

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.04.014

# 未来气候模式下淮河流域极端降水量的时空变化分析

陈琛<sup>1</sup>, 石朋<sup>1,2</sup>, 瞿思敏<sup>1</sup>, 孙龙<sup>3</sup>, 牟时雨<sup>1</sup>,  
冯颖<sup>1</sup>, 董丰成<sup>1</sup>, 崔彦萍<sup>4</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 水利部信息中心, 北京 100053; 4. 江苏省水文水资源勘测局 江苏 南京 210029)

**摘要:** 本文以淮河干流小柳巷以上 14 个气象站 1960—2015 年逐日降水观测数据为基础, 选取 HadGEM2-ES 气候模式, 预测了 2016—2075 年 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 三种排放情景下日降水量数据, 选取年最大日降水量序列(AM)与超门限阈值峰值序列(POT), 分析未来气候模式下淮河流域极端降水量的时空变化和重现期。研究发现: 在三种排放情景下, 淮河流域暴雨中心均未发生明显转移, 暴雨中心仍将集中于流域上游, 这将给该地区带来潜在的防洪压力; 极端降水量随着重现期的增长而增大; 同时极端降水量按照 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 的顺序增大; 相同重现期, 相同排放情景下 AM 序列略大于 POT 序列。研究结果对淮河流域未来防洪规划具有重要的的参考意义。

**关键词:** 淮河; 未来气候模式; 极端降水量; 暴雨中心; 重现期

**中图分类号:** TV121.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-4710(2019)04-0494-07

## Spatio-temporal trend of extreme precipitation in Huaihe River basin based on the future climate model

CHEN Chen<sup>1</sup>, SHI Peng<sup>1,2</sup>, QU Simin<sup>1</sup>, SUN Long<sup>3</sup>, MOU Shiyu<sup>1</sup>,  
FENG Ying<sup>1</sup>, DONG Fengcheng<sup>1</sup>, CUI Yanping<sup>4</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Information Centre of the Ministry of Water Resources, Beijing 100053; 4. Jiangsu Provincial Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210028, China)

**Abstract:** Based on the observed daily precipitation series of 14 meteorological stations in the upstream of Huaihe River Basin above the Xiaoliuxiang hydrological station from 1960 to 2015, the daily precipitation series from 2016 to 2075 are projected by using the HadGEM2-ES climate model outputs under three emission scenarios, i. e., RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. The Annual Maximum (AM) series and Peak over Threshold (POT) series are selected to analyze the temporal and spatial variation and return period of extreme precipitation under future climate scenarios. It is found that no matter in which emission scenarios, the rainstorm center in Huaihe River Basin has not been significantly transferred, and that the rainstorm center will still be concentrated in the upstream region, bringing potential flood control pressure to the region. Moreover, with the return period increasing, the extreme precipitation increases accordingly. Similarly, the extreme precipitation gradually increases with the increase of emission scenarios from RCP2.6 to RCP8.5; in the same return period and the same emission scenario, the values of AM series are slightly

**收稿日期:** 2019-04-03

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405601); 国家自然科学基金资助项目(51479062); 浙江省水利厅重大科技资助项目(RA1801)

**作者简介:** 陈琛,男,硕士生,研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail:johnnychenhhu@163.com

**通讯作者:** 石朋,男,教授,博导,研究方向为流域水文模拟。E-mail:ship@hhu.edu.cn

greater than that of the POT one. This study is of enormous reference significance for future flood control planning of Huaihe River Basin.

**Key words:** Huaihe River Basin; future climate model; extreme precipitation; rainstorm center; return period

在当前全球气候变化的背景下,洪水、台风、干旱以及雨雪冰冻等极端事件频发,灾害损失加剧,越来越多的人开始关注极端事件<sup>[1]</sup>。IPCC 第五次评估报告指出,在多数陆地地区强降水事件发生的频率呈增加趋势<sup>[2]</sup>,观测研究也表明,我国的极端强降水平均强度和极端降水值都有增加的趋势<sup>[3]</sup>。为能准确预测极端降水变化情况,国内外众多学者利用多种不同的极值分布类型对不同地区的极端事件进行研究,肖卉等<sup>[4]</sup>发现 Pearson-III 型分布可以较好地拟合江苏省大暴雨分布特征,汪方等<sup>[5]</sup>证明了 Gamma 概率分布模型在降水拟合上有较好的拟合效果,张利平等<sup>[6]</sup>总结了不同极端水文事件中各分布函数的拟合效果。同时,也有学者对极端降水的变化情况做出研究,闵岫等<sup>[7]</sup>对极端降水的区域性和持续性特征做出了探究,表明不同地区的区域性和持续性特征各有差异,其中长江以南地区的区域性与持续性特征均较大,容易诱发区域性洪水。

