

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220220

# 里下河地区极端降水时空变化及未来趋势分析

鞠 艳, 杨 星, 王轶虹, 王冬梅, 齐 斐, 王志寰

(江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

**摘 要:**在全球变暖背景下,极端天气事件逐渐增加,影响着社会经济发展,因此揭示区域极端降水时空变化对防洪减灾具有重要意义。基于1960—2019年的逐日降水数据,通过M-K趋势检验、小波分析、重标极差以及克里金插值方法,从强度、频率和持续性三方面分析里下河地区的极端降水指数时空变化,并进一步探究其未来趋势变化。结果表明:(1)里下河地区多年平均降水为1 017.25 mm,呈不显著增加趋势,空间分布自西北向东南逐渐增加。(2)研究区内极端降水指数变化各异,极端降水的强度、频率均呈现增加趋势,持续性呈减少趋势。(3)整个变化过程中存在3类尺度的周期性变化,出现3个偏多中心和2个偏少中心。(4)R10 mm和R20 mm未来变化趋势与过去相反且呈弱持续性,而其他极端降水指数未来变化趋势与过去一致,且过去总体趋势对未来趋势的影响时长为9~16年左右。研究结果可为里下河地区科学合理应对气象灾害、合理配置水资源提供依据。

**关键词:**极端降水;时空变化;小波分析;重标极差;里下河

**中图分类号:**TV125;P339

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2023)04-0104-07

## 0 引言

在全球变暖背景下,极端降水事件频发,目前国际上通常用百分位来定义极端降水阈值,当日降水量超过该阈值时,则认为发生了极端降水事件<sup>[1]</sup>。极端降水事件发生的强度和频率的增加,加剧了水文循环过程的不确定性和区域水资源分配的不均匀性<sup>[2]</sup>,引发山体滑坡、洪涝等灾害,严重威胁社会经济发展和人类生命安全。极端降水由于其突发性强、破坏性大的特点,已成为水文相关研究中的热点问题。国内外学者通过理论研究<sup>[3]</sup>、实际观测<sup>[4]</sup>、气候模型<sup>[5]</sup>等,从暴雨频次、强度、雨型分布等特征,对不同地区的极端降水时空分布进行多尺度研究<sup>[6]</sup>,结果表明:随着全球气候变暖,热带和季节性干旱地区极端气候事件频繁<sup>[7]</sup>;同时我国暖季极端降水总体上增强<sup>[8]</sup>,西北和长江中下游地区极端降水强度和水输送增加<sup>[9]</sup>,而华北地

区逐渐减少<sup>[10]</sup>,呈现明显的空间差异性。然而,区域极端降水的持续性仍有很大的不确定性<sup>[11]</sup>,针对小流域尺度的研究较少且存在差异性。为此,探究极端降水时空变化,为合理应对农业气象灾害、提高水资源高效配置提供依据<sup>[12]</sup>。

里下河地区位于南北气候过渡带,地势四周高,中间低,呈“碟”型洼地,受不均匀的降水和复杂的地理环境的影响,该地区水旱灾害频发,出现“有雨必涝、无雨旱灾”的现象<sup>[13]</sup>,对地区的农业生产生活和经济发展有着严重影响。里下河地区研究多以防洪排涝模型构建<sup>[14]</sup>、水质水生态分析<sup>[15]</sup>等为主,对极端降水的时空分布研究较少。本文以里下河地区为例,通过M-K趋势分析、小波分析、重标极差等方法,基于1960—2019年的逐日降水,从强度、频率和持续性3个维度,研究极端降水指数的时空变化分布及其未来趋势分析,为提高区域防灾减灾能力、合理安排农业生产等提供参考。

收稿日期:2022-06-14

网络首发日期:2023-08-21

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.1814.P.20230818.1719.016>

基金项目:江苏省水利科技项目(2022006);院自主科研经费专项资金项目(2022Z020)

作者简介:鞠艳(1996—),女,江苏泰州人,助理工程师,硕士,主要研究方向为水文水资源。E-mail:747030693@qq.com

通信作者:杨星(1978—),男,湖北荆州人,教高,博士,主要研究方向为水资源与水环境、港口、海岸及近海工程。E-mail:yidaxue@163.com

### 1 研究区概况

里下河地区位于江淮下游北部边缘(32°12'~34°10'N、119°08'~120°56'E),北至苏北灌溉总渠,南抵新通扬运河,西至里运河,东至通榆河,总面积约为11 879 km<sup>2</sup>(见图1)。受亚热带季风气候的影响,该地区多年平均气温为14~15℃,多年平均蒸发量为960 mm,多年平均降水量为1 025 mm,汛期降水占全年降水的65%左右。受“碟型洼地”地形的影响,里下河地区水系相对封闭独立,强降水形成的径流向流域中心汇集,导致水位迅速抬升,内部易形成区域性洪水;同时,流域外部受流域性洪水和海潮影响,洪涝灾害频繁<sup>[16]</sup>。

