13日

摘要

基于凯里市1960~2021年逐年最大日降水量和最大小时降水量数据, 结合城市内涝受灾资料, 采用重现期方法对城市排水与内涝防治标准进行分析。研究表明: 地下商业广场排水设计标准对应10~20年一遇, 日降水量阈值为163.2~197.6 mm, 小时降水量阈值为65.4~72.1 mm; 内涝防洪标准为20~30年一遇, 相应日降水量达197.6~217.6 mm, 小时降水量达72.1~75.8 mm。当日降水量超过163.2 mm或小时降水量超过65.4 mm时, 中心城区地下通道、下沉式广场等易涝点内涝风险显著增加; 达到197.6 mm和72.1 mm, 则内涝灾害风险极高。研究成果有助于气象部门更好地开展气象保障服务工作, 为城市内涝气象防灾减灾提供科学的参考依据。

关键词

凯里, 城市内涝, 重现期, 降雨量, 阈值

A Study on Rainfall Thresholds for Urban Waterlogging Prevention and Control in Kaili City Based on Return Period

Fangju Yuan^{1*}, Renzhong Zhang²

¹Qiandongnan Meteorological Bureau, Kaili Guizhou

²Jinping Meteorological Bureau, Jinping Guizhou

Received: October 6, 2025; accepted: November 6, 2025; published: November 13, 2025

*第一作者。

文章引用: 袁芳菊, 张仁忠. 凯里市城市内涝防治设计重现期降雨量阈值研究[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(6): 1239-1246. DOI: 10.12677/ccrl.2025.146124

Abstract

Based on the annual maximum daily precipitation and maximum hourly precipitation data for Kaili City from 1960 to 2021, combined with urban waterlogging disaster records, this study analyzes urban drainage and waterlogging prevention standards using the return period method. The results indicate that the drainage design standard for underground commercial plazas corresponds to a 10~20 year return period, with daily precipitation thresholds of 163.2~197.6 mm and hourly precipitation thresholds of 65.4~72.1 mm. The urban waterlogging flood control standard is set at a 20~30 year return period, with corresponding daily precipitation reaching 197.6~217.6 mm and hourly precipitation reaching 72.1~75.8 mm. When daily precipitation exceeds 163.2 mm or hourly precipitation exceeds 65.4 mm, the risk of waterlogging significantly increases at vulnerable locations such as underground passages and sunken plazas in the urban center. When precipitation reaches 197.6 mm (daily) or 72.1 mm (hourly), the risk of severe waterlogging disasters becomes extremely high. The findings of this study can help meteorological departments better provide meteorological support services and offer a scientific reference for urban waterlogging prevention and disaster mitigation.

Keywords

Kaili, Urban Waterlogging, Return Period, Rainfall, Threshold

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

凯里市位于贵州省东南部,是贵州省黔东南苗族侗族自治州州府所在地,是全州政治、经济、文化中心。全市辖 11 镇 9 个街道,辖区面积 1569.69 km²,常住人口 71.72 万人,2021 年户籍人口 58.82 万人,少数民族占户籍人口的 82.2%,人口密集地主要在城区。受全球气候变暖和极端天气气候事件的影响,造成了严重的人员伤亡和经济损失[1]-[4]。近年来,凯里城市化进程得到了快速发展,城镇内涝引起的灾害给人们生命财产造成了较大的损失,特别是 2021 年河南郑州的特大暴雨灾害[5][6]、2016 年湖北省特大暴雨[7]、2017 年广州特大暴雨[8][9]。城镇内涝引起的灾害也得到了各级政府部门和学者的重视。造成城市内涝有多个方面因素,主要有气象条件、城市发展和规划建设、城市管理、地形等因素。从气候变化方面分析,暴雨是引发城市内涝的主要致灾因子和客观先决条件[10]-[13]。气象部门作为气象防灾减灾第一道防线,做好气象服务工作是关乎民生的大事。城市内涝气象服务的主要做法是发布暴雨预警信号和开展具有针对性的气象叫应服务。根据贵州省气象部门相关规定:贵州省暴雨预警信号分三级,分别以黄色(6 小时内降雨量将达到或已经达到 50 毫米以上,且降雨持续)、橙色(3 小时内降雨量将达到或已经达到 100 毫米以上,且降雨持续)和红色表示(3 小时内降雨量将达到或已经达到 150 毫米以上,或 6 小时内降雨量将达到或已经达到 200 毫米以上,且降雨持续)。预警信号降水量级是固定不变的,具有一定的代表性,但针对性不强。针对城市内涝的气象服务,目前大多采用阈值叫应。城市内涝气象服务叫应阈值在国内多有研究,不同的地区,阈值略有不同。史军[14]等的研究表明,上海市中心城区暴雨积水程度和 1 h 降水强度和 2 h 累积雨量密切相关。吕玉环[15]等利用百分位方法对天津武清区研究表明,

