

鄱阳湖流域极端降水时空变化特征及ENSO事件影响分析

杨晓霞¹, 吴娟¹, 刘佳², 叶许春^{1*}

¹西南大学地理科学学院, 重庆

²中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京

Email: *yxch2000@swu.edu.cn

收稿日期: 2020年11月25日; 录用日期: 2021年1月8日; 发布日期: 2021年2月18日

摘要

基于鄱阳湖流域29个气象观测站1960~2017年逐日降水资料, 选用11个极端降水指数, 采用趋势分析、突变检验、相关分析和小波分析等方法, 系统研究了鄱阳湖流域极端降水的气候背景和时空变化特征, 探讨了不同海区ENSO事件与极端降水变化的响应关系。结果表明, 鄱阳湖流域自1990s以来流域气温上升趋势显著, 降水年代际波动特征明显。在年际变化上, 主要极端降水指数大多呈不同程度的上升趋势, 并在1990年前后发生突变。空间上, 流域极端降水指数总体上呈东北向西南减小态势, 大多数指数在流域中南部增加趋势相对突出。流域极端降水与NINO 1 + 2区之间的线性相关最为显著。在2~6 a时间尺度上, 流域极端降水与4个海区海温异常指数之间存在共振周期, 2010年之后, 鄱阳湖流域降水与赤道太平洋海温异常的同位相变化(正相关)关系明显增强。此外, 当ENSO处于暖事件时, 鄱阳湖流域绝大多数区域年总降水量均表现为不同程度的增加。本文的研究结果对于科学认识和了解鄱阳湖流域洪涝灾害的复杂背景和产生机制具有重要的理论与现实意义。

关键词

极端降水, 时空变化, ENSO事件, 鄱阳湖流域

Spatiotemporal Variations of Extreme Precipitation and the Influence of ENSO in the Poyang Lake Basin

Xiaoxia Yang¹, Juan Wu¹, Jia Liu², Xuchun Ye^{1*}

¹School of Geographical Sciences of Southwest University, Chongqing

²State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing

作者简介: 杨晓霞(1996-), 女, 甘肃省宕昌县人, 在读硕士, 研究方向为气候变化的生态水文效应。

*通讯作者。

Abstract

In this study, 11 extreme precipitation indices were selected to examine the spatiotemporal variation of extreme precipitation in the Poyang Lake basin during 1960~2017. The responses of extreme precipitation indices to ENSO events of different areas of the Pacific Ocean were further investigated. The results show that the temperature in the Poyang Lake basin increased significantly since the 1990s, and the inter-decadal precipitation fluctuated obviously. Most extreme precipitation indices showed that an upward trend with abrupt changes occurred around 1990. Spatially, the extreme precipitation indices decreased from northeast to southwest. The increasing trend of most indices in the central and southern part of the basin was relatively prominent. The linear correlations between the extreme precipitation indices and NINO 1 + 2 were the most significant. On the timescale of 2~6 years, a common oscillation period between the extreme precipitation of the basin and the four ENSO indices can be observed. After 2010, the positive correlation between the precipitation of the Poyang Lake basin and the SST anomalies in the equatorial Pacific increased significantly. Additionally, when in a warm ENSO year, annual precipitation in most areas of the Poyang Lake basin increases in varying degrees. The results of this study will improve the understanding of the complex background and driving mechanism of flood disasters in the Poyang Lake basin.

Keywords

Extreme Precipitation, Spatiotemporal Variation, ENSO, The Poyang Lake Basin

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

IPCC 第五次评估报告指出自 1880~2012 年以来, 全球平均地表温度升高了约 0.85℃, 与此同时, 降水事件普遍呈现出极端化趋势[1]。极端降水事件引发的暴雨、洪涝和泥石流等次生灾害对人类生活、社会发展和自然生态系统产生了严重影响, 引起国际社会的广泛关注[2]。已有结果表明, 极端降水存在明显的区域差异性[3]-[9]。极端降水事件的强度和出现概率在大部分中纬度地区, 以及较为湿润的热带地区存在加强和增大的趋势[1]。当前研究中, 有关极端降水指标的现象分析有所减少, 而对极端降水变化机理的分析逐渐增加, 有关极端降水趋势的模拟研究成为新的增长点[10] [11]。在极端降水变化成因上, 厄尔尼诺/南方涛动事件(El Nino/Southern Oscillation, 简称 ENSO)的年际变化被认为是引起中国降水异常的重要驱动因子[12]。ENSO 一般通过影响东亚季风的强弱进而调控中国的降水, 不同阶段的 ENSO 事件对中国降水异常的影响有所不同[13] [14] [15] [16]。通常情况下, 在厄尔尼诺发展年, 中国中部地区极端降水事件有所减少, 而次年中国东部地区极端降水事件更易发生[17]。ENSO 事件的发生往往会造成严重气候异常, 引发世界各地的严重气象水文灾害, 并造成巨大的社会经济损失。因此, 积极开展 ENSO 事件与极端降水的相关研究对区域经济社会发展至关重要。

