

# 近 56 年安徽省极端气温变化及其与气候指数的关系

刘永婷<sup>1,2</sup>, 徐光来<sup>1,2</sup>, 杨钊<sup>1</sup>, 任秀真<sup>1,2</sup>, 杨先成<sup>1,2</sup>, 李爱娟<sup>1,2</sup>

(1.安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241002; 2.安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室, 安徽 芜湖 241002)

**摘 要:**为了研究安徽地区对全球变暖的响应,基于 1960—2016 年安徽省 78 个气象站的月值极端气温数据,采用数理统计和 GIS 空间分析方法,研究多时间尺度下的极端气温时空变化特征,并探讨了极端气温与气候指数的相互关系。结果表明:(1) 近 56 a 安徽省年极端最高、最低气温总体上均呈现上升趋势,极端最低气温的增温幅度( $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )大于极端最高气温( $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ );(2) 年极端最高气温的突变时间为 2001 年,比极端最低气温(1986 年)晚了 15 a。年极端最高、最低气温的 Hurst 指数都大于 0.5,存在显著的 Hurst 现象,持续以往的升温趋势;(3) 极端气温区域平均值总体呈上升趋势,但在不同地区气温变化的幅度和趋势存在一定差异;(4) 极端气温与 3 个气候指数存在着多时间尺度的相关性,极端最高气温与 ENSO, PDO, AO 分别存在 2.5~6 a, 3~6 a, 7.5~11 a 的共振周期。极端最低气温与 ENSO, PDO, AO 分别在 3~6 a, 4.5~5.5 a, 1~3.5 a 的时间尺度上有着强凝聚性共振周期。总之,研究期间安徽省极端最低温度的上升对整个区域的变暖趋势起着重要作用,极端温度与 3 个气候指标具有多时间尺度遥相关现象。

**关键词:**极端气温; 气候指数; 交叉小波; 安徽省

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0248-08

## Variation of Extreme Temperature and Its Association with Climate Indices in Anhui Province During the Past 56 Years

LIU Yongting<sup>1,2</sup>, XU Guanglai<sup>1,2</sup>, YANG Zhao<sup>1</sup>, REN Xiuzhen<sup>1,2</sup>, YANG Xiancheng<sup>1,2</sup>, LI Aijuan<sup>1,2</sup>

(1.College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002, China;

2.Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu, Anhui 241002, China)

**Abstract:** The primary objective of this study is to investigate the response of Anhui Province to global warming. Based on month temperature data from 78 stations in Anhui Province, the long term daily temperatures observed during the period from 1960 to 2016 were analyzed, and the spatial and temporal variation characteristics of extreme maximum and minimum temperature were depicted by using the mathematic statistic methods and GIS spatial analysis. The relationship between the extreme temperature and ENSO, PDO and AO were also analyzed by using the cross wavelet and wavelet coherence techniques. The results showed that: (1) The annual extreme maximum and minimum temperature in Anhui Province had been rising over the study period trend. The linear increasing rate of annual extreme minimum temperature ( $0.37^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ) was obviously higher than that of annual extreme maximum temperature ( $0.12^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ). (2) The abrupt change of annual extreme maximum temperature occurred about 15 years later than the extreme minimum temperature abrupt changes (in 2001 and 1986, respectively). Asymmetric changes were observed in the annual extreme maximum and minimum temperature. There was obvious Hurst phenomenon in the future, which showed that the trendy ingredients were existed in Anhui Province during recent 56 years. (3) The spatial and temporal variation distribution of average extreme temperature showed the regional differences in the area, even though the overall change of regional extreme temperature was rising nearly 56 years, yet the temperature in different areas had differences in trend and range. (4) The relationship between the extreme temperature and the three large-climate indices presented significant periodic variations.

收稿日期:2020-04-07

修回日期:2020-05-26

资助项目:国家自然科学基金(41301029, 41271172)

第一作者:刘永婷(1985—),女,安徽阜阳人,博士研究生,研究方向为可持续发展。E-mail:2662291994@qq.com

通信作者:徐光来(1978—),男,安徽无为,人,博士,副教授,主要从事水文学与水资源的研究。E-mail:guanglaixu@163.com

The in-phase relations between extreme maximum temperature and ENSO, PDO, AO were found in almost all the time-frequency domains, good coherence could be found in the circle of 2.5 to 6 years, 3 to 6 years and 7.5 to 11 years, respectively. The impact of climate indices on extreme minimum temperature mainly occurred in the circle of 3 to 6 years, 4.5 to 5.5 years and 1 to 3.5 years. The rise of extreme minimum temperature played the major role in the warming trend of the whole region, and the extreme temperature and three climate indices had a multi time scale teleconnection phenomenon.

