

长江三角洲太湖流域湖西浙西区降水极值特性分析

王文琪, 王 栋*, 王远坤

(南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210023)

摘 要:长江三角洲太湖流域属于典型的北亚热带季风气候区, 气候变化、快速城镇化和人类活动使得极端气象灾害的影响加剧。极端降水形成洪水的主要来源之一, 分析降水极值特性是研究洪水的一种必要且有效的手段。以湖西浙西区 96 个站点 2006—2012 年的日降水数据为例, 选取极端降水量(R95P)、一日最大降水量(RX1D)、最大连续五日降水量(RX5D)、降水强度(SDII)和强降水日数(R10, R20 和 R50)七个极端降水指数, 研究降水极值空间分布规律。结果表明, 极端降水量在湖西区北部呈现较高值, 降水强度在浙西山区和湖西山区以及东北部地区呈现较高值, 其余五个指数均显示, 地势较高的浙西山区极端降水指数相应较高。进一步对丹阳、金坛、溧阳、宜兴、安吉和湖州六个代表站 1961—2015 年的降水极值分析, 利用广义极值分布(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)和广义帕累托分布(Generalized Pareto Distribution, GPD)两种极值模型进行分布拟合。研究发现, GPD 的拟合效果优于 GEV, 各个站点的分布模型参数也有差异, 对两种分布下不同重现期的极端降水量值进行对比, 为风险防范和工程设计安全提供了科学依据。另外, 汛期降水的空间分布差异性较大, 汛期和非汛期的对比结果显示极值统计模型参数也有较大差异, 主要体现在阈值和尺度参数上。对于特定季节尤其是暴雨多发期的极端降水事件, 建议利用汛期的降水极值进行统计模拟, 有助于更好地刻画降水极值特性。

关键词:降水极值, 极端降水指数, 空间分布, 广义极值分布, 广义帕累托分布, 湖西浙西区

中图分类号: P333.9

文献标识码: A

Rainfall extreme value analysis on western area of Taihu Lake basin in Yangtze River Delta

Wang Wenqi, Wang Dong*, Wang Yuankun

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

Abstract: The Taihu Lake basin in the Yangtze River Delta is a typical northern subtropical monsoon climate area. Climate change, rapid urbanization and human activities aggravate the impact of extreme meteorological disasters. Extreme rainfall is one of the main sources of flood disasters. Analyzing the characteristics of extreme rainfall is a necessary and effective method to study on flood event. Taking the daily precipitation data of 96 stations from 2006 to 2012 in the western area of Taihu Lake basin as an example, seven extreme precipitation indices (R95P, RX1D, RX5D, SDII, R10, R20 and R50) were selected to study the spatial distribution of extreme precipitation. The results show that the extreme precipitation in the northern part of western area of Taihu Lake basin presents a higher value, while the other six indices show that the extreme precipitation index in mountainous areas with higher terrain is correspondingly

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401501, 2017YFC1502704)

收稿日期: 2019-06-11

* 通讯联系人, E-mail: wangdong@nju.edu.cn

higher. Furthermore, the precipitation extreme values of six representative stations (Danyang, Jintan, Liyang, Yixing, Anji and Huzhou) from 1961 to 2015 were analyzed, and the distribution was fitted by two extreme value statistical models, Generalized Extreme Value Distribution (GEV) and Generalized Pareto Distribution (GPD). It is found that the fitting performance of GPD is better than that of GEV, and the distribution model parameters of each station are also different. Precipitation extreme values in different return periods under two distribution models also provide guidance for risk prevention and engineering design safety. In addition, the spatial distribution of precipitation in flood season is more different. The comparison between flood season and non-flood season shows that the parameters of extreme value statistical model are also quite different, mainly reflected in the threshold and scale parameters. For extreme rainfall events in specific seasons, especially in rainstorm-prone periods, it is suggested that the extreme rainfall observations in flood season be used for statistical simulation, which is helpful to better characterize the statistical characteristics of extreme rainfall.

Key words: extreme rainfall, extreme precipitation index, spatial distribution, Generalized Extreme Value Distribution, Generalized Pareto Distribution, western area of Taihu Lake basin

全球气候变化影响着地球上的水循环,高温、干旱、暴雨、洪涝等极端事件频发,给人类生命财产安全带来极大威胁,极端气候事件已经得到世界范围内的关注和重视,国内外众多学者已对气候变化下极端事件开展了研究^[1-3]. Naveau et al^[4]利用一种无参熵法对欧洲地区24个气象站90年以上的日最低和最高气温变化进行了极值分布变化检验. Rietsch et al^[5]利用法国331个气象站进行了暴雨分析,提出了一种基于极值理论和机器学习算法的站网设计方法帮助更好捕获极端暴雨统计特性. Mascaro^[6]对美国亚利桑那中部地区日降水极值的年际、季节性和空间分布变化进行了探讨. Iliopoulou et al^[7]发现季节性对极端降水分布的尾部指标影响较小. 时光训等^[8]对长江流域1970—2014年极端降水过程的时空变化特征开展分析,发现该地区弱降水变化不显著,强降水变化幅度较大,易发生洪涝灾害. 其他学者也对我国多地的极端降水分布特征进行了探讨^[9-14]. 极端降水发生的频率和强度是导致洪涝等极端灾害发生的重要指标,通常可以用极端降水指数来刻画^[1,8,12,14]. 在分析极端降水发生概率方面,极值理论(Extreme Value Theory, EVT)^[15]发挥出越来越重要的作用. 极值理论作为统计学中对于极值领域开展研究的重要方法,已被广泛应用到极端降水拟合中^[16-18]. 常见用于极端降

水拟合的分布包括广义帕累托分布(Generalized Pareto Distribution, GPD)和广义极值分布(Generalized Extreme Value Distribution, GEV).