道路积水暴雨出现初始阶段的 1 h 降水强度和 2 h、3 h 累积雨量密切相关, 道路积水阈值分别为 20~40 mm、50~70 mm 和 80~100 mm, 会出现不同程度的积水。周苑[16]对遵义市播州区“三个叫应”暴雨阈值研究得出, 1 小时降雨量 40 毫米、2 小时雨量 60 毫米、3 小时降雨量 80 毫米、6 小时降雨量 100 毫米、24 小时雨量 120 毫米及以上且降雨还可能持续作为叫应阈值。安承德[17]对石阡的研究表明, 1 h 雨量达 35 mm、3 h 雨量达 70 mm 或 6 h 雨量达 90 mm 作为暴雨叫应阈值。廖洪敏[18]等也对铜仁玉屏暴雨叫应阈值作了深入研究。凯里市城区多地下通道、地下商场、地下停车场以及低洼道路容易积水路段, 开展凯里市城镇内涝气象服务叫应阈值研究, 有助于气象部门更好地开展气象服务工作, 为气象防灾减灾提供科学的参考依据。

2. 资料和方法

2.1. 资料

资料来源于气象大数据天擎系统中凯里国家气象站气象逐年最大日降水资料和逐年最大小时降水资料, 时间为 1960~2021 年, 共 62a。据统计, 凯里市城市内涝主要有三种类型的隐患点, 一是道路低洼路段, 当降水量达到一定程度时, 道路积水, 给行人和车辆造成生命财产安全, 此类型隐患点共有 5 处, 见图 1 (底图为百度地图); 二是地下商业广场和地下通道, 共 8 处, 到目前为止, 还未出现内涝灾害; 三是各小区地下停车场, 凯里市内各高层建筑均建设有小区地下停车场, 此类隐患点较多。