**Keywords:** extreme temperature; climate indices; cross wavelet analysis; Anhui Province

IPCC 第 5 次评估报告指出,全球大部分地区均呈明显升温趋势,1951—2012 年全球地表平均气温增温幅度达  $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,而中国陆地表面平均气温的升温率为  $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,高于全球的升温幅度<sup>[1-2]</sup>。气候变暖使高温、严寒、洪涝及干旱等极端天气事件的发生日益频繁,强度也越来越大,从而给人类生活、自然环境及经济可持续发展造成严重的影响<sup>[3-4]</sup>。当前,学者们主要基于不同角度和发生阈值对极端气候事件进行阐释<sup>[1,5]</sup>。极端气候事件实质上是由于某气象要素的正负异常超出了一定阈值,发生于某一特定地点和时间的气候极值<sup>[5]</sup>。从单个气象观测点来看,极端气候事件一般采用本站点气候要素(如气温、降水量等)在一段时间内的异常记录或超过特定阈值的天数等指数来表示<sup>[5]</sup>。全球气候变暖导致极端气候事件发生频率和强度的增加,通常,极端气候事件变率的强度及危害都大于平均气候。近年来,极端气候指数时间序列的研究已成为气候变化研究的热点问题,许多学者基于不同的方法和角度对区域极端气温事件的变化特征进行了大量的研究<sup>[5-7]</sup>。You 等<sup>[8]</sup>研究了中国极端气温的变化特征,发现北方地区极端气温的变化幅度比较明显。黄小燕等<sup>[9]</sup>利用 1960—2013 年中国沿海 110 个气象观测站气温资料,分析了中国沿海极端气温事件的变化特征。刘青娥等<sup>[10]</sup>研究了珠江流域极端气温的时空变化规律,并选取 7 个影响因子来分析极端气温变化的环流背景成因。中国领土辽阔,地理位置、地形起伏及下垫面状况的区域差异使得不同地区的气候条件存在明显差异,因此探讨区域范围极端气温指数的变化趋势也显得非常重要。目前,已有学者对贵州、河南、山东和辽宁等中国局地地区的极端气温事件进行了研究和分析<sup>[11-14]</sup>,结果表明各地区极端最低气温总体上均呈增加趋势,不同区域增加幅度差异显著。

海气耦合是影响大气环流和气候变化的重要因素,尤其是发生在热带太平洋的厄尔尼诺—南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、北太平洋年代际振荡(The Pacific Decadal Oscillation, PDO)和北冰涛动(The Arctic Oscillation, AO)现象与全球气候异常

具有密切联系<sup>[15-16]</sup>。相关研究发现 ENSO, PDO 和 AO 是通过大气环流以遥相关形式影响太平洋副热带高压和东亚季风环流的强度,间接对中国气候异常产生重要的影响,尤其是赤道中东太平洋的变冷是导致近年来气候变暖减缓的主要因素<sup>[17-19]</sup>。ENSO, PDO 和 AO 异常相位是造成中国极端气候(降水和气温)事件的重要原因之一,其对极端气候变化的影响方式和强度因时间和区域的不同,而存在一定差异<sup>[20-22]</sup>。

安徽省位于华东腹地( $114^{\circ}54'$ — $119^{\circ}37'E$ ,  $29^{\circ}41'$ — $34^{\circ}38'N$ ),淮河、长江自西向东横贯境内。省内地貌地形复杂多样,同时又地处亚热带和暖温带过渡区域,位于典型的季风区内。安徽省是国家的重要粮食生产基地,随着极端天气事件的频率增加,继而引发的气象灾害对农业生产和经济发展造成了严重的影响<sup>[23]</sup>。以往的研究多注重于安徽省气温时空变化特征<sup>[24-25]</sup>,但是安徽省极端气温事件变化特征及其与气候指数(ENSO, PDO, AO)在时频域中多时间尺度相关关系的研究并不多见,且已有研究所用站点数较少,与其他区域气候变化的对比研究不足。在全球气候变化背景下,有必要对安徽省极端气温事件变化趋势及其与气候指数关系进行深入分析,为短期气候预测、调整农业种植结构及防治气象灾害提供参考依据,达到农业和社会经济可持续发展的目的。本研究基于安徽省 78 个气象站点提供的月值极端气温观测数据,利用线性倾向法、M-K 突变检验和交叉小波等方法,探讨 1960—2016 年极端气温事件的变化趋势及其与 ENSO, PDO, AO 的相关关系,旨在为深入了解区域极端气温变化研究和合理布局工农业生产提供参考依据。

## 1 数据来源和研究方法

### 1.1 数据来源及处理

极端气温数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。由于个别新建或迁移站点缺测资料较多,考虑到数据的连续性及完整性,剔除数据年限不足及缺测数据较多的台站。在 R 语言环境中加载基于 RClimDex 模型,导入各站点气象数据,对资料错误值与异常值进行筛选,以保证结果的可信度。利用克里金插值法对部

分站点个别月份的缺失数据进行提取确定,并对数据进行一致性检验。所有数据序列经过严格的质量控制与均一化处理,最终选取 78 个均匀分布于安徽省的气象站数据,通过分类汇总等数据预处理方法统计出逐年的年极端最高气温(TXx)和极端最低气温(TNn)(图 1)。多元 ENSO 指数(即 Multivariate ENSO Index, MEI)、PDO 和 AO 数据均来源于 NOAA 网站(<http://www.noaa.gov>)。以上数据资料时间跨度均为 1960 年 3 月—2016 年 2 月。

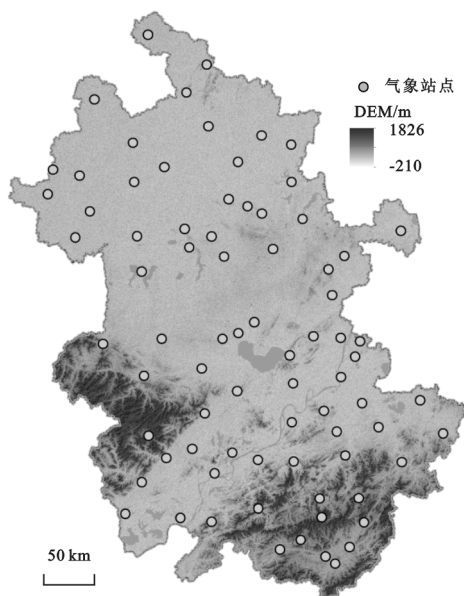


图 1 安徽省气象站点分布示意图

## 1.2 研究方法

利用线性倾向法对安徽省多年极端气温时间序列进行拟合,采用 ArcGIS 10.2 的普通克里金插值法,分析极端气温变化的空间差异。运用 Mann-Kendall 检验方法(M-K 检验)来检验极端气温的突变点<sup>[26]</sup>,并用滑动 t 检验法进行验证,且采取 Pre-Whitening 法对时间序列自相关影响进行消除,使用重标极差法(R/S 分析)来预测未来气温变化的趋势<sup>[27-28]</sup>。