长江三角洲是我国城市化水平最高、经济社会最发达的区域之一,受到季风性气候的影响,降雨年内分配不均^[19]. 近年来全球气候变化、快速城镇化进程以及人类活动的影响使得长三角地区暴雨洪水发生次数频繁,极端事件多发,给该地区人民的生命财产和社会经济带来重大损失. 极端降水是极端天气事件的重要组成部分,所造成的威胁非常大,同时极端降水加大的幅度也胜于平均降水. 因此,极端降水分布特征的研究分析是当前面临的一个重要问题,对于了解降水结构变化、洪涝灾害预警和城市建设规划等都具有指导性意义. 目前已有对长三角和太湖流域的降水极值分析^[16,20-21],具体到湖西浙西区的探讨还未多见,因此本文利用极端降水指数和两种极值统计模型,着重对太湖流域湖西浙西区降水极值特性进行分析,为该地区防洪排涝、城建规划及应对暴雨灾害提供科学参考.

1 研究方法

1.1 极端降水指数 极端降水研究中多采用阈值法,选取超过阈值的观测事件为极端降水

事件. 本文选取世界气象组织气象学委员会及气候变化和可预报性研究计划推荐的七个极端降水指数, 如表 1 所示. 分别计算 2006—2012

年的多年平均值, 在 Surfer 软件中采用克里金法进行空间插值, 进而得到各极端降雨指数多年平均值空间分布规律.

表 1 七个极端降水指数及定义

Table 1 Seven extreme precipitation indices and definitions

类型	名称	代号	单位	定义
相对指数	极端降水量	R95P	mm	年日降水量>第 95 百分位值的降水总量
极值指数	一日最大降水量	RX1D	mm	年最大的一日降水量
	最大连续五日降水量	RX5D	mm	年最大的连续五日降水量
绝对指数	降水强度	SDII	mm·d ⁻¹	年有雨日降水强度
	强降水日数	R10	d	年日降水量≥10mm 的总日数
	强降水日数	R20	d	年日降水量≥20mm 的总日数
	强降水日数	R50	d	年日降水量≥50mm 的总日数

1.2 极值统计模型 GEV 分布通常采用块极大值法(Block Maxima Model, BMM)选取样本序列, 在本例中即选取年最大日降水量序列. GEV 分布函数为:

$$F_{\mu, \sigma, \xi}(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\left(-\frac{1}{\xi}\right)}\right\}, \xi \neq 0 \\ \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]\right\}, \xi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, μ 为位置参数, σ 是尺度参数, ξ 是形状参数, $\mu \in R, \sigma > 0, \xi \in R, 1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0$. $\xi = 0$ 时也是 Gumbel 分布, 称为极值 I 型; $\xi < 0$ 时, 称为极值 II 型; $\xi > 0$ 时, 称为极值 III 型.

由于 GEV 分布模型选取年最大值为样本序列, 某些情况下也浪费了统计资料. GPD 分布通常采用超阈值法(Peak Over Threshold, POT)选取样本序列, 统计超过阈值的样本组成新的样本序列, 能够更准确地描述分布的尾部特征. 假定阈值为 u , GPD 分布函数为:

$$F_{\sigma, \xi}(x) = \begin{cases} 1 - \left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\left(-\frac{1}{\xi}\right)}, \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right), \xi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ 是尺度参数, ξ 是形状参数, $\sigma > 0, \xi \in R, 1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0$. 当 $\xi = 0$ 时为指数分布; 当 $\xi < 0$ 时为 Beta 分布; 当 $\xi > 0$ 时为 Pareto 分布.

1.3 参数估计和模型评价 参数估计方法采用极大似然估计方法(Maximum Likelihood Estimate, MLE), 假设 x_1, x_2, \dots, x_n 为服从独立同分布的采样, θ 为模型参数, 概率分布为 $P\{X=x\}=p(x; \theta)$, 似然函数为:

$$L(\theta) = L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta) \quad (3)$$

极大似然估计量为:

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmax} L(\theta) \quad (4)$$

模型拟合结果评价通常采用 AIC(Akaike Information Criterion)^[22] 和 BIC(Bayesian Information Criterion)^[23] 准则, 这两种评价准则都基于似然函数和模型复杂度, AIC, BIC 越小则模型拟合效果越好. 定义如下:

$$AIC = 2k - 2\ln L \quad (5)$$

$$BIC = k\ln n - 2\ln L \quad (6)$$

式中, k 为参数数目, L 为似然函数, n 为样本总量.

