

长江中下游极端降水时空演变特征研究

邹磊¹ 夏军^{1, 2} 张印²¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及

地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

【摘要】: 以长江中下游为研究对象, 基于 131 个气象站点 1961~2017 年的逐日降水资料, 选取 9 种极端降水指数, 利用 Mann-Kendall 趋势分析和交叉小波变换深入研究了长江中下游流域极端降水时空分布特征及其与太阳黑子和大气环流异常因子之间的关系。研究结果表明: (1) 1961~2017 年间, 长江中下游流域极端降水指数除持续干燥指数(CWD)和持续湿润指数(CDD)外, 其余 7 种降水指数均呈现上升趋势, 其中年降水总量(PRCPTOT)达 16.59mm/10 年; (2) 除 CDD、CWD 外, 其余极端降水指数均呈现由流域东南部向三面递减的半环状变化趋势, 多数极端降水指数在洞庭湖流域、长江下游及太湖流域上升趋势显著; (3) 设计重现期为 50 年时, 除 CDD、CWD 外, 其余极端降水指数空间分布由东南部向西北部递减, 两处异常分布可能与地形因素有关; (4) 太阳黑子和大气环流异常因子对极端降水的变化有较强的影响, 其中太阳黑子的影响最大, ENSO 次之, PDO 最弱。该研究结果可为极端降水事件驱动力的深入探究奠定基础, 进而为防灾减灾工作提供依据和支撑。

【关键词】: 极端降水 变化趋势 时空特征 长江中下游

【中图分类号】: P467 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)05-1264-11

近年来, 随着全球气候变暖, 全球范围内降水分配不均愈发显著, 极端降水事件频率增加, 极端降水事件对自然社会的冲击远大于气候平均变化带来的影响(IPCCAR5), 受到了诸多学者的广泛关注^[1~3]。例如, 北半球中高纬度降水量在气候变化背景下增加的地区扩大, 极端降水增加了 5%~10%^[4]; 美国东北部地区 1996~2014 年的极端降水比 1901~1995 年高出 53%^[5]; 大规模的大气环流对欧洲极端降水的变化产生了重要的影响^[6]; 近 100 年来(1909~2011 年)中国地表平均增温速率高于全球平均值(第三次气候变化国家评估报告), 由此引发了极端降水频率和强度的显著变化^[7,8]。极端降水正给全球带来无法预估的灾害损失, 因此, 开展极端降水时空变化特征及其驱动力研究, 对掌握极端降水的地域分异特征, 针对地域极端降水特性制定防灾减灾预案具有重要意义。

众多学者已经开展了针对中国极端降水事件的时空变化特征分析。王俊超等^[9]对乌江流域极端降水时空分布特征及重现期进行分析, 乌江流域发生极端持续强降水年平均次数呈不显著的减少趋势, 但极端持续强降水量呈不显著的增加趋势; 杨玮等^[10]对江淮流域梅汛期的极端降水变化特征进行了研究, 极端降水量和极端降水日数整体呈现由安徽南部向四周递减的空间分布特征, 极端降水量约占梅汛期降水总量的 1/4~1/3; 李丽平等^[11]对华南地区 40 年的逐日降水资料进行分析, 发现 90 年代以来, 华南前

作者简介: 邹磊(1990~), 男, 助理研究员, 主要研究方向为水文水资源。E-mail: zoulei@igsnrr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41890822)

汛期总降水量显著增加,与强降水量、强降水频率以及暴雨日数的增加密切相关;王冀等^[12]分析华北地区近 50 年的极端气候指数时空变化规律,发现华北地区极端降水量、降水次数和降水强度呈下降趋势,且不同地区速率存在差异。不同地区及流域间的极端降水分布特征各异。而长江流域作为气候变化区域响应的重要地区,降水年内和年际变率大(IPCCAR4)。

上述研究主要关注极端降水的时空变化趋势,其变化的驱动机制还在探索研究之中。有研究表明,大气环流异常因子(如厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)和太平洋十年涛动(PDO))和太阳黑子对降雨有较强的影响^[13,14]。大气环流异常因子可以反映大气环流变化的形势,通过水汽输送影响区域降雨。太阳黑子会影响区域水热平衡,进而影响降雨。长江流域中下游地区是长江流域人类活动最强烈、洪涝灾害最为频繁严重的地区^[15]。已有的研究主要是针对长江流域极端降水的变化趋势和区域差异等进行的^[16~18],而对于其变化驱动力的研究尚少,且研究时间未能准确反映现状特点,关于大气环流异常因子和太阳黑子对该区域极端降水事件的影响研究仍需进一步深入。鉴于此,本文以长江中下游流域为研究区,基于 131 个气象站点 1961~2017 年逐日降水观测资料,选取 9 种极端降水指数,深入分析长江中下游流域极端降水时空分布特征及其与大气环流异常因子和太阳黑子之间的相关性,以期对极端气候事件驱动力探究及气候预测奠定基础,进而为防灾减灾提供决策支撑。

