

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.03.012

陕甘宁三河源区 1971—2017 年极端降水时空变化分析

张 菁^{1,2,3},张 珂^{1,2,3,4},王 晟^{1,2,3},肖 潺^{4,5},陶 然^{1,2,3},鞠 艳^{1,2,3},
李巧玲³,李致家³,阳 辉⁶,刘湘伟⁶

(1. 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;
2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院,江苏 南京 210098;

3. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;4. 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,江苏 南京 210098;
5. 中国气象局国家气候中心,北京 100081; 6. 西藏自治区水文水资源勘测局,西藏 拉萨 850000)

摘要:为了揭示陕甘宁三河源区极端降水时空分布及其变化规律,利用 1971—2017 年逐日降水、气温数据,辅以气候趋势系数、小波相干分析等方法分析三河源地区极端降水时空变化特征,并探究极端降水指数与厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)的关联关系。结果表明:1971—2017 年,陕甘宁三河源地区极端降水有明显增多的趋势;在空间分布上受地理位置和地形的影响,总体呈现“南高北低”的分布格局,空间差异显著。研究区内极端降水指数变化增减不一,大部地区极端降水量增多,弱降水日数减少,强降水日数增多,降水强度增大,降水趋于极端化。极端降水指数与多元 ENSO 指数(MEI)呈显著负相关关系,存在 3~5 a 及 9~12 a 时间尺度的显著共振周期。
关键词:气候变化;极端降水;时空变化;综合 ENSO 指数(MEI);气候趋势系数;小波相干分析
中图分类号:P426.61⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)03-0288-07

Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia Contiguous Region from 1971 to 2017

ZHANG Jing^{1,2,3}, ZHANG Ke^{1,2,3,4}, WANG Sheng^{1,2,3}, XIAO Chan^{4,5},
TAO Ran^{1,2,3}, JU Yan^{1,2,3}, LI Qiaoling³, LI Zhijia³, YANG Hui⁶, LIU Xiangwei⁶

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Yangtze Institute for Conservation & Development, Nanjing 210098, China;
3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. CMA-HHU Joint Laboratory for HydroMeteorological Studies, Nanjing 210098, China;
5. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
6. The Tibet Autonomous Region Hydrology and Water Resources Survey, Lhasa 850000, China)

Abstract: Combined with the climate tendency analysis and wavelet coherence analysis, the daily precipitation and temperature data from 1971 to 2017 were used to reveal the spatiotemporal variations of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia Contiguous Region and explore the relationship between extreme precipitation and the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) activities. The results show that there was a significant increase in extreme precipitation in the Three River Source Area from 1971 to 2017. Precipitation in this region has an apparent spatial pattern with higher values in the south and lower values in the north, showing the apparent impacts of geography and topography. Changes in the extreme precipitation indices in this area are mixed. In most areas, the amount of extreme precipitation, number of heavy precipitation days, and precipitation intensity increase over the study period, while the number of low precipitation days decreases over time, indicating that precipitation in this region tends to become more extreme. There were significant negative correlations between the extreme precipitation indices and the multivariate ENSO index (MEI), and the periods of maximum coherences between extreme precipitation indices and MEI are 3-5 a and 9-12 a.
Key words: climate change; extreme precipitation; spatiotemporal variation; multivariate ENSO index (MEI); climate trend coefficient; wavelet coherence analysis

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402701);宁夏重点研发计划(2018BEG02010);国家自然科学基金(51879067)
作者简介: 张菁(1995—),女,硕士研究生,主要从事水文物理规律与模拟研究。E-mail: zhangjing@hhu.edu.cn
通信作者: 张珂,教授。E-mail: kzhang@hhu.edu.cn
引用本文: 张菁,张珂,王晟,等. 陕甘宁三河源区 1971—2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3): 288-294.
ZHANG Jing, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia Contiguous Region from 1971 to 2017[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49 (3): 288-294.