淮河流域位于中原地区,地跨河南、湖北、安徽、江苏、山东 5 省,人口密集,降雨空间分布不均匀<sup>[8]</sup>,一旦发生洪涝事件将给当地居民的生命财产安全带来极大危害,极端降水作为洪水的主要驱动因素,已引起众多学者的广泛关注。王丽萍等<sup>[9]</sup>发现 1961 年以来流域降水过程强度明显增强,特强和强降水过程均明显增多,刘畅等<sup>[10]</sup>对淮河流域极端降水的频度和强度变化情况做出了分析。现有研究均着眼于过去极端降水变化,对未来气候模式下的极端降水量变化研究还不多。本文在上述研究基础上,基于小柳巷以上 14 个气象站 1960—2015 年(共计 55 年)的逐日降水数据,选取英国 Hadley 气候中心开发的 HadGEM2-ES 气候模式,选取 3 种排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5),使用 delta 统计降尺度方法预测未来 60 年该地区逐日降水量,结合统计特征,分析了未来气候模式下淮河流域小柳巷以上区域的极端降水量时空变化规律。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究数据

研究区及 14 个气象站的分布情况见图 1,气象数据均来自国家气象信息中心 <http://data.cma.cn/>。为保证研究结论的可靠性,首先对观测资料进

行了一致性检验,以排除由于台站迁移、观测仪器和方法变更等非气象因素带来的非均一性问题。本文利用 Wijngaard 等<sup>[11]</sup>提出的均一性检验方法,对 14 个气象站的逐日降水观测资料进行均一性检验,结果表明,所有站点资料均通过了 95% 置信水平下的显著性检验。

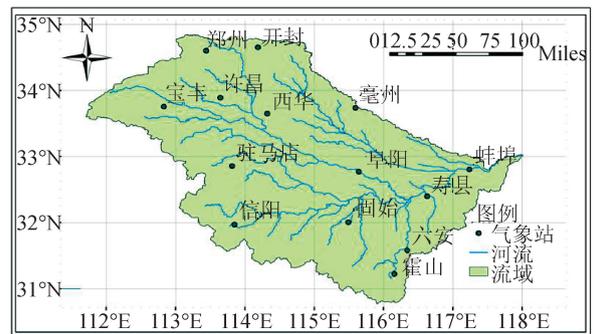


图 1 淮河流域气象站点分布图  
Fig. 1 Huaihe River Basin and location of meteorological stations

为规避只选取年最大值法会出现的遗漏有价值信息或混入无价值信息问题,对现有观测数据和未来模拟数据,本文均同时考虑两类极值序列,一类是年最大值序列(Annual Maximum, AM),另一类是超门限峰值序列(Peak over Threshold, POT)。POT 序列的获得很大程度上依赖于阈值的选择,Reiss 和 Thomas 指出 Hill 图是寻找最优阈值的理想工具<sup>[12]</sup>,本文用 Hill 图法选取最优阈值。经计算,本文选取日降水观测资料超过 99.5th 分位点的数据组成待分析的 POT 序列。根据余敦先等<sup>[13]</sup>的研究结果,GEV(广义极值分布)与 GPD(广义 Pareto 分布)为 AM 序列与 POT 序列的最优拟合。

### 1.2 分析方法

#### 1) 极值分布模型与参数估计方法

广义极值分布(GEV)与广义 Pareto 分布(GPD)被广泛应用于极值序列的拟合,已有研究表明,这两种极值分布分别是淮河流域现有观测资料 AM 序列与 POT 序列的最优分布<sup>[13]</sup>,故本文选取这两种分布模型进行简要介绍。

#### a) 广义极值分布模型(GEV)

设  $X_1, \dots, X_m$  是服从广义极值分布的独立随机变量,则分布函数  $F_x(x)$  为:

$$F_x(x) = P[X < x] = \begin{cases} \exp\{-[1 - \xi(\frac{x-\mu}{\sigma})]\}, & \xi \neq 0 \\ \exp[-\exp(\frac{x-\mu}{\sigma})], & \xi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mu, \sigma, \xi$  分别为位置参数、尺度参数、形状参数。位置参数  $\mu \in R$ , 尺度参数  $\sigma > 0$ , 形状参数  $\xi \in R$ 。 $\mu = 0, \sigma = 1$  时称为标准形式。

b) 广义 Pareto 分布(GPD)