采用 Pearson 相关性分析方法,分析极端气温指数与大气环流指数间的相关性,并基于 Matlab 2020b 软件,依据交叉小波变换(XWT)和小波相干(WTC)分析不同时间尺度上安徽省极端气温与气候指数相关关系及其所包含的周期特征。计算过程主要参考文献<sup>[29—30]</sup>的计算方法,原理如下(计算中选用 Morlet 小波)。

对于两个时间序列  $X_n$  和  $Y_n$  之间交叉小波功率谱(XWT)定义为:

$$W_n^{XY} = W_n^X W_n^{Y*} \quad (1)$$

式中:  $W_n^{Y*}$  为  $Y_n$  序列的复共轭。交叉小波功率谱  $|W_n^{XY}|$  值越大,则两个时间序列  $X_n$  和  $Y_n$  在不同时频

域上的相关性越显著。

小波相干用来反映两个时间序列在时频空间的相干程度,其定义为:

$$R_n^2(S) = \frac{|S[s^{-1}W_n^{XY}(s)]|^2}{S[s^{-1}|W_n^X(s)|^2] \cdot S[s^{-1}|W_n^Y(s)|^2]} \quad (2)$$

式中:  $S$  为平滑窗口;  $s$  为小波相位角的标准偏差;  $|\cdot|$  表示对复数求模;  $|S[s^{-1}W_n^{XY}(s)]|^2$  为两时间序列在某一频率下波振幅的交叉积;  $S[s^{-1}|W_n^X(s)|^2]$  和  $S[s^{-1}|W_n^Y(s)|^2]$  为两时间序列振动波的振幅。

## 2 结果与分析

### 2.1 极端气温趋势变化

从图 2A 可以看出,近 56 a 安徽省大部分地区的 TXx 呈上升趋势(超过 0.05 显著性水平的站点的比例为 51.28%)。其中,黄淮平原的北部地区和江南的小部分地区呈现微弱降温趋势(未达到 0.05 显著水平)。江淮地区和江南的部分地区的气温呈微弱增加趋势,增幅较大(在 0.20℃/10 a 以上)的地区主要集中在皖南地区。由图 2B 可知,安徽省 TNn 呈明显升温趋势,大部分站点年极端最低气温达到 0.05 的显著性水平(94.87% 的站点达到 0.05 显著性水平),增幅最大的是黄淮地区(在 0.51℃/10 a 以上),升温趋势达到极显著水平。相比于 TXx,年 TNn 在黄淮地区上升更显著,且上升速率总体呈现随纬度增加趋势。这与 TNn 在全国范围呈大幅上升趋势,尤其以东北、华北等地区的研究结果相一致<sup>[6]</sup>。

### 2.2 极端气温突变检验及其趋势性

利用 Mann-Kendall 分析法对极端气温进行趋势和突变检验,并结合滑动 t 检验进行验证,确定突变年份。结果表明,安徽省年 TXx 的 UF 与 UB 两条曲线在临界线范围内交点为 2001 年,但 UF 线并未超过 0.05 显著性水平,说明其增温趋势不显著。从图 3A 可以看出,近 56 a 安徽省黄淮平原的大部分地区 TXx 突变点未通过  $\alpha=0.05$  的增温置信度检验,其他地区增温趋势显著,均通过 0.05 显著性检验,突变点主要出现在 20 世纪 90 年代以后。TNn 在 1986 年发生突变,且在 1995 年以后进入显著上升阶段( $M>1.96$ )。安徽省各气象站点 TNn 的  $M$  值均大于 1.96,即通过  $\alpha=0.05$  的增温置信度检验(图 3C),突变点大部分集中在 20 世纪 80—90 年代。基于 R/S 分析测算安徽省各站点气候指标的 Hurst 指数(图 3B,D)。大部分站点 TXx, TNn 的  $H$  值都大于 0.5,表明均存在较为明显的 Hurst 现象,表明未来极端气温可能依然延续过去的升温趋势。TNn 的  $H$  值相对较高,说明 TNn 增温趋势的持续性强于 TXx。



