

# 黄淮海和江淮平原小时极端降水时空演变及归因分析

李 新<sup>1,2</sup>, 陈馨蕾<sup>1</sup>, 周义斌<sup>1</sup>, 王大刚<sup>3</sup>, 张 珂<sup>1,2,4,5,6</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510006; 4. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098;  
5. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 6. 水利部水利大数据重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 基于 1983—2018 年 183 个国家级地面气象观测站的小时降水数据, 采用迭代式 Mann-Kendall 趋势检验、Spearman 秩次相关分析、小波分析等方法, 从降水事件和日内尺度极端降水指数两个维度, 分析了黄淮海平原和江淮平原极端降水的时空演变趋势及其与大气环流模式的关系。结果表明: 黄淮海平原和江淮平原夏季降水事件呈历时短、频率高和强度大等特点, 降水特征空间分布有一定的区域性差异; 除中等强度降水小时数外, 半数以上站点极端降水频率、强度和持续性指数呈增加趋势; 相较于 1983—1999 年, 21 世纪前 20 年极端降水频率、强度和持续时间呈显著增大趋势, 但平均降水强度增大不显著; 与黄淮海平原和江淮平原极端降水指数相关性最强的大气环流指数是大西洋多年代际振荡, 其对强度指数和频率指数呈现以 6~10 月为主的间歇性共同显著周期带。

**关键词:** 极端降水; 小时尺度; 时空演变趋势; 大气环流模式; 黄淮海平原; 江淮平原

**中图分类号:** P426.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-6933(2025)05-0285-11

**Spatiotemporal evolution and attribution analysis of hourly extreme precipitation in the Huang-Huai-Hai Plain and Jiang-Huai Plain**//LI Xin<sup>1,2</sup>, CHEN Xinlei<sup>1</sup>, ZHOU Yibin<sup>1</sup>, WANG Dagang<sup>3</sup>, ZHANG Ke<sup>1,2,4,5,6</sup> (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China; 4. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University Nanjing 210098, China; 6. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on hourly precipitation data from 183 national meteorological stations from 1983 to 2018, this study employs methods such as the iterative Mann-Kendall trend test, Spearman's rank correlation analysis, and wavelet analysis to examine the spatiotemporal evolution of extreme precipitation and its relationship with atmospheric circulation patterns in the Huang-Huai-Hai Plain and Jiang-Huai Plain. The analysis focuses on two dimensions: precipitation events and subdaily extreme precipitation indices. The results show that summer precipitation events in these regions are characterized by short durations, high frequencies, and intense rainfall, with spatial variations in precipitation patterns. Except for moderate-intensity precipitation hours, more than half of the stations exhibit an increasing trend in the frequency, intensity, and duration of extreme precipitation. Compared to the period from 1983 to 1999, the first two decades of 21 century saw a significant rise in the frequency, intensity, and duration of extreme precipitation, although the increase in average precipitation intensity was not significant. The Atlantic multidecadal oscillation shows the strongest teleconnection with extreme precipitation index in the Huang-Huai-Hai Plain and Jiang-Huai Plain, with dominant 6-10 month coherent spectral bands for both intensity and frequency indices.

**Key words:** extreme precipitation; hourly timescale; spatiotemporal trend; atmospheric circulation patterns; Huang-Huai-Hai Plain; Jiang-Huai Plain

2021 年, 联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在其第六次评估报告 (AR6) 中指出: 2011—2020 年全球地表平均温度较 1850—1900 年升高约

1.09℃<sup>[1]</sup>。根据克劳修斯-克拉珀龙 (Clausius-Clapeyron, C-C) 热力学方程, 在相对湿度等其他条件不变的情况下, 气温每升高 1℃, 大气饱和水汽压上升约 7%<sup>[2]</sup>, 极端降水作为大气水汽凝结的极端

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目 (2023YFC3006500); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (B240203007)

作者简介: 李新 (1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xinli@hhu.edu.cn

情形,其增幅应接近水汽含量增幅。在区域和流域尺度上,极端降水的时空演变模式受到全球气候变暖、大尺度大气环流以及局地因素的共同作用,呈现出更加复杂的变化特征<sup>[3]</sup>,从而对水资源的时空分布格局产生显著影响<sup>[4]</sup>。在全球气候变暖和强人类活动背景下,极端降水事件的发生频率、强度、空间范围和持续时间不断增加,导致其洪涝效应发生变化,给流域防洪减灾带来新的挑战,也对人民生命财产安全构成巨大威胁<sup>[5]</sup>。

目前,国内外学者主要从降水事件和极端降水指数两个方面刻画极端降水特征及其时空变化趋势。诸多研究已证实,全球范围内极端降水事件的发生频率和强度整体呈增加趋势<sup>[6-7]</sup>。我国的极端降水虽然总体表现为增长趋势,但不同地区差异显著<sup>[8]</sup>。王志福等<sup>[9]</sup>对中国不同时间尺度的极端降水事件展开了详细分析,发现极端降水事件主要发生在北纬 35°以南区域,尤其是长江流域中下游、江南地区和青藏高原东南部,且持续时间较长。任国玉等<sup>[10]</sup>采用 2 300 多个国家级气象站资料,分析了我国大陆降水的气候态特征,发现华南沿海地区极端降水的频率和强度最高。Li 等<sup>[11]</sup>采用 14 个小时尺度极端降水指数,分析了我国各大流域小时极端降水的时空变化趋势,发现中国大陆地区整体、长江流域以及东南诸河流域的极端降水频率与强度均呈显著增加趋势。

极端降水的时空分布特征受诸多因素影响,包括动力因素(大气环流模式、风场、气压系统等)、热力学条件(温度、湿度、大气稳定性等)和局地影响(地貌、城市化、土地利用方式改变等)<sup>[12]</sup>。在大尺度气候系统背景下,动力因子通过改变大气稳定性和水汽输送路径<sup>[13-14]</sup>,直接影响降水过程的触发条件与维持机制,进而影响极端降水的频率、强度和历时等特征<sup>[15-16]</sup>。管新建等<sup>[17]</sup>发现,东亚季风(East Asian monsoon, EAM)在年际和年代际尺度上变率显著,对长江流域极端降水具有重要影响。Nalley 等<sup>[18]</sup>指出,厄尔尼诺与南方涛动(El Niño-southern oscillation, ENSO)和太平洋年代际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)在某些地区对极端降水具有显著的调节作用。Li 等<sup>[19]</sup>指出, ENSO 对长江流域极端降水有显著影响,拉尼娜事件可能会加剧长江流域当年的降水极值。

黄淮海平原和江淮平原跨越京、津、冀、鲁、豫、苏、皖七省市,人口密集,政治经济地位至关重要。受台风、强降水等极端天气的影响,该区域暴雨洪涝灾害频发。2020 年夏季,长江流域及我国南方地区遭遇大范围强降水,引发流域级大洪水;2021 年

7 月,河南省郑州市遭遇历史罕见特大暴雨,导致严重城市内涝、河流洪水、山洪滑坡等多灾并发,造成 380 人因灾死亡,直接经济损失达 409 亿元;2023 年 7—8 月,京津冀发生历史极端强降水,海河流域形成流域性大洪水,被迫启用永定河泛区等 8 处蓄滞洪区。在全球气候变化与强人类活动的双重胁迫下,黄淮海平原和江淮平原防洪减灾工作面临新的挑战。

当前,针对黄淮海平原与江淮平原极端降水时空变化的研究多聚焦日尺度降水数据,难以反映降水事件的精细时空结构与演化过程,在汇流时间较短的山区及城市流域尤为明显<sup>[20-21]</sup>。相较于日尺度数据,小时尺度数据能更精准地描述降水事件的时空结构,捕捉短时强降水事件,分析降水的时空演化过程。

本文基于 1983—2018 年 183 个国家级地面气象观测站的逐时降水数据,从降水事件和日内尺度极端降水指数两个维度对极端降水进行刻画,旨在分析黄淮海平原和江淮平原小时极端降水的时空变化趋势,揭示其与大气环流模式的相关关系。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

黄淮海平原,即华北平原,总面积为 30 万 km<sup>2</sup>,属于典型的冲积平原,地势相对平坦,海拔大多低于 50 m,整体属于半干旱、半湿润地区。黄淮海平原受温带季风气候的影响,夏季高温且湿度较大,冬季寒冷而干燥,全年降水量在 500~900 mm 之间,其中夏季降水占比达 50%~75%,且主要以暴雨形式集中出现。此外,黄淮海平原的降水年际波动较大,相对变率为 20%~30%。

