

目次

2018~2020年北京市大气PM_{2.5}污染特征及改善原因 刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明 (2409)

京津冀城市群冬季二次PM_{2.5}的时空分布特征 姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹 (2421)

COVID-19管控前后不同污染阶段PM_{2.5}中二次无机离子变化特征 姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹 (2430)

基于在线观测的太原市冬季PM_{2.5}中金属元素污染水平及来源解析 崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明 (2441)

青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源 王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双 (2450)

湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 庞晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小明, 郭送军 (2461)

2021年夏季新乡市区臭氧超标日污染特征及敏感性 侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (2472)

台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (2481)

天津市空气污染的健康影响分析 华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (2492)

2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析 杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮 (2502)

1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析 王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞 (2518)

长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应 钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军 (2528)

宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价 李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰 (2539)

微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析 陆嘉玮, 徐晨晔, 胡纯, 刘树仁, 李方 (2551)

黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇 (2562)

三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险 张雪, 朱波 (2574)

霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价 刘海, 赵国红 (2583)

基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析 刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明 (2592)

河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥 (2601)

饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向 钟婷婷, 林涛, 刘威 (2613)

镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制 张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandyar Shahab (2622)

纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑 郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞 (2635)

富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷镉的吸附性能与机制 何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂 (2646)

富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制 欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 邝晓彤 (2661)

污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制 周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣 (2671)

森林生态系统对大气氮沉降降低的响应 谢丹妮, 仰东星, 段雷 (2681)

气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响 张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲 (2694)

西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析 徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春 (2704)

不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响 马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇 (2715)

氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响 刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波 (2724)

互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响 李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞 (2735)

黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征 姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼 (2746)

黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征 许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮 (2756)

短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响 简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉 (2767)

福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应 车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明 (2775)

中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议 赵晓峰, 雷梅, 陈同斌 (2786)

基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展 龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬 (2799)

河北省土壤化学元素的背景值与基准值 张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达 (2817)

非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析 邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华 (2829)

基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价 余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀 (2838)

长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险 李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元 (2849)

贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征 马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峥, 王惠艳, 彭敏, 张富贵 (2856)

贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估 马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇 (2868)

山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价 郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉 (2879)

P对小麦Cd和As吸收与转运的影响 王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅 (2889)

施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响 李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯 (2899)

广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析 马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚 (2908)

五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征 罗正明, 刘晋仙, 胡砚秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (2918)

天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响 于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜璋琳, 王英成 (2928)

紫云英还田与化肥减量配施对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响 张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭 (2936)

长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响 胡颖榭, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森 (2945)

高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响 张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进 (2955)

菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征 赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰 (2965)

中国碳排放及影响因素的市域尺度分析 吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘 (2974)

碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验 房琪, 李绍萍 (2983)

垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例 陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽 (2995)

1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量分析 苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡 (3003)

《环境科学》征订启事(2480) 《环境科学》征稿简则(2538) 信息(2766, 2798, 2927)

1950 ~ 2019 年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析

苏越¹, 路春燕^{1,2,3*}, 黄雨菲^{1,2}, 苏艳琳^{1,3}, 王自立^{1,3}, 雷依凡¹

(1. 福建农林大学计算机与信息学院, 福州 350002; 2. 福建省资源环境空间信息统计研究中心, 福州 350002; 3. 生态与资源统计福建省高校重点实验室, 福州 350002)

摘要: 全球变暖和人类活动加剧引起区域气候不稳定, 高温事件发生频次和持续性增强, 生态环境保护和经济社会发展面临严峻威胁. 采用 Mann-Kendall 检验法和一元线性回归法探讨 1950 ~ 2019 年中国季节平均最高气温 (AMT) 时空演变特征, 并结合线性相关、偏线性相关以及小波分析揭示中国各季节 AMT 与大气环流间的联系. 结果表明: ① 时间尺度上, 各季节 AMT 均呈显著上升趋势, 春、夏、秋和冬季 AMT 上升幅度分别为 1.21、0.08、1.81 和 0.25℃, 其突变时间主要集中于 20 世纪 90 年代至 21 世纪初. ② 空间分布上, 除夏季以外, 其它季节 AMT 平均变化率由南向北逐渐增加, 但其增加程度各不相同, 其中春冬季东北和西北地区变化速率最快. ③ 各季节 AMT 与大气环流因子间存在复杂关系, 其能量强度在不同频域上具有显著差异. 其中太平洋年代际涛动与夏季 AMT 呈显著负相关, 北大西洋涛动对夏秋冬季 AMT 变化产生较大程度正向驱动, 北极振荡对各季节 AMT 均具有明显正向驱动作用, 厄尔尼诺-南方涛动因年份不同对春夏季 AMT 的短期变化存在显著正向或负向影响. 研究结果可为我国制定科学有效的气候变化应对方案提供理论依据和技术参考.

关键词: 季节平均最高气温 (AMT); 大气环流; Mann-Kendall 检验; 交叉小波; 小波相干; 遥相关分析

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-3003-14 DOI: 10.13227/j.hjkk.202205258

Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019

SU Yue¹, LU Chun-yan^{1,2,3*}, HUANG Yu-fei^{1,2}, SU Yan-lin^{1,3}, WANG Zi-li^{1,3}, LEI Yi-fan¹

(1. College of Computer and Information Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Research Centre of Resource and Environment Spatial Information Statistics of Fujian Province, Fuzhou 350002, China; 3. Key Laboratory of Ecology and Resources Statistics of Fujian Province Universities, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Global warming and intensified human activities have led to regional climate instability with increasing frequency and the persistence of high-temperature climate events. Eco-environmental protection and socio-economic development have been faced with rigorous threats. Taking the monthly maximum temperatures from 1950 to 2019 as the basic data source, the spatio-temporal evolution characteristics of seasonal average maximum temperature (AMT) were discerned using the Mann-Kendall test and unary linear regression method in China from 1950 to 2019. Combined with linear correlation, partial linear correlation, and wavelet analysis, the correlation between seasonal AMT characteristics and atmospheric circulations was analyzed quantitatively. The results showed that: ① the AMT in all seasons had a significant upward trend, with an increase of 1.21, 0.08, 1.81, and 0.25℃ in spring, summer, autumn, and winter, respectively. The abrupt change times of the AMT were concentrated in the 1990s to the early 21st century. ② In terms of spatial distribution, except for in summer, the average trend rates of AMT in other seasons increased gradually from south to north, although the increasing degrees were different. Among them, the AMT change rate in spring-winter was the fastest in northeast and northwest China. ③ There were complex correlations between the AMT of every season and atmospheric circulation factors, and the distribution of the interrelation energy varied significantly in different frequency domains. Specifically, the Pacific Decadal Oscillation had a significant negative correlation with AMT in summer. The North Atlantic Oscillation had an active effect on AMT changes in summer, autumn, and winter. The Arctic Oscillation had a significant positive driving effect on AMT in all seasons, and there were significant positive or negative influences on the short-or long-term changes of AMT in spring and summer due to the different El Niño-Southern Oscillation years. These results could provide a theoretical basis and technical reference for China to formulate scientific and effective response plans of climate change.