2018 年 IPCC 在《全球 1.5℃ 增暖特别报告》^[1] 中指出全球平均气温将在 2030—2052 年比工业化前水平高出 1.5℃,全球增暖已日趋严重。由此引发的高温、暴雨、干旱、洪涝、台风等极端气候事件频发^[2],突发性强,危害性大,易造成社会经济损失,因此研究极端降水事件具有重要意义。

许多学者针对极端降水时空变化及其驱动因素做了大量的探索性研究。气候变暖导致全球极端降水强度急速增长,气温每升高 1℃ 时极端降水量则会成倍增长,极端降水事件发生趋于频繁^[3-4]。近 50 余年,中国西北地区极端降水显著增加,华北、东北和西南地区减少^[5]。杨东等^[6]指出甘肃黄土高原地区西南、东北地区极端降水减少,西北、东南地区增加。姜创业等^[7]指出陕西极端降水事件呈现阶段性变化,1961—2009 年经历了“增长—减少—增长”波动变化过程。李双双等^[8]研究指出秦岭—淮河南北降水强度增加,突发性强降水增多,降水持续时间呈现破碎化,季节性极端降水事件与 ENSO 有着密切的关系。

陕甘宁三河源地区地处黄土高原西北部,属于季风区边缘地带,海拔较高,气候差异明显,地理环境复杂,生态环境脆弱,水资源先天不足,降水是该区域水资源的主要来源,且突发性强降水易引发滑坡、泥石流等灾害,威胁地区人民的生存和发展,因此,研究极端降水的时空特征的变化意义非凡。本文采用逐日实测降水、气温数据定量分析了 1971—2017 年陕甘宁三河源地区极端降水的时空特征与变化趋势,以期在三河源地区应对未来气候变化、解决水资源短缺问题提供参考。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

陕甘宁三河源地区位于黄土高原西北部,地理位置为 34°30′~37°50′N,105°~109°E,面积约 7 万 km²,横跨陕西、甘肃、宁夏 3 省(区),海拔高差较大,内有泾河、葫芦河、清水河,发源于宁夏六盘山地区。六盘山地区地势较高,海拔在 2 000 m 以上,构成三河的分水岭。泾河流域内地势西北高,东南低;清水河流域则南高北低,海拔在 500~2 000 m,以黄土丘陵为主;葫芦河流域地势北高南低,平均海拔 1 800 m,流域内沟壑纵横(图 1)^[9-10]。研究区东南部地区属温带大陆性气候,西北部地区属温带半干旱气候区。草地为主要的用地类型,多集中在北部地区,其次是耕地,集中在东南、西南地区。

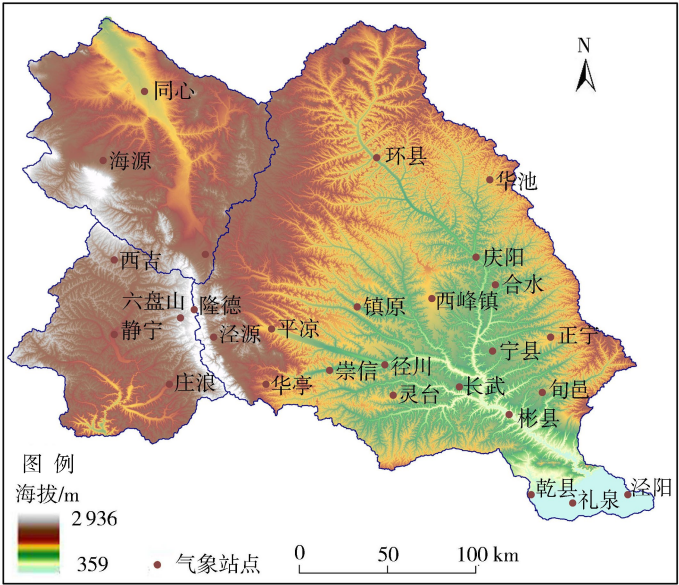


图 1 研究区地理地形与气象站分布

Fig. 1 Geography, topography and distribution of rain stations in the study area

1.2 研究数据

本文气象数据来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)提供的中国地面气候资料日值数据集,筛选逐日降水、气温资料,剔除存在数据缺失的日期,最终选取 29 个站点数据。提取流域地形地貌与河系所需的 DEM (digital elevation model) 数据来自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)现象的相位和强度^[11]采用多元 ENSO 指数(Multivariate ENSO Index, MEI)来表征,数据来源于 NOAA Physical Sciences Laboratory (<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>)。MEI 是热带太平洋上的海温、海平面气压、地面纬向风、地面经向风、海表面温度和天空云量 6 种要素经主成分分析,比其他 ENSO 指数包括的信息多,能够更好地反映海气耦合系统的本质^[12]。