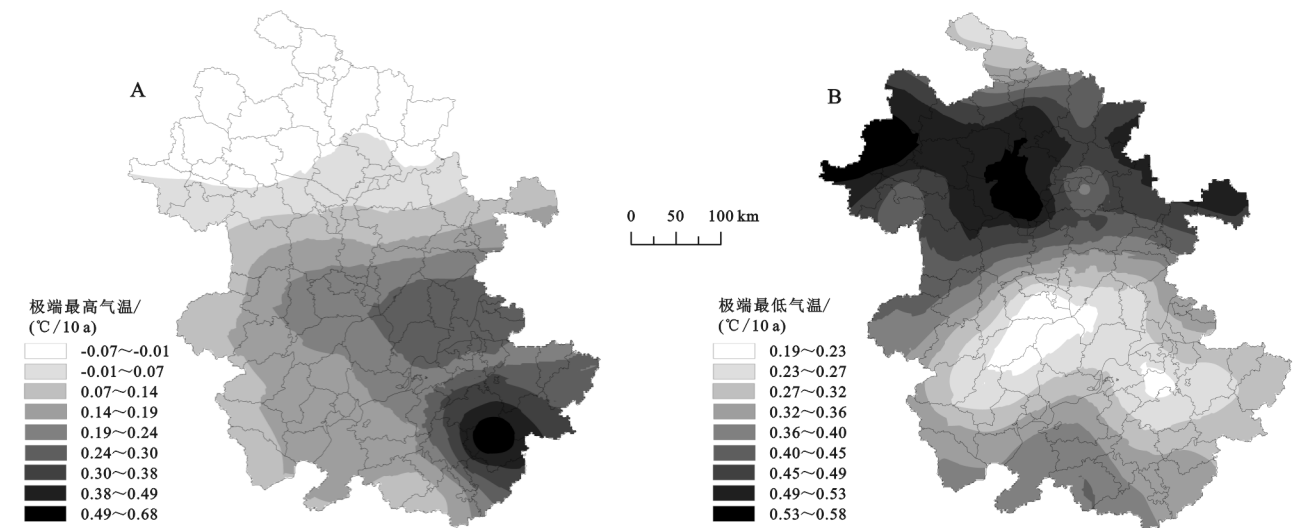


图 2 安徽省年极端最高气温和年极端最低气温变化趋势空间分布

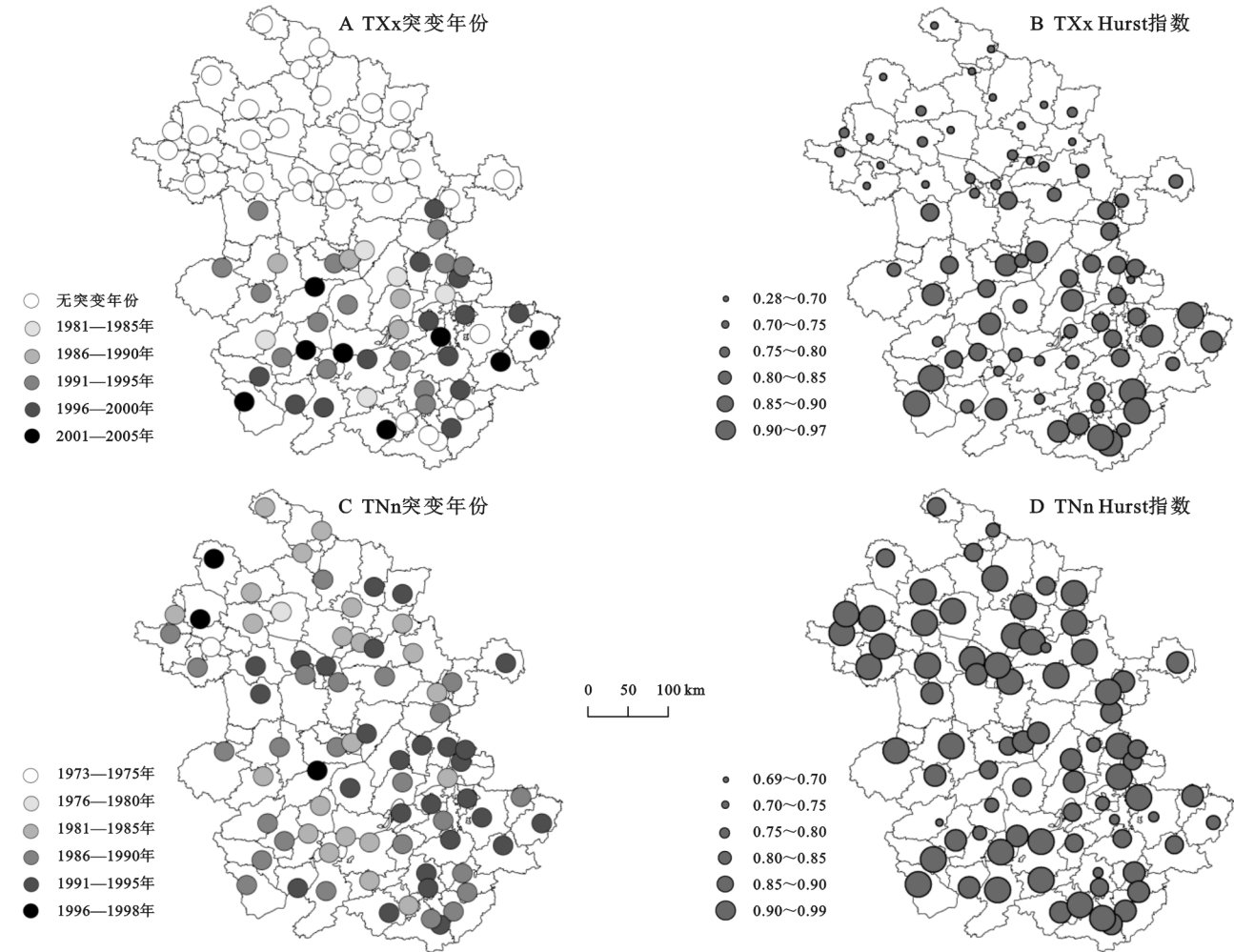


图 3 安徽省年极端气温突变年份和 Hurst 指数

2.3 极端气温与气候指数的关系

大部分地区 TXx 与 MEI 指数呈正相关(占比 93.6%),相关程度较高的站点主要集中在江淮地区,通过显著性检验的比例为 28.2%。与不同的是,大部分 TNn 与 MEI 指数呈现负相关(占比 80.8%),通过 0.05 显著性检验的站点占 14.1%(图 4A,D)。

TXx 与 PDO 指数呈正相关,而大部分地区 TNn 与 PDO 呈负相关,相关程度具有一定空间差异性(图 4B,E)。大部分地区 TXx 与 AO 指数呈负相关,而 TNn 与 AO 均呈正相关,且绝大部分站点相关性通过 0.05 显著性检验,说明 AO 在这一时段对 TNn 的影响范围大于 TXx(图 4C,F)。

