

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.005.

王远宁, 吴灏, 王盼盼, 等. 1960—2017年江淮地区降水的时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 236-244, 255.

WANG Yuanning, WU Hao, WANG Panpan, et al. Spatiotemporal Variability of Precipitation in the Jianghuai Region During 1960—2017[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 236-244, 255.

1960—2017年江淮地区降水的时空变化特征

王远宁, 吴灏, 王盼盼, 彭卓越

(扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

摘要: [目的]探究江淮地区降水量的时空变化特征,并在此基础上研究了大气环流因子对降水量的影响,为江淮地区水资源管理和灾害防治提供科学基础。[方法]基于1960—2017年江淮地区15个气象站点的逐日降水及大气环流数据,采用Mann-Kendall趋势检验、累计距平曲线、小波分析、交叉小波变换及小波相干方法,揭示了江淮地区时空变化特征及影响该地区降水量的因素。[结果]江淮地区降水量存在多尺度的周期性震荡,其中冬季降水量表现为显著增加趋势($p < 0.05$),经历最少次偏多—偏少过程,且存在55.6 a的主周期;年、夏季降水量呈不显著增加趋势,经历最多次偏多—偏少过程,但其在该地区南部多呈显著性变化;春、秋季降水量呈不显著下降趋势,全地区不存在显著性变化站点。该地区降水量与大气环流指数在年际尺度上均存在一定的共振周期,东亚夏季风(EASM)对其影响最显著;南方涛动指数(SOI)对其影响最不显著。[结论]江淮地区降水在年际及季节性尺度上时空变化特征具有明显差异,且在年际尺度上受大气环流一定的显著影响,研究结果能为该地区科学制定水资源规划、预防气候型风险、达到生态平衡提供理论支撑。

关键词:降水; 时空变化; 大气环流; 江淮地区

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0236-09

Spatiotemporal Variability of Precipitation in the Jianghuai Region During 1960—2017

WANG Yuanning, WU Hao, WANG Panpan, PENG Zhuoyue

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: [Objective] The aim of the study is to explore the spatial and temporal variation characteristics of precipitation in the Jianghuai region, and on this basis, the influence of atmospheric circulation factors on precipitation was investigated to provide a scientific basis for water resources management and disaster prevention and control in the Jianghuai region. [Methods] Based on daily precipitation and atmospheric circulation data from 15 meteorological stations in the Jianghuai region from 1960 to 2017, this study used Mann-Kendall trend test, cumulative distance level curve, wavelet analysis, cross wavelet transform and wavelet coherence methods to reveal the spatial and temporal variation characteristics of the precipitation and the factors influencing the precipitation in the Jianghuai region. [Results] The precipitation in Jianghuai region had a multi-scale periodic oscillation, in which winter precipitation showed a significant increasing trend ($p < 0.05$) and experienced the least over-under process, and there was a main cycle of 55.6-year. Annual and summer precipitation showed a non-significant increasing trend and experienced the most overunder process, but it mostly showed significant changes in the southern part of the region. The precipitation in spring and autumn showed an insignificant downward trend, and there were no significant change stations in the whole

收稿日期: 2022-06-06

修回日期: 2022-07-04

资助项目: 国家自然科学基金(52009118); 冰冻圈科学国家重点实验室开放基金(SKLCS-OP-2022-11); 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX22_1762)

第一作者: 王远宁(1999—), 男, 江苏扬州人, 在读硕士研究生, 研究方向为农田排水。E-mail: wyn19991021@163.com

通信作者: 吴灏(1986—), 男, 山东枣庄人, 博士, 讲师, 主要从事农田排水研究。E-mail: wu_hao@yzu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

region. There was a certain resonance cycle between precipitation and the Atmospheric Circulation Index on an interannual scale, with the East Asian Summer Monsoon (EASM) having the most significant influence and the Southern Oscillation Index (SOI) having the least significant influence. [Conclusion] The spatial and temporal characteristics of precipitation in the Jianghuai region varied significantly on interannual and seasonal scales, and were significantly influenced by the atmospheric circulation on interannual scales. The results of this study can provide theoretical support for scientific water resources planning, prevention of climate-based risks and achievement of ecological balance in the region.

Keywords: precipitation; spatiotemporal variations; atmospheric circulation; Jianghuai region

全球气候变暖加速了全球及区域水循环过程,导致全球及区域性旱、涝、旱涝交替等自然灾害频发。降水是导致旱、涝、旱涝交替等灾害发生的主要原因之一,降水量的大小、降水的持续时间、降水发生的范围等对自然灾害的损失程度有重要的影响^[1]。IPCC (2021)第六次评估报告第一工作组指出预计未来 20 a 全球温升将达到 1.5℃^[2]。气温增加导致大气中水汽含量、风速、饱和水汽压等发生改变^[3-5],影响降雨的时空变化特征^[6],进而引发严重的洪涝、水土流失等自然灾害^[7-9],对农业生产、生态系统以及社会发展构成巨大威胁^[10-11]。因此,研究降水时空变化特征及影响因子对于防灾减灾及预测未来可能出现的气候型风险具有重要意义。

降水是区域气候变化最敏感、最直接的因素之一^[12]。在全球变暖背景下,受大气环流、区域地形等的影响,降水的变化模式更加复杂且区域特征变化明显^[13],此变化受到国内外学者的广泛关注。在全球尺度方面,Gu 等^[14]研究指出,近 40 年全球平均降水变化趋势不显著,但是热带地区的降水有所增加,北半球中纬度降水有所减小。Gedefaw 等^[15]调查埃塞俄比亚阿姆哈拉州的年、季节性降水变化,研究得出在该州北部年降水增加,并且只有夏季降水量呈上升趋势。此外,Yang 等^[16]研究发现在 1950—2012 年加拿大降水与大气环流指数有强烈的远程联系。在中国,受地形及多种环流模式的影响,不同地区降水变化差异显著^[17-20]。杜懿等^[21]基于 1979—2018 年降水数据,研究发现我国年均降水量呈显著增长趋势。Zhai 等^[22]调查发现年降水量在中国东北南部、华北和四川盆地明显减少,但在西部、长江流域和东南沿海明显增加。郭嘉兵等^[23]研究 1961—2018 年甘肃省降水特征,甘肃省年降水量自东向西呈减小趋势,周期尺度显著,以 28 a 震荡最强。