GPD 的分布函数为:

$$F(x) = 1 - [1 - \epsilon(\frac{x-\mu}{\sigma})] \frac{1}{\epsilon}, \epsilon \neq 0, \mu \leq x \leq \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2)$$

式中:  $x$  是随机变量,  $\mu$  为门限值,  $\sigma$  为尺度参数,  $\epsilon$  为形状参数。

c) 参数估计方法

本文采用极大似然估计对以上 2 种分布参数进行估计,极大似然估计法对大样本量的复杂模型有较好的适应性,与此同时,还可以得到分布的渐进分布、参数标准差和置信区间。

设  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为相互独立且同分布的概率分布  $F(x)$ , 极大似然估计可通过下式求得:

$$L(\mu, \sigma, \xi) = -n \ln \sigma - \sum_{i=1}^n [1 + \xi(\frac{x_i - \mu}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}}] - (1 + \frac{1}{\xi}) \sum_{i=1}^n \ln [1 + \xi(\frac{x_i - \mu}{\sigma})] \quad (3)$$

使得上式值达到最大值的点即为相应参数的极大似然估计。

2) 拟合优度检验方法

本文选取 CVM 检验(Cramér-von Mises test)来检验各分布的拟合效果,CVM 检验是用来检验拟合优度的一种检验方法,对大小为  $n$  的顺序统计量,定义统计函数

$$\omega^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{2i-1}{2n} - F_\theta(x_i) \right] \quad (4)$$

式中  $F_\theta(x)$  是在参数为  $\theta$  情况下,目标函数的累计分布函数。当  $\omega^2$  值大于临界值时,拒绝原假设。

3) delta(CF)降尺度方法

第一步:估计 GCM 模拟基线和未来气候的均值:

$$\overline{GCMb} = \sum_{i=1}^{Nb} GCMb_i / Nb \quad (5)$$

$$\overline{GCMf} = \sum_{i=1}^{Nf} GCMf_i / Nf \quad (6)$$

式中:  $GCMb_i$  和  $GCMf_i$  分别表示代表时间域的 GCM 基线和 GCM 在第  $i$  个时间步长中未来气候

模式的值,  $\overline{GCMb}$  和  $\overline{GCMf}$  是指定时间域的 GCM 基线和 GCM 未来模式的平均值。 $Nb$  和  $Nf$  是 GCM 基线和 GCM 未来模式的时间域中的值的数量。

第二步:计算加法和乘法变化因子( $CF_{add}$ 、 $CF_{mul}$ ):

$$CF_{add} = \overline{GCMf} - \overline{GCMb} \quad (7)$$

$$CF_{mul} = \overline{GCMf} / \overline{GCMb} \quad (8)$$

第三步:通过应用  $CF_{add}$  和  $CF_{mul}$  获得局部缩放的未来值( $LSf_{add,i}$  和  $LSf_{mul,i}$ ):

$$LSf_{add,i} = LOB_i + CF_{add} \quad (9)$$

$$LSf_{mul,i} = LOB_i \times CF_{mul} \quad (10)$$

式中:  $LOB_i$  是在单个气象站观测到的气象变量(在第  $i$  个时间步长中)的值,或者是指定时间域的流域的平均气象时间序列。 $LSf_{add,i}$  和  $LSf_{mul,i}$  是用 CFM 的加性和乘法公式得到的变量未来情景的值。

## 2 结果分析

未来气候模式,是通过控制温室气体的排放,运用气候系统模式来对未来气候情景做出定量的描述。IPCC 第四次报告中将温室气体排放划分为高(A1)中(A1B)低(B1)三种模式。在 IPCC 第五次报告中,为了更好地将排放与社会经济情景有机结合,从而更好地模拟出未来气候变化对区域的影响,开发出新的情景模式(RCPs)<sup>[14]</sup>。本文选取英国 Hadley 气候中心开发的 HadGEM2-ES 气候模式,模式模拟精度为  $1.88^\circ \times 1.25^\circ$ ,选取 3 种排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)(数字越大代表人类社会活动对流域影响越大),使用 delta 统计降尺度方法预测未来 60 年该地区逐日降水量。