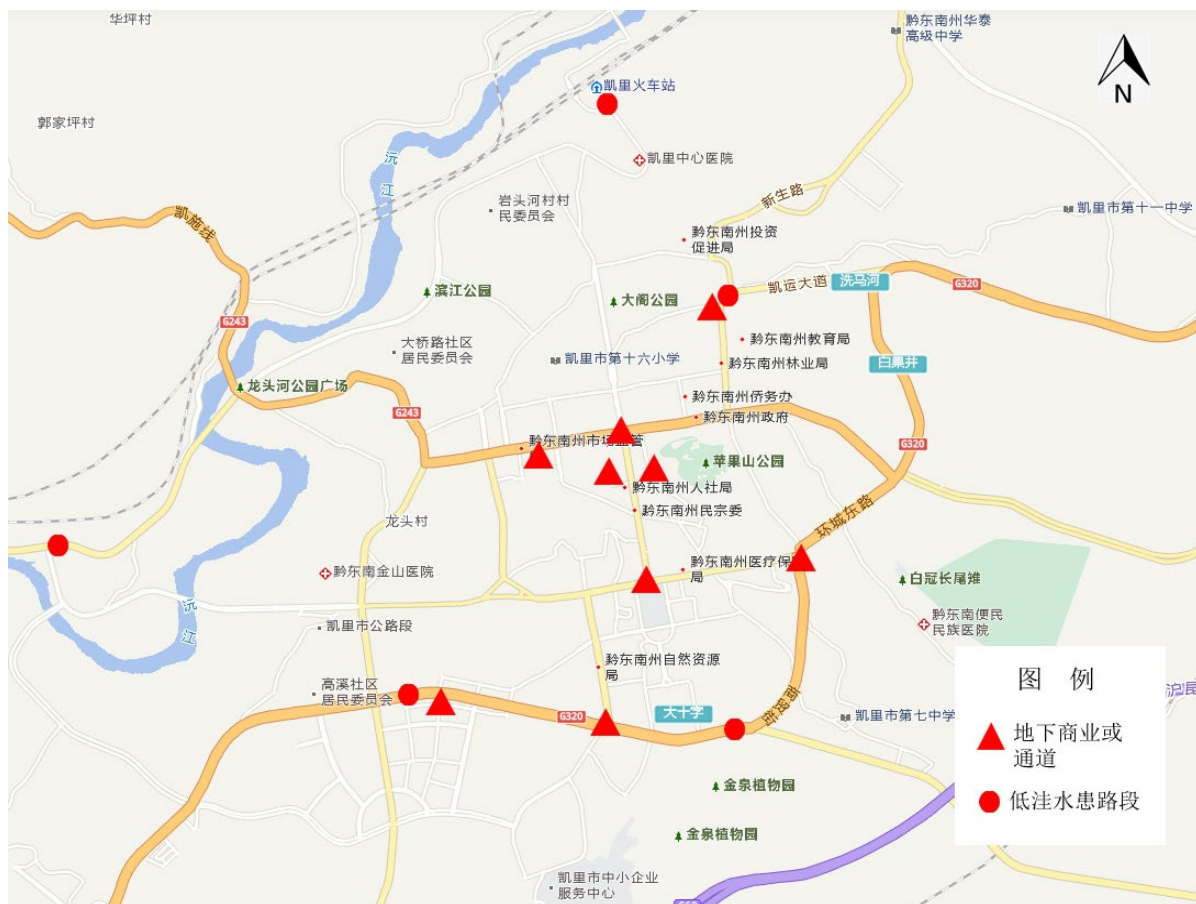


Figure 1. Urban waterlogging hazard points in Kaili City
图 1. 凯里市城市内涝隐患点

2.2. 研究方法

气象阈值的研究方法较多, 常见的有百分位法、试验法、统计法等[15][19]-[22]。针对城市内涝的预警气象服务, 气象部门多采用暴雨预警中固定的数值代替。一些省份也编制了地方标准, 比如湖南省《城市内涝气象服务规范》(2022 年征求意见稿)规定, 城市内涝临灾警报分为 I 级(特别严重)、II 级(严重)、III 级(较重), 分别以红色、橙色、黄色图标表示。未来 1 h 降雨量 70 mm 以上为红色; 未来 1 h 降雨量 50 mm 以上, 70 mm 以下为橙色; 未来 1 h 降雨量 30 mm 以上, 50 mm 以下为黄色。各地预警阈值会因当地气候特征和防汛标准不同而不同。城市内涝的发生除了具有强降水之外, 排水系统的完善也是重要的原因之一。当排水系统排水量小于降水产生的雨水量时, 发生城市内涝的概率较大。最新的《室外排水设计标准》(GB 50014-2021)规定, 雨水管渠的设计流量应根据雨水管渠设计重现期确定。雨水管渠设计重现期应根据汇水地区性质、城镇类型、地形特点和气候特征等因素, 其降水强度符合表 1 规定。

Table 1. Rainwater pipe network design return period
表 1. 雨水管渠设计重现期

城镇类型	中心城区	非中心城区	中心城区的重要地区	中心城区地下通道和下沉式广场等
超大城市和特大城市	3~5	2~3	5~10	30~50
大城市	2~5	2~3	5~10	20~30
中等城市和小城市	2~3	2~3	3~5	10~20

2017 年 7 月 1 日起实施的 GB 51222-2017《城镇内涝防治技术规范》中规定的内涝防治设计重现期划定了超大城市、特大城市、大城市、中等城市和小城市的取值范围, 见表 2。

Table 2. Urban waterlogging prevention and control design return period
表 2. 内涝防治设计重现期

城镇类型	重现期(a)	地面积水设计标准
超大城市	100	
特大城市	50~100	1. 居民住宅和工商业建筑物的底层不进水;
大城市	30~50	2. 道路中一条车道的积水深度不超过 15 cm
中等城市和小城市	20~30	