江淮地区是中国重要的农业区之一,人口众多,工农业发达,属于重点防洪保护区;水资源对该地区农业生产至关重要,而降水是该地区水资源重要来源

之一^[24-26],受气候变暖的影响,水旱灾害频发。潘光波等^[24]认为江淮地区年际、季节性降水变化较大,且降水趋势南北差异明显。王静等^[27]通过广义 Pareto 分布,发现江淮地区中东部持续性降水。龙彦羲等^[28]借助于圆形统计、ArcGIS 空间分析等方法,发现江淮地区全年极端降水发生时间由南向北推迟,且空间差异性较大。但是目前研究时间序列较短且集中在夏季时段,并且对多种时间尺度下降水变化特征间的联系较少,此外大气环流对降水的响应关系是不对称的,不能表述为线性行为。基于此,本文应用 1960—2017 年江淮地区逐日降水数据,采用 M-K 检验法、小波分析、累积距平、交叉小波变换及小波相干法分析江淮地区时空分布特征,及降水与大气环流关系,这将有助于理解气候与水循环间的关系,可为该区水资源管理、制定合理的灌溉排水方案和种植结构调整提供科学的依据。

1 研究区概况

江淮地区为长江流域与淮河流域之间的地带(29°—35°N,114°—122°E),国土面积约为 3.1×10^4 km²(图 1)。研究区域属亚热带季风性气候,气候温暖湿润^[24]。多年平均降水量为 1 100 mm,最大降水量为 1 600 mm,最小降水量为 584 mm,其中降雨量的 47%集中于 6—8 月份。多年平均气温为 14.8℃,最高气温为 39℃,最低气温为 -11℃^[29]。多年平均风速为 3.2~3.5 m/s。冬季盛行偏北风,夏季盛行偏南风。该地区是中国主要的粮食供应地之一,受季风影响,旱、涝、渍灾害频发,严重影响农业生产。

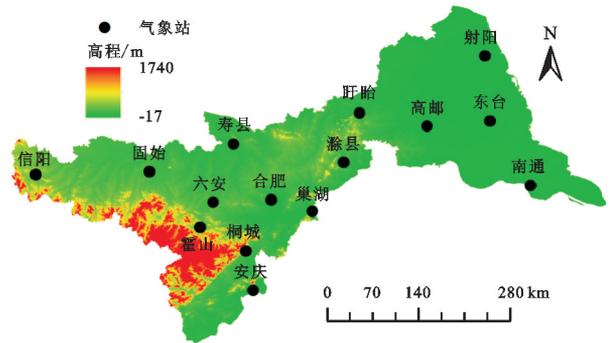
2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所使用的降水资料来自国家气象科学数据中心(CMA)(<http://ncc.cma.gov.cn>),时间序列为 1960—2017 年(表 1)。对于台站缺失的数据采用线性内插法进行插补,所有数据经过 RclimDex 质量控制,

且均通过一致性和极值检验,以保证其稳定性、均一性。四季的划分为春季(3—5月),夏季(6—8月),秋季(9—12月),冬季(12—1月)。为探究大气环流对降水的影响,本文调查了6个大气环流指数与降水的联系。本研究所选取的大气环流指数为:东亚夏季风[East Asian Summer Monsoon, EASM(<http://ljp.gcess.cn/dct/page/1>)]; 北极涛动 [Atlantic Oscillation, AO (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)]; 北大西洋涛动 [North Atlantic Oscillation, NAO(<http://ljp.gcess.cn/dct/page/1>)]; 太平洋涛动 [Pacific Decadal Oscillation, PDO (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/pdo.data>)]; 海洋尼诺指数 [Oceanic Niño Index, ONI(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)]; 南方涛动指数 [Southern Oscillation Index, SOI(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)].

pc.ncep.noaa.gov/); 南方涛动指数 [Southern Oscillation Index, SOI(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)].



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2016)1605号的标准地图制作,地图未做修改,下同。

图1 江淮地区及气象站位置

表1 江淮地区气象站分布

台站名称	北纬/ (°)	东经/ (°)	海拔/ m	开始 年月	截止 年月	最大值/ mm	最小值/ mm	平均值/ mm	中位数/ mm	标准差/ mm
信阳	32.13	114.05	1145	1959-01	2017-12	276.2	0	3.0	0	10.8
盱眙	32.98	118.52	408	1959-01	2017-12	233.2	0	2.8	0	10.3
射阳	33.77	120.25	20	1959-01	2017-12	263.2	0	2.7	0	10.1
固始	32.17	115.62	429	1959-01	2017-12	206.9	0	2.9	0	10.3
寿县	32.55	116.78	227	1959-01	2017-12	259.6	0	2.5	0	9.4
滁县	32.30	118.30	275	1959-01	2017-12	351.7	0	2.9	0	10.5
高邮	32.80	119.45	54	1959-01	2017-12	211.6	0	2.8	0	10.0
东台	32.87	120.32	43	1959-01	2017-12	314.3	0	2.9	0	10.6
南通	31.98	120.88	61	1959-01	2017-12	287.1	0	3.0	0	10.1
六安	31.75	116.50	605	1959-01	2017-12	165.1	0	3.0	0	9.5
霍山	31.40	116.32	864	1959-01	2017-12	314.6	0	3.7	0	11.0
桐城	31.07	116.95	854	1959-01	2017-12	333.0	0	3.5	0	11.7
合肥	31.78	117.30	270	1959-01	2017-12	238.4	0	2.7	0	8.9
巢湖	31.62	117.87	224	1959-01	2017-12	291.0	0	3.0	0	10.0
安庆	30.53	117.05	198	1959-01	2017-12	300.3	0	3.9	0	12.7

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 趋势分析 非参数 Mann-Kendall 检验被广泛应用于水文变化趋势研究,不需要样本遵循一定分布。原假设(H_0)假定时间序列中没有明显的增加或减少趋势,而根据备选假设,时间序列有明显的变化趋势。本文采用 Mann-Kendall 检验对降水量的时间序列进行趋势分析。检验统计量 S 计算如下式:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(S_j - S_k) \quad (1)$$

式中: Sgn 为符号函数,计算公式为:

$$\text{Sgn}(S_j - S_k) = \begin{cases} 1 & (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: X_j 和 X_k 为时间序列数据。