1.3 极端降水定义

目前,极端降水的阈值确定方法有 2 种:绝对阈值法和百分位阈值法,本文采用国际通用的百分位阈值法来确定阈值,进而确定极端降水序列^[13-14],具体方法为把逐日非零降水量按升序排列,将第 95 个百分位值的 47 a 平均值定义为极端降水量事件的阈值,当站点某日降水量超过了极端降水阈值时,即称该站发生了极端降水事件。累加每年极端降水事件的降水量为极端降水总量。参照 Bonsal 等^[15]的方法,若某个气象

要素有 n 个值,将其按照升序排列 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 某个值小于或等于 x_m 的概率为

$$P = \frac{m - 0.31}{n + 0.38}$$

(1)

采用世界气象组织(WMO)、气候委员会(CCI)、全球气候研究计划气候变化和可预测性计划(CLIVAR)确定的气候变化监测指标^[16]。极端降水指数选取以下4个指标参数:(a)湿日降水总量(PRCPTOT),为日降水量大于1 mm的年累积降水量;(b)极端降水量(R95P),为日降水量大于95%分位值的强降水之和;(c)强降水日数(R20),为年日降水量大于或等于20 mm的总日数;(d)雨日日数(RD),为年日降水量大于或等于1 mm的总日数。

1.4 研究方法

1.4.1 气候趋势系数

在气候学上,常用气候倾向率法来分析气象要素 x 的长期变化趋势,由于气候倾向率有单位,无法对不同要素进行比较,且未考虑同一气象要素在不同站点的自然变异差别,因此本文采用克服此缺陷的气候趋势系数 r_{xt} 来度量气象要素的变化趋势^[17]。趋势系数定义为样本长度为 l 的要素时间序列与自然数列(1, 2, $\cdots, l$)之间的相关系数:

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^l (x_i - \bar{x}) \left(i - \frac{l+1}{2}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^l (x_i - \bar{x})^2 \left(i - \frac{l+1}{2}\right)^2}}$$

(2)

式中: x_i ——要素值; $\bar{x}$ ——要素均值。

1.4.2 小波相干分析

小波分析可以直观观察气象序列的整体特征和局部变化,交叉小波功率谱可以揭示它们共同的高能量值区及位相关系,小波相干谱可以用来度量时—频空间中两个时间序列在低能量值区的局部相关密切程度。本文采用小波相干谱研究MEI指数与极端降水指数的相关程度^[18]。

对于任意2个要素的时间序列 X 和 Y 之间的交叉小波功率谱(XWT)定义为

$$W_j^{XY}(s) = W_j^X(s) W_j^{Y*}(s)$$

(3)

式中: $W_j^{XY}(s)$ ——要素 X 与 Y 的交叉小波结果; $W_j^X(s)$ ——要素 X 的连续小波变换结果; $W_j^{Y*}(s)$ —— $W_j^Y(s)$ 的复共轭; s ——伸缩尺度。

小波相干谱定义为

$$R_j^2(s) = \frac{|S(s^{-1} W_j^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1} |W_j^X(s)|^2) S(s^{-1} |W_j^Y(s)|^2)}$$

(4)

式中: S ——平滑算子; s ——伸缩尺度; $W_j^Y(s)$ ——要素 Y 的连续小波变换结果。

这是2个要素的时间序列在某一频率上波振幅的交叉积与各个振幅乘积之比。

2 结果分析

2.1 多年平均降水量及气温

由图2(a)可见,研究区内降水量总体上由东南向西北递减,其中近一半面积的降水量低于500 mm,最大值仅有626.8 mm,出现在六盘山站,以六盘山站为中心的六盘山区一带降水较多,但整个区域内降水相对缺乏;年平均气温4.58~13.39℃,自南向北减小。由时间过程线可见,研究区气候呈现暖湿化趋势,气温显著上升,气候趋势系数为0.8。1971—1996年,气温整体距平为负距平,期间气温先下降后上升,1997—2017年气温整体距平为正距平,1997—2012年期间气温先上升后缓慢下降,2012年后气温则持续上升;年平均降水量在时间上呈现不显著的增长趋势,气候趋势系数为0.15,年降水主要表现为年际震荡。