Key words: seasonal average maximum temperature (AMT); atmospheric circulation; Mann-Kendall test; cross wavelet; wavelet coherence; tele-correlation analysis

在全球气候变化和人类活动强度增加的双重驱动下, 高温天气频发且持续性增强, 生态系统平衡和社会经济发展均面临前所未有的危机和挑战, 高温气象灾害已成为世界各国共同关注的问题之一^[1]. 联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在第五次气象评估报告指出, 近百年来全球气温呈现显著变暖趋势, 持续性高温事件所导致的干旱、森

林火灾等气象灾害发生频次显著增加^[2,3]. 2006 年中国川渝地区^[4] 和 2018 年欧洲西、北部^[5] 均遭遇严重的高温伏旱, 致使当地农作物严重受损. 同时,

收稿日期: 2022-05-24; 修订日期: 2022-08-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (42101392); 福建省自然科学基金项目 (2020J01572); 福建农林大学杰出青年研究人才计划项目 (XJQ201920)

作者简介: 苏越 (1999 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为气候变化空间统计, E-mail: suyue@fafu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: luchunyan@fafu.edu.cn

持续性高温可通过降低植被的含水量增大森林大火的可燃性和传播率等,导致火灾快速升级至极端水平,如 2010 年我国东北地区^[6]和 2019 年澳大利亚^[7],因高温引起的持续性干旱造成特大森林火灾.此外,高温天气频发对人类身体健康与物质财产安全亦产生多种不利影响,一方面,高温不仅影响人体舒适度,导致工作效率降低,同时易诱发多种生理疾病,如中暑、心脑血管疾病等,严重可致人死亡^[8,9].另一方面,高温事件易对社会经济造成严重损失,如 2003 年和 2010 年欧洲发生高温热灾事件,导致数十亿美金的经济损失^[10]; 1988~2004 年高温引起的旱灾致使我国经济损失近 756.88 亿元^[11].因此,明确高温变化规律对于维持生态系统平衡与人类社会经济可持续发展均具有重要意义.

针对高温变化问题,国内外学者已展开了研究,并取得众多成果.早期研究主要采用气象站点数据,多关注于最高气温变化趋势的分析,注重在时间尺度上量化高温演变过程.任国玉等^[12]利用中国 600 多个气象站资料分析 1951~2004 年全国气候变化趋势,结果指出我国最高气温不断上升,夏季炎热期延长;陈建宇等^[13]利用 3 个气象站资料研究陕西榆林地区 1954~2013 年最高气温年际变化趋势,结果表明该区最高气温显著上升;Gocic 等^[14]对 1980~2010 年塞尔维亚地区各气象变量的年际变化趋势进行分析,发现该区最高气温呈显著上升趋势.随着研究不断深入,在“时”与“空”多尺度分析的基础上,高温天气变化驱动因素的研究日益细致,逐渐探究其与大气环流间的联系,如北大西洋涛动^[15](North Atlantic Oscillation, NAO)、太平洋年代际涛动^[16](Pacific Decadal Oscillation, PDO)、北极振荡^[17](Arctic Oscillation, AO)和厄尔尼诺-南方涛动^[18](El Niño-Southern Oscillation, ENSO)等大尺度大气环流因子已相继被研究.此外,随着空间技术不断发展,已有学者采用空间降尺度方法对低分辨率的网格数据集进行处理,以获得高分辨率的网格气候数据集研究区域尺度的气候特征^[19].尽管以往对于高温变化驱动因素的研究取得了众多成果,但研究多采用气象站点数据^[12,13,17],主要关注一个或两个大气环流因子与高温间的相关关系^[15~17],且在时间尺度上多以年计量^[13,17,20],而针对较小时间尺度的研究较少,由此使得研究结果往往存在片面性,不易发现细微差异;同时,截至目前针对我国全国范围最高气温变化趋势及其影响因素量化分析相对较少,且大气环流对我国最高气温的影响尚不完全清楚.

就研究方法而言,目前专家学者多采用 M-K 检

验^[17,21]、累积距平^[22,23]、线性回归^[13,24]、滑动 T 检验^[25,26]、R/S 方法^[20,26]和小波分析法^[27,28]等对区域气候变化进行研究,其中 M-K 检验具有研究样本无需服从正态分布,不易受少数异常值干扰,且其计算过程简便,检验范围广的优势,更适用于研究气候变化的趋势及突变情况^[22,29];小波分析法能够分析时频域中两序列多时间尺度遥相关关系,并揭示两序列在高/低能量区的位相关系及其周期性特征,更适用于分析气候变化与大气环流间的联系^[17,28],但综合利用 M-K 检验和小波分析法进行气候变化的研究却少有报道.

鉴于以上,本研究利用空间降尺度方法生成的高分辨率气温数据集,在分析 1950~2019 年我国季节平均最高气温(average maximum temperature, AMT)时空变化趋势及突变特征的基础上,综合利用交叉小波(cross wavelet transform, XWT)和小波相干(wavelet coherence, WTC)等多种方法探究各季节 AMT 与典型大气环流因子间的多尺度相关关系,以期为中国高温气象灾害评估和预测提供科学参考和理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

我国位于东半球北部,介于 $73^{\circ}33'E \sim 135^{\circ}05'E$, $3^{\circ}51'N \sim 53^{\circ}33'N$ 间,国土面积约 $9.60 \times 10^6 \text{ km}^2$,地貌类型多样,地势西高东低,呈三级阶梯状分布.境内山脉众多,按其走向可分为东西走向、东北-西南走向、西北-东南走向、南北走向和弧形山系等 5 种类型.整体上,我国经度与纬度跨度广,加之地势高低不同,地形及山脉走向多样,形成了复杂的气候类型^[30].统计数据显示,2019 年我国平均气温为 10.34°C ,较常年同期升高 0.79°C ,且有 64 个站点日最高气温突破历史极值,并发生不同程度的高温气象灾害(<http://www.cma.gov.cn/>).