GEV 分布和 GPD 分布分别为淮河流域现有观测数据 AM 序列与 POT 序列的最优拟合分布。为判断 GEV 分布与 GPD 分布是否仍可以较好模拟未来气候模式下流域降水量的 AM 序列与 POT 序列,使用 CVM 检验对两种序列对应的分布进行检验。检验结果见表 1,CVM 检验值越趋近于 1,则拟合效果越好,表中检验值绝大多数大于 0.5,即 GEV 分布与 GPD 分布仍可较好拟合三种排放情景下淮河流域的 AM 序列与 POT 序列。

将 1960—2075 年划分为 3 个年代际,分别是 1960—2015 年、2016—2045 年、2046—2075 年,计算各年代际间极端降水均值并表示在空间图中,以观察不同年代际间、不同排放情景下淮河流域极端降水暴雨中心是否发生明显变化,见图 2~4。

表 1 2016—2075 年 AM 序列与 POT 序列 CVM 检验值

Tab. 1 Value of CVM test of AM series and POT series during 2016—2075

站点	AM 序列			POT 序列		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
蚌埠	0.614	0.939	0.977	0.647	0.968	0.848
宝丰	0.791	0.791	0.573	0.600	0.696	0.675
亳州	0.889	0.792	0.596	0.963	0.835	0.668
阜阳	0.813	0.813	0.802	0.580	0.747	0.612
固始	0.702	0.701	0.977	0.931	0.853	0.735
霍山	0.756	0.755	0.903	0.583	0.867	0.739
开封	0.921	0.912	0.933	0.913	0.892	0.769
六安	0.955	0.955	0.873	0.969	0.733	0.788
寿县	0.448	0.449	0.516	0.572	0.958	0.618
西华	0.968	0.941	0.968	0.970	0.833	0.986
信阳	0.965	0.977	0.773	0.891	0.949	0.611
许昌	0.791	0.516	0.918	0.144	0.693	0.658
郑州	0.705	0.725	0.842	0.797	0.766	0.814
驻马店	0.640	0.553	0.792	0.677	0.519	0.769

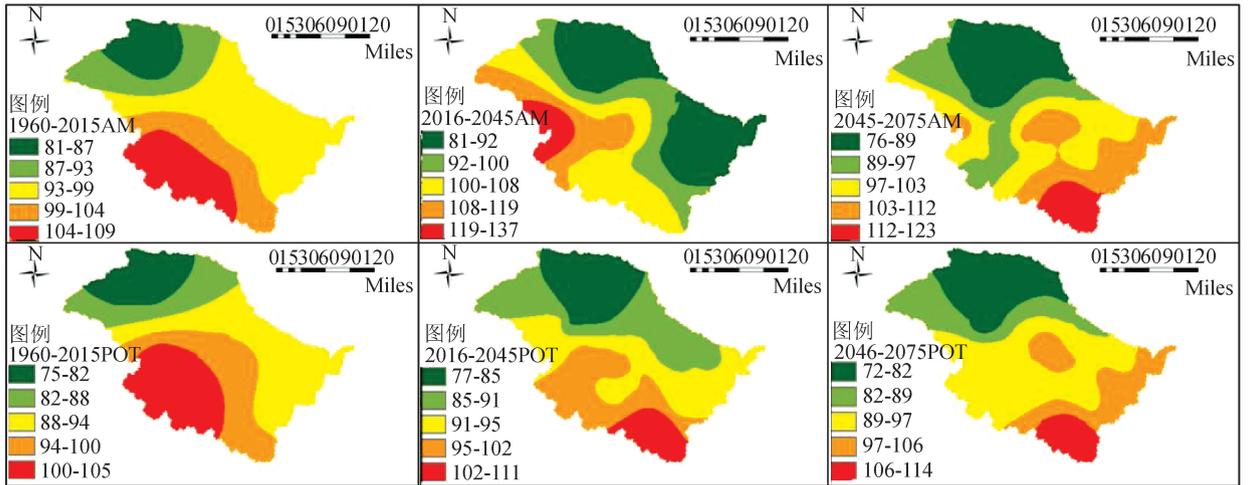


图 2 RCP2.6, 1960—2015 年、2015—2045 年、2046—2075 年 AM 序列与 POT 序列暴雨中心分布图

Fig. 2 Rainstorm center of AM series and POT series during 1960—2015, 2015—2045, 2046—2075 under RCP2.6