根据城市类型的划分, 人口在 50~100 万以内的属于中等城市, 凯里市常住人口约 71 万, 确定为中等城市。凯里市最大的内涝隐患点是中心城区地下通道和下沉式广场等, 该类型隐患点人口较为集中, 特别是大十字地下商业街, 风险隐患系数较大。研究以雨水管渠设计重现期和内涝防治设计重现期为依据, 利用凯里市 1960~2021 年逐年最大日降水量和最大小时降水量分别计算 10a、20a 和 30a 的重现期, 并以此作为城市内涝气象服务叫应临界值阈值。重现期是指多少年出现一次或多次, 是一个统计平均值[23], 其计算方法采用 Pearson III型[24]-[27]分布, 该方法在气象和水文领域得到了广泛的应用。

3. 分析结果

3.1. 降水重现期

采过 Pearson III 型方法, 计算得出凯里市逐年最大日降水量及逐年 1 小时最大降水量频率分布, 见

图 2 所示。从图上可以看出, Pearson III 型分布对样本实测值的模拟效果较好, 其中日降水量平均值为 98.9 mm, C_v 参数取值 0.4992, C_s 参数取值 2.0108, C_s/C_v 为 4.03; 小时降水量平均值为 46.3 mm, C_v 参数取值 0.3093, C_s 参数取值 0.6196, C_s/C_v 为 2.00。Pearson III 型分布效果利用 χ^2 进行检验, 显著性水平 $\alpha = 0.05$, 查表得临界值为 3.841, 日降水量和小时降水量的 χ^2 值均小于 3.841, 服从 χ^2 分布, 通过检验。

