

# 鄱阳湖流域 1960~2018 年极端气温变化 及其与大气环流的关系

尚丽君 廖花妹 涂浙 钟科元 孟丽红 杜超<sup>1</sup>

(赣南师范大学 地理与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

**【摘要】:** 为进一步揭示鄱阳湖流域极端气温事件变化及其影响因素, 基于鄱阳湖流域 24 个气象站点连续 59 年观测资料, 选取 8 个极端气温指数, 分析鄱阳湖流域极端气温动态变化, 并探讨了大气环流与极端气温变化的联系。结果表明: (1) 鄱阳湖流域极端气温暖指数(暖昼天数、暖夜天数和夏日天数)及极值指数(日最低气温最小值和日最高气温最大值)均呈增加趋势;冷指数(冷昼天数、冷夜天数和霜冻天数)均呈逐渐减少趋势。(2) 从空间分布来看, 极端气温空间变化趋势与年际变化一致, 极端气温暖指数和极值指数呈增加趋势, 冷指数均呈减少趋势, 但在不同地区变化趋势存在差异。流域各站点霜冻天数和冷昼天数均呈显著下降趋势, 但在赣北地区下降趋势最显著。大部分站点(23/24)暖夜天数、夏日天数和日最低气温最小值均呈显著增加趋势;(3) 鄱阳湖流域极端气温指数的变化与大气环流的变化存在相关性, 其中西太平洋副高强度指数、夏季东亚季风指数、亚洲区极涡强度指数和北极涛动指数对极端气温事件影响显著。研究结果可为极端气候风险评估、灾害预警提供参考。

**【关键词】:** 气候变化 极端气候事件 影响因素 相关分析

**【中图分类号】:** P423 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)01-0160-12

气候变化改变了区域水热循环, 导致极端气候事件频发, 进而引起一系列的生态环境问题。分析极端气候变化及其影响因素, 可为极端气候风险评估、灾害预警和流域水土资源管理提供重要科学依据<sup>[1]</sup>。

目前, 以气候变暖为主要特征的气候变化已经成为各国政府、社会和科学界共同关注的全球性问题<sup>[2]</sup>。Alexander 等<sup>[3]</sup>研究表明, 近半个世纪以来, 全球范围内, 温度极差不断减少。美国东北部<sup>[4]</sup>极端最低温度和最高温度均呈上升趋势。在欧洲和地中海地区<sup>[5]</sup>, 冷日、冷夜数均呈减少趋势, 而暖日、暖夜数均呈增加趋势, 在非洲<sup>[6]</sup>、东南亚和南太平洋<sup>[7]</sup>地区也发现相似的变化趋势。国内一些学者就中国极端气候变化进行了深入研究。如翟盘茂等<sup>[8]</sup>研究指出, 1951~1999 年中国北方暖夜天数明显增加, 冷夜天数明显减少。汪宝龙等<sup>[9]</sup>统计了 1960~2009 年中国西北地区的气温变化, 发现极端高温天数增多、极端低温天数减少是导致该区域气温显著上升的主要原因。吴国雄等<sup>[10]</sup>分析了青藏高原地区极端气候事件, 发现大部分地区极端低温事件呈下降趋势, 极端高温事件呈上升趋势。综合国内外相关研究可以看出, 关于极端气温变化大部分学者已初步形成共识: 与低温有关的指数, 如冷昼天数、冷夜天数和霜冻天数呈降低趋势, 与高温有关指数如暖昼天数、暖夜天数和无霜日天数呈增加趋势, 并且在不同地形区域下具有一定的差异, 需要具体分析。

一些学者进一步分析了极端气候事件的影响因素。He 等<sup>[11]</sup>发现北极涛动与下一年东亚地区 1 月份极端暖事件发生频率呈显

**作者简介:** 尚丽君(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为气候变化与流域水文过程模拟. E-mail: SLJgeography@163.com

钟科元 E-mail: zkygeo@163.com

**基金项目:** 江西省教育厅课题(GJJ180784); 国家自然科学基金项目(41601600; 41907331)

著正相关,并与极端低温事件呈显著负相关。Sun等<sup>[12]</sup>研究指出,亚洲太平洋地区西风带位置和强度受到西太平洋副高位置的影响,同时也影响到东亚季风的强度,进而影响中国北方地区的气温。卫捷等<sup>[13]</sup>研究副热带高压位置异常与中国北部地区夏季气温之间关系,发现两者具有很高的正相关性。此外,一些学者还分析了其他大气环流(如太平洋/北美指数和北大西洋涛动)对极端气候事件的影响<sup>[14]</sup>。由于海陆位置的特殊性,中国同时受到东亚季风、副热带高压和热带气旋等多种大气海洋系统的综合影响,大气海洋环流模式与极端气候事件之间的关系更加复杂<sup>[10,15]</sup>。如许国宇<sup>[16]</sup>研究发现北京冬季极端低温事件频次与北极涛动指数存在显著负相关。闵岫等<sup>[17]</sup>研究发现西太平洋副高强度指数与鄱阳湖流域极端降水事件存在显著相关性。但是这些研究主要集中于分析单个或两个大气环流年际变化对极端气候事件的影响,系统性的分析极端气候事件与大气环流的联系研究较少。

鄱阳湖是长江流域调蓄洪水的重要湖泊,同时也是我国第一大淡水湖,候鸟迁徙地,鄱阳湖流域是我国重要的粮食生产地。气候变化对流域粮食生产、生态环境保护具有重要的影响。1996年以后鄱阳湖流域升温趋势显著,在1996~1997、2007和2009年分别出现严重干旱、特大干旱,导致农作物大幅度减产,农业生产损失严重<sup>[18]</sup>。当前鄱阳湖极端气候事件的研究较少,流域极端气候变化的影响因素有待进一步分析。

本文基于鄱阳湖流域24个国家级气象站1960~2018年逐日最高气温、最低气温和大气环流数据,分析鄱阳湖流域的极端气温事件长时间变化趋势及其与大气环流的关系,以期为该地区防灾减灾提供科学建议,对提高我国适应气候变化的能力、促进国家经济社会发展有重要的理论意见和现实意义。

