

王颖, 刘晓冉, 程炳岩, 等, 2019. 广义极值分布在重庆短历时极值降水中的应用[J]. 气象, 45(6): 820-830. Wang Y, Liu X R, Cheng B Y, et al, 2019. Application of generalized extreme value distribution model to short-duration extreme precipitation in Chongqing[J]. Meteor Mon, 45(6): 820-830 (in Chinese).

广义极值分布在重庆短历时极值降水中的应用^{*}

王 颖 刘晓冉 程炳岩 孙 佳 廖代强

重庆市气候中心, 重庆 401147

提 要: 利用广义极值分布函数拟合 1981—2016 年重庆 34 个国家气象站短历时(1、3、6、12 h)极值降水序列, 对拟合结果进行显著性水平检验, 并给出不同重现期极值降水的空间分布。结果表明: 广义极值分布函数能较好地拟合重庆地区的短历时极值降水。随着降水历时的延长, 服从 Weibull 分布(Frechet 分布)的站点数逐渐减少(增加)。各短历时不同重现期降水的空间分布具体表现为 10 a 以下及 20 a 以上基本相似, 位于长江沿线以北的重庆西北部地区降水量明显大于重庆长江沿线以南地区, 且渝东南降水的相对大值区位于彭水地区。随着重现期的增加, 降水中心更加集中, 渝东北的大值中心随着历时的延长向北移动。广义极值分布函数的形状参数的绝对值接近或超出 0.5 时, 计算的高重现期(大于样本长度)极值降水存在较大偏差; 当不同历时降水拟合的形状参数值具有明显差异时, 高重现期降水可能出现与客观规律相悖的现象。

关键词: 短历时降水, 年最大值取样, 广义极值分布, 重现期降水

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.008

Application of Generalized Extreme Value Distribution Model to Short-Duration Extreme Precipitation in Chongqing

WANG Ying LIU Xiaoran CHENG Bingyan SUN Jia LIAO Daiqiang

Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

Abstract: Generalized extreme value (GEV) distribution is used to fit the short duration (1, 3, 6 and 12 h) extreme precipitation sequence of 34 national weather stations in Chongqing from 1981 to 2016. The results are as follows: GEV distribution can well fit the short-duration extreme precipitation in Chongqing. As the precipitation lasts longer, the number of the national weather stations subject to Weibull (Frechet) distribution gradually decreases (increases). The spatial distributions of different return periods are basically similar under 10 a and over 20 a. The precipitation to the north of Yangtze River, which is located in the northwestern part of Chongqing, is obviously more than in the areas to the south. And in southeastern Chongqing, there is more precipitation in Pengshui. The precipitation centers are more concentrated with the increase of recurrence period, and the great value center in Northeast Chongqing moves northward as time goes on. When the absolute value of the shape parameter of GEV distribution function is close to or greater than 0.5, the extreme precipitation of the calculated high recurrence (longer than the sample length) is greatly deviated. If there exists prominent difference in the shape parameter of different-duration

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506014、GYHY201306053)、重庆市气象局青年基金(QNJJ-201604)和重庆市建设科技计划项目[城科字 2015 第(2-10)号]共同资助

2018 年 6 月 10 日收稿; 2019 年 4 月 2 日收修定稿

第一作者: 王颖, 主要从事区域气候变化、气象灾害及气候应用服务研究. Email: wy104_fly@163.com

通信作者: 刘晓冉, 主要从事天气、气候动力学研究. Email: liuxiaoran8283@126.com

precipitation, the result appears to be contrary to objective reality.

Key words: short-duration precipitation, year maximum method, generalized extreme value (GEV) distribution, return period rainfall

引 言

我国是世界上暴雨洪涝灾害最严重的国家之一,强降水或持续性降水往往造成流域性洪水、城镇严重渍涝,以及山洪和泥石流等灾害性事件,给人民生命财产和国民经济带来巨大损失。近些年我国极端强降水频繁出现(王丛梅等,2018;高荣等,2018;赵思雄等,2018)。2016年6月18—19日,重庆巴南最大3 h降水达到170.6 mm,最大12 h降水达到228.4 mm,城市发生严重积涝;6月30日至7月6日,长江中下游遭遇多次暴雨过程;7月18—20日,华北和黄淮地区出现强降水过程,多地日雨量突破历史极值(孙劭等,2017)。2017年,我国暴雨过程频繁、重叠度高、极端性强,暴雨洪涝损失偏重(冯爱青等,2018;孙劭等,2018)。加强城市致灾强降水监测和精细化预报预警,发展并强化小时雨强、城市内涝潜势等预报业务,是气象防灾减灾和公共气象服务的重要内容。

短历时极值降水的概率特征研究是防洪抗灾、城市规划、各种工程设计等工作的重要基础(吴滨等,2015)。以往对短历时极值降水的概率特征研究主要应用于编制当地的暴雨强度公式。根据短历时降水资料建立各地区的暴雨强度公式,是城市雨水排水系统规划和设计的基本依据之一,直接关系到城市排水系统规划及设计建设的合理、高效和经济性,也是提高城市防灾减灾和防洪排涝能力的现实需要。顾骏强等(2000)运用耿贝尔分布、指数分布、韦伯分布、皮尔逊-Ⅲ型分布等概率模式对瑞安市5~120 min 9个暴雨历时进行概率拟合,推算了瑞安市暴雨强度总公式。毛慧琴等(2004)利用1959—2000年广州9个降雨历时暴雨资料,分别用皮尔逊-Ⅲ型分布、对数正态分布、指数分布和耿贝尔分布函数进行拟合,得出广州短历时暴雨概率分布遵循皮尔逊-Ⅲ型分布。王海军等(2010)采用广义极值分布拟合长江三峡库区宜昌站及库区巴东站1955—2008年7个短历时(60 min以内)年最大降

水量概率分布,具有较好的效果。强玉华等(2011)采用广义极值(generalized extreme value, GEV)分布拟合1981—2010年丽水国家气象站10个降水历时年最大降水量概率分布,均通过0.05的显著性水平检验。郭凌曜和李英(2015)认为选择适宜的极值分布模型有助于提高极值序列再现期极值的准确度,并利用湖南省97个地面气象观测站1981—2010年1、3、12 h的极值降水,对比了5种分布函数(皮尔逊-Ⅲ型、耿贝尔、对数正态、柯西和韦伯)的拟合效果。李正泉等(2018)选用GEV、皮尔逊-Ⅲ型和韦伯三种极值分布函数,分别对杭州市极值降水序列进行拟合,比较而言,GEV分布的拟合效果更优于其他两种分布。概率模型拟合作为一种基本的研究方法,在极端降水概率预报中也有一定的应用(张宇彤等,2016)。

