

淮河流域不同量级降雨时空分布特征及其影响因素

朱继前, 韩美, 徐泽华, 张雪, 田立鑫

(山东师范大学 地理与环境学院“人地协调与绿色发展”山东省高校协同创新中心, 济南 250358)

摘要:采用淮河流域1965—2016年67个气象站点52 a的逐日降水资料,应用Mann-Kendall趋势检验法、反距离权重插值法和Morlet小波分析法,研究了不同量级降雨时空分布特征及其影响因素。结果表明:(1)淮河流域各量级降雨的年降水量均呈增大趋势,其中暴雨的年降水量年际变化波动相对较大。(2)整个淮河流域的降雨以中、大和暴雨为主,且比较集中。(3)淮河流域小雨和中雨的年降水量由南向北的递减较为平均,各级雨量带呈条带状分布,而大雨和暴雨的各级雨量带无条带状分布的规律。此外,不同量级降雨的降水日数和降水量空间分布一致,均具有“由南向北,依次递减”的特点。(4)1965—2016年,太阳黑子出现极值的年份与淮河流域各量级降雨的降水量极值年份并不完全对应。淮河流域暴雨的年降水量和太阳黑子数都在15 a左右尺度上震荡明显,虽然尺度上不能完全对应,但有交叉,说明暴雨的年降水量和太阳黑子数存在相似的振荡周期变化。

关键词:淮河流域; 降水量; 降水日数; 太阳黑子数

中图分类号:P461.61⁺3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0087-09

Temporal-Spatial Distribution Characteristics and Factors of Different Magnitude Rainfall in Huaihe River Basin

ZHU Jiqian, HAN Mei, XU Zehua, ZHANG Xue, TIAN Lixin

(Collaborative Innovation Center of Human-Nature and Green Development in Universities of Shandong,
College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data of 67 meteorological stations in the Huaihe River Basin in the period 1965—2016, the spatial and temporal distribution characteristics of different magnitude of rainfall in the Huaihe River basin and its influencing factors were analyzed using the Mann-Kendall trend test, inverse distance weighting interpolation, and Morlet wavelet analysis. The results showed that: (1) the annual precipitation of all orders of rainfall in the Huaihe River Basin increased, and the annual precipitation variation of heavy rain was relatively significant; (2) the rainfall in the whole Huaihe River Basin mainly concentrated in middle, large and torrential rain events; (3) the annual precipitation of the rain and middle rain in the Huaihe River Basin decreased from the south to the north by the average, and the rainfall bands at all levels were banded, while the rainfall belts in the heavy rain and the rainstorm had no strip distribution; in addition, the spatial distribution of precipitation days and precipitation of different orders of magnitude was consistent, with the characteristics of ‘from south to north, decreasing in turn’; (4) from 1965 to 2016, the extreme years of sunspot occurrence did not correspond to the extreme years of precipitation in the Huaihe River Basin; the annual precipitation and sunspot number of the rainstorm in the Huaihe River Basin oscillated obviously on the 15-year scale; although the scale could not be completely equivalent, there were intersections, which indicated that the annual precipitation of rainstorm and the number of sunspots were similar to the oscillation period.

Keywords: Huaihe River Basin; precipitation; precipitation days; sunspot number

受全球气候变暖的影响,干旱、洪水以及雨雪冰冻等极端事件频发,灾害损失加剧,对于经济发展和人类活动造成十分严重的后果。降水量的变化直接反映着

区域气候的变化特征,其时空变化的不稳定性是引起旱涝等自然灾害的直接原因,对社会经济发展有重要的影响。因此,降水量的变化趋势和特点逐渐引起了国内

外科学家的高度关注。针对不同省域^[1-2]、不同流域^[3-5]及不同自然区域^[6-7]的降水事件,中国学者进行了许多探索性研究。现有研究主要集中在极端气温与降水的变化特征^[8],极端降水时空变化特征^[9],极端降水最优概率分布模型^[10],极端降水发生的环流原因^[11]等方面,对于淮河流域不同量级降雨的研究相对较少。但有研究表明,近 50 a 来,淮河流域年降水总量呈现缓慢增长趋势,其中春秋季节降水量呈显著减少趋势,冬夏季节降水量呈显著增长趋势,降水变化的转折期为 20 世纪 80 年代前期^[12]。太阳黑子活动是影响降水变化的因素之一,太阳辐射引起水体蒸发,形成的暖湿气流改变大气中水分含量,导致全球水循环现状的改变,从而改变降水分布特征和区域水文循环过程^[13-15]。已有研究表明,太阳活动对辽西北地区降水有一定的影响^[16]。唐洁^[17]在研究陕西省降水量时,发现降水量和同时期的太阳黑子相对数存在相似的平均周期,在 10 a 左右时间尺度上两者呈负相关关系,但降水量有滞后现象。王涛等^[18]运用交叉小波的方法,对 1700 年以来重建的天山中西部降水(干湿)和太阳黑子相对数变化序列进行研究,结果表明两者在准 10 a 尺度上关联性显著。张肖南等^[19]认为,西安夏秋季降水量与太阳黑子在 9 a 时间尺度上有很大的相关性。另外,江淮梅雨与太阳活动的相关性存在南北差异,南北部分别呈现负相关和正相关,且这种相关性在时间序列上保持不变^[20]。为进一步了解淮河流域不同量级降雨的年降水量时空分布规律,本文在前人研究成果的基础上,采用近 52 a 淮河流域 67 个站点观测的降水资料,按照全国统一标准将降水分为 4 个等级,运用 Mann-Kendall 检验和反距离权重插值技术,系统探讨 1965—2016 年淮河流域不同量级降雨时空变化特征;并运用小波分析法,探讨其与太阳黑子的相关性。以期为淮河流域水资源可持续利用及南水北调工程建设提供参考,为区域防灾减灾提供基础资料。该研究不仅对阐明气候过渡带降水对全球变化的区域响应具有重要的理论意义,而且对淮河流域经济社会以及自然生态系统应对气候变化的管理具有深远的实践意义^[21]。

1 研究区概况

淮河流域地处我国东部,地跨江苏、安徽、河南及山东省,介于黄河和长江两大流域之间,位于 110°22′—121°52′E,29°27′—36°12′N,流域面积约 27 万 km²。流域西起伏牛山、桐柏山,东到黄海,南以江淮丘陵、大别山、通扬运河及如泰运河南堤为界与长江相邻,北至黄河南堤和泰山并与黄河流域毗邻,是中国重要的南北气候分界线^[22]。淮河流域南部属于亚热带湿润季风气候区,北部属于暖温带半湿润季风气候