2 研究区概况与数据

太湖流域位于长江三角洲南缘, 流域总面

积为 36895 km²,流域地势西高东低,四周高中间低,地貌主要分为山地丘陵和平原河网两大类.其中山地丘陵主要分布在流域西部,面积为 7338 km²,约占流域总面积的 20%,自北向南分布有茅山山脉、界岭山脉、天目山脉,分别属于江苏和浙江两省.其中,茅山山脉和界岭山脉北段位于江苏省境内,称为湖西山丘区,界岭山脉南段和天目山脉位于浙江省境内,称为浙西山丘区.湖西山丘区茅山山脉高程在 500 m 左右,向东发育有五条较大山溪,集水面积 100~500 km²不等,界岭山脉高程在 900~1000 m 左右,向北发育五条山溪汇入南溪河.浙西山丘区界岭山脉南段地形与北段基本相似,有三条较大溪流汇入太湖,天目山脉高程在

1000~1500 m,是西苕溪和东苕溪的发源地,其中西苕溪发源于天目山脉的北麓,东苕溪发源于天目山脉的南麓.

太湖流域属于北亚热带季风气候区,四季分明,气候温和,雨量充沛,降水多集中在 5—9 月,也是汛期所在月份,约占全年降水量的 60%.全年共有三个雨季,分别为 4—5 月的春雨、6—7 月的梅雨和 8—9 月的台风暴雨,其中梅雨占全年降水的 20%~30%.湖西区 and 浙西区雨量站比较密集,降水观测资料相对完善,本文选取了覆盖密度较大的 96 个站点的短序列日降水数据(2006—2012 年)和六个站点(湖西区四个、浙西区两个)的长序列日降水数据(1961—2015 年),研究区如图 1 所示.

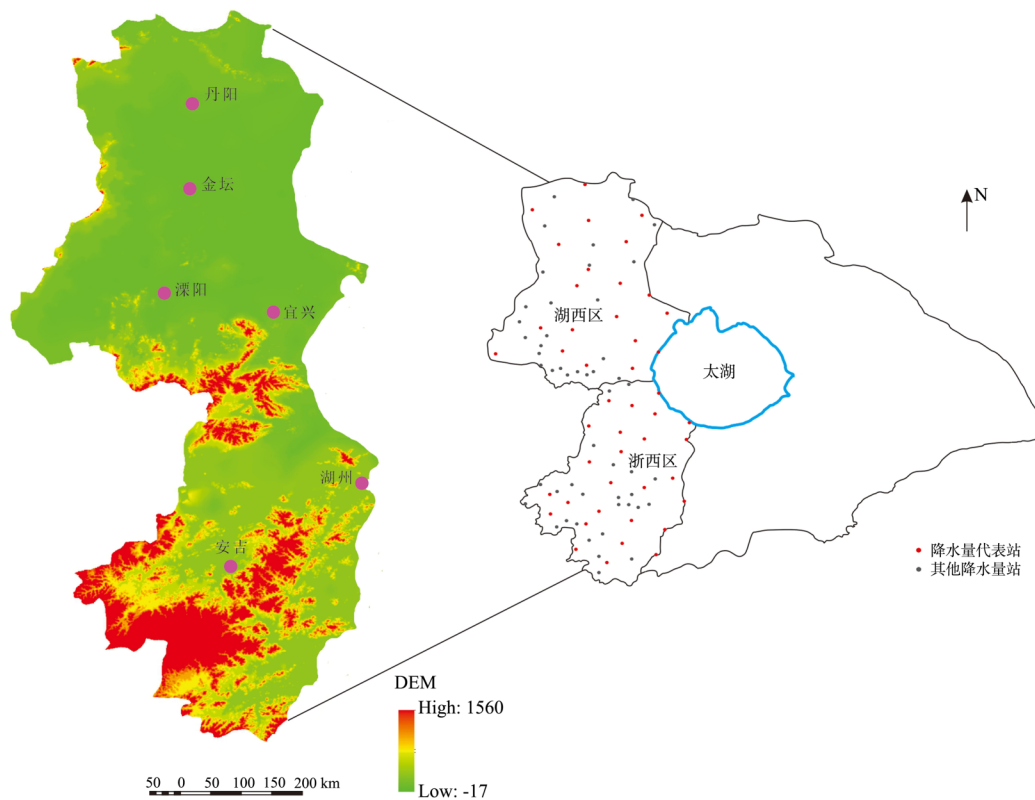


图 1 湖西浙西区地形与降水站点分布

Fig. 1 Topography and spatial distribution of rainfall stations in western area of Taihu Lake basin

3 结果与分析

3.1 降雨空间分布分析 图 2 给出了 96 个站

点年平均日降水量(AMDP)和七个极端降水指数的空间分布,由于站点分布密度较高,可以认为各个站点数据的插值结果基本体现了湖西浙

西地区的降水空间分布特性. 结合图 1 地形分布情况可知, 山区年平均日降雨要大于其他地区, 最大年平均日降水量主要分布在浙西山区.

