

1960–2016年三峡库区极端降水事件时空变化特征

董钊煜¹, 彭涛^{1,2,3}, 董晓华^{1,2,3}, 刘冀^{1,2,3}, 常文娟^{1,2,3}, 林青霞^{1,2,3}

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072; 3. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 利用三峡库区20个气象站1960–2016年的逐日降水资料,应用线性倾向估计、Mann–Kendall突变分析法、小波分析法和克里金插值法,分析库区极端降水事件的时空变化特征。结果表明:1960–2016年,三峡库区极端降水事件总体上呈现减少的趋势,其中Rx5day、CWD减少趋势显著,而SDII、Rx1day、R99p等指数表现为不显著增加趋势,这可能是由于PRCPTOT减少速率小于CWD而造成了雨量再分配;极端降水指数突变多发生于1990年前后;PRCPTOT、R10、R95p的气候倾向率在三峡库区中部地区均表现为明显下降趋势,而CWD则在东北和西南部呈增加趋势,表明三峡库区极端降水存在均化的趋势;三峡库区极端降水指数的变化主周期相似,大多数为4~6a的短周期,仅R10与R25存在12~16a的中周期,表明三峡库区极端降水事件正在向强度大、周期短的方向演化;气候因子均对极端降水指数有较大影响,太阳黑子相对数与极端降水指数呈正相关关系,其他则为负相关,在时序性上,表现为PRCPTOT滞后于大多数气候因子。该研究可为三峡库区极端气候变化的模拟预测及防灾减灾提供参考。

关键词: 极端降水事件; 极端降水指数; 时空变化; 小波分析; 三峡库区

中图分类号:TV12; P426.61⁺4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)05-0093-09

Spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation events in the Three Gorges Reservoir area during 1960–2016

DONG Zhaoyu¹, PENG Tao^{1,2,3}, DONG Xiaohua^{1,2,3}, LIU Ji^{1,2,3}, CHANG Wenjuan^{1,2,3}, LIN Qingxia^{1,2,3}

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China; 3. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443002, China)

Abstract: Daily precipitation data from 20 meteorological stations in the Three Gorges Reservoir area (TGRA) from 1960 to 2016 was used to analyze the spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation events with the methods of linear tendency estimation, Mann–Kendall test, wavelet analysis, and kriging interpolation. The results show that the extreme precipitation in the TGRA generally showed a decreasing trend in the past 57 years, among which Rx5day and CWD decreased significantly, whereas SDII, Rx1day, and R99p increased insignificantly. The reason for this phenomenon could be that PRCPTOT decreased at a slower rate than CWD, which caused the rainfall redistribution. Most of the abrupt changes of extreme precipitation indices occurred around 1990. The climatic tendency rates of PRCPTOT, R10, and R95p all showed a significant downward trend in the central part of the TGRA, except that CWD showed an increasing trend in the northeast and southwest of the TGRA, indicating a homogenizing trend of extreme precipitation in the area. The extreme precipitation indices had similar main changing cycles in the TGRA, most of them had a short cycle of 4–6 a, with the exception of R10 and R25, which had a medium cycle of 12–16 a, indicating that the extreme precipitation events in the

收稿日期:2020-02-10; 修回日期:2020-05-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405603, 2017YFC0405606); 国家自然科学基金项目(51709151); 水电工程水文气象重大关键技术应用研究项目(DJ-ZDZX-2016-02)

作者简介:董钊煜(1999-),男,山西晋中人,本科生,主要从事水文与水资源方面的研究。

通讯作者:彭涛(1973-),男,湖南保靖人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水文水资源与生态水文方面的研究。

TGRA were evolving in the direction of high intensity and short cycles. Climatic factors had a great impact on extreme precipitation indices, among which relative sunspot number was positively correlated with the extreme precipitation indices, whereas the other factors were all negatively correlated with them. In terms of time sequence, PRCPTOT lagged behind from most climatic factors. This study can provide a reference for the prediction of extreme climate changes and the prevention and reduction of disasters in the TGRA.

Key words: extreme precipitation event; extreme precipitation index; spatiotemporal variation; wavelet analysis; the Three Gorges Reservoir Area (TGRA)

1 研究背景

全球变暖是当今世界面临的重大挑战之一。IPCC 第五次评估报告提出,近百年来全球平均气温已上升 0.85°C ,如果不采取干预措施,预计全球平均气温最早在 2030 年之前将超过工业化前水平的 1.5°C ^[1]。气候要素的细微变化对极端气候事件的发展有深远影响^[2-3]。全球变暖导致地气、海气系统的能量收支不平衡,进而深刻影响全球水循环过程,加快全球降水量再分配的过程^[4],导致全球季风区极端降水增强尤为显著^[5-7]。近年来,极端降水事件的频繁发生对我国的经济社会发展和生态环境造成了巨大影响^[8-10]。

国内外学者在极端降水领域已经取得了许多研究成果。Alexander 等^[11]指出,20 世纪以来全球年降水日数有明显上升的趋势;Griffiths 等^[12]研究表明,20 世纪美国东北部的极端降水指数总体表现为持续上升态势;Groisman 等^[13]的研究结果表明,在美国、澳大利亚、中国等国家,强降水事件呈现增多趋势,可见中国的极端气候事件的增多趋势与世界是同步的。闵岫等^[14]研究认为,我国极端气候事件的强度与频率均有所增加,这一结论在杨金虎等^[15]以及 Zhang 等^[16]的研究中也得以证实;任正果等^[17]利用全国格点数据研究发现中国南方地区年降水量与各极端降水指数间存在良好的相关性;Zhai 等^[18]研究结果显示,我国北方地区年降水量呈现显著的减少趋势,而西部地区、长江流域和东南沿海地区则呈现显著的增加趋势,全国大部分地区的年降水日数有显著的减少趋势。总之,已有的研究成果表明我国极端降水事件有极化的趋势,并存在显著的区域差异^[19-24]。