1 研究区概况

长江中下游流域指湖北宜昌以东的长江流域,集水区间面积约 $7.76 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1),属典型的亚热带季风气候,冬季温和少雨,夏季高温多雨。每年 6、7 月受夏季风和北方冷空气的影响,形成“梅雨”,出现长时间的连阴雨天气。梅雨季节过后受西太平洋副热带高压影响,且少台风活动,会形成“伏旱”。降水的不均匀分布是长江中下游流域频繁旱涝灾害的主要原因之一,加之流域内城市密集、人口稠密。因此,流域极端降水会加重长江中下游流域的降水时空分布不均,其时空变化特征和变化驱动力是值得深入研究的。

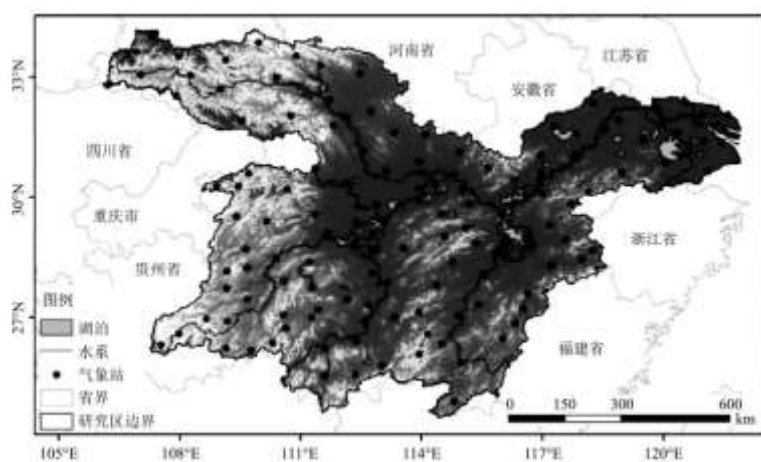


图 1 长江中下游流域及气象站点分布

2 资料与方法

2.1 研究数据

气象资料来源于中国国家气象科学数据共享服务平台提供的长江中下游流域 1961~2017 年共 57 年逐日降水数据。剔除资料不全和长度不够的站点后,最终选择了 131 个气象站点,且这 131 个气象站点的逐日降水数据均通过了均一性检验。

为了研究大气环流异常因子及太阳黑子对极端降水的影响,本文中选取 ENSO 和 PDO 为代表性大气环流异常因子。以 Nino3.4 指数表征 ENSO 的状态,数据来自美国国家海洋与大气管理局 (NOAA) 地球系统研究实验室 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>)。PDO 数据来自 NOAA 地球系统研究室 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>)。太阳黑子数据来自国际科学协会理事会 (ICSU) 世界数据系统 (WDS) 的太阳黑子指数 (<http://sidc.oma.be/silso/dayssnplot>)。

2.2 研究方法

2.2.1 极端降水指数

2 本文选取气候变化与监测指数专家团队 (ETC-CDI) 定义的 27 个极端降水指数中的 9 个来反映长江中下游流域极端降水的强度、频率及持续时间。ETCCDI 建立的标准指数已广泛用于分析世界不同地区极端降水的变化^[19]。

2.2.2 Mann-Kendall 趋势分析

在时间序列趋势分析中, Mann-Kendall (MK) 检验法是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,最初由 H. B. Mann 等^[20]提出。MK 检验法以数据序列平稳为前提,且该序列是随机独立的,它的特点为不受异常值干扰,检测样本不必遵循一定分布。原假设 H_0 为时间序列数据 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本;备择假设 H_1 是双边检验,对于所有的 $k, j \leq n$, 且 $k \neq j$, x_k 和 x_j 的分布是不相同的,检验的统计变量 S 为:

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

式中:

$$\text{Sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & x_j - x_k > 0 \\ 0, & x_j - x_k = 0 \\ -1, & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

S 为正态分布,均值为 0, 方差 $\text{Var}(S)$ 计算如下:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

当 $n > 10$ 时,标准的正态统计变量如下:

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

式中: Z 为时间序列的标准化统计量, 用来判断序列的变化趋势。 Z 值大于 0, 表示趋势上升; Z 值小于 0, 表示趋势下降。当给定显著性水平 α 后, 可在正态分布表中查得临界值 $Z_{1-\alpha/2}$, 若 $Z > Z_{1-\alpha/2}$, 则说明序列的变化趋势性显著。本文选定的显著性水平 $\alpha = 0.05$, 查得 $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$, 所以当 $Z > 1.96$ 时有显著的增加趋势, 而当 $Z < -1.96$ 时有显著的减小趋势。