七个极端降水指数中极端降水量(R95P)的分布模式和其他指数差异较大, 较高值主要分布在北部地区, 浙西区的南部山区则是较低值分布的区域. 由于极端降水量(R95P)代表了年内日降水量超过 95 百分位的降水总量, 可以认为虽然山区容易产生暴雨, 但从全年和总量来看极端降雨不一定发生在山区. 而一日最大降水量(RX1D)和最大连续五日降水量

(RX5D)在空间分布模式上较为相似, 较高值主要分布在浙西的山区, 较低值则出现在湖西区的西南角. 降水强度(SDII)的分布模式也与其他指数略有差异, 主要体现在除了湖西山区和浙西山区的SDII值较高以外, 在湖西区的东北部也呈现出一个较高值区域, 说明降水强度的分布不仅与地形有关, 还受到其他因素的影响. 强降水日数(R10, R20 和 R50)的空间分布模式大致相似, 较高值区域主要出现在湖西和浙西的山区, 同时由 R10, R20 和 R50 的分布变化趋势可知, 随着强降水等级提高, 区域内空间分布差异逐渐减小.

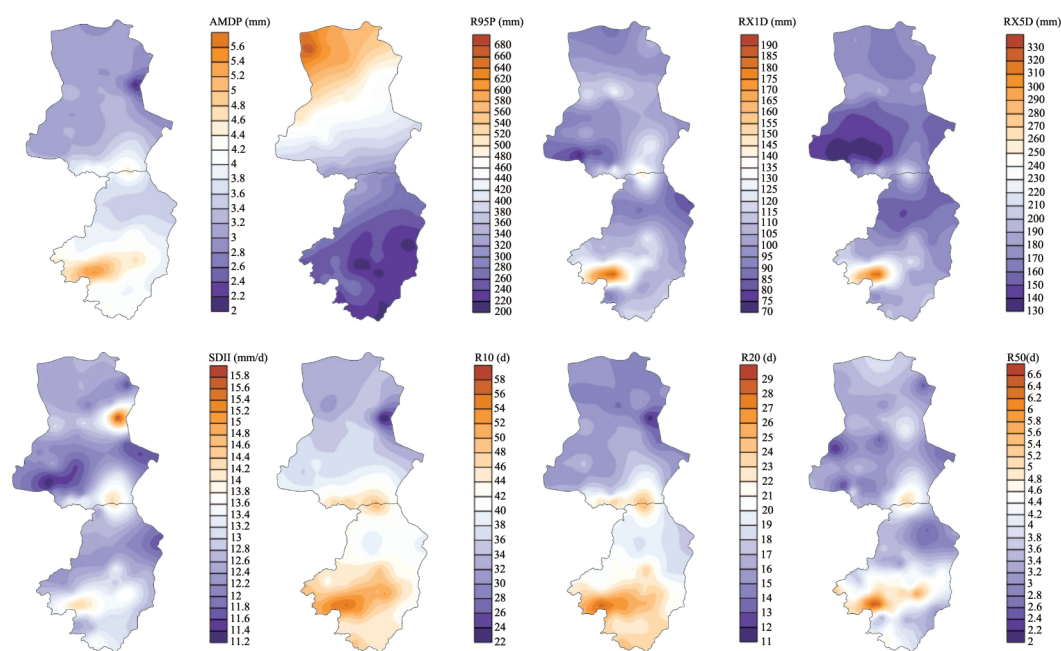


图 2 年平均日降水量和极端降水指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual mean daily rainfall and extreme precipitation indices

3.2 GPD 和 GEV 拟合结果对比 对湖西区四个站点和浙西区两个站点的降水极值拟合结果如表 2 所示. 由 AIC 和 BIC 最小原则可以发现, 六个站点的 GPD 拟合效果均要优于 GEV 拟合效果, 说明 GPD 对于湖西浙西区降水极值特性描述更为有效, 即更能把握降水极值的分布及趋势状况. 在 GP 阈值 u 的选择上, 可以发现该地区站点的阈值大致在 70~90 mm, 这也与之前的研究结果一致^[16]. 对比六个站点的

GEV 拟合结果可知, 除了溧阳站属于极值 II 型以外, 其他站点都属于极值 III 型.

图 3 给出了湖西区四个代表站点 GPD 和 GEV 分布拟合的概率密度分布图 (density plot), 红色和蓝色曲线代表理想的模型概率密度分布, 柱状图表示观测数据分布. 可以发现, 溧阳站的 GEV 分布偏态性要弱于其他三个站点, 与表 2 中 GEV 的形状参数 ξ 相对应. 丹阳站的 GPD 拟合属于重尾分布 (Pareto 分布, $\xi >$