三峡库区是一个特殊的地理单元和长江流域重要的生态功能区,也是典型的生态脆弱区。由于地处亚热带季风区,降水年内和年际变化大,且地形以山地为主,陡坡比例较高,暴雨冲刷极易造成区域性洪涝灾害。由于人类活动的影响,库区生物的适生生境

不断退化,生物生存空间缩小,生物多样性不断下降或丧失,三峡库区的生态环境十分脆弱^[25]。已有研究多集中于三峡库区降水的时空分布方面^[26-27],对极端降水事件特征及影响因素等方面深入研究较少。鉴于此,本文选用三峡库区 20 个气象站 1960-2016 年逐日降水观测资料,研究三峡库区极端降水的时空分布特征与周期特性,并进一步探究气候因子指数与各极端降水指数的相关性,有助于深入理解三峡库区极端降水的变化趋势,为三峡库区的防灾减灾和三峡水库优化调度提供决策参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

三峡库区是指三峡大坝建成后蓄水淹没并有移民任务涉及的地区。库区总面积约为 $5.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于 $28^{\circ}31'N \sim 31^{\circ}44'N$ 、 $105^{\circ}50'E \sim 111^{\circ}40'E$ 之间,海拔高程范围为 $-22 \sim 2\,991 \text{ m}$ 。三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原的结合部,逾越鄂中山区峡谷及川东岭谷地带,西起重庆江津,东至湖北宜昌,北屏大巴山、南依川鄂高原。研究区属亚热带大陆性季风气候,雨热同期,夏季雨量占全年降水量的 60% 以上。年平均气温 18°C ,年降水量 $1\,000 \sim 1\,800 \text{ mm}$,气象灾害发生频繁。受地形的影响与特殊的地理条件约束,地震、崩塌、滑坡、泥石流等灾害时有发生,水土流失现象严重。三峡库区及气象站点分布见图 1。

2.2 数据来源

本文所用数据来源于中国气象局国家气象信息中心(<https://www.nmic.cn/>)中国地面国际交换站气候资料日值数据集,选取三峡库区及周边 20 个分布均匀、基本无缺测资料的站点。逐日降水数据序列为 1960-2016 年,采用雨日阈值为 0.1 mm 。在数据统计过程中,对个别站点短时段缺测的数据进行分段线性插值,对长时段缺测数据的站点进行剔除。

2.3 研究方法

2.3.1 极端降水指数 世界气象组织气象委员会

(WMO – CCI)共推荐了 27 个核心极端气候指数作为气候变化研究的统一标准。本文选取了其中具有代表性的 10 个极端降水指数,如表 1 所示。10 个极端降水指数可以分为 4 类,且相互之间存在着密切联系。

2.3.2 分析方法 本文采用线性倾向估计法和滑动平均法分析各极端降水指数的年际变化趋势;为提高突变检验的可靠性,运用 Mann – Kendall (M – K)突变检验法^[28]与滑动 T 检验法综合检测突变点;利用交叉小波和相干小波变换^[29]分析各极端降水指数间的周期相关性;应用克里金插值法对三峡库区极端降水指数的空间分布特征进行分析;采用相关分析法探讨极端降水指数与气候因子指数之间的相关关系。

3 结果与分析

3.1 极端降水指数的时间变化特征

3.1.1 极端降水指数的变化趋势 三峡库区极端降水指数年际和年代际变化差异明显。1960 – 2016 年三峡库区各极端降水指数年际变化及 5 a 滑动平均值如图 2 所示。由图 2 可知,极端降水指数总体呈减少趋势,但只有 CWD 通过了 0.01 水平的显著性检验,其气候倾向率为 – 0.25 d/10a,其余 6 个指数 PRCPTOT、R10、R25、Rx5day 和 R95p 则均有不显著减小的趋势,而 SDII、Rx1day、R99p 和 CDD 表现

为不显著增加的趋势。CWD 的显著减小(图 2(i))和 CDD 的不显著增加(图 2(j))说明三峡库区连续降水日数减少,而 SDII、Rx1day 和 R99p 的不显著增加则反映了三峡库区极端降水事件强度的增加。由 5 a 滑动平均值的变化可以看出,三峡库区 PRCPTOT、SDII、R10、R25、Rx5day、R95p、R99p、CWD 在 20 世纪 70 年代末有明显的震荡变化。由 5 a 滑动平均可以将这 8 个极端降水指数总体分为 5 个阶段:1970 年以前、1970 – 1975、1975 – 1985、1985 – 1998 年和 1998 年以后,这 5 个阶段分别表现为“下降 – 上升 – 下降 – 上升 – 下降”的趋势,其中 Rx1day 与 CDD 呈现出较明显的丰枯交替特征。各极端降水指数均在 1998 年表现为极大值,这可能与 1998 年区域特大暴雨有关。