如果数据集是完全独立分布的,则 S 的平均值为零, S 的方差如下:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{c=1}^p t_c(t-1)(2t+5)}{18} \quad (3)$$

式中: n 为数据集长度; c 为重复数个数; p 为唯一数数量; t_c 为每个重复数重复的次数。对于长时间序列,统计值 S 可以转为统计量 Z ,公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

在双边的趋势检验中,在给定的 α 置信水平上,

如果 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 则原假设是不可接受的, 即在 α 置信水平上, 时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计量 Z , 大于 0 时是上升趋势; 小于 0 时是下降趋势。

2.2.2 Sen 斜率估计 数据时间序列的趋势度通过 Theil-Sen's 估计量进行估算。Yue 等^[30]认为 Theil-Sen's 估计量能够稳健地估计时间序列数据的趋势量级大小, 被广泛应用于识别水文时间序列的线性趋势。Sen 趋势度计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad j > i \quad (5)$$

式中: x_j 和 x_i 为时间序列数据。 β 大于 0 表示时间序列呈现上升趋势; β 小于 0 表示时间序列呈现下降趋势。

2.2.3 累计距平 累积距平是一种常用的直观判断气候变化趋势的方法。对于气候要素序列, 其某一时刻 t 的累积距平表示为:

$$x = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}), \quad (t=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

式中: x_i 为第 i 年的降水量; \bar{x} 为整个时间序列平均降水量。

在累计距平曲线变化中, 曲线上升表示累计距平增加, 亦为降水量处于持续偏多状态; 反之, 降水量处于持续偏少状态。

2.2.4 小波分析 本研究选择以 Morlet 为基函数的小波分析法对年、季节降水量进行周期性研究。

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (8)$$

式中: $\Psi(t)$ 为基小波函数; i 为虚数; e 为自然底数; t 为时间; ω_0 为无量纲频率。

对于给定的时间序列和 Morlet 小波, 其小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (9)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 为尺度参数; b 为平移参数; $\Psi[(t-b)/a]$ 为复共轭函数。

通过小波变换方程得到不同时间尺度的所有小波系数在域上的积分为小波方差, 可用其确定不同时间尺度上的主周期:

$$\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (10)$$

2.2.5 交叉小波变换及小波相干 为了研究时频空间两个时间序列之间的关系, Torrence 和 Compo 引入了交叉小波和小波相干^[31]。两个时间序列 x_n 和 y_n 的交叉小波为(XWT)定义为:

$$W_n^{xy} = W_n^x W_n^{y*} \quad (11)$$

交叉小波谱密度可以定义为 $|W_{xy}|$ 。XWT 能反

映两个时间序列具有的高能量区域, 在时频空间中找到时间序列里周期性强度一致的区域, 一般反映序列间的“共有周期”强度。小波相干(WTC)在时频空间中找到两个时间序列共同变化的区域(但不一定具有高功率), 更侧重两时间序列在低能量区的相关性^[12]。小波相干定义为:

$$R_n^2(a, b) = \frac{|U[(a, b)^{-1} W_n^{xy}(a, b)]|^2}{U[(a, b)^{-1} |W_n^x(a, b)|^2] \cdot U[(a, b)^{-1} |W_n^y(a, b)|^2]} \quad (12)$$

式中: S 为平滑算子。该定义与传统的相关系数是十分相似的, 因此可以将其视为时频空间中局部相关系数。

3 结果与分析

3.1 江淮地区降水量趋势变化特征

Mann-Kendal 趋势分析显示江淮地区年降水量呈不显著增加趋势, 增加速率为 20.1 mm/10 a; 多年平均降水量为 1 100.5 mm, 降水量最大和最小值为 1 685.0, 596.3 mm, 分别出现在 1991 年、1978 年, 相差 3 倍左右, 极差值几乎等于年平均值, 年际间变化差异较大(表 2, 图 2)。

表 2 1960—2017 年江淮地区降水趋势的检验结果

时间尺度	变化速率/(mm/10 a)	统计量
年	20.1	1.56
春	4.5	-0.24
夏	18.8	1.69
秋	1.8	-0.10
冬	12.5	3.42*

注: * 表示通过 0.05 显著性检验。

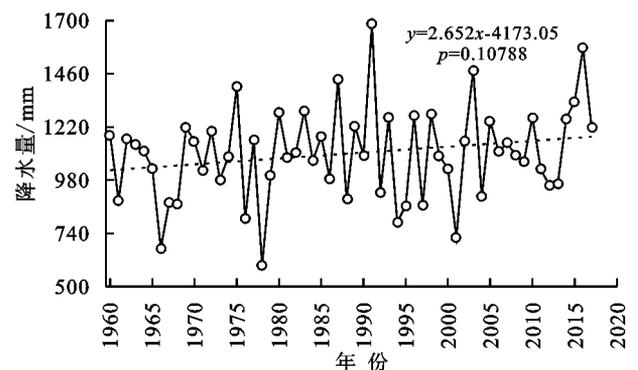


图 2 1960—2017 年江淮地区年降水量趋势变化

冬季降水量呈显著增加趋势 ($p < 0.05$), 增加速率 12.5 mm/10 a, 最大值出现在 2003 年 (203.2 mm), 最小值出现在 1968 年 (19 mm) (表 2, 图 3D)。夏季降水量呈不显著增加趋势, 增加速率为 18.8 mm/10 a, 最大值出现在 1991 年 (1 018 mm), 最小值出现在 1978 年 (220.4 mm) (表 2, 图 3B)。春季降水量和秋季降水量呈不显著下降趋势, 下降速率分别为 4.5, 1.8 mm/10 a; 春季最大降水量出现在 1964 年

(443.4 mm),最小出现在2001年(109.7 mm);秋季最大降水量出现在2016年(495.3 mm),最小值出现在1995年(78.9 mm)(表2,图3A,C)。春、夏、秋和冬季

