

近 50 年淮河流域气温时空变化及其与 PDO 的关系

田立鑫, 韩美, 徐泽华, 孔祥伦, 朱继前

(山东师范大学 地理与环境学院“人地协调与绿色发展”山东省高校协同创新中心, 济南 250358)

摘要:气温的变化是造成自然景观和生态环境改变的主要因素之一。利用淮河流域 1965—2016 年 67 个数据序列完整的气象站日平均气温、最高气温、最低气温数据,采用线性倾向估计、Mann-Kendall 检验、皮尔逊相关系数、连续小波(CWT)、交叉小波变换(XWT)和小波相干谱(WTC)等方法分析了流域气温时空变化特征以及流域年平均气温和 PDO(太平洋年代际涛动)的周期特征。结果表明:在时间尺度上,淮河流域年平均气温、最高气温和最低气温在 1965—2016 年均存在不同程度的上升,年平均最低气温增幅最为明显;空间上流域气温从南向北呈现递减趋势,不同地区的增温趋势略有不同,东部沿海地区平均气温的升温幅度高于西部内陆地区,流域西南部年平均最高气温的升温趋势比较明显,西北部年平均最低气温升温趋势比较明显,年平均气温的突变主要发生在 1996 年,而年平均最高气温和年平均最低气温的突变时间则略早于年平均气温(1992 年)。淮河流域年平均气温存在 1.3~5.5 a 尺度的年际振荡周期,与 PDO 指数的振荡变化相似。淮河流域气温也随着 PDO 冷暖相位的转变发生了相应的变化。

关键词:淮河流域; 气温; 时空变化; PDO; 小波分析

中图分类号:P468.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0240-09

Temporal and Spatial Change of Temperature in the Huaihe River Basin During the Past 50 Years and Its Relationship with PDO

TIAN Lixin, HAN Mei, XU Zehua, KONG Xianglun, ZHU Jiqian

(Collaborative Innovation Center of Human-Nature and Green Development of Universities of

Shandong, College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: Temperature change is one of the main factors which cause the changes of natural landscape and eco-environment. Based on the complete data of daily mean temperature, maximum temperature and minimum temperature of meteorological stations in the Huaihe River Basin from 1965 to 2016, the temporal and spatial variation and periodic characteristics of temperature of the annual mean temperature as well as PDO (Pacific Decadal Oscillation) were quantitatively analyzed by using the linear trend estimation, Mann-Kendall non-parametric test method, continuous wavelet (CWT), cross wavelet Transform (XWT), and wavelet coherence spectrum (WTC) in this study. The results indicate that the annual average temperature, maximum temperature and minimum temperature in the basin increased at different levels during the period 1965—2016, and the increase of annual average minimum temperature was obvious; spatially, the temperature showed the decreasing trend from the south to the north of the basin. The warming trend in different regions of the study area was slightly different. The average temperature in the eastern coastal region of the basin was warmer than that in the western inland area. The increase of the annual average maximum temperature in the southwestern part of the basin was relatively obvious, and the increase of the annual average minimum temperature in the northwest was more obvious. The annual average temperature mutations mainly occurred in 1996, but the abrupt time of annual average maximum temperature and annual average minimum temperature was slightly earlier than that the annual average temperature (1992). The average temperature of the Huaihe River Basin had an interannual oscillation period of 1.3~5.5 years, showing similar characteristic to the PDO index. The cold and warm phase transitions of PDO have also the significant impact on temperature changes in the study area.

收稿日期:2019-03-27

修回日期:2019-04-26

资助项目:国家自然科学基金面上项目(41371517);山东省科技攻关计划(2013GSF11706)

第一作者:田立鑫(1996—),女,山东青州人,硕士研究生,研究方向为环境变化与区域可持续发展。E-mail:919007501@qq.com

通信作者:韩美(1963—),女,山东寿光人,教授,博士生导师,研究方向为资源与环境。E-mail:hanmei568568@126.com

Keywords: Huaihe River Basin; temperature; spatiotemporal analysis; PDO; wavelet analysis

全球气候系统的变暖仍将继续,在 IPCC 第 5 次评估报告中指出全球平均地表温度自 1951 年以来上升了 0.72°C ,至 21 世纪末全球平均温度将升高 $0.3\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ ^[1-2]。就我国气温变化来说,近百年来不同地区存在明显的差异^[3-5],但总体变化趋势与北半球大体一致^[6]。淮河流域地处我国南北气候过渡区,具有重要的地理意义,对全球气候变化十分敏感^[7],其气候要素的研究成为近些年来的热点^[8-10]。王珂清等分析了淮河流域 1961—2008 年的年平均气温发现冬季增温幅度最大,空间上春、秋、冬三季节全流域大部分地区平均气温均呈现上升趋势^[11]。高超等研究发现淮河流域年平均气温在 90 年代中后期显著升高,在季节变化上冬季增温速率较快,并预测在 2011—2060 年该地区气温将持续升高^[12]。叶正伟等运用综合线性回归、距平、小波和重标极差分形等时间序列分析方法,发现 1960—2015 年淮河流域不同类型气温呈现上升趋势^[13]。叶金印等对淮河流域气象要素的时间和空间特征进行分析,发现流域年平均气温变化有明显的空间差异性,且全流域年平均气温均呈上升趋势^[14]。为了更好地解释不同区域气温变化的现象,许多学者对大气环流因子与气温变化的关系展开研究^[15-20],太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation,以下简称 PDO)是中北太平洋海温年代际循环的海洋现象^[21-23],被认为是影响北半球气候变化的重要模态,会对区域气候变化产生极为复杂的影响^[24]。许多国外学者已经就 PDO 指数和北太平洋等地区的气候变率之间的关系展开研究^[25-27],丁一汇等研究发现近百年全球气温的快速增温期与趋缓期(或停顿期)与 PDO(太平洋年代际涛动)的位相变化有很明显的相关,PDO 处于正位相时,全球处于增暖期(20 世纪 20—40 年代和 80,90 年代),PDO 处于负位相时则对应全球增温的停滞阶段(20 世纪 50—70 年代和 1998—2014 年)^[28]。我国的一些学者也就 PDO 与温度的关系展开研究,徐忆菲等分析了我国 1951—2013 年冬季月平均气温与 PDO 在年际和年代际时间尺度上的相关关系,发现当 PDO 处于年代际正(负)相位时,我国气温普遍偏高(低)^[29];秦剑等指出云南夏季气温与春季太平洋年代际涛动(PDO)指数具有较强的正相关关系^[30]。