江淮平原是指江苏、安徽两省淮河以南、长江以北一带,总面积约为 25 万 km<sup>2</sup>,主要由长江、淮河冲击而成,地势低洼,海拔一般在 10 m 以下。江淮平原年降水量为 1 100~1 500 mm,主要集中在夏季,尤其是夏季的梅雨季节,冬季降水较少。江淮平原属于亚热带季风气候,季节性特征明显,夏季温度较高且降水频繁,冬季温度较低且降水明显较少。

### 1.2 数据来源

黄淮海平原和江淮平原 1983—2018 年暖季(4—10 月)的逐小时降水数据资料来源于中国国家级地面气象观测站(<https://data.cma.cn/en>)。为确保数据的完整性,采用以下标准对数据进行筛选<sup>[11]</sup>:①总缺失数据占比小于 1%;②每年 4—10 月缺失数据占比小于 20%。黄淮海平原与江淮平原共布设 183 个国家级地面气象观测站(图 1),这些气象站空间分布均匀、观测资料完整,具备良好的区

域代表性,可有效反映研究区域小时降水过程的时空分布特征。

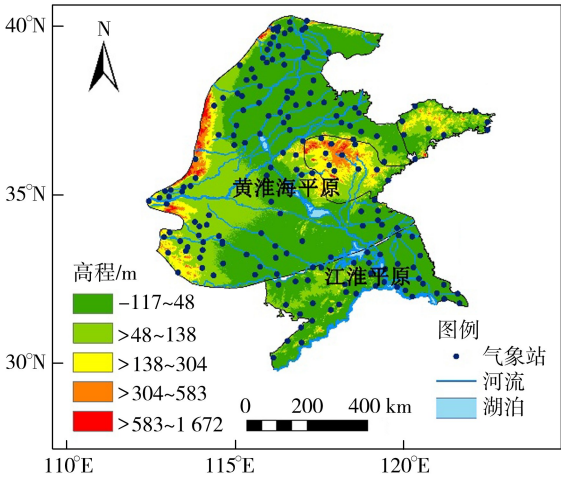


图 1 研究区概况与气象站点分布

Fig. 1 Overview of the study area and distribution of meteorological stations

选取 8 个月尺度大气环流指数开展研究:①5 个海洋和大气环流指数,大西洋多年代际振荡 (Atlantic multidecadal oscillation, AMO)、北极涛动 (Arctic oscillation, AO)、北大西洋涛动 (North Atlantic oscillation, NAO)、太平洋年代际振荡 (Pacific decadal oscillation, PDO) 和海洋尼诺指数 (oceanic Niño index, ONI) (表征 ENSO),数据均来自于美国国家海洋和大气管理局 (the United States National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 物理科学部地球系统研究实验室 (<https://esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>);②3 个夏季季风指数,东亚夏季风指数 (East Asian summer monsoon index, EASM)、南亚夏季风指数 (South Asian summer monsoon index, SASM)、南海夏季风指数 (South China Sea summer monsoon index, SCSM)<sup>[22-24]</sup>。

表 1 小时尺度极端降水指数定义

Table 1 Definition of hourly-scale extreme precipitation indices

| 指数类别  | 指数名称      | 定义          | 含义                              | 单位   |
|-------|-----------|-------------|---------------------------------|------|
| 强度指数  | Rx1hr     | 最大 1 h 降水量  | 年最大 1 h 降水量                     | mm   |
|       | Rx3hr     | 最大 3 h 降水量  | 年最大 3 h 降水量                     | mm   |
|       | Rx6hr     | 最大 6 h 降水量  | 年最大 6 h 降水量                     | mm   |
|       | R95pw1hr  | 极端降水量       | 小时降水量大于基准期小时降水序列 95% 分位值的年累计降水量 | mm   |
|       | R99pw1hr  | 极端强降水量      | 小时降水量大于基准期小时降水序列 99% 分位值的年累计降水量 | mm   |
| 频率指数  | R1hr10 mm | 低强度降水小时数    | 小时降水量大于等于 10 mm 的年总小时数          | h    |
|       | R1hr20 mm | 中等强度降水小时数   | 小时降水量大于等于 20 mm 的年总小时数          | h    |
| 持续性指数 | MxLWS     | 最大连续降水小时数   | 小时降水量大于等于 0.1 mm 的最长连续小时数       | h    |
|       | MeLWS     | 平均连续降水小时数   | 小时降水量大于等于 0.1 mm 的平均连续小时数       | h    |
| 一般指数  | RTot      | 总降水量        | 小时降水量大于等于 0.1 mm 的年累计降水量        | mm   |
|       | NWH       | 降水小时数       | 小时降水量大于等于 0.1 mm 的年总小时数         | h    |
|       | SPII1hr   | 平均 1 h 降水强度 | 小时降水量大于等于 0.1 mm 的总量与小时数之比      | mm/h |

2 研究方法

2.1 降水事件及极端降水指数定义

采用 1 h 作为最小无降水间隔 (minimum inter-event time, MIT) 划分场次降水事件<sup>[25-26]</sup>,判定标准如下:若某 1 h 的累计降水量不低于 0.1 mm 时,则判定该小时为有降水,否则记为无降水。若两次降水的间隔超过 1 h,则判定为不同的降水事件。一场降水事件的降水历时定义为事件从起始到终止的连续时间,而该时段累积的降水量则定义为该次降水事件的降水量。选取场次平均降水量、降水频次、平均降水强度、平均降水历时等 4 个指标,用于刻画降水事件的特征。

采用由 Alexander 等<sup>[27-28]</sup> 提出的小时尺度极端降水指数,用于表征小时极端降水。该指数与水文气象领域广泛采用的、由气候变化检测和指数专家组 (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) 定义的日尺度指数相似,小时尺度极端降水指数从频率、强度、历时等多个方面刻画小时尺度降水过程的极端性。本文采用的小时尺度极端降水指数定义如表 1 所示,其中 R95pw1hr 和 R99pw1hr 的基准期设定为 1983—2012 年。

2.2 迭代式 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数检验方法<sup>[29-30]</sup>,主要用于检测序列的趋势特征,并对序列的显著性水平进行评估。然而,该方法在量化趋势程度上存在局限,因此,借助 Sen<sup>[31]</sup> 斜率估计方法,对趋势程度进行量化。此外,传统的 Mann-Kendall 法的显著性检验结果易受序列自相关性干扰<sup>[32]</sup>,为规避该问题,采用改进型 Mann-Kendall 法——迭代式 Mann-Kendall (iterative Mann-Kendall, IMK) 趋势检验法<sup>[33]</sup>,进一步验证趋势的显著性。鉴于趋势和自相关通常会同时存在于一个时间序列中,IMK 法

通过迭代运算,估计序列的趋势项与一阶自相关系数;在完成整个迭代过程后,对最终的预白化(pre-whitening)时间序列再次进行 Mann-Kendall 检验,以确定趋势的显著性。设显著性水平  $\alpha=0.05$ ,趋势幅度(即斜率大小)通过 Sen 斜率估计法求得。

2.3 Kolmogorov-Smirnov 检验

Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验是统计分析领域常用的非参数检验方法,主要用于评估单一样本是否符合特定分布,或判断两个独立样本的分布是否具有-致性。在双样本检验场景下,该方法通过比较两个样本的经验累积分布函数以衡量其差异,且对分布的形态与位置变化均较敏感,因此在两个样本的比较分析中具有独特的优势。本文采用 K-S 检验法,设定  $\alpha=0.05$ ,判断两个不同时期极端降水指数序列的概率分布是否存在显著差异。

2.4 Spearman 秩次相关分析

Spearman 秩次相关分析是一种非参数相关分析方法,用于衡量两个变量间的单调关系强度。其原理为:先将原始数据转换为秩次(即对数据按大小排序后赋予的位次),再计算两变量秩次间的 Spearman 秩相关系数  $\rho$ ,以此评估二者的相关程度。若  $\rho>0$ ,表明两变量呈正单调相关关系;若  $\rho<0$ ,则呈负单调相关关系;其绝对值越接近 1,变量间的秩次相关性越强;绝对值越接近 0,表示变量之间不存在显著的单调关系;当  $\rho=0$  时,表示变量之间无单调相关性。与 Pearson 相关分析不同,Spearman 秩次相关分析不要求数据服从正态分布,对异常值不敏感,因而更适用于非线性关系的分析。为了保证大气环流指数与年极端降水指数的时间分辨率保持一致,将所有大气环流指数均转换为年尺度:对于 AMO、AO、NAO 和 PDO 取每年 1—12 月的年均值;夏季季风指数取其季节均值;年尺度 ENSO 定义为每年 7—12 月 ONI 的平均值<sup>[19]</sup>。