1.2 数据来源及预处理

1950~2019 年中国逐月最高气温数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>),该数据集空间分辨率为 0.0083333° (约 1 km),数据的绝对误差为 1.28°C .该数据具有时间跨度长、数据完整性好和可靠性强等特点,地理范围涵盖除南海岛礁与岛屿外的中国陆地范围.通过对月度最高气温进行均值处理得到各季节 AMT 数据.需说明的是,本研究根据国家气象划分方法对季节进行划分,即:3~5 月为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季,12 月至翌年 2 月为冬季.

为探究各季节 AMT 与大气环流间的耦合关系,

本研究选取研究时段内 4 种最具代表性的大尺度大气环流因子进行分析,即北极振荡(AO)、北大西洋涛动(NAO)、太平洋年代际涛动(PDO)和厄尔尼诺-南方涛动(ENSO),各大气环流因子均以指数形式表示,逐月 AO、NAO、PDO 和 ENSO 数据均来源

于美国国家气象局气候预报中心(<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/climwx.shtml>),并通过均值处理得到各季节 4 个大气环流因子数据,大气环流因子数据的详细信息见表 1。

表 1 各大气环流因子数据详细信息

Table 1 Detailed data information of atmospheric circulation factors

气候指标	时间跨度(年-月)	取值范围 ¹⁾	气候指标定义
AO	1950-01~2019-12	-3.76~3.49	北半球热带外地区海平面气压场经验正交函数(EOF)的第一主分量
NAO	1950-01~2019-12	-3.18~3.04	亚速尔群岛与冰岛间的标准化海平面气压差
PDO	1950-01~2019-12	-3.60~3.51	太平洋 20°N 以北月值海表温度 EOF 后第一模态的时间系数
ENSO	1950-01~2019-12	-2.09~2.71	Niño 3.4 区域(5°N~5°S,120°W~170°W)平均海表温度距平值

1) 正值表示正相位, 负值表示负相位

1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 检验

为明确中国季节 AMT 的时间变化趋势及突变特征,本研究采用 M-K 检验分析各季节 AMT 的变化率与突变点。M-K 检验包括 M-K 趋势检验和 M-K 突变检验。假设某要素的时间序列为 x_1, x_2, \dots, x_n , 则 M-K 趋势检验的基本原理可表示为^[29]:

$$S_i = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & (x_i - x_j > 0) \\ 0, & (x_i - x_j = 0) \\ -1, & (x_i - x_j < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Var}(S) = n \times (n-1)(2n+5)/18 \quad (3)$$

$$Z_c = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & (\text{if } S > 0) \\ 0, & (\text{if } S = 0) \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & (\text{if } S < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \quad (\forall 1 \leq i \leq j \leq n) \quad (5)$$

式中, S 服从正态分布, sgn 为符号函数, β 为斜率。在给定的 α 置信水平上, 如果 $|Z_c| \geq Z_{(1-\alpha/2)}$, 则气象因素的变化趋势显著。如果 $\beta > 0$, 则表示气候要素呈上升趋势, 反之亦然。

M-K 突变检验^[31]的具体计算过程为:

$$d_k = \sum_{i=1}^k y_i \quad (1 \leq k \leq n) \quad (6)$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (7)$$

在此基础上,若原序列随机且独立,则定义统计量 UF_k :

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{Var}(d_k)}} \quad (1 \leq k \leq n) \quad (8)$$

$$E(d_k) = k(k-1)/4 \quad (9)$$

$$\text{Var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$$

$$(1 \leq k \leq n) \quad (10)$$

引用公式(6)~(10)到反序列 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 中, 同时使 $UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1)$, 若 UF_k 曲线和 UB_k 曲线出现交点, 且交点位于置信区间内, 则该点为突变点。

1.3.2 年际变化趋势分析

一元回归分析模型^[32]可通过回归方程的斜率(Slope)反映空间要素在时间尺度的变化趋势和强度。在本研究中利用一元回归分析模型计算 1950~2019 年研究区各季节 AMT 的年际平均变化趋势, 其计算公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times P_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n P_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (11)$$

式中, n 为所研究时间序列长度; P_i 为第 i 年某季节 AMT。

1.3.3 相关分析

为客观地量化各大气环流因子与各季节 AMT 的相关程度,本研究综合利用线性相关系数(即 Pearson 相关系数)^[33]与偏线性相关系数^[34]进行分析,其计算公式如下:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{h=1}^n (x_{ih} - \bar{x}_i)(x_{jh} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n (x_{ih} - \bar{x}_i)^2 \sum_{h=1}^n (x_{jh} - \bar{x}_j)^2}} \quad (12)$$

式中, n 为所研究时间序列长度; h 为第 h 年; \bar{x}_i 为变量 x_i 的样本均值; \bar{x}_j 为变量 x_j 的样本均值。

$$r_{ij, hml} = \frac{r_{ij, hm} - r_{il, hm} \cdot r_{jl, hm}}{\sqrt{(1 - r_{il, hm}^2)(1 - r_{jl, hm}^2)}} \quad (13)$$

式中, $r_{ij, hml}$ 为排除变量 x_h, x_m 和 x_l 后, 变量 x_i 和 x_j 的偏相关系数。

1.3.4 小波分析

大气环流是影响区域气候变化的重要因素,其

变化与异常波动在空间上可同时或先/后对距离遥远的区域产生作用,由此产生的相关性称为遥相关^[35].基于小波变换与交叉谱构建的交叉小波(XWT)方法能够分析时频域中两序列多时间尺度遥相关关系,揭示两序列在高能量区的位相关关系^[27].具体原理为:假设两时间序列分别为 $X = \{x_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 与 $Y = \{y_i | i=1, 2, \dots, n\}$,连续小波变换分别为 $W_n^X(s)$ 和 $W_n^Y(s)$,则交叉小波谱可定义为:

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s) \quad (14)$$

式中, $W_n^{Y*}(s)$ 为 $W_n^Y(s)$ 的复共轭;交叉小波功率谱为 $W_n^{XY}(s)$ 的绝对值.