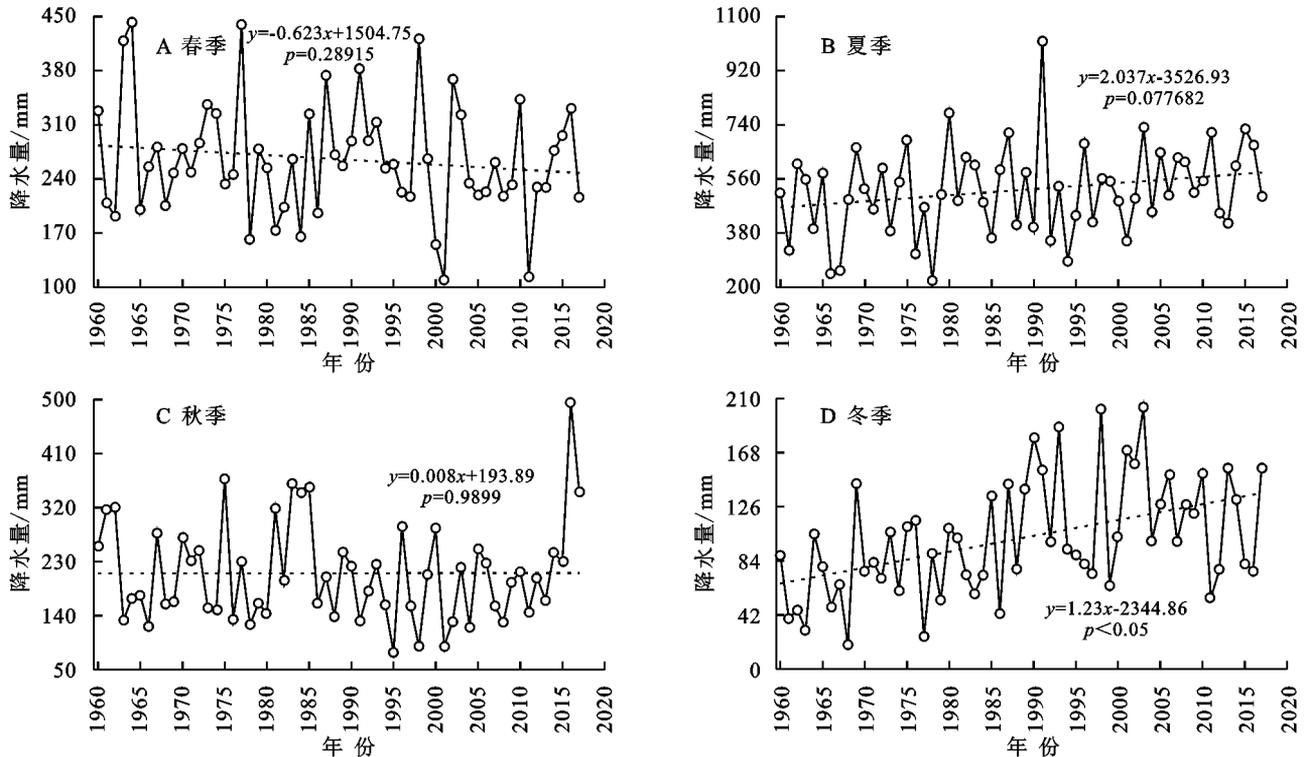


图3 1960—2017年江淮地区降水量的四季趋势变化

不同时间尺度,降水量累积距平值如图4—5所示。在年尺度,1960—1968年、1975—1979年、1993—2001年曲线呈下降趋势,在此期间降水量处于持续偏少状态;1968—1975年、2001—2013年曲线趋势变化较小,降水量基本无显著变化;1979—1993年、2013—2017年曲线呈上升趋势,表明降水量持续增加(图4)。在季节尺度,春季降水量在1960—1977年、1986—1998年曲线呈上升趋势,为多雨阶段;1977—1986年、2000—2017年曲线呈下降趋势,为少雨阶段(图5A)。夏季降水量在20世纪60—70年代、90年代曲线呈下降趋势,为少雨阶段;80年代和21世纪呈上升趋势,为多雨阶段(图5B)。秋季降水量在1960—1980年、1985—2013年曲线呈下降趋势,为少雨阶段;1980—1985年、2013—2017年呈上升趋势,为多雨阶段(图5C)。冬季降水量在1960—1986年曲线呈下降趋势,为少雨阶段;1986—2017则呈上升趋势,为多雨阶段(图5D)。此外,年与夏季降水累积距平非常相似,在降水持续偏多偏少状态的时间段高度吻合,经历偏多—偏少的次数以及发生的转折时间较为重合,而且年降水量近一半来自于夏季降水,可以看出夏季降水对年度降水量的贡献及影响较大,体现出夏季降水在年度降水中的主导地位。

的平均降水量分别为265.4,522.9,210.6,101.6 mm,占多年平均降雨量的24.1%,47.6%,19.1%,9.2%;降水量主要集中在春、夏季,冬季最少。



图4 1960—2017年江淮地区年降水量累积距平值

3.2 江淮地区降水量周期变化特征

小波分析显示江淮地区的年、季节降水量在1960—2017年,包含多个不同尺度的周期变化,形成各种尺度正负相间的震荡中心,存在明显的年代和年际变化特征。在全局尺度,冬季降水量存在55.6 a的显著变化周期,即冬季降水量主周期为55.6 a,其余3个季节和年降水量不存在显著周期。

在局部尺度,年、季节降水量周期性变化特征存在差异。年降水量和春、夏、冬季降水量均存在2~3 a显著周期,分别发生在1991—1996年、1977—1979年、1989—1994年、1995—2000年(图6,图7A,B,D)。秋季在1994—2001年具有3~4 a的显著周期(图7C)。此

外,春季和夏季还在 1996—2004 年、1987—1992 年分别具有 3~6 a,4~5 a 的显著周期(图 7A,B)。年降水量与季节降水量显著周期性震荡均趋向于 2~4 a 的时间尺