候区,天气气候复杂多变且极易发生洪涝灾害,可能与它处于南北气候、高低纬度和海陆相 3 种过渡带的重叠地区有关^[23-24]。流域内多年平均降水量约为 900 mm,但年际变化大,多集中在 6—9 月,具有“冬春干旱少雨,夏秋闷热多雨”的特点;且年内时空分布也极不均匀,大致由南向北逐渐递减,山区多于平原,沿海大于内陆。另外,气候的多变性以及地形地貌的复杂性决定了淮河流域降水量时空分布的独特性。随着全球气候变暖,淮河流域降水量分布特征也随之改变。大强度大面积的暴雨易诱发洪水,致使流域人民的生命和财产遭到损失,阻碍社会与经济发展^[25]。

2 研究资料与方法

2.1 研究资料

本研究降水数据来自中国气象局国家气象信息中心(NMIC),网址为: [http://data.cma.cn/\(2018-11-1\)](http://data.cma.cn/(2018-11-1))。选取淮河流域 67 个数据序列完整的气象站逐日降雨量资料,并将时间统一订正到 1965—2016 年。为了确定数据是否准确并能够满足研究需求,NMIC 对数据质量进行了评估,以确保数据的可靠性和连续性^[26]。本文采用全国统一标准,将降水分为 4 个不同强度的降水量级。日降水量在 0.1~9.9 mm 范围内为小雨,10~24.9 mm 为中雨,25~49.9 mm 为大雨,≥50 mm 为暴雨。太阳黑子数的资料获取: [http://www.sidc.be/silso/datafiles\(2018-11-1\)](http://www.sidc.be/silso/datafiles(2018-11-1))。

2.2 研究方法

(1) Mann-Kendall 趋势检验法。采用 Mann-Kendall(M-K)趋势检验法,对不同量级降雨的年降水量序列进行趋势检验。作为一种非参数检验方法,M-K 检验被广泛应用于气温、降水和径流等趋势分析和显著性检验研究中^[27-29]。M-K 检验法主要依靠统计量 Z 的值,对序列的变化趋势进行判断,计算过程参见相关文献^[30-31]。若 Z 值大于 0 时,表示序列具有上升趋势;若 Z 小于 0 时,则表示序列具有下降趋势。在确定显著性水平 α 后,可以核算 $Z_{1-\alpha/2}$ 的值。若 $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$ 时,则接受原假设,表示该序列变化趋势不显著;反之,序列变化趋势显著。当 α 为 0.1 时, $Z_{1-\alpha/2}$ 为 1.645; α 为 0.05 时, $Z_{1-\alpha/2}$ 为 1.96; α 为 0.01 时, $Z_{1-\alpha/2}$ 为 2.56。

(2) 反距离权重插值法。反距离权重法是基于“地理第一定律”的基本假设,每个采样点对插值点都具有一定的影响,用权重来表示。采样点离插值点越近,权重越大;反之,采样点离插值点越远,权重就越小。计算公式为:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

式中: $Z(s_0)$ 为 s_0 处的预测值; $Z(s_i)$ 是在 s_i 处获得的测量值; N 为预计算过程中要使用的预测点周围样

点的数量; λ_i 为预测计算过程中使用的各样点的权重, 确定权重的计算公式为:

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}} \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \tag{3}$$

式中: d_{i0} 为预测点 s_0 与各已知样点 s_i 之间的距离。 p 的最佳值通过求均方根预测误差的最小值求得, 一般情况下该值取 2^[32-33]。

(3)小波分析法。小波分析是一种涉及小波变换和小波函数分析方法, 基本原理是通过一组函数来逼近或表示一个信号。小波函数 Ψ_i 经过小波变换可以获得小波变换系数, 通过分析这些系数, 可以显示出 Ψ_i 的时频特性和局部变化特性。目前有许多小波函数可供选择, 本文采用 Morlet 小波。通过计算 Morlet 小波系数的实部, 可以得到不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布信息, 正小波系数表示研究对象在该时段为偏多期, 负值时表示研究对象在该时段为偏少期, 零值则对应着突变点。小波方差能确定一定时间系列中存在的主要时间尺度, 即对研究对象序列的演变起主要作用的周期。计算过程见参考文献^[34-36]。