2.2 极端降水时间变化特征

基于各极端降水指数分析各极端降水指数的时间变化特征(图3)。除总雨日呈下降趋势外,其余均呈上升趋势。湿日降水量表现为不显著的增长趋势,以年际震荡为主,变化速率为0.018 mm/a,多年均值小于500 mm。极端降水量反映极端降水的情况,气候趋势系数为0.14,呈上升趋势,通过了0.05显著性水平检

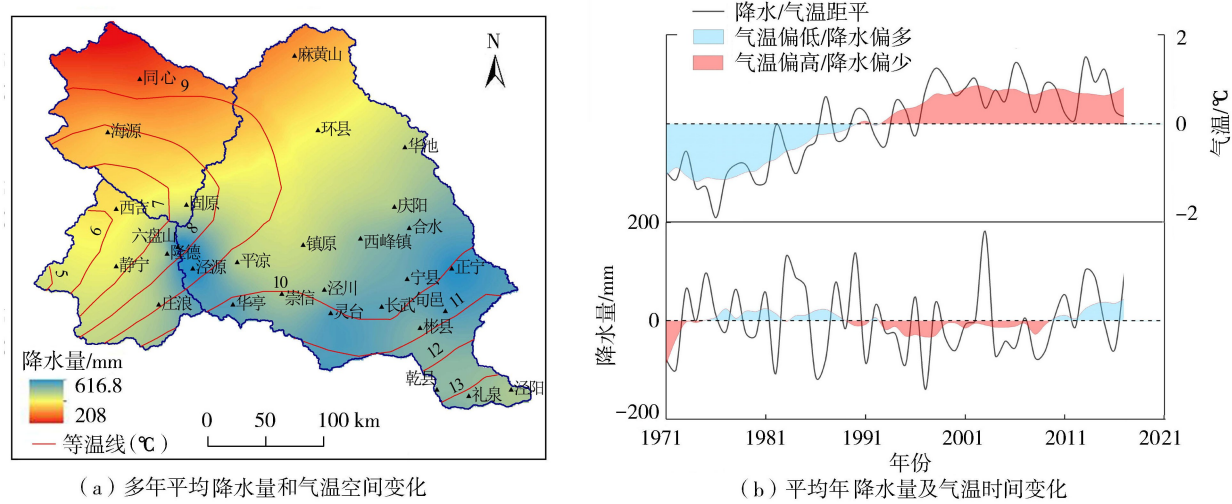


图2 多年平均降水量和气温的空间分布及区域平均年降水量和气温的时间变化
Fig.2 Spatial distribution of multi-year average precipitation and air temperature, and time courses of yearly regional average precipitation and air temperature

验。从9 a 滑动平均曲线可以看出极端降水量呈波动增长,20 世纪 70—90 年代中期先增长后减小,之后呈较快的增长趋势。强降水日数波动幅度较大,表现出“增加—减少—增加”的波动变化过程,气候趋势系数为 0.13,总体呈正趋势,达到 0.1 的显著性水平。年总雨日数呈显著的减小趋势,气候趋势系数为-0.37,达到了 99% 以上的置信度。研究区的降水量增加,年总雨日显著减少,降水强度增加,同时强降水日数显著增加,表明日降水低于 20 mm 的弱降水日数急剧减少,极端降水增多。极端降水和强降水日数增加表明研究区极端降水事件的发生也有所增加。