度;在时域中,能量强度不完全相同,且具有明显的局部特征。其中年降水量与夏季降水量的周期振荡相似,这可能是由于年降水量的 50%以上来源于夏季。

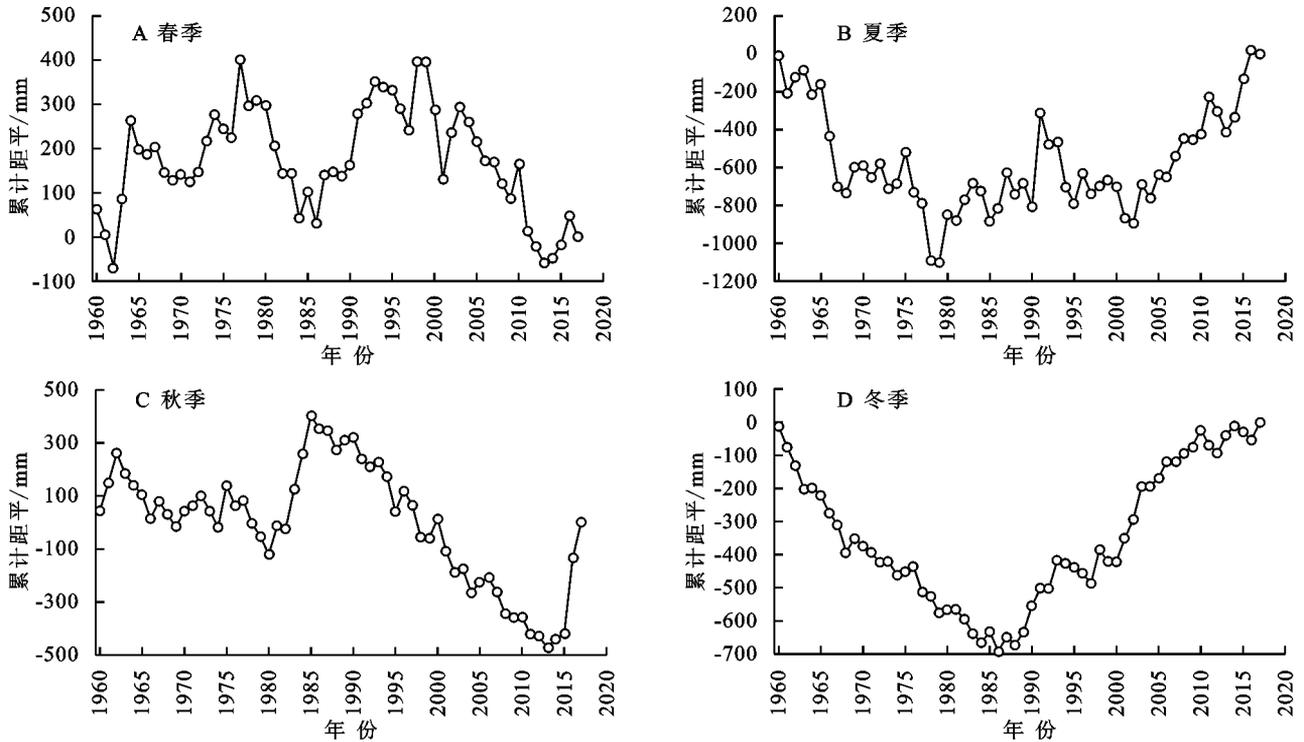
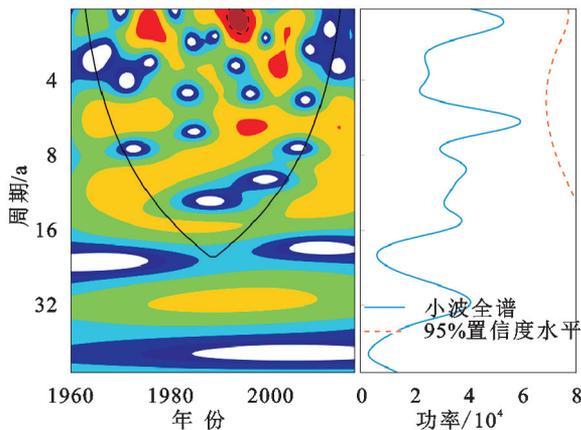


图 5 1960—2017 年江淮地区四季降水量累积距平值



注:黑色实线代表小波影响锥,黑色轮廓虚线、红色虚线表示为置信度为 95% 的红色噪声检验,颜色越偏向深红色为功率越高,周期强度越高,下同。

图 6 1960—2017 年江淮地区年降水量周期变化特征

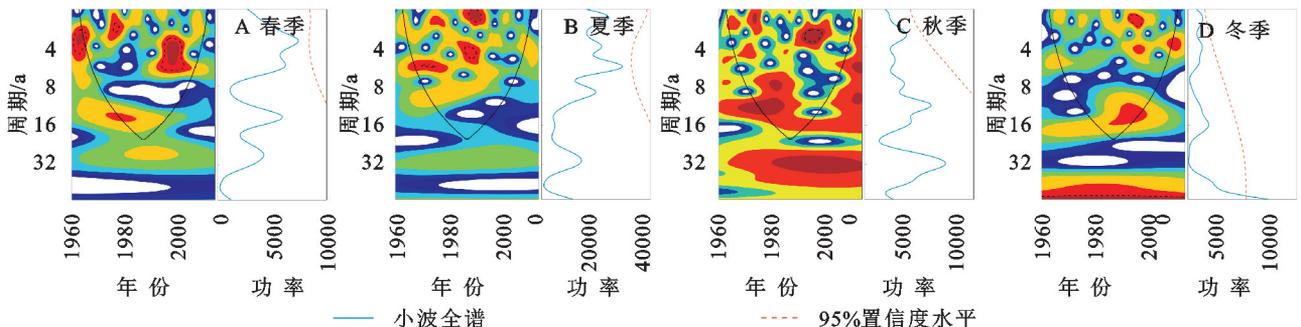
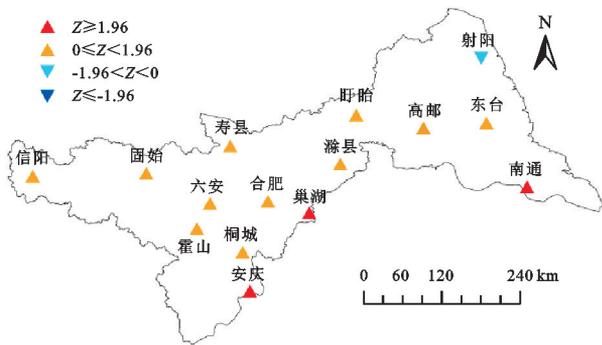


图 7 1960—2017 年江淮地区季节降水量周期变化特征

3.3 江淮地区降水量空间分布特征

为进一步展示年、季节降水量变化趋势的空间分布特征,将不同站点降水量 Mann-Kendal 趋势检验的结果进行空间可视化。年、季节降水量空间变化如图 8—9 所示。