3 结果与分析

3.1 不同量级降雨年降水量变化

利用淮河流域 67 个站点 1965—2016 年共 52 a

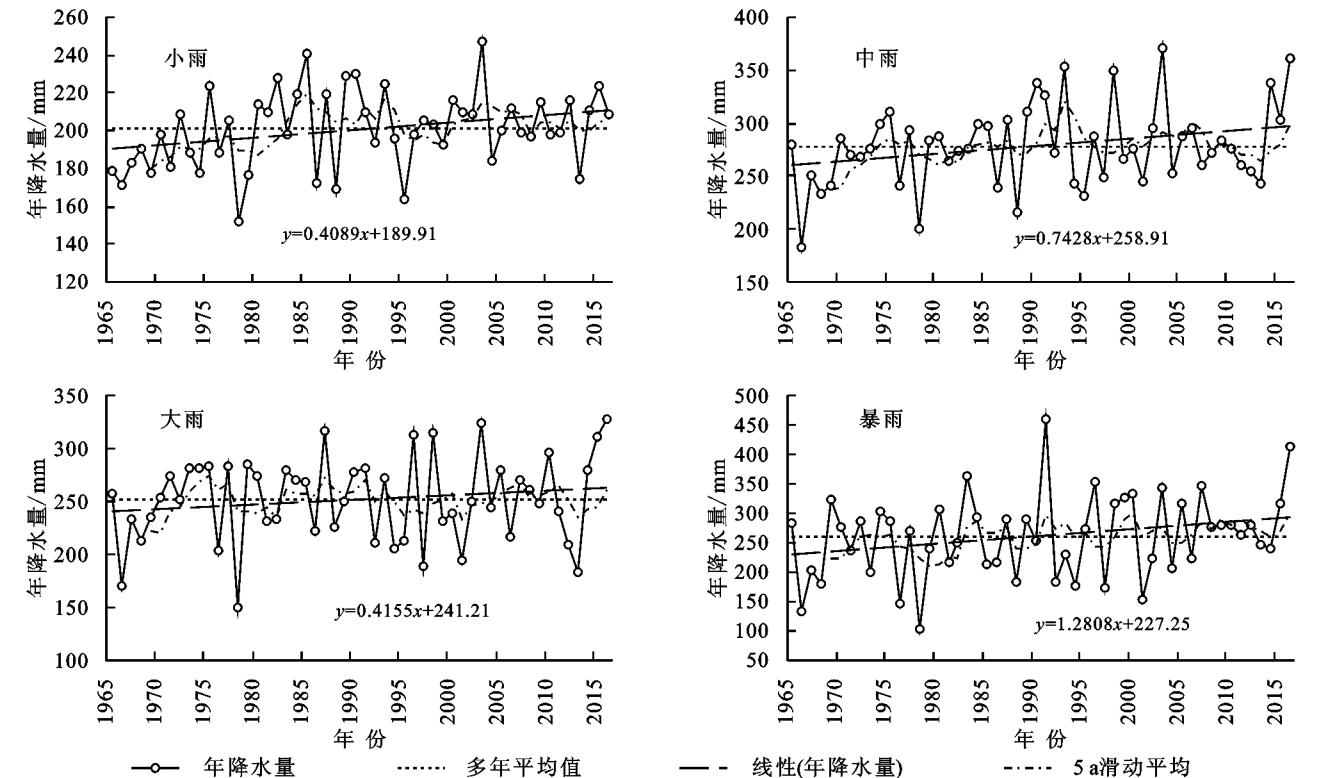


图 1 不同量级降雨年降水量变化特征

的逐日降水量计算不同量级降雨的年降水量及其 5 a 滑动平均值、气候倾向率、各等级降雨量和降雨日数多年平均值及其比例, 并由计算结果得出淮河流域不同量级降雨的年降水量变化特征。由图 1 可知, 淮河流域小、中、大和暴雨的年降水量均呈增大趋势, 其气候倾向率分别为为 4. 089, 7. 428, 4. 155, 12. 808 mm/10 a。其中, 小雨和中雨的年降水量最大值均出现在 2003 年, 分别为 247. 4, 371. 0 mm, 大雨和暴雨的年降水量最大值则出现在 2016 年和 1991 年, 分别为 327. 5, 458. 8 mm; 小、大和暴雨的年降水量最小值均出现在 1978 年, 分别为 151. 7, 149. 1, 102. 7 mm, 中雨的年降水量最小值则出现在 1966 年, 为 183. 2 mm。它们的变异系数分别为 0. 10, 0. 14, 0. 16, 0. 27, 说明暴雨年降水量的年际变化波动相对较大。另外, 各量级降雨的年降水量的 5 a 滑动平均值均呈先增大再减小的循环交替变化趋势, 且整体略呈上升趋势, 变幅较平稳。由表 1 可以看出, 整个淮河流域小、中、大和暴雨量所占总降雨量比例分别为 20. 22%, 28. 06%, 25. 41%, 26. 31%, 除中雨外, 总体呈现降雨等级越高, 其降雨量所占比例越大。从不同量级降雨的降水量和降雨日数所占比例来看, 中、大和暴雨总降雨日数在不到 30% 的情况下, 占据了 79. 78% 的雨, 而小雨的降雨日数占 70% 以上, 对应的雨量却只有 20. 22%。这说明整个淮河流域的降雨以中、大和暴雨为主, 且比较集中。

表 1 各等级降水量和降水日数多年平均值及其比例

项目	小雨	中雨	大雨	暴雨	总降雨
年均降水量/mm	200.70	278.60	252.20	261.20	992.7
占总降水量比例/%	20.22	28.06	25.41	26.31	100.0
年均雨日数/d	75.70	15.60	7.30	3.60	102.2
占总雨日数比例/%	74.07	15.27	7.14	3.52	100.0

3.2 不同量级降雨年降水量空间分布

由图 2 可知,流域小雨、中雨、大雨和暴雨的年平均降水量分别为 200.7、278.6、252.2、261.2 mm,其中小雨时,流域北部为 129.40~197.41 mm,流域南部为 197.41~333.42 mm;中雨时,流域北部为 151.28~299.40 mm,流域南部为 299.40~595.64 mm;大雨时,流

域北部为 130.07~239.90 mm,流域南部为 239.90~624.29 mm;暴雨时,流域北部为 50.48~291.60 mm,流域南部为 291.60~773.84 mm。从各站点不同量级降雨的年降水量均大致由南向北逐渐递减。其中,淮河流域小雨和中雨年降水量由南向北的递减较为平均,各级雨量带呈条带状分布。而大雨和暴雨的年平均降水量多为 184.98~294.81 mm 和 130.86~291.60 mm,且多集中在中北地区,各级雨量带无条带状分布的规律。但总体来说,淮河流域不同量级降雨的年降水量均为北少南多。