尽管交叉小波(XWT)可揭示两序列在高能量区的位相关关系,但对低能量区位相关关系解析不足^[27].为此,本研究采用小波相干(WTC)对各季节AMT与大气环流因子间的遥相关关系加以分析.具体定义如下:

$$R_n^2(n) = \frac{|S[s^{-1} W_n^{XY}(s)]|^2}{S[s^{-1} |W_n^X(s)|^2] \cdot S[s^{-1} |W_n^Y(s)|^2]} \quad (15)$$

式中, $|S[s^{-1} W_n^{XY}(s)]|^2$ 为两时间序列在某一频率下波动振幅的交叉积; $S[s^{-1} |W_n^X(s)|^2]$ 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 季节平均最高气温变化趋势及突变特征

基于M-K检验得到1950~2019年中国地区各季节AMT变化趋势及突变情况(表2和图1).由表2可知:在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下,近70年中国各季节AMT均呈显著上升趋势.其中,近70年各季节AMT趋势倾向率按降序排列分别为:春季 $[0.19 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ 、秋季 $[0.10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ 、夏季 $[0.08 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ 和冬季 $[0.02 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$.由图1可知:尽管各季节AMT总体均呈升温态势,但波动振荡现象亦与之共存,且发生突变年份各异.春季、夏季、秋季和冬季AMT分别在2002及2003、2005及2008、1994和1985年产生突变,且均为增温突变.总体而言,中国各季节AMT发生增温突变的时间略有差异,但突变时间均集中于20世纪末至21世纪初,且在突变后均呈显著增温趋势.

2.2 季节平均最高气温空间演变特征

通过年际平均变化趋势分析得到基于像元的各季节AMT变化率.由图2可知,1950~2019年各季节AMT变化趋势存在较大程度的空间异质性.整体

表2 1950~2019年各季节平均最高气温变化趋势及其显著性检验

Table 2 Trend analysis and significance test of seasonal average maximum temperature from 1950 to 2019

季节	指标			
	均值/ $^\circ\text{C}$	标准正态统计量 Z_c	显著性水平 ($\alpha=0.05$)	趋势倾向率 $^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$
春季	12.81	4.88	显著	0.19
夏季	24.46	3.19	显著	0.08
秋季	13.12	3.29	显著	0.10
冬季	-0.10	3.52	显著	0.02

上,除夏季以外,其它季节AMT的年际平均倾向率由南向北均逐渐增加,各季节AMT的变化趋势各不相同,其中西北和东北地区增温幅度较大,降温区域主要集中在华东、华中、华南和西南地区.就年际平均倾向率变化范围而言,近70年春季AMT的平均变化范围最大 $[-0.84 \sim 1.12 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,其次为秋季 $[-0.45 \sim 0.81 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,再次为冬季 $[-0.30 \sim 0.90 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,夏季变化范围最小 $[-0.14 \sim 0.82 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$.

空间上,春季AMT的升温速率由西南向东北逐渐增加,且增温区域约占我国陆地总面积的91.1%,主要分布在西北、东北、华北和华东地区,而降温区域主要集中在青藏高原和云贵高原区域.夏季AMT的平均倾向率由中部向四周逐渐增加,且绝大多数地区的平均变化速率处于-

$0.15 \sim 0.15 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间,变化幅度相对较小.秋季AMT升温幅度大于 $0.30 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的区域主要集中在塔里木盆地(约占我国陆地总面积的11.1%),降温区域主要集中在青藏高原.冬季AMT的年际平均倾向率空间分布与春季相似,由南向北逐渐增加,其中平均变化速率大于 $0.30 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 地区约占我国陆地总面积的48.5%,主要集中在西北、华北和东北地区,增幅相对较大.

2.3 季节平均最高气温与大气环流因子相关关系

利用线性相关分析和偏线性相关分析计算可知(表3),在 $\alpha=0.01$ 或 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下,各季节AMT均至少与一个大气环流因子呈显著线性或偏线性相关,即春、秋和冬季AMT均与AO呈显著正相关,夏季AMT与PDO呈显著负相关.