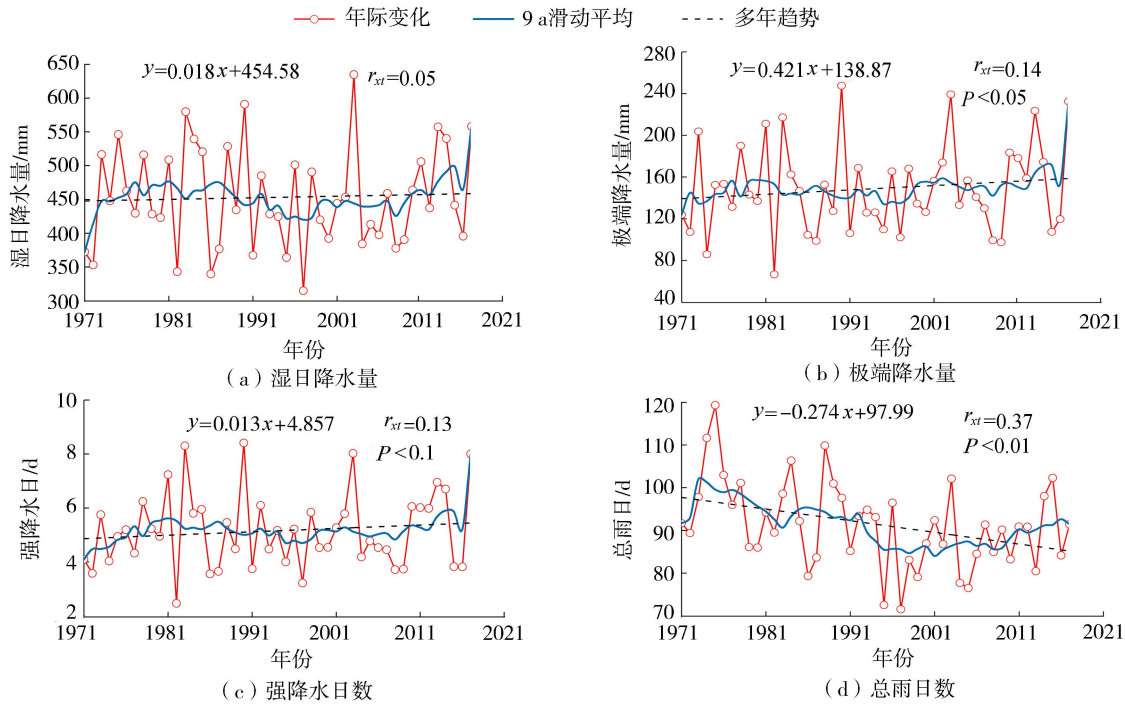


图3 1971—2017 年各极端降水指数变化趋势
Fig.3 Time courses of extreme precipitation indices from 1971 to 2017

2.3 极端降水空间变化特征

受地理位置与地形影响,极端降水的空间分布与年总降水保持一致,在空间上总体呈现“南高北低”,南部地区极端降水指数普遍大于北部地区,降水事件发生的频次、强度、数量六盘山一带偏多,以同心为中心的地区较少。区域内极端降水指数变化不尽相同,根据各极端降水指数变化趋势空间分布(图 4)可以看出:极

端降水指数变化趋势存在显著的空间差异。1971—2017 年,研究区北部湿日降水量为正趋势,麻黄山地区湿日降水量显著增长,趋势系数为 0.25,达到 0.05 的显著性水平;东南、西南地区湿日降水量减少,泾阳、礼泉地区通过显著性检验。研究区内极端降水南北变化截然不同,总体呈现北增南减的变化特征,环县地区极端降水增加非常明显,达到 0.05 的显著性水平,趋势系数为 0.35。东部地区强降水日数无明显变化,西北部为正趋势,强降水日数增加,95% 以上置信度的显著增长区在麻黄山、海源、西吉地区。强降水日数减少区域主要位于西南部的庄浪、六盘山地区,但均未通过显著性检验。研究区内 80% 地区年总雨日为负趋势,灵台、镇原、静宁地区显著减少,其中灵台变化最大,趋势系数为-0.55;东南部地区降雨日数增长,但未通过显著性检验。整体而言北部地区极端降水量、强降水日数均呈增长趋势,年总雨日减少,降水趋于极端化,西南部地区极端降水、强降水日数、年总雨日均呈减少趋势,空间差异较大。