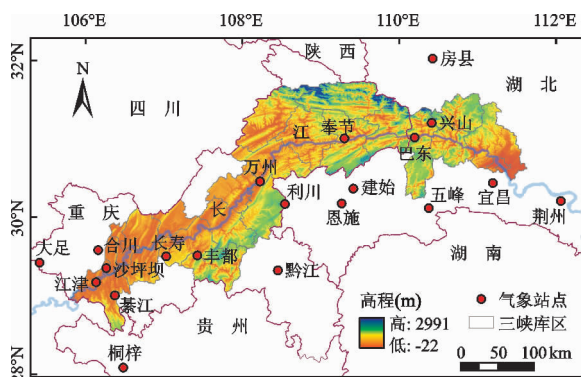


图 1 三峡库区及气象站点分布

表 1 10 个极端降水指数及其定义

指标类别	代码	指数名称/单位	指数定义
绝对指标	R10	中雨日数/d	日降水量≥10mm 的日数
	R25	大雨日数/d	日降水量≥25mm 的日数
相对指标	R95p	强降水量/mm	日降水量 > 95% 分位值的总降水量
	R99p	极强降水量/mm	日降水量 > 99% 分位值的总降水量
持续指标	CDD	持续干期/d	最长连续无降水日数
	CWD	持续湿期/d	最长连续降水日数
强度指标	Rx1day	日最大降水量/mm	年最大的 1d 降水量
	Rx5day	5d 最大降水量/mm	连续 5d 最大降水总量
	PRCPTOT	年降水量/mm	≥1mm 降水日累积量
	SDII	降水强度/(mm · d ⁻¹)	年降水量/降水日数

3.1.2 极端降水指数的突变特征 对三峡库区 1960 – 2016 年各极端降水指数进行突变分析,其中 PRCPTOT、SDII、Rx1day 和 Rx5day 4 个极端降水指数的 M – K 曲线图如图 3 所示(其他极端降水指数 M – K 曲线图从略)。图 3(a)显示,PRCPTOT 的 UF

曲线在 1960 – 1977 年间基本处于零线以上;1978 – 1984 年呈折线上升的趋势;1985 年后则呈现急剧下降的趋势,表明三峡库区的年降水量经历了减少 – 增大 – 减少的发展变化。同时,PRCPTOT 的 UF 与 UB 曲线有 6 个交点,经过滑动 T 检验(滑动年数为 5

a), 仅 1988、1998 与 2002 年出现的降水增加突变是可信的, 但 UF 线没有超过 $\alpha = 0.05$ 信度水平, 表明 PRCPTOT 的突变不显著。图 3(b) 显示, 在 1960–1968 年间, SDII 的 UF 曲线在零线附近波动; 1969–1990 年基本在零线以上; 1990 以后有急剧下降的

趋势, 1995 年后一直在零线下保持波动。SDII 的 UF 与 UB 曲线有 5 个交点, 经过滑动 T 检验, 仅 1966 年出现的降水增加突变是可信的, 但 UF 曲线没有超过 $\alpha = 0.05$ 信度线, 说明 SDII 的突变没有达到 95% 的显著性水平。