GEV是一种适用性较强的概率分布模型,广泛应用于气象、水文、地震、金融、医学等数据分析(钱小仕等,2012;金光炎,1998;晏丽红和谢中华,2006;周旭东等,2013;柳会珍和吴建民,2007;秦伟良等,2007;高建召等,2009)。由于GEV能够较好地拟合降水的偏态分布,因而基于该方法定义的干旱指数也被广泛应用于气象干旱的监测和预测中(王澄海等,2012;王芝兰等,2013;龚艳冰等,2016)。利用GEV分布函数计算不同重现期的致洪面雨量也是研究中小河流域暴雨洪涝灾害风险区划的重要基础(谢五三等,2017)。程炳岩等(2008)针对重庆地区极端降水的概率特征也做过一些研究,在研究重庆暴雨强降水时,基于重庆测站1953—2002年汛期逐日降水量资料,采用超门限峰值(POT)取样方式,得出广义帕雷托分布(GPD)比GEV分布具有更高精度和稳定性,更为实用;同时,也指出GPD抽样为POT方式,而GEV的抽样为年最大值(AM)方式。抽样方式不同,拟合效果也有所差异,如姜彤等(2008)采用AM取样方法,对比4种分布(GEV分布、GB、广义逻辑分布与韦克比分布)拟合长江流域1961—2000年147个气候观测站降水极值序列的优劣,结果显示GEV函数的拟合效果明显优于

GPD。GEV 分布函数拟合重庆短历时极值降水的效果如何,还有待于进一步研究。本文拟采用 GEV 分布拟合 1981—2016 年重庆 34 个国家气象站短历时(1、3、6、12 h)极值降水,讨论该概率模型的适用性,并推断给定重现期的气候极值。这将为重大工程建设的气候可行性论证工作奠定技术基础,也为重庆极端降水事件的监测、评估、区划及防灾减灾气象服务等工作提供决策支撑。

1 资料和方法

1.1 资料来源

资料来源于重庆市气象信息与技术保障中心,主要包括 1981—2016 年重庆地区 34 个国家气象站的逐分钟降水量和重庆市气象资料年报表各时段最大降水量资料。

逐分钟降水量资料主要由两部分组成:第一部分是自记纸形式保存,主要通过历史降水自记记录资料,使用中国气象局组织编制的“降水自记纸彩色扫描数字化处理系统”进行数字化处理,并需要经人工审核或修正后,录入数据库(王伯民等,2004)。第二部分是现代自动气象站自动记录的逐分钟降水量资料。

利用逐分钟降水资料,以年为单位滑动选取 1、3、6、12 h 的最大降水量,对比气象资料年报表各时段最大降水量,选取更为可靠的建立短历时极值降水序列,时间为 1981—2016 年。

1.2 方法

采用 GEV 分布函数拟合极值降水序列。GEV 分布函数 $F(x)$ 如下:

$$F(x) = \begin{cases} e^{-[1+k(\frac{x-\beta}{\alpha})^{-\frac{1}{k}}]}, & k \neq 0 \\ e^{-e^{-\frac{x-\beta}{\alpha}}}, & k = 0 \end{cases}$$

式中, β 为位置参数, α 为尺度参数, k 为形状参数。当 $k=0$ 时,对应极值 I 型分布(耿贝尔分布),当 $k>0$ 时,对应极值 II 型分布(Frechet 分布),当 $k<0$ 时,对应极值 III 型分布(韦伯分布)。参数估计采用极大似然法,本文直接利用 MATLAB 自带的 GEV 分布拟合函数进行计算。GEV 分布函数是三种极值函数的统一形式,弥补了单一函数分布的局限性

(Kotz and Nadarajah,2000;史道济,2006)。

拟合结果的显著性检验采用常规的柯尔莫哥洛夫(K-S)检验,同时计算拟合分布与经验分布的相关系数和均方根误差,讨论 GEV 分布拟合重庆短历时极值降水的适用性。

计算各短历时不同重现期最大降水量的空间分布。设 T 年一遇的极值降水为 x_p ,相应极值出现频率 $p=\frac{1}{T}$,重现期极值降水计算(陈兴旺,2008)如下:

$$x_p = \begin{cases} \{[-\ln(1-p)]^{-k}-1\} \frac{\alpha}{k} + \beta, & k \neq 0 \\ \alpha \{\ln[-\ln(1-p)]\} + \beta, & k = 0 \end{cases}$$

2 结果与分析

2.1 GEV 分布拟合短历时极值降水的误差分析

采用 GEV 分布函数拟合不同短历时极值降水的概率分布特征,拟合结果与经验分布的对比检验如图 1 所示。各短历时均通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平的柯尔莫哥洛夫检验(图 1a),相关系数在 0.98 以上(图 1b)且均方根误差在 0.06 以内(图 1c),表明 GEV 分布在拟合重庆短历时极值降水方面具有较好的适用性。

2.2 模型参数的空间分布特征

GEV 分布包含三个模型参数,分别是形状参数 k 、位置参数 β 和尺度参数 α ,三个参数的空间分布如图 2~图 4 所示。

图 2 表示 GEV 分布拟合不同短历时极值降水的形状参数 k 的空间分布。1 h 极值降水的 k 的变化范围在 $-0.264 \sim 0.288$,有 64.7% 的站点 k 为负,属于极值 III 型分布(韦伯分布),其余站点 k 为正,属于极值 II 型分布(Frechet 分布),没有 k 严格为 0 的站点。正值中心主要位于渝西的渝北,渝东北的城口,渝东南的酉阳和秀山,其余地区以负值区为主,负值中心主要位于渝东北的万州和梁平及渝西的合川(图 2a)。3 h 极值降水的 k 的变化范围在 $-0.524 \sim 0.409$, k 为负(正)的站数比例为 47.0% (53.0%),除涪陵($k=-0.524$)和巴南($k=0.409$)外,其余站点 $|k|<0.3$ 。正值中心主要位于渝东北