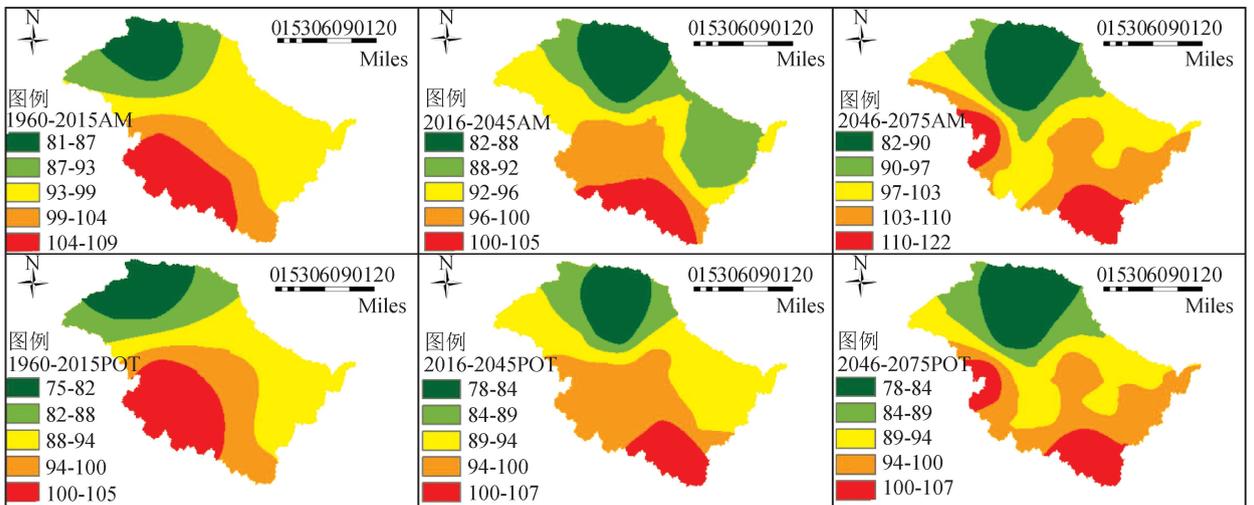


图 3 RCP4.5, 1960—2015 年、2015—2045 年、2046—2075 年 AM 序列与 POT 序列暴雨中心分布图

Fig. 3 Rainstorm center of AM series and POT series during 1960—2015, 2015—2045, and 2046—2075 under RCP4.5

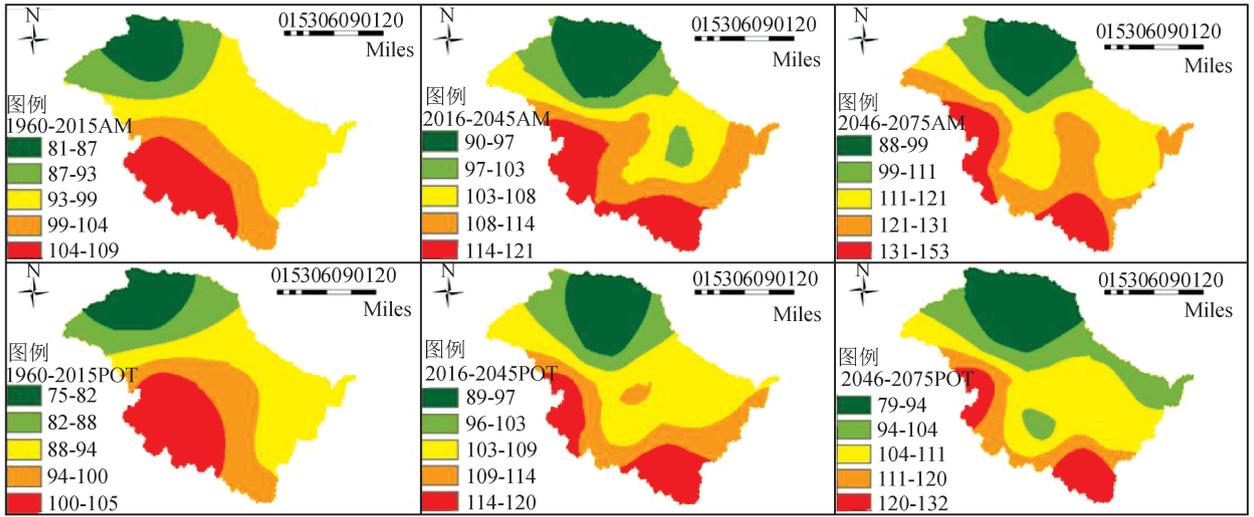


图4 RCP8.5,1960—2015年、2015—2045年、2046—2075年AM序列与POT序列暴雨中心分布图

Fig.4 Rainstorm center of AM series and POT series during 1960—2015, 2015—2045, and 2046—2075 under RCP8.5