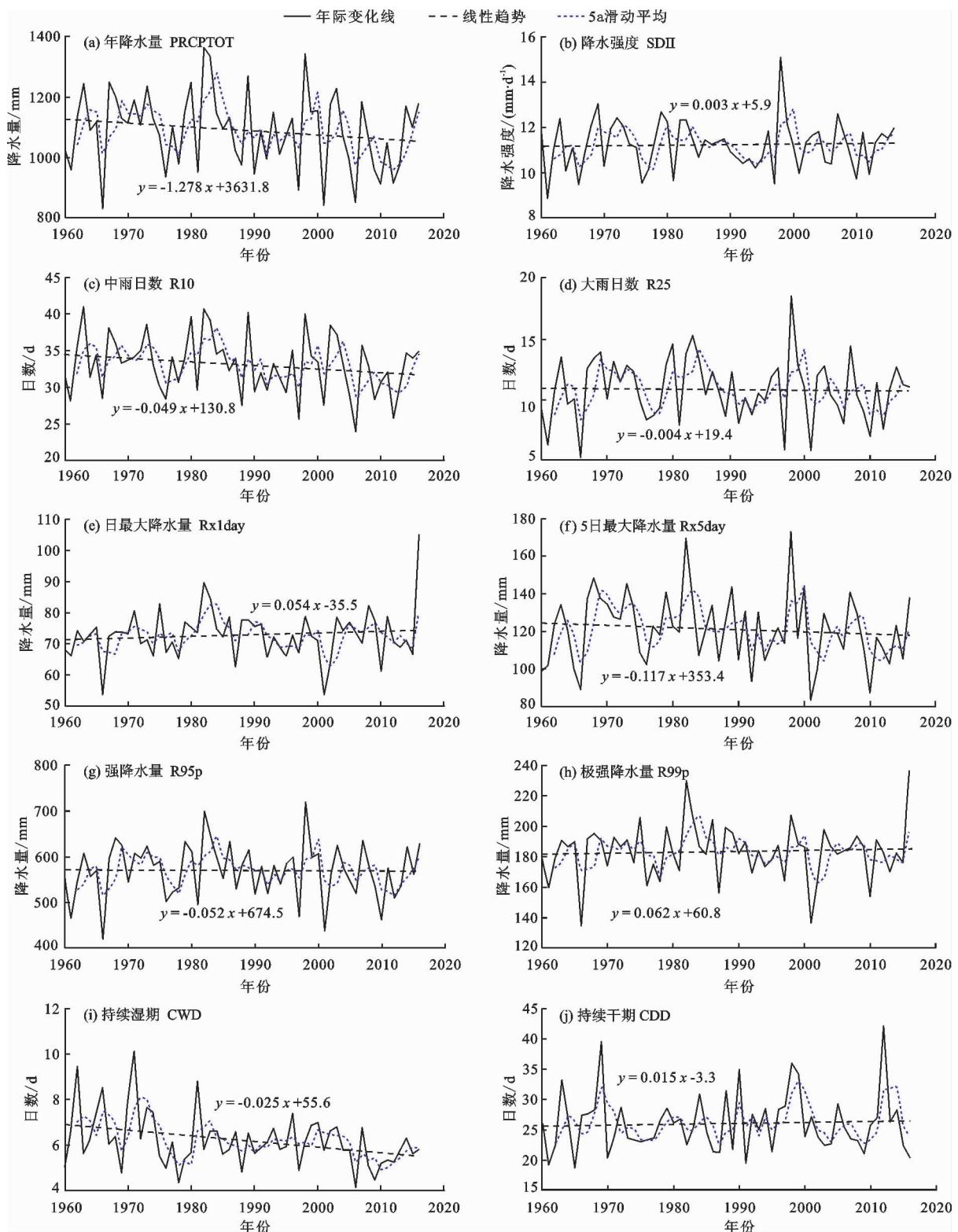


图 2 1960–2016 年三峡库区各极端降水指数年际变化及 5 a 滑动平均值

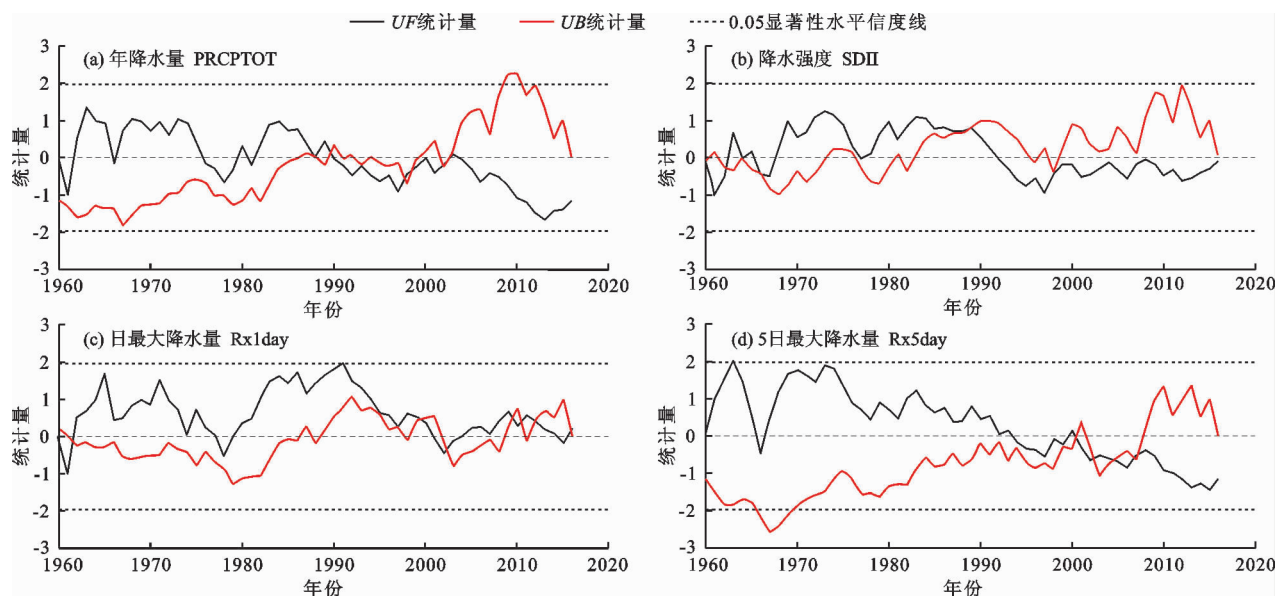


图3 1960–2016年三峡库区极端降水指数M-K突变检验

分析表明,在95%的显著性水平下,三峡库区的R10、R25、R95p、R99p、Rx1day等5个指数均存在不显著突变现象,Rx5day、CWD发生显著突变现象,CDD没有发生突变。

3.1.3 极端降水指数的周期特征 采用Morlet小波分析方法研究三峡库区8个极端降水指数的周期变化特征,并构建全局小波谱进行检验,结果如图4所示。由图4可知,三峡库区8种极端降水指数的变化主周期相似,普遍存在4~6a的短周期,仅R10与R25存在12~16a的中周期。具体分析如下:

在1995年以前,PRCPTOT、SDII、R10和R25均没有表现出明显的周期特征;在1996–2006年,PRCPTOT、SDII、R10、R25、R95p和R99p均存在4~6a的显著周期;PRCPTOT与SDII、R10、R25、R95p和R99p等5个指数具有较大的相关性。从全局小波谱可以看出,6个指数均存在4a左右周期,其中大多数指数还存在12a左右周期,但6个指数的全局小波谱显示仅4a左右的振荡周期通过了0.05显著性水平的检验,因此PRCPTOT、SDII、R10、R25、R95p与R99p的主周期为4a左右,这表明各极端降水指数与年降水量具有良好的相关关系。CWD与CDD均在1975年存在显著的2a左右短周期,结合全局小波谱可见,CWD与CDD的能量谱呈交替出现峰值的情况。对比R95p与R99p的不显著能量峰值,可以发现R99p比R95p具有更短的振荡周期。从R99p和CWD的全局小波谱可知,三峡库区的极端降水事件正在向周期短、强度大的方向演变。

