王静,余锦华,何俊琦. 2015. 江淮地区极端降水特征及其变化趋势的研究 [J]. 气候与环境研究, 20 (1): 80-88, doi:10.3878/j.issn.1006-9585. 2014.13222. Wang Jing, Yu Jinhua, He Junqi. 2015. Study on characteristics and change trend of extreme rainfall in the Jianghuai region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (1): 80-88.

江淮地区极端降水特征及其变化趋势的研究

王静 余锦华 何俊琦

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/大气科学学院,南京 210044

摘 要 利用 1961~2011 年江淮地区 5~9 月无缺测的 71 站逐日降水资料,做基于 POT (Peaks-Over-Threshold)的广义 Pareto 分布 (GPD),研究江淮地区极端降水的分布特征及其变化趋势。结果表明:(1)皖赣交界处阈值最大,西北和东南部较小,且江淮大部分地区阈值的线性趋势系数为正,其中湖北东部和江西北部的站点,趋势达 0.8 mm (10 a)⁻¹以上,并通过了显著性水平 0.01 的 MK (Mann-Kendall)检验。(2) 江淮地区中东部多存在连续性极端降水,因此文中采用基于极值指数的自动分串技术获得近似独立的极值样本。(3) 尺度参数大值区位于江淮南部,西北、东南以及淮河以北较小,且线性趋势系数在大部分地区均表现为正值,表明出现降水极大值的概率增加。(4)皖赣鄂交界处是极端降水发生概率大值区,而西北、东南及安徽中部地区较小,且极端降水在大部分地区有增加的趋势,特别是在大别山附近及河南东部,2 年和 20 年重现水平的趋势分别达 6 mm (10 a)⁻¹和 20 mm (10 a)⁻¹以上。

关键词 广义 Pareto 分布 超门限峰值 POT (Peaks-Over-Threshold) 极端降水
 文章编号 1006-9585 (2015) 01-0080-09
 中图分类号 P466
 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13222

Study on Characteristics and Change Trend of Extreme Rainfall in the Jianghuai Region

WANG Jing, YU Jinhua, and HE Junqi

Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The daily rainfall data from May to September of 71 stations in the Jianghuai region from 1961 to 2011 with no missing data were used to introduce the GPD (Generalized Pareto Distribution) based on the POT (Peaks-Over-Threshold) method in a study of the spatial distribution of extreme rainfall characteristics and trends. The results indicate that the maximum thresholds are at the border of Anhui and Jiangxi, whereas smaller thresholds are in northwest and southeast. The trends of the thresholds are positive in most places. At the stations in eastern Hubei and northern Jiangxi, the trends are more than $0.8 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ and pass the 0.01 significance level of the Mann-Kendall test. In the mid-east region, extreme rainfall is nearly continuous; therefore, an automatic declustering scheme is used to select the independent extreme events exceeding the threshold. The largest values of scale parameter are in the south, whereas in areas northwest, southwest, and north of the Huaihe River, the values are smaller. In most parts of the Jianghuai region, the trends of scale parameter are positive, which indicates a greater occurrence probability of maximum rainfall. The border region of Anhui, Jiangxi, and Hubei has the highest probability of extreme rainfall, whereas the probabilities are lower in the northwest, southeast, and middle parts of Anhui. The trends of extreme rainfall are positive in most places,

收稿日期 2013-12-13; 网络预出版日期 2014-03-07

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB955903,江苏省高校自然科学研究重大项目 13KJA170002,江苏高校优势学科建设工程项目 作者简介 王静,女,1989 年出生,硕士研究生,主要从事极端气候变化研究。E-mail: sxwangjing@163.com

particularly in the Dabie mountains nearby and in eastern Henan, where the trends of 2-a and 20-a return levels are more than 6 mm $(10 \text{ a})^{-1}$ and 20 mm $(10 \text{ a})^{-1}$, respectively.