鄱阳湖流域位于长江中下游地区, 每年注入长江的水量超过黄河、海河和淮河的径流总量, 对长江中下游水安全和生态安全影响重大。受区域特有的气候条件、地貌特征以及人类活动等因素的影响, 鄱阳湖流域洪涝

灾害频发,是长江中下游洪涝灾害的重灾区和多发区。据统计,仅 20 世纪 90 年代发生的流域性大洪水就有 4 次:1992、1995、1996 和 1998 年[18]。2020 年夏季的洪水灾害更是异常严重,给鄱阳湖流域及长江中下游地区造成了重大经济损失。目前,有关鄱阳湖流域极端降水时空变化特征及其与 ENSO 事件相关性分析较为缺乏,不利于对极端降水的成因背景及其年际预测的认识。随着国家级“环鄱阳湖生态经济区”建设的全面推进,深入了解流域洪涝灾害的复杂背景和产生机制十分迫切。基于此,本文采用趋势分析、相关分析、小波分析等方法,对全球变暖背景下的鄱阳湖流域极端降水时空变化特征开展系统分析,深入探讨其与 ENSO 事件的相关性,以期区域科学适应和应对极端气候变化提供理论支撑。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源及预处理

本文共选取鄱阳湖流域 29 个站点 1960~2017 年逐日最高气温、逐日最低气温和降水数据进行相关分析,所有气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)。该数据在使用前均通过了严格的质量控制,并对部分站点缺测数据进行均值插补处理。极端降水指数定义是基于世界气象组织(World Meteorological Organization)气候委员会等组织成立的气候变化检测指标专家组(Expert Team on Climate Change and Indices)参与制定的 27 个极端指数[19]。本文根据研究区实际降水情况和研究需要选取其中四类共 11 个极端降水指标(见表 1)。采用基于 R 语言的 RClimDex1.0 软件计算极端降水指数并建立时间序列。ENSO 事件选取赤道太平洋 NINO 1 + 2 区、NINO 3 区、NINO 3.4 区、NINO 4 区的海表温度距平(Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA)指数,该数据源自于美国国家大气与海洋管理局(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>)。

Table 1. Definition of extreme precipitation indices

表 1. 极端降水指数定义

分类	代码	指数名称	指数定义	单位
绝对指数	R10	中雨日数	日降水量 ≥ 10 mm 的日数	d
	R20	大雨日数	日降水量 ≥ 20 mm 的日数	d
	R25	暴雨日数	日降水量 ≥ 25 mm 的日数	d
相对指数	R95p	强降水量	日降水量 $> 95\%$ 分位值的年累计降水量	mm
	R99p	极强降水量	日降水量 $> 99\%$ 分位值的年累计降水量	mm
持续指数	CDD	持续干期	日降水量 < 1 mm 的最大持续日数	d
	CWD	持续湿期	日降水量 > 1 mm 的最大持续日数	d
	PRCPTOT	年总降水量	日降水量 > 1 mm 的年累计降水量	mm
强度指数	RX1day	1 日最大降水量	每月最大 1 日降水量	mm
	RX5day	5 日最大降水量	每月连续 5 日最大降水量	mm
	SDII	降水强度	年总降水量与日降水量 ≥ 1.0 mm 日数的比值	mm/d

2.2. 降水时间序列变化分析

趋势分析中由于线性回归要求时间序列符合正态分布,且易受异常值干扰,本文选用非参数化 Sen 趋势度对流域极端降水指数的年际变化率进行分析[20],并结合 Mann-Kendall 方法对趋势变化进行显著性检验,可以在一定程度上提高气候变化趋势判断的准确性。突变性分析采用 Mann-Kendall 突变检验,同时结合滑动 T 检验,检验两组随机变量样本均值是否存在显著差异性,从而对突变时间点的准确性进行验证。

2.3. 线性相关分析

采用 Pearson 法分析各极端降水指数之间及其与 ENSO 指标之间的线性相关关系，其相关系数的显著性采用 t 检验法[19]。但由于 ENSO 事件及极端降水本身所具有的复杂性，变量之间的关系较为复杂，简单线性相关并不能真实反映出两个变量之间的内在联系。

2.4. 小波分析

采用交叉小波变换(Cross wavelet transform, 简称 XWT)和小波相干(Wavelet coherence, 简称 WTC)等信号分析技术[21], 对极端降水指数和主要 ENSO 指标的时间序列进行统计分析, 可以从多时间尺度来揭示其内在联系, 弥补简单线性相关分析的不足。ENSO 事件本身具有复杂的时频结构及多尺度周期变化特征, 交叉小波分析相较传统方法而言, 能更客观、定量地揭示极端降水指标与 ENSO 事件之间的时频位相关关系。

3. 结果分析

3.1. 鄱阳湖流域降水变化的气候背景

区域极端降水的变化与全球气候变暖的大背景密切相关。图 2 显示了 1960~2017 年间鄱阳湖流域气候变化的整体背景。就气温变化来看(图 1(a)), 近 58 a 来全球平均气温呈明显的增加趋势。鄱阳湖流域年平均气温变化与长江流域气温变化具有高度的一致性, 二者与全球气温变化过程总体一致, 但也存在一定差异。具体表现在: 三者气温距平总体上于 1990 年前后由负转正, 表明 1990 年以来全球和长江流域气温的增加趋势明显加快, 而鄱阳湖和长江流域的气温增加幅度更为突出; 鄱阳湖和长江流域年平均气温变化的波动幅度明显大于全球平均气温, 并且二者存在明显的先下降后上升的过程, 特别是 1960~1970 年间, 气温波动下降幅度较大, 1990s 以来流域气温上升趋势显著, 1998 年以后温度整体维持在较高水平。

