

# 淮河流域极端降水概率分布模型及其应用

陆苗<sup>1,3</sup>, 高超<sup>1,2</sup>, 姚梦婷<sup>1,3</sup>, 苏布达<sup>4</sup>, 徐光来<sup>1</sup>

(1. 安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241000;

2. 安徽师范大学 江淮流域气候变化与水資源研究中心, 安徽 芜湖 241000;

3. 安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室, 安徽 芜湖 241000; 4. 中国气象局 国家气候中心, 北京 100081)

**摘要:** [目的] 研究淮河流域极端降水最优概率分布模型, 旨在为洪水计算规范修改和调整提供参考。[方法] 基于淮河流域 110 个气象站点 1959—2008 年的日降水资料, 通过年最大值法(AM)及超门限峰法(POT)分别建立极端降水 AM 及 POT 序列, 比较两者捕捉极端降水的适用性, 建立淮河流域极端降水最优概率分布模型, 并对其应用进行探讨。[结果] (1) 在研究流域极端降水空间分布上, POT 序列适用性更强, 能较好捕捉降水极值。在研究极端降水时间变化上, AM 序列更合理; (2) 经 K-S 法检验, Wakeby 函数是 AM 及 POT 序列的最优概率分布模型, 优于水利工程标准曲线 Pearson III 函数, 且 Wakeby 函数的中部拟合效果比尾部更优。[结论] 最优概率分布模型在气候变化的研究中得到较好地应用, 近 25 a 来淮河流域极端降水强度呈增长趋势, 且频率增大, 需加强对该流域极端降水灾害的防治减灾工作。

**关键词:** 极端降水; Wakeby 函数; 超门限峰法; 概率分布模型; 重现期; 淮河流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)02-0197-07

中图分类号: P468

**文献参数:** 陆苗, 高超, 姚梦婷, 等. 淮河流域极端降水概率分布模型及其应用[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2):197-203. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.038

## Probability Distribution Model and its Application on Extreme Precipitation in Huaihe River Basin

LU Miao<sup>1,3</sup>, GAO Chao<sup>1,2</sup>, YAO Mengting<sup>1,3</sup>, SU Buda<sup>4</sup>, XU Guanglai<sup>1</sup>

(1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China; 2. Climate Change and Water Resource Center of Jianghuai Basin, Anhui Normal University,

Wuhu, Anhui 241000, China; 3. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu, Anhui 241000, China; 4. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** [Objective] Studying the optimal probability distribution model of extreme precipitation in order to provide basis for the standard modification of flood calculation method. [Methods] Based on the daily precipitation data from 110 meteorological stations during 1959—2008 in the Huaihe River basin, annual maximum series(AM) and peak over threshold series(POT) were established to compare the applicability of them. The optimal probability distribution models of extreme precipitation for AM and POT were established and the applications were discussed. [Results] In the study of spatial distribution of extreme precipitation, POT was proved to be more reasonable than AM. In dealing with temporal sequence, AM was more reasonable. Checked by K-S method, Wakeby was the optimal function for the two kinds of series. The estimation accuracy of Wakeby was higher than the performance of Pearson III, which is regarded as the standard frequency curve in the water conservancy project; especially, the middle part of Wakeby fitted better than its tail did. [Conclusion] The probability distribution model can get a better application in the climate change. The extreme precipitation showed an increasing trend during 1984—2008 and the frequency is increasing. The

收稿日期: 2015-01-08

修回日期: 2015-03-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“不同空间尺度农业旱涝灾害气象因子致灾阈值的确定: 以淮河上游地区为例”(41571018); 教育部高校博士学科点专项科研基金项目(20113424120002; 20123424110001); 淮河流域气象开放研究基金项目(HRM201303)

第一作者: 陆苗(1990—), 女(汉族), 安徽省蚌埠市人, 硕士研究生, 研究方向为气象灾害与气候变化。E-mail: giser\_lm@163.com。

通信作者: 高超(1978—), 男(汉族), 安徽省全椒县人, 博士, 教授, 主要从事气候变化与水文水资源方面的研究。E-mail: gaoqinchaol@163.com。

government needs to take some measures to deal with extreme precipitation disasters.

**Keywords:** extreme precipitation; Wakeby function; peak over threshold; probability distribution model; return period; Huaihe River basin

在气候变化背景下,极端降水事件发生频率及强度不断增大,由此引发的洪涝灾害也日益严重<sup>[1-2]</sup>。为此,国内外学者对降水事件的研究逐渐从平均态转为极端态<sup>[3-4]</sup>。极端降水发生频率与概率统计学密切相关,特别是概率分布模型。通过建立区域最优概率分布模型来描述极端降水发生规律,已成为研究极端降水的重要内容。极端分布模型可分为单变量、双变量及多变量模型<sup>[5]</sup>。单变量模型是指不同参数(如形状参数、尺度参数及位置参数)的概率分布函数,双变量及多变量模型是在单变量函数的基础上建立多元联合分布,常用的工具有 Copula 函数<sup>[6-7]</sup>。概率分布模型中主要组成部分是概率分布函数,最优概率分布函数的建立在多变量模型中也尤为重要,因此本文着重研究单变量模型,即概率分布函数。另外,从数理统计角度建立概率分布函数来研究极端事件的变化特征,在一定程度上可弥补物理、动力学方法的不足<sup>[8]</sup>,但是,该方法的应用仍存在自身不可避免的不确定性<sup>[9]</sup>,为减小这种不确定性,不断提高最优概率分布模型的拟合精度,需探究更多拟合效果最好的概率分布函数。