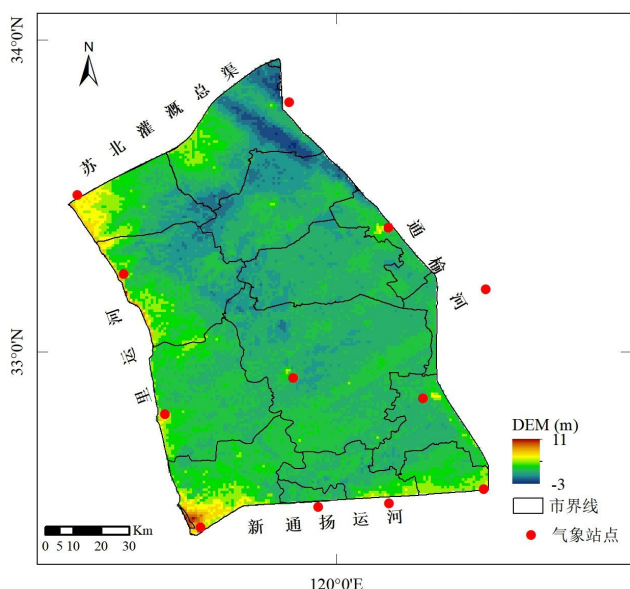


图1 里下河地区地理位置及气象站点分布示意图  
Fig.1 Geographical location and distribution of meteorological stations in the Lixia River Plain

### 2 数据与方法

#### 2.1 数据来源

本文基于中国气象数据网提供的逐日降水数据(<http://data.cma.cn/>),通过筛选、剔除缺失数据以及质量控制验证,最终选取1960—2019年里下河腹部的12个站点数据(见图1)。利用ETCCDMI提供的气候变化指数<sup>[17]</sup>,提取了11个极端降水指数,并将其分为强度、频率和持续性3个维度,如表1所示。

#### 2.2 研究方法

##### 2.2.1 Mann-Kendall 趋势分析

采用M-K方法研究极端降水的趋势变化及突变点检验,该方法不需要方差正态性假设,对于显著性水平检验具有较为坚实统计学理论基础,能减少数据异常值的影响,有较好的实用性,计算过程详见参考文献<sup>[18]</sup>。

##### 2.2.2 小波分析

小波分析能够在时频域的变换中提取关键信息,被广泛应用于气候变化研究中的时序变化分析和不同时间尺度下的变量的周期性研究,对数据进行延伸后,采用Morlet负小波函数对延伸后数据进行小波变换处理,利用cmor分析各极端降水指数的周期性变化特征,具体计算公式详见参考文献<sup>[19]</sup>。

##### 2.2.3 重标极差法

重标极差法(R/S)中Hurst指数可以揭示时间序列中的未来趋势性,具体计算公式详见参考文献<sup>[20]</sup>。Hurst指数主要有3种形式:①当 $0 < H < 0.5$ ,说明时序为

表1 极端降水指数定义

Table1 Definition of extreme precipitation indices

维度	极端降水指数	名称	定义	单位
强度指数	PRCPTOT	降水总量	年日降水量 $\geq 1$ mm的降水量总和	mm
	Rx1day	最大1 d降水量	年日降水量最大值	mm
	Rx5day	最大5 d降水量	年最大的连续五日降水量	mm
	R95p	极端降水量	年日降水量 $>95\%$ 分位值的强降水之和	mm
	R99p	极端强降水量	年日降水量 $>99\%$ 分位值的强降水之和	mm
	SDII	普通日降水强度	年日降水量最大值 $\geq 1$ mm的总量与总日数之比	mm/d
频率指数	R10 mm	小雨日数	年日降水量 $\geq 10$ mm的总日数	d
	R20 mm	中雨日数	年日降水量 $\geq 20$ mm的总日数	d
	R50 mm	暴雨日数	年日降水量 $\geq 50$ mm的总日数	d
持续性指数	CDD	持续干旱日数	日降水量 $< 1$ mm的最长连续日数	d
	CWD	持续湿润日数	日降水量 $\geq 1$ mm的最长连续日数	d

反持续序列,未来变化趋势与过去相反,且 $H$ 越接近0,反持续性越强;②当 $H=0.5$ ,说明时序为随机序列,未来变化趋势与过去无关;③当 $0.5 < H < 1$ ,说明时序为持续序列,未来变化趋势与过去一致,且 $H$ 越接近1,持续性越强。根据已有研究进一步定义:强反持续性( $0 < H \leq 0.35$ ),弱反持续性( $0.35 \leq H < 0.5$ ),弱持续性( $0.5 < H \leq 0.65$ ),强持续性( $0.65 \leq H < 1$ )。