## 1 研究区概况、数据来源与方法

### 1.1 研究区概况

鄱阳湖流域位于长江中下游南岸(图1),介于 $24^{\circ}29'14''N\sim 30^{\circ}04'41''N$ , $113^{\circ}34'36''E\sim 118^{\circ}28'58''E$ 之间<sup>[19]</sup>,流域总面积为 $1.62\times 10^5\text{km}^2$ ,其中有96.6%的流域面积位于江西省内。鄱阳湖流域由赣江、信江、抚河、饶河和修水五大河流构成,成为长江水系的重要组成部分,流域内气候温暖湿润,雨量丰沛,属于亚热带湿润气候,年降水量在111.6~2149.6mm之间,平均气温在 $17^{\circ}\text{C}\sim 19.1^{\circ}\text{C}$ 之间<sup>[20]</sup>。



图 1 研究区概况与气象站点分布图

### 1.2 数据来源

本文气象数据来自中国气象局气象信息中心资料室整理的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”(<http://cdc.cma.gov.cn>)。由于各站点观测资料起始时间和缺测情况的不同,本文选取了观测数据相对完整的1960~2018年的气象数据,包括:逐日最高气温、最低气温。

为了保证监测数据的有效性和科学性,本文对数据质量进行了控制。首先,站点观测数据不得少于59年;其次,当某站点单项数据连续缺测天数>30d,或累计数据缺失 $\geq 10\%$ 时,则该站点将被剔除;再次,当单个站点出现若干数据缺失时,用附近2个或者2个以上站点的相对应数据的平均值进行填补,以得到完整的气象数据序列。

本文所使用的大气环流数据来自于中国国家气候中心气候系统诊断室(<http://ncc.cma.gov.cn>)和美国国家海洋和大气局(NOAA)(<http://www.esrl.noaa.gov/>)。此外,夏季东亚季风指数和北极涛动指数来自李建平个人主页(<http://ljp.gcess.cn/dct/page/65577>)。西太平洋副高强度指数和亚洲区极涡强度指数时间范围是1960~2014年逐月尺度,其余各指数时间范围均是1960~2018年逐月尺度。由于大气环流指数众多,查阅已有的研究<sup>[11,17,21]</sup>,并根据综合指数、更近、原始动力原则,选取与研究区气温密切相关的4种大气环流指数,用于分析极端气候指数与大气环流的关系。这些大气环流指数分别是西太平洋副高强度指数和夏季东亚季风指数、亚洲区极涡强度指数和北极涛动指数(Arctic Oscillation index, AO)。数据来源单位对数据质量进行了严格的控制,被广泛应用于科技工作中,这些数据的详细信息可查看相应的数据提供单位官方网站和对应的文献<sup>[11,17,21]</sup>。

### 1.3 研究方法

本文选取8个极端气温指数量化极端气温事件<sup>[22]</sup>。即:(1)极端暖指数:暖昼天数(TX90P)、暖夜天数(TN90P)和夏日天数(SU);(2)极端冷指数:冷昼天数(TX10P)、冷夜天数(TN10P)和霜冻天数(FD);(3)极值指数:日最高气温的最大值(TX<sub>x</sub>)和日最低气温的最小值(TN<sub>n</sub>)。

表 1 极端气温指数

指数分类	指数	缩写	定义	单位
暖指数	暖昼天数	TX90P	每年日最高气温大于1960~2018年第90个百分位值的天数	d
	暖夜天数	TN90P	每年日最低气温大于1960~2018年第90个百分位值的天数	d
	夏日天数	SU	每年日最高气温大于25℃的天数	d
冷指数	冷昼天数	TX10P	每年日最高气温小于1960~2018年第10个百分位值的天数	d
	冷夜天数	TN10P	每年日最低气温小于1960~2018年第10个百分位值的天数	d
	霜冻天数	FD	每年年内日最低气温小于0℃的天数	d
极值指数	日最低气温的最小值	TN <sub>n</sub>	每年日最低气温的最小值	℃
	日最高气温的最大值	TX <sub>x</sub>	每年日最高气温的最大值	℃

反距离权重插值法是以插值点与样本点之间的距离为权重的插值方法,它以插值点与样本点之间的距离为权重进行加权平均,插值点越近的样本点赋予的权重越大<sup>[23]</sup>。本研究采用 ArcGIS10.0 中的地统计模块的反距离权重插值方法(IDW),将极端气温的倾向率进行空间差值,分析极端气候空间变化趋势。

采用 Mann-Kendall 趋势分析法分析气温的时间变化趋势。由于 Mann-Kendall 检验法有无需假定数据特殊分布的特点,是世界气象组织推荐处理非参数检验问题的方法,广泛适用于分析降雨、径流和蒸发等要素时间序列的变化情况<sup>[24]</sup>。Mann-Kendall 检验法通过趋势系数  $Z$  值判断该序列数据的变化趋势。当  $Z>0$  时表示呈上升趋势, $Z<0$  表示呈下降趋势, $Z$  的绝对值越大,说明该序列的变化趋势越显著。 $|Z|>1.96$  说明通过 0.05 显著性检验; $|Z|>2.58$  说明通过 0.01 显著性检验; $|Z|>3.30$  说明通过 0.001 显著性检验。

采用 Sen's 估计法分析序列数据的变化率,通过计算拟合直线的斜率  $\alpha$  判断序列数据变化趋势,斜率  $\alpha$  值的正负表示拟合直线的变化趋势<sup>[25]</sup>。当  $\alpha>0$  时,呈上升变化趋势;当  $\alpha=0$  时,变化趋势不明显;当  $\alpha<0$  时,呈下降变化趋势。Sen's 估计法和 Mann-Kendall 秩次相关法均不需要样本数据遵从特定的分布,且对两方法判断结果受序列异常值影响均较低。因此,本文采用 Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法相结合的方法对鄱阳湖流域极端气温变化进行分析。