Keywords Generalized Pareto Distribution (GPD), Peaks-Over-Threshold (POT), Extreme rainfall

1 引言

暴雨引起的洪水和内涝给人民的生命财产和 公共基础设施带来重大影响。随着经济建设和城市 的发展,其影响更为深远。江淮是我国暴雨洪涝灾 害发生最为严重的地区之一,IPCC 第四次评估报 告指出,极端事件在 21 世纪将变得更加频繁,该 区域的极端降水事件研究受到关注(田红等,2005; IPCC,2007; 江志红等,2007; 翟盘茂等,2007; 丁裕国等,2008; 杨金虎等,2008)。

广义极值理论分布(GEV)曾是极值理论应用 最为普遍的概率模型,但由于该模型极值样本只取 变量最大值,使很多可用的极值信息被丢弃,被认 为是一种浪费(Coles,2003)。POT(Peaks-Over-Threshold)考虑了超过预定阈值的所有可能样本信 息,近年来在极值理论中得到了推广应用。POT方 法中,阈值的确定是非常关键的,过高使超阈值样 本偏少,可用的极值信息被舍弃,参数方差增大; 过低使一些不可用的信息被利用,可能扰乱模型渐 近分布背景,造成模型偏差。

在以往的基于极值模型的极端降水研究中,一 般将阈值和模型参数设定,进而得到的极端降水不 随时间而变。如何定量描述极端降水的发生概率和 变化特征是有待于解决的问题。本文采用基于 POT 的广义 Pareto 分布 (GPD),选取江淮地区近 51 年 5~9 月无缺测的 71 站日降水量,首先确定随时间 变化的阈值,然后采用基于极值指数的分串技术确 保样本的独立性,利用分串之后的独立样本估算随 时间变化的模型参数,定量描述江淮地区极端降水 的发生概率和变化趋势的空间分布。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所用的资料是 1961~2011 年的江淮地区 5~9 月无缺测的 71 站的逐日降水资料,江淮地形 及站点分布如图 1 所示。江淮地区的地形复杂,涵 盖丘陵、平原,河网密布,111°E 附近为二、三阶 梯分界线,豫皖鄂交界为大别山,西段为西北—东 南走向,东段为东北—西南走向,湘赣鄂交界处为 幕阜山,安徽南部有海拔 1800 m 的黄山。江淮东 南部多为东北—西南走向山脉。下面的结果将显示 地形对江淮地区极端降水的影响很复杂,与地形的 海拔高度、山脉走向、地理位置以及水汽的输送方 向等有关。

2.2 方法

2.2.1 阈值(门限值)的选取

本文参照文献(Francisco et al., 2011) 将阈值 设为

$$u_{c}(t) = m_{c}(t) + \alpha_{c}, \qquad (1)$$

其中, $m_s(t)$ 代表每次降水事件的平均降水量,取每 一年的中位数,假定为a+bt的形式; α_s 是 $\{[D(t)-m_s(t)]|D(t)>m_s(t)\}$ 的百分位数,用来确保 超阈值极值数与超出D(t)>0的第95百分位数的 极值数相似,D(t)是观测站的日降水。这样我们就





可以得到超阈值*u_s(t*)的极值降水样本。 2.2.2 分串技术

江淮地区夏季有很多连续性降水,因此有些超 阈值的极值降水样本可能是连续存在的,为了确保 样本是近似独立的,我们采用一种分串技术(Hsing, 1987;邓兰松和郑丕锷,2004)。常采用的分串方 案是确定一个固定的时长 *h*,*h* 内的超阈值样本就 在一个串内,选取该串中的最大值作为独立样本 (Leadbetter et al., 1989)。但是这种方法主观性太 强, Ferro and Segers (2003)提出采用客观的极值 指数作为参数来进行分串,这个方法完全取决于极 值指数(由超出阈值数*N*和超阈值数之间的时间间 隔*T_i*决定):

 $\tilde{\theta}_{n}(u) =$

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{n}(u) = \frac{2\left(\sum_{i=1}^{N-1} T_{i}\right)^{2}}{(N-1)\sum_{i=1}^{N-1} T_{i}^{2}} & \max\left\{T_{i}\right\} \leq 2, \\ \hat{\theta}_{n}^{*}(u) = \frac{2\left[\sum_{i=1}^{N-1} (T_{i}-1)\right]^{2}}{(N-1)\sum_{i=1}^{N-1} (T_{i}-1)(T_{i}-2)} & \max\left\{T_{i}\right\} > 2, \end{cases}$$

$$(2)$$

 $\widetilde{\theta}_n(u) \xrightarrow{P} \theta,$ (3)