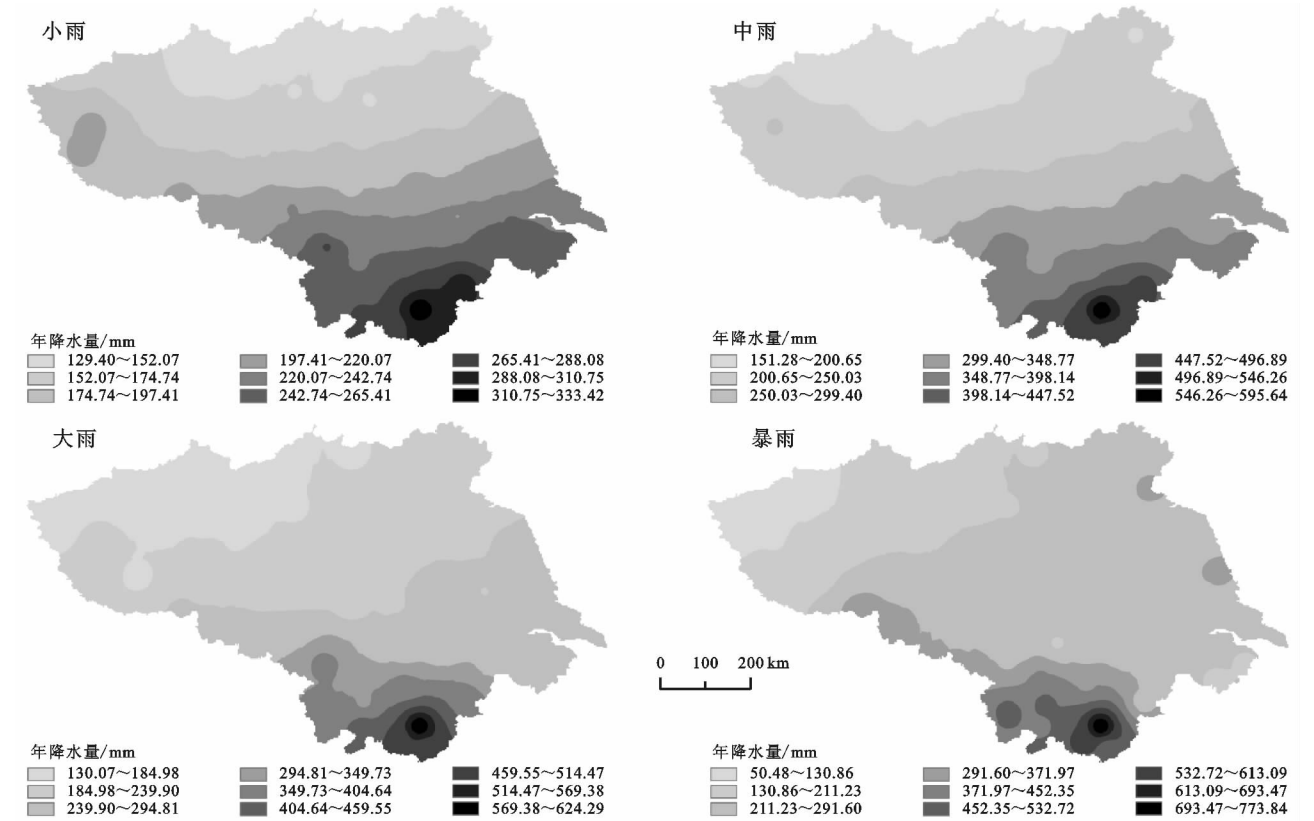


图 2 不同量级降雨年降水量空间分布

从淮河流域各站点年降水量 Mann-Kendall 统计检验的空间分布(图 3)来看,67 个站点的不同量级降雨的年降水量虽然呈现不同变化趋势,但总体呈略微上升的趋势。其中小雨的年平均降水量呈上升趋势的站点为 60 个(89.6%),有 3 个、14 个和 3 个气象站点分别通过了 0.1、0.05、0.01 的显著性水平检验,并且显著上升的站点主要分布在流域东部;年平均降水量呈下降趋势的站点主要分布在东北部,均没有通过显著性水平检验。中雨的年平均降水量中有 54 个(80.6%)站点呈上升趋势,其中 8 个、10 个和 1 个站点分别通过 0.1、0.05、0.01 的显著性水平检验;而中雨的年平均降水量呈下降趋势的站点均没有通过显著性水平检验,且大都分布在流域的

边缘地区。大雨的年平均降水量中各有 1 个站点通过了 0.1、0.01 的显著性水平检验(上升和下降),总体还是呈下降的站点较多,共 48 个(71.6%)。暴雨的年平均降水量通过显著性水平检验的站点主要位于流域东南部,有 2 个、7 个和 3 个气象站点分别通过了 0.1、0.05、0.01 的显著性水平检验;年平均降水量呈下降趋势的站点均没有通过显著性水平检验。总体上看,不同量级降雨的年降水量呈显著上升趋势的站点大都分布在流域东南部,说明该区域由降雨引起的各种风险可能在显著增加,应该引起相关部门的高度重视。

3.3 不同量级降水日数的空间分布

通过分析不同量级降雨的降水日数空间分布图

(图 4),可以得到,淮河流域小、中和大雨的降水日数低值区主要集中在流域北部,分别为 52.5~63.4, 9.6~15.1,4.0~6.8 d;而暴雨的降水日数低值区则主要集中在流域东北部,为 1.5~3.1 d。淮河流域中、大和暴雨的降水日数高值区均只出现在流域南部黄山气象站点所在的区域,分别为 31.6~37.1,15.1~17.9,7.9~9.5 d;而小雨的降水日数低值区则分布在流域南部太湖、东至、祁门和黄山等 6 个气象站点所在的区域。总体看来,淮河流域大部分地区小雨的

降水日数为 52.5~85.1 d,中雨的降水日数为 9.6~20.6 d,大雨的降水日数为 4.0~9.5 d,暴雨的降水日数为 1.5~4.7 d。不同量级降雨的降水日数和降水量空间分布一致,均具有“由南向北,依次递减”的特点。从不同量级降雨的降水日数高值区可以看出,中、大和暴雨的降水总日数远小于小雨的降水日数;结合图 2 可知,该区域内,中、大和暴雨的总降水量远大于小雨的降水量,说明降水日数高值区内以中、大和暴雨为主。

