

王颖,白莹莹,邓承之,等.2024.重庆区域性暴雨过程的重现期评估模型构建方法研究[J].暴雨灾害,43(2):204–213. WANG Ying, BAI Yingying, DENG Chengzhi, et al. 2024. Research on the Construction Method of Return Period Assessment Model for Regional Rainstorm Process in Chongqing [J]. Torrential Rain and Disasters,43(2):204–213 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–091

## 重庆区域性暴雨过程的重现期评估模型构建方法研究

王颖<sup>1,2</sup>,白莹莹<sup>1,2</sup>,邓承之<sup>3</sup>,刘川<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:**提出一种利用重现期方法构建区域性暴雨过程的评估模型,用于全面评估暴雨过程发生的频率和强度。基于2011—2021年重庆市114次区域性暴雨过程的小时雨量数据及暴雨灾情数据,利用概率分布函数拟合、重现期计算、相关分析等方法,构建区域性暴雨过程的重现期评估模型,并开展业务检验。结果表明:(1)利用自建的重现期计算公式,得到暴雨过程特征量的重现值与原始值的误差小于10%,重现期计算结果准确性较高。(2)构建的重现期评估模型与直接经济损失的正相关系数可通过0.001显著性水平检验,较现行业务指标提高16%。(3)历史回算和独立样本检验结果显示,重现期评估模型与业务指标评估等级一致率达70%,模型稳定性强且能反映事件发生频率和强度,可为区域性暴雨过程评估提供新思路。

**关键词:**区域性暴雨;概率拟合;重现期评估模型;业务检验

中图分类号:P49

文献标志码:A

DOI: 10.12406/byzh.2023–091

### Research on the Construction Method of Return Period Assessment Model for Regional Rainstorm Process in Chongqing

WANG Ying<sup>1,2</sup>, BAI Yingying<sup>1,2</sup>, DENG Chengzhi<sup>3</sup>, LIU Chuan<sup>1,2</sup>

(1. CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147, China; 2. Chongqing climate center, Chongqing 401147, China; 3. Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** This paper proposes an assessment model of the regional rainstorm process based on the return period method, which is used to comprehensively assess the frequency and intensity of rainstorm processes. Based on the hourly rainfall data and rainstorm disaster data of 114 regional rainstorm processes in Chongqing from 2011 to 2021, the probabilistic fitting, return period calculation, correlation analysis and other methods are used to construct the return period assessment model of regional rainstorm processes, and the business verification is carried out. The results are as follows: (1) Using the return period calculation formula built in this study, the error between the return value and the original value of the rainstorm process characteristic quantity is less than 10%, suggesting a higher accuracy of the return period calculation. (2) The correlation coefficient between the constructed return period assessment model and direct economic loss is significant at the significance level of 0.001, which shows a 16% improvement compared to the current business index. (3) Historical backtracking and independent sample tests show that the grade consistency rate between the return period evaluation model and business index is 70%. The return period assessment model is stable and can reflect the frequency and intensity of events, which can provide a new idea for regional rainstorm process assessment.

**Key words:** regional rainstorm; probabilistic fitting; return period assessment model; business verification

### 引言

受全球变暖和城市化发展的双重影响,极端降水事件在空间范围、发生频率、降水强度、季节分布等方面均有所变化(Fisher and Knutti, 2016; Wasko et al., 2016; Myhre et al., 2019),且在不同地区表现出不同的变化

特征(Marelle et al., 2018; Olafsdottir et al., 2021)。就中国而言,Chen等(2020)研究表明中国东部小时和日尺度降水增强,在日尺度上增强更为显著,上海地区的强降水事件频率显著增加(Liang and Ding, 2017),华南沿海小时尺度降水强度增强(Wu et al., 2019),长三角地区的夏季极端小时降水发生频率增加(Jiang et al.,

收稿日期:2023–05–04;定稿日期:2024–01–04

资助项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J071);重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJSGG–202129,YWJSGG–202205)

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技术研究。E-mail: wy104\_fly@163.com

通信作者:白莹莹,主要从事气候监测评估方法研究。E-mail: byying113@126.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

2020)等等。区域性暴雨过程常出现极端强降水,具有季节性明显、突发性强、影响范围广、来势凶猛、破坏力强的特点,是我国主要的致灾气象因子之一(黄会杰等,2018)。相对于局地暴雨,区域性暴雨过程所造成的自然灾害影响范围更大、损失也更重(牛若芸等,2018)。客观准确地判断区域性暴雨过程的范围、强度、持续时间等特征量强度,对暴雨监测预警、城市内涝灾害风险管理、公众气象服务等具有重要意义(周伟东等,2022;谢五三等,2023)。

常规的区域性暴雨评估采用百分位法进行强度等级划分(叶殿秀等,2019;张顺谦等,2019;伍红雨等,2021)。GB/T 42075-2022要求区域性暴雨过程评估所用资料为不少于30 a的逐日降水数据,即国家气象站日尺度降水数据,未利用稠密的区域自动气象站观测数据资源,不能描述日尺度以下的小时极端降水事件,可能造成某些地区暴雨持续时间和空间范围刻画不够精细、暴雨强度被低估等问题。气象要素重现期极值是工程设计的关键气象参数之一,广泛应用于极端气候事件分析评估(丁裕国,2011;贺芳芳等,2021)、气象灾害风险评估(孟玉婧等,2020;高琦等,2020;张小军等,2021)、气候可行性论证等工作。洪国平(2020)分析表明,经自然对数转换后的湖北年区域性暴雨过程强度指数序列满足正态分布(可视为对数正态分布),由此计算了重现期指标值作为强度评估的参考。涂锴等(2023)基于动态重现期构建了极端高温的评估模型,并有效澄清了重现期的绝对值和概率性的分歧和谬误。区域性暴雨评估鲜有采用重现期的概念,一方面是因为区域性暴雨过程的特征量一般为空间极值,区别于传统概念上基于单点长时间序列计算的重现期;另一方面,相比百分位法,重现期方法的计算过程相对复杂,涉及选样、概率拟合、误差分析、结果计算等多方面,不利于业务应用。但重现期的优势在于通过概率拟合的方式综合考虑所有样本的分布情况,得到的强度等级比单纯的数字指标更加直观,更易于理解极端事件发生的频率。

针对空间极值问题,重现期是指统计量的特定值重复出现的统计时间间隔(QX/T 529-2019),该定义只限定了时间,并未涉及空间范围。传统方法基于单点分析认为是某个点的发生频率,如果统计量为空间取样,可否理解为特定空间范围内的发生频率,以适应区域性暴雨过程特征量的空间极值抽样,得到基于重现期的强度评估结果。不同的样本来源,决定了对重现期计算结果的不同理解,由于范围扩大,必然导致相同重现期下的空间极值远大于单点极值。针对重现期计算过程复杂的问题,考虑采用重现期计算结果

与特征量进行二次建模,得到简单的计算公式,以便高效快速地分析任意特征量强度及综合强度等级。

为解决中国现行标准中区域性暴雨评估所用资料不够精细、特征量选择与灾情关联不够、评估指标理解不够直观等问题,利用重庆地区2011—2021年114次区域性暴雨过程的小时雨量数据和暴雨灾情资料,建立基于重现期的与灾情关系更加紧密的区域性暴雨过程评估模型,为暴雨灾害预报预警、监测评估及风险管理提供技术支撑和方法参考。