年降水量有 3 个站点表现为显著增加的趋势 ($p < 0.05$),主要位于江淮地区的南部,其余站点变化趋势不显著(图 8)。在季节尺度,春季和秋季降雨量,不存在显著变化的站点(图 9A,C);对于夏季降水量而言,5 个站点呈显著增加趋势 ($p < 0.05$),主要分布在江淮地区西南部 and 东南部(图 9B);对于冬季降雨量而言,14 个站点表现为显著增加趋势 ($p < 0.05$),除江淮地区东北部外,其他区域均有分布(图 9D)。



注: $Z \geq 1.96$ 为显著上升趋势 ($p \leq 0.05$), $0 \leq Z < 1.96$ 为上升趋势 ($p > 0.05$), $-1.96 < Z < 0$ 为下降趋势 ($p > 0.05$), $Z \leq -1.96$ 为显著下降趋势 ($p \leq 0.05$), 下同。

图8 1960—2017年江淮地区年降水量空间分布特征

3.4 大气环流对江淮地区降水量影响分析

交叉小波能量谱显示年降水量与 EASM, PDO, AO, NAO 分别在 1993—1998 年、1991—1997 存在 2~3 a 的显著共振周期, 均呈负相关关系; EASM, AO, NAO 变化滞后于年降水量, PDO 变化则相反 (图 10A, C, E, I)。1990—2002 年, 与 ONI 具有 5~7 a 的显著共振周期, 呈正相关关系, ONI 变化领先于年降水量 (图 10G)。1989—2001 年, 1974—1978 年, 与 PDO, SOI 分别存在 4~6 a 的显著共振周期, 均呈正相关关系; PDO 变化滞后于年降水量, 而 SOI 变化则相反 (图 10I, K)。

交叉小波凝聚谱表明年降水量与 AO, NAO, ONI, SOI 存在 2~3 a 的显著共振周期, 相关振荡分别表现在 1973—1976 年、1993—1997 年、1978—1981 年、

1980—1986 年、1979—1985 年; 与 AO, NAO, SOI 呈负相关关系, 与 SOI 呈正相关关系; AO, SOI 变化滞后于降水量, 而 NAO, ONI 变化则相反 (图 10D, F, H, L)。在 1981—1990 年, 与 AO, NAO 具有 3~5 a 的显著共振周期, 呈负相关关系, 且 AO, NAO 变化均超前于年降水量 (图 10D, F)。年降水量与 EASM, NAO, ONI, PDO, SOI 分别在 1966—1977 年、2000—2011 年、2004—2012 年、1972—1980 年、2008—2011 年存在 4~7 a 的显著共振周期; 与 EASM, NAO 呈负相关关系, 与 ONI, PDO, SOI 呈正相关关系; NAO 变化滞后于年降水量, 而其余 4 个指数变化则相反 (图 10B, F, H, J, L)。在 1973—1990 年, 与 EASM 具有 8~13 a 的显著共振周期, 两者呈正相关关系, EASM 变化滞后于年降水量 (图 10B)。在 1980—1999 年, 与 AO, NAO 存在 15~20 a 的显著共振周期, 均呈负相关关系, 且 AO, NAO 变化均滞后于年降水量 (图 10D, F)。

综上所述, NAO 与 AO 对年降水量的影响在时频空间上结构具有一定相似性, 且只有其具有高时间尺度上的显著影响。此外, 根据显著共振周期, EASM 对年降水量影响最大, 而 SOI 对年降水量影响最小。在交叉小波能量谱及凝聚谱中, 有些年份的大气环流指数与降水量之间的影响并不显著, 这表明除了大气环流气候模式的影响, 其他人类活动同样会导致降水量的变化, 因此还需要对非气候影响因素进行进一步的研究。