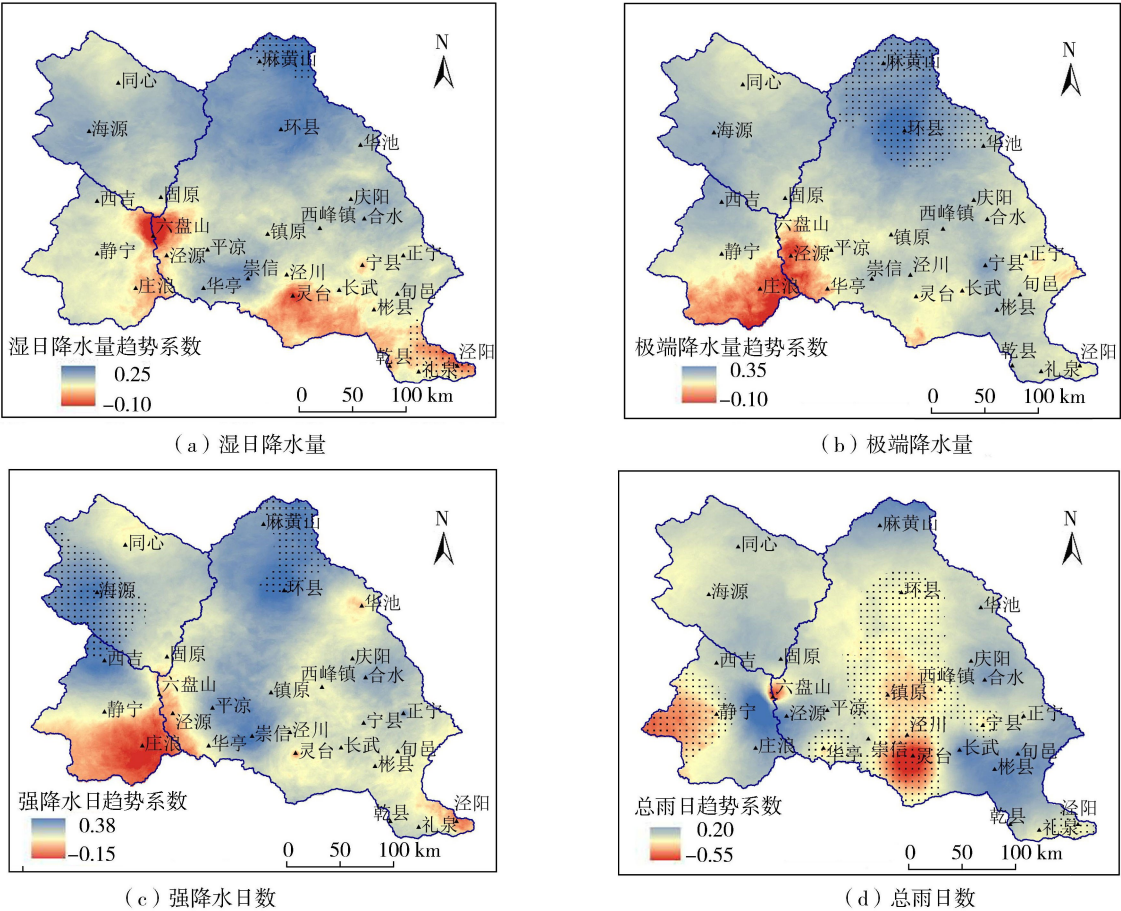


图4 各极端降水指数变化趋势空间分布

Fig.4 Spatial patterns of variation trends of extreme precipitation indices

2.4 极端降水指数与 MEI 的关联分析

使用小波相干分析法研究 MEI 与极端降水指数在时频域中低能量区的相互关系(图 5)。湿日降水量与 MEI 在 3~5 a 时间尺度具有显著的负相关特征,相关系数达到 0.9,两序列交叉位相差约为 120°,湿日降水量超前 MEI 变化。MEI 与极端降水量在 1982—1986 年时段上有一个准 4 a 显著共振周期,相关系数为 0.8;1980—2015 年时段具有 10~12 a 时间尺度显著共振周期,位相差 90°,MEI 序列提前极端降水量变化。强降水日数与 MEI 在 1977—1989 年具有 3~5 a 时间尺度的显著负相关共振周期,相关系数达 0.8,位相差约为 130°;1990 年后出现 9~13 a 时间尺度的显著共振周期,位相差为 90°,MEI 序列变化超前强降水日数变化。MEI 与降雨日数在 1977—1986 年时段具有 3~5 a 时间尺度的显著共振周期,表现出较强的负相关特征,位相差为 120°±10°,相关系数可达 0.85,通过 95% 的置信度检验,MEI 滞后降雨日数变化,在其他频段上没有显著的相关能量区。