## 2 结果分析

### 2.1 鄱阳湖流域极端气温动态变化

#### 2.1.1 极端气温年际变化趋势

鄱阳湖流域 1960~2018 年极端气温暖指数、极值指数均呈增加趋势,冷指数均呈减少趋势(图 2)。暖指数和极值指数的变化大致可分为 3 个阶段:第一阶段是 1960~1976 年,该阶段极端气温暖指数和极值指数呈波动下降趋势;第二阶段是 1977~2003 年,该阶段暖昼天数(TX90P)、暖夜天数(TN90P)、夏日天数(SU)和日最高气温最大值(TXx)呈不显著的波动变化,日最低气温最小值(TNn)在 1976 年后呈逐渐增加趋势,并在 1991 年出现突变最低值(-9.28℃);第三阶段是 2004~2018 年,暖指数和极值指数呈波动增加趋势。

冷指数中冷夜天数和霜冻天数 1960~1990 年呈逐渐下降趋势,1990~2018 年呈波动下降趋势;冷昼天数与其他指数变化存在差异,1960~2018 年间存在 3 个抛物线峰值变化,分别是:1960~1978 年,1979~2002 年和 2003~2018 年 3 个波动变化区间,总体上呈下降趋势( $Z=-1.43$ )。

从总体变化趋势来看,暖指数中,暖夜天数(TN90P)增加趋势最显著( $Z=3.49, P<0.001$ ),其次是夏日天数(SU)( $Z=2.73, P<0.01$ ),而暖昼天数变化趋势不显著( $Z=1.31$ )。冷指数 TX10P、TN10P 和 FD 均呈下降趋势,对应的变化趋势为 1.18d/10a、3.59d/10a 和 2.64d/10a。FD 下降趋势最显著( $Z=-4.13$ ),其次是 TN10P( $Z=-3.90$ ),两者均通过 0.001 显著性检验, TX10P 呈不显著下降趋势;极值指数 TXx 和 TNn 均呈增加趋势,其中 TNn 增加趋势显著( $Z=3.09, P<0.01$ )。

从表征极端气温变化的 8 个指数变化趋势可以得出,鄱阳湖流域与低温相关的极端气候事件明显减少,与高温有关的指数呈增加趋势,鄱阳湖流域近 59 年来气候呈现显著的变暖趋势。

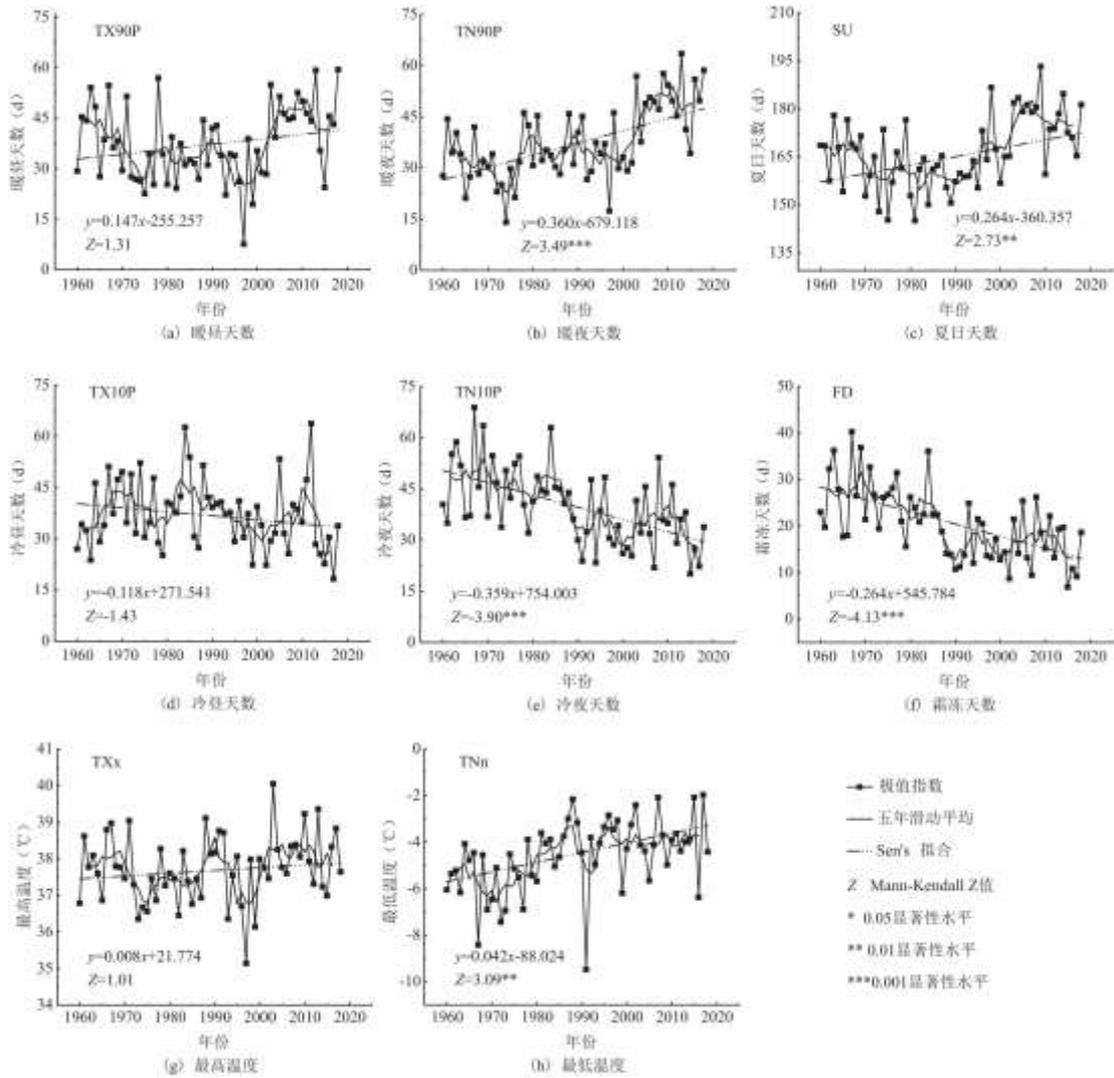


图 2 鄱阳湖流域 1960~2018 年极端气温指数的年际变化

### 3. 1. 2 极端气温指数空间变化趋势

从空间分布来看, 极端气温的空间变化趋势与年际变化一致, 极端气温暖指数和极值指数均呈增加趋势, 冷指数呈下降趋势, 但在不同地区变化趋势存在差异(图 3)。大部分站点 TN90P 和 SU 均呈显著增加趋势。冷指数 TX10P、TN10P 和 FD 均呈下降趋势, 其中 FD 和 TN10P 在所有站点都呈显著下降趋势, 两指数在赣北鄱阳湖周边区域下降趋势最显著 ( $Z < -6.0$ ), 极值指数 (TXx 和 TNn) 在流域内均呈增加趋势, TNn 在赣北地区增加趋势最显著。