表2 湖西浙西区六个代表站点降水极值GPD和GEV拟合结果

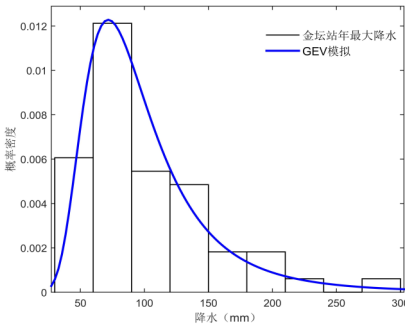
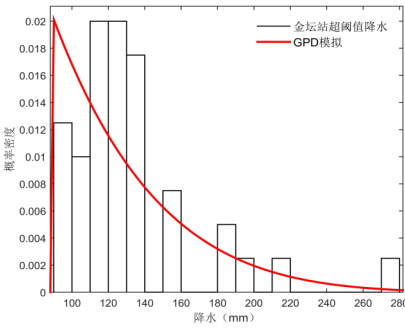
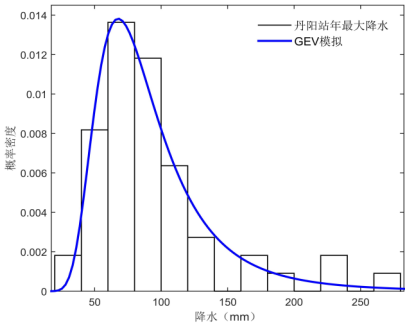
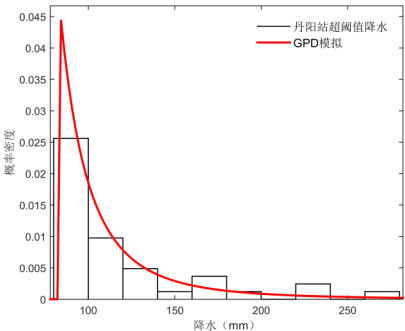
Table 2 GPD and GEV fitting results of extreme rainfall for six stations in western area of Taihu Lake basin

站点	GPD (POT)						GEV (BMM)				
	ξ	σ	$u(\text{mm})$	$Q_r(\%)$	AIC	BIC	ξ	σ	μ	AIC	BIC
丹阳站	0.40	22.22	84	99.80	373.42	376.85	0.19	27.06	72.30	554.28	559.42
金坛站	-0.14	48.81	89	99.80	384.02	387.40	0.19	30.49	77.04	567.74	572.80
溧阳站	-0.37	33.80	81	99.80	344.33	347.76	-0.02	24.34	73.80	530.39	535.53
宜兴站	-0.02	23.50	89	99.80	335.07	338.45	0.08	22.62	75.43	528.13	533.19
安吉站	0.26	18.08	87	99.80	344.62	348.05	0.04	26.27	76.20	541.92	547.06
湖州站	-0.04	28.12	78	99.80	347.37	350.75	0.20	22.14	69.33	532.80	537.87

0),而宜兴站可以视为轻尾分布(指数分布, $\xi \approx 0$),其他两个站点则属于Beta分布($\xi < 0$).同样,图4给出浙西区两个代表站点的概率密度分布图,可以发现安吉站的GPD拟合属于Pareto分布($\xi > 0$),湖州站的GPD拟合则属于指数分布($\xi \approx 0$).另外,对比两个站点的GEV分布结果显示湖州站偏态性更强.

图5给出两种分布下不同重现期各个站点

的极端降水量值,可以发现,相同重现期水平下丹阳站和金坛站降水量更高,表明这两个站点所在地区可能遭遇的暴雨级别更高,应当相应提高风险防范等级.同时,GPD和GEV两种分布结果略有差异,例如,丹阳站相同重现期水平下GPD拟合的降水量大于GEV拟合的结果,从风险分析角度,基于GPD拟合的特定重现期下极端降水量推求更有利于工程设计安全.



续图 3

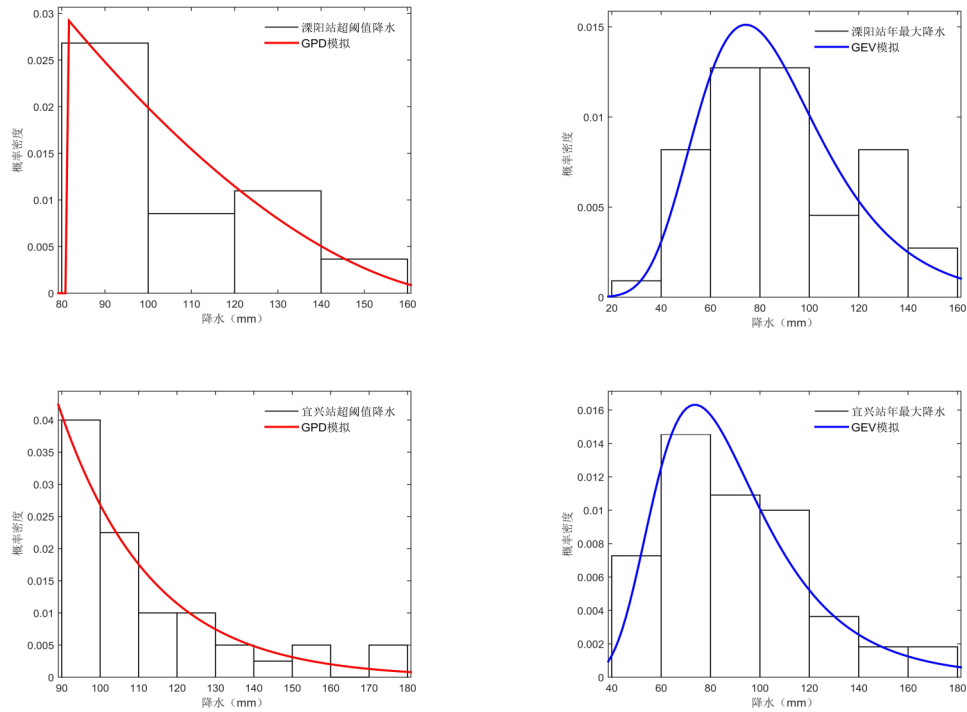


图 3 湖西区四个代表站点极端降水 GPD 和 GEV 分布拟合

Fig.3 GPD and GEV fitting plots for four stations in western area of Taihu Lake basin in Jiangsu Province