式(3) 表示 $\tilde{\theta}_n(u)$ 依概率收敛为 θ ,即随着n的增 大, $\tilde{\theta}_n(u)$ 和 θ 之间的差距趋于 0。这样我们就可以 得到极值指数 θ ,它的取值范围在 [0,1]。

2.2.3 广义 Pareto 分布 (GPD)

广义 Pareto 的概率分布函数为 (Pickands, 1975)

$$P(X \le x) = F(x) = 1 - \left[1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right]^{-1/\xi} \xi \neq 0, \quad (4)$$

其中, x = D(t) 是日降水, u = u(t) 是随时间变化的 阈值。满足以下条件:

$$x > u,$$
 (5)

$$1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma} > 0, \tag{6}$$

其中, σ 是尺度参数,它起放大或缩小分布面积的 作用,描述极值分布的变率,尺度参数越大,表明 极值波动范围越大; ξ 是形状参数,描述极值的分 布情况, $\xi < 0$,GPD 是薄尾的, $\xi > 0$,GPD 是厚 尾的,表示分布没有上限(Coles, 2003;万仕全, 2010)。

我们采用估计偏差小且稳健性强的"*L*矩"来 进行参数估计(Hosking, 1990; Coles and Walshaw, 1994; Hosking and Wallis, 1997; 蔡敏等, 2007; 程炳岩等, 2008; 赵旭, 2012),并在模型的参数 中添加时间变化项:

$$\xi(t) = \xi, \tag{7}$$

$$\ln \sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 t. \tag{8}$$

2.2.4 极端降水的发生概率和变化特征的推算

重现水平是出现气候稀有事件(气候极值)概率的气候变量的可能取值,而出现极值的概率的倒数就是重现期。对于不同概率1/T下(T为重现期)的重现水平 x_T,有分布函数:

$$F(x_T) = 1 - \frac{1}{\rho T},\tag{9}$$

其中, *ρ* 是每年超过阈值的平均样本数。由上式结合 GPD 的分布函数公式(4) 以及模式参数的估计, 可求得 GPD 重现水平的估计式为

$$x_{T}(t) = u(t) + \frac{\sigma(t)}{\xi} \left[(T\rho)^{\xi} - 1 \right] \quad \xi \neq 0, \quad (10)$$

若已知重现水平则其重现期的估计式为

$$T(t) = \left\{ \left[x_T - u(t) \right] \frac{\xi}{\sigma(t)} + 1 \right\}^{1/\xi} / \rho \qquad \xi \neq 0.$$
 (11)

在固定重现期内至少出现一次大于重现水平的降 水的概率为

$$P(t) = 1 - \left\{ 1 - \left[1 + \xi \frac{x_T - u(t)}{\sigma(t)} \right]^{-1/\xi} \right\}^{\rho T} \quad \xi \neq 0, \quad (12)$$

其中, $\rho = n\zeta_u \theta$, n 为总的观测数, ζ_u 是样本超出 阈值的概率, θ 为极值指数,T 为重现期。重现水 平随时间变化的趋势($\beta_{T,t} = \partial x_{T,t} / \partial t$)仍为时间的 函数,我们取其平均值作为估计值:

其中, t_i 和 t_f 是重现期开始和结束的时间,b是每次降水事件平均值的线性回归项。用式(13)计算 重现水平随时间变化的趋势包括两个方面:一个是 长期的平均降水趋势b,另一个是尺度参数的趋势 σ_1 ,它提供了出现极端降水极大值概率的趋势变化 信息($\sigma_1 > 0$ 表明出现降水极大值的概率增加, $\sigma_1 < 0$ 表明概率减少)。[($Tn\zeta_u \theta$)^{ξ} – 1]/ ξ 这一项总是



图 2 (a) 景德镇、(b) 黄山的日降水量 D(t) (空心圆) 分布和阈值 $u_s(t)$ (直线) Fig. 2 Distribution of D(t) (circles) and $u_s(t)$ (straight) for (a) Jingdezhen station and (b) Huangshan station