概率分布模型已被广泛用于降水<sup>[10]</sup>、径流<sup>[11]</sup>、干旱<sup>[12]</sup>等极端水文气象事件研究中,多集中在预估不同重现期下降水极值<sup>[13]</sup>、计算不同等级降水量出现的水文重现期<sup>[14]</sup>及探究极端降水的概率特征<sup>[15]</sup>等。概率分布模型是研究极端事件的重要手段,是地理学与统计学的结合,但目前对概率分布函数新的应用探究较少。本研究拟利用 33 种概率分布函数(其中包括 10 种多参数概率分布函数),建立淮河流域极端降水最优概率分布模型,在此基础上,将其与水利工程标准 Pearson III 函数进行对比,以便供今后洪水计算规范修改和调整参考。

## 1 研究区概况

淮河流域位于 112—121°E, 31—36°N,流域面积约  $2.70 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。淮河流域气候属暖温带半湿润季风气候,天气气候复杂,降水在空间上分布不均,主要集中在流域东西两端。该区年内降水多集中在 6—8 月,年际间降水变化大,旱涝急转,洪涝灾害频发。1949 年至今,淮河流域已发生洪涝灾害 10 次余,最高日降水量达 750 mm,给社会经济发展带来严重的破坏<sup>[16]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

降水资料主要来自中国气象局国家气象信息中心提供的淮河流域 176 个气象站点数据,因部分气象站点降水资料存在缺失或年限较短,故从中挑选出 110 个降水资料较完整的气象站点资料。所用降水资料为日尺度数据,单位为 mm/d,时间跨度为 1959 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日。

2.1.1 基本定义 定义极端降水的方法有两种,一是定义年日降水量最高值为极端降水,二是定义 1959—2008 年所有日降水数据的最高前 50 个数据为极端降水。定义极端降水在数值上的大小为极端降水的强度;定义极端降水每年发生的频次为极端降水在时间上的频率;定义拟合极端降水序列的概率分布函数,为极端降水在数值上的频率特征;定义拟合极端降水的最佳概率分布函数为最佳概率分布模型。

2.1.2 极端降水序列 在建立极端降水的概率分布模型前,需要建立极端降水序列,常用的方法有绝对值法、百分位法或阈值法等。极端降水序列是基于年最大值<sup>[17]</sup>(annual maximum, AM)和超门限峰值<sup>[18]</sup>(peak over threshold, POT)两种抽样方法所得。AM 序列是选取流域内各站 1959—2008 年每年的最大日降水值作为极端降水值。POT 序列是将 50 a 的日降水数据从大到小排列,以每年一次的频率,选取前 50 位日降水量作为极端降水值。为降低数据本身对建立最佳概率分布模型的误差,首先对两种序列的捕捉降水极端值的适用性进行探讨。对比 AM 及 POT 序列的统计特征(表 1),发现在样本量相同的情况下,POT 序列的全距及标准差比 AM 序列低,说明 POT 序列内数据更稳定,变动范围较小。偏度及峰度是能较好刻画数据特征的统计量。偏度为正说明数据右偏,且正偏度越大,数据分布右偏程度更大。峰度描述数据分布形态陡缓程度,其值越大表明数据分布形态越陡峭,在众数周围分布较集中。POT 序列的偏度及峰度值比 AM 序列大,表明 POT 序列的分布形态较符合极端降水的分布形态,能更好地反映降水的极端态。另外,POT 序列的总和及均值比 AM 序列高,捕捉降水极端值的能力更强。综上,POT 序列对捕捉一段时间内的极端降水值适用性更强,而 AM 序列对捕捉在一定时间序列上的极端降水值适用性更强。

表 1 代表性站点 AM 及 POT 序列统计特征

项目	N 统计量	全距 统计量	极小值 统计量	极大值 统计量	和 统计量	均值 统计量	标准差 统计量	偏度		峰度	
								统计量	标准误	统计量	标准误
AM 驻马店	50	390.9	29.5	420.4	5 323.0	106.460	61.437 54	3.072	0.337	13.734	0.662
POT 驻马店	50	331.3	89.1	420.4	6 451.1	129.022	56.637 96	3.532	0.337	14.959	0.662
AM 连云港	50	213.8	50.6	264.4	5 412.7	108.254	39.496 19	1.425	0.337	3.879	0.662
POT 连云港	50	170.4	94.0	264.4	5 986.9	119.738	30.291 78	2.789	0.337	10.209	0.662
AM 宿县	50	174.0	47.6	221.6	4 847.7	96.954	42.036 91	1.515	0.337	2.252	0.662
POT 宿县	50	141.4	80.2	221.6	5 562.8	111.256	34.624 27	1.894	0.337	3.654	0.662

## 2.2 研究方法

2.2.1 概率分布模型 在气象概率统计中,常用概率分布函数对气候要素的极值进行拟合,建立最优概率分布模型。目前,在气象研究中应用最多的是参数较少的概率分布模型,如两参数的 Gamma 分布<sup>[19]</sup>或者三参数的 GEV 分布<sup>[20]</sup>及 Weibull 分布<sup>[21]</sup>等。通常概率分布模型的参数越多,其表达就越灵活,从而能较好地描述数据的变化<sup>[19]</sup>。并且,不同地区的水文气象条件差异大,若采用单一的概率分布模型描述不同地区的极端水文气象事件,会对一些不适宜该概率分布模型的地区产生影响,降低研究的可靠性。为提高建立最优概率分布模型的精度,探索能较好拟合淮河流域极端降水的概率分布模型,选择 2 种单参数概率分布函数、8 种双参数概率分布函数、13 种三参数概率分布函数及 10 种多参数概率分布函数进行数据拟合,且通过最大似然法对模型最优参数进行估计。引用多参数概率分布函数,可为探索能较好拟合淮河流域极端降水序列的最优模型提供有力支持。