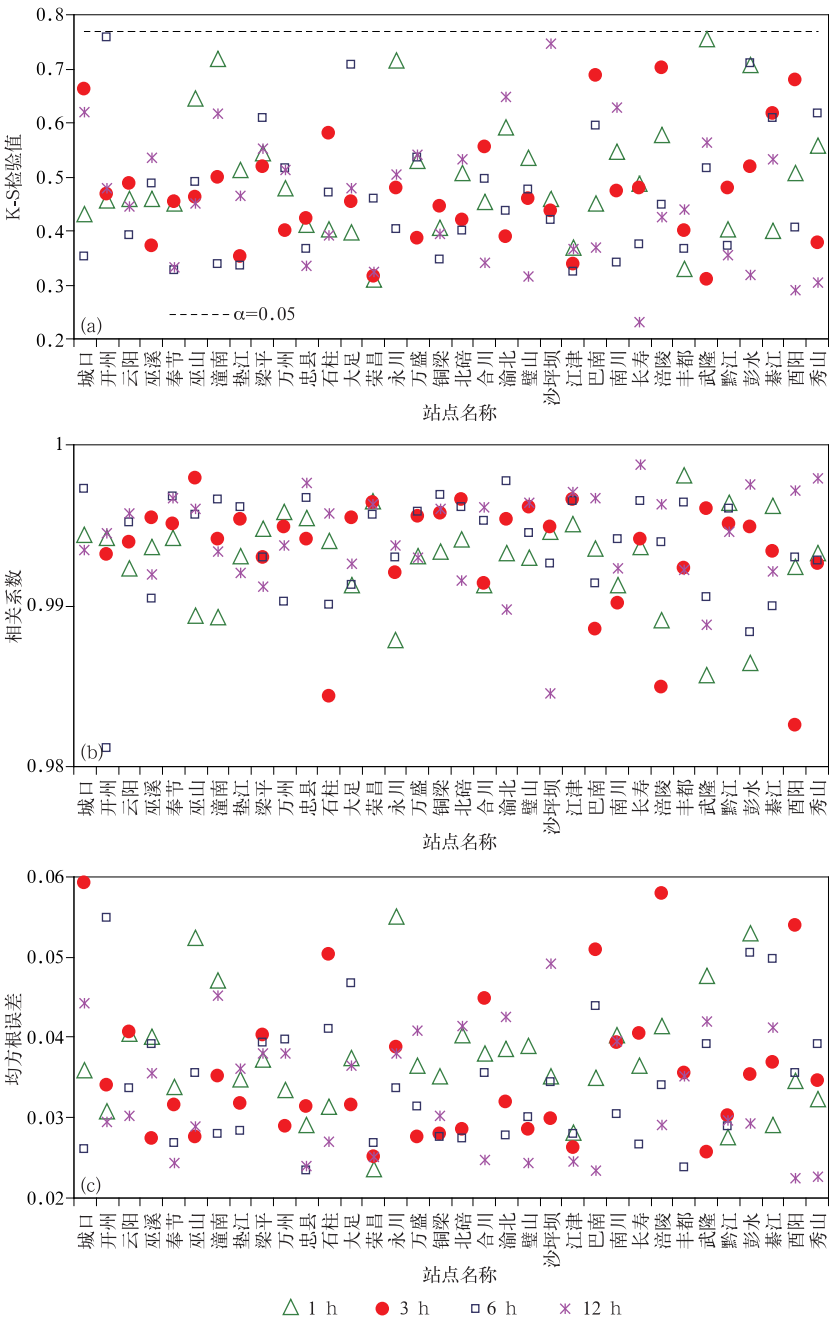


图 1 1981—2016 年短历时极值降水的 GEV 函数拟合分布与经验分布的对比检验

(a)K-S 检验值,(b)相关系数,(c)均方根误差

Fig. 1 Comparative test between GEV distribution and empirical distribution fitting short-duration extreme precipitation from 1981 to 2016

(a) value of K-S test, (b) correlation coefficient, (c) root mean square error

的忠县,渝西的巴南和永川,负值中心主要位于中部的涪陵地区(图 2b)。6 h 极值降水的 k 的变化范围在 $-0.433 \sim 0.359$,有 35.3% 的站点 k 为负,其余

为正。正值中心主要位于渝东北的巫山(0.359),重庆中东部的忠县和石柱,渝西的巴南和璧山,负值中心主要位于渝东北的云阳(-0.433)(图 2c)。12 h

极值降水的 k 的变化范围在 $-0.597 \sim 0.344$, 值为负(正)的站数比例为 29.4%(70.6%)。正值中心主要位于渝东北的巫山, 重庆中东部的石柱, 渝西的璧山(0.344), 负值中心主要位于渝东北的城口(-0.597)(图 2d)。随着历时的延长, k 为负(正)的站点比例逐渐减少(增加), 即服从韦伯分布(Frechet 分布)的站点数逐渐减少(增加), 没有严格服从极值 I 型(耿贝尔)分布的站点。

根据重现期降水公式, 其降水的大小与位置参数 β 和尺度参数 α 成正比, 但随 k 的变化呈 e 指数增加, 重现期降水的大小对 k 的变化更为敏感。因此, k 的绝对值较大的站点计算的重现期降水可能出现异常偏大或者偏小的情况, 这将在最后的讨论中详细说明。

图 3 表示 GEV 分布拟合不同短历时极值降水的位置参数 β 的空间分布, 基本代表了平均降水的空间分布情况。1 h 极值降水的 β 的大值区位于长江以北的重庆西北部及重庆西南部的綦江、万盛片区, 渝东南以彭水为大值中心, β 较小的地区包括渝东北的城口和渝东南的武隆(图 3a)。3 h 极值降水

的 β 的大值区与 1 h 的空间分布基本相似, 位于长江以北的重庆西北部及渝东南的彭水和秀山, 小值区位于重庆的中部和东北部(图 3b)。6 h 极值降水的 β 的大值区仍然在长江以北呈带状分布, 小值区与 3 h 结果基本一致(图 3c)。12 h 极值降水的 β 的相对大小分布与 6 h 基本相似(图 3d)。总体而言, 长江沿线以北的平均降水大于长江沿线以南, 渝东南的彭水又成为平均降水的相对大值中心。

GEV 分布的尺度参数 α 代表了极值降水的离散度大小, α 越大, 降水越不稳定。1 h 极值降水的 α 大值区位于重庆西部的荣昌至万盛地区, 嘉陵江以西地区, 渝东北的梁平和渝东南的彭水地区(图 4a)。3 h 极值降水的 α 相对大值区位于长江以北的重庆西北部地区, 渝东北和渝东南的大值中心与 1 h 的分布相同(图 4b)。6 h 和 12 h 极值降水的 α 相对大值区分布基本相同, 仍然位于长江沿线以北及渝东南的彭水地区(图 4c、4d)。总体而言, 不同历时 α 的空间分布基本相似, 渝东北的大值中心出现在梁平, 渝东南出现在彭水, 而渝西除 1 h 外, 其余三个历时的的大值中心基本位于嘉陵江附近。