近些年来,有关淮河流域气温变化的研究多集中在对不同类型气温时空变化过程的研究中,但鲜有学者将 PDO 指数与流域气温相结合,探讨 PDO 和流域年平均气温之间存在的联系。本文在先前学者研

究成果的基础上,通过近 52 a 淮河流域 67 个站点观测的年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温资料,运用线性倾向估计、Mann-Kendall 检验、空间插值等方法系统探讨 1965—2016 年淮河流域不同特征气温在全球气候变暖影响下的时空变化特征以及突变状况;并运用连续小波(CWT)、交叉小波变换(XWT)和小波相干谱(WTC)对流域年平均气温和 PDO(太平洋年代际涛动)的周期特征进行研究,以期研究淮河流域气候变化研究提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

淮河流域地处我国东部,位于 $110^{\circ}22'\sim 121^{\circ}52'E$, $29^{\circ}27'\sim 36^{\circ}12'N$,面积约 27 万 km^2 ,流域发源于河南南部桐柏山太白顶北麓,由淮河及沂沭泗两大水系组成,入江苏境内洪泽湖。流域东临黄海,南以大别山、江淮丘陵等与长江分界,北以黄河南堤和泰山为界^[31]。淮河流域除去西部、西南部及东北部为山区、丘陵区以外,其余均为广阔的平原。流域地处中国南北气候过渡带,以南属亚热带区,以北属暖温带区^[32-33]。淮河流域多年平均降水量约为 920 mm,并由南向北递减,由于流域内气候的过渡性和不稳定性,导致淮河流域旱涝灾害频繁,生态环境较为脆弱^[34]。

1.2 数据来源及处理

本文研究的气温数据来自中国气象局国家气象信息中心(NMIC),网址为 <http://data.cma.cn/>。选取淮河流域 67 个数据序列完整的气象站日平均气温、最高气温、最低气温资料(图 1),并将时间统一订正到 1965—2016 年。文中所指的平均气温、最高气温、最低气温均为一年中每日平均气温、最高气温、最低气温的合计平均。为了满足研究需求,NMIC 对数据质量进行评估,以确保数据的可靠性和连续性。PDO 指数资料来自 <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>^[35],资料时间段为 1965—2016 年。

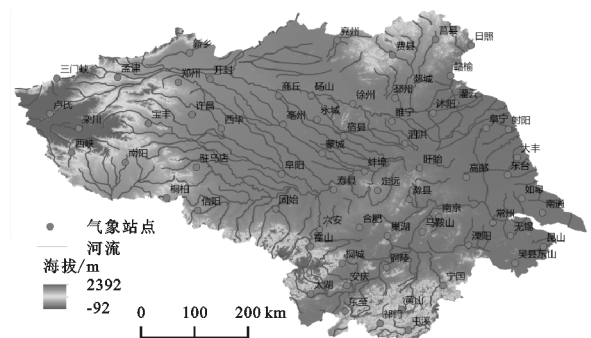


图 1 淮河流域气象站点分布

1.3 研究方法

1.3.1 趋势性和突变性分析方法 趋势分析分别采用线性倾向估计和 Mann-kendall 趋势检验两种方法。采用线性倾向估计来分析淮河流域 3 种不同类型气温在时间上的年际变化趋势。Mann-kendall 检验^[36]是世界气象组织(WTO)推荐的一种非参数检验法^[37]适用于类型变量和顺序变量^[38],本文运用此方法分析流域在空间上的气温变化趋势和突变状况。

1.3.2 Sen's 斜率估计 Sen's 趋势分析中数据不需要服从一定的分布,受异常值干扰较小,对测量误差或离群数据具有较强的规避能力^[39],能够很好地揭示时间序列的突变和趋势变化^[40-41]。

1.3.3 周期分析 运用连续小波(CWT)在时频域中分析年平均气温序列的年代际振荡,交叉小波变化(XWT)和小波相干谱(WTC)探讨年平均气温与 PDO(太平洋年代际涛动)之间的多时间尺度相关关系,具体方法过程详见文献^[17,42]。

2 结果与分析

2.1 淮河流域气温年际变化特征

将 1965—2016 年 52 a 的年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温变化趋势进行对比(图 2),可以看出三者的气温变化趋势大体一致,呈现逐步上升的趋势。流域年平均气温最小值出现在 1969 年(13.88℃),最大值出现在 1993 年(16.32℃),多年平均气温为 14.99℃;年均最高气温在 18.79℃(1984 年)到 21.20℃(1993 年)之间变化;年均最低气温最小值为 9.57℃(1969 年),最大值为 12.36℃(2016 年)。年平均、最高、最低气温在 1965—1990 年接近 84% 的年份处于负距平。就年平均气温来说,1992 年前后气温呈显著上升趋势,之后各年的平均气温高于流域整个时段的年平均气温。从年际变化上升趋势来说,5 a 滑动最低气温曲线较 5 a 滑动最高气温曲线以及 5 a 滑动平均气温曲线变化更为剧烈,表明年最低气温的上升幅度最为明显,这也说明增暖现象在最低气温上表现得更加突出。与国内外一些研究结果得出的结论“全球地表温度的升高过程中大多数地区在最低气温的上升幅度明显高于最高温度”^[43-44]一致。

2.2 淮河流域气温空间分布特征

通过对淮河流域 67 个气象站点 1965—2016 年年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温实测温度数据进行 Kriging 空间插值(图 3),可以看出淮河流域各地年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温的变化在空间上具有高度一致性,不同特征气温在空间上呈现出从南向北递减的趋势。南部黄山地区以及流域北部的沂蒙山和大别山山区海拔较高,受地形的影响,根据气温的垂直递减规律,三地区年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温均为淮河流域明显的低值中心。淮河流域平均气温的变化范围为 8.2~16.9℃,温度最高值出现在安庆附近,为 16.99℃;淮河流域的最高气温在 11.53~22.16℃ 之间变化,在祁门地区附近温度最高;最低气温在 5.5~13.84℃ 之间变化,安庆地区附近的最低气温的最高值为 13.84℃。

区以及流域北部的沂蒙山和大别山山区海拔较高,受地形的影响,根据气温的垂直递减规律,三地区年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温均为淮河流域明显的低值中心。淮河流域平均气温的变化范围为 8.2~16.9℃,温度最高值出现在安庆附近,为 16.99℃;淮河流域的最高气温在 11.53~22.16℃ 之间变化,在祁门地区附近温度最高;最低气温在 5.5~13.84℃ 之间变化,安庆地区附近的最低气温的最高值为 13.84℃。