2.2.2 Kolmogorov-Smirnov 优度检验 描述两个独立统计样本的相似性,检验函数拟合效果的方法有 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验法, Anderson-Darling (A-D) 检验法, Chi-Squared (C-S) 检验法等。A-D 检验是一种最小距离估计方式,也是估计偏离正态性最有效的统计量之一。对于样本量不大于 25 的数据很有效,大样本可能被拒绝正态性<sup>[22]</sup>。而 C-S 检验法受样本容量影响较大,且样本会被划分为离散数据<sup>[23]</sup>。在适用函数范围上, A-D 检验法只适合一些特定的函数,如 Normal, Weibull, Lognormal 等函数。K-S 检验法适用于任何连续分布,具有分布无关性的优点,故选择 K-S 检验法作为检验拟合优度的标准<sup>[24]</sup>。当样本容量  $n=50$ , 显著水平  $\alpha=0.05$  时, K-S 临界检验值为 0.192 33。当检验统计量  $D$  值小于 K-S 检验临界值时,则认为理论分布函数与样本分布函数拟合效果较好,且  $D$  值越小,拟合效果越好。

2.2.3 重现期 极端降水的重现期,表示在一段时间内极端降水事件发生的平均周期,即平均多少年发生一次。若某次极端降水的极大值为  $X$ , 降水量大于或等于  $X$  的极端降水事件平均每  $T$  年出现一次,则  $X$

就称为  $T$  年一遇的降水极大值,其重现期就是  $T$  年<sup>[25]</sup>。推估不同重现期下的极端降水量,有助于淮河流域洪涝灾害预警,为建设防洪工程提供理论依据。

## 3 结果与分析

### 3.1 观测降水极值的概率分布

为研究拟合淮河流域极端降水的最佳概率分布模型,运用不同参数的 33 种概率分布函数对极端降水 AM 及 POT 序列进行拟合,通过 K-S 法检验函数拟合优度,采用最大似然法估计最优参数。根据通过 K-S 显著性检验(检验统计量  $D_n < 0.192 33$ )的站点数,发现能较好拟合 95% 以上站点的 AM 序列的有 17 种分布函数,能较好拟合 95% 以上站点的 POT 序列的分布函数有 13 种,有 11 种分布函数能同时较好拟合 95% 以上站点的 AM 及 POT 序列的函数。另外,若有分布函数的  $D_n$  值没有通过 95% 的置信度检验( $D_n > 0.192 33$ ),可认为不适合拟合淮河流域极端降水序列,上述分布函数有 2 种,分别为 Error Function 及 Student's, 且只有一个参数。 $D_n$  值越小,说明函数拟合效果越好,本文判定适合淮河流域极端降水最优函数的标准是某函数为最优函数(排名第 1,  $D_n$  值最小)在所有站点中出现次数最多的函数。通过统计各站点的最佳函数出现的次数,可以发现 Wakeby 函数为最优函数的站点个数最多,同时 Wakeby 函数能拟合 93% 以上的站点,故 Wakeby 函数为 AM 及 POT 序列的最佳概率分布模型。

### 3.2 误差分析

基于 AM 及 POT 序列,利用 Wakeby 函数及各站点的最佳函数预估淮河流域 110 个站点 50 a 一遇的极端降水量,分别计算 Wakeby 函数、各站点的最佳函数推估各站点 50 a 一遇的极端降水值与 1959—2008 年极端降水最大值之间的相对误差,研究 Wakeby 函数的适用性。通过计算,约 80% 站点的相对误差集中在 0~0.2 之间,说明 Wakeby 函数对 AM 及 POT 序列的拟合效果都较好。对比 AM 及 POT 序列, POT 序列的相对误差多小于 AM 序列,

得出 Wakeby 函数拟合 POT 序列的效果略好,进一步体现 POT 序列捕捉极端值的能力。有分析结果可知,随着实际降水极值增大,相对误差也随之增大,表现了 Wakeby 函数的尾部模拟效果略差。由图 1 所示的空间分布图可以看出,各站点的最优函数与 Wakeby 函数下的极端降水预估分布图基本一致,进一步说明 Wakeby 函数能较好地拟合淮河流域内的降水分布。对比各站点最优函数与实际 50 a (1959—2008 年)极端降水分布图,误差主要集中在

河南省驻马店地区及山东省沛县一带,1975 年 8 月在河南省驻马店地区发生的一次特大暴雨,造成上蔡站日降水量达 775.1 mm/d,而预估的 100 年一遇的极端降水值只有 438.5 mm/d。由于预估极端值的统计理论本身所造成的不确定性,对极端降水的预估仍存在很大的不确定性,主要表现在时空预测及数量控制上的欠缺,即使是最优函数也不能保证能完全拟合降水序列。目前只能通过提高最优概率分布函数的准确性,以降低这种不确定性。