同时, 本文采用 Sen' s 斜率估计法^[21]计算降水序列的斜率 β 来评估趋势的大小, 其不受异常值的影响。Sen' s 的斜率计算公式为:

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

式中: β 是趋势斜率的估计值; Median 为取中值函数; x_i 和 x_j 是分别第 i 和第 j 时刻的观测值。

2.2.3 交叉小波分析

交叉小波是将小波变换和交叉谱分析两种方法相结合而产生的一种信号分析手段。该方法既可以从多时间尺度上来研究两个时间序列在时频域中的相互关系, 又可以揭示两个序列在不同时段尺度上的一致性和相关性, 也能再现该时频域空间中的相位关系^[22]。本研究所采用的计算过程参考文献^[23~25]的计算方法和程序:

对于两个时间序列 x_n 和 y_n , 交叉小波变换 (XWT) 定义为:

$$W_n^{xy}(s) = W_n^x(s) W_n^{y*}(s) \quad (6)$$

式中: $W_n^x(s)$ 和 $W_n^y(s)$ 分别为序列 x_n 和 y_n 的连续小波变换, $W_n^{y*}(s)$ 为 $W_n^y(s)$ 的复共轭, s 为时滞。交叉小波功率谱可定义为 $W_n^{xy}(s)$ 。

交叉小波的相位角定义为:

$$\varphi = \arctan \frac{\Im\{W_n^{xy}(s)\}}{\Re\{W_n^{xy}(s)\}} \quad (7)$$

式中: $\{W_n^{xy}(s)\}$ 和 $\{W_n^{xy}(s)\}$ 分别表示 $W_n^{xy}(s)$ 的虚部和实部。位相谱反映两序列在不同时域的滞后性特征, 据相位角正负向可分析时频域内两序列间的相关性。

Torrence 等^[24]给出了具有背景功率谱 P_k^x 和 P_k^y 的两个时间序列的交叉小波功率的理论分布, 如下所示:

$$D\left(\frac{|W_u^X(s)W_u^{Y^*}(s)|}{\sigma_X\sigma_Y} < p\right) = \frac{Z_v(p)}{v}\sqrt{P_X^X P_Y^Y} \quad (8)$$

式中: σ_X 和 σ_Y 分别为时间序列 x_n 和 y_n 的标准差; $Z_v(p)$ 是与概率 p 有关的置信度; v 为自由度。其显著性检验的标准谱选取两个 χ^2 分布小波谱乘积的平方根。对于实小波(自由度 $v=1$), 在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的条件下, $Z_1(95\%)=2.182$; 对于复小波($v=2$), $Z_2(95\%)=3.999$ 。

3 结果与分析

3.1 长江中下游极端降水指数的时空变化分析

3.1.1 极端降水指数的时间序列变化特征

本文采用 Mann-Kendall 趋势分析方法对长江中下游流域极端降水指数的时间变化趋势进行了分析。由图 2 所示, 1961~2017 年间, 在 95% 的置信水平下, 除 CDD、PRCPTOT 和 RX5day 的变化趋势并不显著外(图 2a, 2c, 2h), 其余极端降水指数年均值均产生了显著的变化趋势。其中, 指示降水强度的指数 R25mm 以 $0.4\text{d}/10$ 年的速率显著上升; 其余为指示极端降水量的指数, R95 和 R99 分别以 $20.53\text{mm}/10$ 年和 $11.88\text{mm}/10$ 年的速率显著升高, RX1day 和 RX5day 分别以 $2.67\text{mm}/10$ 年和 $3.82\text{mm}/10$ 年的速率升高, SDII 以 $0.27\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}/10$ 年的速率显著上升。研究所选 9 种极端降水指数整体呈现上升趋势, 且多数指数上升显著, 表明 1961~2017 年间长江中下游流域极端降水事件发生频率持续增加, 并存在继续上升的趋势。