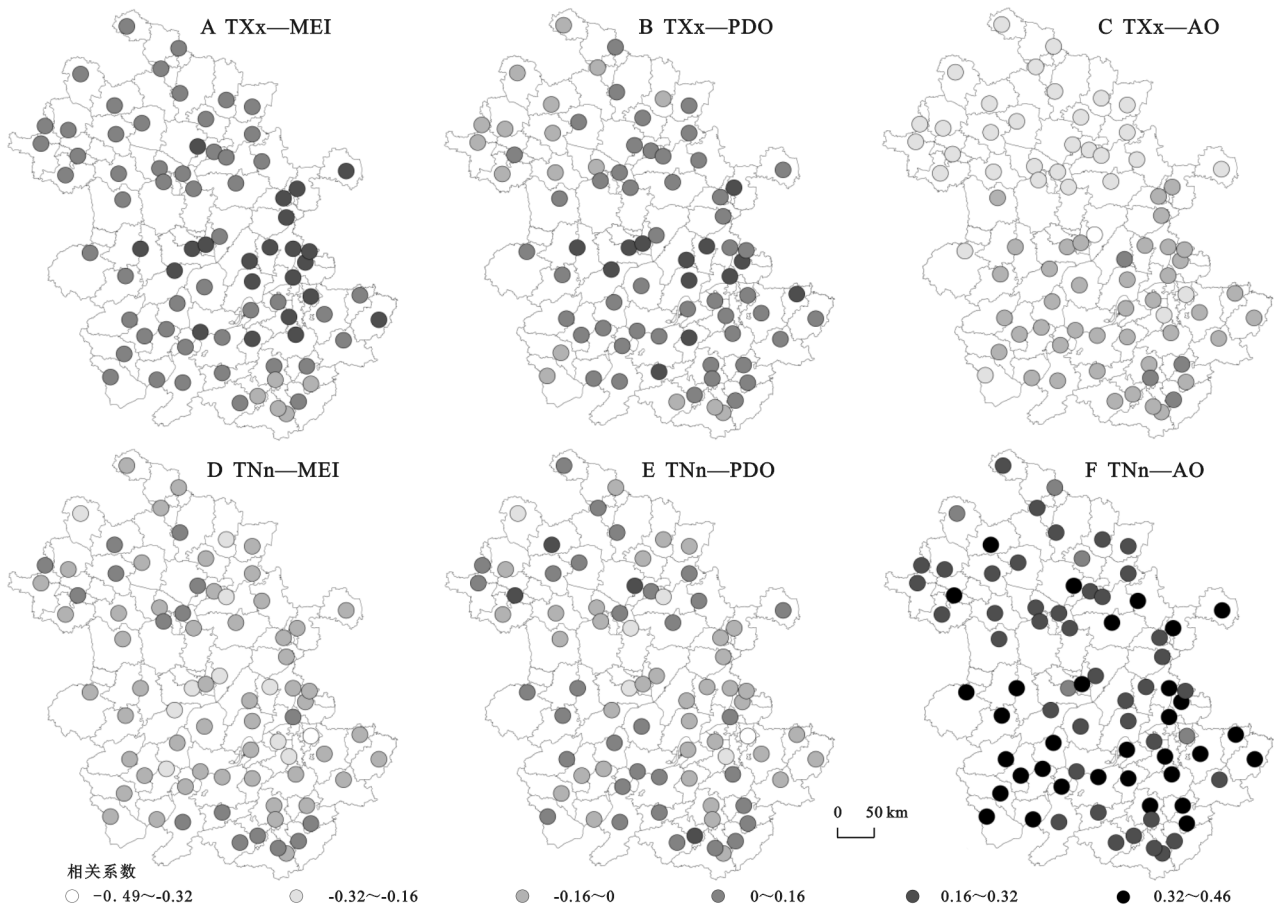


图 4 年极端气温与 MEI,PDO 和 AO 的相关系数

交叉小波变换重点突出极端气温与气候指数在时频域中高能量区的相互关系,相干小波变换则重点突出极端气温与气候指数在时频域中低能量区的相互关系。黑色粗实线圈内表示能量较高且通过  $\alpha = 0.05$  红噪声标准谱的检验,细黑弧线表示小波影响锥的边界。 $\rightarrow$ 表示极端气温和气候指数同相位, $\leftarrow$ 表示极端气温和气候指数反相位, $\uparrow$ 表示极端气温变化超前气候指数变化约  $90^\circ$ , $\downarrow$ 表示极端气温变化落后气候指数变化约  $90^\circ$ 。

安徽省 TXx 与 MEI 的小波功率谱高能量区主要集中在 1980—2012 年 2.5~6 a 的共振周期上,其能量谱表现出带状分布的特征,且两者在大部分时频域中呈正相关(图 5A)。在低能量区存在 2~7 a (1982—2015 年)的共振周期且接近同相位变化,其中在 2002—2005 年叠加 3~3.5 a 的周期,有些显著周期大部分位于影响锥形线外,认为没有通过检验(图 5D)。TXx 和 PDO 高能量区在 1984—2002 年存在 3~6 a 的共振周期(图 5B)。TXx 与 PDO 相干小波功率谱低能量区在 1990—1994 年表现出 6~7 a 正相位的共振周期(图 5E)。由图 5C 看出, TXx 与 AO 存在 3 个间歇性共振周期,分别为 1.5~2 a (1964—1968 年),7.5~11 a (1972—1988 年)和 4 a (1982—1984 年)。由低能量区图 5F 可知, TXx 与

AO 在 1960—1968 年存在 1.5~3 a 的共振周期, 1960—1995 年存在 7~11 a 的共振周期且接近反相位变化,其能量谱呈现带状分布的特征。