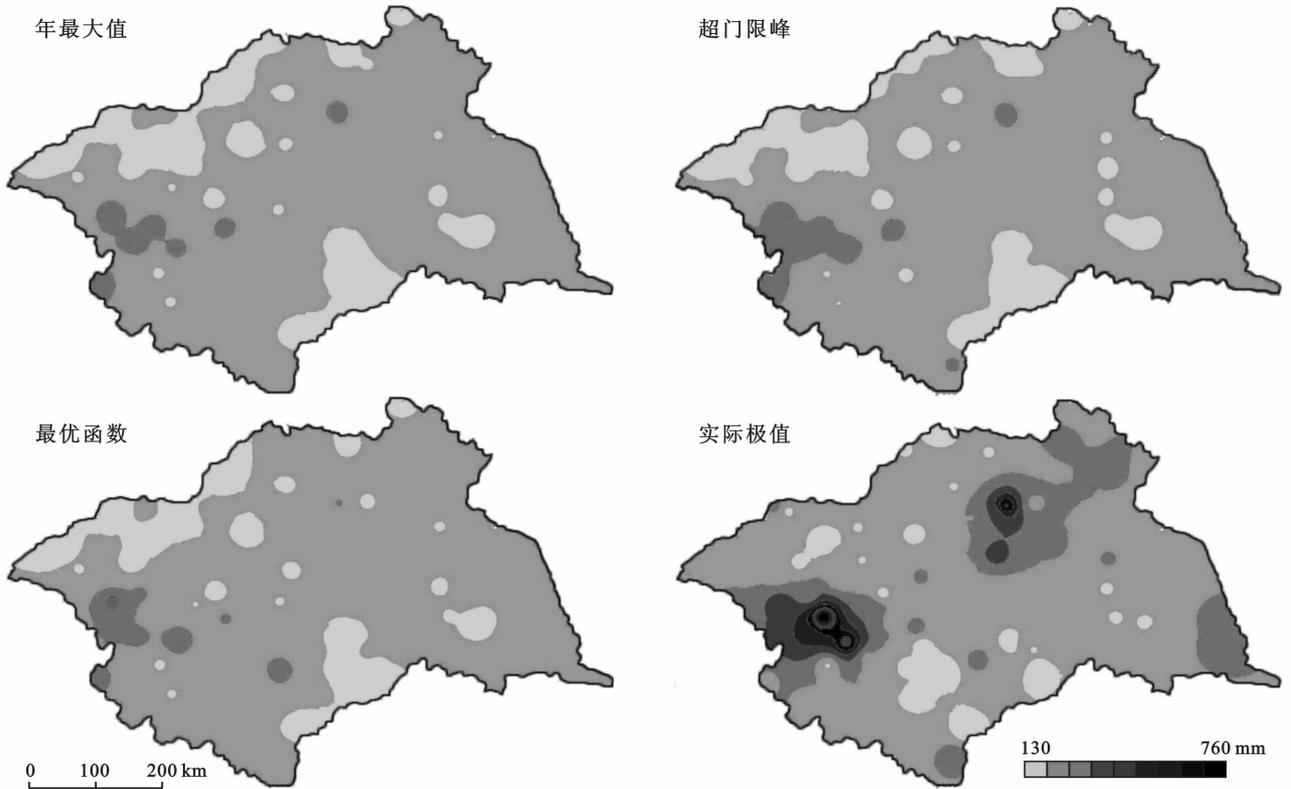


图 1 淮河流域 50 a 重现期下 Wakeby 函数、最优函数极端降水量的分布

### 3.3 对比分析

目前在水利工程建设中规定使用的水文频率曲线为 PearsonⅢ 函数<sup>[28]</sup>,为比较 PearsonⅢ 与 Wakeby 函数在淮河流域极端降水的适用性,利用两种函数分别对 AM 及 POT 序列进行拟合,推求 50 a 重现期下预估的极端降水值,并计算其与实际 50 a 降水极值的相对误差,以便供今后洪水计算规范修改和调整参考。由图 2 可见,两种函数预估的重现期降水空间分布基本一致,极端降水高值区分布在河南省驻马店—上蔡—桐柏一带,与实际 50 a 降水极值分布一致说明两种函数都能很好地预估极端降水的高值,这对防洪减灾具有实际意义。从数值上看,对于实际极值高的站点, PearsonⅢ 函数模拟的较高,是因为 Wakeby 函数的尾部拟合效果比 PearsonⅢ 函数差,但是 Wakeby 函数对较低的实际极值模拟效果比 Pearson

Ⅲ 函数好, PearsonⅢ 函数预估的值偏低。整体上看,两种函数的相对误差都控制在 0.2 左右,只有少数站点的相对误差较高,对比图 2—3,误差较高的站点都分布在 50 a 重现期降水的高值区(河南省上蔡、驻马店等地),高强度极端降水事件的发生存在很大的不确定性,对高强度极端降水的预估仍需进行进一步地探讨。统计淮河流域 110 个站点 50 a 重现期降水与实际 50 a 降水极值的相对误差,对于 Wakeby 函数,相对误差小于 0.2 的站点有 90 个(AM 序列)及 86 个(POT),对于 PearsonⅢ 函数,相对误差小于 0.2 的站点有 76 个(AM 序列)及 61 个(POT),因此 Wakeby 函数对淮河流域极端降水整体拟合效果较好,而 PearsonⅢ 函数对极端降水高值拟合效果较好。Wakeby 函数有 5 个参数,相较三参数的 PearsonⅢ 函数应用更灵活,可为今后淮河流域水利工程标准曲线的制定提供参考。