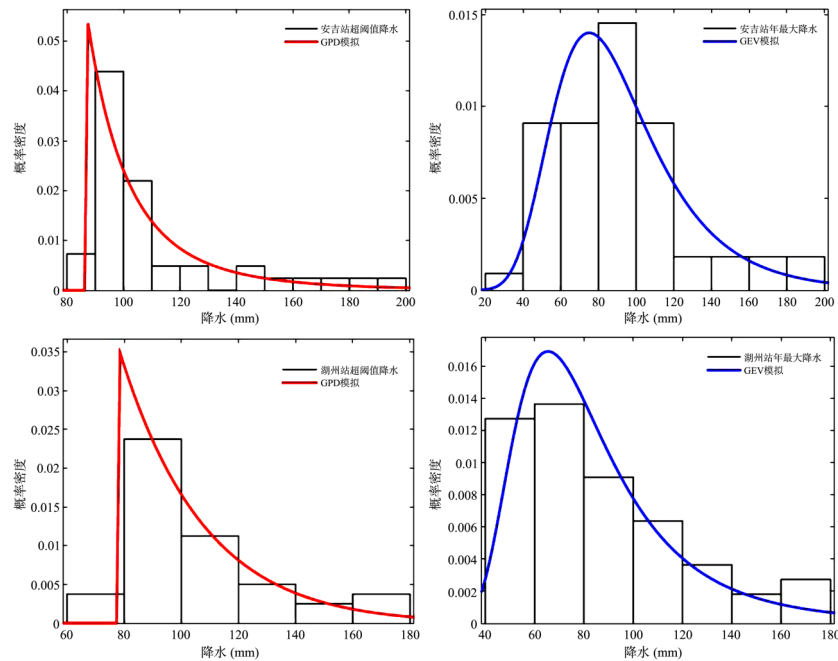


图 4 浙西区两个代表站点极端降水 GPD 和 GEV 分布拟合

Fig. 4 GPD and GEV fitting plots for two stations in western area of Taihu Lake basin in Zhejiang Province

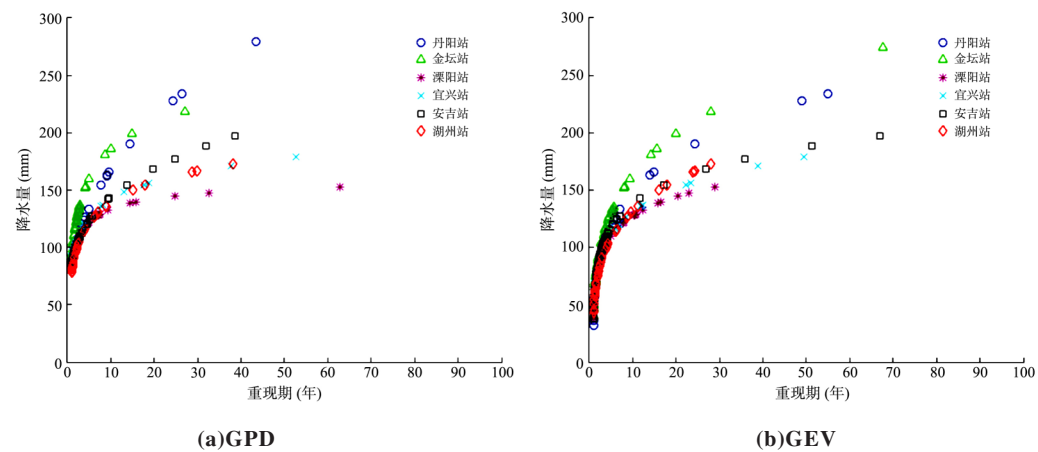


图5 湖西浙西区代表站点不同重现期的极端降水量值

Fig. 5 Extreme rainfall under different return periods for stations in western area of Taihu Lake basin

3.3 汛期和非汛期降水极值分布对比 考虑到该地区受季风性气候的影响,降水年内分布不均,首先对汛期(5—9月)和非汛期(10月至次年4月)的日平均降水量空间分布进行比较.图6显示,汛期降水的空间分布差异性明显大于非汛期,在湖西山区和浙西山区呈现出明显的较高值区域,可以认为汛期降水的空间分布特征与非汛期差异明显.进一步分别对汛期和非汛期的降水极值进行了GPD模拟.由表3可以发现,汛期和非汛期的降水极值模拟结果差

异较大,具体表现在阈值选取和参数变化范围上.总体来说,非汛期的尺度参数 σ 较汛期偏小,阈值 u 也明显比汛期要小得多;而从形状参数来看,汛期和非汛期可能属于不同的分布,例如金坛站在汛期属于Pareto分布,而在非汛期则属于Beta分布.由表2和表3对比可知,全年的降水极值特征与汛期、非汛期也有差异,对于特定季节尤其是暴雨多发期的极端降水事件,应当具体考虑该时期的降水观测值,从而更准确地有效地捕获极端降水特征.