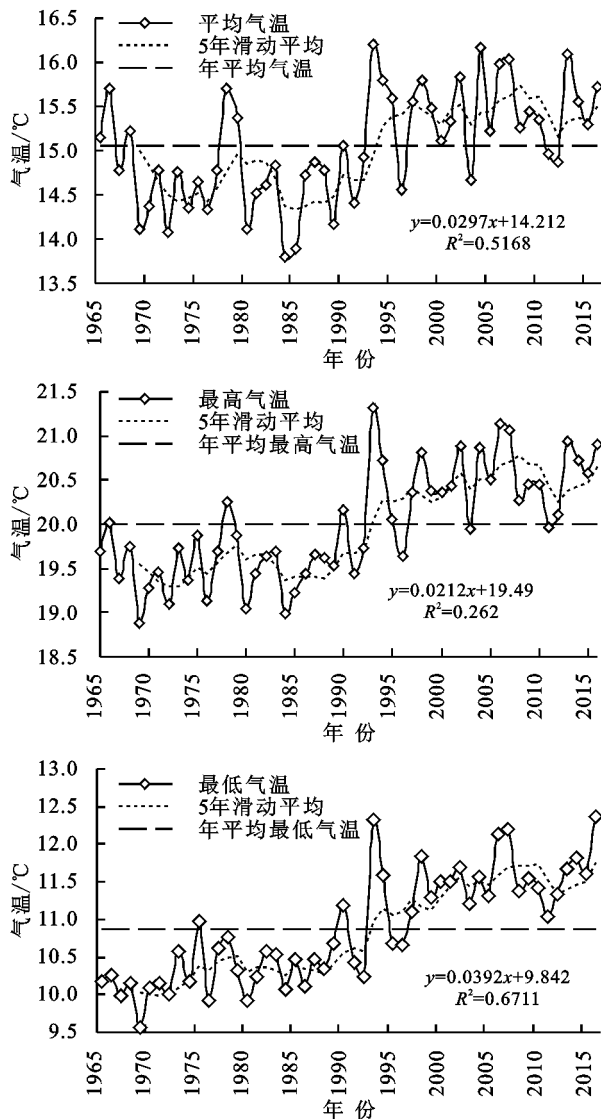


图2 淮河流域不同类型气温年际变化特征

2.3 淮河流域气温变率空间分布

运用 Sen's 斜率估计与(M-K)检验相结合的方法对气温变化的趋势和显著性进行分析,结果显示淮河流域各个站点的 M-K 检验 Z 值均为正值,说明该研究区内年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温均呈现上升趋势。通过对流域不同特征气温 Sen's 斜率进行空间插值,可以看出流域的平均气温升高态势呈现出东部沿海高、西部内陆低的空间格局,而最高气温在流域西南部升温较为显著,最低气温在流域西北地区的升温较为明显。

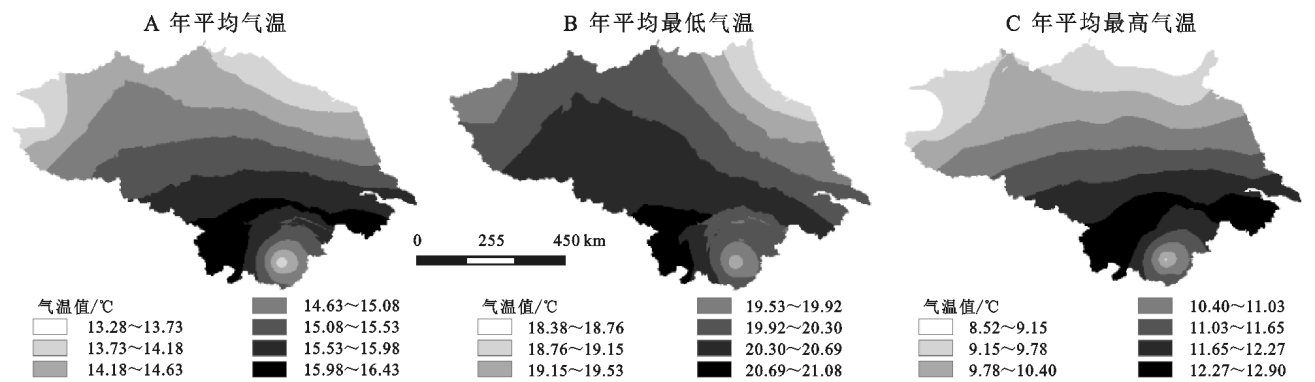


图 3 淮河流域不同类型气温空间分布

年平均气温的 M-K 趋势检验中淮河流域有 95% (64 个) 的站点呈极显著增温趋势(图 4), 其中卢氏站和杨山站的气温变化率分别为 0.095℃/10 a 和 0.115℃/10 a, 通过了 90% 和 95% 的置信度检验, 而许昌站气温上升率仅为 0.05℃/10 a, 未通过置信度检验, 表明该地年平均气温的上升趋势不显著。从总体空间分布上来看, 除许昌站外, 各个站点年平均气温均通过了置信度检验, 说明大部分地区年平均气温呈明显的上升趋势, 流域内站点的 M-K 检验 Z 值呈现东南高于西北的特点, 体现了明显的地域分异规律。

在年平均最高气温的 M-K 趋势检验中淮河流域有 45 个站点检验统计量 $|Z| > 2.576$, 通过 99% 的置

信度检验, 气温显著上升(图 5); 12 个站点通过了 95% 的置信度检验, 零散分布在流域中部和北部; 6 个站点通过了 90% 的置信度检验, 主要集中在流域中部地区; 而开封等 4 个站点未通过 90% 的置信度检验, 年平均最高气温的上升趋势不显著。整体来看, 空间分布上, 淮河流域西南地区 M-K 检验 Z 值较高, 升温较东部和中部地区更为显著。

在年平均最低气温中除许昌站外其余 66 个气象站点的检验统计量 Z 均大于 2.576, 通过了 99% 的置信度检验, 年最低气温呈极显著上升趋势(图 6)。与年平均气温、年平均最高气温相比, 淮河流域年平均最低气温的上升趋势更为明显。