## 1 资料说明与研究方法

### 1.1 资料说明

研究所用的资料包括:(1)2011—2021年重庆地区2 067个气象站(包括34个国家气象站和2 033个区域自动气象站)逐小时降水数据,站点分布如图1所示。所有资料来源于重庆市气象信息与技术保障中心,均经过质量控制,包括极值检验、空间一致性检验等(任芝花等,2010),满足研究需要。(2)2011—2021年重庆区(县)暴雨灾情记录,包含1 054条,选取的直接经济损失数据代表灾损大小。数据来源于中国气象局气象灾害管理系统。

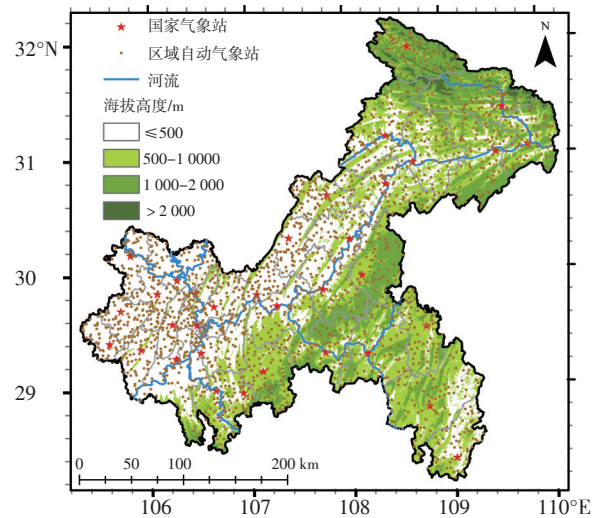


图1 重庆市气象站空间分布

Fig.1 Spatial distribution of meteorological stations in Chongqing City

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 区域性暴雨过程特征量统计

GB/T 42075-2022基于国家气象站数据给出了区域性暴雨过程的判识和评估方法,在重庆境内仅34个国家气象站,空间分辨率已不能满足气象服务需求。为提升区域性暴雨监测评估准确性,根据重庆市气象局相关业务规定(渝气办函〔2022〕20号),定义本地化的基于区域自动气象站数据的区域性暴雨过程,具体如下:

(1)当某区(县)辖区内至少四分之一观测站累计降

水量达到暴雨标准(24 h 雨量 ≥ 50 mm)时,称该区(县)达到暴雨,简称区县暴雨;

(2) 24 h 内,重庆市 34 个区(县)中有 7 个及以上区(县)达到区县暴雨标准时,称为一次区域暴雨;

(3) 区域性暴雨过程的起止时间为区县暴雨最早开始和最晚结束时间,达到区县暴雨标准的区(县)数称为“暴雨区县数”。

重庆地区 2011—2021 年累计出现 114 次区域性暴雨过程,根据历次过程的起止时间及降雨量,统计持续时间(暴雨持续日数、暴雨时数、暴雨持续时数)、空间范围(暴雨面积比、暴雨区县数)、过程最大降水量及 1~24 h(1 h、2 h、⋯、24 h,下同)最大降水量等 30 个特征量,并根据区域性暴雨过程起止时间匹配灾情数据,遴选由区域性暴雨过程造成的灾情记录。

暴雨时数和暴雨持续时数的统计方法如下:在达到区县暴雨的区(县)中统计逐小时空间最大 1 h 降水,其中空间最大 1 h 降水量 ≥ 20 mm 的小时数为暴雨时

数,时间连续的小时数称为暴雨持续时数,可能分为多段,取最长持续时数,单位为小时(h)。

1.2.2 概率分布函数拟合及优选

绘制区域性暴雨过程特征量的箱线图(图 2),考察暴雨特征量的统计分布特征。大部分变量在高值区存在异常值且呈显著的偏态分布,按照 3IQR 标准(Dawson, 2011)得到极端异常值包括:暴雨持续日数 2 个、暴雨时数 1 个、暴雨持续时数 2 个,其余变量的异常值均为 1.5~3IQR 之间的温和异常值。在统计过程中,极端异常值应予以剔除,否则将造成较大的计算误差。采用适用于偏态分布的广义极值(GEV)、广义逻辑斯蒂(GLD)、对数正态(LN)、皮尔逊 III 型(P3)、广义帕累托(GPD)、指数(EXP)、耿贝尔(GUM)等 7 种常用概率分布函数(参考 [https:// docs.scipy.org/doc/scipy/reference/stats.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/stats.html))对暴雨特征量进行概率拟合及优选,选取最优模型计算不同概率条件下的暴雨特征值,建立重现期与暴雨特征量的函数关系。

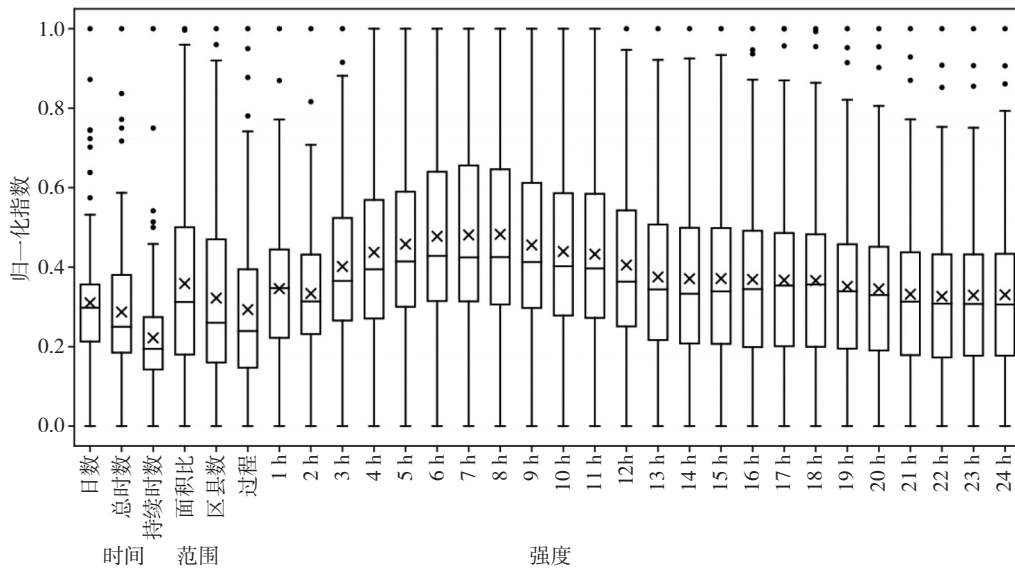


图 2 2011—2021 年重庆区域性暴雨过程特征量极差归一化序列箱线图(“x”表示样本均值,“·”表示异常值)

Fig.2 Box diagram of regional rainstorm process characteristic parameter sequences normalized by range in Chongqing from 2011 to 2021 ("x" represents sample mean and "." represents outliers)

概率模型优选过程如下(王颖等, 2020):