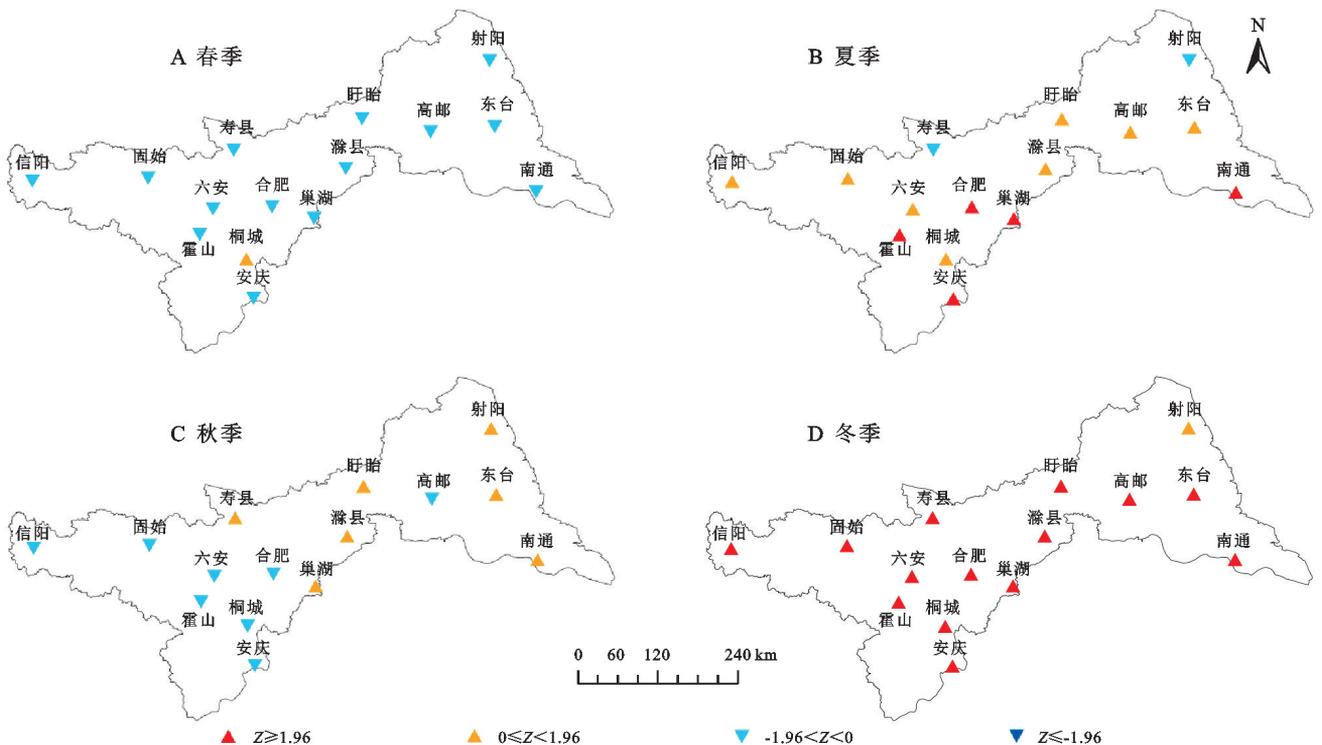
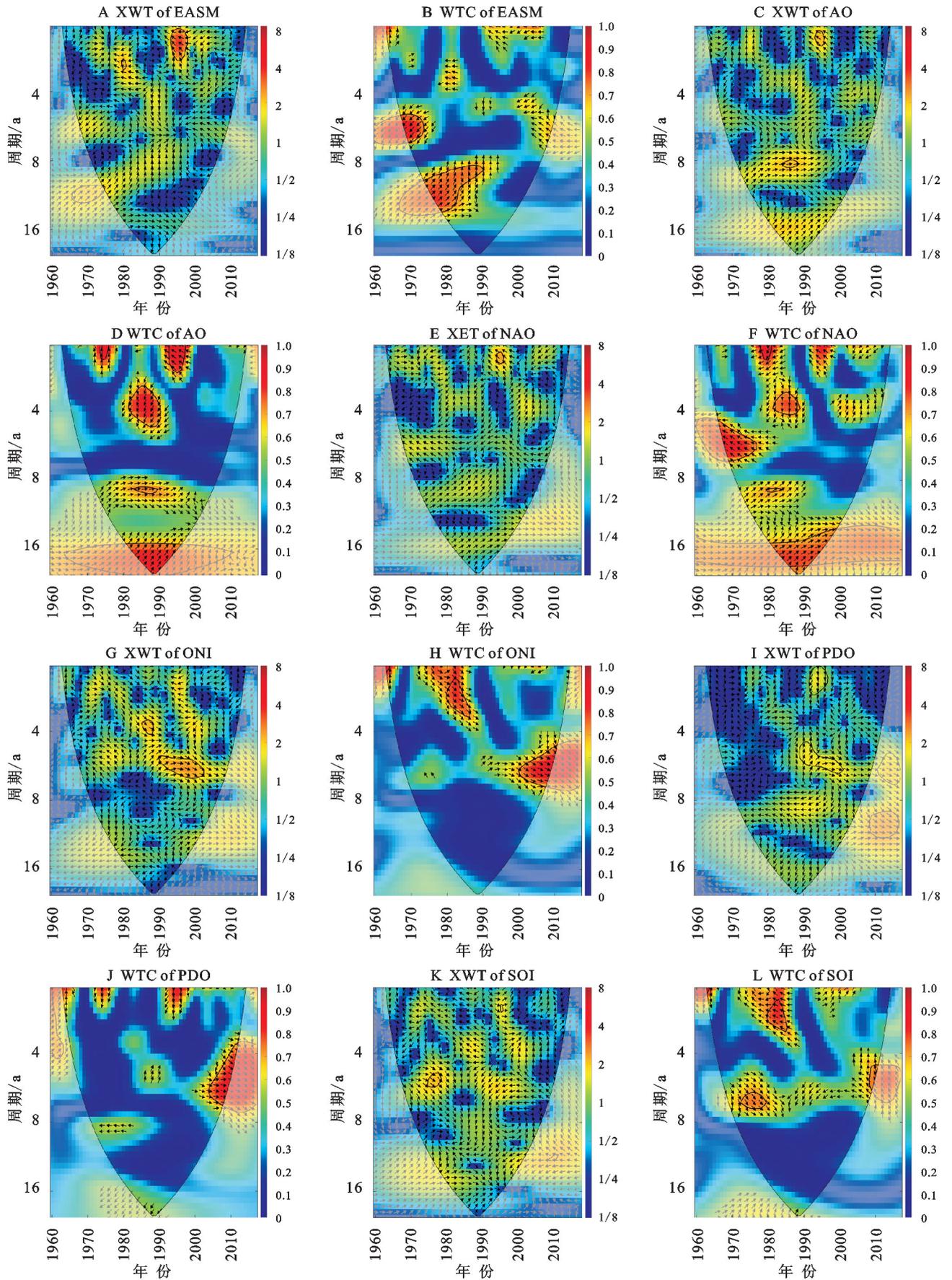


图9 1960—2017年江淮地区季节降水量空间分布特征



注:细虚线为小波影响锥曲线;黑粗线为 95%置信区间;箭头表示相对位相差,“→”表示两者变化位相一致,“←”表示两者变化位相相反,“↑”表示大气环流指数变化延后于年降水量,“↓”表示大气环流指数变化提前于年降水量。

图 10 大气环流指数与年降水量交叉小波能量谱及凝聚谱

4 结论

(1) 江淮地区冬季降水量呈显著增加的趋势,年、夏季降水量均呈不显著增加趋势,春季、秋季降水量呈不显著减小趋势。年与夏季降水量经历最多次偏多—偏少过程,而冬季降水量经历次数最少。

(2) 在全球尺度,冬季降水量存在 55.6 a 的显著变化周期。在局部尺度,年与季节降水量在整个时域中基本都受 2~4 a 时间尺度波动变化影响。

(3) 年、夏季降水量显著增加的站点位于江淮地区的南部;冬季降水量显著增加的站点分布在江淮除东北部之外所有地区;春季、秋季降水量不存在显著性变化的站点。

(4) 年降水量与大气环流指数在年际尺度上均存在一定的共振周期,但在不同时域中存在明显差异。EASM 对其影响最显著;SOI 对其影响最不显著。

参考文献:

- [1] 李晓婷,刘利民,李雪洋,等.基于逐小时数据的辽宁省夏季降水日变化特征分析[J].沈阳农业大学学报,2021,52(2):129-136.
- [2] 马占云,任佳雪,陈海涛等.IPCC 第一工作组评估报告分析及建议[J].环境科学研究,2022,35(11):2550-2558.
- [3] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change[J].Climatic Change,1998,39:667-694.
- [4] Trenberth K E, Dai A, Rasmussen R M, et al. The changing character of precipitation[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2003,84(9):1205-1217.
- [5] Sena J A, Deus L, Freitas M A V, et al. Extreme events of droughts and floods in Amazonia:2005 and 2009[J]. Water resources management, 2012,26(6):1665-1676.
- [6] Papalexioiu S M, Montanari A. Global and regional increase of precipitation extremes under global warming [J]. Water Resources Research, 2019,55(6):4901-4914.
- [7] Houze R A, Rasmussen K L, Medina S, et al. Anomalous atmospheric events leading to the summer 2010 floods in Pakistan[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011,92(3):291-298.
- [8] Khaing Z M, Zhang K, Sawano H, et al. Flood hazard mapping and assessment in data-scarce Nyaungdon area, Myanmar[J]. Plos One, 2019, 14 (11). DOI:10.1371/journal.pone.0224558.
- [9] Zhang K, Liu L, Chao L, et al. Spatiotemporal variations of terrestrial ecosystem water use efficiency in Yunnan Province from 2000 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2019,35(5):1-5.
- [10] Rosenzweig C, Tubiello F N, Goldberg R, et al. Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change [J]. Global Environmental Change, 2002,12(3):197-202.
- [11] Liu S, Huang S, Xie Y, et al. Spatial-temporal changes of rainfall erosivity in the loess plateau, China: Changing patterns, causes and implications[J]. Catena, 2018,166:279-289.
- [12] 白爱娟,施能,方建刚.陕西省降水量变化的区域特征分析[J].高原气象,2005,4(7):635-641.
- [13] 吴舒祺,赵文吉,杨阳,等.基于小波变换的长江中下游地区极端降水与大气环流响应关系研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(4):67-75.
- [14] Gu G, Adler R F, Huffman G J, et al. Tropical rainfall variability on interannual-to-interdecadal and longer time scales derived from the GPCP monthly product [J].Journal of Climate,2007,20(15):4033-4046.
- [15] Gedefaw M, Yan D, Wang H et al. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall variability in amhara regional state, Ethiopia[J]. Atmosphere, 2018, 9(9). DOI:10.3390/atmos9090326.
- [16] Yang Y, Gan T Y, Tan X. Spatiotemporal changes in precipitation extremes over Canada and their teleconnections to large-scale climate patterns[J]. Journal of Hydrometeorol, 2019, 20(2):275-296.
- [17] 王耸,高西宁,肖瑶,等.1961—2010 年中国降水量变化分区及其区域特征[J].干旱地区农业研究,2017, 35(6):284-293.
- [18] 苗运玲,张云惠,卓世新,等.东疆地区汛期降水集中度 and 集中期的时空变化特征[J].干旱气象,2017, 35(6):949-956.
- [19] 张悟颖,孙维君,张玉伦.1960—2012 年西藏林芝气温和降水变化[J].中国沙漠,2018,38(5):1086-1091.
- [20] 朱艳欣,桑燕芳.青藏高原降水季节分配的空间变化特征[J].地理科学进展,2018,37(11):1533-1544.
- [21] 杜懿,王大洋,阮俞理,等.中国地区近 40 年降水结构时空变化特征研究[J].水力发电,2020,46(8):19-23.
- [22] Zhai P, Zhang X, Hui W, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. Journal of Climate, 2005,18(7):1096-1108.
- [23] 郭嘉兵,李金文,马金珠,等.甘肃省 1961 — 2018 年降水量时空分布与变化研究[J].灌溉排水学报,2021,40(3):142-148.
- [24] 潘光波,许有鹏,丁瑾佳,等.江淮下游平原地区降水时空变化:以江苏里下河腹部区为例[J].南京大学学报:自然科学版,2010,46(6):671-680.

- [16] 李雪萍, 贡璐. DMSP/OLS 和 VIIRS/DNB 夜间灯光影像的校正及拟合[J]. 测绘通报, 2019(7):138-146.
- [17] Peng S, Ding Y, Liu W, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4):1931-1946.
- [18] Wood S L R, Jones S K, Johnson J A, et al. Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 29:70-82.
- [19] U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). Guidelines for Ecological Risk Assessment[R]. Washington D C: Risk Assessment Forum, 1998.
- [20] 中华人民共和国生态环境部. 生态保护红线划定技术指南[Z]. 北京, 2015.
- [21] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3):393-408.
- [22] 李芸, 王轶夫, 孙玉军, 等. 吉林省落叶松林 NPP 时空特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(3):1-13.
- [23] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1):7-13.
- [24] 李晶, 刘乾龙, 刘鹏宇. 1998—2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J]. 生态学报, 2022, 42(1):1-16.
- [25] Luo F, Liu Y, Peng J, et al. Assessing urban landscape ecological risk through an adaptive cycle framework[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180:125-134.
- [26] 张玉娇, 曾杰, 陈万旭, 等. 基于适应性循环的丹江口库区生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1):349-360.
- [27] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 等. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J]. 地理学报, 2015, 70(7):1052-1067.
- [28] 景培清, 张东海, 艾泽民, 等. 基于格局-过程生态适应性循环三维框架的自然景观生态风险评价: 以黄土高原为例[J]. 生态学报, 2021, 41(17):7026-7036.
- [29] Allison H E, Hobbs R J. Resilience, adaptive capacity, and the “Lock-in Trap” of the western Australian agricultural region[J]. *Ecology and Society*, 2004, 9(1):3.

~~~~~

(上接第 244 页)

- [25] 刘芳, 张红旗. 中国 8 个重要农业区土地利用结构及时空变化分析[J]. 资源科学, 2011, 33(2):294-301.
- [26] 钱永甫, 王谦谦, 黄丹青. 江淮流域的旱涝研究[J]. 大气科学, 2007, 6(11):1279-1289.
- [27] 王静, 余锦华, 何俊琦. 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, 2015, 20(1):80-88.
- [28] 龙彦羲, 邹睿, 尹义星, 等. 江淮地区夏、冬季和年极端降水发生时间的时空特征及影响因素[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11):1-4, 190.
- [29] 吴晶璐, 朱红芳, 宗培书, 等. 近 30 多年江淮流域极端气温指数的时空变化分析: 站点观测和再分析的对比[J]. 气象科学, 2018, 38(4):464-476.
- [30] Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(9):1807-1829.
- [31] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1):61-78.