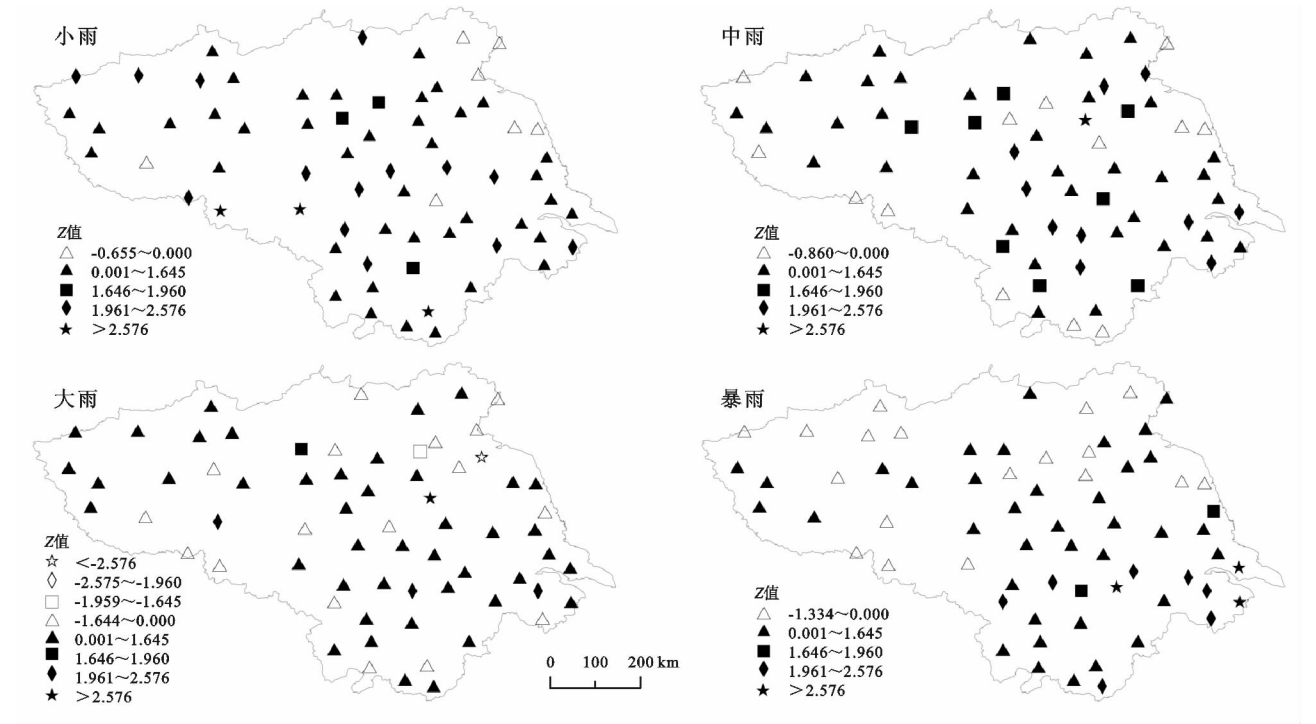


图 3 不同量级降雨年降水量长期趋势的空间格局

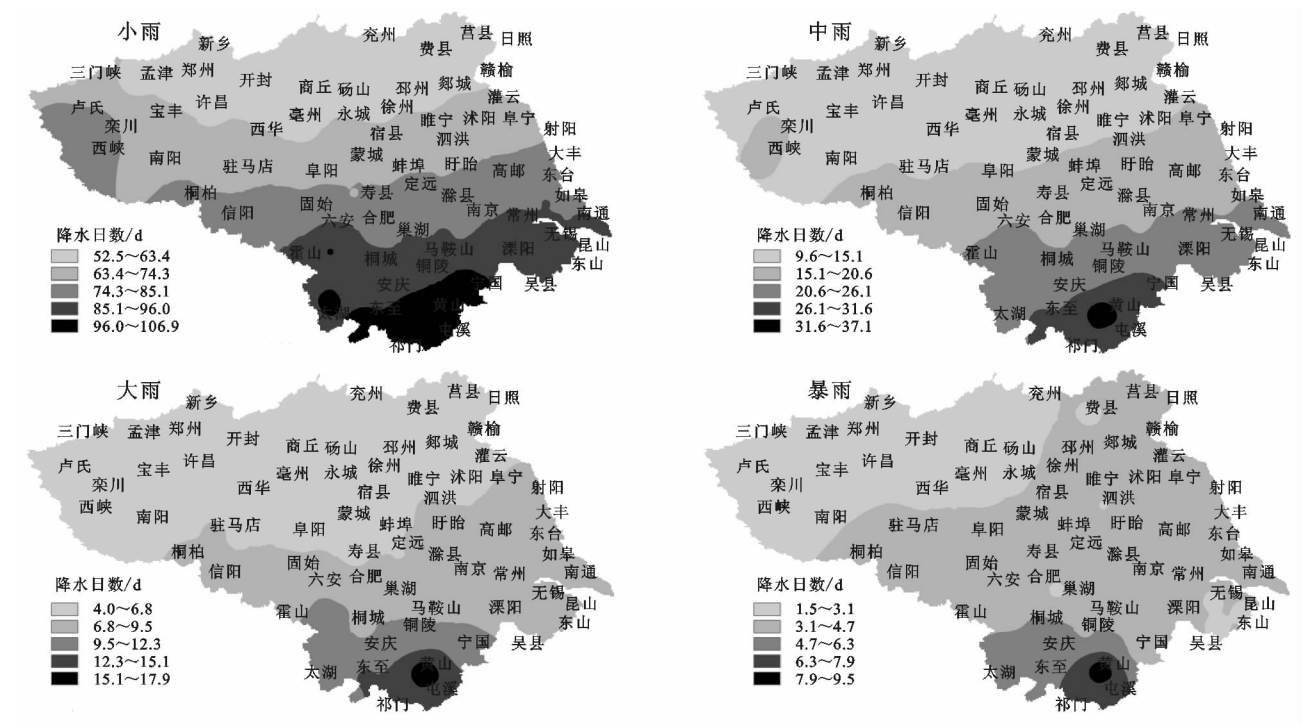


图 4 不同量级降雨的多年降水日数空间分布

3.4 太阳黑子与不同量级降雨年降水变化的关系

根据太阳黑子数年内均值和淮河流域不同量级降雨的年降水量距平值绘制图 5, 图中太阳黑子出现极值的年份与降水量极值年份并不完全对应。1979 年以前, 太阳黑子变化极值年与中雨和大雨年降水量变化极值年相对应, 而小雨和暴雨年降水量变化极值年则滞后太阳黑子变化极值年 1 a。1979 年以后, 太阳黑子和降水量变化关系相对复杂, 各量级降雨年降

水量变化极值年则滞后太阳黑子变化极值年 2~4 a。总体来看, 1979 年前, 在太阳黑子的高值区, 淮河流域不同量级降雨的年降水量负距平年份多; 在太阳黑子低值区, 淮河流域小雨和中雨的年降水负距平年份多, 大雨和暴雨的年降水正距平年份多; 1979 年后, 在太阳黑子的高值区, 淮河流域不同量级降雨的年降水量正距平年份多; 在太阳黑子低值区, 淮河流域不同量级降雨的年降水量负距平年份多。