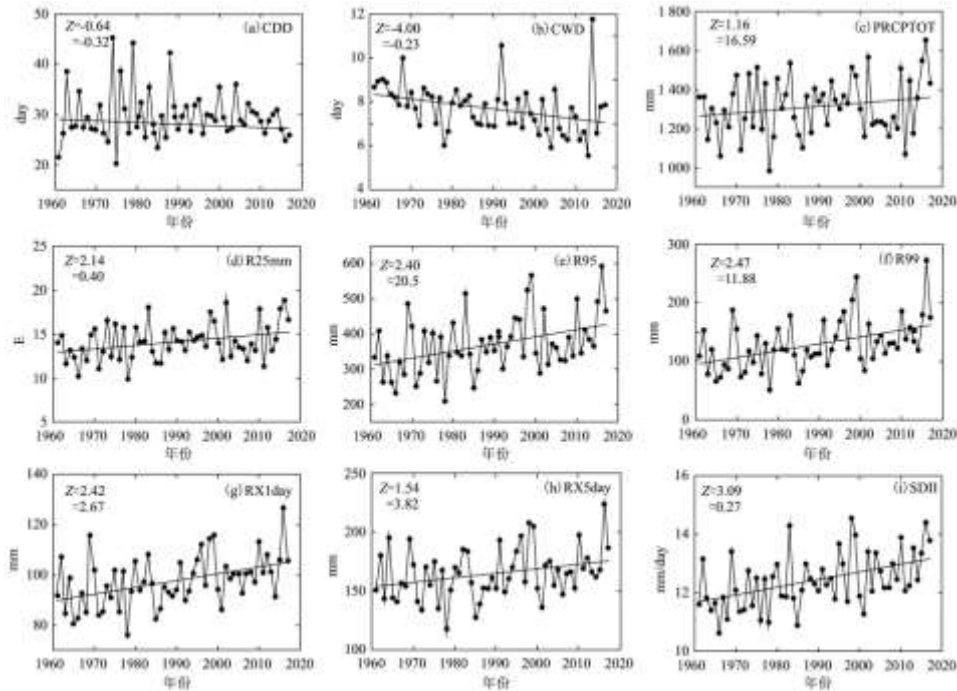


图 2 长江中下游流域极端降水指数变化趋势

虽然 CDD 和 CWD 均减小, 但是 R25mm、R95、R99 和 RX1day 显著增加, RX5day 也呈现不显著的增加趋势, 说明研究区持续干旱和湿润日数减小, 降水更为集中, 单日或者连续数日(小数值)的降水量将会更大, 更易引起极端降水事件。

3.1.2 极端降水指数的空间分布特征

图3给出了9个极端降水指数的空间分布及变化趋势。在整个研究区域中，CDD高值区主要分布于流域西北部的汉江流域，CWD高值区分布在流域东南部，而低值区分布在西北部 and 东北部，即汉江流域和长江下游流域，总体呈现出由东南向西北减少的趋势。PRCPTOT、R25mm、R95、R99、RX1day、RX5day和SDII的分布较为相似(图3c~图3i)，高值区主要分布于流域东南部的鄱阳湖流域，最低值主要分布在流域西北部的汉江流域，同时较低值区分布于流域西南部的洞庭湖上游和东北部的长江下游及太湖流域，呈现出半环形分布，这与该流域年降水量的空间分布基本一致^[26]。表2为极端降水指数之间的相关系数，由表中可得，持续降水天数(CDD和CWD)的相关系数相对较小，与其他极端降水指数之间的相关系数没有超过0.05显著性水平。而其余极端降水指数之间的相关系数均超过0.01的显著性水平，呈现显著的正相关关系，表征各极端降水指数具有相似的空间分布。

研究区域内131个站点中，有95个(72.52%)站点的CDD值呈现出下降趋势，其中20个站点下降趋势显著，空间上主要分布在洞庭湖流域的下游区域，太湖流域等。有89个(67.9%)站点的CWD值呈现出下降趋势，其中16个站点下降趋势显著。主要分布在洞庭湖流域。R25mm和RX1day能够表征中等强度及较强降水特征，流域内105个站点(80.2%)R25mm呈现上升趋势，其中17个站点上升趋势显著，主要分布在洞庭湖流域的下游区域、鄱阳湖和太湖流域。流域内有100个(76.3%)站点RX1day呈现上升趋势，主要分布在主要分布在洞庭湖上游区域和长江下游区域；PRCPTOT、R95和R99可表征强降水过程，流域内99个站点(占75.6%)PRCPTOT呈上升趋势，主要位于研究区的东部，即太湖流域。112个(85.5%)站点的R95值呈现上升趋势，107个(81.7%)站点的R99值呈现上升趋势，其中17个站点上升趋势显著。84.7%的站点R95和R99的值的趋势相同，上升显著的站点集中在洞庭湖流域的上游区域和长江下游流域。