- (1) 计算不同概率模型理论值与观测值的绝对均方根误差( $E_1$ )和相对均方根误差( $E_2$ );
- (2) 计算每个概率模型的综合误差统计量  $U$ , 具体如下

$$\begin{cases} U^{(j)} = \frac{U_1^{(j)} + U_2^{(j)}}{2} \\ U_1^{(j)} = \frac{E_1^{(j)} - \min\{E_1\}}{\min\{E_1\}} \times 100\% \\ U_2^{(j)} = \frac{E_2^{(j)} - \min\{E_2\}}{\min\{E_2\}} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $j$ 取 1~7, 分别代指 7 种概率模型,  $\min\{\dots\}$ 表示 7 个分布中的最小误差;

(3) 当综合误差  $U$  达到最小的概率模型即为最优线型。

GB 50014—2021 规定具有 10 a 以上自计雨量的地区可以采用年多个样法推算暴雨强度公式,在资料年限不足的情况下,将 11 a 的 114 次区域性暴雨过程视为年多个样法取样,符合规范要求。概率值与重现期可相互推导,过程如下:将样本数为  $n$  的序列按从大到小排序,  $m$  为序数,  $N$  代表样本年数,年交叉率记为  $\lambda = n/N$ ,在此表示平均每年发生区域性暴雨过程的次

数。经验频率 $p$ 和重现期 $T$ 可分别通过式(2)和式(3)计算(郝树棠,1989)

$$p = \frac{m}{\lambda N + 1} \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{\lambda p} = \frac{\lambda N + 1}{\lambda m} \quad (3)$$

当 $\lambda = 1$ 时, $n = N, p$ 为年频率, $T > 1$ 年;

当 $\lambda > 1$ 时, $p$ 为次频率, $T > 1/\lambda$ 年。

暴雨特征值(记为 $y$ )与重现期 $T$ 呈明显的对数关系( $y \sim \ln T$ ),拟合效果由决定系数( $R^2$ )判断。当 $R^2 \geq 0.99$ 时,认为拟合效果较好。如果一次对数效果欠佳,考虑采用二次对数,同时为避免 $\ln T$ 出现负数,增加重现期调整系数 $C$ ,得到形如 $y \sim \ln[\ln(T + C)]$ 的关系式, $C$ 在0~3之间按0.01为步长取值,循环计算直至获得较好的拟合效果。

## 2 暴雨特征量重现期计算

重庆区域性暴雨过程特征量区间值、最优线型及绝对误差( $E_1$ )、相对误差( $E_2$ )如表1所示。暴雨特征量的最优分布模型不尽相同,降水强度特征量 $E_2$ 在1.9%~4.1%;空间范围特征量的暴雨面积比 $E_2$ 约3.2%,暴雨区县数 $E_1 < 1$ 个;持续时间 $E_1 \leq 2$ h,所有特征量拟合效果总体较好。有效重现期约为样本长度的两倍(Uboldi, 2014),样本仅11 a,故计算30个特征量不同重现期(0.125 a、0.2 a、0.25 a、0.33 a、0.5 a、1 a、2 a、3 a、5 a、10 a、20 a)特征值。重现期和特征值之间可通过最优概率模型实现相互计算,但不同特征量的最优模型各不相同,计算公式较为复杂,甚至涉及积分运算,不利于业务应用。为解决这一难题,考虑建立简化的重现期计算公式,简化计算过程,提升运算效率。

表1 2011—2021年重庆区域性暴雨过程特征量区间值、最优概率模型及误差统计

Table 1 The ranging values, optimal probability model, and error statistics of regional rainstorm process characteristic parameter sequences in Chongqing from 2011 to 2021

类别	名称	最大值	最小值	最优概率模型	$E_1$	$E_2/\%$
持续时间	暴雨持续日数/d	5.2	0.5	LN	0.1	8.6
	暴雨时数/h	93	1	GLD	2.0	11.2
	暴雨持续时数/h	73	1	GLD	0.7	17.2
空间范围	暴雨面积比/%	61.2	6.6	P3	1.2	3.2
	暴雨区县数/个	30	6	P3	0.9	5.4
降水强度	最大过程降水/mm	493.5	106.2	LN	6.1	2.2
	最大1 h降水/mm	180.9	21.6	GLD	3.5	4.1
	最大3 h降水/mm	254.0	37.9	P3	3.2	2.6
	最大6 h降水/mm	270.7	49.1	P3	6.3	3.3
	最大12 h降水/mm	349.6	66.1	LN	5.1	3.0
	最大24 h降水/mm	403.4	99.7	P3	3.9	1.9

注: $E_1$ 、 $E_2$ 分别表示最优概率模型拟合值与观测值之间的绝对和相对均方根误差

为简化重现期计算公式,将特征量( $y$ )与重现期( $T$ )进行二次建模,部分计算结果如图3所示。两者基本满足对数关系,且决定系数在0.99以上,具有较好的拟合效果。需要注意的是,对数拟合关系在左端点附近存在较大偏差,这可通过加入更多较小重现期(如0.1 a、0.15 a等)进行二次建模以缩小误差,但低重现期计算结果并非关注重点,是否进行该项操作对实际应用影响较小。

对1~24 h(即1 h、2 h、...、24 h)最大降水量而言,降水随历时、重现期的变化同样满足对数关系,通过多种途径对比,增加历时 $t$ 和重现期 $T$ 修正参数,得到重庆区域性暴雨过程的降水量-历时-重现期( $y-t-T$ )的综合计算公式如下

$$y = 39.295 \times \{\ln[\ln(t + 1.48)] + 1.041\} \times \{\ln[\ln(T + 1.04)] + 3.833\} - 16.894 \quad (4)$$

式中 $t$ 为降水历时,取1~24 h, $T$ 为重现期,取0.125~20 a。综合公式与计算重现期降水的平均相对偏差

( $e = \left[ \frac{|R' - R|}{R} \times 100\% \right]$ )约2.5%,决定系数 $R^2 = 0.995$ ,具有较好的拟合效果(图4)。

所有特征量( $y$ )与重现期( $T$ )的数学表达式及误差分布如表2所示。在0.125~20 a重现期段,二次建模决定系数 $R^2 > 0.99$ ,总体效果较好。进一步计算二次建模重现值与原始值的绝对均方根误差 $E_1^*$ 和相对均方根误差 $E_2^*$ ,在 $T \geq 0.125$  a条件下 $E_2^* < 10\%$ ,误差总