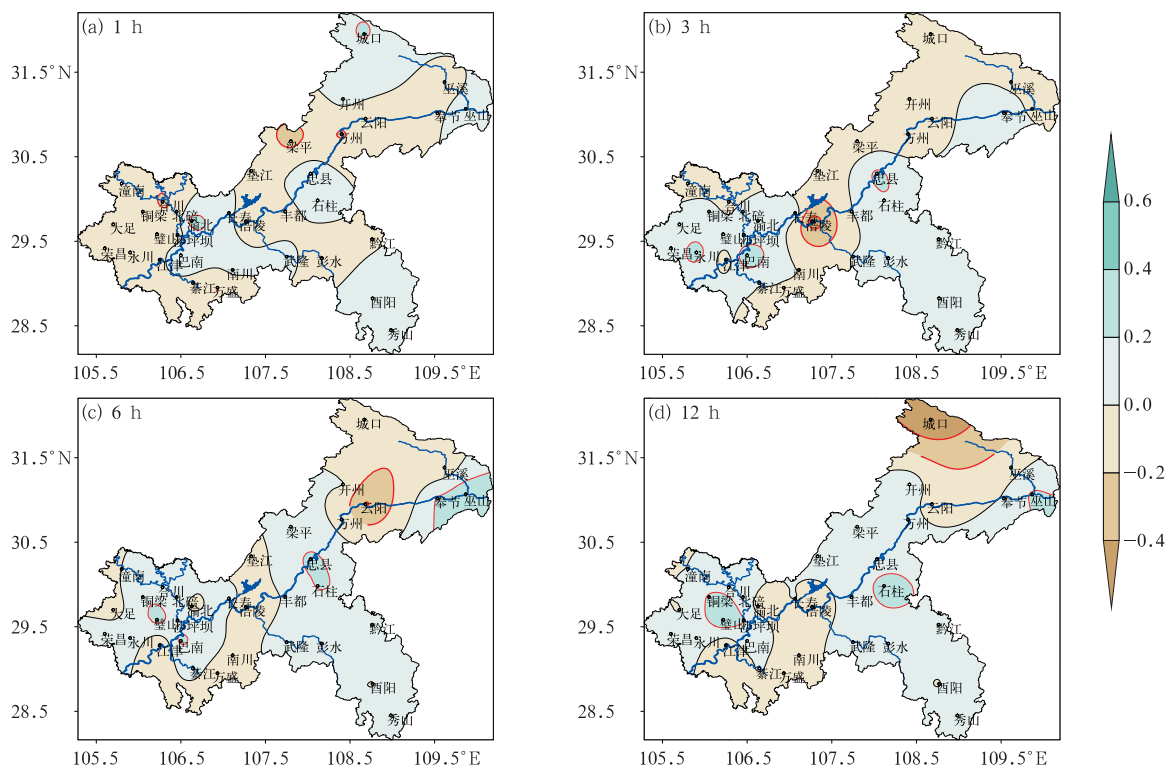
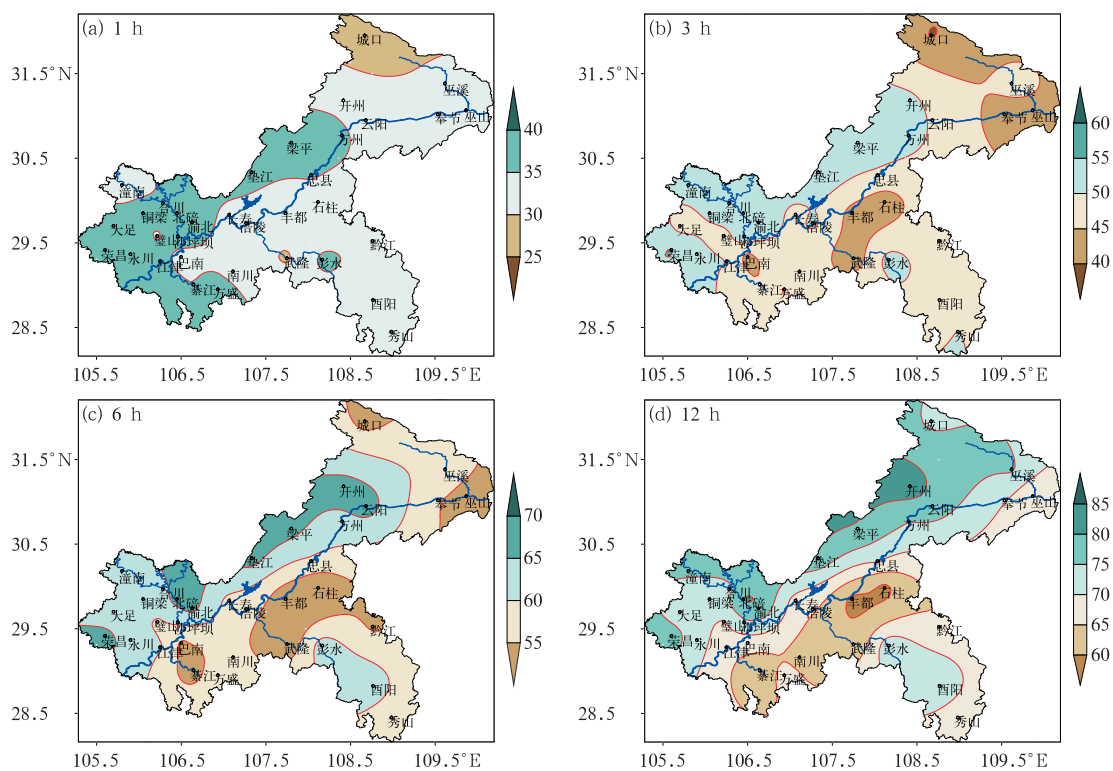
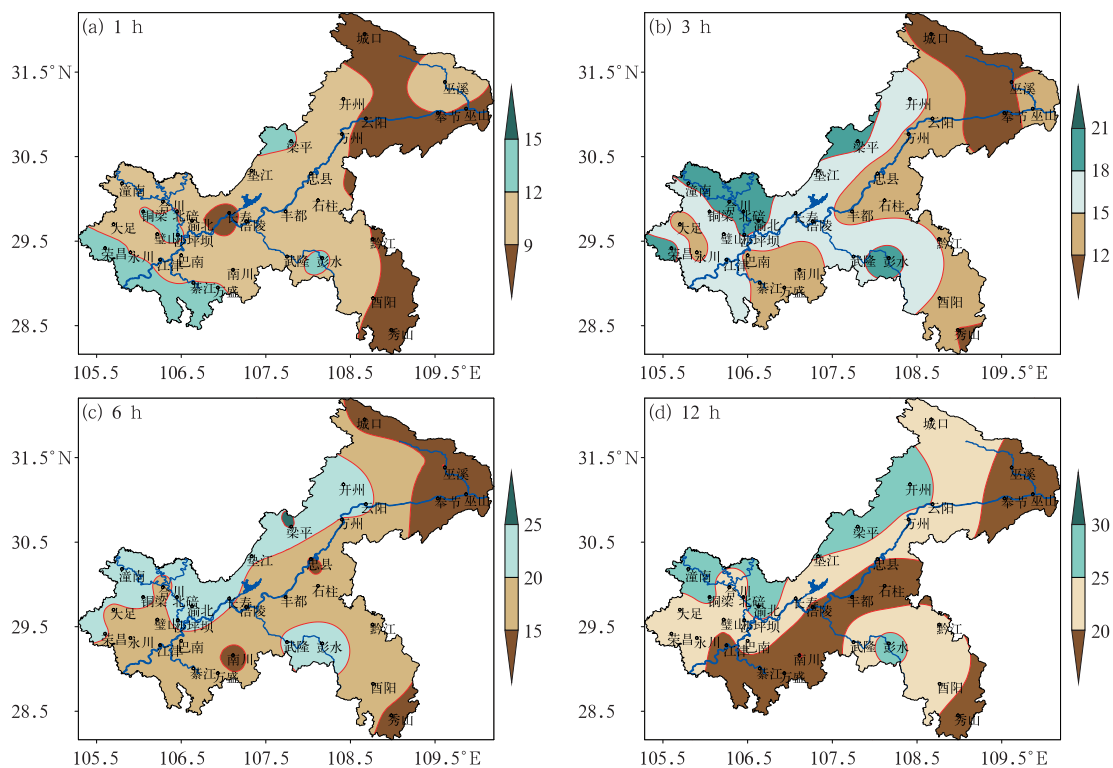