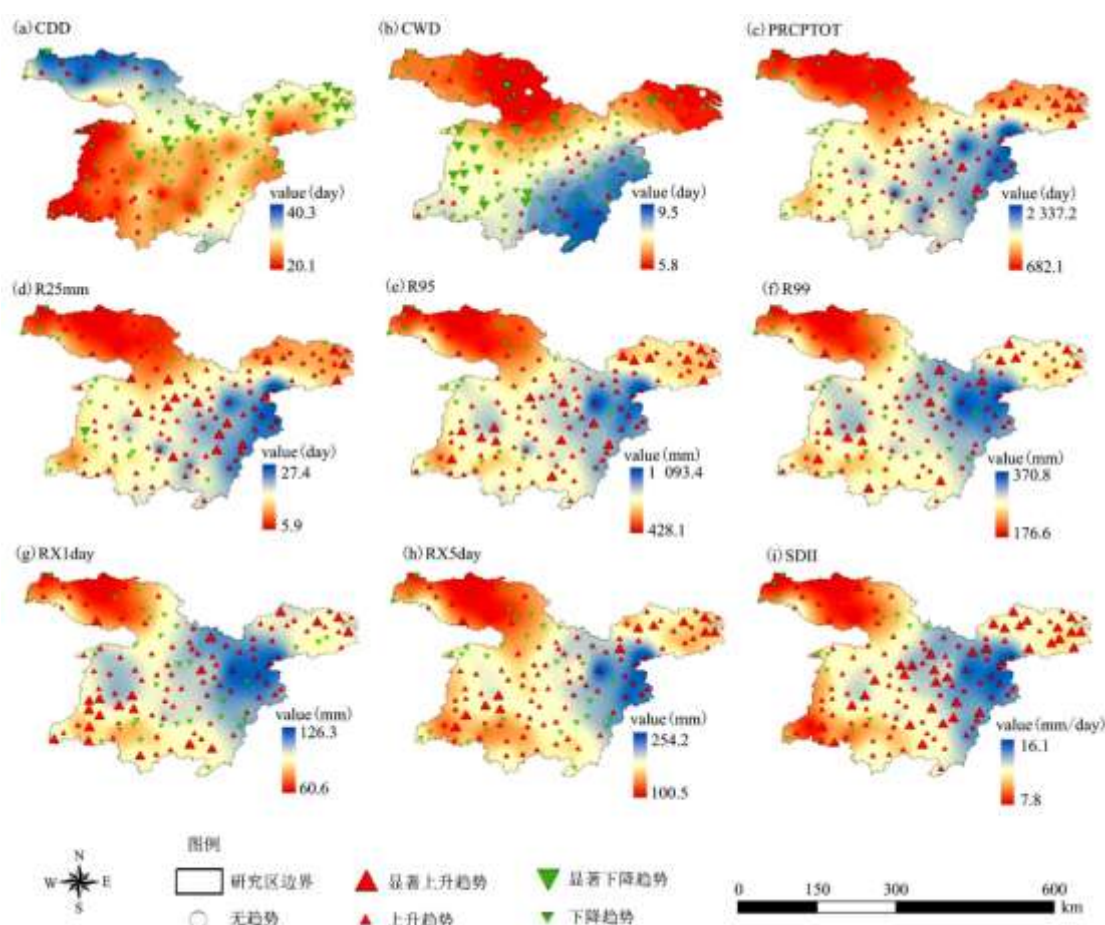


图 3 长江中下游流域极端降水指数空间分布及其变化趋势

综上所述,除 CDD 和 CWD 主要呈现下降趋势外,其余均呈现大范围的上升趋势,与 3.1.1 的结果相同,且就显著上升趋势而言,大部分的显著上升趋势出现在洞庭湖流域上游、长江下游及太湖流域,表明这些地区在气候变化过程极端降水事件的发生频率将显著提高。

3.2 设计重现期的极端降水指数空间变化

极端降水事件对经济社会有着重要的影响。在重大工程的施工设计中,往往要考虑极端降水事件出现的重现期,如在水利设施的设计中要考虑最大降水量的重现期,以确保工程的安全性^[27]。长江中下游流域暴雨洪涝等自然灾害频繁出现,严重威胁流域沿线的水安全,因此,对长江中下游流域设计重现期的极端降水指数空间变化研究,对长江中下游流域水安全及水资源科学调度有重要意义。

本研究使用 GEV 分布 (Generalized Extreme Value) 对长江中下游流域重现期为 50 年的极端降水指数序列进行拟合 (图 4),该分布已被广泛应用于极端指标拟合,且被认为模拟效果较好^[28]。结果表明,长江中下游流域重现期为 50 年的极端降水指数分布与 1961~2017 年长江中下游流域极端降水指数空间分布趋势相似,因此,使用 GEV 进行极端降水指数序列拟合是合理的。

除指示降水历时的 CDD 与 CWD 外,其余指数整体呈现出指数值从东南向西北的减少趋势,表明长江中下游流域东南部的鄱阳湖流域、长江下游流域、太湖流域极端降水频率较大,极易遭受极端降水事件。就 CDD 而言,指数值呈现从西北向东南减少的趋势,说明长江中下游流域的西北部,即汉江流域更容易遭受长历时的连续干旱日。而就 CWD 而言,指数值分布并不存在明显空间趋势。对于其他极端降水指数,在 109° E 到 112° E 的汉江流域南部也出现了较高的降水极值。这可能是由于夏季风控制时,偏东气流在此地受大巴山及神农架地形抬升,水汽在山地前堆积,形成较为集中的地形雨,导致极端降水指数的升高^[29]。而在东南边缘,极端降水指数相对较低,可能是由于武夷山脉对偏东气流的阻挡,气团在越过武夷山脉后在长江中下游流域的东南方向形成焚风效应,造成该地极端降水指数的降低^[30]。设计重现期的极端降水指数空间变化表明,长江中下游流域东南部的极端降水风险最高。因此,需要采取更多的工程和非工程措施来减少该流域极端降水对经济社会带来的损失。