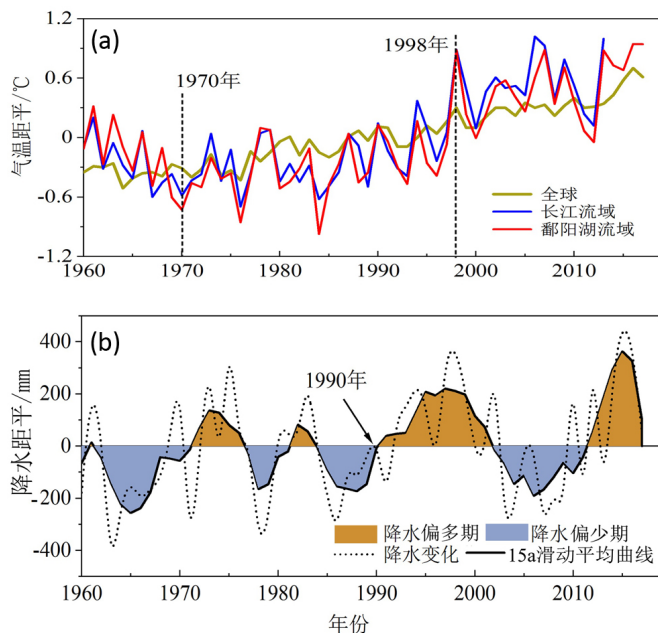


Figure 1. (a) Comparison of annual mean temperature anomalies among the world, the Yangtze River basin and the Poyang Lake basin during 1960~2017; (b) Inter-decadal variation of annual precipitation anomaly in Poyang Lake basin

图 1. (a) 1960~2017 年间全球、长江流域和鄱阳湖流域年平均气温距平变化; (b) 鄱阳湖流域年降水量距平的年代际变化过程

就降水变化情况来看,1960~2017 年间鄱阳湖流域年降水量呈现明显的年代际波动特征(图 1(b))。1960~1970 年间,降水整体偏少,表现为明显的负距平;1970~1990 年间,降水波动较小,出现多次的降水枯丰时期转换;1990 年以来,降水波动加剧,年代际变化特征明显,其中 1990s 和 2010s 降水异常偏多,2000s 降水异常偏少。

3.2. 鄱阳湖流域极端降水指数时间变化特征

基于四类极端降水指标,从多角度对鄱阳湖流域极端降水的时间变化特征进行深入分析。由表 2 可知,绝对指数中的 R10、R20 和 R25 均呈现上升趋势,其中 R25 变化速率为 0.78 d/10a,上升趋势显著。相对指数中的 R95p 和 R99p 均呈显著的上升趋势,二者的变化速率分别 26.74 mm/10a 和 11.90 mm/10a。这一结果与时光训等 [4] 的相关分析结果具有一致性,即鄱阳湖流域大部分地区增加趋势较明显。以 CWD 为代表的持续指数呈现微弱下降趋势,其变化速率为-0.10 d/10a。极端降水强度指数变化显著,均通过了 0.05 显著性检验,其中 SDII 更是通过 0.01 显著性检验,表明近 58 a 来流域降水强度的增加最为明显。此外,除 CDD 和 CWD 外,整个流域极端降水指数的上升站点比重明显高于下降站点比重,特别是 RX1day 和 SDII 呈上升趋势的站点比重达到 100%,表明流域绝大部分区域极端降水以上升为主。

Table 2. Variations of extreme precipitation indices in the Poyang Lake basin from 1960 to 2017

表 2. 1960~2017 年鄱阳湖流域极端降水指数变化特征

极端降水指数	变化速率	突变点	站点比重%		
			上升	下降	
绝对指数	R10	0.54 d/10a	2011	86.21%	13.79%
	R20	0.75 d/10a	1991*	96.55%	3.45%
	R25	0.78 d/10a*	1991*	96.55%	3.45%
相对指数	R95p	26.74 mm/10a*	1991*	96.55%	3.45%
	R99p	11.90 mm/10a*	1992*	86.21%	13.79%
持续指数	CDD	-0.06 d/10a	2014*	34.48%	65.52%
	CWD	-0.10 d/10a	1999*	24.14%	75.86%
	PRCPTOT	0.58 mm/10a	1991	93.10%	6.09%
强度指数	RX1day	14.14 mm/10a*	1992*	100%	-
	RX5day	29.13 mm/10a*	1991*	96.55%	3.45%
	SDII	0.32 (mm/d)·10a**	1991*	100%	-