3.2 极端降水指数的空间分布

选择PRCPTOT、R10、R95p和CWD 4个极端降

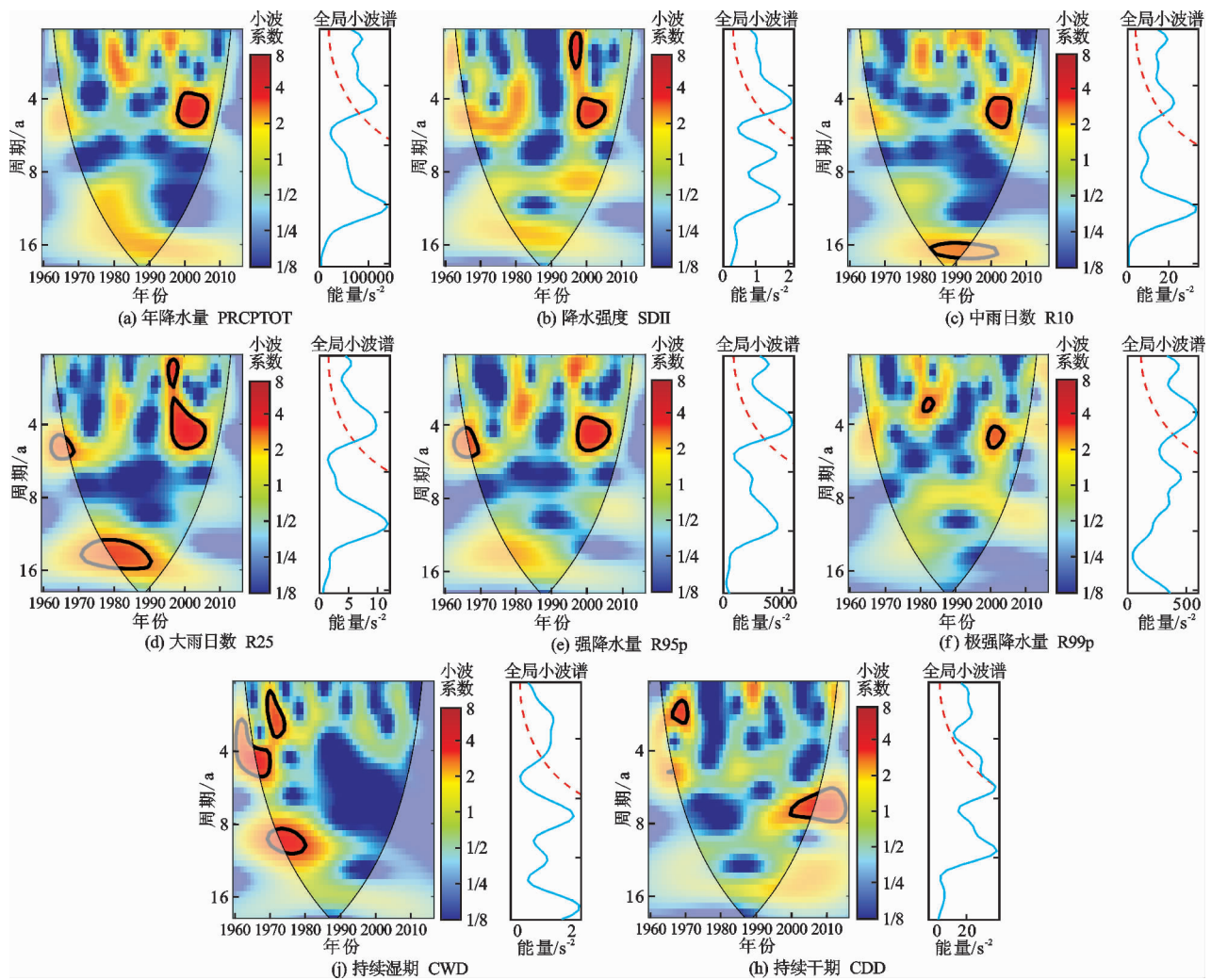
水指数,分别计算1960–2016年三峡库区各气象站点极端降水指数的平均值,利用克里金法进行空间插值得到4个极端降水指数的空间分布特征,如图5所示。由图5可以看出,1960–2016年三峡库区PRCPTOT整体呈下降趋势,气候倾向率呈现中部减少、东西增加的空间格局(图5(a)),这可能是由于川鄂高原的阻隔,使中部地区降水量减少所致。倾向率增加的站点有6个,增幅为1.3~10.4 mm/10a;呈现减少趋势的有14个站点,但仅桐梓站的下降趋势通过了显著性检验,合川站PRCPTOT增幅最大,为10.43 mm/10a,五峰站减幅最大,为-25.78 mm/10a;R10倾向率的绝对值空间分布呈现西南低、东北高的格局(图5(b)),倾向率增加的站点有4个,增幅为0.09~0.6 d/10a;呈减少趋势的有16个站点,桐梓站的减少趋势通过了0.01显著性水平的检验,奉节、五峰两站的减少趋势则通过了0.05显著性水平的检验,沙坪坝站R10增幅最大,为0.55 d/10a;五峰站减幅最大,为-1.16 d/10a;R95p的倾向率绝对值分布呈现中部高,东西低的格局(图5(c)),20个站点均呈现减少趋势,中部减小幅度最大,代表站点为恩施站,倾向率为-0.6 mm/10a,但20个站点的减少趋势均不显著;与PRCPTOT的空间分布类似,CWD的气候倾向率分布也呈现东西增加,中部减少的状态(图5(d)),倾向率增加的站点有12个,其中有3个站点通过了显著性检验,占比25%,增幅为0.1~12.15 d/10a;呈现减少趋势的有8个站点,其中5个通过显著性检验,占比62.5%,其中恩施站通过了0.01显著性水