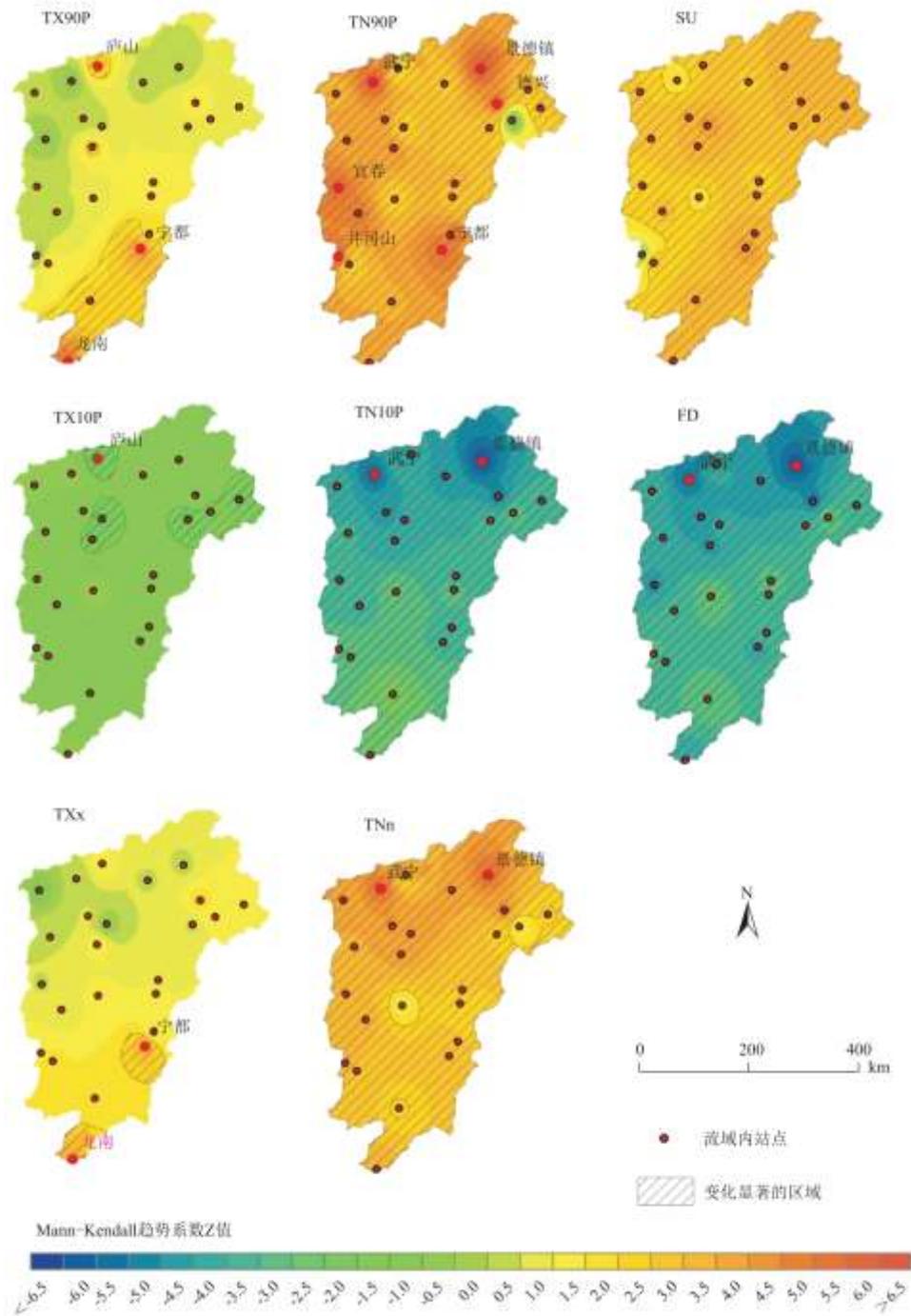


图3 鄱阳湖流域 1960~2018 年极端气温指数空间变化趋势

从具体指数来看, 暖昼天数(TX90P)自北向南增加趋势越显著, 在赣南地区通过 0.001 的显著性检验, 如宁都( $Z=4.03$ )和龙南( $Z=4.50$ )。此外, 个别站点具有特殊性, 以庐山站为例, TX90P( $Z=2.79, P<0.01$ )暖昼天数呈显著增加趋势, 高于周边站点, 这可能与庐山站的地理位置有关(海拔 1164.5m)。

暖夜天数(TN90P)的空间变化趋势不如 TX90P 的规律性明显, 呈现多个站点为中心显著增加趋势, 如武宁、景德镇、井冈山和宁都等站点。这些站点暖夜天数变化趋势依次为: 井冈山( $Z=6.26$ )>景德镇( $Z=6.06$ )>武宁( $Z=5.94$ )>德兴( $Z=5.42$ )>宜春

( $Z=5.36$ ) > 宁都 ( $Z=5.16$ )。

冷指数中 TN10P 和 FD 自南向北减少趋势越显著, 其中武宁和景德镇两个站点的减少趋势最显著 ( $P<0.001$ )。此外, 最低气温最小值 (TNn) 的增加趋势与 TN10P 和 FD 的变化趋势具有相似性 (北部若干个站点呈极显著增加趋势)。

综合, 极端气温指数空间变化趋势可以看出, 极端气温暖指数和极值指数呈增加趋势, 冷指数呈下降趋势, 但在不同地区变化趋势存在差异。这种差异可能与下垫面和局地大气环流等因素有关。