注: **表示 $p < 0.01$ 显著水平检验, *为 $p < 0.05$ 显著水平检验; -表示无下降站点。

突变分析表明,鄱阳湖流域极端降水指数大多于 1990 年前后发生突变,且除年总降水量外均通过 0.05 显著性检验。这一结果表明鄱阳湖流域极端降水自 1990s 以来出现明显增加趋势,与前述流域降水年代际变化特征结果一致。已有研究结果也表明,鄱阳湖流域在 1990s 极端降水偏多,暴雨频率和强度均有所增加[22] [23],且这一时期内流域发生多次洪涝灾害。

3.3. 鄱阳湖流域极端降水指数空间变化特征

图 2 显示了近 58 a 来 11 个极端降水指数多年平均值的空间插值(普通克里格法)结果以及各站点变化趋势的显著性检验,具体表现为: 1) 绝对指数: R10、R20 和 R25 空间分布特征基本一致(图 2(a)~(c)),大体由东向西呈减小态势。相较而言, R10 和 R20 空间分布较为分散,延续性较低,特别是 R10 低值区主要集中在西北部,

东南部区域主要以下降趋势为主；R25 的空间延续性较好，在中西部区域增加趋势较为突出，南部山区局部区域存在下降趋势。2) 相对指数：R95p 和 R99p 的空间分布格局具有很好的一致性，整体由北向南减少(图 2(d)、图 2(e))，高值区集中于流域东部的鄱阳湖区和饶河及其周边地区，低值区集中于南部赣江流域。就时间变化来看，R95p 在整个流域范围内均呈增加趋势，其中东、中部 4 个站点的增加趋势显著；R99p 在东南山区存在部分下降区域。3) 持续指数：CDD、CWD 和 PRCPTOT 空间变化呈现出较强的反向性特征(图 2(f)~(h))，CDD 和 CWD 整体由东南向西北减少，而 PRCPTOT 则表现为由西南向东北减小。各气象站点的 CDD 和 CWD 变化趋势空间变异较大，整体上以下降趋势为主，同时也存在部分站点出现上升趋势，而 PRCPTOT 则以上升趋势