2.5 交叉小波变换

Hudgins 等<sup>[34]</sup>提出的交叉小波变换结合了小波变换和交叉谱分析的优点,可以揭示两个时间序列在时-频域中的协同振荡特征,其计算过程参见

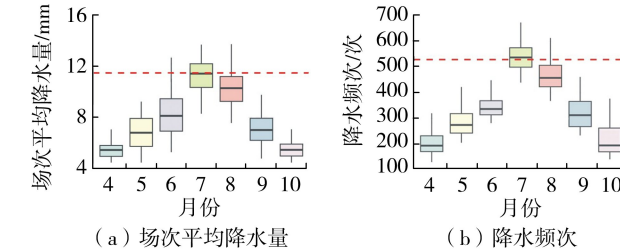


图3 黄淮海平原降水事件特征指标箱线图

Fig. 3 Box plots of precipitation events indicators in the Huang-Huai-Hai Plain

Torrence 等<sup>[35]</sup>的研究。

3 结果与分析

3.1 降水事件时空分布特征

图2为黄淮海平原和江淮平原降水事件不同特征指标的空间分布。可见,研究区降水量总体呈东南向西北递减的趋势;江淮平原南部降水量略高于北部,黄淮海平原东南部降水量大体高于西北部。从整体分布看,降水频次呈由南向北递减的趋势,且黄淮海平原降水频次总体低于江淮平原。此外,两大平原的降水强度呈由西向东递增趋势,高值中心多临近海洋;降水历时则呈由西南向东北递减的趋势。

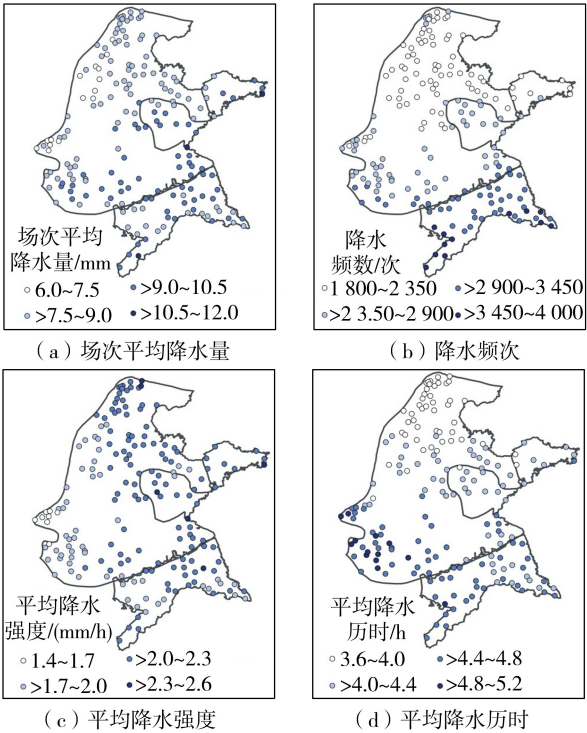


图2 降水事件特征指标空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of precipitation events indicators

图3和图4分别为黄淮海平原和江淮平原1983—2018年暖季(4—10月)降水事件各特征指标的年内分布(图中红色虚线为各特征指标的90%分位数)。总体而言,两大平原的场次平均降水量、降水频次、平均降水强度都呈现夏季(6—8月)偏高,其他月

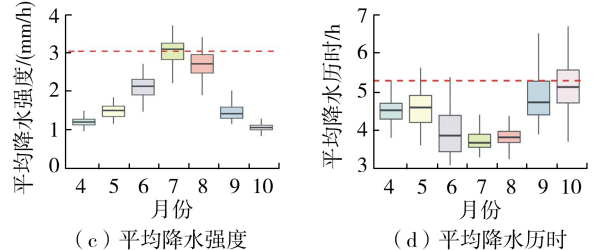


图4 降水事件特征指标年内分布



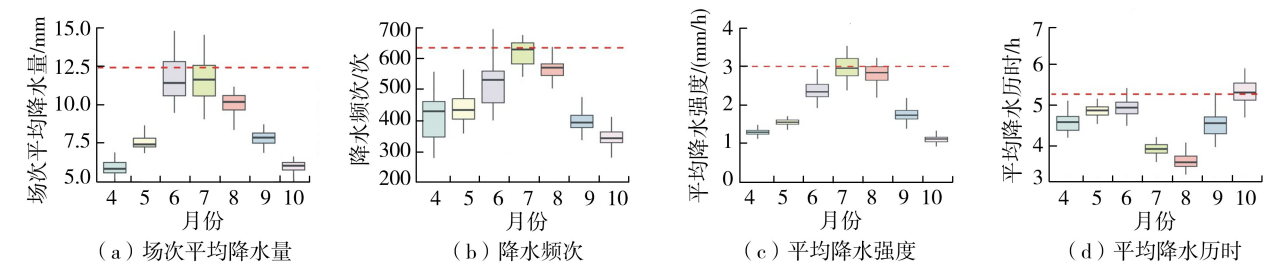


图4 江淮平原降水事件特征指标箱线图

Fig.4 Box plots of precipitation events indicators in the Jiang-Huai Plain

份偏小的特点;与之不同,夏季平均降水历时较其他月份明显偏短,表明黄淮海平原与江淮平原夏季降水事件普遍具有历时短、频次高、强度大的特点。

### 3.2 气候态特征分析

为展示各极端降水指数的频率分布特征,基于核密度估计(kernel density estimation, KDE)法绘制1983—2018年黄淮海平原和江淮平原各极端降水指数的概率密度曲线,见图5。

总体而言,黄淮海平原和江淮平原的强度指数和频率指数在概率分布及气候学平均值上均存在显著差异,这一差异反映了两者间降水特征的不同。从强度指数分析,江淮平原极端降水强度一般大于

黄淮海平原,尽管江淮平原的年最大值指数(Rx1hr、Rx3hr和Rx6hr)仅略高于黄淮海平原,但R95pw1hr、R99pw1hr为黄淮海平原的1.4~1.5倍;从频率指数来看,江淮平原极端降水频率(R1hr10mm和R1hr20mm)为黄淮海平原的1.5~1.7倍;从持续性指数来看,两大平原极端降水事件的历时差异较小,江淮平原略高于黄淮海平原。值得注意的是,尽管江淮平原年降水量和降水频率明显高于黄淮海平原,但两大平原的平均降水强度却十分接近。这一现象与地理环境及气候背景密切相关;江淮平原东临东海、地势相对平坦,受夏季风与湿润海洋气流的影响显著,水汽输送更为充足,加之