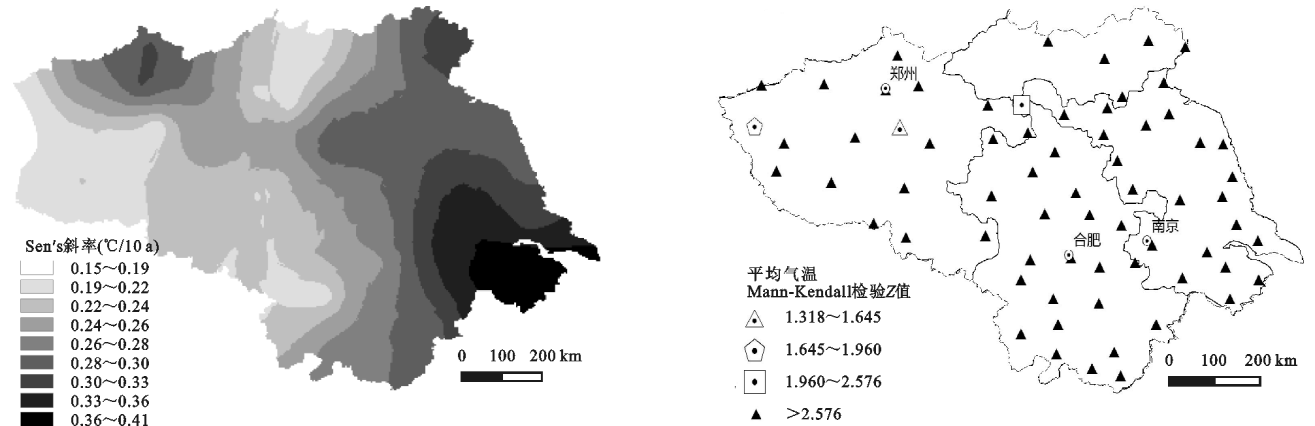


图 4 淮河流域年平均气温空间变化趋势

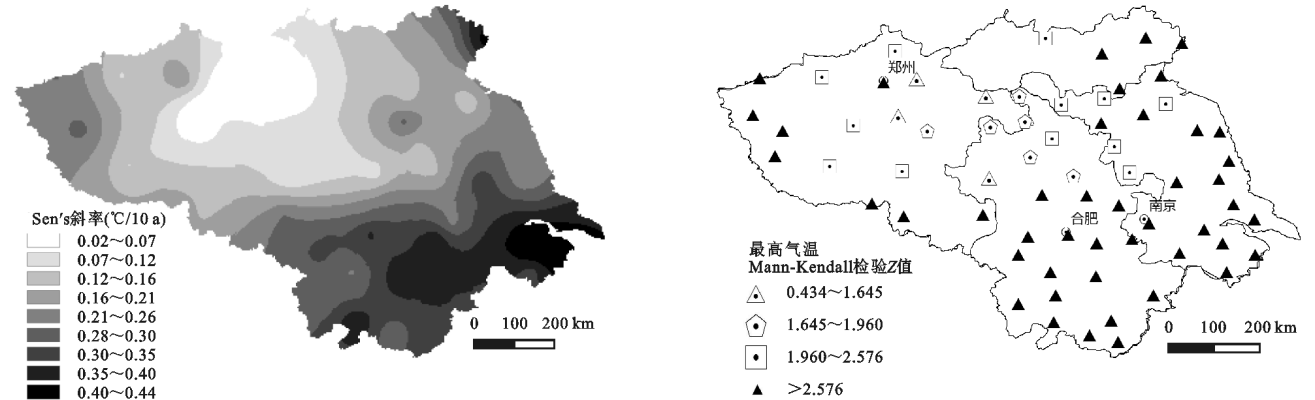


图 5 淮河流域年最高气温空间变化趋势

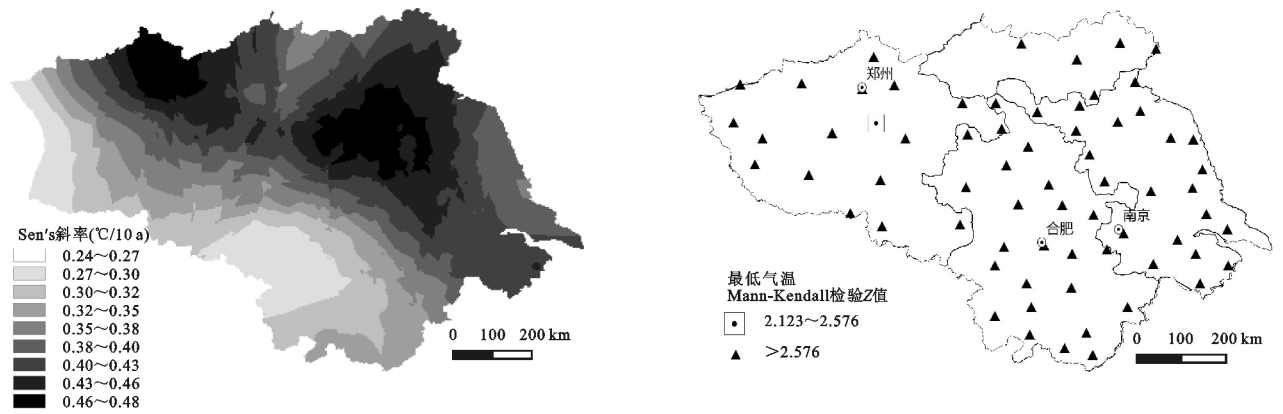


图 6 淮河流域年最低气温空间变化趋势

2.4 淮河流域气温突变检验

应用 Mann-Kendall 突变检验方法对 1965—2016 年淮河流域气温序列进行突变分析,发现(图 7A)的正序列曲线 UF 与反序列曲线 UB 在 1996 年存在交点并位于 0.05 信度线内,说明流域年平均气温突变时间为 1996 年,并在 1998 年开始显著升温。最高气温(图 7B)与最低气温(图 7C)的 UF 与 UB 曲线在 1992 年存在交点,表明两者的突变年份均为 1992 年,说明最高气温在 1992

年发生了由低到高的突变,并在 2002 年气温显著上升;最低气温于 1992 年发生突变,并在 1993 年升温显著。最高气温和最低气温都呈现“上升—下降—上升—显著上升”的变化过程,而平均气温在 1983—1990 年期间 UF 统计量为负值,说明在这个期间淮河流域的平均气温是呈现下降趋势的。总的来看淮河流域气温都在 90 年代呈现突变性增温,但平均气温的突变要滞后于年平均最高和最低气温。