由图 5G 可以看出,安徽省 TNn 与 MEI 指数在 1964—1974 年和 1984—1993 年分别表现出 1~3.5 a, 3~6 a 共振周期, TNn 变化与 MEI 指数具有较好的反相关。在低能量区(图 5J), 1980—1988 年、1988—1997 年和 1998—2003 年分别存在 2~5.5 a, 6~7.5 a 和 3 a 左右的显著负相关共振周期。TNn 与 PDO 指数(图 5H)在 1988—1994 年表现出 1~2 a 或 4.5~5.5 a 的共振周期,在其他年代和频率上的能量较弱。在低能量区(图 5K),在 3~6 a 显著周期尺度上,较强的能量发生在 1980—1990 年。TNn 与 AO 指数(图 5I)在 1~3.5 a (1962—1970 年)显著周期尺度上能量较强,呈正相关。在低能量区(图 5L)时域中 1~4 a 尺度的正相关振荡出现在 1960—1970 年,在 1980—1984 年、1990—1994 年表现出 2.5~3.5 a 和 4.5~6 a 显著共振周期。

3 讨论与结论

3.1 讨论

安徽省极端气温呈现上升趋势,其中 TNn 的升

温速率是 TXx 的 3 倍多,这与全国范围内极端最低气温呈显著上升趋势,而 TXx 的增暖趋势不显著的结论相一致<sup>[31-32]</sup>。对比分析安徽省和全国、沿海地区及其周边省份大致相同时段的极端气温的变化值(表 1),安徽省 TXx 的增温速率与中国沿海地区一致,TNn 的增温幅度介于河南省和山东省之间。

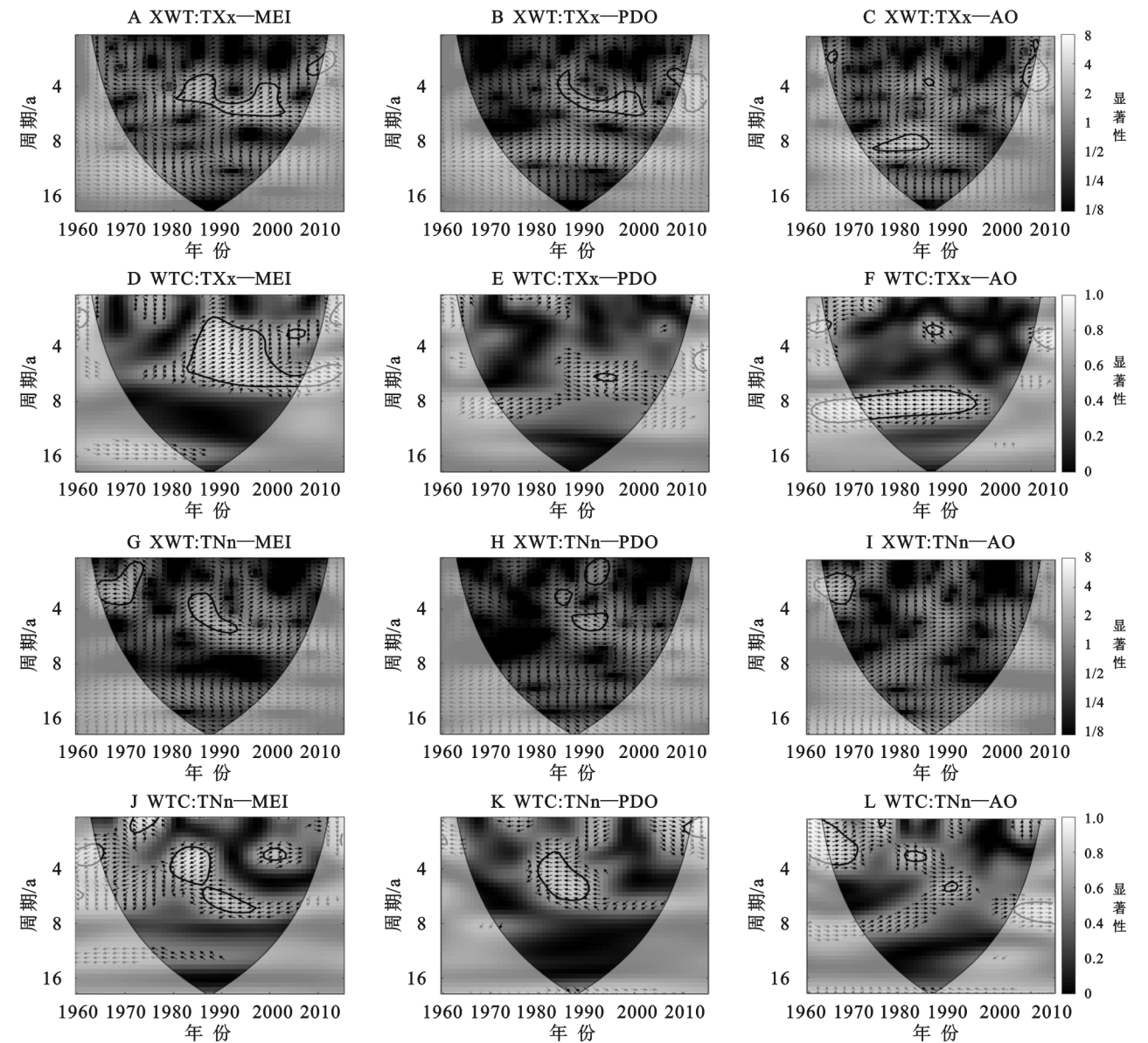


图 5 年极端气温与 MEI,PDO 和 AO 的交叉小波功率谱、相干小波功率谱

表 1 安徽省极端气温的变化趋势及与其他区域对比							℃/10 a
指数	安徽省	中国大陆 <sup>[32]</sup>	沿海地区 <sup>[9]</sup>	河南省 <sup>[12]</sup>	山西省 <sup>[33]</sup>	山东省 <sup>[13]</sup>	
	1960—2015 年	1961—2010 年	1960—2013 年	1960—2014 年	1951—2011 年	1973—2013 年	
极端最高气温	0.12	0.16	0.12 *	−0.12	0.16	0.14	
极端最低气温	0.37 **	0.53 **	0.40 *	0.41 **	0.62 **	0.33 *	