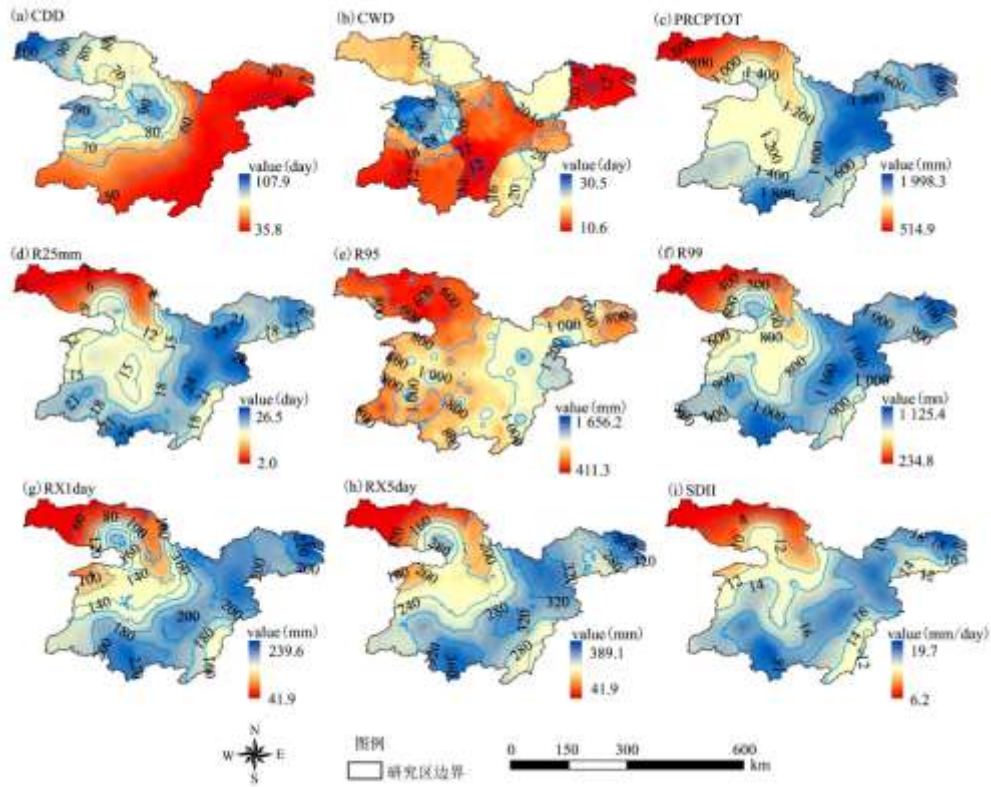


图 4 长江中下游流域重现期为 50 年的极端降水指数分布图

3.3 极端降水指数变化的驱动力分析

本文利用交叉小波变换探究大气环流异常因子和太阳黑子与极端降水指数之间的相关性。为了便于分析, 本文从 9 种极端降水指数中选取 CWD, R25mm 和 RX1day 作为代表性指数分析极端降水指数与大气环流异常因子(ENSO 和 PDO)以及太阳黑子之间的相关性。在交叉小波结果图中, 颜色越接近红色代表相关性越强, 越接近蓝色代表相关性越弱;粗实线区域表示通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 条件下的红噪声标准谱的检验;箭头表示两者之间的位相关系, $\rightarrow$ 表示两时间序列变化一致, $\leftarrow$ 表示反位相, 说明两者为负相关关系;黑色细实线包围的部分为小波影响锥(Cone of Influence, COI), 表示交叉小波变换的数据边缘效应影响较大的区域。