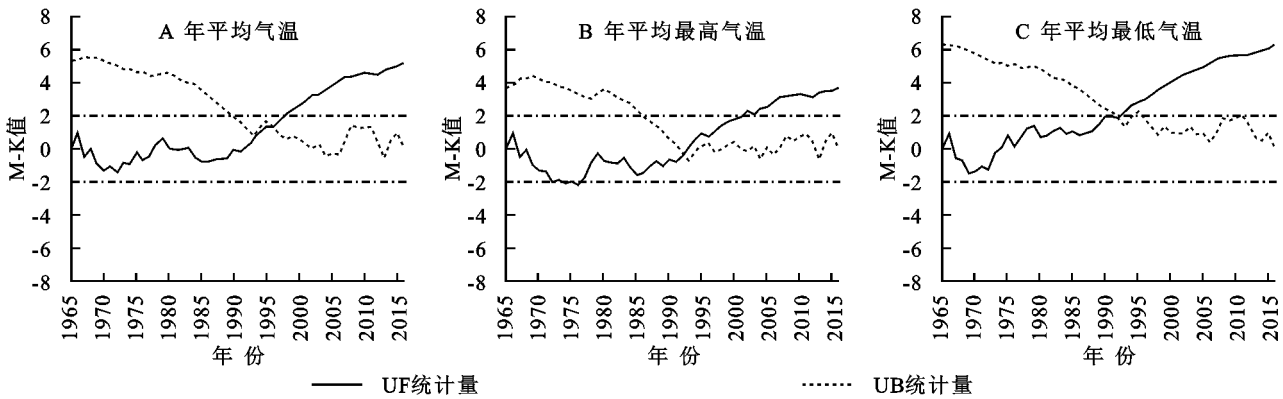


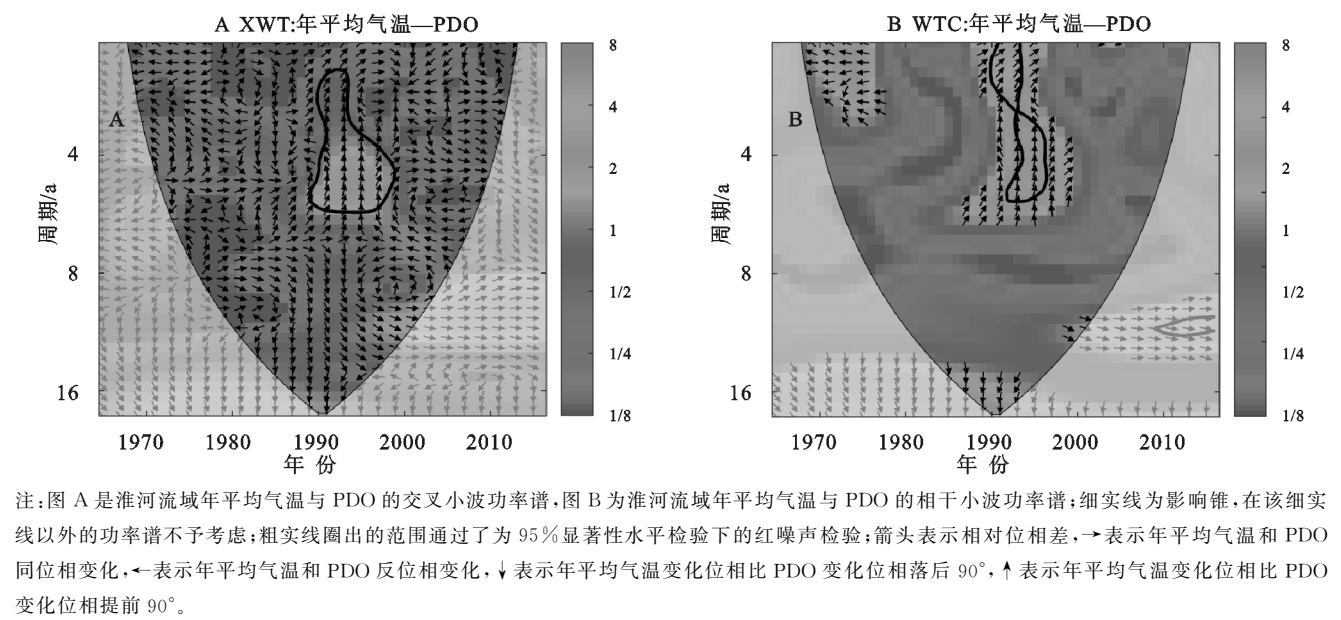
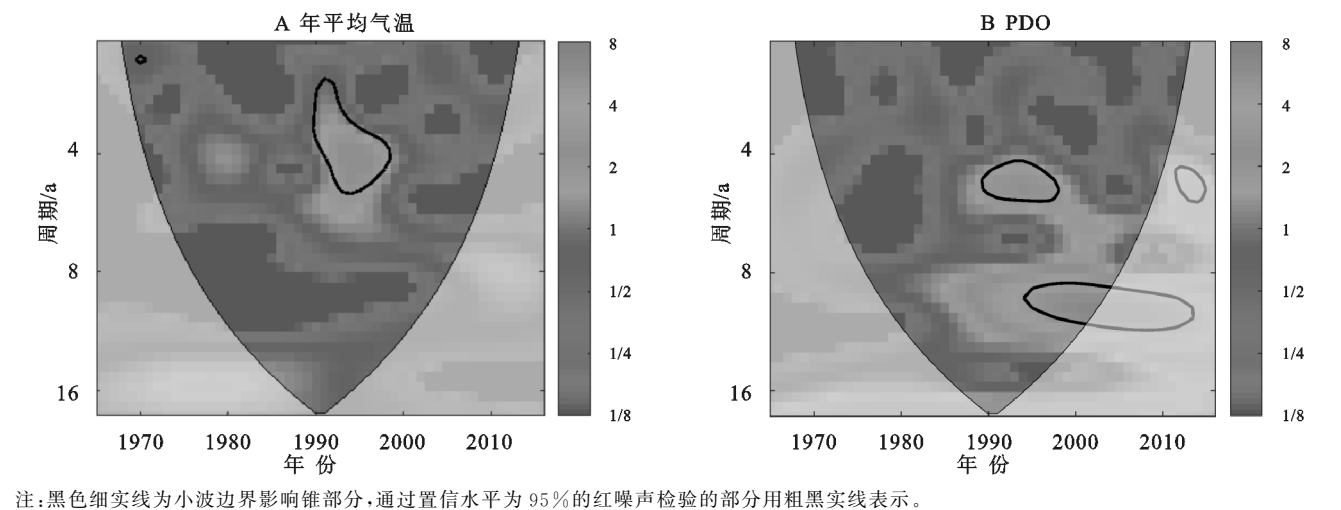
图 7 淮河流域不同类型气温突变检验