正的,与 ξ 的正负无关,式(13)第二项的正负取 决于 σ_1 。如果 b和 σ_1 都是正的话,重现水平随时 间是增加的; b和 σ_1 都是负的话,重现水平随时间 是减少的;如果一正一负的话,取决于哪个处于主 导地位。

3 江淮地区极端降水的 GPD 模拟

3.1 GPD 模型阈值变化特征和独立样本的选取

3.1.1 阈值变化特征的分析

我们用阈值 *u*_s(*t*)随时间变化的 GPD 来模拟极 端降水事件。图 2 选取了随时间阈值分别增加和减 少的两个站点来反映阈值变化对样本选取的重要 性。图中空心圆表示日降水的分布,直线表示随时 间变化的阈值。选取固定的阈值的话,在景德镇站 会导致前面选的样本少,而后面选的样本多(图 2a);相反,黄山站会导致前面选的样本多,而后 面选的样本少(图 2b)。

图 3 反映了江淮地区各站点降水的平均阈值、 阈值随时间变化趋势的空间分布和通过 0.01、0.05 及 0.1 的 MK (Mann-Kendall)检验的站点。平均 阈值的分布与中位数的分布(图略)相似,皖赣交 界平均阈值较大,说明此处的平均降水量较大,大 别山的迎风坡也存在一个大值区,这与地形迎风坡 对水汽的抬升作用有关;阈值较小的地方位于江淮 西北部和东南部,安徽中部的平均阈值也较小,其 分别与水汽输送较小和地形的背风坡有关,图 3 还 显示,在江淮大部分地区阈值的趋势为正,湖北东 部和江西北部的趋势都达到 0.8 mm (10 a)⁻¹ 以



图 3 江淮地区平均降水阈值(等值线,单位:mm)及其随时间变化 趋势[阴影,单位:mm(10 a)⁻¹]的空间分布,虚线为趋势零线。填充色 为黑色、灰色和白色的三角形分别表示该站点通过显著性水平为 0.01 (8 个)、0.05(11 个)和 0.1(9 个)的 MK 检验,剩下的无填充色的 圆圈表示没有通过检验的站点

Fig. 3 Spatial distribution of the average precipitation (contour, units: mm) and the trends (shaded, units: mm $(10 \text{ a})^{-1}$] of threshold in Jianghuai region, dashed line is zero trend line. Black-filled, gray-filled, and white-filled triangles indicate significant stations at 0.01 (8), 0.05 (11), and 0.1 (9) significance levels of MK (Mann-Kendall) test, respectively, circles mean nonsignificant stations

上,只有位于安徽南部的黄山站负趋势[-0.39 mm (10 a)⁻¹]比较明显。虽然趋势不大,但通过 MK 检验的站点不少,通过 0.1 的显著性检验有 28 个站。 表明近五十年来,平均降水量随时间是增加的,与 田红等(2005)得出的江淮地区夏季降水为上升趋势的结论相一致。

3.1.2 独立样本的选取

由于江淮地区极端降水可能是连续出现的,因



图 4 (a) 江淮地区极值指数 θ (等值线) 和分串前后样本数之差(阴影)的空间分布; (b) 分串后的独立样本数的空间分布 Fig. 4 (a) Spatial distribution of extremal index θ (contour) and differences between the sample numbers before and after declustering (shaded) in the Jianghuai region; (b) spatial distribution of the numbers of independent samples after declustering

此需要采用分串技术来进行独立样本的选取。Ferro and Segers (2003)提出的自动分串技术只需要用极 值指数 θ 来划分独立的串。极值指数的取值范围为 [0,1], θ =1表示极端降水事件之间是近似独立的, 而 $\theta \rightarrow 0$ 则表示独立性减弱,极端降水事件是成串 出现的。

由式(2)和式(3)计算的江淮地区的极值指数分布用图 4a 等值线表示,分串前后的样本数之 差用图 4a 阴影表示。总的来说,江淮地区中东部 极值指数较小,说明此处多存在连续性暴雨,相反, 在江淮地区西部,极值指数较大,接近于 1,说明 这里极端降水事件之间是近似独立的。如果在一个 独立的串内有两个或两个以上的极端降水事件时, 我们选取该串内最大的日降水量作为样本,这样就 产生了新的极端降水样本序列。从图中可以看出, 分串前后样本数之差和极值指数有很好的对应关 系,样本数之差最大的地方位于皖赣浙交界处,这 个地方的极值指数也是最小的;极值指数接近于 1 的江淮地区西部,分串前后样本数变化不明显。