注: \* 表示通过 0.05 显著性水平检验, \*\* 表示通过 0.01 显著性水平检验。

随着极端气候事件发生频率增加,不少研究人员对极端气温事件原因进行了相关研究。Griffiths 等<sup>[34]</sup>对亚洲—太平洋地区的极端气温变化进行了研究,结果表明城市站和乡村站极端气温变化幅度存在明显差异,尤其是极端最低气温的变化。王琼等<sup>[35]</sup>分析了长江流域极端气温的时空变化规律,得出冷指数的变暖幅度明显大于暖指数的变化幅度,长江上游区域极

端冷指数的平均值大于下游区域,而极端暖指数相反。影响极端气温变化的原因非常复杂,除了上面提及的城市热岛效应和海拔因素外,火山爆发、地形状况<sup>[36]</sup>以及地表覆被变化<sup>[37]</sup>都是影响气候变化的外强迫因素,而大尺度海洋变率如 ENSO,PDO 和 AO 是年际、年代尺度的气候系统内部变率。东亚季风与中国气候变化联系密切,ENSO,PDO 和 AO 可能通



过海气相互作用改变东亚季风的强弱,影响中国东部地区的气候异常。安徽省极端气温与 ENSO, PDO 和 AO 存在不同尺度的共振周期,只是在不同年代和频率中的能量强弱分布存在一定差异。极端气温和 ENSO 相关程度最为明显,其次为 AO 指数, PDO 指数对其影响最小。

本文没有考虑城市站点与乡村站点之间的差异。城市化引起的土地利用/覆被变化和热岛效应可能会影响升温幅度的估算<sup>[38-39]</sup>。本文只选取了 3 个比较常见的气候指数,分析了其与极端气温年值的相关关系,没有考虑不同季节极端气温对 ENSO, PDO, AO 的响应差异。如何定量区分影响极端气温变化的各个因素,还需要更深层次的研究分析。

### 3.2 结论

(1) 近 56 a 来安徽省 TNn 的上升幅度 ( $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) 明显大于 TXx ( $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ), 极端气温差趋于缓和。TNn 序列比 TXx 的突变时间(分别为 1986 年、2001 年)提前了 15 a, 说明安徽省极端最低气温的增温效果权重比较大, 是年平均增温的主要贡献者。TXx 和 TNn 序列均存在比较明显的 Hurst 现象, 表明未来极端气温可能依然延续过去的升温趋势。

(2) 安徽省年 TXx 呈上升趋势, 升温幅度相对较小, 主要集中在江淮地区和沿江部分地区。TNn 普遍呈升温趋势, 部分地区增温趋势达到极显著水平。

(3) 极端气温与气候指数具有一定程度的遥相关性。大部分地区 TXx 与 ENSO, PDO, AO 呈正、正、负相关, 安徽省 TXx 与 ENSO, PDO, AO 分别存在 2.5~6 a (1980—2012 年), 3~6 a (1984—2002 年) 和 7.5~11 a (1972—1988 年) 左右的共振周期。大部分地区 TNn 与 MEI, PDO, AO 呈负、负、正相关, 安徽省 TNn 与 ENSO, PDO, AO 分别在 3~6 a (1984—1993 年), 4.5~5.5 a (1988—1994 年) 和 1~3.5 a (1962—1970 年) 左右的时间尺度上有着强凝聚性共振周期。

致谢: 本文所用原始气象观测数据源自中国气象局国家气象信息中心。

### 参考文献:

- [1] Ciais P, Sabine C, Bala G, et al. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] 周丹, 张勃, 李小亚, 等. 1961—2010 年中国大陆地面气候要素变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 549-558.
- [4] Sun P, Zhang Q, Yao R, et al. Spatiotemporal patterns of extreme temperature across the Huai River basin, China, during 1961—2014, and regional responses to global changes [J]. Sustainability, 2018, 10. DOI: 10.3390/su10041236.
- [5] 任国玉, 封国林, 严中伟, 等. 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.
- [6] 周雅清, 任国玉. 中国大陆 1956—2008 年极端气温事件变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 405-417.
- [7] 张克新, 董小刚, 廖空太, 等. 1960—2017 年黄河流域极端气温的季节变化特征及其与 ENSO 的相关性分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 185-192.
- [8] You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961—2003 [J]. Climate Dynamics, 2011, 36(11/12): 2399-2417.
- [9] 黄小燕, 王小平, 王劲松, 等. 1960—2013 年中国沿海极端气温事件变化特征[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 612-620.
- [10] 刘青娥, 吴孝情, 陈晓宏, 等. 珠江流域 1960—2012 年极端气温的时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1356-1366.
- [11] 朱大运, 熊康宁, 肖华. 贵州省极端气温时空变化特征分析[J]. 资源科学, 2018, 40(8): 1672-1683.
- [12] 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.
- [13] 陈永金, 刘加珍, 张平, 等. 山东省近 40 a 气候变化及其与相关因子的关系[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 81-86, 103.
- [14] 周晓宇, 赵春雨, 王颖, 等. 1961—2012 年辽宁省极端气温事件气候变化特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 876-887.
- [15] Dai A. The influence of the inter-decadal Pacific oscillation on US precipitation during 1923—2010 [J]. Climate Dynamics, 2013, 41: 633-646.
- [16] 陈文, 兰晓青, 王林, 等. ENSO 和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 634-641.
- [17] Zhou W, Johnny C L Chan. ENSO and the South China Sea summer monsoon onset [J]. International Journal of Climatology, 2010, 27(2): 157-167.
- [18] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling[J]. Nature, 2013, 501(7467): 403-407.
- [19] Wang L, Chen W. How well do existing indices measure the strength of the East Asian winter monsoon[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(4): 855-870.
- [20] Zhang W J, Li H Y, Stuecker Malte F, et al. A new understanding of El Niño's impact over East Asia: Dominance of the ENSO combination mode[J]. Journal of Climate, 2016, 29(12): 4347-4359.
- [21] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际震荡与中国气候变率的联系[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 641-653.
- [22] 雷杨娜, 孙娴, 乐章燕. 中国东部地区冬季气温与北极涛动的关系[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(4): 42-48.
- [23] 付伟, 许信旺, 司红君, 等. 极端气温事件对安徽省农业生