图 2 GEV 分布拟合各短历时极值降水的形状参数 k 的空间分布

Fig. 2 Distribution of shape parameter k of GEV distribution fitting each short-duration extreme precipitation

图3 同图2,但为位置参数 β Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the location parameter β 图4 同图2,但为尺度参数 α Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the scale parameter α

α 与 β 的空间分布基本相似,不同短历时 α 和 β 的空间相似系数分别为 0.67、0.70、0.68、0.79,即平均降水量越大的站点,概率密度曲线的峰值越小,降水量值的范围越分散。

2.3 重现期降水的空间分布

不同重现期降水的空间分布具体表现为 10 a 以下和 20 a 以上基本相似,各短历时不同重现期 (2、3、5、10、20、30、50、100 a) 的空间相似系数结果

显示,相邻两个重现期的空间相似系数均在 0.95 以上。综合而言,各历时低重现期中 5 a 与 2、3、10 a 的空间相似系数和高重现期中 30 a 与 20、50、100 a 的空间相似系数均在 0.9 以上(表 1)。因此,5 和 30 a 重现期具有一定的空间代表性,分别列出不同历时 5 和 30 a 重现期降水的空间分布(图 5)。

1 h 的 5 a 重现期降水分布的空间大值区位于重庆西部(以荣昌、永川及沙坪坝为中心)、长江以北的中部地区(以垫江和梁平为中心)及渝东南的彭水

表 1 重现期为 5 a 和 30 a 的极值降水与其余重现期降水的空间相似系数

重现期		2 a	3 a	5 a	10 a	20 a	30 a	50 a	100 a
5 a	1 h	0.948	0.983	1	0.955	0.813	0.701	0.558	0.393
	3 h	0.910	0.972	1	0.953	0.838	0.759	0.660	0.540
	6 h	0.902	0.971	1	0.958	0.859	0.792	0.706	0.596
	12 h	0.926	0.978	1	0.970	0.902	0.857	0.799	0.723
30 a	1 h	0.485	0.569	0.701	0.879	0.985	1	0.982	0.928
	3 h	0.458	0.596	0.759	0.919	0.991	1	0.989	0.954
	6 h	0.479	0.632	0.792	0.933	0.993	1	0.991	0.960
	12 h	0.616	0.735	0.857	0.956	0.995	1	0.994	0.974

地区,小值区位于渝东北的城口、奉节、巫山、巫溪一带及重庆中部的丰都地区(图 5a₁)。30 a 重现期降水的大值中心位于重庆西部的渝北和永川及东北部的忠县(图 5a₂)。

3 h 的 5 a 重现期降水分布的空间大值区位于长江沿线以北的重庆西北部地区(以荣昌及渝北为中心)及渝东南的彭水地区;小值区位于重庆东北部(以城口为中心)(图 5b₁)。30 a 重现期降水的大值区位于重庆西部(以荣昌、永川及巴南为中心)及渝东南的彭水地区(图 5b₂)。

6 h 的 5 a 重现期降水分布的大值区位于长江沿线以北的重庆西北部(以梁平、开州、渝北及北碚为中心)及渝东南的彭水地区,中部的丰都、石柱及渝东北的城口、巫溪、巫山、奉节一带降水相对较小,总体呈现出东北—西南向的带状分布(图 5c₁)。30 a 重现期降水分化出三个大值区,中心分别位于渝东北的梁平,渝西的铜梁,渝东南的彭水(图 5c₂)。

12 h 的 5 a 重现期降水分布与 6 h 基本相似,降雨量整体增加 10~20 mm(图 5d₁)。30 a 重现期降水的大值中心仍然位于渝东北的梁平和开州、渝西的铜梁和璧山、渝东南的彭水(图 5d₂)。

总体而言,不同重现期降水的空间分布与 GEV 分布函数的位置参数 β 及尺度参数 α 的空间分布相

似,即长江沿线以北的重庆西北部地区降水量明显大于长江沿线以南,且渝东南降水的相对大值区位于彭水地区。随着重现期的增加,降水中心更加集中;相同重现期随着降水历时的延长,渝东北的大值中心有向北移动的趋势(忠县、垫江→梁平→开州),当历时延长到 24 h 及其以上,渝东北的大值中心已经完全移动到开州地区(图略),这可能受到地形的影响。短时强降水发生的强度和频率与山脉形态和地形高度有关(刘裕禄等,2017)。地形对长历时(>24 h)暴雨极值的分布有明显影响(王家祁和胡明思,1990)。开州北部位于大巴山区的南面,山地迎风坡对气流的强迫抬升,会引起降水量的显著增大(陈明等,1995),地形对天气系统的阻挡作用有利于暴雨的维持。因此,开州为暴雨多发区,历时越长,地形对暴雨的增强作用越明显。

3 存在的问题

GEV 分布的形状参数 k 对拟合效果具有重大影响。当 $k < -1$ 时,不存在极大似然估计;当 $-1 < k < -1/2$ 时,可能存在问题;当 $k > 1/2$ 时,不存在二阶矩及更高阶矩(Kotz and Nadarajah,2000)。因此, k 的最优取值范围是 $[-0.5, 0.5]$ 。