图 4b 为江淮地区分串之后的新的极端降水样 本数,在中南部样本数较多,而在北部样本数较少, 说明在江淮地区南方极端降水要多于北方。结合平 均阈值的分布图来看,在江淮流域西部,阈值的大 小与样本数呈反比,例如在湖北东部阈值较大,而 样本数较小;最西边阈值很小,样本数反而很多; 但是在江淮流域的中东部,阈值的大小与样本数呈 正比,例如皖赣浙交界阈值较大,样本数也较多; 而在北部阈值较小,样本数也较小。



图 5 尺度参数 σ_0 (等值线) 和随时间变化的趋势 σ_i (阴影)的空间 分布。红色和蓝色分别表示趋势为正和趋势为负,向上和向下的三角 形分别表示趋势为正和趋势为负,填充色为黑色、灰色和白色的三角 形分别表示该站点通过 0.01 (18 正 7 负)、0.05 (4 正 1 负)和 0.1 (5 正 1 负)的 MK 检验,剩下的无填充色的圆圈表示没有通过检验 Fig. 5 Spatial distributions of σ_0 (contour) and trends σ_1 (shaded). Red and blue mean positive and negative trends, up- and down-pointing triangles mean positive and negative trends, black-filled, gray-filled, and white-filled triangles indicate significant stations at 0.01 (18+, 7–), 0.05 (4+, 1–), and 0.1 (5+, 1–) significance levels of MK test, respectively, circles mean nonsignificant stations

3.2 GPD 模型参数的估计及其变化特征

对经过分串的独立极端降水样本序列进行 GPD 拟合得到模型的尺度参数及其趋势的空间分 布(图 5)。由图 5 可见,江淮地区南部平均尺度参 数 σ_0 较大,中心位于幕阜山、庐山、黄山处,出现 降水极大值的概率大,与这些区域的地形作用有 关;而在江淮地区西北部、东南部以及淮河以北 σ_0 较小,出现降水极大值的概率较小,这与江志红等



图 6 江淮地区重现期为(a)2年和(b)20年的极端降水重现水平(单位: mm d⁻¹)的空间分布 Fig. 6 Spatial distribution of expected extreme rainfall return level (mm d⁻¹) in the (a) 2-a and (b) 20-a return periods in the Jianghuai region

(2009)利用 GPD 拟合中国东部日极端降水的尺 度参数分布相近。与图3的平均阈值相比,二者皆 是中南部较大,西北和东南较小,但由于尺度参数 反映降水极大值出现的概率,而极端降水对地形的 依赖性较大,因此分布较阈值来说空间差异性较 大。从图 5 的阴影可以看出,与阈值的几乎整个地 区都增加的趋势分布不同,尺度参数的趋势存在局 地性,但大部分地区趋势还是增加的,总的来看, 江淮地区中北部趋势为正,西部和南部趋势为负。 具体来看,河南东部 σ_1 最大,表明此处的趋势增加 最明显;此外,河南、安徽、浙江及江苏大部分地 区趋势均为正,也就是降水极大值的发生概率是增 加的。江淮地区西北、西南部、江西北部和长江三 角洲 σ_1 为负,这些地方降水极大值的发生概率是减 小的。整个江淮地区共有 36 个站点通过了 0.1 的 MK 检验, 27 正 9 负, 也就是降水极大值的发生概 率随时间变化的趋势比较明显。与平均降水量的趋 势相比,通过检验的站点更多,趋势更明显。

4 江淮地区极端降水发生概率的空间分布

图 6a 和 6b 分别为江淮地区重现期为 2 年和 20 年的极端降水重现水平。两图分布相似,从图中可 以看出,极端降水重现水平最大的地方位于皖赣鄂 的交界处, 2 年和 20 年重现期的重现水平分别达到 了 120 mm d⁻¹和 220 mm d⁻¹以上,这里的平均阈值 和尺度参数 σ_0 都较大,说明平均降水量较多,也易 发生极值较大的极端降水事件,因此容易发生极端 降水。而江淮地区西北部和东南部重现水平较小,