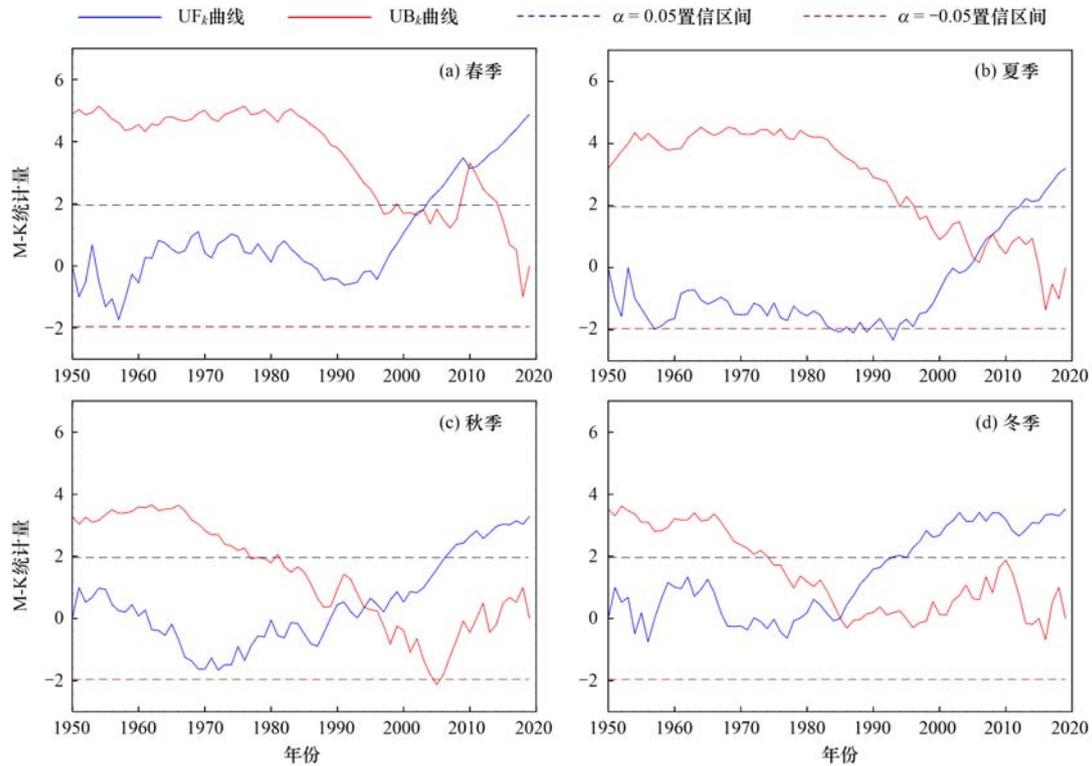


图 1 1950 ~ 2019 年各季节平均最高气温突变 M-K 曲线

Fig. 1 Mutation M-K curves of seasonal average maximum temperature from 1950 to 2019

表 3 各季节平均最高气温与大气环流因子间的相关关系¹⁾

Table 3 Correlativity between seasonal average maximum temperature and atmospheric circulation factors

季节	系数	AO	ENSO	NAO	PDO
春季	Pearson 相关系数	0.31 **	-0.04	0.16	0.07
	偏相关系数	0.29 *	-0.07	-0.04	0.14
夏季	Pearson 相关系数	0.12	-0.09	-0.04	-0.33 **
	偏相关系数	0.22	0.15	-0.19	-0.35 **
秋季	Pearson 相关系数	0.24 *	-0.15	0.09	-0.13
	偏相关系数	0.21	-0.10	-0.05	0.01
冬季	Pearson 相关系数	0.29 *	0.08	0.22	0.18
	偏相关系数	0.27 *	0.03	-0.10	0.22

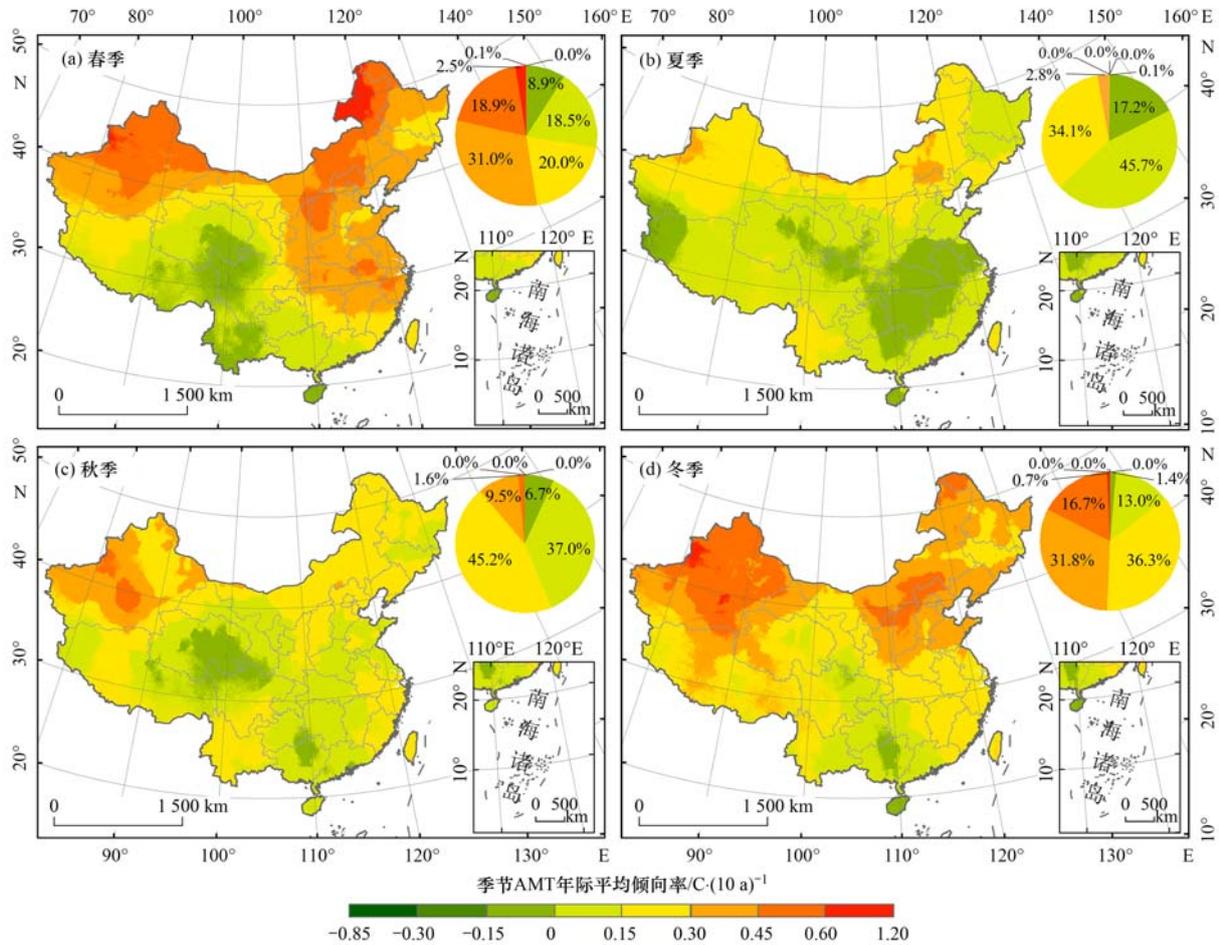
1) ** 表示在 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平下通过检验, * 表示在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下通过检验

2.4 季节平均最高气温与大气环流因子遥相关关系

基于交叉小波和小波相干分析得到各季节 AMT 与大气环流因子间的遥相关关系结果,如图 3 所示.由图 3(a)可知,春季 AMT 与 AO、ENSO 和 PDO 在高/低能量区均存在显著共振阶段(主要集中在 2.07 ~ 4.38 a 周期),其中,春季 AMT 与 AO 在高能量区存在 4 个显著共振[图 3(a1)],即 1954 ~ 1961、1966 ~ 1973、1978 ~ 1990 和 2006 ~ 2014 年,且在各共振阶段二者对应频段位相关系数均呈正相关;与 ENSO 在高能量区存在 1968 ~ 1973、1978 ~ 1988 和 2009 ~ 2012 年 3 个显著共振,第一阶段春季 AMT 对应频段位相超前 ENSO 变化约 1/4 周期(约 3 个月),后两个阶段二者对应频段位相关系数呈负相关[图 3(a2)];与 PDO 在低能量区存在 1979

~ 2000 和 2004 ~ 2014 年显著共振阶段,且两阶段二者对应频段位相关系数呈正/负相关[图 3(a8)].