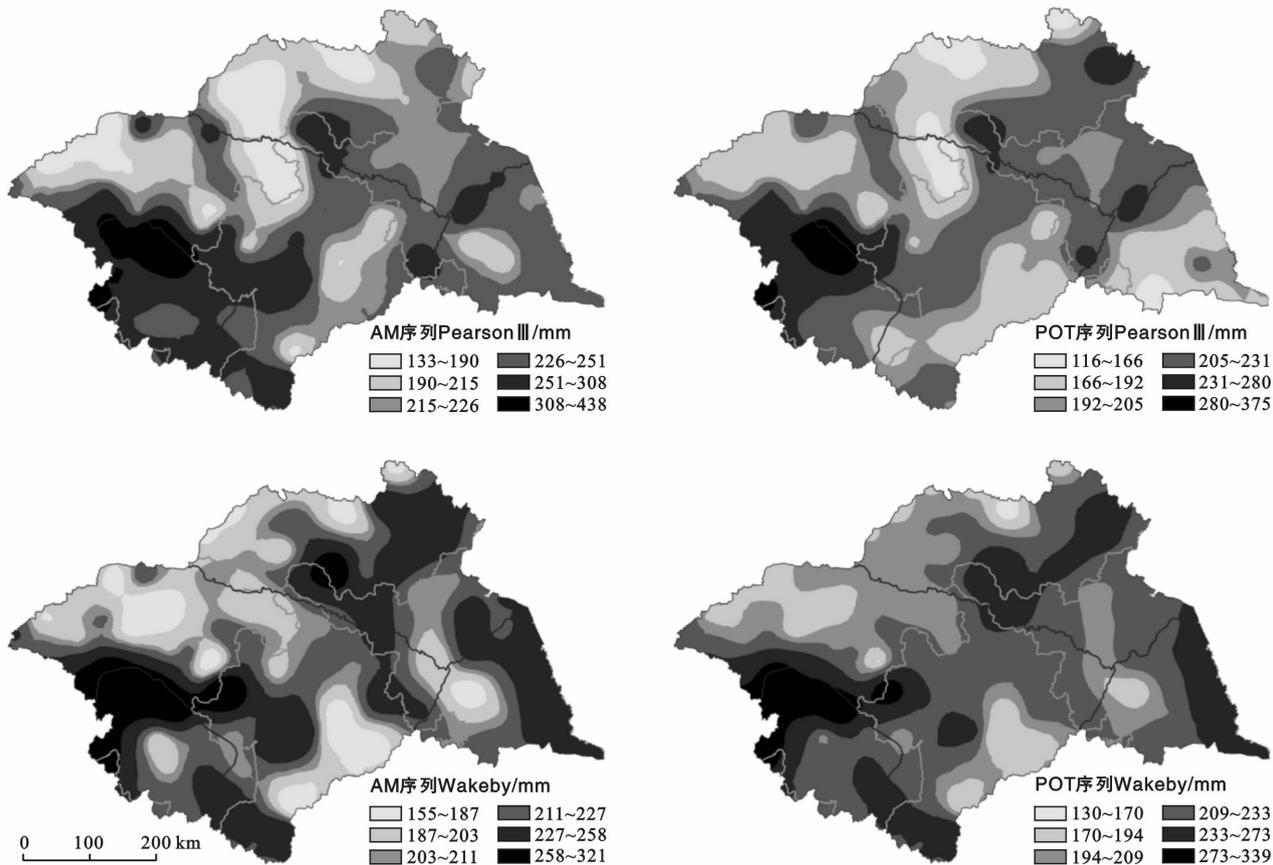


图 2 淮河流域 AM 及 POT 序列不同函数下 50 a 重现期的极端降水的空间分布

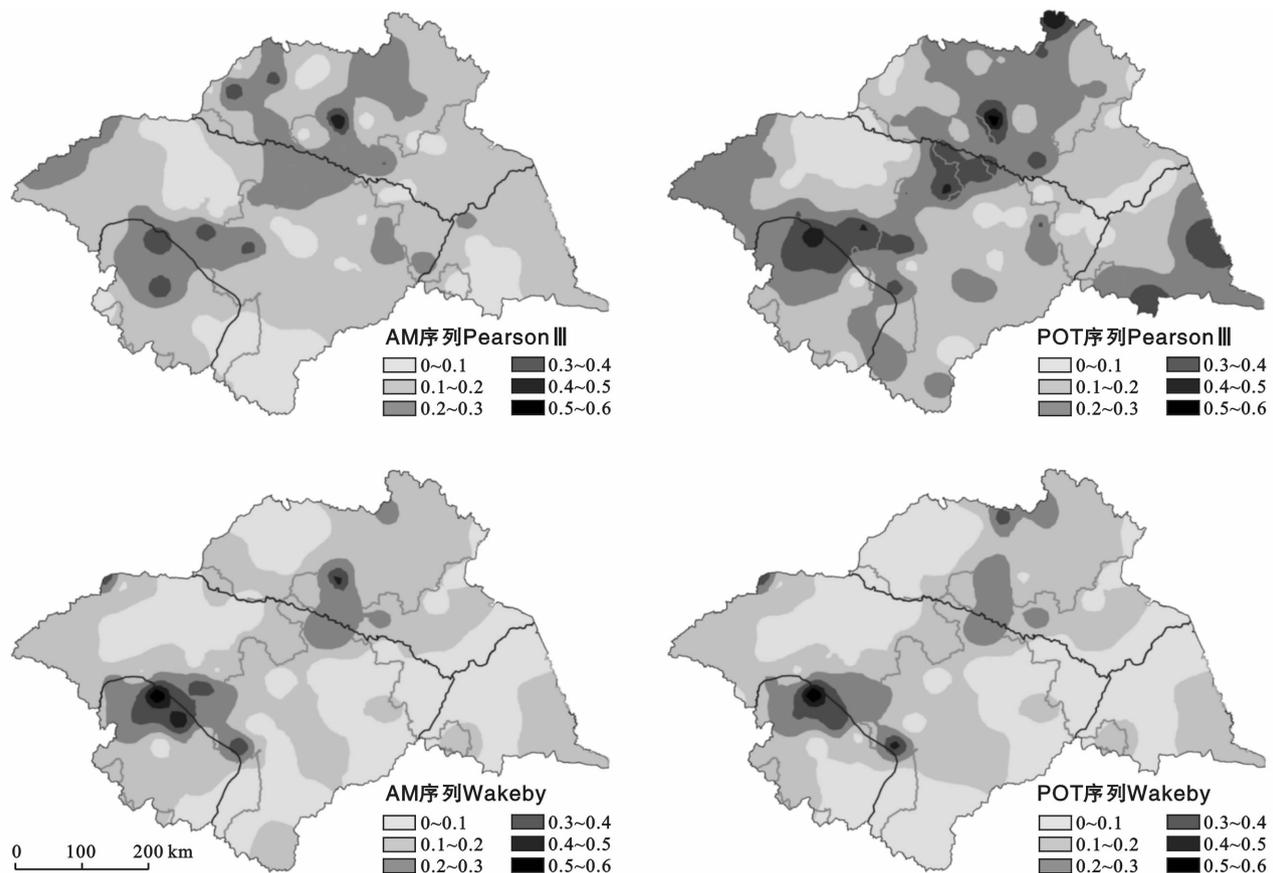


图 3 淮河流域基于不同函数估算的 50 a 重现期的极端降水的误差率

### 3.4 最优概率分布模型应用

概率分布模型在地理学中的应用多集中在地理要素重现期及重现期水平的推算,本研究根据概率分布模型的参数特征及分布曲线,将其应用扩展到气候变化中,以期扩大大概率分布模型的应用。极端降水的概率分布模型的函数曲线可以描述极端值在时间上的变化,利用泰森多边形法分别建立淮河流域 1959—1983 年与 1984—2008 年极端面雨量序列(图 4),探究极端降水在时间上的变化,进而分析淮河流域气候变化。利用淮河流域最优概率分布模型分别对两个时间段的极端面雨量序列进行拟合,检验其拟合度,结果均通过 K-S 检验 95% 置信度,表明 Wakeby 函数能较好拟合极端面雨量序列。

分析发现,流域极端面雨量在 1959—1983 年(前 25 a)的频率特征与 1984—2008 年(近 25 a)相比具有明显差异。1959—1983 年, Wakeby 函数曲线较陡峭,极端降水量集中在 95 mm/d 左右。1984—2008 年, Wakeby 函数曲线较平缓,这一时期极端降水量集中在 98 mm/d 左右,且 102 mm/d 以上极端降水发生频率增多(图 5)。