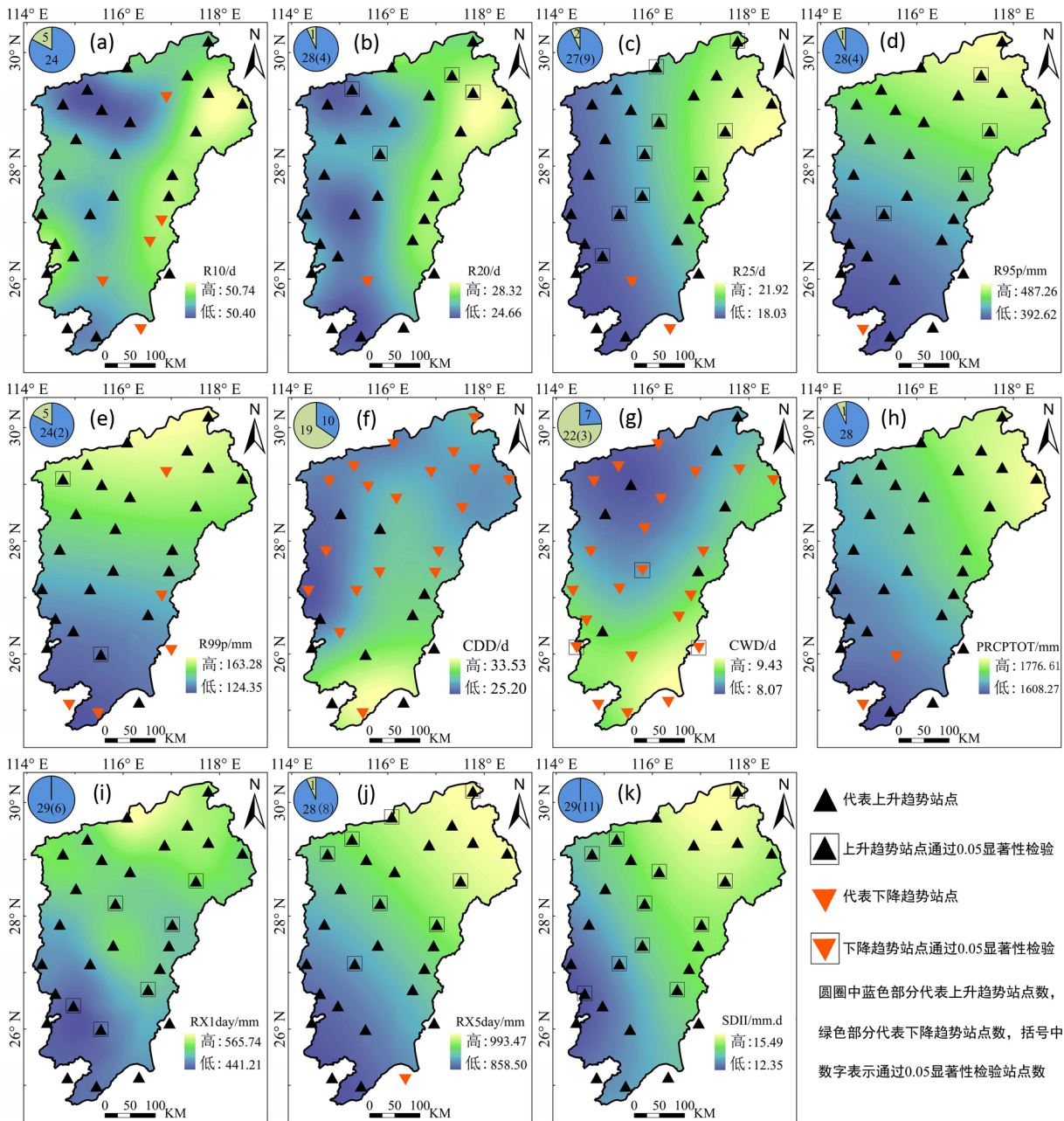


Figure 2. Spatial variation of extreme precipitation indices in the Poyang Lake basin

图 2. 鄱阳湖流域极端降水指数空间变化特征

为主。4) 强度指数: RX1day、RX5day 和 SDII 的分布具有很好的空间一致性(图 2(i)~(k)), 均表现为由东北向西南减小的特征。在研究时段内, 这三个指标在鄱阳湖流域内均呈增加趋势, 特别是 SDII 在西北—南东方向的大多数站点上增加趋势显著。

3.4. ENSO 事件对极端降水的影响分析

3.4.1. 极端降水指数与 ENSO 事件线性相关分析

表 3 为鄱阳湖流域各极端降水指数与 ENSO 相关指标的 Pearson 相关系数矩阵。整体而言, 11 个极端降水指数与 4 个 ENSO 相关指标构成的 44 组相关关系中, 有 40 组呈正相关, 4 组呈负相关。就各极端降水指数而言, 除持续干期(CDD)外, 其余指数与 ENSO 指标中 4 个海区(NINO 1 + 2 区、NINO 3 区、NINO 3.4 区和 NINO 4 区)海表温度异常均为正相关, 说明海温升高对鄱阳湖流域极端降水的增加具有重要影响。其中, NINO 1 + 2 区海表温度异常与各极端降水指标之间的相关性最为显著, 有 6 个指数(R20, R25, PRCPTOT, RX1day, RX5day, SDII)相关性通过 0.05 显著性检验, 1 个指数(R10)通过 0.01 显著性检验。这一结果表明, NINO 1 + 2 区内的海表温度异常偏高时, 鄱阳湖流域中雨日数、大雨日数、暴雨日数、年总降水量、1 日最大降水量、5 日最大降水量和降水强度等均呈现相对增加的趋势。

Table 3. Correlation coefficients between extreme precipitation indices and ENSO indices in the Poyang Lake basin
表 3. 鄱阳湖流域极端降水指数与 ENSO 指标相关性分析

极端降水指数		ENSO 指数			
		NINO 1 + 2 区	NINO 3 区	NINO 4 区	NINO 3.4 区
绝对指数	R10	0.37**	0.31*	0.14	0.25
	R20	0.33*	0.26	0.14	0.20
	R25	0.31*	0.24	0.14	0.19
相对指数	R95p	0.25	0.16	0.10	0.09
	R99p	0.17	0.13	0.15	0.10
持续指数	CDD	-0.02	-0.04	-0.07	-0.07
	CWD	0.09	0.04	0.03	0.03
	PRCPTOT	0.33*	0.26	0.13	0.19
强度指数	RX1day	0.32*	0.27*	0.21	0.20
	RX5day	0.28*	0.22	0.15	0.16
	SDII	0.28*	0.22	0.17	0.15

注: **表示通过 0.01 显著性检验; *表示通过 0.05 显著性检验。

3.4.2. 极端降水指数与 ENSO 事件非线性趋势相关性分析

由表 3 表可知, 年总降水量(PRCPTOT)与其余指标的相关系数总体高于其他指数, 因此可作为典型指标反映极端降水的年代际变化。

图 3 为不同海区 ENSO 指标与鄱阳湖流年总降水量的交叉小波谱和小波相干谱。图中小波相干系数越大, 表明两者相关性越高。由图可知, NINO 1 + 2 区海表温度距平指数与鄱阳湖流域年总降水量的相关性整体高于其他海区, 具体为: NINO 1 + 2 区 > NINO 3 区 > NINO 3.4 区 > NINO 4 区。从周期性角度来看, 4 个海区海表温度距平指数与流域年总降水量的交叉小波谱的高能量区均存在于 1969~1974 年间的 2~4 a 时间尺度上, 以及 1997~2003 年间的 4~6 a 时间尺度上, 相较而言年总降水量与 NINO 1 + 2 区和 NINO 3 区的共振周期强于 NINO

3.4 区和 NINO4 区。同时，二者小波相干谱均存在显著性区域，其中 NINO 1 + 2 区显著相关性出现在 1970~1976 年、1980~1985 年间的 3~6 a 时间尺度上及 1974~1984 年的 10~12 a 时间尺度上，小波相干系数高于 0.7，表现出较强的相关性；NINO 3 区、NINO 3.4 区以及 NINO 4 区显著相关性均出现 1970~1978 年间的 2~3 a 时间尺度上。