夏季 AMT 与各大气环流因子具有不同的共振周期性特征.夏季 AMT 与 ENSO 在高/低能量区分别存在 1988 ~ 1999 年(以 2.32 ~ 3.68 a 为周期)和 2008 ~ 2016 年(以 2.32 ~ 3.90 a 为周期)显著共振[图 3(b2)和图 3(b6)].夏季 AMT 与 PDO 在高能量区存在 3 个间歇性共振阶段,即 1953 ~ 1957、1957 ~ 1978 和 1989 ~ 1998 年,各阶段夏季 AMT 与 PDO 对应频段位相关系数均呈负相关[图 3(b4)].在低能量区 1961 ~ 1984 年(以 7.80 ~ 11.69 a 为周期)夏季 AMT 与 AO 存在显著共振,位相关系数表现为夏季 AMT 超前 AO 变化约 3 个月[图 3(b5)].在低能量区 2008 ~ 2012 年(以 2.07 ~ 2.92 a 为周期)



基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4617 号标准地图制作,底图无修改;
饼图表示各季节 AMT 年际平均倾向率占研究区总面积的百分数

图 2 1950~2019 年各季节平均最高气温变化趋势空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the tendency rate for seasonal average maximum temperature from 1950 to 2019

夏季 AMT 与 NAO 存在显著共振,且二者对应频段位相关系呈正相关[图 3(b7)].

秋季 AMT 与各大气环流因子在不同阶段存在显著的年际和年代际尺度共振周期.在高能量区 1980~1996 年(以 2.76~6.19 a 为周期)秋季 AMT 与 AO 存在显著共振,其能量谱呈反“L”状分布特征;在低能量区存在 1966~2000 年(以 12.38~22.38 a 为周期)显著共振,且二者在高/低能量区对应频段位相关系均呈正相关[图 3(c1)和图 3(c5)].秋季 AMT 与 ENSO、PDO 在高能量区分别存在 1979~1997 年(以 2.32~6.19 a 为周期)和 1984~1998 年(以 3.90~6.19 a 为周期)显著共振[图 3(c2)和图 3(c4)].秋季 AMT 与 NAO 在高/低能量区 1980~1996 年(以 2.07~8.26 a 为周期)和 1966~2003 年(以 12.38~14.73 a 为周期)分别存在显著共振,且二者在高/低能量区的对应频段位相关系均呈正相关[图 3(c3)和图 3(c7)].

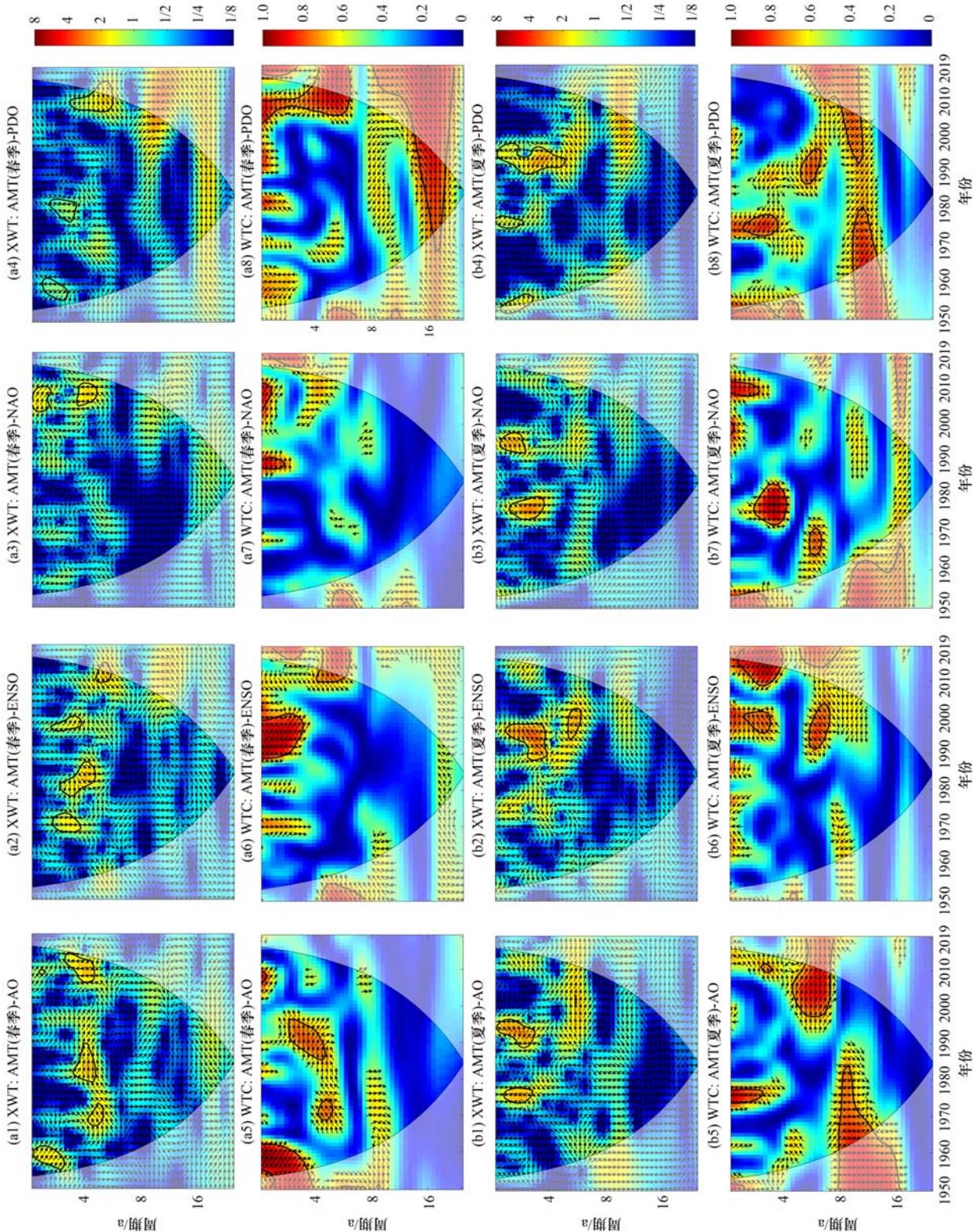
冬季 AMT 与各大气环流因子在不同时频域二者间的相关性与周期性存在差异.冬季 AMT 与 AO