通过统计量 $V_n$ 可以判断序列是否有非周期性循环,且能测定出平均循环长度,即过去趋势对未来的影响时间长度,其计算公式详见参考文献<sup>[20]</sup>。绘制 $V_n \sim \ln(n)$ 曲线,当 $0 < H < 0.5$ ,曲线向下;当 $H=0.5$ ,曲线为水平线;当 $0.5 < H < 1$ ,曲线向上。曲线明显转折点处对应的时间长度 $n$ 为平均循环长度。

### 3 结果分析

#### 3.1 多年平均降水时空变化特征

本文研究了1960—2019年里下河地区多年平均降水量及变化趋势的时空分布特征。从图2(a)中可以看到,里下河地区多年平均降水为1 017.25 mm,变化范围为927.2~1 075.4 mm,空间分布差异明显,总体呈现自西北向东南增加的分布,高值区主要分布在流域的中下游,其中,东台至海安一带降水较多,多年平均降水在1 065 mm;低值区主要分布在阜宁一带,多年平均降水在930 mm。图2(b)为多年平均降水变化趋势空间分布,图中阴影表示该区域的变化趋势显著,即通过了置信度95%( $P < 0.05$ )的检验。结果表明,该研究区降水变化范围为-1.25~0.75 mm/a,海安、东台以及淮安近60年降水呈下降趋势,下降幅度在0.85 mm/a左右;流域中部降水呈增加趋势,增加速率为0.36 mm/a左右;其中,沿着通榆河附近降水变化趋势显著。除此以外,其他地区没有显著的变化趋势。

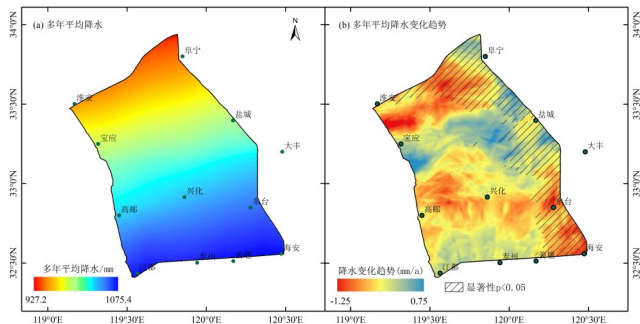


图2 里下河地区多年平均降水及其变化趋势空间分布  
Fig.2 Spatial distribution of multi-year annual mean precipitation and its variation trend in the Lixia River Plain

#### 3.2 极端降水指数时空分布特征

##### 3.2.1 极端降水指数空间变化

图3(a)~(f)为强度指数的空间分布,除SDII外,其他指数基本呈自西北向东南逐渐增加的分布,高值区主要分布在流域的中下游,低值区主要分布在阜宁一带,与降水的空间分布基本一致;SDII指数空间分布相反,自西北向东南逐渐减少,阜宁附近平均日降雨强度较大,约为13.4 mm/d。频率指数中(见图3(g)~(i)),R50 mm空间分布与其他指数相反,新通扬运河附近较小,出现暴雨的可能偏小,而R10 mm和R20 mm指数的中东部降水频率指数均较大,说明该区域会出现较多的中雨和暴雨,面临防洪压力。图3(j)~(k)为持续性指数,CDD和CWD的空间分布相反,CDD指数自西南向东北方向逐渐递增,与降水的空间分布格局基本一致,而CWD低值区主要分布在通榆河沿线,高值区分布在高邮附近,约为11.3 d,说明流域该区域出现持续降雨偏多。

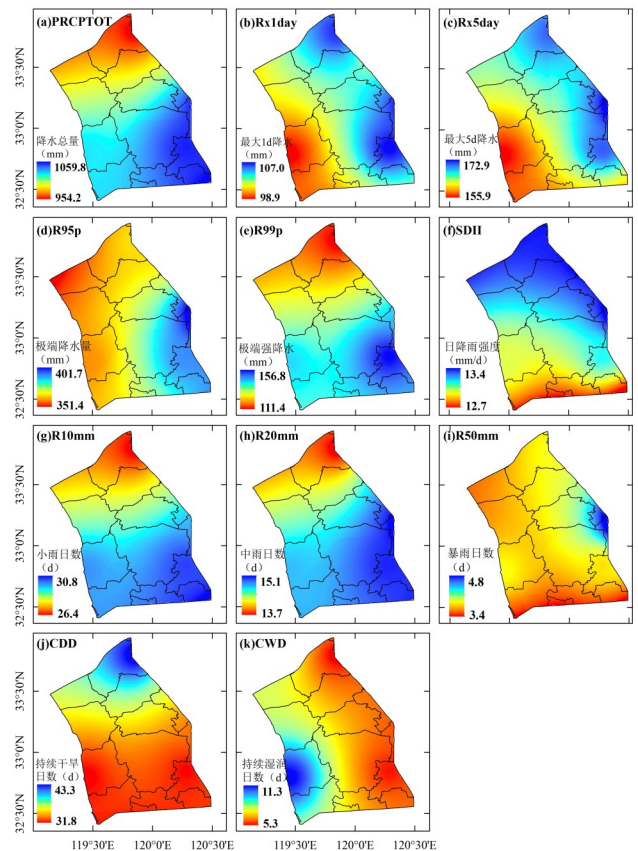


图3 极端降水指数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of extreme precipitation indices