从图2~4可以看出,在RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5三种排放情景下,各年代际间的极端降水最大值仍集中在流域南部,年代际间暴雨中心都未发生明显偏移,均分布在淮河流域上游(信阳站、霍山站一带)。从数值来看,在三种排放情景下,未来60年极端降水均值相比于现在略有增长,但2016—2045年与2045—2075年两个年代际间相比,未发生明显变化,相同年代际间,AM序列略大于POT序列。三种排放情景之间相比,RCP8.5极端降水均值增长最为明显,在2045—2075年间,RCP8.5下AM序列的极端降水最大值152.5mm,RCP2.6中为123.1mm,两者相差29.4mm,增长约23.9%。由以上结果可以看出,在未来气候模式下,淮河流域暴雨中心虽未发生明显偏移,但极端降水量有增大趋势,且随人类活动对流域影响的增大而增大。

对未来气候模式下AM序列与POT序列,分别用GEV分布与GPD分布计算重现期。

图5~7表明,在三种排放情景下,淮河流域AM序列与POT序列十年一遇、二十年一遇与百年一遇的降水量空间分布基本相同,降水极大值多发生于淮河流域上游。而从数值上看,RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5三种排放情景下,相同序列、相同重现期的降水量数值依次增大。

重现期与事件发生的概率相对,重现期越长,则事件发生的概率越小,对应的降水量越大,这与不同重现期下AM与POT序列模拟的降水量分布数值是相对应的,同时可以发现,在相同排放情景、相同重现期情况下,AM序列模拟数值普遍大于POT序列,这与现有实测资料AM序列与POT序列均值的比较结果相吻合。

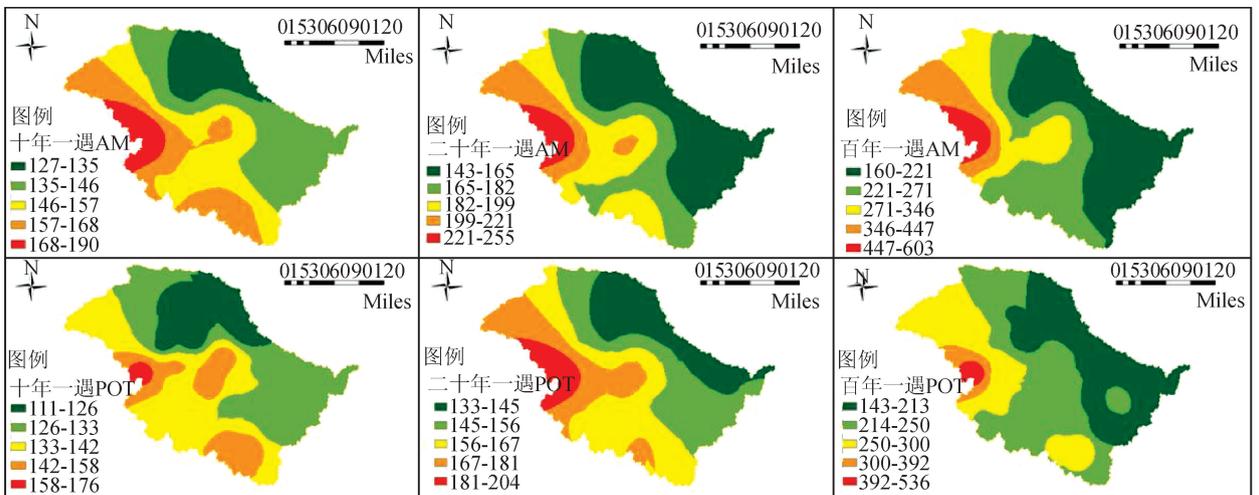


图5 RCP2.6,AM序列与POT序列重现期分别为10a、20a、100a时的降水量分布图

Fig.5 Precipitation distribution of AM series and POT series in reappearing periods of 10a, 20a, 100a under RCP2.6