近 25 a 极端面雨量的分布曲线与前 25 a 相比向右偏移,峰度下降,因而极端面雨量的众数也向右偏移,表明在近 25 a(1984—2008

年)里,淮河流域整体极端降水量强度在增大,且面极端雨量增加的可能性增大,即流域极端降水发生的机率增大。同时,对 POT 序列中极端降水发生的年份进行频率统计(图 5),发现近 25 a(1984—2008 年)出现极端降水事件的频率比前 25 a 高。1984—2008 年,淮河流域发生极端降水频率增高,强度增大,极端降水呈增长趋势,需要加强对流域极端降水灾害的防治减灾工作。

利用 Mann-Kendall(M-K)趋势检验方法,对 110 个站点 AM 序列进行趋势分析,以验证上述结论的正确性。

M-K 值为正,序列具有上升或增加趋势;M-K 值为负,序列具有下降或减少的趋势<sup>[29]</sup>。结果表明约 70% 的站点 M-K 检验值大于 0,则相应站点极端降水值呈上升趋势,分布在流域中部,主要以安徽省及河南省为主(图 4),其他站点极端降水值呈下降趋势,分布在流域边界附近。其中,河南省驻马店一带的太康、淮阳、郸城以及山东省沛县一带的郟城站点的 M-K 值大于 1.96,通过显著性检验,其极端降水值呈显著增加趋势。流域内没有站点的极端降水值呈显著下降趋势。总体上,淮河流域极端降水值呈现增长的趋势,与上述结论一致。