图4为里下河地区各极端降水指数变化趋势空间分布,从图4(a)~(f)中可以看到,强度指数变化趋势分布基本一致,研究区中上游地区呈减少趋势,中下

游呈不显著的增加趋势,其中PRCPTOT的上游下降趋势最大,下降速率为 $-0.45\text{ mm/a}$ ;下游增加趋势最大,增速为 $0.35\text{ mm/a}$ 左右。频率指数(见图4(g)~(i))变化趋势空间分布一致,基本都呈增加趋势,其中R50 mm指数在流域东南部增加趋势显著,其他地区变化趋势不明显。从持续性指数(见图4(j)~(k))来看,CDD和CWD的变化趋势空间分布不一致,在研究区东北部CDD呈下降趋势,而CWD指数在流域西南部有微弱的下降趋势。总体来看,研究区中下游极端降水的强度在不断增强且其持续性有所减弱,流域可能会面临瞬时强降雨,出现暴雨的频率也有所提升,需要进一步加强防洪。

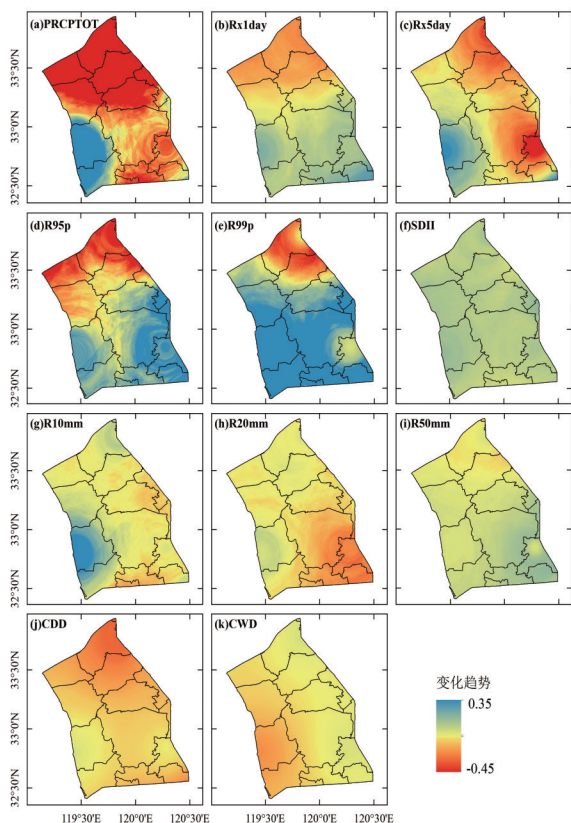


图4 极端降水指数变化趋势空间分布  
Fig.4 Spatial distribution of extreme precipitation indices trends

### 3.2.2 极端降水指数时间变化

对里下河地区近60年的极端降水指数进行统计分析,图5为不同维度的极端降水指数的箱型图,从图5(a)中可以看到,极端降水强度指数中,里下河地区近60 a的降水总量变化范围为 $488.87 \sim 1\ 636.60\text{ mm}$ ; Rx1day和Rx5day均值分别为 $121.84\text{ mm}$ 和 $155.81\text{ mm}$ ,两者相差不大且变化范围均较小;极端降水量约为 $372.5\text{ mm}$ ,极端强降水量 $125.1\text{ mm}$ ,由此可见,里下河地区降水多为短历史的强暴雨。极端降水频率和持

续性指数中(见图5(b)),小雨日数、中雨日数和暴雨日数依次递减,暴雨日数平均为 $4.5\text{ d}$ ,持续湿润日数为 $7.2\text{ d}$ ,研究区降水呈过程性、间歇性,且梅雨期多为强对流天气,局部地区短时降水强度大;持续干旱日数均值长达 $34\text{ d}$ ,据记录,2019年出现罕见的连旱事件,达到60年一遇的气象干旱,骆马湖、微山湖等水库在旱限水位以下运行分别长达 $37\text{ d}$ 和 $40\text{ d}$ 。