平的检验,宜昌站 CWD 增幅最大,为 12.15 d/10a;万州站减幅最大,为 -8.12 d/10a。综合分析表明,年降水量与其他极端降水指数具有较好的相关性,且呈现空间均化的趋势。CWD 显著减少,且减少速率大于年降水量的减少速率,这可能是造成三峡库区极端降水事件强度增大的原因。

3.3 极端降水指数与气候因子指数的关系

对东亚夏季风指数(EASMI)、太阳黑子相对数(WOLFER)、南方涛动指数(SOI)和 ENSO 指数(SST)4 种气候因子指数与 10 种极端降水指数进行相关分析,结果见表 2。由表 2 可知,东亚夏季风与 SDII 和 R25 存在显著的负相关关系;而太阳黑子相对数与各极端降水指数呈不显著正相关关系,与吴梦初等^[30]的研究结果相似;南方涛动指数与各极端降水指数呈不显著的负相关关系,而 ENSO 指数与绝大多数极端降水指数呈不显著的正相关关系,仅与 PRCPTOT 和 R10 存在不显著的负相关关系。

采用交叉小波变换(XWT)方法,进一步分析极端降水指数与气候因子指数之间的关系。现以 PRCPTOT 为例,分析该极端降水指数与 4 个气候因子指数的时频变化关系,其交叉小波相关性分析见图 6。由图 6 可知,年降水量在 2 a(1980 年左右)尺度上,相较于东亚夏季风落后 1/4 周期,即落后 0.5 a,而在 10 a(1975 年左右)尺度上超前东亚夏季风 2.5 a,在 1995 年前后,在 1 a 尺度上存在年降水量与东亚夏季风的显著的负相关关系。对太阳黑子相对数而言,PRCPTOT 在 1980 年左右表现出了显著的落后了 1/4 个周期,均在 2~3.5 a 之间,并都有强烈震荡的正相关性。在 2000 年前后的 5 a 内,ENSO 指数与南方涛动指数均对 PRCPTOT 产生了显著影响,PRCPTOT 在时序上落后了 ENSO 指数 1 a,超前于南方涛动指数约 1 a,年降水量与 ENSO 指数呈现显著负相关关系,南方涛动指数则与降水量展现了显著的正相关关系。



注:“V”型实线包围区域为小波边界效应影响区域;粗实线区域表示通过 0.05 的显著性检验,红色虚线为 0.05 的红噪声标准谱。

图 4 1960 - 2016 年三峡库区极端降水指数时间序列 Morlet 小波能量谱分布

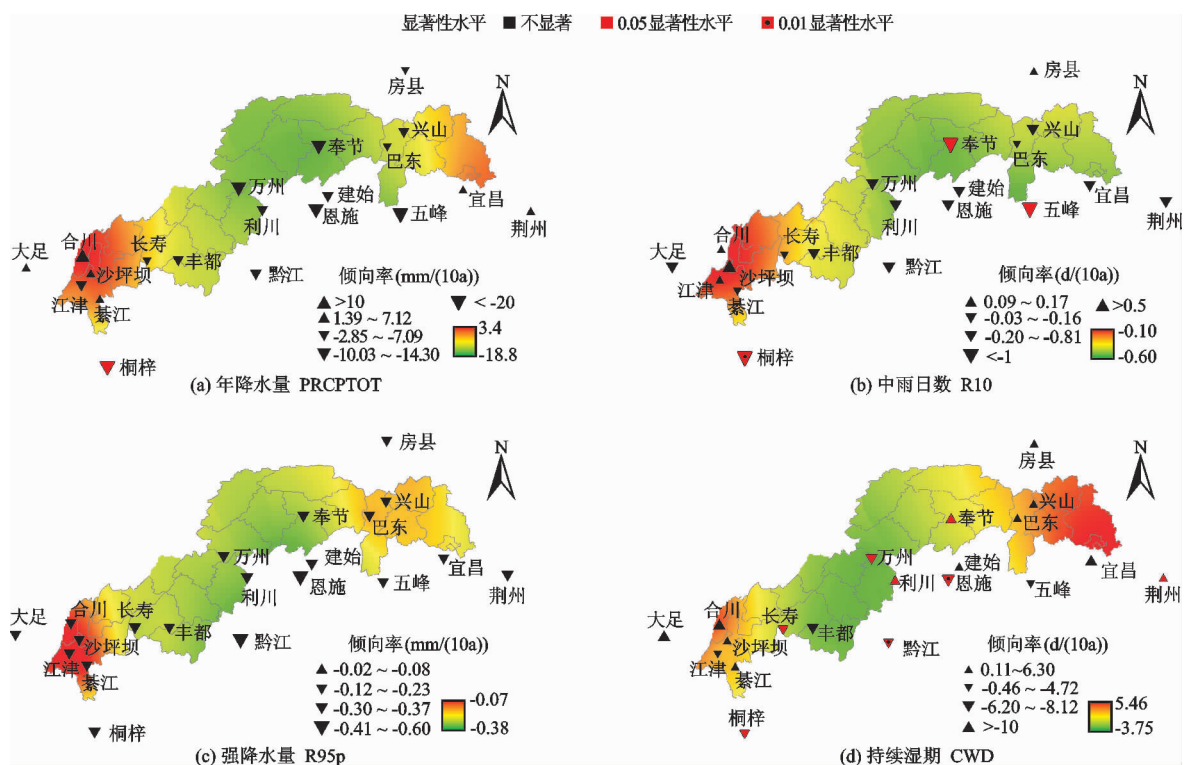
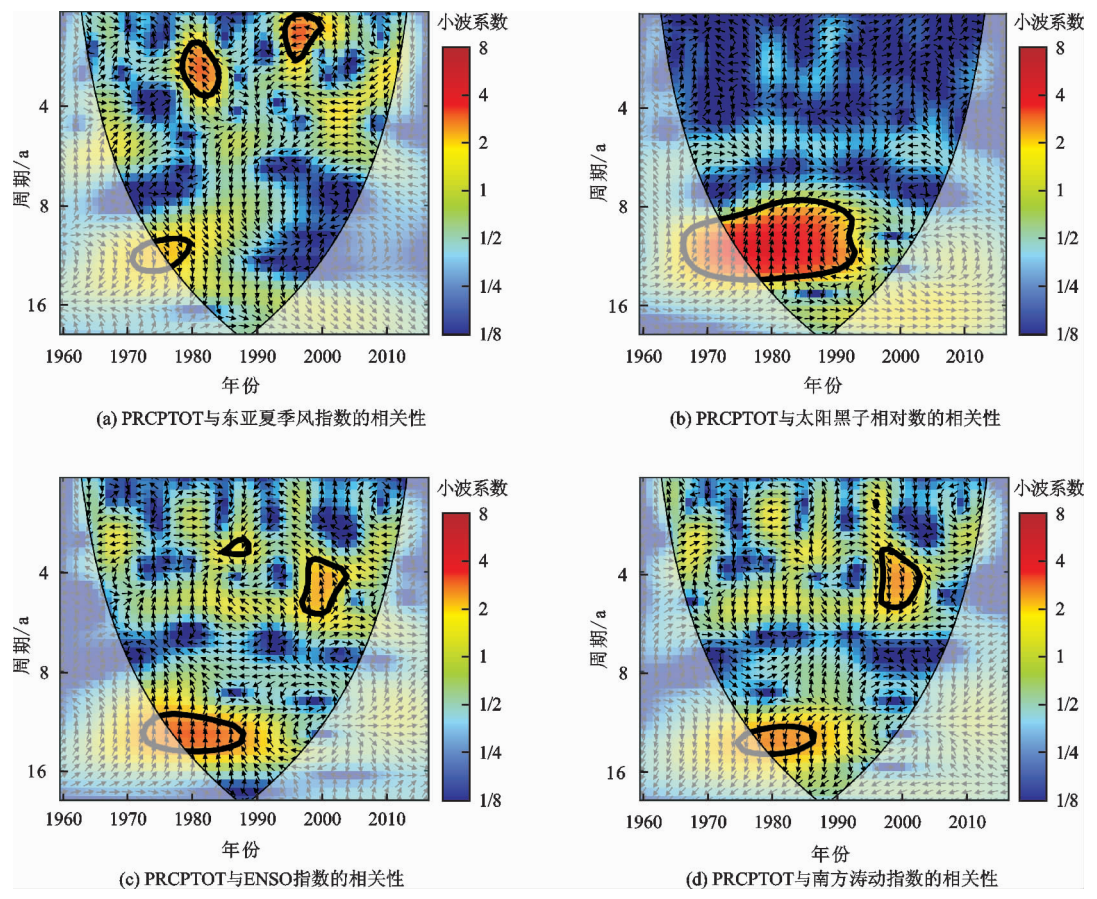