85

图 7 江淮地区极端降水重现水平为 120 mm d⁻¹ 的重现期(单位: a) 的空间分布



这两个区域的平均阈值和尺度参数 σ_0 都较小,不易发生极端降水。

图 7 为极端降水重现水平为 120 mm d⁻¹时江淮 地区重现期的空间分布。与图 6a 的极端降水重现 水平对应,在重现水平为 120 mm d⁻¹的皖赣鄂交界 处,重现期为 2 年。西北和东南重现期最长,西北 部有些地方甚至百年难得一遇,对应图 6 的重现水 平最小,不易发生极端降水;中南部及大别山西南 坡重现期较短,重现期不超过 4 年,对应图 6 的重 现水平较大,较易发生极端降水;安徽中部与周围 相比,重现期较长,对应图 6 的重现水平相对于周 围较小,而这里的平均阈值也相对较小,因此不易 发生极端降水。

图 8a 和图 8b 分别为 2 年重现期和 20 年重现 期内至少发生一次极端降水重现水平为 120 mm d⁻¹ 的概率空间分布。图 8a 中,皖赣鄂交界处 2 年内 至少发生一次降水量为 120 mm d⁻¹ 的概率在 0.8 以 上,安徽中部、江淮西北部和东南部概率则在 0.2 以下。江淮地区中南部 20 年内至少发生一次日降 水量为 120 mm 的概率在 0.9~1,表示 20 年的时间 内,该区域必定会发生日降水量大于 120 mm 的降 水,江淮西北部和东南部至少出现一次 120 mm d⁻¹ 的概率在 0.7 以下。

5 江淮地区极端降水发生概率的变 化特征

由以上分析研究表明,江淮地区中南部和大别 山西南坡极端降水发生概率较大,结合形成暴雨的 物理条件、地形特征及位置分析,超低空有西南气 流带来的暖湿气流,大别山的西南坡为迎风坡,其 动力抬升作用促使对流运动发生或加强,使该区域 成为极端降水发生概率较大的地区。皖赣鄂交界 处,北为大别山,西为幕阜山,东为黄山,对于偏 南气流水汽输送,形成一个中尺度水汽辐合区,有 利于大暴雨的形成,该区极端降水发生的概率最 大。在江淮东南部偏南气流的水汽输送方向与山脉 走向交角小,地形差异较小,对水汽的抬升作用也 较小,极端降水发生概率也较小;相对其他区域, 江淮地区西北部的水汽来源较小,因此极端降水发 生概率较小。安徽中部,无论夏季盛行西南风还是 东南风,都处于背风坡,使该区域成为江淮极端降 水发生概率最小的地区之一。那么极端降水的变化 是否也与江淮地区的地形分布有关?我们将对此 做一探讨。

从式(13)可以得出,极端降水重现水平的趋势由阈值的趋势b和尺度参数的趋势 σ_1 共同决定。 图 9a 和 9b 分别表示 2 年重现期和 20 年重现期极端降水重现水平的趋势分布,二者都与 σ_1 的分布相似,说明江淮地区极端降水重现水平的趋势主要是由尺度参数的时间变化项 σ_1 决定,同时也证实了 Katz and Browns(1992)提出的原始分布的方差变







图 9 江淮地区 (a) 2 年重现期和 (b) 20 年重现期内极端降水重现水平变化趋势的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of return level trends in the (a) 2-a and (b) 20-a return periods in the Jianghuai region

化对于极值频率的影响比平均值的影响还要大。江 淮大部分地区极端降水重现水平的变化趋势为正,最 大值位于大别山附近及河南东部,这些地区极端 降水的增加趋势最明显,2 年和 20 年重现期的重 现水平趋势增加分别达到了 6 mm (10 a)⁻¹ 和 20 $mm(10a)^{-1}$ 以上;西北、西南、江西北部和长江三 角洲趋势为负,这些地区的极端降水随时间是减 少的,其中西北部的负趋势最明显,分别达到了 -12 mm (10 a)⁻¹和-20 mm (10 a)⁻¹。对比两图发 现,随着重现期的增大,各站的重现水平趋势的绝 对值增加。比较图 6~9,大别山西南坡是极端降水 发生概率较大的地方,极端降水趋势是增加的;江 淮西北部发生概率较小,极端降水趋势有明显的减 少; 江淮东南部和安徽中部的发生概率较小, 但趋 势是增加的。说明极端降水的变化趋势与其发生概 率大小的关系在江淮地区的不同区域表现出不一 样的特征,与地形的关系复杂。