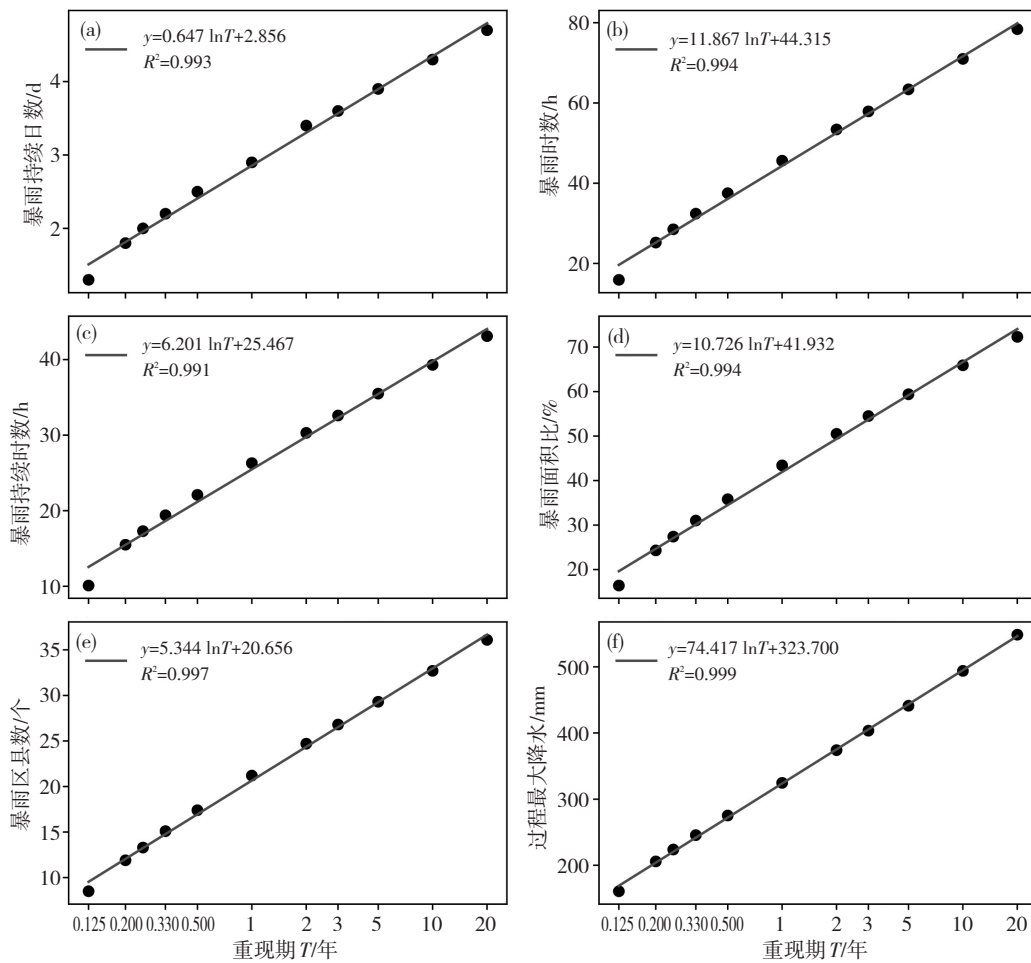


图3 2011—2021年重庆区域暴雨过程的暴雨持续日数(a)、暴雨时数(b)、暴雨持续时数(c)、暴雨面积比(d)、暴雨区县数(e)、过程最大降水(f)与重现期的关系

Fig.3 Relationship between (a) rainstorm duration days, (b) rainstorm hours, (c) rainstorm duration hours, (d) storm area ratio, (e) number of rainstorm counties, (f) cumulative maximum precipitation of the regional rainstorm processes and return period in Chongqing from 2011 to 2021

体上略大于表1的概率拟合误差,但仍在可接受范围内。同时,误差大小并不影响特征量之间的相对强弱,也不影响基于重现期的强度评估结果。因此,通

过表2的关系实现任意重现期与特征量的相互计算总体可行。以1 h降水量150 mm为例,计算重现期约5.9 a,在2011—2021年的114次区域性暴雨过程中,出现了两次超阈值降水事件,平均5.5 a出现一次,重现期计算结果基本符合实际情况。

### 3 重现期评估模型的构建

按照95%、85%、60%百分位,将2011—2021年重庆114次区域性暴雨过程划分为4个等级,对应重现期T分别为2 a、0.6 a、0.2 a。同时,为减少极端异常值对评估结果的影响,将T=20 a的特征值作为理论上限。基于重现期的单一特征量强度等级划分如下:

- 当  $2 a \leq T \leq 20 a$  时,暴雨特征量强度为I级-特强;
- 当  $0.6 a \leq T < 2 a$  时,暴雨特征量强度为II级-强;
- 当  $0.2 a \leq T < 0.6 a$  时,暴雨特征量强度为III级-较强;
- 当  $T < 0.2 a$  时,暴雨特征量强度为IV级-一般。

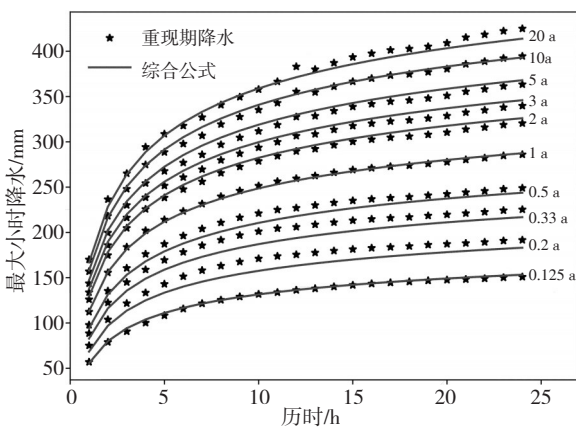


图4 2011—2021年重庆区域性暴雨过程降水量-历时-重现期关系曲线

Fig.4 The relationship between precipitation, duration, and return period of regional rainstorm process in Chongqing from 2011 to 2021

表2 2011—2021年重庆区域性暴雨过程特征量值( $y$ )与重现期( $T$ )的关系

Table 2 Relationship between regional rainstorm process characteristic parameter value ( $y$ ) and return period ( $T$ ) in Chongqing from 2011 to 2021

类型	特征量	$y-T$ 关系	$R^2$	$E_1^*$	$E_2^*/\%$
持续时间	暴雨持续日数/d	$y = 0.647 \times \ln T + 2.856$	0.993	0.2	6.6
	暴雨时数/h	$y = 11.867 \times \ln T + 44.315$	0.994	2.6	7.8
	暴雨持续时数/h	$y = 6.201 \times \ln T + 25.467$	0.991	1.2	6.7
空间范围	暴雨面积比/%	$y = 10.726 \times \ln T + 41.932$	0.994	2.2	7.5
	暴雨区县数/个	$y = 5.344 \times \ln T + 20.656$	0.997	1.2	8.0
降水强度	最大过程降水/mm	$y = 74.417 \times \ln T + 323.700$	0.999	7.7	2.9
	最大1~24 h降水/mm	$y = 39.295 \times \{\ln[\ln(t+1.48)] + 1.041\} \times \{\ln[\ln(T+1.04)] + 3.833\} - 16.894$	0.995	6.9 12.6	4.2 8.7

注: $R_2$ 、 $E_1^*$ 、 $E_2^*$ 分别代表在 $T \geq 0.125$  a条件下二次建模的决定系数、重现值与原值之间的绝对均方根误差和相对均方根误差

根据简化的重现期计算公式(表2),计算暴雨特征量不同等级临界阈值,重庆地区任意区域性暴雨过程特征量可通过表3进行初步的等级划分。

以最大24 h降水为例,区域性暴雨过程各区县最大降水空间分布及重现期强度等级如图5所示。在重

庆东北部、西部、东南部均有降水量超过320 mm的极端降水中心(图5a),降水强度达I级的区县包括开州、云阳、奉节、酉阳、潼南、大足、荣昌,所有区县最大24h降水重现期至少达III级强度(图5b)。基于重现期的区域性暴雨过程强度识别对其他特征量同样适用。