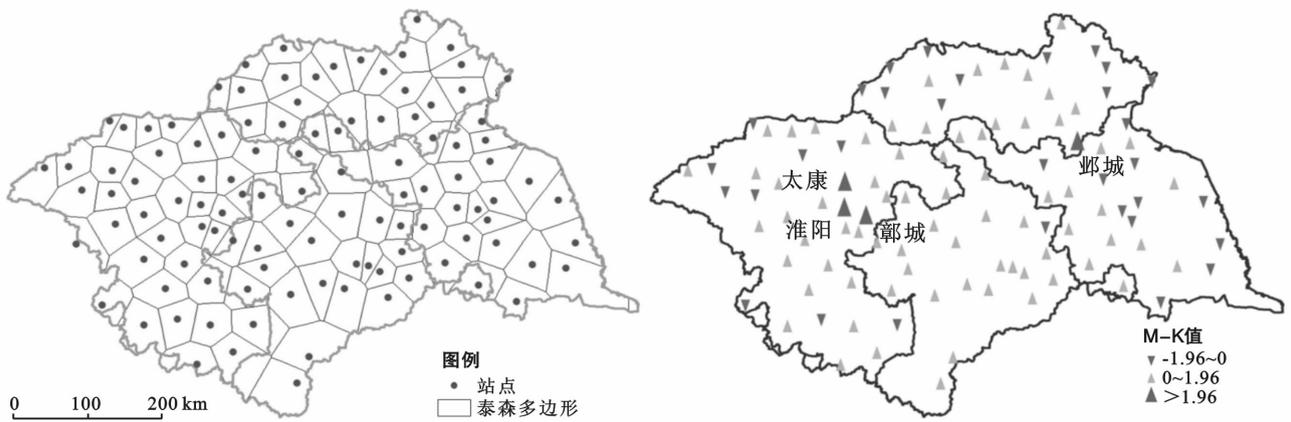


图 4 淮河流域泰森多边形图及极端降水 M-K 变化趋势

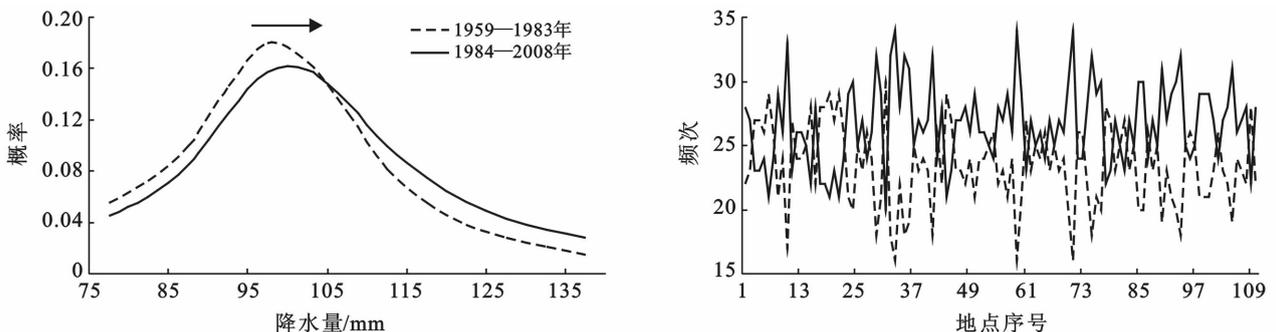


图 5 1959—1983 年与 1984—2008 年极端降水 Wakeby 函数概率分布模型及频次对比

## 4 讨论与结论

引用多参数概率分布模型,对淮河流域 110 个站点 1959 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日逐日极端降水序列进行拟合,最终建立适用于淮河流域的最优概率分布模型 Wakeby 函数,将其与 Pearson III 函数对比,并对其应用进行探讨。有文献<sup>[10]</sup>指出 Gen. Extreme Value 函数(GEV)为淮河流域极端降水 AM 序列的最优函数,Gen. Pareto 函数(GP)为 POT 序列的最优函数。该文献是将 3 种特定函数(GEV, GP, Gamma)进行对比,所选的函数范围较小,都是三参数函数,且选用气象站点略少,不能很好地表征淮河流域极端降水情况。在本研究中,GEV, GP 函数都能较好地拟合淮河流域 110 个站点中 98% 以上站点( $D_n < 0.19233$ )。Wakeby 函数为 5 参数函数,函数两侧可以分别拟合,相较三参数函数的 GEV, GP 以及 Pearson III 函数,函数表达更加灵活,若其能改进尾部的拟合效果,适用范围会更广<sup>[30]</sup>,可为今后淮河流域水利工程标准曲线的制定提供参考。不同区域地理环境、气候特征均不同,拟合极端降水序列的最优函数也可能不同。目前已有研究得出 Wakeby 函数适用于长江流域<sup>[19]</sup>等地,对其他区域是否适用有待研究。

Wakeby 函数既可计算不同重现期下极端降水值,也可探究不同时期淮河流域极端降水事件变化。对于最优概率分布其他方面的应用,仍有待挖掘。本研究探讨了单变量概率分布模型的应用,而双变量及多变量模型在淮河流域极端降水中的应用有必要进一步分析。

### [参 考 文 献]

- [1] 董思言,高学杰. 长期气候变化: IPCC 第五次评估报告解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56-59.
- [2] 陆苗,高超,苏布达,等. 淮河流域极端降水空间分布及概率特征[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 160-168.
- [3] Bell J L, Sloan L C, Snyder M A. Regional changes in extreme climate events: A future climate scenario [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(1): 81-87.
- [4] 安华,延军平,张涛涛,等. 增暖背景下华北平原极端降水事件时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 144-148.
- [5] 夏军,余敦先,杜鸿. 气候变化影响下极端水文事件的多变量统计模型研究[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(6): 397-402.
- [6] 张强,李剑锋,陈晓宏,等. 基于 Copula 函数的新疆极端降水概率时空变化特征[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 3-12.
- [7] 李计,李毅,宋松柏,等. 基于 Copulas 函数的多维干旱变量联合分布[J]. 自然资源学报, 2013, 28(2): 312-320.
- [8] 丁裕国. 降水量  $\Gamma$  分布模式的普适性研究[J]. 大气科学, 1994, 18(5): 552-560.
- [9] 江志红,丁裕国,马婷婷,等. 气候极值推断的不确定性及其置信区间初步探讨[J]. 气象学报, 2012, 70(6): 1327-1333.
- [10] 余敦先,夏军,张永勇,等. 近 50 a 来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1200-1210.
- [11] 杜鸿,夏军,曾思栋,等. 淮河流域极端径流的时空变化规律及统计模拟[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 398-409.
- [12] 魏锋,丁裕国,王劲松. 西北地区 5—9 月极端干期长度的概率特征分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 147-152.
- [13] 张正涛,高超,刘青,等. 不同重现期下淮河流域暴雨洪涝灾害风险评价[J]. 地理研究, 2014, 33(7): 1361-1372.
- [14] Liang Li, Zhao Linna, Gong Yuanfa, et al. Probability distribution of summer daily precipitation in the Huaihe basin of China based on Gamma distribution [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 26(1): 72-84.
- [15] 郭军,任国玉,李明财. 环渤海地区极端降水事件概率分布特征[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 425-432.
- [16] 高超,刘青,苏布达,等. 不同尺度和数据基础的水文模型适用性评估研究: 淮河流域为例[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1765-1777.
- [17] Marty C, Blanchet J. Long-term changes in annual maximum snow depth and snowfall in Switzerland based on extreme value statistics [J]. *Climatic Change*, 2012, 111(3/4): 705-721.
- [18] Helmi S, Marzia C, Claudia D. Observed variability and trends in extreme rainfall indices and peaks-over-threshold series [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, 2013, 10(5): 6049-6079.
- [19] Su Buda, Zbigniew W, Kundzewicz, et al. Simulation of extreme precipitation over the Yangtze River basin using Wakeby distribution [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 96(3/4): 209-219.
- [20] Chang J K, Min J P, Joo H L. Analysis of climate change impacts on the spatial and frequency patterns of drought using a potential drought hazard mapping approach [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(1): 61-80.
- [21] Li Zhi, Francois B, Chen Jie. Assessing the applicability of six precipitation probability distribution models on the Loess Plateau of China [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(2): 462-471.