图 5 1960 – 2016 年三峡库区各气象站点 4 个极端降水指数变化趋势空间分布及显著性检验



注：“V”型实线包围区域为小波边界效应影响区域；粗实线区域表示通过 0.05 的显著性检验。

图 6 1960 – 2016 年三峡库区极端降水指数 PRCPTOT 与气候因子指数交叉小波相关性分析

表2 1960-2016年三峡库区极端降水指数与气候因子相关分析

气候因子	极端降水指数									
	PRCPTOT	SDII	R10	R25	Rx1day	Rx5day	R95p	R99p	CWD	CDD
EASMI	-0.222	-0.284*	-0.188	-0.319*	-0.164	-0.198	-0.254	-0.124	-0.069	0.087
WOLFER	0.187	0.181	0.213	0.132	0.003	0.186	0.149	0.029	0.065	0.199
SOI	-0.101	-0.053	-0.032	-0.090	-0.114	-0.125	-0.105	-0.128	-0.216	-0.049
SST	-0.007	0.057	-0.048	0.039	0.089	0.058	0.047	0.080	0.163	0.028

注：*表示通过了0.05的显著性水平检验。

4 结 论

本文采用10个极端降水指数研究了1960-2016年三峡库区极端降水事件的变化趋势、突变特性、周期特征、空间分布以及气候因子对极端降水事件的影响,得出以下主要结论:

(1)1960-2016年三峡库区极端降水总体上呈现减少趋势,其中Rx5day、CWD显著减少,而SDII、Rx1day、CDD等指数则呈增加趋势,这可能由PRCPTOT减少速率小于CWD造成的雨量再分配所致;除Rx1day、CDD外8个指数均在1976年左右发生明显突变。三峡库区10个极端降水指数的变化主周期相似,大多数存在4~6a的短周期,仅R10与R25存在12~16a的中周期。

(2)三峡库区极端降水指数在空间上具有明显的差异。年降水量与其他极端降水指数具有较好的相关性,4种指数均呈现出整体下降的趋势。PRCPTOT、R95p倾向率的空间分布均为库区中部强、东、西部弱,R10与R95p整体均呈下降趋势,R10在库区东北部的下降倾向强于西南部,CWD则表现为中部下降、东、西部上升的趋势,在空间上整体表现为均化的趋势。

(3)三峡库区的PRCPTOT与东亚夏季风、南方涛动指数和ENSO指数均呈现负相关关系,而与太阳黑子相对数则呈现正相关关系,在短周期上,除南方涛动指数外的其他3种气候因子均在时序性上超前于PRCPTOT,而在中周期上,PRCPTOT的变化则超前于东亚夏季风。

参考文献:

[1] 董思言,高学杰.长期气候变化-IPCC第五次评估报告解读[J].气候变化研究进展,2014,10(1):56-59.
[2] 黄强,陈子燊.全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究[J].地球科学进展,2014,29(8):956-967.
[3] 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.