不同极端降水指数与 MEI 的小波相干谱具有一定的相似性,在 1977—1989 年时段上存在 3~5 a 时间

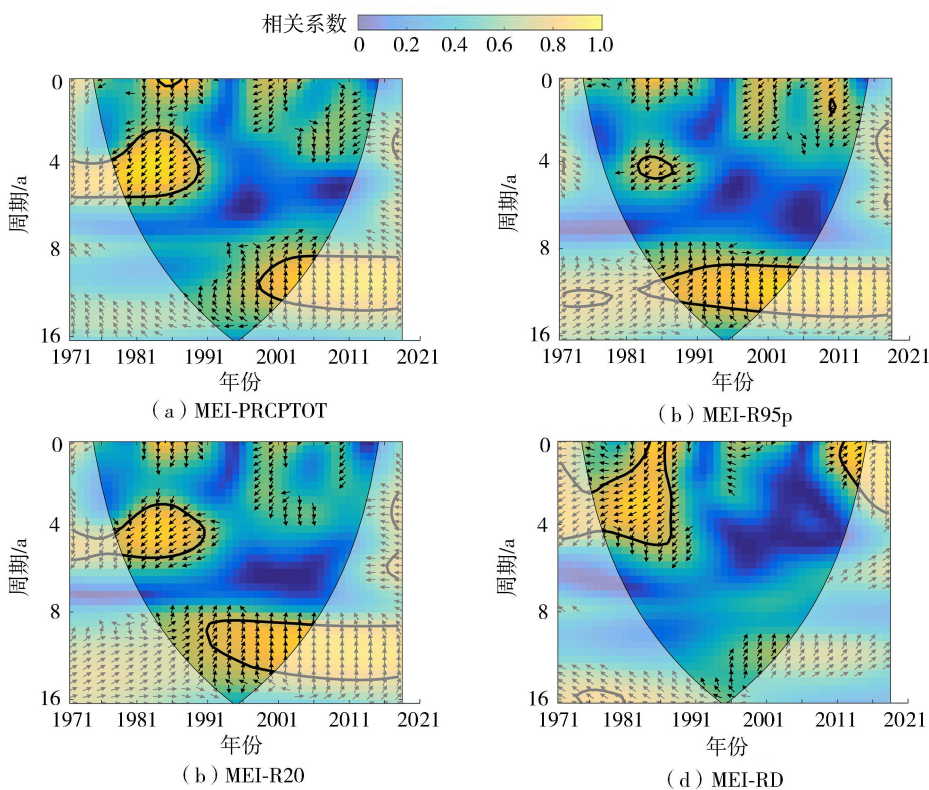


图 5 极端降水指数和 MEI 的交叉小波相干谱

Fig.5 Wavelet coherence spectrum of extreme precipitation indices and MEI indices

尺度的共振周期,呈显著负相关性,位相差约为 120° ,极端降水指数序列变化超前 MEI。20 世纪 90 年代出现 9 ~ 12 a 时间尺度的共振长周期,位相差 90° ,相关系数可达 0.8,两序列表现出较强的相关特征。

3 结 论

- a. 研究区多年平均降水量由东南向西北递减,在时间上主要表现为年际震荡,1971—2017 年以来出现了 2 次丰枯交替,2010 年左右进入多雨期,气温上升,整个研究区气候呈现暖湿化。
- b. 湿日降水量、极端降水量与强降水日总体上呈波动增长趋势,其中极端降水、强降水日显著增长,总雨日呈显著的减少趋势。
- c. 极端降水指数在空间上具有明显的差异性,极端降水量和降水事件发生频次均由南向北递减。湿日降水量和极端降水量在大部分地区呈增加趋势,总雨日显著减少,强降水日数增加,弱降水日减少,区域内降水趋于极端化。
- d. 极端降水指数与 MEI 具有显著负相关性,相关系数达 0.8,通过 95% 的置信度检验。1977—1989 年有 3 ~ 5 a 时间尺度的共振周期,极端降水指数超前 MEI 变化,随后出现 9 ~ 12 a 时间尺度的显著共振长周期。影响降水的要素较多,环流因子的共同作用会对区域极端降水造成重要影响,本文仅通过综合 ENSO 指数与极端降水的关联角度分析两者关系,后续工作会通过多个角度来探讨极端降水的影响因素。

参考文献:

[1] IPCC. Special report on global warming of 1.5℃ [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.

[2] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin[J]. Journal of Hohai University, 2020,48(1):39-45. (in Chinese))

[3] DONAT M G, LOWRY A L, ALEXANDER L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(5): 508-513.