表3 湖西浙西区六个代表站点汛期和非汛期降水极值 GPD 模拟结果

Table 3 GPD fitting results of flood season and non-flood season for six stations in western area of Taihu Lake basin

站点	汛期						非汛期					
	ξ	σ	u (mm)	$Q_t(\%)$	AIC	BIC	ξ	σ	u (mm)	$Q_t(\%)$	AIC	BIC
丹阳站	-0.04	51.52	107	99.80	170.61	169.07	-0.15	16.32	42	99.80	178.77	177.53
金坛站	0.55	17.42	128	99.80	153.80	152.27	-0.29	16.37	49	99.80	172.46	171.22
溧阳站	-1.07	55.02	101	99.80	134.14	132.61	-0.11	18.25	46	99.80	178.46	177.18
宜兴站	-0.48	41.46	105	99.80	148.33	146.80	0.07	15.03	52	99.80	207.88	206.74
安吉站	0.29	22.15	98	99.80	153.04	151.50	0.43	14.38	51	99.80	200.64	199.40
湖州站	-0.30	33.26	95	99.80	147.07	145.53	0.57	11.99	48	99.80	190.58	189.31

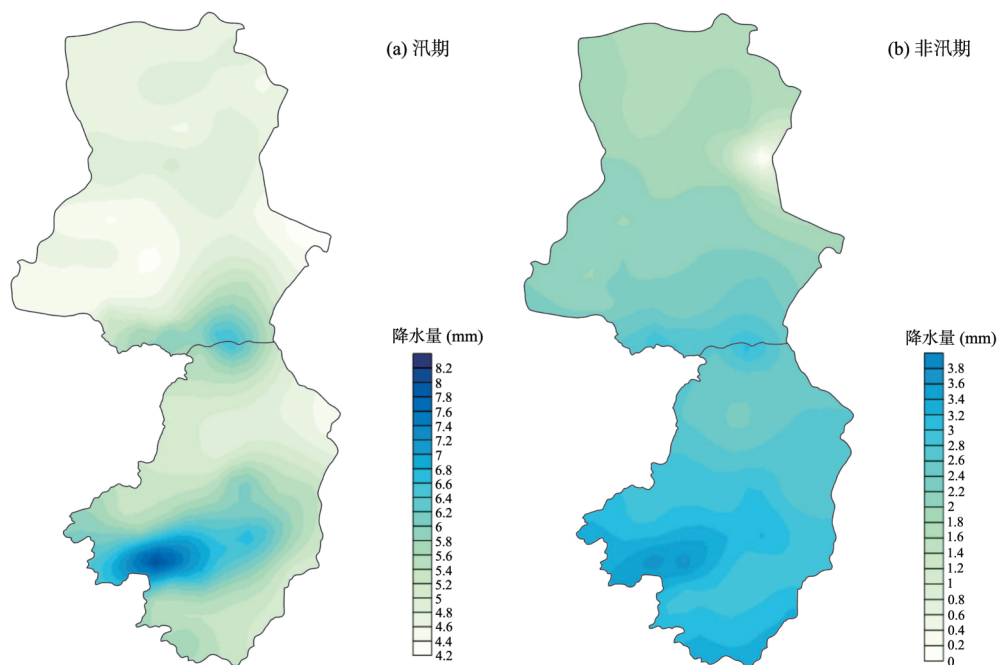


图 6 汛期和非汛期日平均降水量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of mean daily precipitation in flood season and non-flood season

4 结 论

本文利用极端降水指数和极值统计模型,基于湖西浙西区多站点降水资料,对湖西浙西区降水极值的空间分布特性和统计分布特性进行了分析,得出以下结论:

(1) 浙西山区的年平均日降水量、一日最大降水量、最大连续五日降水量以及强降水日数等指标在研究区内均显示最大值,但从极端降水量和降水强度来看,最大值不一定发生在山区,还可能与其他因素有关;

(2) 湖西区 and 浙西区六个代表站点的降水极值分布拟合结果显示,GPD拟合效果要优于GEV,阈值范围大致在70~90 mm,GPD分布模型更能把握降水极值的分布状况.从具体分布类型上来看,各个站点之间也存在差异性,相同重现期水平下部分站点的降水量更高,应适当提高风险防范等级;

(3) 汛期和非汛期的降水空间分布和GPD分布模式也有较大差别,体现在汛期的日平均

降水空间分布差异要高于非汛期,汛期GPD阈值也明显高于非汛期,同时形状和尺度参数变化范围也不同,考虑到该地区暴雨极端事件多发生在汛期,应当针对汛期观测记录进行极值分析更为合理.

参考文献

- [1] 张利平,杜鸿,夏军等.气候变化下极端水文事件的研究进展.地理科学进展,2011,30(11):1370—1379. (Zhang L P, Du H, Xia J, et al. Progress in the study of extreme hydrologic events under climate change. Progress in Geography, 2011, 30 (11):1370—1379.)
- [2] 孔锋,史培军,方建等.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望.灾害学,2017,32(2):165—174. (Kong F, Shi P J, Fang J, et al. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the