6 结论与讨论

利用 1961~2011 年江淮地区 5~9 月无缺测的 71 站逐日降水资料,定义了随时间变化的极端降水 阈值,做基于 POT 的广义 Pareto 分布 (GPD),并 采用自动分串技术来确保样本的独立性,借助 L 矩 估计法,估算随时间变化的 GPD 尺度参数,研究 江淮地区极端降水的发生概率和变化趋势。结果表 明:

(1) 阈值的分布与中位数的分布相似,皖赣交 界阈值较大,说明此处的平均降水量较大,大别山 的迎风坡也存在一个大值区,与地形的动力强迫作 用有关;阈值较小的地方位于江淮西北部和东南 部,这些地方的平均降水量较小。在江淮大部分地 区阈值的趋势为正,湖北东部和江西北部的站点趋 势都达到 0.8 mm (10 a)⁻¹以上,且均通过了 0.01 的 MK 检验,只有位于安徽南部的黄山站负趋势 [-0.39 mm (10 a)⁻¹]比较明显。

(2)由于江淮地区极端降水可能是连续出现 的,因此需要采用分串技术来进行独立样本的选 取。江淮地区中东部极值指数较小,说明此处多存 在连续性暴雨;相反,在江淮地区西部,极值指数 较大,接近于1,说明这里极端降水事件之间是近 似独立的。分串之后的样本数在中南部较多,而在 北部较少,表明在江淮地区南方极端降水要多于北 方。

(3) 江淮地区南部的尺度参数σ₀较大,大值中 心位于幕阜山、庐山、黄山处,这些山地的坡度较 大,使对流易发生,因此出现降水极大值的概率大; 在江淮地区西北部、东南部以及淮河以北σ₀较小, 出现降水极大值的概率较小。尺度参数的趋势存在 局地性,但大部分地区趋势是增加的,西北、西南 部、江西北部和长江三角洲σ₁为负,这些地方降水 极大值的发生概率是减小的。

(4)皖赣鄂的交界处,2 年和 20 年重现期的 重现水平都较大(分别达到了 120 mm d⁻¹和 220 mm d⁻¹以上),发生 120 mm d⁻¹降水的重现期较短 (2年以下),固定重现期内至少发生一次120 mm d⁻¹ 的概率较大(分别达到了 0.8 和 0.9 以上),说明这 里发生极端降水的概率较大;而在江淮地区西北 部、东南部及安徽中部则相反,这些地方不易发生 极端降水。极端降水事件发生概率的大小与阈值和 尺度参数有很好的对应关系,平均降水量较多、发 生极大值概率较大的地方,容易发生极端降水。

(5) 江淮地区极端降水重现水平的趋势主要由 尺度参数的时间变化项 σ_1 决定,大部分地区极端降 水重现水平的趋势为正,最大值位于大别山附近及 河南东部,这些地区极端降水的增加趋势最明显, 2年和20年重现期的重现水平增加趋势分别达到了 6 mm (10 a)⁻¹和 20 mm (10 a)⁻¹以上;西北、西南、 江西北部和长江三角洲趋势为负,这些地区的极端 降水随时间是减少的,其中西北部的负趋势最明 显,重现水平趋势分别达到了-12 mm (10 a)⁻¹和 -20 mm (10 a)⁻¹。江淮地区极端降水发生概率的大 小与地形有关,而极端降水的变化趋势则与地形关 系复杂。

参考文献(References)

- 蔡敏, 丁裕国, 江志红. 2007. 我国东部极端降水时空分布及其概率特征 [J]. 高原气象, 26 (2): 309–318. Cai Min, Ding Yuguo, Jiang Zhihong. 2007. Extreme precipitation experimentation over eastern China based on L-moment estimation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (2): 309–318.
- 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 Bingyan, Ding Yuguo, Zhang Jinling, et al. 2008. Application of generalized Pareto distribution to the research of extreme rainfall of Chongqing[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (5): 1004–1009.