## 2.2 鄱阳湖流域极端气温变化与大气环流变化的联系

极端气温事件的发生和变化受多种因素的影响, 如大气环流因子、区域环境因子、城市化和空气中气溶胶变化等。大气环流是影响气候变化的一个主要因素。表 2 统计了极端气温指数与主要大气环流的相关性, 可以看出, 西太平洋副高强度指数与极端气温暖指数 (TX90P、TN90P 和 SU) 和极值指数 (TXx 和 TNn) 均呈正相关, 与极端气温冷指数 (TX10P、TN10P 和 FD) 呈负相关。表明随着西太平洋副高强度指数的增加, 极端气温暖指数将呈增加趋势, 冷指数将呈现减少趋势。卫捷等<sup>[13]</sup>也发现了中国华北地区夏季气温与副热带高压位置呈很高的正相关。Sun 等<sup>[26]</sup>发现极端气温暖指数 (SU 和 TX90) 与副热带高压呈正相关, 冷指数 (TX10、TN10 和 FD) 与副热带高压呈负相关。Zhong 等<sup>[27]</sup>也在松花江流域发现类似的规律。Gong 等<sup>[28]</sup>研究发现, 夏季平均气温上升一个标准差的情况下, 位于中国南部和西部的邻近地区与蒙古周围的两个中心的 500 百帕位势高度异常高, 尤其是南部中心, 平均温度和极端温度发生巨大变化。500 百帕和 850 百帕高度风在南部中心及附近都显示出反气旋模式, 这一异常中心与西太平洋副热带高压密切相关。西太平洋副热带高压控制着西太平洋和中低纬度东亚对流层的中低层环流, 当副热带高压扩大、加强并向西南移动时, 将会出现明显的 500 百帕高度异常, 伴随着对流层中下部较强的下沉和发散运动, 导致极端高温事件发生<sup>[29]</sup>。前期海面副高减弱会导致热带西太平洋表面西风异常<sup>[30]</sup>, 进而导致东南季风变化, 西太平洋副高位置的异常对亚洲太平洋地区西风带位置和强度有很大影响, 从而导致东亚季风强度的变化<sup>[12]</sup>, 进而影响鄱阳湖流域的气温。因此副热带高压经向位置的波动影响西风带波动, 导致东亚季风的变化, 进而影响鄱阳湖流域的气温的变化。

表 2 极端温度指数变化趋势与大气环流指数的相关性

大气环流指数	暖指数			冷指数			极值指数	
	TX90P	TN90P	SU	TX10P	TN10P	FD	TXx	TNn
西太平洋副高强度指数	+0.166	+0.416**	+0.205	-0.214	-0.345**	-0.361**	+0.273*	+0.303*
夏季东亚季风	-0.006	-0.172	+0.002	+0.093	+0.046	+0.139	-0.345**	-0.333**
亚洲区极涡强度指数	-0.246	-0.526***	-0.197	-0.303*	+0.207	+0.282*	-0.192	-0.235
北极涛动	-0.070	+0.166	-0.053	-0.169	-0.419**	-0.483***	-0.005	+0.271*

极涡是位于对流层中、上层, 中心在极区的大尺度气旋性冷性环流系统, 它的变化反映了各种不同性质的气团的输送方向, 特别是极地寒冷气团的流向, 对东亚及中国气候变异有重大影响<sup>[31]</sup>。鄱阳湖流域亚洲区极涡强度指数与暖指数和极值指数呈负相关, 与冷指数 (TN10P 和 FD) 呈正相关, 其中与暖夜天数 (TN90P) 相关性达到了 0.001 显著性检验 (表 2)。蒋淑芳等<sup>[32]</sup>发现中国气温与冬季北半球极涡面积指数之间存在负相关。在极端气候事件上, 张婧雯等<sup>[33]</sup>研究发现中国冬季冷昼和冷夜天数与极涡面积呈正相关, 暖昼和暖夜天数与极涡面积呈负相关。Zhong 等<sup>[27]</sup>发现松花江流域极端气温冷指数 (TX10P、TN10P 和 FD) 与北半球极涡面积和强度指数呈正相关, 暖指数 (TX90P、TN90P 和 SU) 和极值指数 (TXx 和 TNn) 与北半球极涡面积和强度指数呈负相关。极涡面积扩大时,

则使得北方和东部沿海大部分地区冷夜次数增加;当北半球极涡面积收缩时,中国大部分地区的冬季气温都会随之变高<sup>[34]</sup>。李红斌等<sup>[35]</sup>对中国东北地区夏季逐日气温和大气环流因子资料进行分析也发现,极涡面积和强度指数与东北夏季气温呈负相关关系,这与本文结论一致。极涡强、弱直接反映了极地和中高纬度地区气压的南北振荡变化特征,极涡强时,极地地区气压较常年偏低,中高纬度地区气压较常年偏高;反之则相反<sup>[36]</sup>。顾思南等<sup>[34]</sup>认为北半球绕极涡的局地变异与我国气温异常场的关系主要和西风带主要槽、脊变异有关系,其中与东亚大槽关系最为密切。东亚大槽加深时,极区的冷空气容易沿着槽线深入我国境内造成降温,而东亚大槽变浅时极区的冷空气不易深入我国境内,因此我国气温相对较高。

北极涛动(AO)反映了极地内的位势与中纬度地区的位势差异,呈跷跷板的此起彼伏状态的一种纬向循环<sup>[37]</sup>。鄱阳湖流域北极涛动与冷指数中TN10P和FD、极值指数TNn呈现显著相关性( $P < 0.05$ ),而与其他指数相关性不显著(表3)。许国宇等<sup>[16]</sup>也发现北京冬季极端低温事件的频次与AO存在显著负相关。Zhong等<sup>[27]</sup>认为由于AO指数在冬季较强盛,夏季较弱,因此AO指数与主要发生在冬半年的极端气温指数(TN10P、TX10P、FD和TNn)存在显著相关性,与主要发生在夏半年的极端气温指数(TN90P、TX90P、SU和TXx)相关性不显著。施宁等<sup>[38]</sup>指出平流层正相AO事件的增强,更易使贝加尔湖地区对流层显著正位势高度异常,将有利于东亚地区向南、向下异常风场的出现,此时,西伯利亚高压向南扩展,进而使我国南方地区受到北方冷空气影响。AO的正相位相关增强时,中高纬度较强的西风气流将温暖的海洋空气输送到中高纬度大陆,使得欧亚大陆变暖。此外,AO增强,次年一月东亚上空南风明显异常,异常的东南风与该地区的西北风相反,因此冷空气平流减少,从而导致温度升高,极端低温事件减少<sup>[11]</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 极端气温变化的地区差异