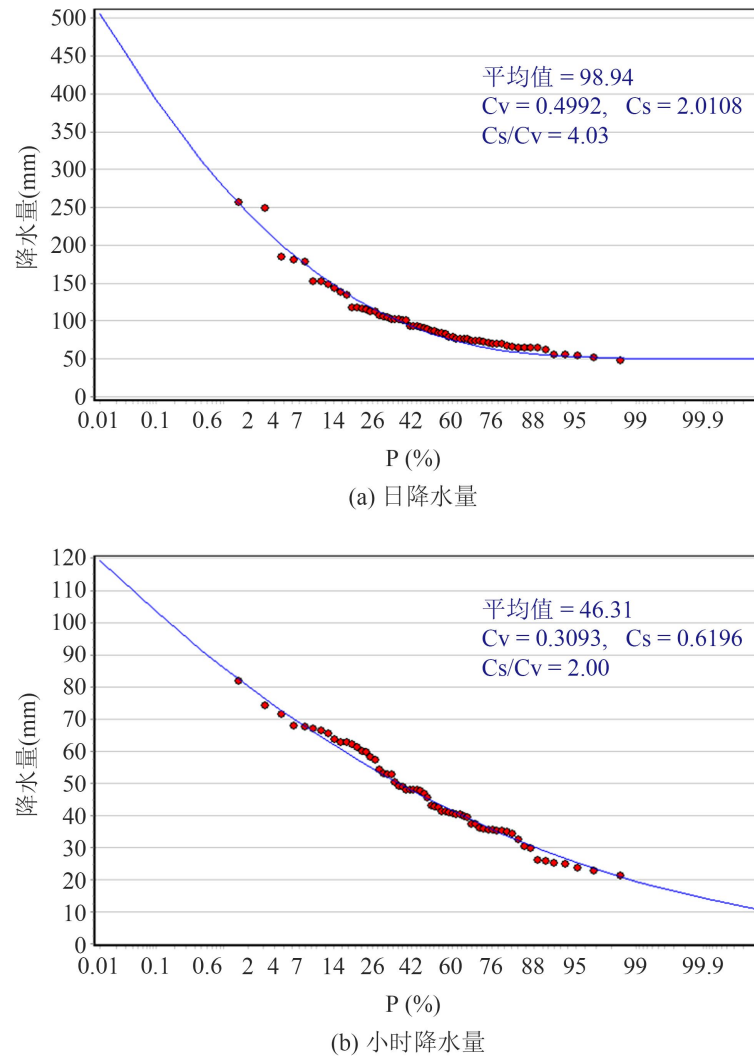


Figure 2. Pearson Type III frequency distribution chart

图 2. Pearson III 型频率分布图

根据内涝防治设计对重现期的标准, 分别计算出 10a、20a、30a、50a、100a、500a、1000a, 见表 3。根据室外排水设计, 地下商业广场为 10~20a, 内涝防洪标准为 20~30a, 对应的日降水量重现期阈值分别为 163.2~197.6 mm 和 197.6~217.6 mm, 小时降水量重现期阈值分别为 65.4~72.1 mm 和 72.1~75.8 mm。重现期的计算结果表明, 凯里市日降水量达 163.2 mm 和 1 小时降水量达 65.4 mm, 将超过排水标准, 内涝隐患点、中心城区地下通道和下沉式广场等发生内涝风险的可能性较大, 其余地区日降水量达 197.6 mm 和 1 小时降水量达 72.1 mm, 将超过内涝防洪标准, 发生灾害的可能性也极高。

Table 3. Return periods of daily precipitation and hourly precipitation
表 3. 日降水量和小时降水量重现期

重现期	10a	20a	30a	50a	100a	500a	1000a
日降水量	163.2	197.6	217.6	242.9	277.3	357.1	391.5
小时降水量	65.4	72.1	75.8	80.2	86.0	98.3	103.4

对城市内涝灾害叫应服务除了考虑 1 小时和 24 小时时间外，还应考虑 24 小时时段内任意时段的叫应阈值。由于无逐年连续 2~23 小时长时间序列降水气候资料，因此，研究通过插值的方法来确定。对 1 小时降水量和日降水量重现期阈值进行插值到每个时段中，得出数值见表 4。

Table 4. Precipitation amounts at various return periods in Kaili City
表 4. 凯里市各重现期降水量

重现期	10a	20a	30a	50a	10a 受灾 阈值	叫应阈值	20a 受灾 阈值	叫应 阈值	30a 受灾 阈值	叫应 阈值
1 h	65.4	72.1	75.8	80.2	39.2	20~30	43.3	20~30	45.5	30~40
2 h	69.7	77.6	82.0	87.3	41.8	20~30	46.6	30~40	49.2	30~40
3 h	73.9	83.0	88.1	94.3	44.3	20~30	49.8	30~40	52.9	30~40
4 h	78.2	88.5	94.3	101.4	46.9	30~40	53.1	30~40	56.6	40~50
5 h	82.4	93.9	100.5	108.5	49.4	30~40	56.3	40~50	60.3	40~50
6 h	86.7	99.4	106.6	115.6	52.0	30~40	59.6	40~50	64.0	40~50
7 h	90.9	104.8	112.8	122.6	54.5	30~40	62.9	40~50	67.7	50~60
8 h	95.2	110.3	119.0	129.7	57.1	40~50	66.2	50~60	71.4	50~60
9 h	99.4	115.8	125.1	136.8	59.6	40~50	69.5	50~60	75.1	60~70
10 h	103.7	121.2	131.3	143.9	62.2	40~50	72.7	50~60	78.8	60~70
11 h	107.9	126.7	137.5	150.9	64.7	40~50	76.0	60~70	82.5	60~70
12 h	112.2	132.1	143.6	158.0	67.3	40~60	79.3	50~70	86.2	60~80
13 h	116.4	137.6	149.8	165.1	69.8	40~60	82.6	50~70	89.9	60~80
14 h	120.7	143.0	155.9	172.2	72.4	40~60	85.8	60~80	93.5	60~80
15 h	124.9	148.5	162.1	179.2	74.9	40~60	89.1	60~80	97.3	70~90
16 h	129.2	153.9	168.3	186.3	77.5	50~70	92.3	60~80	101.0	70~90
17 h	133.4	159.4	174.4	193.4	80.0	50~70	95.6	70~90	104.6	70~90
18 h	137.7	164.9	180.6	200.5	82.6	50~70	98.9	70~90	108.4	80~100
19 h	141.9	170.3	186.8	207.5	85.1	60~80	102.2	70~90	112.1	80~100
20 h	146.2	175.8	192.9	214.6	87.7	60~80	105.5	80~100	115.7	90~110
21 h	150.4	181.2	199.1	221.7	90.2	60~80	108.7	80~100	119.5	90~110
22 h	154.7	186.7	205.3	228.8	92.8	60~80	112.0	80~100	123.2	90~110
23 h	158.9	192.1	211.4	235.8	95.3	70~90	115.3	90~110	126.8	100~120
24 h	163.2	197.6	217.6	242.9	97.9	70~90	118.6	90~110	130.6	100~120