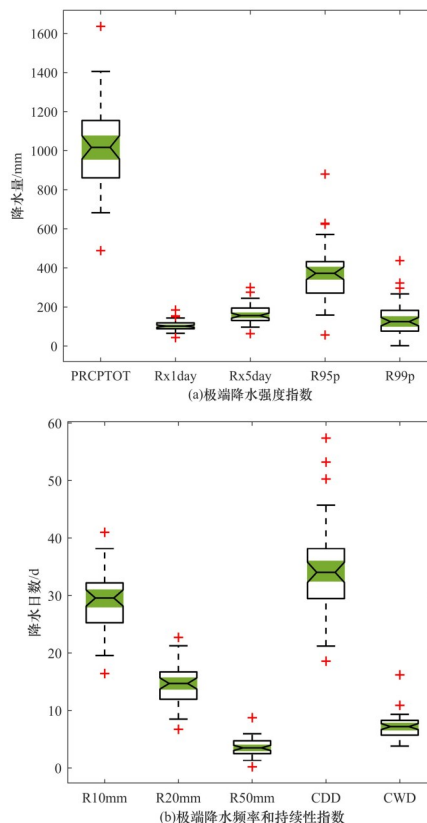
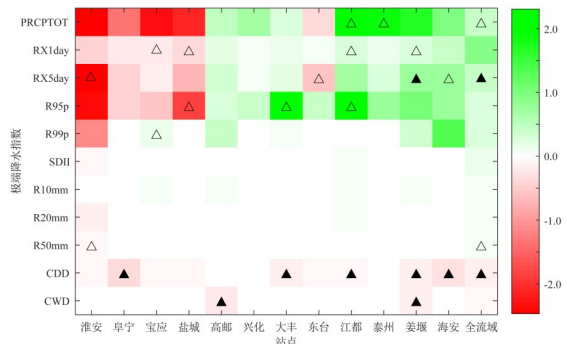


图5 极端降水指数箱型图  
Fig.5 Boxplot of extreme precipitation indices

从图6中可以看出,淮安、阜宁、宝应和盐城的极端降水强度、频率和持续性都在减小,强度指数中的Rx5day和R95p减少趋势显著,频率指数中暴雨指数呈显著减少趋势。江都、泰州、姜堰和海安的极端降水强度增加,频率和持续性减小,强度指数中PRCPTOT、Rx5day增加趋势达到90%的显著水平,其中姜堰站达到了95%的显著水平;频率指数和持续性指数均表现下降趋势,表明里下河地区中下游在降水持续性减少的情况下,极端降水强度在不断增加,面临更高的极端降水风险。从整个流域来看,里下河地区极端降水强度、频率均呈现增加趋势,持续性指数呈减少趋势。PRCPTOT、Rx5day和R50 mm的增加趋势显著,流域极端降水强度增大,新增降水中暴雨较多,面临更大的骤发性极端降水风险和防洪压力。



注:  $\Delta$ 代表通过置信度90%的显著性检验;  $\blacktriangle$ 代表通过置信度95%的显著性检验; 未标注代表未通过显著性检验。

图6 里下河地区各站点及全流域极端降水指数M-K趋势变化检验  
Fig.6 M-K trend of extreme precipitation indices of each station and whole basin

### 3.3 极端降水指数周期性变化

图7为极端降水指数小波分析,当小波系数实部为正值时,表示为多雨期,反之为少雨期。可以看出,极端降水指数变化过程中存在3类尺度的周期性变化,呈现多时间尺度特征,其中除R99p指数外,其他指

数均在48~64年尺度上存在高低交错的准2次震荡;在38~47年尺度上除CDD和CWD指数外,其他指数均出现了高低交替的准3次震荡;在20~35年尺度上呈现局部性的高低交替的准4次震荡,前两个尺度上的周期性变化具有全域性。在整个时间尺度上,除SDII、CDD指数外,其他极端降水指数出现3个偏多中心,分别为1965年、1990年、2016年,存在2个偏少中心,分别为1978年和2004年。

### 3.4 极端降水指数未来趋势分析

通过R/S分析里下河地区各极端降水指数的未来变化趋势,见表2。结果表明:里下河各极端降水指数中R10mm和R20mm的Hurst指数值小于0.5,其未来变化趋势与过去趋势相反,即未来一段时间内,R10mm和R20mm的下降趋势与过去相比将削弱,呈弱持续性。其他极端降水指数的Hurst指数均大于0.5,表明其未来变化趋势与过去相一致,其中CDD和CWD将继续保持显著下降趋势,且呈强持续性;SDII和