本文利用鄱阳湖流域24个气象站逐日气温监测资料,分析了鄱阳湖流域极端气候变化及其影响因素,结果表明:流域内极端气温暖指数(TX90P、TN90P和SU)和极值指数(TXx和TNn)呈上升趋势变化,极端气温冷指数(TX10P、TN10P和FD)呈现下降趋势,这与松花江流域<sup>[27]</sup>、西北干旱区<sup>[40]</sup>、长江流域<sup>[42]</sup>、四川盆地<sup>[43]</sup>、青藏高原<sup>[44]</sup>以及中国沿海<sup>[45]</sup>地区对极端气温事件研究的结论趋于一致。

由于地形地貌、气候水文特征的差异,不同地区的极端气候事件变化趋势也表现出不同(表3)。如柏会子等<sup>[39]</sup>对华北地区进行研究发现,极端气温整体上呈上升趋势,但夜间的升温趋势大于白昼。高文华等<sup>[41]</sup>研究河南省1960~2014年极端气温变化特征发现,20世纪90年代后气温变化进入加速阶段。徐丽娇等<sup>[44]</sup>指出青藏高原地区极端高温事件主要分布在西藏东南部、青海西北部地区,极端低温事件主要分布在西藏中部、青海中西部地区。本研究发现,鄱阳湖流域霜冻天数减少趋势最显著( $Z = -4.13$ )通过了0.001显著性检验,这与松花江( $Z = -4.25, P < 0.001$ )、青藏高原( $P < 0.001$ )、长江流域( $P < 0.01$ )和中国沿海( $P < 0.05$ )变化趋势一致;鄱阳湖流域霜冻天数减少幅度高于长江流域和中国沿海,低于松花江和青藏高原。鄱阳湖流域夏日天数的增加幅度为2.64/10a,高于华北地区(0.04d/10a)、河南省(1.83d/10a)、长江流域(2.16d/10a)和中国沿海(2.4d/10a)。最高气温最大值(TXx)与四川盆地、中国沿海等研究结果相似,均表现为不显著增加;最低气温最小值(TNn)增温速率为0.42°C/10a( $P < 0.01$ ),与河南省(0.41°C/10a)和长江流域(0.42°C/10a)增加趋势相近,低于松花江流域(0.7°C/10a, $P < 0.001$ )和西北地区(0.58°C/10a),高于四川盆地(0.3°C/10a)和青藏高原(0.36°C/10a)。鄱阳湖流域极端气温指数与其他地区存在差异,可能与地形地貌、局地气候环流有关。

表3 中国不同地区极端气温变化差异

研究区与时间	作者	极端气温指数选取	极端气温指数变化趋势
松花江流域 (1960-2014)	Zhong 等 <sup>[27]</sup>	暖指数:TX90P、TN90P、SU 冷指数:TX10P、 TN10P、FD 极值指数:TXx、TNn	极端气温暖指数(TX90P、TN90P和SU)呈增加趋势,极端气温冷指数(TX10P、TN10P和FD)均减少趋势。FD、

			TNn 下降趋势最为显著
华北地区 (1965-2014)	柏会子 等 <sup>[39]</sup>	高温指数:SU35、TX90P、TN90P、WSDI 低温指数:FD0、TX10P、TN10P、CSDI	研究区内表征极端高温事件的指数均呈上升趋势,而表征极端低温事件的指数均呈下降趋势,白昼的升温趋势小于夜间
西北地区 (1961-2014)	商沙沙 等 <sup>[40]</sup>	日最高气温、日最低气温、平均气温	平均气温呈波动上升趋势,其中冬季的增温速率最大,极端低温和极端高温均呈上升变化趋势
河南省 (1960-2014)	高文华 等 <sup>[41]</sup>	相对指数:TX90、TN90、TX10、TN10 绝对指数:ID0、FD0、SU25、TR20 极值指数:TXx、TXn、TNx、TNn 其他指数:WSDI、CSDI、GSL、DIR	气温总体表现为上升趋势,极端低温事件主要发生在黄淮海平原区、南阳盆地以及桐柏山-大别山丘陵区;而极端高温事件主要发生在豫西山地丘陵
长江流域 (1960-2012)	Guan <sup>[42]</sup>	绝对指数:ID、FD、SU、TR 相对指数:TX90、TN90、TX10、TN10 极值指数:TXx、TXn、TNx、TNn	流域内冷指数呈下降趋势,暖指数呈上升趋势,最低气温最小值的上升幅度(0.42℃/10a)明显大于最高气温最大值(0.14℃/10a)
四川盆地 (1971-2014)	孙晨等 <sup>[43]</sup>	暖指数:SU、TX90P、TN90P 冷指数:FD、TX10P、TN10P 极值指数:TXx、TXn、TNx、TNn	四川盆地绝大部分区域极端气温指数变化趋势一致,但变化程度不同。东部盆地地区的极端气温暖指数上升趋势大于西部高原地区,极端气温冷指数正好相反
青藏高原 (1961-2010)	徐丽娇 等 <sup>[44]</sup>	极端高温、极端低温、年均气温	青藏高原主体正在变暖,夜间最低温度升温明显,中部地区升温速率高于东部,平均温度和最高温度分别在1994和1997年发生突变
中国沿海 (1961-2014)	王晓利 等 <sup>[45]</sup>	相对指数:TX90P、TN90P、TX10P、TN10P 绝对指数:FD、ID、SU、TR 极值指数:TXx、TNx、TXn、TNn 其他指数:GSL、WSDI、CSDI、DTR	中国沿海各区域,暖指数呈上升趋势,冷指数和气温日较差呈下降趋势,SU、TN90P、极值指数具有从北向南递增趋势,FD、ID、气温日较差多年均值从北向南递减