表3 2011—2021年重庆部分暴雨特征量重现期临界阈值表

Table 3 Threshold for grades of some rainstorm characteristics in Chongqing from 2011 to 2021

重现期/a	暴雨持续时间			暴雨范围		最大降水量/mm					
	持续日数/d	总时数/h	持续时数/h	面积比/%	区县数/个	过程	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
20	4.8	80	44	74	37	547	167	264	321	371	414
2	3.3	53	30	49	24	375	129	207	253	292	326
0.6	2.5	38	22	37	18	286	99	161	197	229	256
0.2	1.8	25	16	25	12	204	68	114	140	163	183

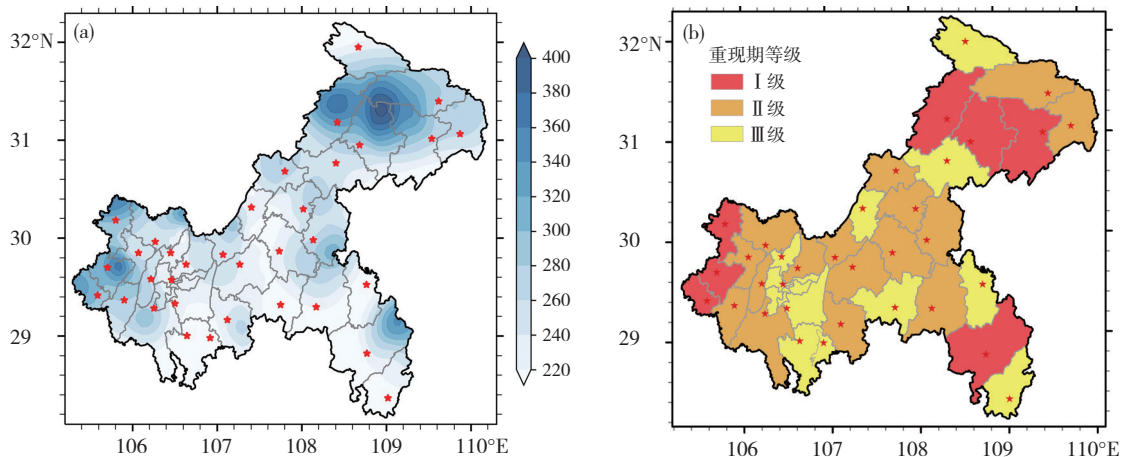


图5 2011—2021年重庆区域性暴雨过程最大24 h降水(a,单位:mm)及其重现期等级(b)空间分布

Fig. 5 (a) Spatial distribution of maximum 24-h precipitation (unit: mm) and (b) its return period grade of regional rainstorm process in Chongqing from 2011 to 2021

区域性暴雨过程导致的直接经济损失呈高偏态分布,原始序列偏度系数为7.6,取对数后偏度系数变为-0.4,接近正态分布,以取对数的直接经济损失作为灾损指标,记为 $lgE$ 。

灾损指标( $lgE$ )与暴雨特征量对数重现期( $\ln T$ )之间

的线性相关结果显示(图6), $lgE$ 与强度类特征量存在较好线性相关,在时间和面积类特征量中, $lgE$ 与暴雨面积比、暴雨总时数相关性相对较高,与暴雨持续日数相关最弱。综合考虑时间、空间、强度因子与 $lgE$ 的相关情况,采用暴雨总时数( $T$ )、暴雨面积比

( $T_a$ )、最大24 h降水( $T_i$ )建立区域性暴雨过程综合强度的重现期评估模型(记为 $\bar{T}$ ),由式(5)或式(6)计算

$$\ln(\bar{T}) = w_t \times \ln(T_t) + w_a \times \ln(T_a) + w_i \times \ln(T_i) \quad (5)$$

$$\bar{T} = T_t^{w_t} \cdot T_a^{w_a} \cdot T_i^{w_i} \quad (6)$$

式中: $w_t$ 、 $w_a$ 、 $w_i$ 代表权重系数,分别取0.28、0.29、0.43(根据与灾损指标的相关系数取值)。 $\bar{T}$ 按照95%、85%、60%的比例(重现期临界阈值分别是1.5 a、0.6 a、0.2 a)划分为I~IV级,记为 $G_r$ 。

区域性暴雨过程各类特征量的重现期变化如图7

所示,综合最强的过程为2020年“7.15”过程( $\bar{T} = 7.6$  a),三个特征量均达到I级强度,直接经济损失排历史第三位;其次是2018年“7.2”过程( $\bar{T} = 3.2$  a),暴雨持续时间为历史第一,降水强度达到I级,但空间范围较小,为II级强度,直接经济损失排37位;综合强度第三的是2014年“9.1”过程( $\bar{T} = 2.7$  a),降水强度达到I级,排历史第一,暴雨面积为II级,空间范围为III级,直接经济损失超过60亿元,达历史最高。重现期能够较为客观真实地反映区域性暴雨过程不同类型特征量强度及综合强度。

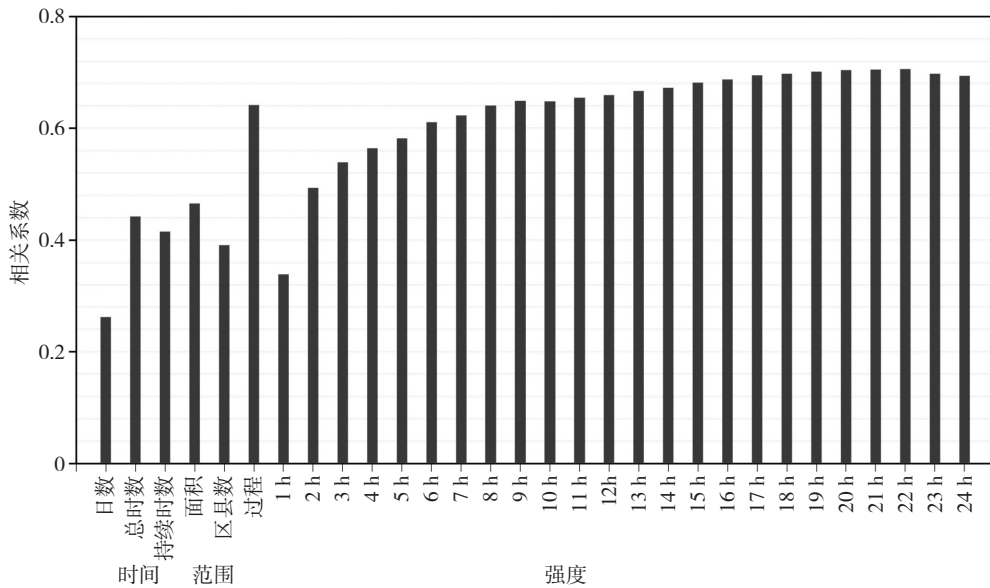


图6 2011—2021年重庆暴雨特征量对数重现期( $\ln T$ )与灾损指标( $\lg E$ )的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficient between logarithmic return period ( $\ln T$ ) of rainstorm characteristics and disaster loss index ( $\lg E$ ) in Chongqing from 2011 to 2021