- background of global climate change. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(2): 165—174.)
- [3] Cavalcanti I F A, Carril A F, Penalba O C, et al. Precipitation extremes over La Plata Basin - Review and new results from observations and climate simulations. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 211—230.
- [4] Naveau P, Guillo A, Rietsch T. A non-parametric entropy-based approach to detect changes in climate extremes. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 2014, 76(5): 861—884.
- [5] Rietsch T, Naveau P, Gilardi N, et al. Network design for heavy rainfall analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2013, 118(23): 13075—13086.
- [6] Mascaro G. On the distributions of annual and seasonal daily rainfall extremes in central Arizona and their spatial variability. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 266—281.
- [7] Iliopoulou T, Koutsoyiannis D, Montanari A. Characterizing and modeling seasonality in extreme rainfall. *Water Resources Research*, 2018, 54(9): 6242—6258.
- [8] 时光训, 刘健, 马力等. 1970—2014年长江流域极端降水过程的时空变化研究. *水文*, 2017, 37(4): 77—85. (Shi G X, Liu J, Ma L, et al. Spatio-temporal variations of extreme precipitation events in Yangtze River Basin during 1970—2014. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(4): 77—85.)
- [9] 杨卫, 张利平, 闪丽洁等. 汉江流域极端水文事件时空分布特征. *气候变化研究进展*, 2015, 11(1): 15—21. (Yang W, Zhang L P, Shan L J, et al. Spatiotemporal distribution features of extreme hydrological events in the Hanjiang River Basin. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2015, 11(1): 15—21.)
- [10] 张利平, 杨艳蓉, 秦琳琳等. 未来情景下南水北调中线工程水源区极端降水分布特征. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 29—34. (Zhang L P, Yang Y R, Qin L L, et al. Distribution of extreme precipitation events in water source area for the middle route project of South-to-North water transfer Under A2, A1B, B1 scenarios. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2013, 9(1): 29—34.)
- [11] 张婷, 魏凤英. 华南地区汛期极端降水的概率分布特征. *气象学报*, 2009, 67(3): 442—451. (Zhang T, Wei F Y. Probability distribution of precipitation extremes during raining seasons in South China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(3): 442—451.)
- [12] 李胜利, 巩在武, 石振彬. 近50年来山东省极端降水指数变化特征分析. *水土保持研究*, 2016, 23(4): 120—127. (Li S L, Gong Z W, Shi Z B. Characteristics of change in extreme precipitation indices in Shandong province in recent 50 years. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(4): 120—127.)
- [13] 慈晖, 张强, 张江辉等. 1961—2010年新疆极端降水过程时空特征. *地理研究*, 2014, 33(10): 1881—1891. (Ci H, Zhang Q, Zhang J H, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events within Xinjiang during 1961—2010. *Geographical Research*, 2014, 33(10): 1881—1891.)
- [14] 宋晓猛, 张建云, 孔凡哲等. 北京地区降水极值时空演变特征. *水科学进展*, 2017, 28(2): 161—173. (Song X M, Zhang J Y, Kong F Z, et al. Spatio-temporal variation characteristics of precipitation extremes in Beijing. *Advances in Water Science*, 2017, 28(2): 161—173.)
- [15] Coles S. An introduction to statistical modeling of extreme values. London: Springer, 2001, 45—90.
- [16] 袁嘉晨, 胡庆芳, 陈元芳等. 基于极值理论的太湖流域降水极值分析. *水电能源科学*, 2017, 35(7): 1—5. (Yuan J C, Hu Q F, Chen Y F, et al. Precipitation extreme value analysis of Taihu Basin based on extreme value method. *Water Resources and Power*, 2017, 35(7): 1—5.)
- [17] 宋晓猛, 张建云, 孔凡哲. 基于极值理论的北京市极端降水概率分布研究. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48(6): 639—650. (Song X M, Zhang J Y, Kong F Z. Probability distribution of extreme precipitation in Beijing based on extreme value theory. *SCIENTIA SINICA (Technologica)*, 2018, 48(6): 639—650.)
- [18] 石先武, 方伟华, 林伟等. 基于极值理论的中国台风降水分布不确定性分析. *北京师范大学学报*

- (自然科学版), 2011, 47(5): 493—501. (Shi X W, Fang W H, Lin W, et al. Uncertainty of China typhoon rainfall probability estimation with different extreme-value models. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2011, 47(5): 493—501.)
- [19] 吴浩云, 王银堂, 胡庆芳等. 太湖流域 61 年来降水时空演变规律分析. 水文, 2013, 33(2): 75—81. (Wu H Y, Wang Y T, Hu Q F, et al. Temporal-spatial change of precipitation in Taihu Lake Basin during recent 61 Years. Journal of China Hydrology, 2013, 33(2): 75—81.)
- [20] 周北平, 史建桥, 李少魁等. 近 53 年长三角地区极端降水时空变化分析. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 5—9. (Zhou B P, Shi J Q, Li S K, et al. Spatio-temporal variations of extreme precipitation in the Yangtze River Delta during 1960—2012. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(9): 5—9.)
- [21] 于文金, 阎永刚, 邹欣庆. 太湖流域暴雨时空特征研究. 自然资源学报, 2012, 27(5): 766—777. (Yu W J, Yan Y G, Zou X Q. Study on spatial and temporal characteristics of rainstorm in Taihu Lake basin. Journal of Natural Resources, 2012, 27(5): 766—777.)
- [22] Akaike H. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716—723.
- [23] Schwarz G. Estimating the dimension of a model. The Annals of Statistics, 1978, 6(2): 461—464.

(责任编辑 吴劲薇)