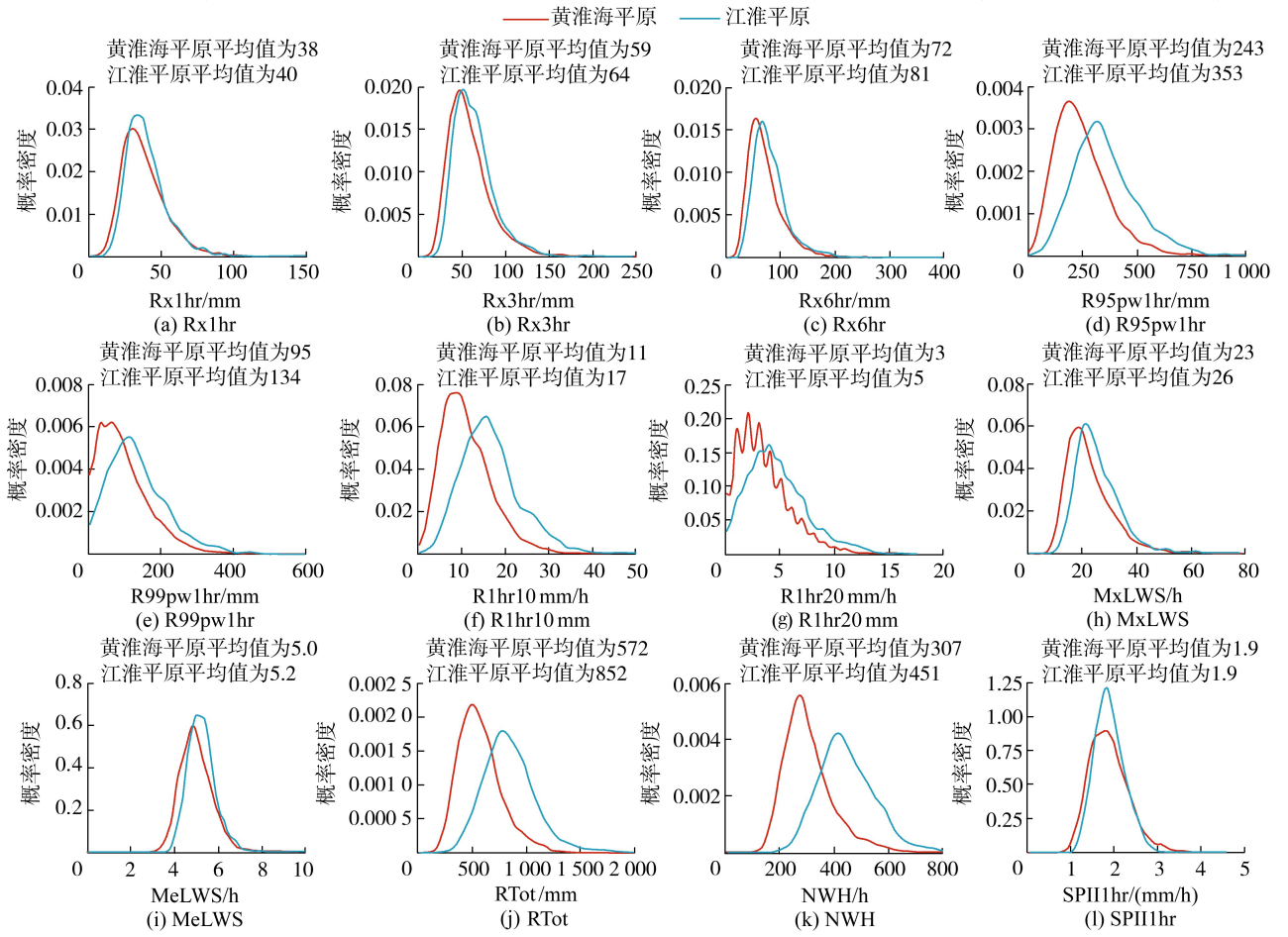


图5 1983—2018年极端降水指数的概率密度曲线

Fig.5 Probability density curves of the extreme precipitation indices from 1983 to 2018

梅雨锋的作用,使得极端降水强度与频率更高<sup>[36]</sup>;相比之下,黄淮海平原整体地形起伏较大,受山脉等地形阻挡,湿润气流输送相对有限,因此极端降水量与降水频率均较低<sup>[37]</sup>。

3.3 极端降水指数变化趋势

采用迭代式 Mann-Kendall 趋势检验法,对两大平原各极端降水指数的变化趋势进行检验,图 6 为黄淮海平原和江淮平原 12 个极端降水指数的变化趋势及相应的显著性 ( $\alpha=0.05$ ,图例为各变化类别占比)。在研究区域内,除中等强度降水小时数外,超半数站点的其他极端降水指数均呈增加趋势。①从强度指数来看,两大平原超 50% 站点的极端降水强度指数呈增加趋势,其中显著增加的站点主要分布于沿海地区及江淮平原南部。②从频率指数来看,超半数站点低强度降水小时数呈增加趋势,显著增加的站点主要分布在黄淮海平原北部和江淮平原南部。③从持续性指数来看,绝大多数站点降水历时变长,约 83.6% 的站点平均连续降水小时数呈增

加趋势,显著增加站点占比超过 10%,主要分布在黄淮海平原。此外,两大平原超 80% 站点总降水量和降水频率呈增加趋势,约 60% 的站点平均降水强度呈增加趋势,显著增加站点主要分布在黄淮海平原北部和江淮平原南部。

总体而言,黄淮海平原和江淮平原的极端降水频率、降水强度和降水历时呈增加趋势,但存在一定的区域性差异。由于两大平原大部分地区地势低平且城市化进程较高,可能会加剧城市内涝的风险。

3.4 不同时期降水指数气候态特征对比

采用 Kolmogorov-Smirnov 检验,比较研究区域 1983—1999 年与 2000—2018 年两个时期年极端降水指数的概率密度曲线,两个时期站点数量一致,可排除抽样误差对概率密度函数的影响。如图 7 所示,在  $\alpha=0.05$  的显著性水平下,除 SPI11hr 外,所有极端降水指数在两个时期的分布均存在显著差异。与 1983—1999 年相比,2000—2018 年黄淮海平原和江淮平原的小时极端降水频率、强度和持续时间