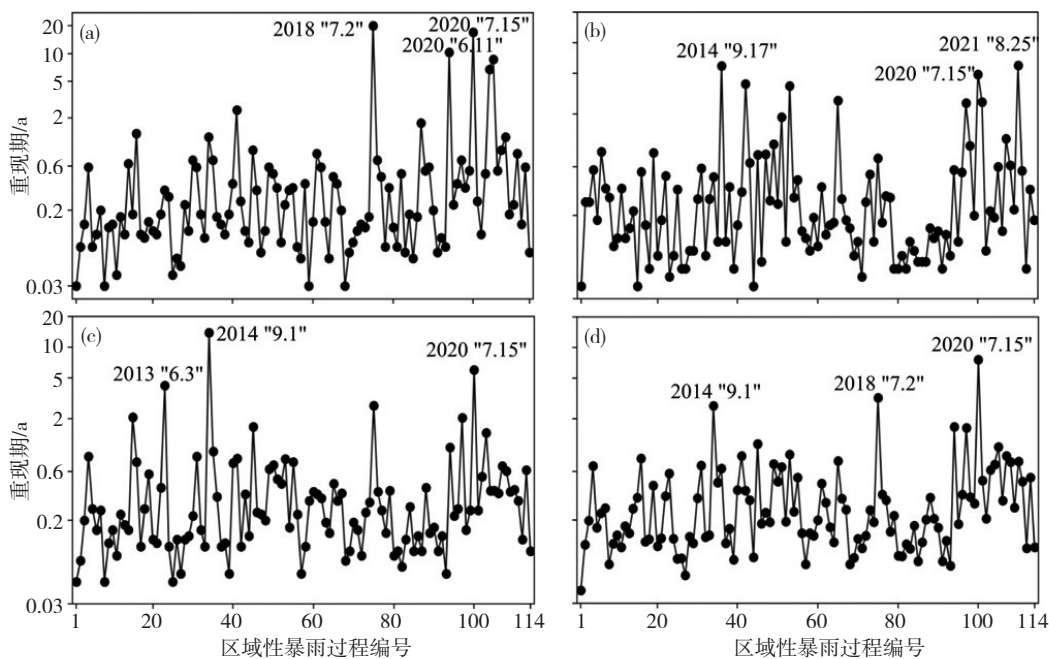


图7 2011—2021年重庆区域性暴雨过程持续时间(a)、空间范围(b)、降水强度(c)、综合强度(d)的重现期(单位:a)变化

Fig. 7 Variation of return period (unit: a) index of (a) duration time, (b) spatial range, (c) rain intensity, (d) comprehensive intensity of regional rainstorm processes in Chongqing from 2011 to 2021

### 4 重现期评估模型业务检验

在实际区域性暴雨过程评估业务中,利用总降水量、最大24 h降水量、累计暴雨区县数和暴雨持续日数4个特征量,先进行极差归一化处理,再分别按照0.25、0.4、0.25、0.1进行加权求和,得到综合业务指标(记为*B*),并按照0.53、0.40、0.24划分为I~IV级,记为*G<sub>B</sub>*。

重现期评估模型等级(*G<sub>T</sub>*)与综合业务指标等级(*G<sub>B</sub>*)对比如图8所示。*G<sub>T</sub>*和*G<sub>B</sub>*完全一致的比例达77%,相差不超过一个等级的比例为98%,仅有两次过程相差2个等级。进一步给出相差2个等级的2020年“6.11”过程和2021年“9.16”过程累积降水量空间分布(图9)。2020年“6.11”过程持续时间、空间范围和降水强度明显偏大,*G<sub>B</sub>*为III级(较强),*G<sub>T</sub>*为I级(特强),暴雨过程导致的直接经济损失超6亿元,灾损指标排第8位,*G<sub>B</sub>*评估结果偏低。2021年“9.16”过程*G<sub>B</sub>*为I级(特强),*G<sub>T</sub>*为III级(较强),暴雨过程导致的直接经济损失

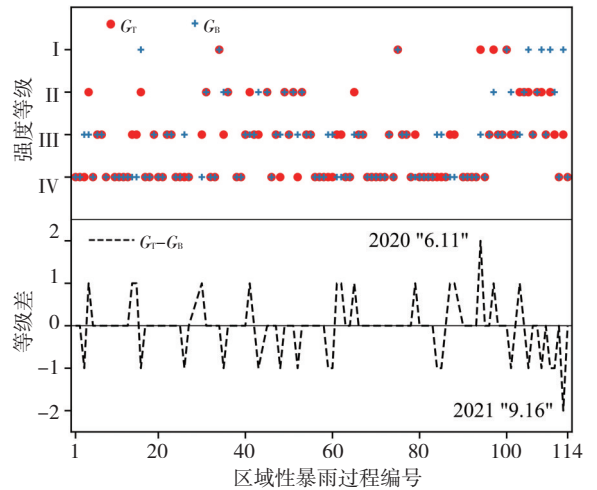


图8 2011—2021年重庆区域性暴雨过程的重现期评估模型等级(*G<sub>T</sub>*)与综合业务指标等级(*G<sub>B</sub>*)对比

Fig.8 Grade comparison of return period assessment model (*G<sub>T</sub>*) and comprehensive business indicator (*G<sub>B</sub>*) of regional rainstorm process in Chongqing from 2011 to 2021

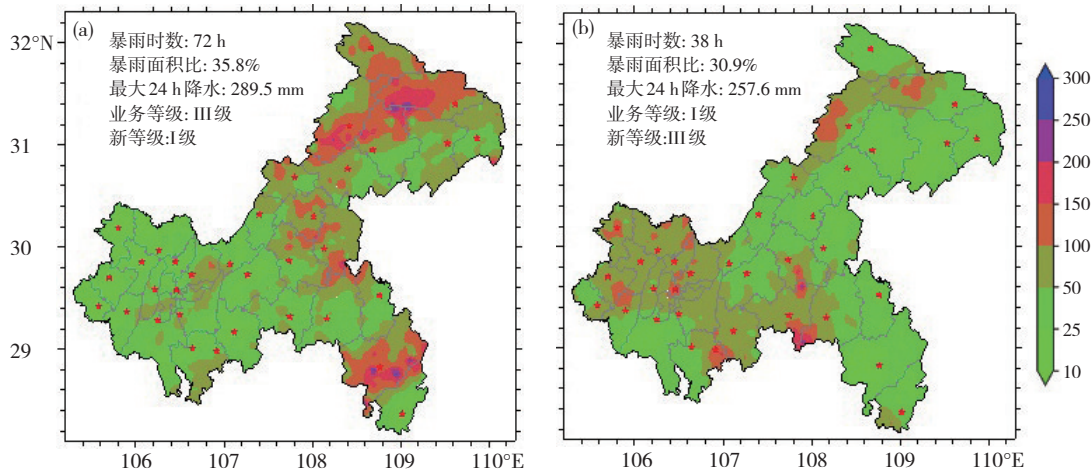


图9 重庆2020年“6.11”(a)和2021年“9.16”(b)过程累积降水量(单位:mm)空间分布

Fig.9 Accumulated rainfall (unit: mm) distribution of regional rainstorm processes of (a) 2020 “6.11” and (b) 2021 “9.16”