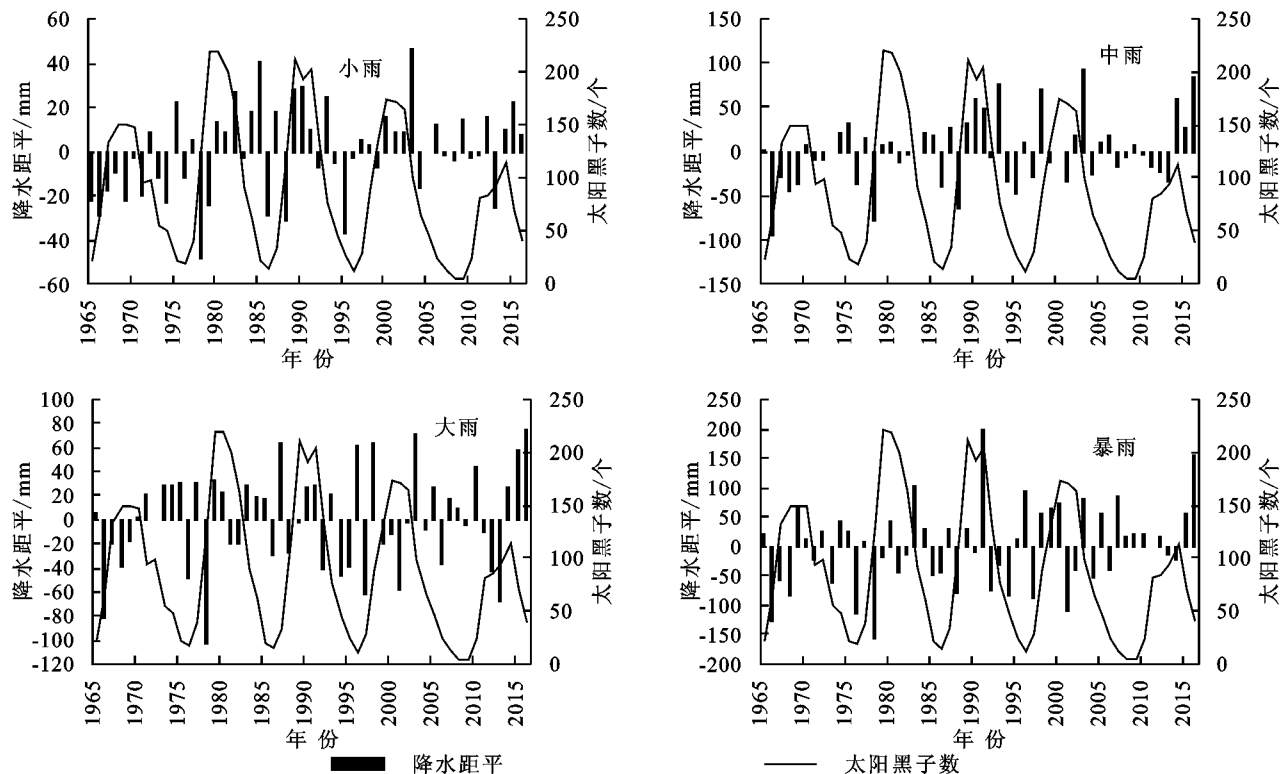


图 5 年均太阳黑子相对数与淮河流域年降水量距平的关系

3.5 基于 Morlet 小波的不同量级降雨年降水量和太阳黑子数的振荡特征

对淮河流域 1965—2016 年不同量级降雨年降水量和太阳黑子数的时间序列分别进行 Morlet 小波分析, 可以看出淮河流域不同量级降雨年降水量和太阳黑子数在不同时间段呈现出各种振荡周期 (图 6—10)。从图 6A 中可以看出, 小雨的年降水量在 18~32 a 尺度上周期明显, 期间年降水量变化经历了小—大—小—大—小。从图 6B 可以看出, 小雨的年降水量在 31 a 左右尺度下的小波方差极值表现最为显著, 为第 1 峰值, 说明淮河流域小雨的年降水量在 31 a 左右的周期振荡最强, 为主周期, 即淮河流域小雨的年降水量在 31 a 左右会经历一个剧烈变化的过程; 其次存在 13 a 左右的次周期; 再弱一些的是 7, 4 a 左右的周期。如图 7A, 8A 所示, 中雨和大雨的年降水量的振荡周期相同, 在 20~26 a 尺度上震荡明显, 期间降水量变化经历了小—大等多个变化过程。

由图 7B, 8B 同样可知, 中雨和大雨的年降水量在 24 a 左右尺度下的小波方差极值表现最为显著, 所以它们的主要周期在 24 a 左右; 二、三和四主周期也是相同的, 分别在 13, 7, 4 a 左右。如图 9A 所示, 暴雨的年降水量在 8~15 a 和 25~32 a 尺度上震荡明显。由图 9B 可知, 暴雨的年降水量在 14 a 左右尺度下的小波方差极值表现最为显著, 所以它的主要周期为 14 a 左右, 其次存在 20 a 左右的周期, 再弱一些的是 6, 4 a 左右的周期。由图 10A 可知, 太阳黑子数在 10~16 a 尺度上震荡明显, 而在 25~32 a 尺度上震荡不是很明显。从图 10B 可以看出, 太阳黑子数在 16 a 左右尺度下的小波方差极值表现最为显著, 为第 1 峰值, 说明太阳黑子数在 16 a 左右的周期振荡最强, 为主周期; 其次存在 29 a 左右的次周期。对比分析可知, 淮河流域暴雨的年降水量和太阳黑子数都在 15 a 左右尺度上震荡明显, 虽然尺度上不能完全对应, 但有交叉, 说明暴雨的年降水量和太阳黑子数存在相似