在高/低能量区 1970~1989 年(以 6.95~9.28 a 为周期)和 1963~1991 年(以 4.91~11.03 a 为周期)分别存在显著共振,两个阶段冬季 AMT 对应频段位相关系均超前 AO 变化约 3 个月[图 3(d1)和图 3(d5)].冬季 AMT 与 PDO 在高能量区存在 2 个显著共振阶段,即 1975~1979 年(以 2.46~3.68 a 为周期)和 1997~2003 年(以 2.19~2.76 a 为周期),且各阶段二者对应频段位相关系均呈负相关;在低能量区二者存在 3 个显著共振阶段,即 1976~1987、1977~1980 和 1995~2000 年[图 3(d4)和图 3(d8)].

总体上,各季节 AMT 与各大气环流因子均存在显著共振,在不同时频域上相关程度与共振周期存在差异,其中春季 AMT 与各大气环流因子的联系均体现在较短年代际周期尺度上,且与 AO 主要呈正相关;与 ENSO 呈负相关或超前大气环流因子变化;与 PDO 在短/长期年际周期尺度呈负/正相关;而 NAO 与春季 AMT 关系较弱.夏季 AMT 与 AO、ENSO、NAO 呈正相关或超前大气环流因子变化,而

与 PDO 表现为负相关或滞后其变化. 秋季 AMT 受到 AO 和 NAO 较长年代际周期变化的正相关影响,

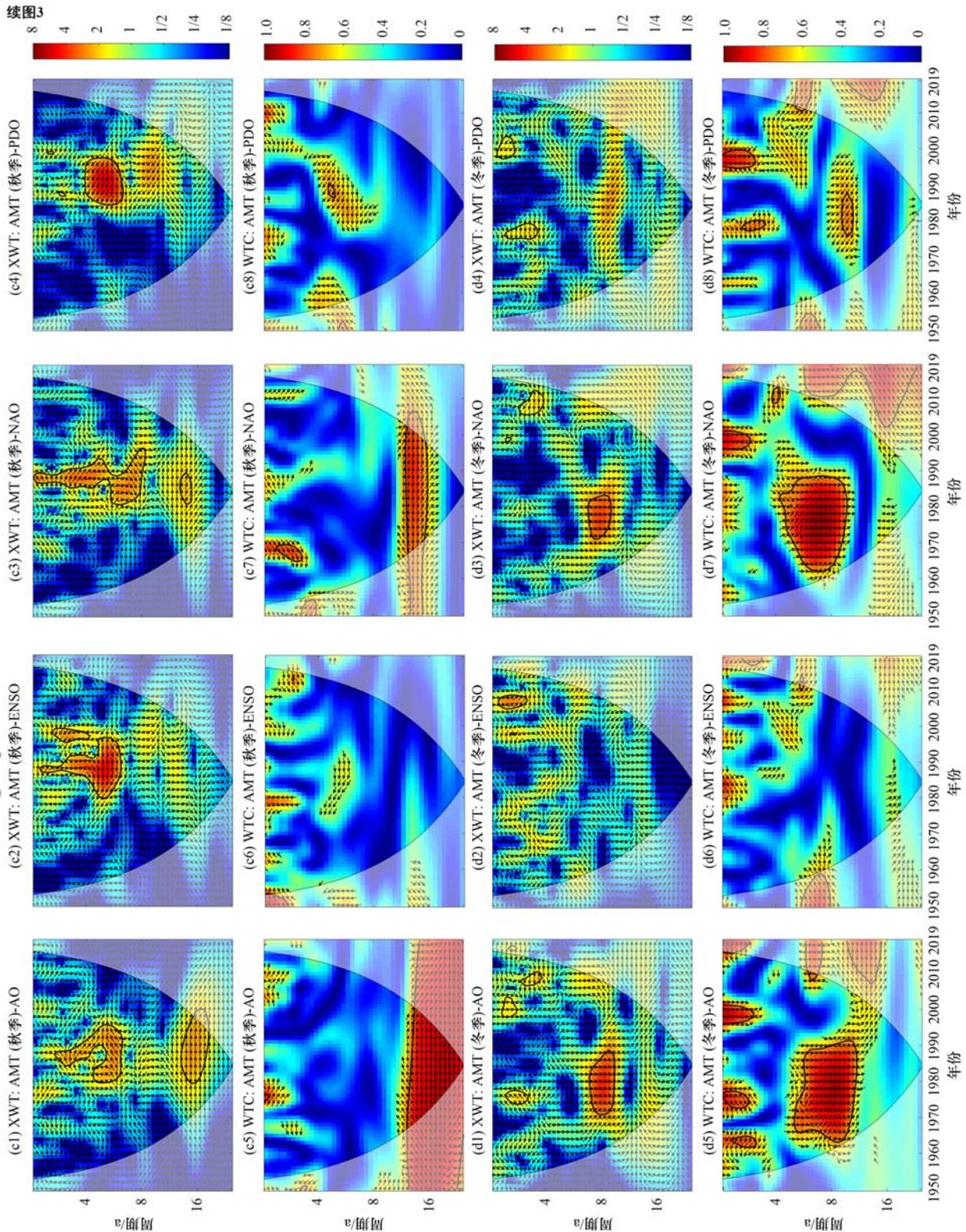
而 ENSO 和 PDO 主要影响秋季 AMT 短期年际周期特征,且相关关系相对较弱. 冬季 AMT 与 AO、NAO