图 5 为长江中下游流域极端降水指数与 EN-50、PDO 和太阳黑子的交叉小波能量谱。例如, 能量谱显示, CWD 和 ENSO 在 1982~1988 年间有 4~5 年周期的较显著的负相关关系(图 5a); R25mm 和 ENSO 在 1968~1972 年间有 2~4 年周期的正相关关系, 在 1982~1984 年间有 3~4 年周期的较显著的正相关关系(图 5b); CWD 与 PDO 在 1990~1992 年间有 4~6 年周期的正相关关系, 在 2008~2012 年间有 3~6 年周期的正相关关系(图 5d); R25mm 与太阳黑子在 1965~1993 年间有 7~13 年周期显著的正相关关系(图 5h)。RX1day 与太阳黑子在 1966~1999 年间有 10~13 年周期显著的正相关关系(图 5i)。可以看出, 太阳黑子对极端降水的影响最强, ENSO 次之, PDO 影响最弱。一些研究证明, 太阳黑子的活动通过影响辐射导致地球表面温度和气压变化, 从而影响大气环流的变化, 随之影响天气变化, 造成降雨结构变化^[31]。交叉小波图也显示, 在有些年份, ENSO、PDO 和太阳黑子对流域极端降水的降水并不强烈, 这说明可能存在其他的影响因素对极端降水的变化产生一定程度的影响, 具体影响机理需要进一步探究。综上, 太阳黑子和大气环流异常因子对长江中下游流域的极端降水指数变化有重要影响, 这些影响因子的分析对长江中下游流域应对极端事件和水资源开发利用有重要的理论和现实意义。

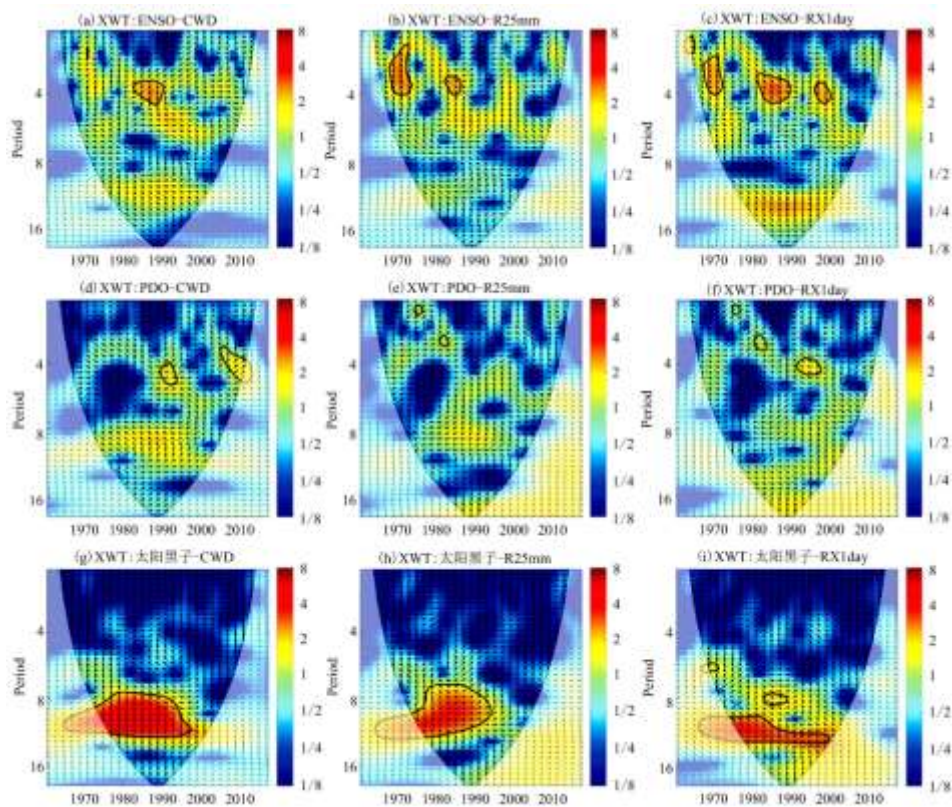


图 5 长江中下游流域极端降水指数与 ENSO、PDO、和太阳黑子的交叉小波功率谱

4 结论

本文基于长江中下游流域 131 个气象站点长序列的逐日降水数据，选用 9 种极端降水指数，对长江中下游流域极端降水事件的时空变化特征进行了分析，并探究了大气环流因子与极端降水事件间的相关性，主要结论如下：

(1) 1961~2017 年间，长江中下游流域极端降水指数除 CWD 和 CDD 外，均呈现上升趋势，其中 R25mm、R95、R99、RX1day 和 SDII 上升趋势显著。长江中下游流域的极端降水事件可能随着时间的推移，发生强度和发生频率不断增加。

(2) 长江中下游流域的极端降水指数除 CDD、CWD 外，其余降水指数均呈现由流域东南部向三面递减的半环状变化趋势，表明长江中下游流域东南部更容易发生极端降水事件。且除 CDD、CWD 外的各极端降水指数存在显著的正相关关系，呈现分布的一致性。大部分极端降水指数的显著上升趋势出现在洞庭湖流域上游、长江下游及太湖流域，表明这些地区在气候变化过程极端降水事件的发生频率将显著提高。