3.2. 阈值确定及检验

按照城市建设的设计标准, 凯里市重现期降水量反映了发生城市内涝的一个上限值, 实际上, 受城市化发展进程、地形、泥污堵塞等影响, 发生内涝的降水量阈值远小于设计标准重现期的值。根据近 8 年城市内涝的不完全统计, 2014 年以来, 因城市内涝车辆受水淹发动机损坏的情况, 主要发生 8 次, 分别为 2014 年 7 月 4 日、2015 年 5 月 27 日、2015 年 6 月 18 日、2016 年 7 月 20 日、2017 年 6 月 29 日、2018 年 8 月 7 日、2020 年 9 月 6 日。对应的日降水量值在 105~152 mm 之间, 发生积水内涝的路段主要是在洗马河、火车站、金泉湖路段、丰球黔城路段、香炉山景区入口路段, 这些地方有个共同点, 即位于低洼处或是位于地形喇叭口汇流处。据凯里市气象资料分析, 近 8 年来, 共有降水量大于 100 mm 的天气过程 6 次, 这些路段基本都发生内涝灾害。由此表明, 日降水量超过 100 mm, 发生灾害性的洪涝概率较大。通过洪涝日降水量与标准重现期比值, 即 $105/163 \approx 0.6$, 即可得到洪涝受灾降水量阈值经验参数。

$$\text{洪涝受灾降水量阈值} = \text{重现期降水量} \times 0.6 \quad (1)$$

根据公式(1)计算各重现期洪涝受灾降水量阈值, 再将达到阈值前 10~30 mm 时的数值取整到 10 位数确定为叫应阈值。计算结果见表 3。从表中可以看出, 1~24 h 各时段内降水量大于受灾阈值 39.2~97.9 mm 时, 不考虑其它因素, 造成城市内涝的可能性较大。充分考虑降水量将要达到受灾阈值前开展气象叫应服务, 计算得到 1~24 h 叫应阈值为 20~70 mm, 气象服务叫应阈值随着降雨持续时间的增加, 数值也明显增大。即降水量大于受灾阈值, 且持续时间越短, 降水强度越大, 易造成道路积水。从近 8 年来凯里市城区内涝基本情况分析, 主要是经济损失, 均未造成人员伤亡, 受灾时, 路面最大积水深度均未超过 1 m, 造成的损失主要是汽车涉水引起发动机进水和积水漫进门面造成货物被水淹, 或汽车停放在低洼地带造成被水淹。这些损失都是可以通过提前了解气象预报预警信息来采取应对措施避免的。

4. 结论与讨论

以城市建设雨水管渠设计重现期和内涝防治设计重现期为依据, 利用凯里市 1960~2021 年逐年最大日降水量和最大小时降水量, 采用重现期方法, 结合凯里市历年城市内涝受灾资料研究得出如下结论:

(1) 根据室外排水设计, 地下商业广场为 10~20a, 内涝防洪标准为 20~30a, 对应的日降水量重现期阈值分别为 163.2~197.6 mm 和 197.6~217.6 mm, 小时降水量重现期阈值分别为 65.4~72.1 mm 和 72.1~75.8 mm。重现期的计算结果表明, 凯里市日降水量达 163.2 mm 和 1 小时降水量达 65.4 mm, 将超过排水标准, 内涝隐患点、中心城区地下通道和下沉式广场等发生内涝风险的可能性较大, 日降水量达 197.6 mm 和 1 小时降水量达 72.1 mm, 将超过内涝防洪标准, 发生内涝灾害的可能性极高。

(2) 城市内涝气象服务叫应阈值是一个相对稳定的统计值, 但随着城市化进展的发展, 积雨面积和下垫面径流系数的变化, 城市内涝隐患点也不断变化, 受灾阈值和叫应阈值也将随之变化。同时, 受灾阈值和叫应阈值不是绝对值, 在开展气象服务时, 应根据降水实况和未来天气参考叫应阈值开展气象服务, 才能最大程度地避免和减少城市内涝造成的损失。