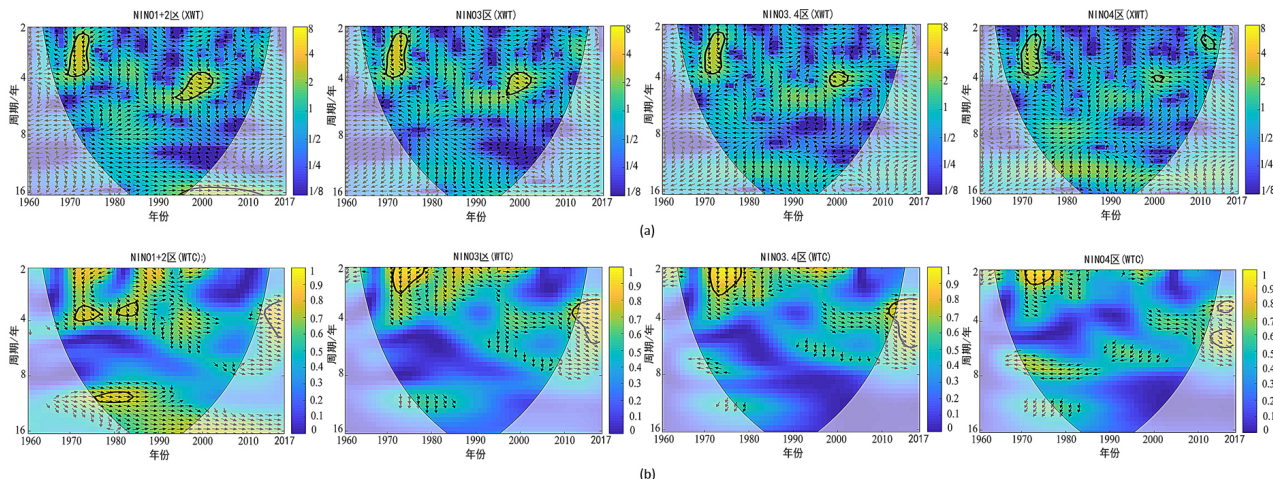


Figure 3. The time-frequency spectrum of XWT (a) and WTC (b) between annual precipitation in the Poyang Lake basin and the four ENSO indices

图 3. 不同海区海表温度距平指数与鄱阳湖流域年总降水量交叉小波谱(XWT) (a)和小波相干谱(WTC) (b)

年际变化中，流域年总降水量与 4 个海区的海温异常在 1970 年以前无直接相关性。在 2~3 a 的时间尺度上，1970~1978 年间流域年总降水量滞后 NINO 3 区、NINO 3.4 区和 NINO 4 区海温异常 90°，后期逐渐转正，但相关性减弱。进入 2000 年以后，这种相关性近乎消失。在 3~6 a 的时间尺度上，年总降水量与 NINO 1 + 2 区海温异常在 1970~2000 年间以同位相变化(正相关)为主，2000~2010 年间两者相关性消失。2010 年之后，年总降水量与 4 个海区的海温异常的相关性均显著增强，表明近年来鄱阳湖流域降水受赤道太平洋海温异常影响逐渐增加。

3.4.3. 暖、冷 ENSO 事件对鄱阳湖流域极端降水的影响

根据暖、冷 ENSO 事件发生峰值所在年份进行统计，可知研究时段(1960~2017 年)内暖 ENSO 事件发生年份共计 17 年；冷 ENSO 事件发生年份共计 11 年。

同样，选取流域极端降水代表性指数年总降水量(PRCPTOT)来分析暖冷 ENSO 事件对流域极端降水的影响 [24]。图 4 显示了暖、冷 ENSO 事件发生年份，流域年总降水量的空间差异性。由图可以看出，当 ENSO 处于暖事件时，除北部和南部较小范围外，鄱阳湖流域绝大多数区域年总降水量均表现为不同程度的增加。空间上，年总降水量的增加大体以中部为中心，向南北两侧减小，最大值约 15%。相较而言，已有研究表明，当 ENSO 处于暖事件年份时，秦岭 - 淮南北区域全年以降水偏少为主 [12]，而珠江流域上游极端降水量级均呈增加趋势，下游以及南部边缘极端降水量级减少 [24]。统计检验表明，就鄱阳湖流域内各具体气象站点而言，ENSO 暖事件时，流域年总降水量的增加幅度均不显著。

4. 结论及讨论

4.1. 结论

本文基于 1960~2017 年鄱阳湖流域 29 个气象站点逐日降水资料，系统分析了流域近 58 a 来极端降水时空变化特征及其与 ENSO 事件的相关性。研究结果表明，在全球变暖的气候变化大背景下，鄱阳湖流域自 1990s