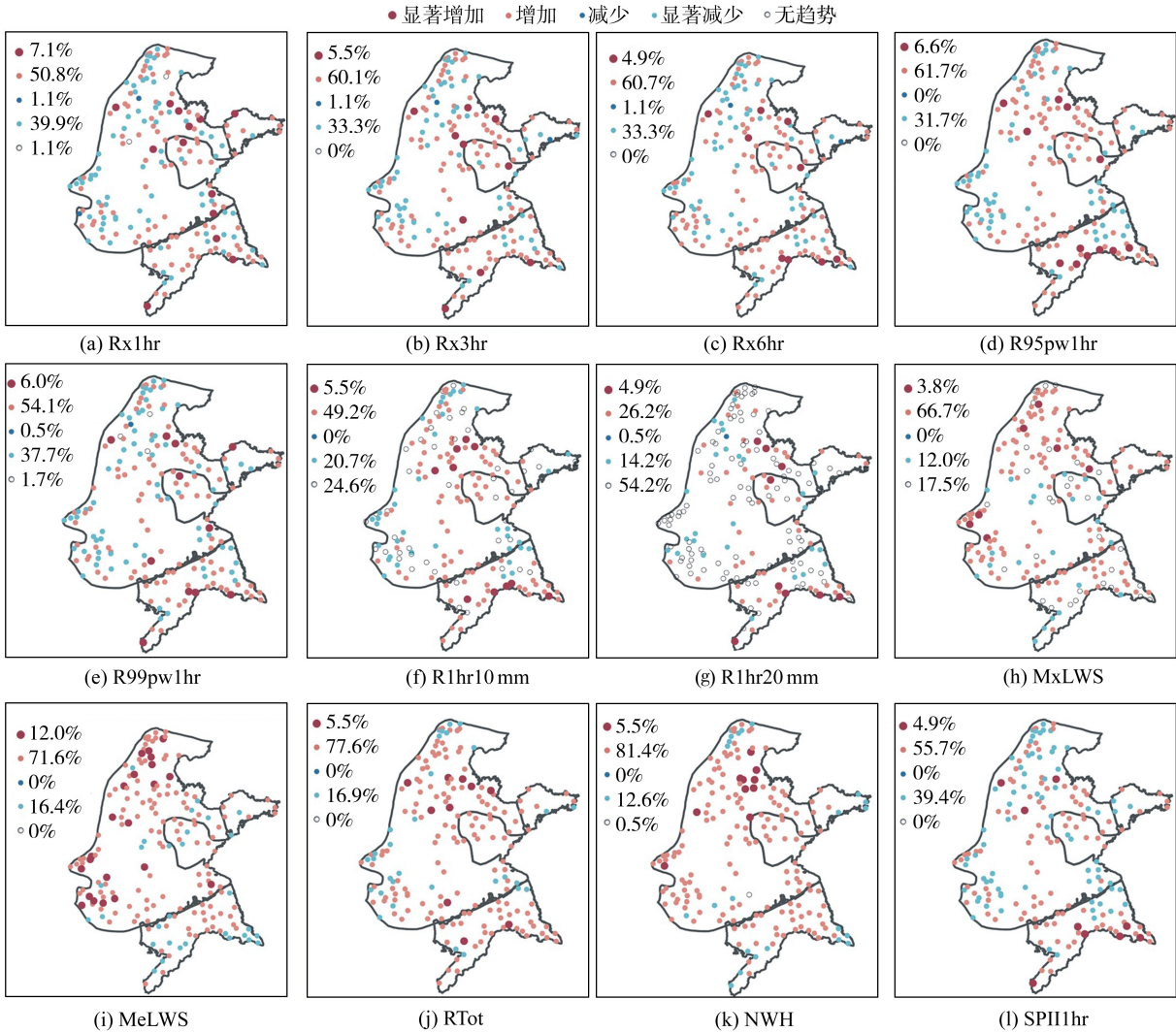


图 6 183 个站点 1983—2018 年极端降水指数变化趋势

Fig. 6 Trends in extreme precipitation indices at 183 stations from 1983 to 2018

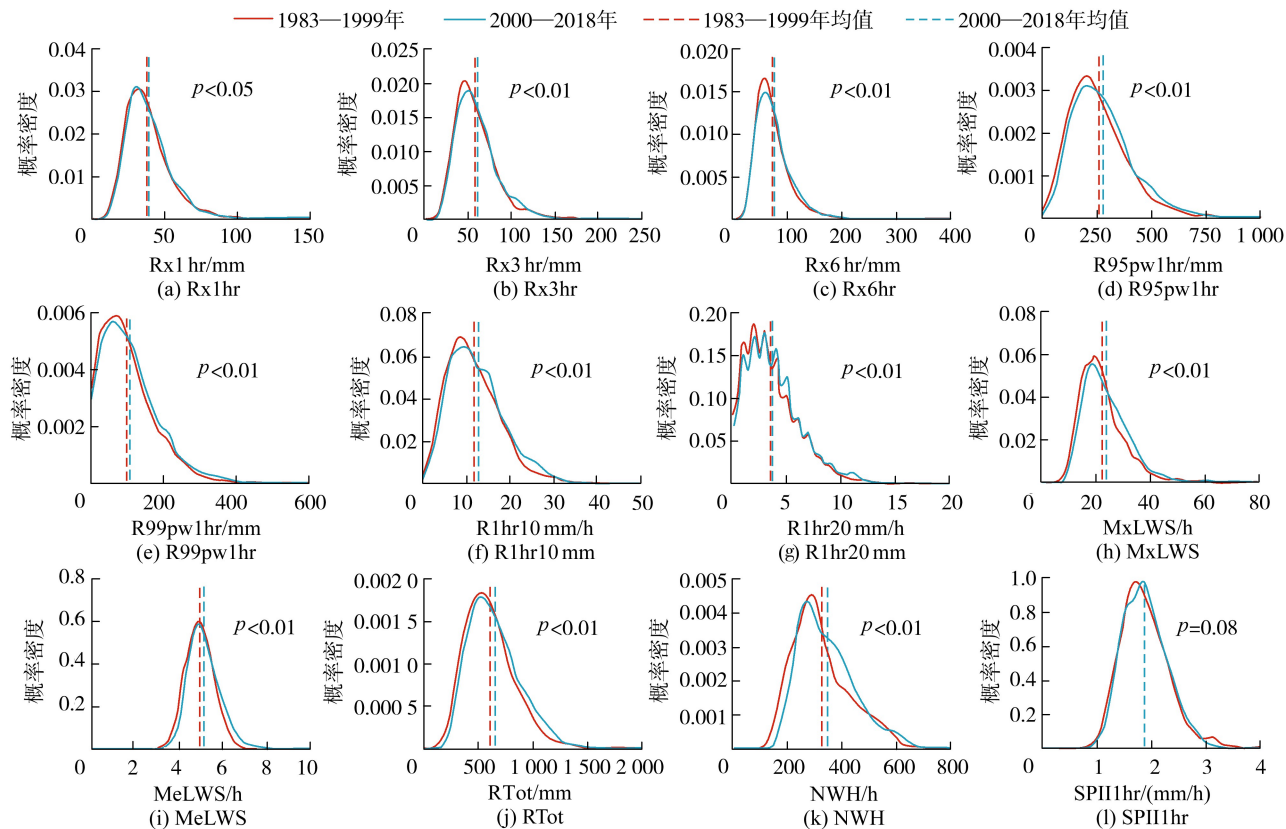


图 7 两平原 1983—1999 年与 2000—2018 年极端降水指数概率密度曲线对比

Fig. 7 Comparison of probability density curves for extreme precipitation indices in two plains from 1983 to 1999 and from 2000 to 2018

显著增加,可能导致洪涝灾害风险增加。值得注意的是,虽然 21 世纪前 20 年降水总量与降水频率显著增加,但平均降水强度未发生显著变化,这可能是因为降水事件更趋向于短历时强降水事件,该类事件增多并未使降水过程整体强度出现明显的上升趋势。

### 3.5 极端降水和大气环流模式的相关性

极端降水的变化不仅揭示了区域降水的整体变化趋势,还能反映大气环流指数及气候系统的基本特征。为进一步研究极端降水指数与大尺度大气环

流指数的联系,采用 Spearman 秩次相关分析法,对 12 个极端降水指数与 8 个大气环流指数间的相关性进行计算与评估。如图 8(a) 所示 (\* 表示在  $\alpha=0.05$  水平下显著相关),黄淮海平原和江淮平原的极端降水指数与 AMO 之间的相关性最高,且均呈正相关关系。其中,R95pw1hr、R1hr10 mm、R1hr20 mm 和 RTot 与 AMO 的相关性尤为显著,相关系数超过 0.3。

相比之下,AO 和 NAO 与极端降水指数主要呈负相关关系,但未达显著性水平。ENSO 指数对持

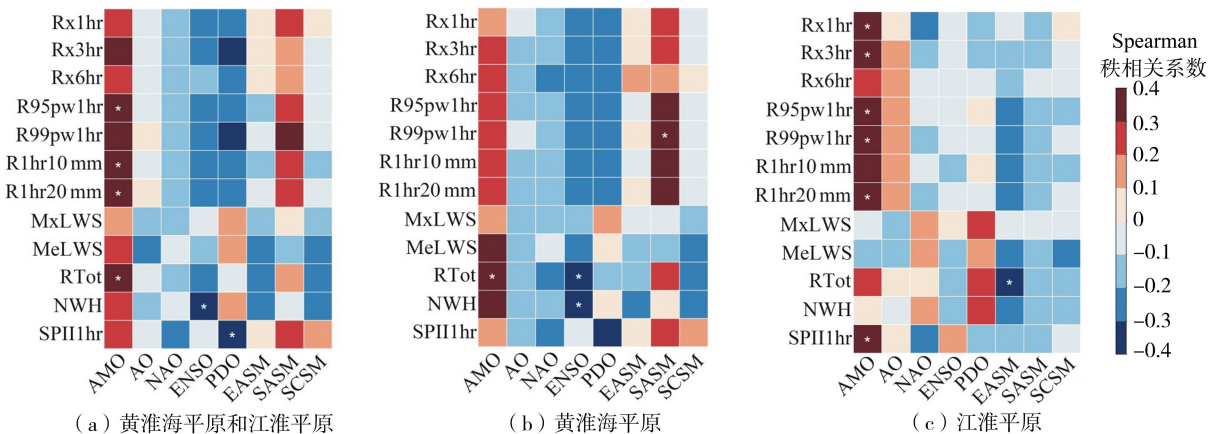


图 8 区域平均极端降水指数与大气环流指数的 Spearman 秩相关系数

Fig. 8 Spearman's rank correlation coefficients between the regionally averaged extreme precipitation indices and atmospheric circulation indices



续性指数和 SPII1hr 以外的极端降水指数影响较强,均呈负相关关系,且与 NWH 显著负相关。PDO 对 MxLWS、MeLWS、NWH 表现出正相关影响,而其他极端降水指数则表现为负相关关系,尤其与 SPII1hr 显著负相关。EASM 与 Rx1hr、Rx3hr、Rx6hr、SPII1hr 呈正相关关系,但相关性较弱,相关系数低于 0.1。SASM 与除了 MeLWS、NWH 外的极端降水指数表现出较强的正相关关系,SCSM 仅与 Rx1hr、SPII1hr 存在正相关关系,与其他降水指数呈负相关关系。