2.5 淮河流域年平均气温与 PDO 的关系

2.5.1 基于连续小波转换的年平均气温和 PDO 的振荡特征 淮河流域年平均气温和 PDO 指数在不同时间段呈现出各种振荡周期(图 8)。年平均气温在 1989—1998 年之间存在 1.3~5.5 a 的显著周期(通过置信度水平 95% 的红噪声检验);PDO 指数在 1989—1998 年、1994—2001 年分别存在 4.2~5.5 a, 8.5~9.8 a 的显著周期(通过置信度水平 95% 的红噪声检验),而在 2001—2014 年之间存在 1.3 a 的显著周期,但位于影响锥之外,未通过显著水平 $\alpha=0.05$ 下的红色噪音标准谱检验。对比可知,淮河流域年平均气温和 PDO 指数在一定阶段存在时频域相关。

2.5.2 淮河流域年平均气温和 PDO 交叉小波变换和小波相干谱分析 对淮河流域年平均气温和 PDO (太平洋年代际涛动)进行交叉小波变换(XWT)和小

波相干谱(WTC)分析,进一步分析淮河流域年平均气温和 PDO 在周期上的共同特征。交叉小波变换重点突出淮河流域年平均气温和 PDO 在高能量区的相互关系,相干小波变换则重点突出淮河流域年平均气温和 PDO 在低能量区的相互关系。从图 9A 中看出,交叉小波功率谱高能量区在 1989—1999 年表现出 3~6 a 的共振周期(通过了通过置信度水平 95% 的红噪声检验),平均位相角接近垂直向上 90° ,则位相谱年平均气温变化位相比 PDO 提前。从小波相干功率谱低能量区(图 9B)中可以看出,在 1990—1993 年存在 2~4 a 的共振周期(小波相干谱相关性通过置信度水平 95% 的红噪声检验),年平均气温与 PDO 呈正相关,前者比后者提前两个月(平均相位角右向上 60°);在 1991—1997 年存在 2.5~5.5 a 的共振周期且接近同位相变化。



2.5.3 PDO 冷暖相位转变对淮河流域气温的影响

为了进一步探究淮河流域气温与 PDO 之间的联系,我们根据 PDO 的年代际振荡特征,对研究时段进行冷暖相位划分,将 PDO 指数进行 11 a 滑动平均处理,指数大于零(小于零)则称为 PDO 暖相位(冷相位)^[45],通过分析结果可知在研究时段内 1965—1976 年基本处于冷相位,1977—2000 年 PDO 转变为暖相位,2001—2016 年 PDO 又向冷相位发展。通过对流域不同相位下的年平均气温进行插值,由插值结果可知当 PDO 处于冷相位时,淮河流域的年平均气温比 PDO 处于暖相位时年平均气温高(图 10)。这与以往研究发现的在 PDO 暖位相期,长江中下游地区的气温异常偏低是一致的^[46]。从冷暖相位的年平均气温差插值图中可以看出,流域中部地区在 PDO 冷相位与暖相位时的气温差异较小。由此可见,PDO 处于不同相位时地区气温的变化也会产生差异。

3 讨论

淮河流域年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温的突变时间均在 20 世纪 90 年代发生突变,3 类气温突变前后均呈上升趋势,与 1950 年以来全球气候变暖状况加剧相呼应^[47]。

PDO 作为一种年代到年代际时间尺度上的气候变率强信号,可直接影响太平洋及其周边地区(包括中国)气候产生年代际变化^[46],对区域乃至全球气候变化具有重要的影响^[48-51]。在国内相关学者主要探讨了 PDO 对中国降水^[42]、季节性气温^[52]、气候变率^[46]、干湿变化^[53]等方面的影响,而对局域范围内 PDO 与年际尺度气温之间的关系研究较少。本文利用小波分析等方法,探讨了淮河流域气温与 PDO 之间的关系,发现淮河流域平均气温存在 1.3~5.5 a 的显著周期,PDO 在 4.2~5.5 a 存在显著周期,虽然尺

度上并不能完全对应,但有交叉部分,表明淮河流域年平均气温与 PDO 有相似的震荡周期特征。在高能量区淮河流域年平均气温和 PDO 的相关性主要

体现出 3~6 a 的共振周期,在低能量区两者存在 2~4 a 和 2.5~5.5 a 的共振周期,表明 PDO 对淮河流域年平均气温在较短年际周期交替上有重要的影响。