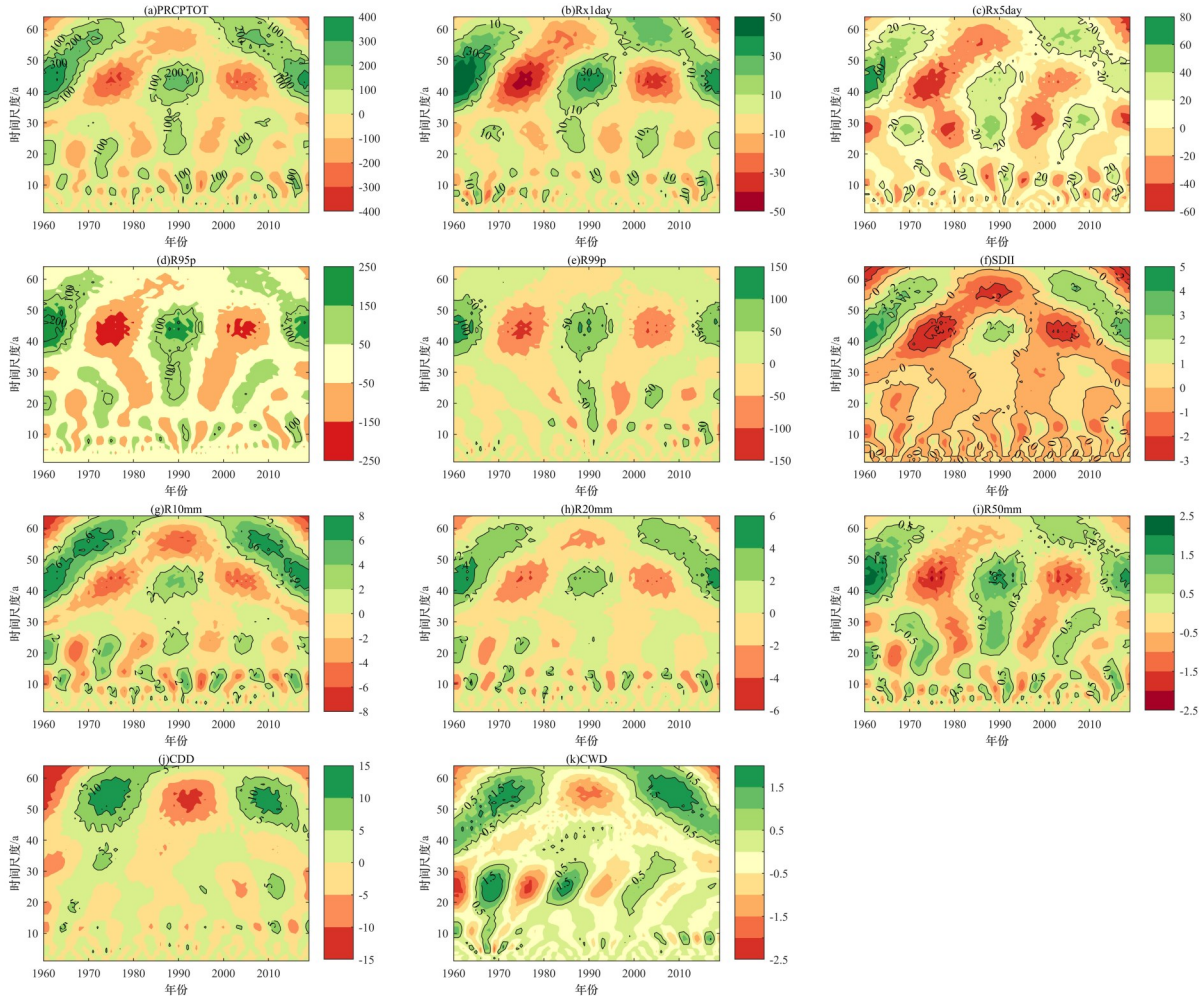


图7 极端降水指数小波系数实部等值线

Fig.7 The real contour map of the wavelet coefficient of extreme precipitation indices

Rx1day 将持续保持增长趋势,且呈强持续性;其余指数未来将呈现上升趋势,但呈弱持续性。整体而言,CWD 指数的 Hurst 值最大,说明 CWD 未来下降趋势的持续性最强,与过去变化趋势最为相似。

从图 8 可以看出,里下河地区 11 个极端降水指数中 R10 mm 和 R20 mm 的  $V$  统计量呈下降趋势,其他指数的  $V$  统计量呈上升趋势,说明只有 R10 mm 和 R20 mm 未来趋势与过去相反,但呈弱持续性,其他极端降水指数与过去增减趋势相一致且持续性较强。受过去趋势影响的未来趋势时间长度基本在 9~16 a,其中 PRCPTOT、R99p、R50 mm 为 16 a,CDD、R10 mm、Rx5day 为 15 a,Rx1day、R95p 为 14 a,R20 mm、CWD 为 13 a,SDII 最小为 9 a。总体而言,极端降水指数过去对未来趋势的影响时间较长。