小于5 000万元,灾损指标排名第69位,*G<sub>B</sub>*评估结果较实际明显偏高。

$\bar{T}$ 和*B*与直接经济损失的相关系数分别为0.447和0.385,重现期评估模型与灾害损失的相关性较现行业务指标提高16%。

重现期虽基于2011—2021年数据推导,但计算结果在新的历史极值出现前具有稳定性。将重现期应用于2022年区域性暴雨过程强度评估,结果如表4所示。 $\bar{T}$ 与*B*大小排序完全一致,*G<sub>T</sub>*与*G<sub>B</sub>*略有差异,其中:有四次过程等级一致(占比67%),两次过程相差1

表4 2022年重庆区域性暴雨过程强度评估检验

Table 4 Verification of the intensity assessment of the regional rainstorm process in Chongqing in 2022

过程名称	特征量(重现期/a、强度等级)			$\bar{T}$ /a	<i>G<sub>T</sub></i>	<i>B</i>	<i>G<sub>B</sub></i>
	暴雨总时数/h	暴雨面积比/%	最大24 h降水/mm				
“4.24”	18 (0.11、IV)	12.7 (0.07、IV)	182.9 (0.20、III)	0.12	IV	0.16	IV
“4.28”	12 (0.07、IV)	14.2 (0.08、IV)	114.1 (0.06、IV)	0.07	IV	0.08	IV
“5.9”	15 (0.08、IV)	17.8 (0.11、IV)	175.6 (0.18、IV)	0.12	IV	0.24	III
“6.23”	34 (0.42、III)	26.2 (0.23、III)	189.0 (0.22、III)	0.27	III	0.32	III
“6.26”	20 (0.13、IV)	42.3 (1.03、II)	255.5 (0.60、II)	0.46	III	0.45	II
“9.20”	13 (0.07、IV)	27.8 (0.27、III)	265.9 (0.71、II)	0.28	III	0.35	III

个等级,  $G_b$  较  $G_r$  略偏高。重现期可以对任意特征量的强度进行评估, 且特征量之间具有可比性, 如“4.28”和“5.9”过程的时、空、强等级均为 IV 级, “9.20”过程的降水强度等级最高、范围等级次之、持续时间等级最弱。

总体而言,  $G_r$  与  $G_b$  整体一致率达 70%, 但重现期评估模型稳定性强, 不同特征量之间具有可比性, 且能反映事件发生频率和强度, 具有更好的适用性。

## 5 结论与讨论

本文基于 2011–2021 年重庆 2 067 个气象站降水数据, 对区域性暴雨过程的持续时间、空间范围、降水强度特征量进行全面统计, 建立了基于重现期的强度评估模型, 得到如下主要结论:

(1) 暴雨特征量呈偏态分布, 利用多种极值概率分布函数进行拟合及误差分析, 选取最优模型计算不同重现期特征值, 具有较高的准确性; 经对数简化后的重现期计算公式, 其重现值与原始值之间的相对均方根误差小于 10%, 精度略有下降, 但能够简化计算过程, 提升运算效率。

(2) 单个暴雨特征量的重现期( $T$ )强度等级按照 2 a、0.6 a、0.2 a 划分为 I~IV 级, 选取暴雨时数、暴雨面积比、最大 24 h 降水量作为代表特征量建立综合强度的重现期评估模型( $\bar{T}$ ), 按照 1.5 a、0.6 a、0.2 a 划分为 I~IV 级( $G_r$ ), 重现期能够较为客观真实地反映不同类型特征量强度及综合强度。

(3) 历史回算结果表明, 综合强度的重现期评估模型( $\bar{T}$ )与业务指标( $B$ )评估等级一致率为 77%, 相差  $\leq 1$  个等级占比 98%, 相差 2 个等级的两次过程以  $\bar{T}$  更符合实况,  $\bar{T}$  与直接经济损失的相关系数通过 0.001 的显著性水平检验, 较现行业务指标( $B$ )提高 16%, 对灾损大小更具指示意义。

(4) 独立样本检验结果表明, 重现期评估模型稳定性强, 不同特征量之间具有可比性, 且能反映事件发生频率和强度, 具有更好的适用性, 可为区域性暴雨过程评估提供新思路。

重现期设计值在工程建设中应用广泛, 本文推导了 1~24 h 降水量-历时-重现期关系曲线, 即小时尺度的暴雨强度公式。短历时(180 min 及以下)暴雨强度公式是室外排水设计的重要参数(GB 50014-2021), 目前中国常用四参数型式进行推导, 是一种经验性的、由既定结果推导过程参数的结果式导向推求方法, 在某种意义上来说是主观的(刘俊等, 2018)。本文采用正向推导思路, 根据最优模型计算的重现期与特征值的数学关系, 建立小时尺度的暴雨强度公式, 事先并未假定公式服从何种型式, 也非采用常规推荐的皮尔

逊-III 型分布、指数分布、耿贝尔分布等函数进行推导, 在既定公式的选择上有所突破, 可为暴雨强度公式编制提供新的思路。

## 参考文献(References):

- 丁裕国, 李佳耘, 江志红, 等. 2011. 极值统计理论的进展及其在气候变化研究中的应用[J]. 气候变化研究进展, 7(4):248–252. Ding Y G, Li J Y, Jiang Z H, et al. 2011. Advances in extremes statistics and their application to climate change study [J]. Advances in Climate Change Research, 7(4): 248–252 (in Chinese)
- 高琦, 徐明, 彭涛, 等. 2020. 汉江流域极端雨量时空分布特征[J]. 暴雨灾害, 39(5):516–523. Gao Q, Xu M, Peng T, et al. 2020. Spatial and temporal distribution characteristics of extreme area rainfall in Hanjiang River basin[J]. Torrential Rain and Disasters, 39(5):516–523 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.010
- 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2022. GB/T 42075-2022 区域性暴雨过程评估方法[S]. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. 2022. GB/T 42075-2022 methods of regional rainstorm process assessment [S] (in Chinese)
- 郝树棠. 1989. 一年多次法和超定量法选择重现期的计算问题[J]. 中国给水排水, 5(4):40–42. Hao S T. 1989. Problems of the return period calculated by annual multisampling and peaks-over-threshold approach [J]. China Water & Wastewater, 5(4):40–42 (in Chinese)
- 贺芳芳, 梁卓然, 董广涛. 2021. 上海地区洪涝致灾因子复合概率及未来变化分析[J]. 灾害学, 36(2):9–13, 18. He F F, Liang Z R, Dong G T. 2021. Analysis on the compound probability and future change of flood and waterlogging disaster factors in Shanghai [J]. Journal of Catastrophology, 36(2):9–13, 18 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2021.02.002
- 洪国平. 2020. 区域性暴雨过程评价指标在湖北的本地化修订与应用[J]. 暴雨灾害, 39(5):470–476. Hong G P. 2020. Localized revision and application of assessing indices for regional heavy rainfall events in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters, 39(5):470–476 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.005
- 黄会杰, 彭超, 徐刚, 等. 2018. 重庆市区域性暴雨危险性定量分析及其时空分布规律研究[J]. 地球与环境, 46(3):237–244. Huang H J, Peng C, Xu G, et al. 2018. Temporal-spatial distribution and quantitative risk assessment of rainstorms in Chongqing [J]. Earth and Environment, 46(3): 237–244 (in Chinese). doi:10.14050/j.cnki.1672-9250.2018.46.031
- 刘俊, 周宏, 鲁春辉, 等. 2018. 城市暴雨强度公式研究进展与述评[J]. 水科学进展, 29(6):898–910. Liu J, Zhou H, Lu C H, et al. 2018. A review on recent advances of urban rainfall intensity-duration-frequency relationships [J]. Advances in Water Science, 29(6):898–910 (in Chinese). doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2018.06.015
- 孟玉婧, 白美兰, 董祝雷. 2020. 内蒙古山洪致灾阈值与量化风险评估研究[J]. 暴雨灾害, 39(3):285–292. Meng Y J, Bai M L, Dong Z L. 2020. Research on disaster thresholds and quantitative risk evaluation of torrential flood in Inner Mongolia [J]. Torrential Rain and Disasters, 39(3):285–292 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.009
- 牛若芸, 刘凌华, 刘为一, 等. 2018. 1981–2015 年中国 95° E 以东区域性暴雨过程时、空分布特征[J]. 气象学报, 76(2):182–195. Niu R Y, Liu C H, Liu W Y, et al. 2018. Characteristics of temporal and spatial distri-