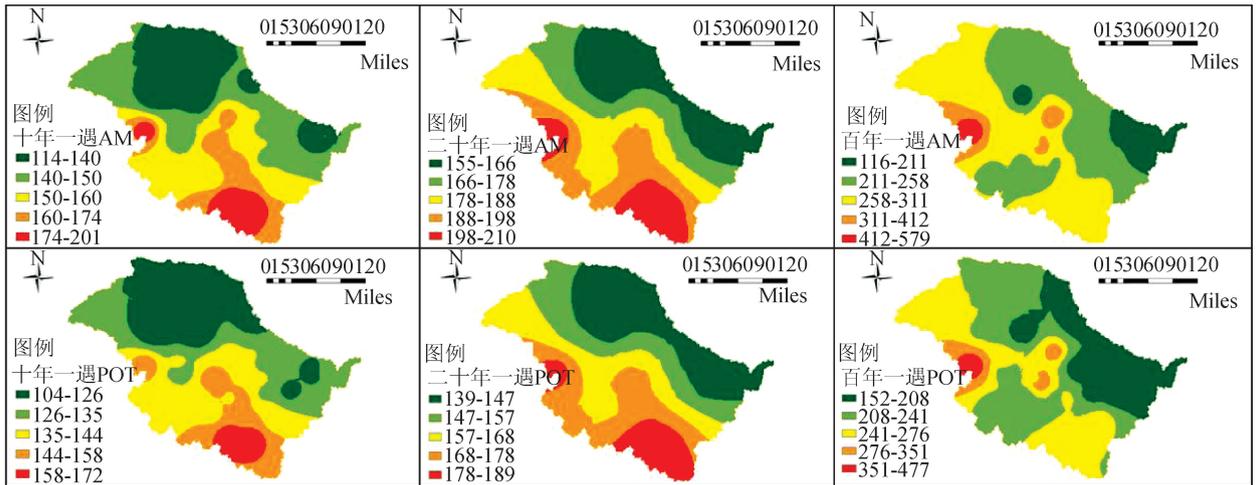


图6 RCP4.5, AM序列与POT序列重现期分别为10a、20a、100a时的降水量分布图

Fig. 6 Precipitation distribution of AM series and POT series in reappearing periods of 10a, 20a and 100a under RCP4.5

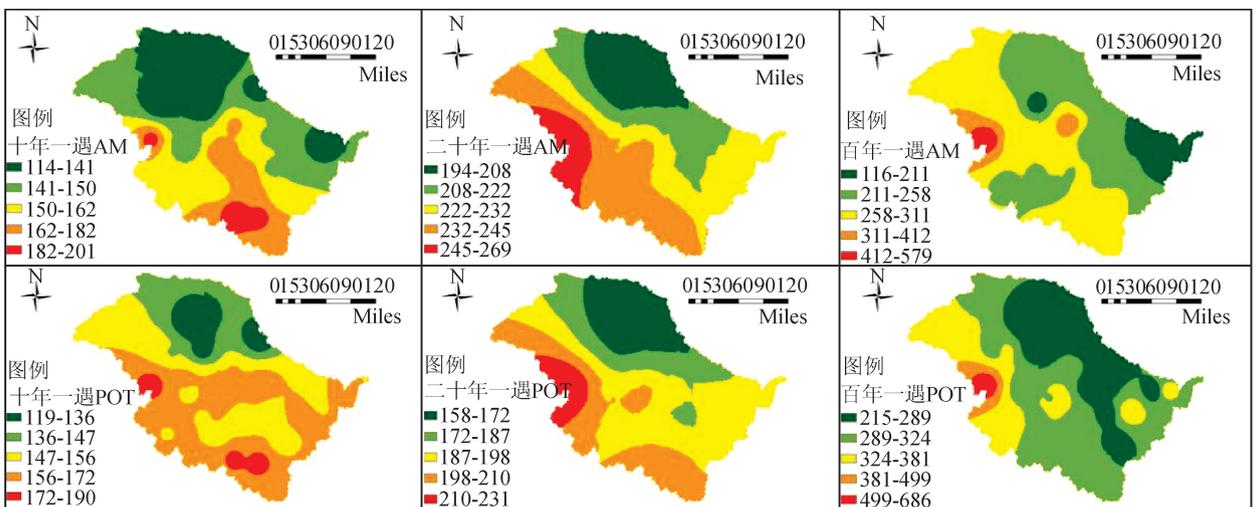


图7 RCP8.5, AM序列与POT序列重现期分别为10a、20a、100a时的降水量分布图

Fig. 7 Precipitation distribution of AM series and POT series in reappearing periods of 10a, 20a and 100a under RCP8.5