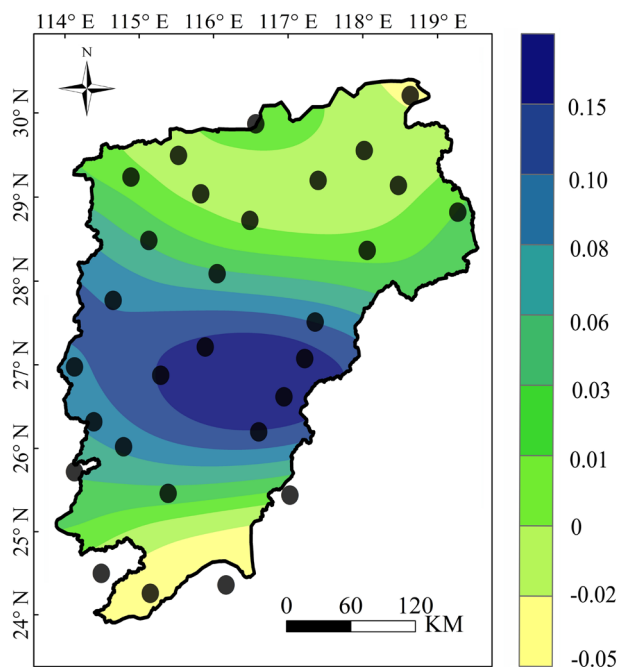


Figure 4. Impact of warm and cold ENSO events on annual precipitation in Poyang Lake basin

图 4. 暖、冷 ENSO 事件对鄱阳湖流域年总降水量的影响(图中黑色圆圈代表未通过 0.1 显著性检验的站点)

以来气温上升趋势显著,降水年代际波动特征明显。极端降水指标中,除持续干期(CDD)和持续湿期(CWD)外,其余指标在研究时段内均呈现上升趋势,且上升站点比重超过 85%。除中雨日数(R10)和持续干期(CDD)外,其余指标均在 1990 年前后发生突变。空间上,流域极端降水指数除持续干期(CDD)和持续湿期(CWD)外,其余极端降水指标总体上呈东北向西南减小态势;不同区域极端降水指标的年际变化趋势存在差异,但多数指标在流域中南部增加趋势相对突出。

作为极端降水的重要影响因素,ENSO 事件与鄱阳湖流域极端降水特征之间存在一定的相关性。其中 NINO 1+2 区海表温度异常与各极端降水指标之间的线性相关最为显著。流域极端降水与 4 个海区海温异常指数之间在 2~6 a 时间尺度上存在共振周期,2010 年之后,流域降水与赤道太平洋海温异常的正相关(同位相变化)关系明显增强。此外,当 ENSO 处于暖事件时,流域绝大多数区域年总降水量均表现为不同程度的增加。

4.2. 讨论

整体来说,在全球气候变暖的大背景下,鄱阳湖流域极端降水自 1990s 年代以来呈现出新的变化特征:流域降水出现明显的年代际波动以及主要极端降水指标呈上升趋势。受此影响,鄱阳湖流域的水文过程发生了明显变化,流域洪旱灾害交替发生,极端气候水文事件趋于增加。在未来全球变暖导致的区域气候持续变化影响下,这种态势是否会持续,对制定合理的流域灾害风险管理机制至关重要。从流域极端降水变化特征来看,今后研究中应注重对极端降水时频演变特征和规律的精细化研究。此外,深入了解流域洪涝灾害的复杂背景和产生机制十分重要。由于不同方法及模型对极端降水分析及预测的结果有所不同,如何提高评估预测的准确性仍是相关研究的重点。流域极端降水造成洪旱灾害的主要原因,而 ENSO 事件是极端降水的重要驱动因子。就不同海区的海水异常来看,NINO 1+2 区海表温度异常对鄱阳湖流域极端降水变化的影响最为显著,在今后气候变化的模拟预测中值得关注和进一步研究。

鄱阳湖流域是我国南方红壤区水土流失异常严重区,近年来在“山江湖”综合开发战略的影响下,生态恢

复工程取得了骄人成绩, 流域森林覆盖率上升, 植被覆盖度增加。流域植被的变化除了受人类活动影响之外, 气候变化的作用尤其突出。Qu 等研究表明, 在长江流域温度升高和降水增加对植被修复具有积极作用[25]。然而, 降水的极端化, 也可能对生态修复的可持续性产生潜在风险[26]。因此, 在鄱阳湖流域降水出现新的变化特征以及极端降水指标呈整体上升趋势的背景下, 积极开展流域植被变化对极端气候变化的响应, 探究气候变化对生态恢复的反馈机制, 对确保鄱阳湖流域乃至长江中下游地区的生态安全和可持续发展具有突出的现实意义。