表 2 极端降水指数的 Hurst 指数

Table2 Hurst index of extreme precipitation indices			
维度	极端降水指数	H 值	未来趋势
强度指数	PRCPTOT	0.511	弱持续性
	Rx1day	0.655	强持续性
	Rx5day	0.506	弱持续性
	R95p	0.576	弱持续性
	R99p	0.577	弱持续性
	SDII	0.658	强持续性
频率指数	R10 mm	0.395	弱反持续性
	R20 mm	0.470	弱反持续性
	R50 mm	0.578	弱持续性
持续性指数	CDD	0.774	强持续性
	CWD	0.961	强持续性

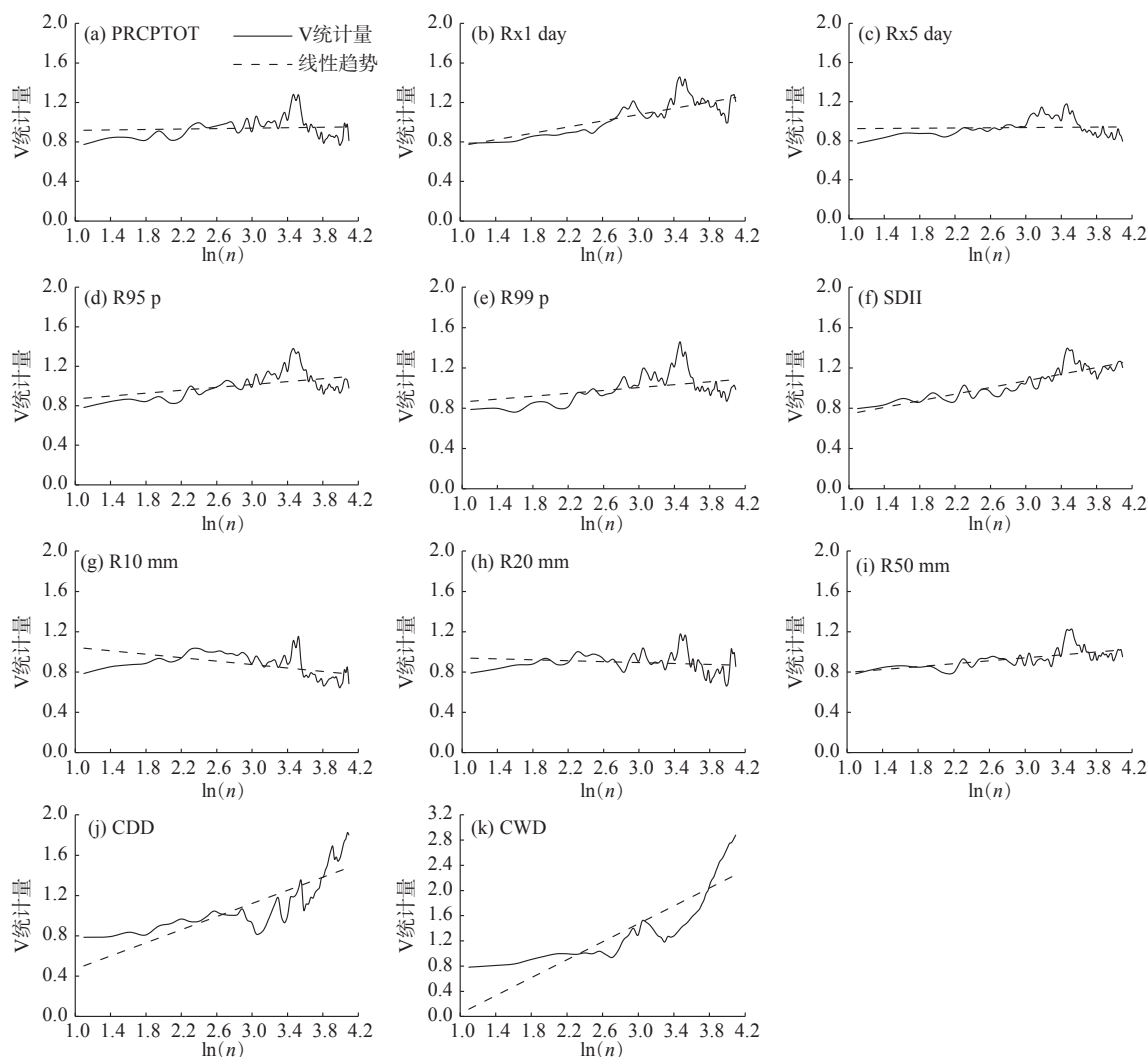


图 8 极端降水指数  $V \sim \ln(n)$  曲线  
Fig.8 The  $V \sim \ln(n)$  curve of extreme precipitation indices