的振荡周期变化。暴雨是引发旱涝的原因之一,郑晓东等^[37]通过分析淮河流域旱涝指数与太阳黑子数之间的小波系数关系,发现淮河流域旱涝与太阳黑子周

期关系密切,这与本文研究结论基本一致。由此可见,淮河流域暴雨的年降水量与太阳黑子活动有一定的对应关系。

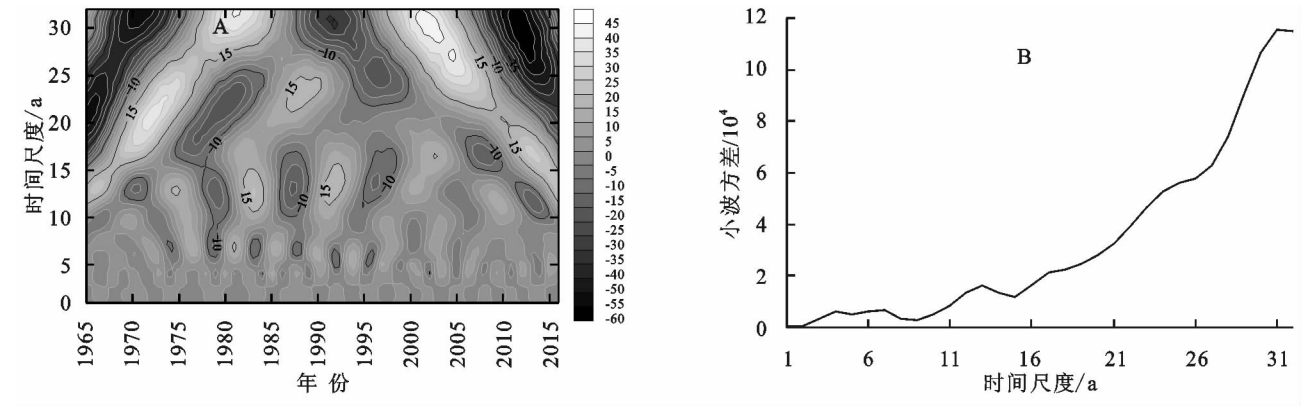


图 6 淮河流域小雨年降水量小波变化实部值和小波方差

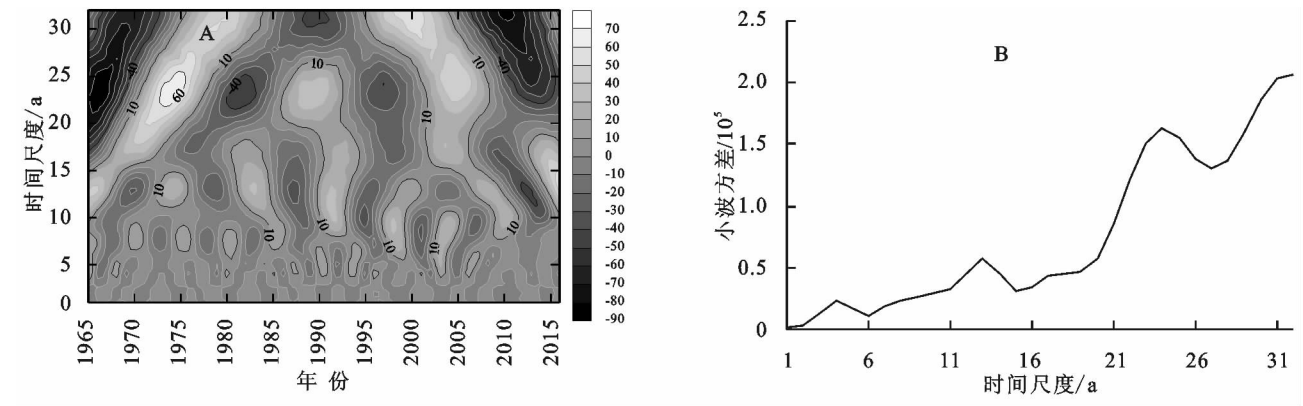


图 7 淮河流域中雨年降水量小波变化实部值和小波方差

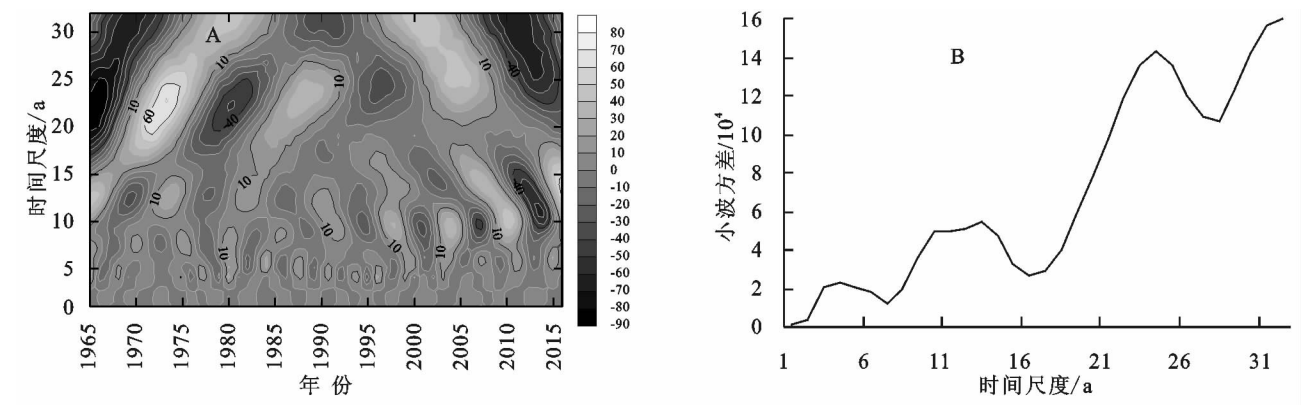


图 8 淮河流域大雨年降水量小波变化实部值和小波方差

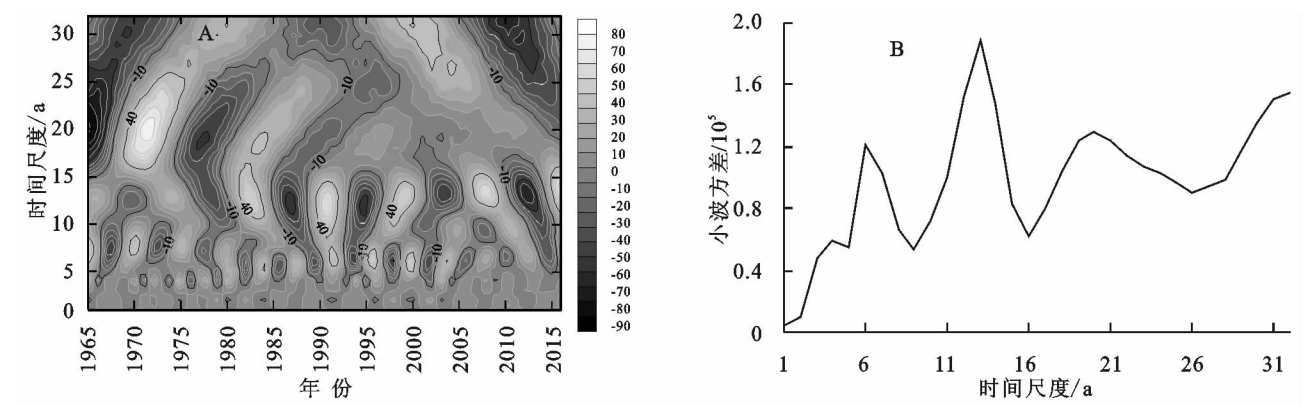


图 9 淮河流域暴雨年降水量小波变化实部值和小波方差

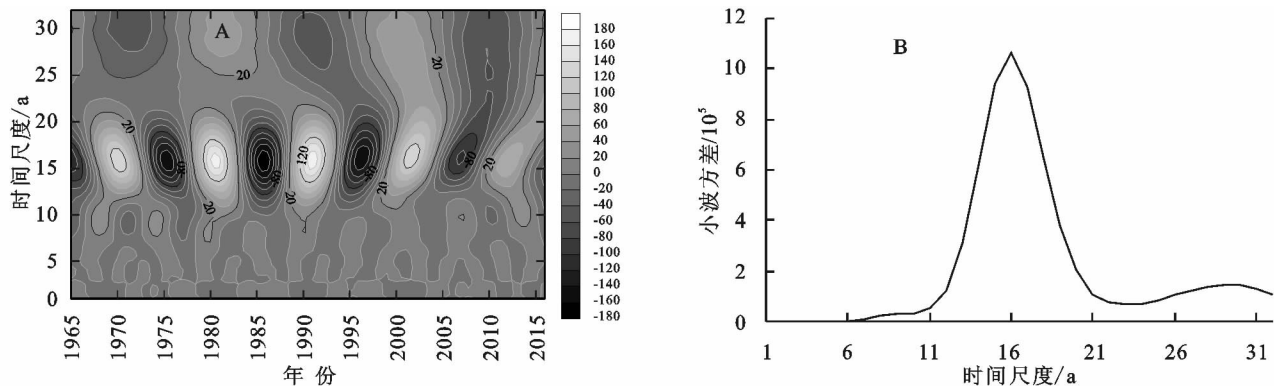


图 10 太阳黑子数小波变化实部值和小波方差

4 结论

(1) 淮河流域小、中、大和暴雨的年降水量气候倾向率分别为 4.089, 7.428, 4.155, 12.808 mm/10 a, 均呈增大趋势; 它们的变异系数分别为 0.10, 0.14, 0.16, 0.27, 说明暴雨年降水量的年际变化波动相对较大。

(2) 整个淮河流域中、大和暴雨总降雨日数在所不到 30% 的情况下, 占据了 79.78% 的雨, 而小雨的降雨日数占 70% 以上, 对应的雨量却只有 20.22%。可知, 整个淮河流域的降雨以中、大和暴雨为主, 且比较集中。

(3) 淮河流域小雨和中雨年降水量由南向北的递减较为平均, 各级雨量带呈条带状分布。而大雨和暴雨的年降水量多为 184.98~294.81 mm 和 130.86~291.60 mm, 且多集中在中北地区, 各级雨量带无条带状分布的规律。淮河流域北部和东北部是各量级降雨日数的低值区, 流域南部黄山气象站点所在区域是各量级降雨日数的高值区。不同量级降雨的降水日数和降水量空间分布一致, 均具有“由南向北, 依次递减”的特点。

(4) 1979 年以前, 太阳黑子变化极值年与中雨和大雨年降水量变化极值年相对应, 而小雨和暴雨年降水量变化极值年则滞后太阳黑子变化极值年 1 a。1979 年以后, 太阳黑子和降水量变化关系相对复杂, 小、中、大和暴雨年降水量变化极值年则滞后太阳黑子变化极值年 2~4 a。通过 Morlet 小波分析可知, 淮河流域暴雨的年降水量和太阳黑子数都在 15 a 左右尺度上震荡明显, 虽然尺度上不能完全对应, 但有交叉, 说明暴雨的年降水量和太阳黑子数存在相似的振荡周期变化。

参考文献:

[1] 杨东, 程军奇, 李小亚, 等. 甘肃黄土高原各级降水和极端降水时空分布特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1539-1547.