( $P$ )、最大 60 min 降雨动能( $E_{60}$ )的相关系数都大于 0.6,降雨量和最大 60 min 降雨动能( $E_{60}$ )是影响坡面产流、产沙的两个主要因子。坡面产流产沙均与最大 60 min 雨强( $I_{60}$ )相关明显。

(2) 黔西高原地区坡面产流产沙与二元复合指标  $EI_{60}$ ,  $PI_{60}$  和  $I_{30} I_{60}$  的相关系数表明,  $EI_{60}$ ,  $PI_{60}$  和  $I_{30} I_{60}$  是影响坡面产流、产沙 3 种主要的降雨复合指标,  $EI_{30}$  和  $EI_{60}$  与坡面产流产沙的相关系数间相差较小。

(3) 基于可比性,黔西高原地区降雨侵蚀力简易算法的拟合参照值通过经典算法结构  $R = EI_{30}$  得到。该地区降雨侵蚀力的简易算法为:  $R = 0.344(PI_{60})$ 。该算法能便捷、快速地预测该地区的降雨侵蚀力,为土壤侵蚀预报模型的建立提供理论依据。

#### [参 考 文 献]

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning[J]. US Washington D C: Agriculture Handbook No 537, 1978.
- [2] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J]. Transactions of the ASAE, 1983,26(1):153-156.
- [3] 章文波,谢云,刘宝元.用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J].地理研究,2002,21(3):384-390.
- [4] 严毅,陈登.贵州省毕节市土地石漠化现状与治理对策[J].内蒙古林业调查设计,2011,34(5):43-46.
- [5] 李瑞,李勇,刘云芳.贵州喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀关系研究[J].水土保持研究,2012,19(3):3560-3562.
- [6] 戴海伦,苑爽,张科利,等.贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J].水土保持研究,2013,20(1):37-41.
- [7] 许月卿,周巧富,李双成.贵州省降雨侵蚀力时空分布规律分析[J].水土保持通报,2005,25(4):11-14.
- [8] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J].地球科学进展,2012,27(5):499-509.
- [9] 罗宁,许炳南,文继芬,等.贵州大气降水的时空分布规律研究[J].贵州气象,2006,30(4):3-7.
- [10] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力  $R$  值的计算与分布[J].水土保持学报,1995,9(4):5-18.
- [11] 伍育鹏,谢云.国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J].水土保持学报,2001,15(3):31-34.
- [12] 王万忠,焦菊英.黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M].北京:科学出版社,1996.
- [13] 姚治君,廖俊国,陈传友.云南玉龙山东南坡降雨因子与土壤流失关系的研究[J].自然资源学报,1991,6(1):45-54.
- [14] 徐丽,谢云,符素华,等.北京地区降雨侵蚀力简易计算方法研究[J].水土保持研究,2007,14(6):433-437.
- [15] 符素华,段淑怀,吴敬东,等.北京山区次降雨侵蚀力[J].水土保持学报,2002,16(1):37-39.
- [16] 蒋荣.地形因子对贵州喀斯特地区坡面土壤侵蚀的影响[D].江苏南京:南京大学,2013.
- [22] 李洪成.数据的正态性检验方法及其统计软件实现[J].统计与决策,2009(12):155-156.
- [23] 陆运清.用 Pearson's 卡方统计量进行统计检验时应注意的问题[J].统计与决策,2009(15):32-33.
- [24] Steinskog D J, Tjostheim D B, Kvamstø N G. A cautionary note on the use of the Kolmogorov-Smirnov test for normality [J]. Monthly Weather Review, 2007,135(3):1151-1157.
- [25] 林两位,王莉萍.用 Pearson-III 概率分布推算重现期年最大日雨量[J].气象科技,2005,33(4):314-317.
- [26] Houghton J C. Birth of a parent: The Wakeby distribution for modeling flood flows [J], Water Resource Research, 1978,14(6):1105-1109.
- [27] 李宏伟.水文频率参数计算方法与应用研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [28] 中华人民共和国水利部. SL44-2006 水利水电工程设计洪水计算规范[S].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [29] 陆文秀,刘丙军,陈俊凡,等.近 50 a 来珠江流域降水变化趋势分析[J].自然资源学报,2014,29(1):80-90.
- [30] Park J S, Jung H S, Kim R S, et al. Modelling summer extreme rainfall over the Korean peninsula using Wakeby distribution [J]. International Journal of Climatology, 2001,21(11):1371-1384.

(上接第 203 页)