### 3 结论

本文以淮河小柳巷以上流域14个气象站1960—2015年逐日降水数据为基础,模拟不同排放情景下研究区2016—2075年逐日降水过程,通过统计分析,研究淮河流域未来不同排放情景下极端降水的时空变化特征,得出结论。

1) 3种排放情景下,未来60年淮河流域暴雨中心未发生重大偏移,暴雨中心仍将集中于淮河上游(信阳站、霍山站一带),将给该地区带来潜在的防洪压力;同时3种模式下极端降水数值都略有增加,增加数值随着人类活动对流域的影响增大而增大。

2) 计算重现期为10年、20年与100年下的极端降水,两种序列空间分布情况一致,降水分布均为南多北少,极值的最大值均分布在流域上游,随着

重现期的延长,极端降水数值增大,且随着人类活动影响增大而增大。

3) 在相同排放情景,相同重现期下AM序列的极端降水数值要略大于POT序列,这与现有实测资料AM序列与POT序列均值的比较结果一致。

#### 参考文献:

- [1] 丁裕国. 探讨灾害规律的理论基础-极端气候事件概率[J]. 气象与减灾研究, 2006, 29(1): 44-50.  
DING Yuguo. Theoretical basis for discussing disaster disciplinarian-The probability of extreme climate event [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2006, 29(1): 44-50.
- [2] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M].

- Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 144-148.  
ZHAI Panmao, WANG Cuicui, LI Wei. A review on study of change in precipitation extreme [J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(3): 144-148.
- [4] 肖卉, 姜爱军, 沈瑛, 等. 江苏省最大日降水量时空分布特征及其统计拟合[J]. 气象科学, 2006, 26(2): 177-182.  
XIAO Hui, JIANG Aijun, SHEN Zhen, et al. The space-time distribution characters of maximum diurnal precipitation in Jiangsu province and the statistic assimilation [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2006, 26(2): 177-182.
- [5] 汪方, 丁裕国, 范金松. 江苏夏季逐日降水极值统计特征诊断研究[J]. 气象科学, 2002, 22(4): 435-443.  
WANG Fang, DING Yuguo, FAN Jinsong. The diagnosis research for extremum statistical character of summer's daily precipitation in Jiangsu province [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2002, 22(4): 435-443.
- [6] 张利平, 杜鸿, 夏军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1370-1379.  
ZHANG Liping, DU Hong, XIA Jun, et al. Progress in the study of extreme hydrologic events under climate change [J]. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1370-1379.
- [7] 闵岫, 钱永甫. 中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 765-771.  
MIN Shen, QIAN Yongfu. Regionality and persistence of extreme precipitation events in China [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 765-771.
- [8] 肖紫薇, 石朋, 胡健伟, 等. 淮河流域上游不同尺度降雨集中度时空变化分析[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(1): 74-79.  
XIAO Ziwei, SHI Peng, HU Jianwei, et al. Spatial distribution and temporal trends in daily and monthly precipitation concentration indices in the upper reaches of the Huai River [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(1): 74-79.
- [9] 王莉萍, 王维国, 张建忠. 我国主要流域降水过程时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 161-173.  
WANG Liping, WANG Weiguo, ZHANG Jianzhong. Analysis on spatial and temporal distribution characteristics of precipitation processes over main river basin in China [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(2): 161-173.
- [10] 刘畅, 钟平安, 万新宇, 等. 淮河流域汛期极端降水时空演变规律分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(4): 6-10.  
LIU Chang, ZHONG Ping'an, WAN Xinyu, et al. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics on extreme precipitation of Huaihe River Basin in flood period [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(4): 6-10.
- [11] WIJNGAARD J B, TANK A M G K, KONNEN G P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series [J]. International Journal of Climatology, 2003, 23(6): 679-692.
- [12] REISS R, THOMAS M. Statistical analysis of extreme values: from insurance, finance, hydrology and other fields [M]. Basel: Birkhauser Verlag, 2001.
- [13] XIA Jun, SHE Dunxian, ZHANG Yongyong, et al. Spatio-temporal trend and statistical distribution of extreme precipitation events in Huaihe River Basin during 1960-2009 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(2): 195-208.
- [14] MOSS R, EDMONDS J A, HIBBARD K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment [J]. Nature, 2010, 463: 747-756.

(责任编辑 王绪迪)