- bution of regional rainstorm processes to the east of 95°E in China during 1981–2015 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,76(2):182–195 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2017.092
- 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]. *Meteorological Monthly*,36(7): 123–132 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2010.7.019
- 涂锴,严中伟,范丽军,等.2023.基于动态重现期的极端高温气候评估方法研究[J]. *气候变化研究进展*,19(1):11–22. Tu K, Yan Z W, Fan L J, et al. 2023. Study of evaluation method on the climate of extreme high temperatures based on dynamic return periods [J]. *Climate Change Research*,19(1):11–22 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673–1719.2022.008
- 王颖,刘晓冉,程炳岩,等.2020.重庆多历时极值降水的概率型优选及应用[J]. *气象科学*,40(4):560–568. Wang Y, Liu X R, Cheng B Y, et al. 2020. Probability distribution model optimization and application of multiple duration extreme precipitation in Chongqing [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*,40(4):560–568 (in Chinese). doi:10.3969/2019jms.0003
- 伍红雨,郭尧,邹燕,等.2021.华南区域性暴雨过程的客观评估及异常机理分析[J]. *暴雨灾害*,40(3):306–315. Wu H Y, Guo Y, Zou Y, et al. 2021. Objective assessment and analysis of abnormal causes of regional rainstorm events in South China [J]. *Torrential Rain and Disasters*,40(3): 306–315 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.03.009
- 谢五三,唐为安,王胜.2023.安徽省暴雨致灾危险性评估[J]. *暴雨灾害*, 42(3):353–359. Xie W S, Tang W A, Wang S. 2023. Disaster-causing hazard assessment of rainstorms in Anhui Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(3):353–359 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–118
- 叶殿秀,王遵娅,高荣,等.2019.1961–2016年我国区域性暴雨过程的客观识别及其气候特征[J]. *气候变化研究进展*,15(6):575–583. YE D X, WANG Z Y, GAO R, et al. 2019. Objective identification and climatic characters of the regional rainstorm event in China from 1961 to 2016 [J]. *Climate Change Research*,15(6):575–583 (in Chinese). doi: 10.12006/j.issn.1673–1719.2018.172
- 张小军,庄文兵,肯巴提.波拉提.2021.北疆电线积冰的分布及区划[J]. *沙漠与绿洲气象*,15(3):117–121. Zhang X J, Zhuang W B, Kenbati B. 2021. The temporal and spatial distribution characteristics and the division of wire icing in north of Xinjiang [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 15(3):117–121 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2021.03. 015
- 张顺谦,王春学,陈文秀,等.2019.四川省暴雨过程强度及损失评估方法研究[J]. *暴雨灾害*,38(1):79–85. Zhang S Q, Wang C X, Chen W X, et al. 2019. Study on evaluation method of intensity and loss of rainstorm in Sichuan Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,38(1):79–85 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.01.010
- 中国气象局.2019. QX/T 529 – 2019 气候可行性论证 极值概率统计分析[S]. China Meteorological Administration. 2019. QX/T 529 – 2019 specifications for climatic feasibility demonstration–probability and statistic analysis of extremum [S] (in Chinese)
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.2021. GB 50014 – 2021 室外排水设计标准[S]. Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. 2021. GB 50014 – 2021 standard for design of outdoor wastewater engineering [S] (in Chinese)
- 周伟东,韩宁,戴建华,等.2022.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*,41(4):405–412. Zhou W D, Han N, Dai J H, et al. 2022. Investigation of rainstorm warning and its difference under different synoptic conditions in Shanghai [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(4):405–412. doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2022. 04.005
- Chen Y, Li W, Jiang X L, et al. 2020. Detectable intensification of hourly and daily scale precipitation extremes across Eastern China [J]. *Journal of Climate*,34(3):1–56. doi:10.1175/JCLI–D–20–0462.1
- Dawson, R.2011.How significant is a boxplot outlier [J]. *Journal of Statistics Education*,19(2):1–13. doi:10.1080/10691898.2011.11889610
- Fisher E M, Knutti R.2016.Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models [J]. *Nature Climate Change*,6:986–991. doi: 10.1038/NCLIMATE3110
- Jiang X, Luo Y, Zhang D L, et al. 2020.Urbanization enhanced summertime extreme hourly precipitation over the Yangtze River Delta [J]. *Journal of Climate*,33(13):5809–5826. doi:10.1175/JCLI–D–19–0884.1
- Liang P, Ding Y H. 2017. The long-term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in Shanghai during 1916–2014 [J]. *Advances In Atmospheric Sciences*,34,321–334. doi:10.1007/s00376–016–6120–0
- Marelle L, Myhre G, Hodnebrog O, et al. 2018.The changing seasonality of extreme daily precipitation [J]. *Geophysical Research Letters*, 45(20): 11–352. doi:10.1029/2018GL079567
- Myhre G, Alterskjær K, Stjern C W, et al. 2019. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming [J]. *Scientific Reports*, 9, 16063. doi:10.1038/s41598–019–52277–4
- Olafsdottir H K, Rootzén H, Bolin D. 2021.Extreme rainfall events in the Northeastern United States become more frequent with rising temperatures, but their intensity distribution remains stable [J]. *Journal of Climate*,34(22):8863–8877. doi:10.1175/JCLI–D–20–0938.1
- Uboldi F, Sulis A N, Lussana C, et al. 2014. A spatial bootstrap technique for parameter estimation of rainfall annual maxima distribution [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 981–995. doi:10.5194/hess–18–981–2014
- Wasko C, Sharma A, Westra S. 2016. Reduced spatial extent of extreme storms at higher temperatures [J]. *Geophysical Research Letters*,43(8): 4026–4032. doi:10.1002/2016GL068509
- Wu M W, Luo Y L, Chen F, et al.2019.Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over Coastal South China [J]. *Meteorology and Climatology*,58(8):1799–1819. doi:10.1175/JAMC–D–18–02 84.1

(责任编辑 何明琼)