[4] 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. (RONG Yanshu, WANG Wen, WANG Peng, et al. Analysis of characteristics of extreme rainfall and estimate of rainfall during return periods in Huaihe Basin[J]. Journal of Hohai University, 2012, 40(1):1-8. (in Chinese))
- [5] 高涛, 谢立安. 近50年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(5):577-589. (GAO Tao, XIE Lian. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(5):577-589. (in Chinese))
- [6] 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. (YANG Dong, CHENG Junqi, LI Xiaoya, et al. The variation characteristic of different levels of precipitation and extreme preapitation in Loess Plateau of Gansu province region in recent 52 years [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1539-1547. (in Chinese))
- [7] 姜创业, 蔡新玲, 吴素良, 等. 1961—2009年陕西省极端强降水事件的时空演变[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1):151-157. (JIANG Chuangye, CAI Xinling, WU Suliang, et al. Spatio-temporal evolution of extreme precipitation events in Shaanxi Province during the period 1961-2007[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(1):151-157. (in Chinese))
- [8] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋, 等. 1960—2013年秦岭—淮河南北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. (LI Shuangshuang, YANG Saini, LIU Xianfeng, et al. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in north and south of the Qinling-Huaihe region and influencing factors during 1960-2013 [J]. Progress in Geography, 2015, 34(3):354-363. (in Chinese))
- [9] 李帅, 魏虹, 刘媛, 等. 气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J]. 生态学报, 2017, 37(4):1252-1260. (LI Shuai, WEI Hong, LIU Yuan, et al. Runoff prediction for Ningxia Qingshui River Basin under scenarios of climate and land use changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4):1252-1260. (in Chinese))
- [10] 王淑红, 张钰, 王大超, 等. 1956—2016年渭河支流葫芦河流域径流及降水的年际变化特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 370-377. (WANG Shuhong, ZHANG Yu, WANG Dachao, et al. Annual variation of the runoff and precipitation in the Hulu River basin, a tributary of the Weihe River, from 1956 to 2016 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2):370-377. (in Chinese))
- [11] 房俊晗, 郭斌, 张振克, 等. 1960—2013年黄淮海平原极端降水时空变化特征[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2018, 48(2): 160-171. (FANG Junhan, GUO Bin, ZHANG Zhenke, et al. Temporal and spatial characteristics of precipitation extremes in the Huang-Huai-Hai Plain during 1960-2013 [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2018, 48(2): 160-171. (in Chinese))
- [12] 陈虹颖, 徐峰, 李晓惠, 等. 近65年 ENSO 事件强度变化及时频特征研究[J]. 热带气象学报, 2017, 33(5):683-694. (CHEN Hongying, XU Feng, LI Xiaohui, et al. Intensities and time-frequency variability of ENSO in the last 65 years [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(5):683-694. (in Chinese))
- [13] 鲁菁, 张玉虎, 高峰, 等. 近40年三江平原极端降水时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 272-282. (LU Jing, ZHANG Yuhu, GAO Feng, et al. Temporal and Spatial variation characteristics of extreme precipitation in the Sanjiang Plain in recent 40 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 272-282. (in Chinese))
- [14] 罗玉, 陈超, 马振峰, 等. 1961—2015年四川省汛期极端降水指数时空变化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(9): 133-141. (LUO Yu, CHEN Chao, MA Zhenfeng, et al. Spatial-temporal variation of extreme precipitation indices during the main flood season in 1961-2015 in Sichuan [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2018, 40(9): 133-141. (in Chinese))
- [15] BONSAL B R, ZHANG X, VINCENT L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. Journal of Climate, 2001, 14(9): 1959-1976.
- [16] ALEXANDER L V, ZHANG X B, PETERSON T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D5):1-10.
- [17] 施能. 北半球冬季大气环流遥相关的长期变化及其与我国气候变化的关系[J]. 气象学报, 1996, 54(6): 675-683. (SHI Neng. Secular variation of winter atmospheric teleconnection pattern in the northern hemisphere and its relation with China's climate change [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1996, 54(6): 675-683. (in Chinese))
- [18] 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, European Geosciences Union (EGU), 2004, 11(5/6):561-566.

(收稿日期:2020-09-03 编辑:张志琴)