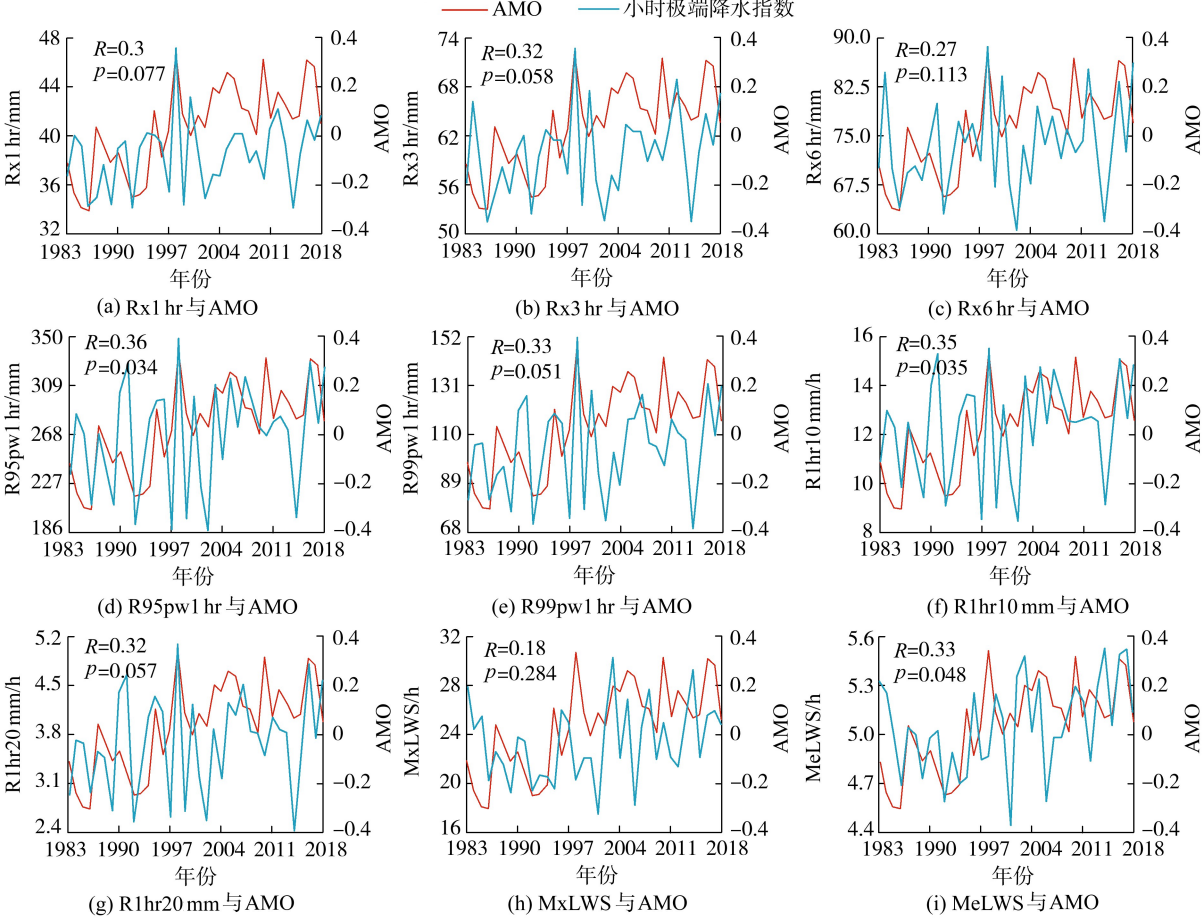
总体来说,对黄淮海平原和江淮平原的极端降水而言,AMO 的影响最大,ENSO 和 PDO 也是不可忽视的影响因素,而 AO、NAO 和夏季季风指数的影响并不显著。图 8(b) 为黄淮海平原的极端降水指数与大气环流指数的 Spearman 秩次相关系数,其总体特征与两大平原整体情况(图 8(a))基本一致,AMO、ENSO、SASM 对极端降水指数的影响较为显著。如图 8(c) 所示,对于江淮平原,AMO 与极端降水指数的相关性最高,其中强度指数、Rx1hr20 mm 以及 SPII1hr 与 AMO 呈显著正相关关系。NAO、ENSO、PDO 与部分极端降水指数呈正相关关系,而夏季季风指数与极端降水指数呈负相关关系,且 EASM 与 RTot 呈显著负相关关系。

中国东部地区的气候主要由 EAM 主导,而

ENSO 对 EAM 具有显著影响。连接 ENSO 与 EAM 的关键系统,是北太平洋西部对流层下层生成的异常反气旋(气旋)系统<sup>[38-39]</sup>。Linderholm 等<sup>[40]</sup>发现,中国夏季气候的主要模式与 NAO 年际变化高度相关,NAO 主要通过影响北大西洋地区的气压场与大气环流,间接作用于东亚地区的气候系统。Su 等<sup>[41]</sup>也发现,AMO 对长江流域的极端降水事件有显著影响,对该地区低于平均水平的降水事件贡献最大,表明 AMO 在影响长江流域气候模式中发挥了重要作用。杨萌洲等<sup>[42]</sup>在研究非典型大西洋尼诺对中国东部降水的影响时发现,大西洋尼诺不仅可显著影响大西洋周边区域的天气与气候状况,还能通过大气遥相关过程,对中国东部夏季前后汛期降水产生影响,与本文的研究结果一致。

### 3.6 极端降水指数与大尺度气候模式的时频相关性

基于极端降水指数与大气环流指数的相关性,利用交叉小波法,分析二者的周期相关性以及在时-频域的共同显著周期和相移。为保证时间尺度的一致性,首先计算 1983—2018 年暖季(4—10 月)黄淮海平原与江淮平原所有站点极端降水指数的逐月区域平均值,再与月尺度大气环流指数开展交叉小波分析。因 AMO 与极端降水指数的相关性最为显著,图 9 和图 10 分别展示了两大大平原区域平均极端





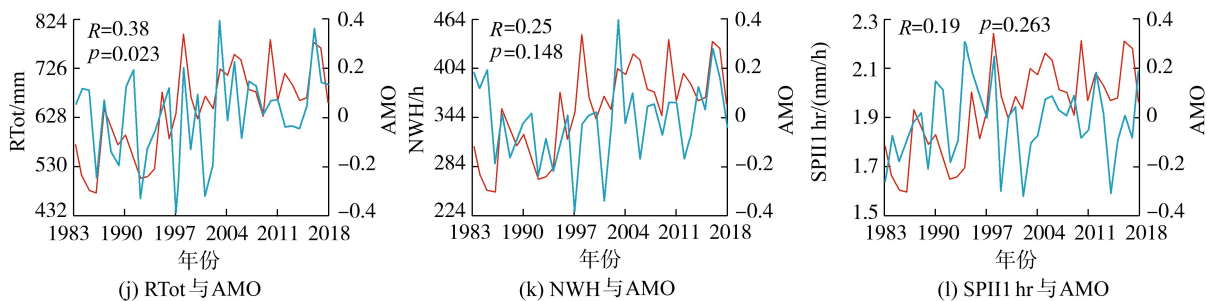


图 9 区域平均极端降水指数与 AMO 的时间序列图

Fig. 9 Time series plot of regionally averaged extreme precipitation indices and AMO