[2] 赵平伟, 郭萍, 李成武, 等. 云南不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12): 2135-2141.

[3] 田莉娟, 薛丽芳, 杨慧, 等. 近 60 年来南四湖流域降水变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 201-206.

[4] 郑泳杰, 张强, 陈晓宏. 1961—2005 年淮河流域降水时空演变特征分析[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2015, 61(3): 247-254.

[5] 王月, 张强, 张生, 等. 淮河流域降水过程时空特征及其对 ENSO 影响的响应研究[J]. 地理科学, 2016, 36(1): 128-134.

[6] 赵一飞, 邹欣庆, 张勃, 等. 黄土高原甘肃区降水变化与气候指数关系[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1325-1332.

[7] 芦佳玉, 延军平, 曹永旺. 1961—2015 年西南地区降水及洪涝指数空间分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1711-1720.

[8] 王怀军, 潘莹萍, 陈忠升. 1960—2014 年淮河流域极端气温和降水时空变化特征[J]. 地理科学, 2017, 37(12): 1900-1908.

[9] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960—2013 年秦岭—淮河流域极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 354-363.

[10] 余敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近 50 年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] You Qinglong, Kang Shichang, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961—2003[J]. Climate Dynamics, 2011, 36(11/12): 2399-2417.

[12] 金小霞, 孙燕, 李超, 等. 淮河流域近 50 年降水异常及其大尺度环流特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 609-616.

[13] 张蓓蓓, 王朋, 张辉, 等. 近 63 a 安康地区降水与太阳黑子活动的相关性分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1336-1343.

[14] 夏军, 石卫, 雒新萍, 等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 279-286.

[15] Fu C, James A L, Wachowiak M P. Analyzing the

- combined influence of solar activity and El Niño on streamflows across Southern Canada [J]. Water Resources Research, 2012, 48(5): W05507-W05525.
- [16] 曹永强,刘佳佳,高璐. 近 54 年来辽西北地区降水与太阳黑子关系研究[J]. 地理科学, 2015, 35(8): 1027-1032.
- [17] 唐洁. 基于 EEMD 的陕西降水量与太阳黑子活动关系分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 154-159.
- [18] 王涛,霍彦峰,罗艳. 近 300 a 来天山中西部降水与太阳活动的小波分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 708-717.
- [19] 张肖南,史兴民,杨尚英. 西安夏、秋季降水与太阳黑子的关系[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 485-490.
- [20] 程国生,苍中亚,杜亚军,等. 江淮梅雨长期变化对太阳活动因子的响应分析[J]. 高原气象, 2015, 34(2): 478-485.
- [21] 王胜,谢五三,唐为安,等. 1961—2009 年淮河流域昼夜降水变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2881-2887.
- [22] 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.
- [23] 高超,陈实,翟建青,等. 淮河流域旱涝灾害致灾气候阈值[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 36-44.
- [24] 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.
- [25] 崔玉娟,张玉洁,方修琦,等. 1644—1949 年长江三角洲地区 5 种洪涝致灾因子组合特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(4): 697-704.
- [26] Li X, Jiang F, Li L, et al. Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China [J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(11): 1679-1693.
- [27] 李鹏飞,刘文军,赵昕奕. 京津冀地区近 50 年气温、降水与潜在蒸散量变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 137-143.
- [28] 刘晓婉,徐宗学,彭定志. 雅鲁藏布江流域 NDVI 与降水量时空分布特征及其相关性分析[J]. 中国农村水利水电, 2018(1): 89-95.
- [29] 姚梦婷,高超,陆苗,等. 1959—2008 年淮河流域极端径流的强度和频率特征[J]. 地理研究, 2015, 34(8): 1535-1546.
- [30] 徐宗学,张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 27-34.
- [31] 赵丽娜,宋松柏,郝博,等. 年径流序列趋势识别研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(3): 194-198, 205.
- [32] 徐超,吴大千,张治国. 山东省多年气象要素空间插值方法比较研究[J]. 山东大学学报: 理学版, 2008, 43(3): 1-5.
- [33] 蔡福,于贵瑞,祝青林,等. 气象要素空间化方法精度的比较研究: 以平均气温为例[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 173-179.
- [34] 姜晓艳,刘树华,马明敏,等. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 354-362.
- [35] 李森,夏军,陈社明,等. 北京地区近 300 年降水变化的小波分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1001-1011.
- [36] 邹春霞,申向东,李夏子,等. 小波分析法在内蒙古寒旱区降水量特征研究中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 113-116.
- [37] 郑晓东,鲁帆,马静. 近 50 年淮河流域旱涝与太阳黑子的关系研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 1-4.

~~~~~

(上接第 86 页)

- [7] 任立良,沈鸿仁,袁飞,等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 492-500.
- [8] 李玉平,韩添丁,沈永平,等. 天山南坡清水河与阿拉沟流域径流变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 127-135.
- [9] 韩知明,贾克力,杨芳,等. 基于 Morlet 小波的呼伦湖流域降水多时间尺度分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 160-166.
- [10] 康磊,刘世荣,刘宪钊. 岷江上游水文气象因子多尺度周期性分析[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1253-1262.
- [11] 张健,李同昇,张俊辉,等. 1933—2012 年无定河径流突变与周期特征诊断[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 475-480.
- [12] 张晓晓,张钰,徐浩杰. 1961—2010 年白龙江上游水文气象要素变化规律分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(2): 172-178.
- [13] 高亚军,赫晓慧,张展,等. 1956—2009 年皇甫川流域不同历时最大暴雨量周期性和趋势性分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 251-253.
- [14] 杨立哲,钱虹,郝璐. 锡林河近 50 年径流变化特征及其影响因素分析[J]. 草业科学, 2015, 32(3): 303-310.
- [15] 李永格,李宗省,冯起. 1956—2013 年曹家湖流域径流深变化[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 200-209.
- [16] 张洪波,李哲浩,席秋义,等. 基于改进过白化的 Mann-Kendall 趋势检验法[J]. 水力发电学报, 2018, 37(6): 34-46.
- [17] 宋小园,朱仲元,张圣微,等. 锡林河流域气候变化特征诊断分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 151-158.
- [18] 焦玮,朱仲元,宋小园,等. 近 50 年气候和人类活动对锡林河流域径流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 904-909.