- 产的动态影响分析[J].气象科学,2014,34(4):443-449.
- [24] 查良松,陈晓红,吉中会,等.1970—2008 年安徽省气温时空格局变化[J].地理研究,2010,29(4):641-654.
- [25] 刘永婷,徐光来,尹周祥,等.全球变化背景下安徽近 55 a 气温时空变化特征[J].自然资源学报,2017,32(4):680-691.
- [26] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2 版.北京:气象出版社,2007.
- [27] 王怀清,殷剑敏,孔萍,等.鄱阳湖流域千年旱涝变化特点及 R/S 分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1214-1220.
- [28] 冯新灵,罗隆诚,邱丽丽,等.成都未来气候变化趋势的 R/S 分析[J].长江流域资源与环境,2008,17(1):83-87.
- [29] 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, 2004,11(5/6):561-566.
- [30] 张克新,潘少明,曹立国,等.横断山区季风期水分盈亏量时空变化特征及其与若干气候指数的相关性分析[J].自然资源学报,2014,29(11):1869-1877.
- [31] 郝振纯,孙乐强.我国 1961—2009 年气温变化规律分析[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(6):595-691.
- [32] 赵军,师银芳,王大伟,等.1961—2008 年中国大陆极端气温时空变化分析[J].干旱区资源与环境,2012,27(3):52-56.
- [33] 牛旭,严俊霞,李红建.1951—2011 年山西省极端气温变化基本特征研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):73-78.
- [34] Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R et al. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25 (10): 1301-1330.
- [35] 王琼,张明军,王圣杰,等.1962—2011 年长江流域极端气温事件分析[J].地理学报,2013,68(5):611-625.
- [36] Li Z, He Y, Theakstone W H, et al. Altitude dependency of trends of daily climate extremes in southwestern China, 1961—2008[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012,22(3):416-430.
- [37] Ling Y, Zhang J Y, Dong W J. Vegetation effects on mean daily maximum and minimum surface air temperatures over China [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(9):900-905.
- [38] Yang Y J, Wu B W, Shi C, et al. Impacts of urbanization and station-relocation on surface air temperature series in Anhui province, China [J]. Pure and Applied Geophysics, 2013,170(11):1969-1983.
- [39] 贾艳青,张勃,张耀宗,等.城市化对长三角地区极端气温影响的时空分异研究[J].自然资源学报,2017,32(5):814-828.

~~~~~

(上接第 247 页)

- [18] 张慕黎.刺槐和侧柏苗木对干旱及早后复水的生理反应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [19] 庞云龙.旱后复水对侧柏和元宝枫幼树生长及生理特性的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [20] 吉增宝,王进鑫.干旱胁迫对侧柏幼树某些生理特性的影响[J].西北林学院学报,2009,24(6):6-9.
- [21] 赵丽英,邓西平,山仑.不同水分处理下冬小麦旗叶叶绿素荧光参数的变化研究[J].中国生态农业学报,2007,15(1):63-66.
- [22] Goss R, Lepetit B. Biodiversity of NPQ[J]. Journal of Plant Physiology, 2015,172:13-32.
- [23] Li X, Feng W, Zeng X C. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006,26(10):2186-2196.
- [24] 刘雷震,武建军,周洪奎,等.叶绿素荧光及其在水分胁迫监测中的研究进展[J].光谱学与光谱分析,2017,37(9):130-137.
- [25] 董果,戴勖,赵勇,等.侧柏叶温及叶绿素荧光特性对土壤水分胁迫的响应[J].中国水土保持科学,2014,12(1):68-74.
- [26] 卢福顺,石瑛,王凤义.干旱和复水对马铃薯叶绿素荧光参数的影响[J].中国马铃薯,2013,27(4):203-207.
- [27] 李晓梅,盛积贵.干旱和复水对 2 种辣椒叶绿素荧光参数的影响[J].西南农业学报,2016,29(11):2567-2572.
- [28] 孙志勇,季孔庶.干旱胁迫对 4 个杂交鹅掌楸无性系叶绿素荧光特性的影响[J].西北林学院学报,2010,25(4):35-39.
- [29] 张国盛,郝蕾,闫子娟,等.6 种树种叶片叶绿素荧光动力学参数对土壤水分变化的响应[J].生态学杂志,2017,36(11):87-93.
- [30] 马仁义,张茜,张强,等.持续干旱对侧柏和祁连圆柏叶片水分状况及光合作用的影响[J].干旱区研究,2010,27(1):88-96.
- [31] 蒙祖庆,宋丰萍,刘振兴,等.干旱及复水对油菜苗期光合及叶绿素荧光特性的影响[J].中国油料作物学报,2012,34(1):40-47.
- [32] 王振夏,魏虹,吕茜,等.枫杨幼苗对土壤水分湿—干交替变化光合及叶绿素荧光的响应[J].生态学报,2013,33(3):888-897.