### 3.2 流域极端气温的变化对海拔、经度和纬度的响应

由于不同地区极端气温变化趋势存在差异,通过统计极端气温变化趋势与纬度、经度和海拔的相关性,可以判断极端气温变化趋势对不同纬度、经度和海拔的响应。

纬度决定着地球表面的热量分布,影响着地表能量分布特征,并影响着气候变化的趋势。IPCC 第三次评估报告指出,北半球高纬度地区,特别是极地地区变暖趋势更明显<sup>[46]</sup>。鄱阳湖流域 TN10P 和 FD 自南向北减少趋势越显著, TNn 越往北增加趋势越显著(图 3)。从表 3 也可以看出, TN10P 和 FD 与纬度呈现显著负相关,其中 TN10P 与纬度呈极显著相关( $R=-0.695, P<0.001$ ),说明随着纬度的增加,冷夜天数和霜冻天数减少速率越快。这与 Zhong 等<sup>[27]</sup>和王晓利等<sup>[45]</sup>相关研究结论相似。此外, TX90P 和 TXx 与纬度变化呈现显著负相关,即越往北暖昼天数和最高温最大值呈显著减少趋势,这与 Zhong 等<sup>[27]</sup>和王晓利等<sup>[45]</sup>研究结论相反,这可能与鄱阳湖流域自南向北,三面环山,从丘陵到平原逐渐降低的地形有关。

表 4 鄱阳湖流域 1960~2018 年极端温度指数变化趋势与经纬度、海拔的相关性

指数	极端气温指数	纬度	经度	海拔
----	--------	----	----	----

暖指数	TX90P	-0.548**	+0.087	+0.129
	TN90P	-0.085	-0.284	+0.003
	SU	-0.004	+0.377	-0.455*
冷指数	TX10P	-0.243	-0.389	-0.266
	TN10P	-0.695***	-0.247	+0.177
	FD	-0.424*	-0.054	+0.214
极值指数	TXx	-0.640***	+0.012	+0.218
	TNn	+0.258	-0.190	-0.199

经度位置反映了从沿海到内陆水热的变化,从而对区域气候变化具有一定的影响。Brown 等<sup>[47]</sup>对美国东北部研究发现沿海地区比内陆地区气温变化更显著。表 3 计算结果表明,经度与所有极端气温指数的变化趋势均不存在显著相关性,这可能与鄱阳湖流域“三高一低”东、南、西高,北低的封闭地形有关,东部有武夷山阻挡了来自东部的暖湿气流,暖湿空气不易进入流域内部;西部罗霄山阻挡了与西部气流的交换,从而导致极端气温经向变化趋势不显著。

海拔高度通过影响垂直方向的水热分布,进而影响气候空间变化。一些研究结果表明,气温变暖趋势随海拔高度的上升越显著。Li 等<sup>[48]</sup>对中国西南地区研究表明,高海拔地区比低海拔地区变暖趋势更加显著。类似的在阿尔卑斯山、落基山也得出类似的结论<sup>[49,50]</sup>。本文研究发现鄱阳湖流域部分站点变暖趋势高于周边地区的情况,如庐山站(海拔 1164.5m)的 TX90P ( $Z=2.79, P<0.01$ )和 TXx ( $Z=1.45$ )。通过相关性分析发现除 SU 与海拔存在相关性外 ( $R=-0.455, P<0.05$ ),其他指数与海拔均呈不显著相关性(表 3)。这主要可能与鄱阳湖流域地形有关,流域地形主要为湖泊、平原和丘陵,流域内最低海拔为-23m,最高为 2076m,海拔差异不足以对极端温度变化趋势产生影响。

## 4 结论

本文基于鄱阳湖流域 24 个气象站点连续 59 年气象观测资料,选取研究区的 8 个极端气温指标,分析鄱阳湖流域极端气候动态变化,并进一步探讨了极端气温变化与大气环流的关系。结果表明:

(1) 鄱阳湖流域极端气温暖指数和极值指数呈增加趋势,冷指数呈逐渐减少趋势。研究结果与松花江流域、华北、青藏高原和四川盆地等地结论类似。流域最低气温最小值(TNn)增温速率高于四川盆地和青藏高原,霜冻天数减少幅度低于松花江和青藏高原。

(2) 从空间分布来看,极端气温的空间变化趋势分布与年际变化一致,极端气温暖指数和极值指数呈增加趋势,冷指数呈下降趋势,但在不同地区变化趋势存在差异。流域霜冻天数和冷昼天数自南向北减少趋势越显著,在赣北地区下降趋势最显著。

(3) 鄱阳湖流域极端气温指数的变化与大气环流的变化存在相关性,鄱阳湖流域极端气候事件的变化受到大规模大气环流的影响,研究结果可为研究区灾害防治和可持续发展提供数据支持。