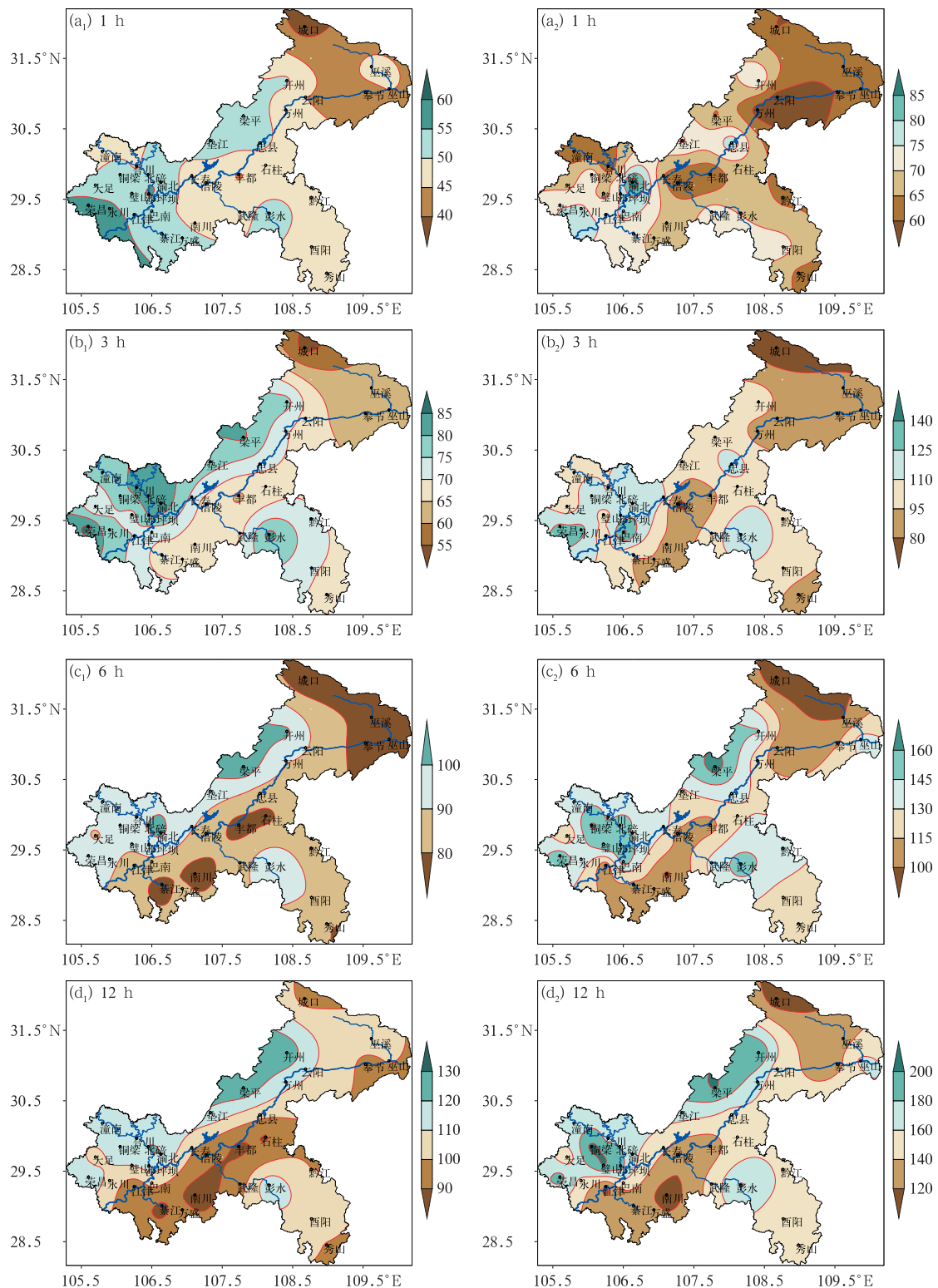


图5 不同历时 5 a(a_1, b_1, c_1, d_1)和 30 a(a_2, b_2, c_2, d_2)重现期降水的空间分布(单位:mm)

Fig. 5 Spatial distribution of 5 a (a_1, b_1, c_1, d_1) and 30 a (a_2, b_2, c_2, d_2) return period rainfall in different time durations (unit: mm)

当 k 在 -0.5 左右时, GEV 分布的概率密度曲线是一条有最高临界值(取值 $\beta - \alpha/k$)的极值 III 型

曲线, 如涪陵 3 h 极值降水, 其经验概率分布和拟合概率曲线如图 6a 所示。GEV 分布拟合涪陵 3 h 极

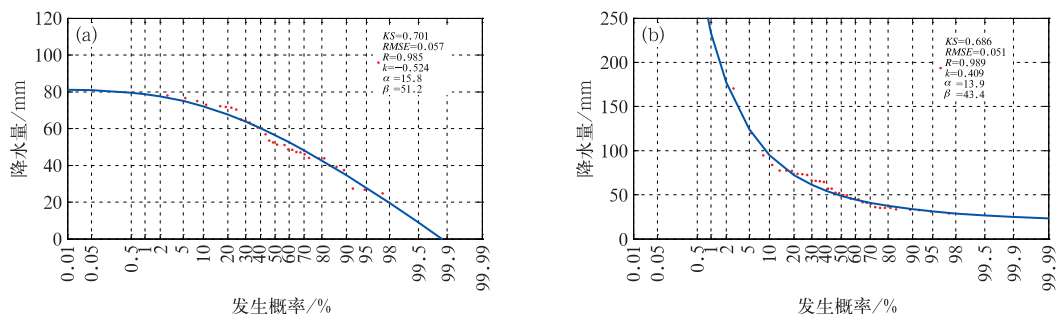


图 6 形状参数 k 的绝对值接近 0.5 时短历时极值降水的概率分布曲线

(a) 涪陵, 3 h; (b) 巴南, 3 h

Fig. 6 Probability curve of short-duration extreme precipitation when the absolute value of shape parameter k close to 0.5

(a) Fuling, 3 h; (b) Banan, 3 h

值降水的模型参数值如下: $k = -0.524$ 、 $\alpha = 15.8$ 、 $\beta = 51.2$, K-S 检验值为 0.701, 虽然通过了 0.05 的显著性水平检验, 但该检验结果是发生在 36 个样本之间, 即当重现期低于 36 a (发生概率 $> 2.7\%$) 时, 拟合结果较好; 当发生概率为 0 时, 对应的极值降水为 81.4 mm, 即无论重现期多长, 其对应的最大降水量 ≤ 81.4 mm, 将导致高重现期降水量明显偏小的情况。类似的情况还包括城口 12 h 降水 ($k = -0.597$ 、 $\alpha = 22.4$ 、 $\beta = 74.0$, 最大降水为 111.5 mm)。