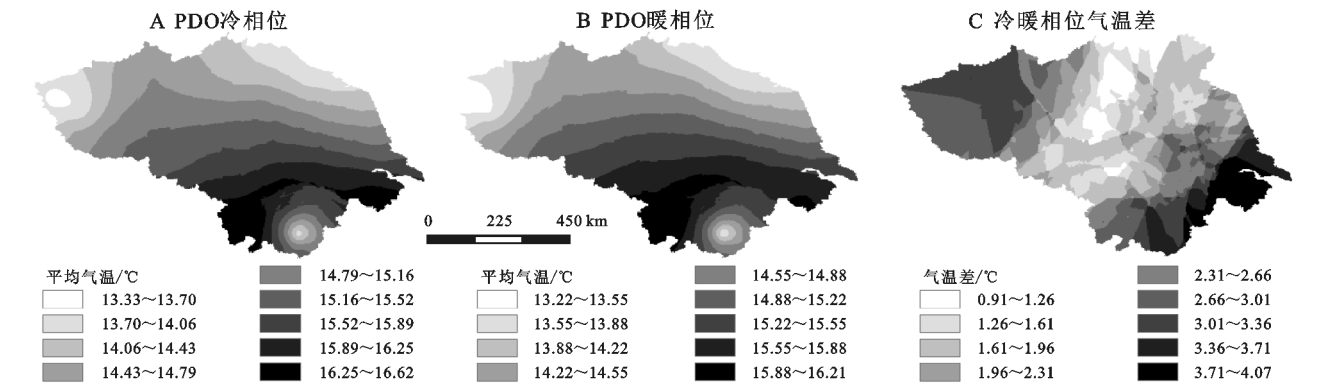


图 10 PDO 不同相位所对应的流域年平均气温状况

PDO 处于暖位相(即“正相位”)时,热带中东太平洋异常暖,阿留申低压加强,西风加强,北太平洋中西部温度较低,赤道中东太平洋、北美沿岸和阿拉斯加湾偏暖,大气环流由此产生变化,直到几十年之后才逐渐变冷,PDO 冷相位(即“负相位”)时,太平洋出现类似于拉尼娜现象,赤道附近的深海冷水涌上洋面,大气圈变冷^[54-57]。由插值结果可知当 PDO 处于冷相位时,淮河流域的年平均气温比 PDO 暖相位时高(图 10),朱益民等^[46]曾分析了 PDO 在海洋中的特征及其与东亚大气环流和中国气候变率的联系,其结果与本文结果具有一致性。但在之前众多学者分析中^[29,50,57],当 PDO 处于年代际正(负)相位时,气温是普遍偏高(低)的,与本文的研究结论存在矛盾,这是淮河流域在 1976—1999 年温度的持续升高的积累所致。从 PDO 不同相位时淮河流域年平均气温变化趋势可以看出,在冷相位时期(1965—1976 年、2001—2016 年)流域年平均气温的变化趋势线斜率分别为-0.023 7,0.002 9(图 11)。表明在此阶段内流域年平均气温呈下降趋势或极不显著的升温,PDO 的相位转变是气候变暖停滞的原因之一^{—[58-59]}。

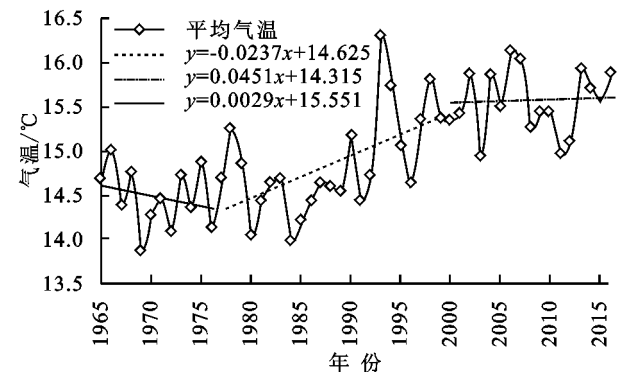


图 11 PDO 不同相位时流域气温变化趋势

由于本文所使用数据序列长度有限,在揭示流域长期气温时空格局变化上存在局限性和不足。本文

对于淮河流域年平均气温与 PDO 的关系只是进行了初步探讨,还需进一步分析 PDO 对研究区年平均气温变化的影响机理。

4 结论

(1) 在流域气温时空变化上,流域多年平均气温为 14.99℃,1965—2016 年淮河流域年平均气温、最高气温和最低气温均有不同程度的上升,其中年平均最低气温的上升趋势最为明显,气温变化趋势线斜率为 0.039 2。流域气温从南向北呈现递减趋势,南部黄山地区以及流域北部的沂蒙山和大别山山区海拔较高,受地形的影响,根据气温的垂直递减规律,三地区年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温均为淮河流域明显的低值中心。

(2) 在气温变率的空间分布中,淮河流域各个地区气温均呈上升趋势,但各地增温趋势存在差异,流域的平均气温升高态势呈现出东部沿海高,西部内陆低的空间格局,而最高气温在流域西南部升温较为显著,最低气温在流域西北地区的升温较为明显。年平均气温的突变主要发生在 1996 年,而年平均最高气温和年平均最低气温的突变则稍有提前(1992 年)。

(3) 在淮河流域年平均气温与 PDO 的关系上,淮河流域平均气温存在 1.3~5.5 a 尺度的年际振荡周期,呈现出与 PDO 指数相似的变化特点。高能量区表现出 3~6 a 的共振周期,平均气温变化位相比 PDO 提前;低能量区分别存在 2~4 a 和 2.5~5.7 a 的共振周期。PDO 冷暖相位转变对淮河流域气温变化具有显著影响,当 PDO 处于冷相位时,淮河流域的年平均气温比 PDO 暖相位时高。

参考文献:

[1] 秦大河, Thomasstocker. IPCC 第五次评估报告第一工

- 作组报告的亮点结论[J].气候变化研究进展,2014,10(1):1-6.
- [2] Oliver J E. Intergovernmental Panel in Climate Change (IPCC)[J]. Encyclopedia of Energy Natural Resource & Environmental Economics, 2013,26(2):48-56.
- [3] 任国玉,徐铭志,初子莹,等.近54年中国地面气温变化[J].气候与环境研究,2005,10(4):717-727.
- [4] 孙文,范昊明.全球变暖背景下松花江流域气温最新变化特征[J].水土保持研究,2018,25(3):97-104.
- [5] 张扬,白红英,苏凯,等.1960—2013年秦岭陕西段南北坡极端气温变化空间差异[J].地理学报,2018,73(7):1296-1308.
- [6] 王怀军,潘莹萍,陈忠升.1960—2014年淮河流域极端气温和降水时空变化特征[J].地理科学,2017,37(12):1900-1908.
- [7] 郝振纯,鞠琴,王璐,等.气候变化下淮河流域极端洪水情景预估[J].水科学进展,2011,22(5):605-614.
- [8] 叶正伟,刘育秀.南北气候过渡视角下的淮河流域气温空间分布与演化特征[J].水电能源科学,2018,213(5):7-11.
- [9] 金君良,何健,贺瑞敏,等.气候变化对淮河流域水资源及极端洪水事件的影响[J].地理科学,2017,37(8):1226-1233.
- [10] 邓汗青,柳春,何冬燕,等.淮河流域春夏季降水水位相变化特征[J].大气科学学报,2017,40(4):473-484.
- [11] 王珂清,曾燕,谢志清,等.1961—2008年淮河流域气温和降水变化趋势[J].气象科学,2012,32(6):671-677.
- [12] 高超,姜彤,翟建青.过去(1958—2007)和未来(2011—2060)50年淮河流域气候变化趋势分析[J].中国农业气象,2012,33(1):8-17.
- [13] 叶正伟,纪旭,刘育秀.典型南北气候过渡带地区气温的时间变化特征:以淮河流域为例[J].中国农业资源与区划,2018,39(3):122-131.
- [14] 叶金印,黄勇,张春莉,等.近50年淮河流域气候变化时空特征分析[J].生态环境学报,2016,25(1):84-91.
- [15] 刘洋,杨青,刘志辉,等.近130年来中亚干旱区典型流域气温变化及其影响因子[J].地理学报,2014,69(3):291-302.
- [16] 龚道溢,王绍武.大气环流因子对北半球气温变化影响的研究[J].地理研究,1999,18(1):31-38.
- [17] 李红军,江志红,刘新春,等.阿克苏河径流变化与北大西洋涛动的关系[J].地理学报,2008,63(5):491-501.
- [18] 王永波,施能.近45a冬季北大西洋涛动异常与我国气候的关系[J].大气科学学报,2001,24(3):315-322.
- [19] 谭桂容,陈海山,孙照渤,等.2008年1月中国低温与北大西洋涛动和平流层异常活动的联系[J].大气科学,2010,34(1):175-183.
- [20] 丁之勇,董义阳,鲁瑞洁.1960—2015年中国天山南、北坡与山区极端气温时空变化特征[J].地理科学,2018,38(8):1379-1390.
- [21] 董安祥,李耀辉,张宇,等.1942年中国北方八省市大旱的成因[J].地理科学,2014,34(2):205-210.
- [22] 王绍武,罗勇,赵宗慈,等.对变暖停滞的思考[J].气候变化研究进展,2014,10(4):303-306.
- [23] Minobe S, Mantua N. Interdecadal modulation of inter-annual atmospheric and oceanic variability over the North Pacific[J]. Progress in Oceanography, 1999,43(2/4):163-192.
- [24] Schneider N, Cornuelle B D. The forcing of the Pacific decadal oscillation[J]. Journal of Climate, 2005, 18(21):4355-4373.
- [25] Steven R H, Nathan J M. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989[J]. Progress in Oceanography, 2000,47(2):103-145.
- [26] Rycroft M J. Decadal Climate Variability: Dynamics and Predictability [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008,59(17):2247-2247.
- [27] Bond N A, Harrison D E. The Pacific Decadal Oscillation, Air-Sea Interaction and Central North Pacific Winter Atmospheric Regimes [J]. Geophysical Research Letters, 2000,27(5):731-734.
- [28] 丁一汇,王会军.近百年中国气候变化科学问题的新认识[J].科学通报,2016,61(10):1029-1041.
- [29] 徐忆菲,彭丽霞,李季,等.1951—2013年我国冬季气温年代际变化与PDO的关系[J].气象科技,2017(4):89-97.
- [30] 秦剑,田永丽,任菊章,等.太平洋年代际涛动与云南夏季气温的年代际变化[J].高原气象,2004,23(增刊):69-76.
- [31] 张建忠.2003年淮河流域大洪水[J].气象知识,2003(5):2-4.
- [32] 王怀军,潘莹萍,陈忠升.1960—2014年淮河流域极端气温和降水时空变化特征[J].地理科学,2017,37(12):1900-1908.
- [33] 张平,延军平,王文静,等.1960—2014年淮河流域5省旱涝变化[J].浙江大学学报:理学版,2017,44(3):345-353.
- [34] 王倩,刘雪华,吕宝磊.基于SPOT-VGT数据的流域植被覆盖动态变化及空间格局特征:以淮河流域为例[J].地理科学进展,2013,32(2):270-277.
- [35] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997,78(6):1069-1080.
- [36] Mann H B. Nonparametric Tests Against Trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [37] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. Global & Plan-

- etary Change, 2013, 100(1): 172-182.
- [38] 刘惠英, 任洪玉, 张平仓, 等. 香溪河流域近 60 年来降雨量变化趋势及突变分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 282-286.
- [39] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 705-716.
- [40] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [41] 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.
- [42] 董蕾, 张明军, 王圣杰, 等. 基于格点数据的西北干旱区极端降水事件分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2048-2057.
- [43] Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N, et al. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 18(12): 2253-2256.
- [44] 翟盘茂, 任福民. 中国近四十年最高最低温度变化[J]. 气象学报, 1997, 55(4): 418-429.
- [45] 韩子轩, 苏涛, 支蓉, 等. 不同太平洋年代际振荡和 ENSO 位相下大气水分收支变化对北半球冬季太平洋蒸发量的影响[J]. 大气科学, 2017, 41(6): 1316-1331.
- [46] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J]. 测绘科学, 2003, 61(6): 641-654.
- [47] Allen S K, Plattner G K, Nauels A, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. An overview of the Working Group 1 contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)[J]. Computational Geometry, 2007, 18(2): 95-123.
- [48] Meehl G A, Hu A, Santer B D, et al. Contribution of the Interdecadal Pacific Oscillation to twentieth-century global surface temperature trends[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1005-1008.
- [49] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 围绕全球变暖“停滞”的争论[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(6): 571-574.
- [50] 杜勤勤, 张明军, 王圣杰, 等. 中国气温变化对全球变暖停滞的响应[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1748-1764.
- [51] 苏京志, 温敏, 丁一汇, 等. 全球变暖趋缓研究进展[J]. 大气科学, 2016, 40(6): 1143-1153.
- [52] 赵建, 任周鹏, 王劲峰, 等. 1961—2013 年东北与华北气温变化速度空间差异[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(7): 909-914.
- [53] 马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J]. 大气科学, 2006, 30(3): 464-474.
- [54] 刘超. PDO 对海平面变化趋势的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
- [55] Mantua N J, Hare S R. The Pacific Decadal Oscillation[J]. Journal of Oceanography, 2002, 58(1): 35-44.
- [56] 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.
- [57] 王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 中国极端气温季节变化对全球变暖减缓的响应分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 36-46.
- [58] Held I M. Climate science: The cause of the pause[J]. Nature, 2013, 501(7467): 318-319.
- [59] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. IPCC 第 5 次评估报告问世[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(6): 436-439.

(上接第 239 页)

- [14] 刘守江, 张斌, 杨清伟, 等. 汶川地震非规范滑坡体上植被的自然恢复能力研究: 以彭州银厂沟谢家店子滑坡体为例[J]. 山地学报, 2010, 28(3): 373-378.
- [15] 赵旦, 张森, 于名召, 等. 汶川地震灾后农田和森林植被恢复遥感监测[J]. 遥感学报, 2014, 18(4): 958-970.
- [16] 李丹雄. 北川县地震滑坡迹地植被恢复适宜植物研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [17] 张坤. 汶川地震极重灾区受损体植被恢复调查分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [18] 田佳, 田涛, 赵廷宁, 等. 微立地因子植被恢复法在汶川地震植被重建中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(5): 16-20.
- [19] 王育松, 上官铁梁. 关于重要值计算方法的若干问题[J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2010, 33(2): 312-316.
- [20] 奇凯, 张春雨, 侯继华, 等. 赤峰市沙地油松林草本植物多样性及种间关联动态[J]. 生态学报, 2010, 30(18): 5106-5112.
- [21] 李波, 张曼, 赵璐玲, 等. 汶川地震滑坡体自然植被恢复及影响因子: 以龙溪—虹口自然保护区为例[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(3): 468-473.