基金项目

国家自然科学基金(42071028, 51822906), 以及中央高校基本科研业务费专项资金资助(XDJK2019B074)。

参考文献

- [1] PACHAURI, R., REISINGER, A. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Journal of Romance Studies*, 2014, 4(2): 85-88.
- [2] 尹占娥, 田鹏飞, 迟潇潇. 基于情景的 1951-2011 年中国极端降水风险评估[J]. *地理学报*, 2018, 73(3): 405-413.
YIN Zhan'e, TIAN Pengfei and CHI Xiaoxiao. Multi-scenario-based risk analysis of precipitation extremes in China during the past 60 years (1951-2011). *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 405-413. (in Chinese)
- [3] 张增信, Klaus F, 姜彤, 张金池. 2050 年前长江流域极端降水预估[J]. *气候变化研究进展*, 2007(6): 340-344.
ZHANG Zengxin, KLAUS F, JIANG Tong and ZHANG Jinchi. Projection of future precipitation extremes in the Yangtze River Basin for 2001-2050. *Climate Change Research*, 2007(6): 340-344. (in Chinese)
- [4] 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.
SHI Guangxun, LIU Jian, MA Li, *et al.* Spatial-temporal variations of extreme precipitation events in Yangtze River Basin during 1970-2014. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(4): 77-85. (in Chinese)
- [5] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50a 温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 2003, 58(s): 1-10.
ZHAI Panmai, PAN Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(s): 1-10. (in Chinese)
- [6] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 337-353.
REN Guoyu, FENG Guolin and YAN Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 337-353. (in Chinese)
- [7] 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.
MIN Shen, QIAN Yongfu. Regionality and persistence of extreme precipitation events in China. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 763-771. (in Chinese)
- [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.
WANG Zhifu, QIAN Yongfu. Frequency and intensity of extreme precipitation events in China. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 1-9. (in Chinese)
- [9] 李双双, 孔锋, 韩鹭, 等. 陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. *地理研究*, 2020, 39(1): 140-151.
LI Shuangshuang, KUN Feng, HAN Lu, *et al.* Spatiotemporal variability of extreme precipitation and influencing factors on the Loess Plateau in northern Shaanxi province. *Geographical Research*, 2020, 39(1): 140-151. (in Chinese)
- [10] YUAN, Z., YANG, Z. Y., YAN, D. H. and YIN, J. Historical changes and future projection of extreme precipitation in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 127(1-2): 393-407. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1643-3>
- [11] WANG, X. X., JIANG, D. B. and LANG, X. M. Extreme temperature and precipitation changes associated with four degree of global warming above preindustrial levels. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(4): 1822-1838. <https://doi.org/10.1002/joc.5918>
- [12] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960-2013 年秦岭-淮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 and LIU Xianfeng. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in north and south of the Qinling-Huaihe region and influencing factors during 1960-2013. *Progress in Geography*, 2015, 34(3): 354-363. (in Chinese)
- [13] ZHANG, Q., LI, J. F., SINGH, V. P., *et al.* Influence of ENSO on precipitation in the East River basin, south China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118: 1-13. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50279>
- [14] 符淙斌, 滕星林. 我国夏季的气候异常与埃尔尼诺/南方涛动现象的关系[J]. *大气科学*, 1988, 12(S1): 133-141.
FU Congbin, TENG Xinglin. The relationship between China climate anomalies in summer and ENSO phenomena. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 1988, 12(S1): 133-141. (in Chinese)

- [15] ZHANG, R. H., SUMI, A. and KIMOTO, M. Impact of El Nio on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser. II*, 1996, 74(1): 49-62. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.74.1_49
- [16] GONG, D. Y., WANG, S. W. Impacts of ENSO on rainfall of global land and China. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(9): 852-857. <https://doi.org/10.1007/BF02885036>
- [17] XIAO, M. Z., ZHANG, Q. and SINGH, V. P. Spatiotemporal variations of extreme precipitation regimes during 1961-2010 and possible teleconnections with climate indices across China. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(1): 468-479. <https://doi.org/10.1002/joc.4719>
- [18] 郭华, 张奇, 王艳君. 鄱阳湖流域水文变化特征成因及旱涝规律[J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 699-709.
GUO Hua, ZHANG Qi and WANG Yanjun. Annual variations in climatic and hydrological processes and related flood and drought occurrences in the Poyang Lake basin. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 699-709. (in Chinese)
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
WEI Fengying. *Modern climate statistical diagnosis and prediction technology*. Beijing: Meteorological Press, 2007. (in Chinese)
- [20] SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63: 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- [21] GRINSTED, A., MOORE, J. C. and JEVERJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11(40): 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- [22] ZHANG, Q., XU, C. Y., JINAG, T. and WU, Y. J. Possible influence of ENSO on annual maximum streamflow of the Yangtze River, China. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2-4): 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.08.010>
- [23] 闵岫, 刘健. 鄱阳湖区域极端降水异常的特征及成因[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(3): 435-444.
MIN Shen, LIU Jian. Characteristics and causes of the extreme precipitation anomaly in Lake Poyang area. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(3): 435-444. (in Chinese)
- [24] 郑江禹, 张强, 史培军, 等. 珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究[J]. *地理科学*, 2017, 37(2): 283-291.
ZHENG Jiangyu, ZHANG Qiang, SHI Peijun, *et al.* Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation regimes and related driving factors in the Pearl River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(2): 283-291. (in Chinese)
- [25] QU, S., WANG, L. C., LIN, A. W., *et al.* What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: Climate change or anthropogenic factors? *Ecological Indicators*, 2018, 90: 438-450. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.029>
- [26] 江珊珊, 张增信, 王玮琳, 等. 江苏省植被动态演变规律及其与极端气候事件的关系[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(5): 74-80.
JIANG Shanshan, ZHANG Zengxin, WANG Weilin, *et al.* Dynamic variation rules of vegetation cover in Jiangsu Province and its response to climate change. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2016, 40(5): 74-80. (in Chinese)