基金项目

贵州省气象局科研业务项目(项目编号: 黔气科登[2023] 02-02 号)。

参考文献

- [1] World Meteorological Organization (WMO) (2021) State of the Global Climate 2020. World Meteorological Organization (WMO).
- [2] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

- [3] Westra, S., Alexander, L.V. and Zwiers, F.W. (2013) Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation. *Journal of Climate*, **26**, 3904-3918. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>
- [4] 马丽娟, 效存德, 康世昌. 全球主要山地气候变化特征和异同——IPCC AR6 WGI 报告和 SROCC 综合解读[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5): 605-621.
- [5] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22.
- [6] 左璇, 朱业玉, 郭鹏, 等. 郑州市短历时强降水变化特征及重现期研究[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(2): 25-32.
- [7] 赵娴婷, 王晓芳, 王珏, 等. 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, 2020, 46(4): 490-502.
- [8] 田付友, 郑永光, 张小玲, 等. 2017 年 5 月 7 日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. 气象, 2018, 44(4): 46-484.
- [9] 徐国强, 赵晨阳. 2017 年 5 月 7 日广州特大暴雨模拟中的背景场影响分析[J]. 气象, 2019, 45(12): 1642-1650.
- [10] 高峰, 刘鹏, 黄超然. 基于系统思考的武汉市内涝成因分析及对策[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 101-106.
- [11] 王佳盛, 黄鸿强. 城市内涝成因分析及对策研究[J]. 陕西水利, 2022(10): 53-57.
- [12] 徐业平, 陈祥. 城市内涝成因分析及应急管理对策建议[J]. 中国防汛抗旱, 2015, 25(3): 16-18.
- [13] 简国丹. 全球变暖背景下城市内涝防治策略研究[J]. 城市建筑空间, 2022, 29(8): 216-218.
- [14] 史军, 穆海振, 杨涵有, 等. 上海中心城区暴雨内涝阈值研究[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(4): 344-350.
- [15] 吕玉环, 魏蕾, 李鑫. 天津武清区暴雨城市内涝风险阈值研究[J]. 气候变化研究快报, 2018, 7(4): 224-231.
- [16] 周苑, 刘皓, 邹成立. 遵义市播州区“三个叫应”暴雨阈值研究[J]. 西部论丛, 2018(8): 491-193.
- [17] 安承德, 郎贵英, 杜小玲, 等. 石阡县近 10 a 暴雨天气特征和“三个叫应”阈值研究[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(2): 71-75.
- [18] 廖洪敏, 何为, 石薇, 等. 玉屏暴雨与致灾暴雨特征及乡镇“三个叫应”阈值确定[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(2): 63-70.
- [19] 李航, 陈鹏. 城市暴雨内涝灾害期间居民步行安全阈值研究[J]. 水利水电快报, 2021, 42(7): 6-10.
- [20] 邓汗青, 田红, 方茸, 等. 合肥市城市典型易涝点致灾阈值确定及其风险评估[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(5): 482-487.
- [21] 马雨露, 赖成光, 习树峰, 等. 南方高度城市化地区极端降雨特征分析及阈值确定[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 76-81.
- [22] 邸苏闯, 刘洪伟, 苏泓菲, 等. 北京城市暴雨预警及应急管理现状与挑战[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(3): 49-53.
- [23] 王小明, 高学杰. 什么是千年一遇事件?——论灾害事件的发生概率和重现期[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(5): 628.
- [24] 张伶俐, 成坤, 刘春泽, 等. 长白山地区暴雨特征及重现期几种计算方法对比[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2021, 22(1): 21-27.
- [25] 王俊超, 彭涛, 王清. 乌江流域极端降水时空分布特征及重现期分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 267-275.
- [26] 唐明. 暴雨特征信息的时空尺度及重现期的探讨[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(2): 49-53.
- [27] 杨士恩, 郭晓霞, 衣霞, 等. 聊城市日最大降水量分布特征及其重现期的推算[J]. 山东气象, 2009, 29(4): 28-30.