(3) 在设计重现期为 50 年的条件下，对长江中下游流域极端降水指数序列进行拟合，除 CWD 空间趋势不明显，CDD 由流域东南部向西北部递增，其余极端降水指数由东南部向西北部递减，两处异常分布可能与地形因素有关。

(4) 交叉小波图显示太阳黑子和大气环流异常因子对极端降水的变化有较强的影响，其中太阳黑子的影响最大，ENSO 次之，PDO 最弱。

参考文献：

-
- [1]苏布达, 姜彤, 董文杰. 长江流域极端强降水分布特征的统计拟合[J]. 气象科学, 2008, 28(6):625-639.
- [2]PFAHL S, O' GORMAN P A, FISCHER E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation[J]. Nature Climate Change, 2017, 7 (6):423-427.
- [3]潘欣, 尹义星, 王小军. 1960-2010 年长江流域极端降水的时空演变及未来趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 436-444.
- [4]WU H J, LAU W K. Detecting climate signals in precipitation extremes from TRMM (1998-2013)-Increasing contrast between wet and dry extremes during the “global warming hiatus” [J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43 (3):1340-1348.
- [5]HUANG H P, WINTER J M, OSTERBERG E C, et al. Total and extreme precipitation changes over the northeastern united states[J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(6):1783-1798.
- [6]TABARI H, WILLEMS P. Lagged influence of Atlantic and Pacific climate patterns on European extreme precipitation [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1):5748.
- [7]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.
- [8]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.
- [9]王俊超, 彭涛, 王清. 乌江流域极端降水时空分布特征及重现期分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3):267-275.
- [10]杨玮, 程智. 近 53 年江淮流域梅汛期极端降水变化特征[J]. 气象, 2015, 41(9):1126-1133.
- [11]李丽平, 章开美, 王超, 等. 近 40 年华南前汛期极端降水时空演变特征[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4):443-450.
- [12]王冀, 蒋大凯, 张英娟. 华北地区极端气候事件的时空变化规律分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2):166-173.
- [13]李夫星, 陈东, 汤秋鸿. 黄河流域水文气象要素变化及与东亚夏季风的关系[J]. 水科学进展, 2015, 26(4):481-490.
- [14]董林垚, 张平仓, 刘纪根, 等. 太阳黑子和 ENSO 对日本吉野川流域水文要素影响[J]. 水科学进展, 2017, 28(5):671-680.
- [15]李安强, 张建云, 仲志余, 等. 长江流域上游控制性水库群联合防洪调度研究[J]. 水利学报, 2013, 44(1):59-66.
- [16]陈峪, 陈鲜艳, 任国玉. 中国主要河流流域极端降水变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(4):265-269.
- [17]贺冰蕊, 翟盘茂. 中国 1961-2016 年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5):437-444.
- [18]王蒙, 殷淑燕. 近 52a 长江中下游地区极端降水的时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7):1221-1229.

-
- [19]尹红,孙颖.基于ETCCDI指数2017年中国极端温度和降水特征分析[J].气候变化研究进展,2019,15(4):363-373.
- [20]MANN H B.Nonparametric tests against trend[J],Econometrica,1945,13(3):245-259.
- [21]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.
- [22]刘志方,刘友存,郝永红,等.黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J].干旱区地理,2014,37(6):1137-1146.
- [23]GRINSTED A,MOORE J C,JEVREJEVA S.Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J].Nonlinear Processes in Geophysics,2004,11(5-6):561-566.
- [24]TORRENCE C,COMPO G P.A practical guide to wavelet analysis[J].Bulletin of the American Meteorological Society,1998,79(1):61-78.
- [25]张克新,潘少明,曹立国,等.横断山区季风期水分盈亏量时空变化特征及其与若干气候指数的相关性分析[J].自然资源学报,2014,29(11):1869-1877.
- [26]张峻,张艺玄.长江中下游地区近60a降水变化规律研究[J].暴雨灾害,2019,38(3):259-266.
- [27]荣艳淑,王文,王鹏,等.淮河流域极端降水特征及不同重现期降水量估计[J].河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):1-8.
- [28]FISCHER T,SU B,LUO Y,et al.Probability distribution of precipitation extremes for weather index:Based insurance in the Zhujiang River Basin,South China[J].Journal of Hydrometeorology,2012,13(3):1023-1037.
- [29]姚昊,潘晓滨,臧增亮.一次鄂西地区暴雨过程中地形敏感性试验研究[J].气象与环境学报,2008,24(5):63-68.
- [30]朱素行,徐海明,徐蜜蜜.亚洲夏季风区中尺度地形降水结构及分布特征[J].大气科学,2010,34(1):73-84.
- [31]贾玉芳,申洪源,丁召静.鄱阳湖流域降水变化及其与太阳黑子的关系[J].热带地理,2011,31(2):178-181,198.