当 k 在 0.5 左右时, GEV 分布的概率密度曲线是一条有最低临界值 (取值 $\beta - \alpha/k$) 的极值 II 型曲线, 这对高重现期降水的量值没有限制, 但会随着重现期的增加降水量迅速增大。GEV 分布拟合重庆 34 站各短历时极值降水的最大形状参数 $k = 0.409$ (巴南 3 h), 其经验概率分布和拟合概率曲线如图 6b 所示。拟合的巴南 3 h 极值降水的概率密度曲线表现出下端平缓、上端陡峭的分布形式, 发生概率 $> 20\%$ (重现期低于 5 a) 的降水差异很小, 随着发生概率的减小 (重现期增加), 降水迅速增大, 30 年一遇降水为 145.4 mm, 50 年一遇降水增加到 177.5 mm, 100 年一遇降水高达 233.1 mm, 重现期越高, 巴南与周围站点降水量的空间梯度越大。广义极值分布拟合巴南 6 h ($k = 0.253$) 和 12 h ($k = 0.089$) 的百年一遇降水分别为 215.8、194.4 mm, 明显低于 3 h 的百年重现期降水。因此, 即使单个历时的拟合结果满足较高的精度要求, 但当不同历时的 k 值具有明显的差异时, 需要综合考虑不同历时拟合结果的合理性。

综上所述, 利用 GEV 分布拟合重现期极值降

水, 当 GEV 分布的形状参数的绝对值远 < 0.5 时, 拟合具有较高的精度; 当接近或超出该值, 将导致高重现期 (大于样本长度) 极值降水存在较大偏差。当不同历时降水拟合的 k 值具有明显差异时, 高重现期降水可能出现与客观规律相悖的现象 (如巴南百年一遇极值降水 3 h > 6 h > 12 h), 需要综合考虑不同历时拟合结果的合理性。此时, 应考虑采用其他概率模型进行拟合, 以期得到更为可靠的重现期降水量。

4 结 论

(1) GEV 分布满足极值降水拟合的误差精度, 能较好地拟合重庆地区的短历时极值降水, 可以在重庆短历时极值降水的重现期计算中推广应用。

(2) 随着降水历时的延长, 重庆 34 个国家站极值降水服从极值 III 型 (韦伯) 分布的站点数逐渐减少, 服从极值 II 型 (Frechet) 分布的站点数逐渐增多, 没有严格服从极值 I 型 (耿贝尔) 分布的站点。

(3) 各短历时不同重现期降水的空间分布具体表现为 10 a 以下和 20 a 以上基本相似, 位于长江沿线以北的重庆西北部地区降水量明显大于长江沿线以南地区, 且渝东南降水的相对大值中心位于彭水地区。

(4) 随着重现期的增加, 降水中心更加集中; 相同重现期随着降水历时的延长, 渝东北的大值中心有向北移动的趋势 (忠县、垫江 $\rightarrow$ 梁平 $\rightarrow$ 开州)。

(5) 当 GEV 分布的形状参数的绝对值远小于 0.5 时, 拟合具有较高的精度; 当接近或超出该值,

将导致高重现期(大于样本长度)极值降水存在较大偏差。当不同历时降水拟合的 k 值具有明显差异时,高重现期降水可能出现与客观规律相悖的现象,应考虑采用其他概率模型进行拟合,以期得到更为可靠的重现期降水量。

参考文献

- 陈明,傅抱璞,于强,1995.山区地形对暴雨的影响[J].地理学报,50(3):256-263. Chen M, Fu B P, Yu Q, 1995. Influence of topography on storm rainfall[J]. Acta Geographica Sin, 50(3):256-263 (in Chinese).
- 陈兴旺,2008.广义极值分布理论在重现期计算的应用[J].气象与减灾研究,31(4):52-54. Chen X W, 2008. Application of generalized extreme value distribution theory in calculating return periods[J]. Meteor Dis Reduction Res, 31(4):52-54(in Chinese).
- 程炳岩,丁裕国,张金铃,等,2008.广义帕雷托分布在重庆暴雨强降水研究中的应用[J].高原气象,27(5):1004-1009. Cheng B Y, Ding Y G, Zhang J L, et al, 2008. Application of generalized Pareto distribution to research of extreme rainfall of Chongqing[J]. Plateau Meteor, 27(5):1004-1009(in Chinese).
- 冯爱青,曾红玲,尹宜舟,等,2018.2017年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J].气象,44(4):548-555. Feng A Q, Zeng H L, Yin Y Z, et al, 2018. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):548-555(in Chinese).
- 高建召,胡刚,王奎,等,2009.利用蛋白质的二面角序列对蛋白质结构比对[J].计算机工程与应用,45(32):5-8. Gao J Z, Hu G, Wang K, et al, 2009. Using dihedral angle series of protein for protein structure comparison[J]. Comp Engin Appl, 45(32):5-8 (in Chinese).
- 高荣,宋连春,钟海玲,2018.2016年汛期中国降水极端特征及与1998年对比[J].气象,44(5):699-703. Gao R, Song L C, Zhong H L, 2018. Characteristics of extreme precipitation in China during the 2016 flood season and comparison with the 1998 situation[J]. Meteor Mon, 44(5):699-703(in Chinese).
- 龚艳冰,胡娜,刘高峰,等,2016.基于GEV干旱指数和DFA方法的苏北地区季节性干旱研究[J].长江流域资源与环境,25(1):140-146. Gong Y B, Hu N, Liu G F, et al, 2016. Seasonal drought research based on GEV index and DFA method in the north of Jiangsu Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 25(1):140-146(in Chinese).
- 顾骏强,陈海燕,徐集云,2000.瑞安市暴雨强度概率分布公式参数估计研究[J].应用气象学报,11(3):355-363. Gu J Q, Chen H Y, Xu J Y, 2000. Research on parameter estimate of probability distribution formula of storm intensity in Rui'an[J]. Quart J Appl Meteor, 11(3):355-363(in Chinese).
- 郭凌曜,李英,2015.湖南省短历时降水极值分布拟合与应用[J].气象与环境学报,31(3):69-74. Guo L Y, Li Y, 2015. Fitting of extreme distribution for precipitation in a short-period and its application in Hunan Province[J]. J Meteor Environ, 31(3):69-74 (in Chinese).
- 姜彤,苏布达,Marco G, 2008.长江流域降水极值的变化趋势[J].水科学进展,19(5):650-655. Jiang T, Su B D, Marco G, 2008. Trends in precipitation extremes over the Yangtze River Basin[J]. Adv Water Sci, 19(5):650-655(in Chinese).
- 金光炎,1998.广义极值分布及其在水文中的应用[J].水文,18(2):9-15. Jin G Y, 1998. General extreme value distribution and its application to hydrology[J]. J Chin Hydrol, 18(2):9-15(in Chinese).
- 李正泉,宋丽莉,梁卓然,等,2018.杭州市降水特征及极端降水趋势预估[J].气象,44(6):781-789. Li Z Q, Song L L, Liang Z R, et al, 2018. Precipitation characteristics and projection of extreme precipitation trend in Hangzhou City[J]. Meteor Mon, 44(6):781-789(in Chinese).
- 柳会珍,吴建民,2007.金融资产极端日收益率数据的统计极值研究[J].统计与决策,23(3):113-114. Liu H Z, Wu J M, 2007. Statistical extreme value study of extreme daily yield data of financial assets[J]. Statistics & Decision, 23(3):113-114 (in Chinese).
- 刘裕禄,杜其成,黄勇,2017.黄山地区短时强降雨的地形增幅机制[J].气象,43(2):181-188. Liu Y L, Du Q C, Huang Y, 2017. The topographical enhancement mechanism of short-time heavy rainfall in Huangshan Mountain[J]. Meteor Mon, 43(2):181-188(in Chinese).
- 毛慧琴,杜尧东,宋丽莉,2004.广州短历时降水极值概率分布模型研究[J].气象,30(10):3-6. Mao H Q, Du Y D, Song L L, 2004. Research on probability distribution models of short-period precipitation extreme in Guangzhou[J]. Meteor Mon, 30(10):3-6(in Chinese).
- 钱小仕,王福昌,曹桂荣,等,2012.广义极值分布在地震危险性分析中的应用[J].地震研究,35(1):73-78. Qian X S, Wang F C, Cao G R, et al, 2012. Application of the generalized extreme value distribution to seismic hazard analysis[J]. J Seismological Res, 35(1):73-78(in Chinese).
- 强玉华,邓霞君,胡淳焄,等,2011.丽水市短历时降水特征[J].水土保持应用技术,31(6):30-31. Qiang Y H, Deng X J, Hu C H, et al, 2011. Characteristics of short-period precipitation in Lishui[J]. Technol Soil Water Conser, 31(6):30-31(in Chinese).
- 秦伟良,徐志勇,邹健,等,2007.基于两类极值分布的金融风险度量[J].安徽工程科技学院学报,22(2):58-61. Qin W L, Xu Z Y, Zou J, et al, 2007. Measuring financial risk based on two distributions of extreme value theory[J]. J Anhui Univer Technol Sci, 22(2):58-61(in Chinese).
- 史道济,2006.实用极值统计方法[M].天津:天津科学技术出版社. Shi D J, 2006. Practical Extreme Value Statistical Method[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press(in Chinese).
- 孙劼,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).
- 孙劼,王东阡,尹宜舟,等,2018.2017年全球重大天气气候事件及其