Coles S G, Walshaw D. 1994. Directional modeling of extreme wind speeds

[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 43 (1): 139-157.

- Coles S G. 2003. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values [M]. Berlin: Springer-Verlag, 208pp.
- 邓兰松, 郑丕锷. 2004. 平稳收益率序列的极值 VaR 研究 [J]. 数量经济 技术经济研究, (9): 52-57. Deng Lansong, Zheng Pi'e. 2004. Studies of Value-at-Risk in the stationary return sequence based on extreme value theory [J]. Quantitative & Technical Economics (in Chinese), (9): 52-57.
- 丁裕国, 郑春雨, 申红艳. 2008. 极端气候变化的研究进展 [J]. 沙漠与 绿洲气象, 2 (6): 1–5. Ding Yuguo, Zheng Chunyu, Shen Hongyan. 2008. The research advance for extreme climate and its change [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 2 (6): 1–5.
- Ferro C A T, Segers J. 2003. Inference for clusters of extreme values[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 65 (2): 545–556.
- Francisco J A, Jose A G, Maria C G. 2011. Peaks-over-threshold study of trends in extreme rainfall over the Iberian peninsula[J]. J. Climate, 24 (4): 1089–1105.
- Hsing T. 1987. On the characterization of certain point processes [J]. Stochastic Processes and Their Applications, 26: 297–316.
- Hosking J R M. 1990. L-moments-analysis and estimation of distributions using linear combinations of order-statistics [J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series B. Methodological, 52 (1): 105–124.
- Hosking J R M, Wallis J R. 1997. Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-moments [M]. New York: Cambridge University Press, 244pp.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY USA, 2007, 996pp.
- 江志红, 丁裕国, 陈威霖. 2007. 21世纪中国极端降水事件预估[J]. 气候 变化研究进展, 3 (4): 202–207. Jiang Zhihong, Ding Yuguo, Chen Weilin. 2007. Projection of precipitation extremes for the 21st century over China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (4): 202–207.
- 江志红, 丁裕国, 朱莲芳, 等. 2009. 利用广义帕雷托分布拟合中国东部日极端降水的试验 [J]. 高原气象, 28 (3): 573–580. Jiang Zhihong, Ding

Yuguo, Zhu Lianfang, et al. 2009. Extreme precipitation experimentation over eastern China based on generalized Pareto distribution [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (3): 573–580.

- Katz R W, Browns B G. 1992. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages[J]. Climatic Change, 21 (3): 289–302.
- Leadbetter M R, Weissman I, De Haan L, et al. 1989. On clustering of high values in statistically stationary series [R]. Centre for Stochastic Processes. Department of Statistics, University of North Carolina at Chapel Hill, Tech. Rep, 253.
- Pickands III J. 1975. Statistical inference using extreme order statistics [J]. The Annals of Statistics, 3 (1): 119–131.
- 田红, 李春, 张士洋. 2005. 近 50 年我国江淮流域气候变化 [J]. 中国海 洋大学学报, 35 (4): 539–544. Tian Hong, Li Chun, Zhang Shiyang. 2005. The climate change in the Yangtze–Huaihe River valley over the past 50 years [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 35 (4): 539–544.
- 万仕全. 2010. 中国降水与温度极值的时空分布规律模拟 [D]. 兰州大 学博士学位论文, 1–154. Wan Shiquan. 2010. The temporal and spatial distribution regularities simulation of precipitation and temperature extremes in China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 1–154.
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特 征 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 75–83. Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 75–83.
- 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究 [J]. 气候变化研究进展, 3 (3): 144–148. Zhai Panmao, Wang Cuicui, Li Wei. 2007.
 A review on study of change in precipitation extremes [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (3): 144–148.
- 赵旭. 2012. 广义 Pareto 分布的统计推断 [D]. 北京工业大学理学博士学 位论文, 1–122. Zhao Xu. 2012. Statistic inference of generalized Pareto distribution [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Beijing University of Technology, 1–122.