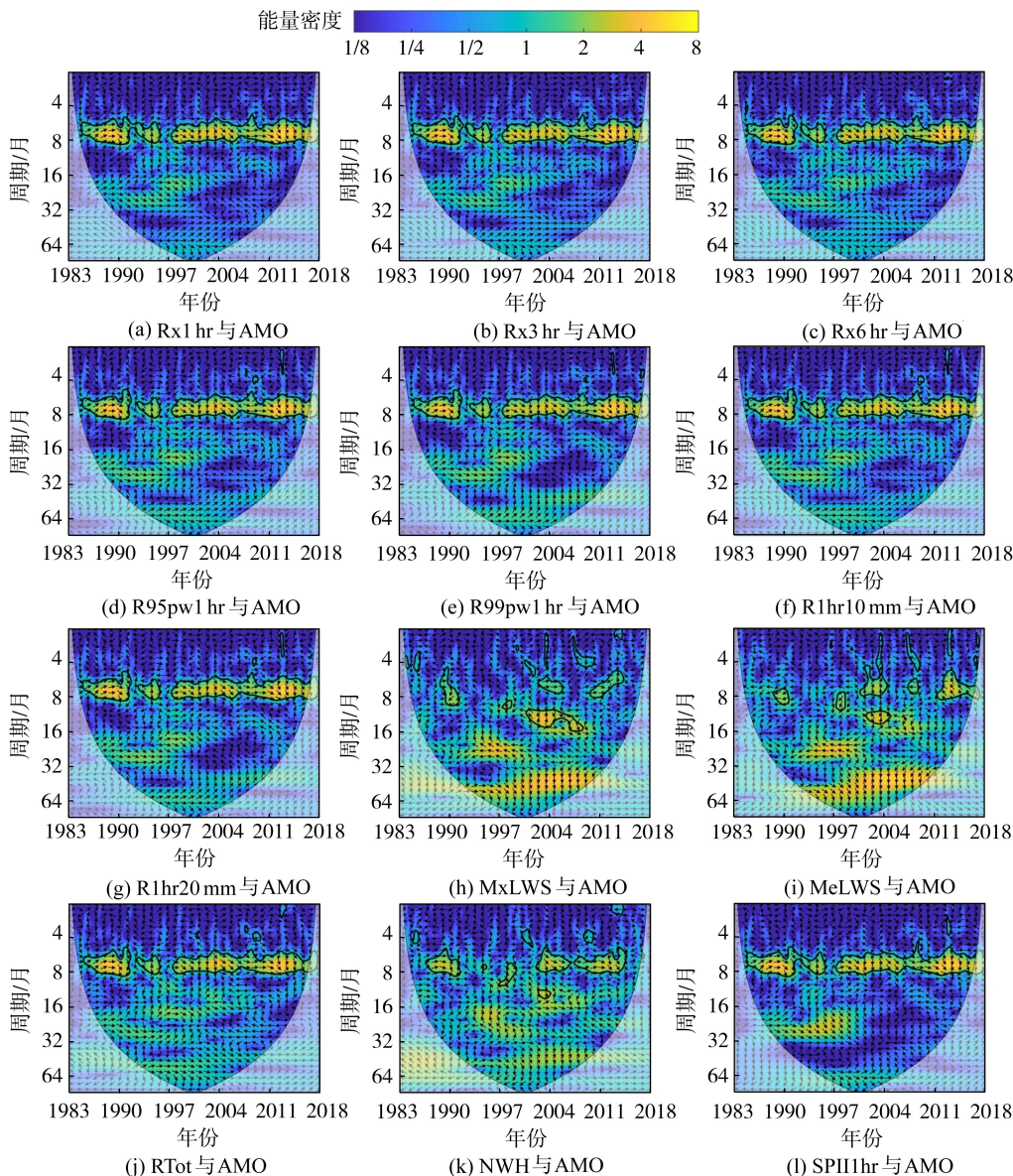


图 10 区域平均极端降水指数与 AMO 的交叉小波功率谱

Fig. 10 Cross-wavelet power spectrum of regionally averaged extreme precipitation indices and AMO

降水指数与 AMO 的时间序列图和交叉小波功率谱 (图 10 中黄色代表能量密度高值, 蓝色代表低值; 黑色细实线为小波边界效应影响锥曲线, 粗黑实线范围内表示通过置信水平 95% 的红色噪音标准谱检验)。

根据极端降水指数与 AMO 的交叉小波分析, AMO 与 MxLWS 在 1988—1991 年、2001—2008 年、2010—2014 年分别存在 5~10、12~16、6~8 月的共同显著周期 (图 10 (h)); 与 MeLWS 在 2000—2005 年、2011—2018 年存在 4~8 月的共同显著周

期(图 10(i));与 NWH 分别在 1986—1991 年、2002—2015 年有 5~9 月的共同显著周期(图 10(k)),而其他极端降水指数与 AMO 则呈现以 6~10 月为主的间歇性共同显著周期带。在 6~10 月的周期范围内,AMO 对除 NWH 和持续性指数外其他极端降水指数的影响模式基本一致。此外,AMO 与极端降水指数的相位关系在不同时间、不同极端降水指数之间存在差异,相位变化可能与 AMO 冷暖相位转换有关。

## 4 结 论

a. 年内分布上,夏季(6—8 月)降水的场次平均降水量、降水频次、平均降水强度明显高于其他季节,但平均降水历时低于其他季节,表明夏季降水呈历时短、频率高和强度大的特点。空间分布上,降水量从东南向西北呈减少趋势,降水频次由南向北递减,平均降水强度由西向东增加,降水历时则由西南向东北递减。

b. 从气候态特征来看,尽管江淮平原年降水量和降水频率明显高于黄淮海平原,但两者的平均降水强度十分接近。

c. 除 R1hr20 mm 外,50%以上站点的极端降水指数都表现出增加的趋势。83.6%的站点 MeLWS 呈增加趋势,显著增加站点占比超过 10%,主要分布在黄淮海平原。黄淮海平原和江淮平原 80%以上站点降水总量及降水发生频率整体呈现增加趋势,60%左右的气象站点显示平均降水强度有增强的现象,其中部分站点增长显著,主要分布在黄淮海平原北部和江淮平原南部。

d. Spearman 秩次相关分析结果表明,AMO 与黄淮海平原和江淮平原极端降水频率、强度和总降水量均显著相关;此外,ENSO 和 PDO 也是不容忽视的影响因素,而 AO、NAO 和夏季季风指数对黄淮海平原和江淮平原极端降水的影响相对较小。交叉小波分析结果表明,AMO 与强度指数和频率指数呈现以 6~10 月为主的间歇性共同显著周期带,其周期性变化和相位变化对极端降水的变化具有重要影响。

## 参考文献:

[ 1 ] Intergovernmental Panel on Climate Change ( IPCC ). Climate Change 2021: the physical science basis [ M ]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[ 2 ] 陈晓宏,罗佳颖,罗丹. 粤港澳大湾区极端降水的气温响应结构研究[ J ]. 水力发电学报, 2023, 42( 12 ): 1-13. ( CHEN Xiaohong, LUO Jiaying, LUO Dan. Temperature response structure of precipitation extremes in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [ J ]. Journal of

Hydroelectric Engineering, 2023, 42 ( 12 ): 1-13. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 宋蕾玥,张珂,晁丽君,等. 基于随机森林模型的长江流域分区多源融合降水模拟方法研究[ J ]. 水资源保护, 2024, 40 ( 3 ): 125-132. ( SONG Leiyue, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Research on zoning multi-source fusion precipitation simulation method of the Yangtze River Basin based on random forest model [ J ]. Water Resources Protection, 2024, 40 ( 3 ): 125-132. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 王珪,史海匀. 粤港澳大湾区极端降雨的时空变化及其驱动因素探究[ J ]. 水资源保护, 2024, 40 ( 6 ): 28-37. ( WANG Yao, SHI Haiyun. Exploring spatiotemporal variations and driving factors of extreme precipitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [ J ]. Water Resources Protection, 2024, 40 ( 6 ): 28-37. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 商守卫,王磊之,王银堂,等. 1960—2019 年成都地区极端降水时空演变特征分析[ J ]. 水资源保护, 2023, 39 ( 3 ): 195-204. ( SHANG Shouwei, WANG Leizhi, WANG Yintang, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area from 1960 to 2019 [ J ]. Water Resources Protection, 2023, 39( 3 ): 195-204. ( in Chinese ) )

[ 6 ] PETERSON T C, ZHANG X, BRUNET-INDIA M, et al. Changes in North American extremes derived from daily weather data [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113: D07113.

[ 7 ] 朱凯莉,赖成光,王兆礼,等. 城市化背景下长三角核心城市群汛期降水时空演变特征分析[ J ]. 水资源保护, 2023, 39 ( 6 ): 95-103. ( ZHU Kaili, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Temporal and spatial evolution characteristics analysis of flood season precipitation in core city group of the Yangtze River Delta under background of urbanization [ J ]. Water Resources Protection, 2023, 39 ( 6 ): 95-103. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 占龙飞,董保华,辛佳洁,等. 1961—2020 年中国极端降水指数时空变化特征[ J ]. 气候与环境研究, 2025, 30( 3 ): 359-372. ( ZHAN Longfei, DONG Baohua, XIN Jiajie, et al. Spatio-temporal variation characteristics in the extreme precipitation index in China during 1961-2020 [ J ]. Climatic and Environmental Research, 2025, 30 ( 3 ): 359-372. ( in Chinese ) )

[ 9 ] 王志福,钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征[ J ]. 水科学进展, 2009, 20( 1 ): 1-9. ( WANG Zhifu, QIAN Yongfu. Frequency and intensity of extreme precipitation events in China [ J ]. Advances in Water Science, 2009, 20( 1 ): 1-9. ( in Chinese ) )

[ 10 ] 任国玉,战云健,任玉玉,等. 中国大陆降水时空变异规律: I. 气候学特征[ J ]. 水科学进展, 2015, 26( 3 ): 299-310. ( REN Guoyu, ZHAN Yunjian, REN Yuyu, et