## 4 结论与展望

本研究以里下地区为例,从强度、频率和持续性3个维度,通过M-K趋势分析、小波分析和重标极差等方法,研究极端降水指数的时空期变化特征,进一步探讨其周期性及未来趋势变化,主要结论如下:

(1)里下河地区多年平均降水为1 017.25 mm,变化范围为927.2~1 075.4 mm,空间分布呈自西北向东南增加。多年平均降水呈不显著增加趋势,变化范围为-1.25~0.75 mm/a,流域中部及兴化以北区域呈显著增加趋势,兴化以南地区呈显著减小趋势。

(2)里下河地区极端降水强度、频率均呈现增加趋势,持续性呈减少趋势。研究区内各站点变化各异,淮安、阜宁和盐城站的极端降水强度、频率和持续性在减小,Rx5day和R95p减少趋势显著;江都、姜堰和海安的极端降水强度增加,频率和持续性减小,PRCPTOT、Rx5day增加趋势显著。

(3)极端降水指数变化过程中存在3类尺度的周期性变化,在48~64年尺度上存在高低交错的准2次震荡,在38~47年尺度上出现高低交替的准3次震荡,在20~35年尺度上呈现局部性的高低交替的准4次震荡,在整个时间尺度上存在3个偏多中心和2个偏少中心。

(4)R10 mm和R20 mm未来变化趋势与过去相反且呈弱持续性,其他极端降水指数未来变化趋势与过去一致,其中CWD指数未来下降趋势的持续性最强,且过去总体趋势对未来趋势的影响时长为9~16年左右。

在全球变暖背景下,极端降水事件频发,影响极端降水的气候因素较多,环流因子的共同作用会造成区域性的极端降水事件,本文尚未探讨其与大气环流的关系,后续需要进一步研究极端降水的影响因子。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 时光训,刘健,马力,等.1970—2014年长江流域极端降水过程的时空变化研究[J].水文,2017,37(4):77-85.
- [3] HAN J Y, DU H B, WU Z F, et al. Changes in extreme precipitation over dry and wet regions of China during 1961—2014 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(11): 5847-5859.
- [4] LIU Z Y, XIE Y, CHENG L Y, et al. Stability of spatial dependence structure of extreme precipitation and the concurrent risk over a nested basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602(2): 126766.
- [5] FRANCES V, DAVENPORT N S. Using machine learning to analyze physical causes of climate change: a case study of U.S. Midwest extreme precipitation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(15).
- [6] 韩丽,黄俊雄,周娜,等.非平稳条件下北京市最大月降水量频率特征分析[J].水文,2021,41(2):32-37,108.
- [7] NICHOLSON S E, FUNK C, FINK A H. Rainfall over the African continent from the 19th through the 21st century [J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 165(JUN): 114-127.
- [8] 刘向培,佟晓辉,贾庆宇,等.1960—2017年中国降水集中程度特征分析[J].水科学进展,2021,32(1):10-19.
- [9] GUO X Y, WU Z F, HE H S, et al. Variations in the start, end, and length of extreme precipitation period across China [J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(5): 2423-2434.
- [10] 黎凌峰,王靓怡,韦李宏,等.三类ENSO相位下中国暖季降水时空变化特征[J].水文,2022,42(2):66-72,108.
- [11] 刘凯,聂格格,张森.中国1951—2018年气温和降水的时空演变特征研究[J].地球科学进展,2020,35(11):1113-1126.
- [12] 张珂,鞠艳,李致家.金沙江流域实际蒸散发遥感重建及时空特征分析[J].水科学进展,2021,32(2):182-191.
- [13] 孙正兰,王永东,陈静,等.江苏里下河腹部地区径流系数变化特征分析[J].长江科学院院报,2021,38(2):18-23.
- [14] 米博宇,陈皓锐,金银龙,等.江苏里下河平原农田涝灾的情景模拟分析:以高邮灌区典型圩垸为例[J].排灌机械工程学报,2021,39(6):608-614.
- [15] 项瑛,张余庆,程婷.基于SWAT模型的里下河平原区水文模拟[J].资源科学,2015,37(6):1181-1189.
- [16] 叶正伟,许有鹏,潘光波.江淮下游汛期降水与ENSO冷暖事件的关系:以里下河腹部地区为例[J].地理研究,2013,32(10):1824-1832.
- [17] ALEXANDER L V, ZHANG X, 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.
- [18] YUE S, PILON P, CAVADIAS G. Power of the Mann - Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 259: 254-271.
- [19] 王学风,路洁,曹永强.辽宁省近54年旱涝特征分析及其对大气环流响应研究[J].水利学报,2020,51(12):1514-1524.
- [20] 龚成麒,董晓华,董立俊,等.雅砻江流域REOF分区的降水特征及其未来趋势分析[J].水土保持研究,2022,29(3):78-87.

(下转第121页)