### 参考文献:

- 
- [1] 王有恒, 谭丹, 赵红岩. 近 50a 来甘肃省极端高温事件变化特征[J]. 干旱气象, 2012, 30(03) :410-414.
- [2] 周放, 孙照渤. 1961-2010 年江苏省夏季气温变化及其异常时环流场特征[J]. 气象科学, 2014, 34(1) :96-103.
- [3] 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(D5).
- [4] 曹永旺, 延军平. 1961-2013 年山西省极端气候事件时空演变特征[J]. 资源科学, 2015, 37(10) :2086-2098.
- [5] 孙晨, 程志刚, 毛晓亮, 等. 近 44a 四川地区极端气候变化趋势及特征分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(1) :119-126.
- [6] 吕越敏, 李宗省, 冯起, 等. 近 60 年来祁连山极端气温变化研究[J]. 高原气象, 2019, 38(5) :959-970.
- [7] MANTON M J, DELLA-MARTA P M, HAYLOCK M R, et al. Trends in extreme daily rainfall and temperature in southeast asia and the south pacific:1961-1998[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(3) :269-284.
- [8] 袁文德, 郑江坤. 1962-2012 年西南地区极端温度事件时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7) :1246-1254.
- [9] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近 50a 气温和降水极端事件的变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(10) :1720-1733.
- [10] 吴国雄, 段安民, 张雪芹, 等. 青藏高原极端天气气候变化及其环境效应[J]. 自然杂志, 2013, 35(3) :167-171.
- [11] HE S P, WANG H J. Linkage between the East Asian January temperature extremes and the preceding Arctic Oscillation[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36:1026-1032.
- [12] SUN S Q, YING M. Subtropical high anomalies over the Western Pacific and its relations to the Asian monsoon and SST anomaly[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1999, 16:559-568.
- [13] 卫捷, 杨辉, 孙淑清. 西太平洋副热带高压东西位置异常与华北夏季酷暑[J]. 气象学报, 2004, 62(3) :308-316.
- [14] MUTIIBWA D, VAVRUS S J, MCAFEE S A, et al. Recent spatiotemporal patterns in temperature extremes across conterminous United States[J]. Journal of Geophysical Research, 2015, 120:7378-7392.
- [15] 丁婷, 高辉. 2019 年夏季东亚大气环流异常及对我国气候的影响[J]. 气象, 2020, 46(1) :129-137.
- [16] 许国宇, 马晓青. 北极涛动对冬季北京极端低温事件的影响分析[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(2) :39-43.
- [17] 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.
- [18] 占明锦, 殷剑敏, 孔萍. 鄱阳湖流域气候变化事实研究[J]. 气象与减灾研究, 2013, 36(3) :18-24.

- 
- [19]孙鹏,张强,陈晓宏,等.鄱阳湖流域水沙时空演变特征及其机理[J].地理学报,2010,65(7):828-840.
- [20]胡振鹏,林玉茹.气候变化对鄱阳湖流域干旱灾害影响及其对策[J].长江流域资源与环境,2012,21(7):897-904.
- [21]黄建平,陈文,温之平,等.新中国成立70年以来的中国大气科学研究:气候与气候变化篇[J].中国科学:地球科学,2019,49(10):1607-1640.
- [22]丁之勇,葛拥晓,吉力力·阿不都外力,等.1957-2012年新疆艾比湖流域极端气温与降水变化趋势[J].中国科学院大学学报,2018,35(2):160-171.
- [23]阳文锐,王如松,黄锦楼,等.反距离加权插值法在污染场地评价中的应用[J].应用生态学报,2007,18(9):2013-2018.
- [24]KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London:Charles Griffin,1948.
- [25]SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Publication of the American Statistical Association,1968,324:1379-1389.
- [26]SUN W Y, MU X M, SONG X Y, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960-2013 under global warming[J]. Atmospheric Research,2016,168:33-48.
- [27]ZHONG K Y, ZHENG F L, WU H Y, et al. Dynamic changes in temperature extremes and their association with atmospheric circulation patterns in the Songhua River Basin, China[J]. Atmospheric Research,2017,190:77-88.
- [28]GONG D Y, PAN Y Z, WANG J A. Changes in extreme daily mean temperatures in summer in eastern China during 1955-2000[J]. Theoretical and Applied Climatology,2004,77:25-37.
- [29]MANTON M J, DELLA-MARTA P M, HAYLOCK M R, et al. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific:1961-1998[J]. International Journal of Climatology,2001,21:269-284.
- [30]李熠,杨修群,谢倩.北太平洋副热带高压年际变异与 ENSO 循环之间的选择性相互作用[J].地球物理学报,2010,53(7):1543-1553.
- [31]张恒德,高守亭,刘毅.极涡研究进展[J].高原气象,2008,27(2):452-461.
- [32]蒋淑芳,李小泉.近三十余年我国气候异常的初步分析[J].气象,1985,06(7):20-24.
- [33]张婧雯.冬季北半球极涡演变特征及其对我国气温的影响[D].南京信息工程大学,2013.
- [34]顾思南,杨修群.北半球绕极涡的变异及其与我国气候异常的关系[J].气象科学,2006,27(2):135-142.
- [35]卢秉红,李红斌,赵坤,等.东北夏季气温变化与北半球温度及极涡的关系[J].气象科学,2009,29(5):638-644.
- [36]熊光明,陈权亮,朱克云,等.平流层极涡变化与我国冬季气温、降水的关系[J].高原气象,2012,31(4):1001-1006.

- 
- [37] THOMPSON D W, WALLACE J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25:1297-300.
- [38] 施宁, 张乐英. 冬季平流层北极涛动对江南气温的影响[J]. *大气科学学报*, 2013, 36(5):604-610.
- [39] 柏会子, 肖登攀, 刘剑锋, 等. 1965-2014 年华北地区极端气候事件与农业气象灾害时空格局研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(5):99-105.
- [40] 商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近 54 a 中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(1):68-76.
- [41] 高文华, 李开封, 崔豫. 1960-2014 年河南极端气温事件时空演变分析[J]. *地理科学*, 2017, 37(8):1259-1269.
- [42] GUAN Y H, ZHANG X C, ZHENG F L, et al. Trends and variability of daily temperature extremes during 1960-2012 in the Yangtze River Basin, China[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 124:79-94.
- [43] 孙晨, 程志刚, 毛晓亮, 等. 近 44a 四川地区极端气候变化趋势及特征分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1):119-126.
- [44] 徐丽娇, 胡泽勇, 赵亚楠, 等. 1961-2010 年青藏高原气候变化特征分析[J]. *高原气象*, 2019, 38(5):911-919.
- [45] 王晓利, 侯西勇. 1961-2014 年中国沿海极端气温事件变化及区域差异分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(21):7098-7113.
- [46] IPCC. *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*[C]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007, 25.
- [47] BROWN P J, BRADLEY R S, KEIMIG F T. Changes in extreme climate indices for the Northeastern United States, 1870-2005[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23:6555-6572.
- [48] LI Z, HE Y, WANG P, et al. Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961-2008[J]. *Global Planet. Chang*, 2012, 80:255-272.
- [49] FYFE J C, FLATO G M. Enhanced climate change and its detection over the Rocky Mountains[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12:230-243.
- [50] GIORGI F, HURRELL J W, MARINUCCI M R, et al. Elevation dependency of the surface climate change signal: a model study. *Journal of Climate*, 1997, 10:288-296.