[4] 孔锋,史培军,方建,等.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J].灾害学,2017,32(2):165-174.
[5] GOSWAMI B N, VENUGOPAL V, SENGUPTA D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment[J]. Science, 2006, 314(5804): 1442-1445.
[6] 秦大河.气候变化科学与人类可持续发展[J].地理科学进展,2014,33(7):874-883.
[7] ZHANG Wenxia, ZHOU Tianjun. Significant increases in extreme precipitation and the associations with global warming over the global land monsoon regions[J]. Journal of Climate, 2019, 32(24): 8465-8488.
[8] 姜彤,王艳君,翟建青,等.极端气候事件社会经济影响的风险研究:理论、方法与实践[J].阅江学刊,2018,10(1):90-105+147.
[9] 景丞,姜彤,王艳君,等.中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究[J].气象学报,2016,74(4):572-582.
[10] 陆咏晴,严岩,丁丁,等.我国极端降水变化趋势及其对城市排水压力的影响[J].生态学报,2018,38(5):1661-1667.
[11] 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, 2006, 111: D05109.
[12] GRIFFITHS M L, BRADLEY R S. Variations of twentieth-century temperature and precipitation extreme indicators in the Northeast United States[J]. Journal of Climate, 2007, 20(21): 5401-5417.
[13] GROISMAN P Y, KARL T R, EASTERLING D R, et al. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change[J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 243-283.
[14] 闵岫,钱永甫.中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J].水科学进展,2008,19(6):763-771.
[15] 杨金虎,江志红,王鹏祥,等.中国年极端降水事件的

- 时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 75-83.
- [16] ZHANG Qiang, LI Jianfeng, SINGH V P, et al. Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes: Implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle[J]. Global and Planetary Change, 2013, 111: 57-76.
- [17] 任正果, 张明军, 王圣杰, 等. 1961-2011年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 640-649.
- [18] ZHAI Panmao, ZHANG Xuebin, Wan Hui, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of Climate, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [19] 孔 锋, 方 建, 乔枫雪, 等. 透视中国小时极端降水强度和频次的时空变化特征(1961-2013年)[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 3051-3067.
- [20] 刘江涛, 徐宗学, 赵 焕, 等. 1973-2016年雅鲁藏布江流域极端降水事件时空变化特征[J]. 山地学报, 2018, 36(5): 750-764.
- [21] 郭湘宇, 吴正方, 杜海波, 等. 福建省极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J]. 资源科学, 2017, 39(6): 1084-1098.
- [22] 张 卉, 薛联青, 刘远洪, 等. 洞庭湖流域极端降水变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 6-12.
- [23] 李运刚, 何大明, 胡金明, 等. 红河流域 1960-2007 年极端降水事件的时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(11): 1908-1917.
- [24] 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.
- [25] 章家恩, 徐 琪. 三峡库区生物多样性的变化态势及其保护对策[J]. 热带地理, 1997, 17(4): 412-418.
- [26] 刘晓冉, 程炳岩, 杨 茜, 等. 近 50a 三峡库区汛期极端降水事件的时空变化[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 244-251.
- [27] 张天宇, 李永华, 程炳岩, 等. 三峡库区汛期极端降水非均匀性特征[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 298-304.
- [28] TORIDE K, CAWTHORNE D L, ISHIDA K, et al. Long-term trend analysis on total and extreme precipitation over Shasta Dam Watershed[J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 244-254.
- [29] 王文圣, 丁 晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 515-520.
- [30] 吴梦初, 延军平. 太阳活动与 ENSO 事件对云南省旱涝灾害的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 280-284.

(上接第 92 页)

- [32] WANG Yanchao, LIU Yu, ZHANG Huifang, et al. Temperature variability inferred from tree-ring records in Weichang region, China, and its teleconnection with large-scale climate forcing [J]. Climate Dynamics, 2019, 52(3-4): 1533-1545.
- [33] ZHOU Tianjun, YU Rucong, ZHANG Jie, et al. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s[J]. Journal of Climate, 2009, 22(8): 2199-2215.
- [34] 郝志新, 耿 秀, 刘可邦, 等. 关中平原过去 1000 年干湿变化特征[J]. 科学通报, 2017, 62(21): 2399-2406.
- [35] 郭飞燕, 毕 玮, 郭飞龙, 等. 山东气候年际变化特征及其与 ENSO 的关系[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(3): 465-474.
- [36] 张人禾, 闵庆桦, 苏京志. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(5): 544-553.
- [37] GUTZLER D S, KANN D M, THORNBRUGH C. Modulation of ENSO-based long-lead outlooks of southwestern US winter precipitation by the Pacific decadal oscillation [J]. Weather and Forecasting, 2002, 17(6): 1163-1172.
- [38] 唐 民, 吕俊梅. 东亚夏季风降水年代际变异模态及其与太平洋年代际振荡的关系[J]. 气象, 2007, 33(10): 88-95.
- [39] MANTUA N J, HARE S R, ZHANG Yuan, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(6): 1069-1079.
- [40] CHAN J C L, ZHOU Wen. PDO, ENSO and the early summer monsoon rainfall over South China [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(8): L08810.