- al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over Chinese mainland: I. Climatology [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26 (3): 299-310. (in Chinese))
- [11] LI Xin, ZHANG Ke, BAO Hongjun, et al. Climatology and changes in hourly precipitation extremes over China during 1970-2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 839: 156297.
- [12] ZHAO W, KINOUCI T, ANG R, et al. A framework for quantifying climate-informed heavy rainfall change: implications for adaptation strategies [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 835: 155553.
- [13] BLANC A, BLANCHET J, CREUTIN J. Characterizing large-scale circulations driving extreme precipitation in the Northern French Alps [J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(1): 465-480.
- [14] WAN Wuyi, ZHOU Yu. Spatiotemporal patterns in persistent precipitation extremes of the Chinese mainland (1961-2022) and association with the dynamic factors [J]. *Atmospheric Research*, 2024, 310: 107600.
- [15] ZHANG Xuebin, WANG Jiafeng, ZWIERS F W, et al. The influence of large-scale climate variability on winter maximum daily precipitation over North America [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(11): 2902-2915.
- [16] GAO Tao, WANG H J, ZHOU Tianjun. Changes of extreme precipitation and nonlinear influence of climate variables over monsoon region in China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 197: 379-389.
- [17] 管新建, 刘源, 孟钰, 等. 中国洪涝灾害农业致灾性时空分布规律 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 21-25. (GUAN Xinjian, LIU Yuan, MENG Yu, et al. Analysis on spatiotemporal distribution of agricultural disaster caused by floods and waterlogging in China [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 21-25. (in Chinese))
- [18] NALLEY D, ADAMOWSKI J, BISWAS A, et al. A multiscale and multivariate analysis of precipitation and streamflow variability in relation to ENSO, NAO and PDO [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 288-307.
- [19] LI Xin, ZHANG Ke, GU Pengrui, et al. Changes in precipitation extremes in the Yangtze River Basin during 1960-2019 and the association with global warming, ENSO, and local effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 760: 144244.
- [20] DUAN Yongchao, MENG Fanhao, LIU Tie, et al. Sub-daily simulation of mountain flood processes based on the modified soil water assessment tool (SWAT) model [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(17): 3118.
- [21] CHEN Guangzhao, HOU Jingming, LIU Yuan, et al. Study on the sensitivity of urban inundation and watershed flood simulation to rainfall data spatial resolution [J]. *Urban Climate*, 2024, 57: 102125.
- [22] LI Jianping, ZENG Qingcun. A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20: 299-302.
- [23] LI Jianping, ZENG Qingcun. A unified monsoon index [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(8): 1151-1154.
- [24] WANG Bin, WU Zhiwei, LI Jianping, et al. How to measure the strength of the East Asian summer monsoon [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(17): 4449-4463.
- [25] 朱秀迪, 张强, 孙鹏. 北京市快速城市化对短时间尺度降水时空特征影响及成因 [J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2086-2104. (ZHU Xiudi, ZHANG Qiang, SUN Peng. Effects of urbanization on spatio-temporal distribution of precipitations in Beijing and its related causes [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2086-2104. (in Chinese))
- [26] 李建, 宇如聪, 孙激. 从小尺度考察中国中东部极端降水的持续性和季节特征 [J]. *气象学报*, 2013, 71(4): 652-659. (LI Jian, YU Rucong, SUN Wei. Observation of the persistence and seasonal characteristics of extreme precipitation in central and eastern China on an hourly scale [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 71(4): 652-659. (in Chinese))
- [27] ALEXANDER L V, FOWLER H J, BADOR M, et al. On the use of indices to study extreme precipitation on sub-daily and daily timescales [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(12): 125008.
- [28] LEWIS E, GUERREIRO S, BLENKINSOP S, et al. Quality control of a global sub-daily precipitation dataset and derived extreme precipitation indices [C]//EGU General Assembly 2019. Vienna, Austria: European Geosciences Union, 2019: 21.
- [29] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, 13(3): 245-259.
- [30] KENDALL M G. Rank correlation methods [J]. *British Journal of Psychology*, 1990, 25(1): 86-91.
- [31] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [32] VON STORCH H. Misuses of statistical analysis in climate research [M]//Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques Proceedings of an Autumn School Organized by the Commission of the European Community on Elba from October 30 to November 6, 1993. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999: 11-26.

(下转第 328 页)



[22] 贺宝根,周乃晟,顾群. 苏州河污染底泥处理的合理措施[J]. 上海师范大学学报(自然科学版),1997(4): 54-61. ( HE Baogen,ZHOU Naisheng, GU Qun. Rational division of treatment for Suzhou creek ' s polluted sediments[ J]. Journal of Shanghai Normal University ( Natural Sciences),1997(4):54-61. ( in Chinese))

[23] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. 水利学报,1963(2):1-12. (TANG Cunben. Sediment initiation law[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1963(2):1-12. ( in Chinese))

[24] 王庭健,夏忠林. 城市富营养湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究,1994,7(4): 12-19. ( WANG Tingjian, XIA Zhonglin. The effect to water quality of phosphorus loading and its release in the sediments of urban eutrophic lakes [ J]. Research of Environmental Sciences, 1994, 7 ( 4 ): 12-19. ( in Chinese))

[25] 彭进平,逢勇,李一平,等. 水动力条件对湖泊水体磷素质量浓度的影响[J]. 生态环境,2003,12(4): 388-392. ( PENG Jinping, PANG Yong, LI Yiping, et al. The effect of water dynamical condition on phosphorus in lakes [ J]. Ecology and Environment Sciences,2003,12(4): 388-392. ( in Chinese))

[26] CHENG Pengda, WANG Xinquan, FENG Chun. Numerical simulation of phosphorus release from resuspended sediment[J]. Acta Mechanica Sinica,2020, 36:1191-1201.

[27] 王佩,卢少勇,王殿武,等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. 中国环境科学,2012,32(4): 703-709. ( WANG Pei, LU Shaoyong, WANG Dianwu, et al. Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake [ J]. China Environmental Science,2012, 32(4): 703-709. ( in Chinese))

[28] 成杭新,李括,李敏,等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘,2014,21(3): 265-306. ( CHENG Hangxin, LI Kuo, LI Min, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[ J]. Earth Science Frontiers,2014,21(3):265-306. ( in Chinese))

[29] 王思如,顾一成,杨大文,等. 长江下游典型平原城市感潮河网水动力提升分析[J]. 水科学进展,2022,33(1): 91-101. ( WANG Siru, GU Yicheng, YANG Dawen, et al. Study on hydrodynamic improvement of urban tidal river for a typical plain cities in the lower reaches of Yangtze River[ J]. Advances in Water Science,2022,33(1):91-101. ( in Chinese))

( 收稿日期:2024 - 11 - 26 编辑:胡新宇)

( 上接第 295 页)

[33] WANG Xiaolan,SWAIL V R. Changes of extreme wave heights in Northern Hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes[ J]. Journal of Climate, 2001,14(10):2204-2221.

[34] HUDGINS L, FRIEHE C A, MAYER M E. Wavelet transforms and atmopsheric turbulence [ J]. Physical Review Letters,1993,71(20):3279.

[35] TORRENCE C,COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[ J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1998,79(1):61-78.

[36] 傅云飞,罗晶,王东勇,等. 夏季江淮地区降水的气候变化研究进展[J]. 暴雨灾害,2020,39(4):317-324. ( FU Yunfei, LUO Jing, WANG Dongyong, et al. Research progress on climate change of summer precipitation in the Jianghuai region[ J]. Torrential Rain and Disasters,2020, 39(4):317-324. ( in Chinese))

[37] WEI Wei, ZHANG Renhe, WEN Min, et al. Relationship between the Asian westerly jet stream and summer rainfall over central Asia and North China: roles of the Indian monsoon and the South Asian high [ J]. Journal of Climate,2017,30(2):537-552.

[38] WANG Bin, WU Renguang, FU J X. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [ J]. Journal of Climate,2000,13(9):1517-1536.

[39] CHEN Wen, FENG Juan, WU Renguang. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon [ J]. Journal of Climate, 2013,26(2):622-635.

[40] LINDERHOLM H W, OU T, JEONG J H, et al. Interannual teleconnections between the summer North Atlantic oscillation and the East Asian summer monsoon [ J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011,116:D13.

[41] SU Zhenkuan, HAO Zhenchun, YUAN Feifei, et al. Spatiotemporal variability of extreme summer precipitation over the Yangtze River Basin and the associations with climate patterns[ J]. Water,2017,9(11):873.

[42] 杨萌洲,袁潮霞. 非典型大西洋尼诺对中国东部前、后汛期降水的影响[J]. 大气科学学报,2024,47(2):260-272. ( YANG Mengzhou, YUAN Chaoxia, . Impacts of non-canonical Atlantic Nino on Eastern China precipitation in the early and late rainy seasons [ J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2024, 47 ( 2 ): 260-272. ( in Chinese))

( 收稿日期:2025 - 03 - 13 编辑:胡新宇)