- 成因[J]. 气象, 44(4): 556-564. Sun S, Wang D Q, Yin Y Z, et al, 2018. Global major weather and climate events in 2017 and the possible causes[J]. Meteor Mon, 44(4): 556-564 (in Chinese).
- 王伯民, 吕勇平, 张强, 2004. 降水自记纸彩色扫描数字化处理系统[J]. 应用气象学报, 15(6): 737-744. Wang B M, Lü Y P, Zhang Q, 2004. The color scanning digitizing processing system of precipitation autographic record paper[J]. J Appl Meteor Sci, 15(6): 737-744 (in Chinese).
- 王澄海, 王芝兰, 郭毅鹏, 2012. GEV 干旱指数及其在气象干旱预测和监测中的应用和检验[J]. 地球科学进展, 27(9): 957-968. Wang C H, Wang Z L, Guo Y P, 2012. Application and verification of drought index in meteorology drought monitor and precipitation[J]. Adv Earth Sci, 27(9): 957-968 (in Chinese).
- 王丛梅, 俞小鼎, 刘瑾, 等, 2018. 弱天气尺度背景下太行山极端短时强降水预报失败案例剖析[J]. 气象, 44(1): 107-117. Wang C M, Yu X D, Liu J, et al, 2018. Analysis of a forecast failure case of extreme flash-rain under weak synoptic-scale background in Taihang Mountain[J]. Meteor Mon, 44(1): 107-117 (in Chinese).
- 王海军, 张峻, 王宏记, 等, 2010. 长江三峡地区宜昌、巴东短历时极值降水特征分析[J]. 暴雨灾害, 29(1): 38-43. Wang H J, Zhang J, Wang H J, et al, 2010. The characteristics of short-duration precipitation extremes of Badong and Yichang stations in the Yangtze Three Gorges Area[J]. Torr Rain Dis, 29(1): 38-43 (in Chinese).
- 王家祁, 胡明思, 1990. 中国点暴雨量极值的分布[J]. 水科学进展, 1(1): 2-12. Wang J Q, Hu M S, 1990. Distributions of extreme storm rainfall values in China[J]. Adv Water Sci, 1(1): 2-12 (in Chinese).
- 王芝兰, 王劲松, 李耀辉, 等, 2013. 标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析[J]. 高原气象, 32(3): 839-847. Wang Z L, Wang J S, Li Y H, et al, 2013. Comparison of application between generalized extreme value index and standardized precipitation index in Northwest China[J]. Plateau Meteor, 32(3): 839-847 (in Chinese).
- 吴滨, 文明章, 李玲, 等, 2015. 福建省不同短历时暴雨时空分布特征[J]. 暴雨灾害, 34(2): 153-159. Wu B, Wen M Z, Li L, et al, 2015. Temporal and spatial distribution of different short-time rainstorm in Fujian[J]. Torr Rain Dis, 34(2): 153-159 (in Chinese).
- 谢五三, 吴蓉, 田红, 等, 2017. 东津河流域暴雨洪涝灾害风险区划[J]. 气象, 43(3): 341-347. Xie W S, Wu R, Tian H, et al, 2017. Rainstorm flood risk regionalization of the Dongjin River Basin[J]. Meteor Mon, 43(3): 341-347 (in Chinese).
- 晏丽红, 谢中华, 2006. 赤潮发生的频率分析[J]. 天津科技大学学报, 21(3): 60-62. Yan L H, Xie Z H, 2006. Red tide frequency analysis[J]. J Tianjin Univer Sci Technol, 21(3): 60-62 (in Chinese).
- 张宇彤, 矫梅燕, 陈静, 等, 2016. 基于贝叶斯方法的极端降水概率预报试验[J]. 气象, 42(7): 799-808. Zhang Y T, Jiao M Y, Chen J, et al, 2016. Probabilistic forecasting of extreme precipitation experiment based on Bayesian Theory[J]. Meteor Mon, 42(7): 799-808 (in Chinese).
- 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. 气象, 44(3): 351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing[J]. Meteor Mon, 44(3): 351-360 (in Chinese).
- 周旭东, 杨涛, 梁慧迪, 2013. 广义极值分布模型在黄河源区枯季径流中的应用[J]. 水电能源科学, 31(2): 12-14. Zhou X D, Yang T, Liang H D, 2013. Application of generalized extreme value distribution model to low water flow in head water of Yellow River Basin[J]. Water Resources Power, 31(2): 12-14 (in Chinese).
- Kotz S, Nadarajah S, 2000. Extreme Value Distributions: Theory and Applications[M]. London: Imperial College Press: 61-63.