U 型黑色细实线为小波边界效应影响锥,在该曲线外的功率由于受到边界效应的影响而不予考虑;粗黑实线表示通过置信水平为 95% 的红噪声检验,两者相关性显著;←表示 AMT 与大气环流因子间变化位相相反,即两者呈负相关关系,→表示两者变化位相一致,即两者呈正相关关系,↑表示 AMT 落后大气环流因子变化 1/4 周期,↓表示 AMT 超前大气环流因子变化 1/4 周期;色柱表示能量密度的相对变化;XWT:AMT(春季)-AO 表示春季 AMT 与 AO 的交叉小波谱,WTC:AMT(春季)-AO 表示春季 AMT 与 AO 的小波相干谱,以此类推

图 3 各季节平均最高气温与各大气环流因子的交叉小波谱和小波相干谱

Fig. 3 Cross wavelet spectrum and wavelet coherence spectrum of seasonal average maximum temperature and atmospheric circulation factors



均存在显著共振阶段,且对应频段位相关系呈现冬季 AMT 超前 AO 和 NAO 变化约 3 个月,而 ENSO 和 PDO 与冬季 AMT 年际变化关系较弱。

3 讨论

3.1 中国季节平均最高气温影响因素分析

在人类活动强度增强和全球气候变化加剧的背景下,高温天气已成为各国政府和专家学者共同担忧

的问题之一。为此,结合我国季节 AMT 时空变化趋势以及与大气环流因子间的耦合关系(图 1~3、表 2 和表 3),本研究对影响我国季节 AMT 变化的驱动因素进行探讨分析。总体上,我国季节 AMT 受到长期或短期、直接或间接的人为和自然因素的影响(图 4),明确驱动力因素可有助于确定未来研究工作的重心。

3.1.1 气候系统内部变率作用

大气环流因子对区域气候具有重要影响,在空

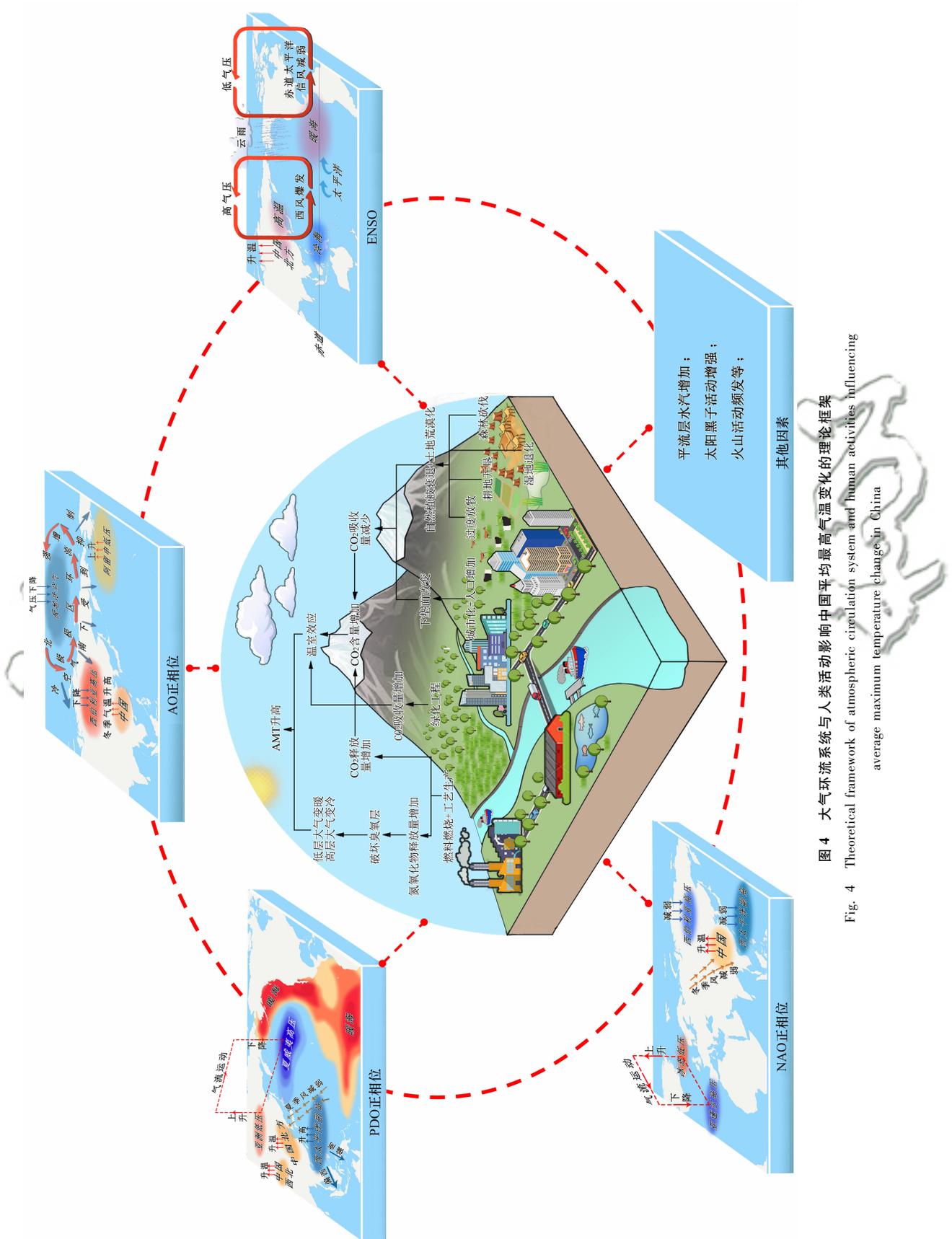


图 4 大气环流系统与人类活动影响中国平均最高气温变化的理论框架
 Fig. 4 Theoretical framework of atmospheric circulation system and human activities influencing average maximum temperature change in China

间上不仅可作用于大气环流周边地区,亦可以遥相关的形式对距离遥远的地区产生影响^[36]. 相关研究表明, AO 作为气候系统中一种重要的内部变率和动力过程, 主要影响北极地区与北半球中高纬度地区间气压的反向波动^[37]. 冬季 AO 通过影响西伯利亚高压和东亚大槽改变冬季风, 并与北半球中高纬度地面气温呈显著正相关, 当 AO 为正相位增强时, 我国北方和西北地区易出现暖冬^[38]. 本研究结果显示(图 2 和表 3), 冬季 AMT 与 AO 呈显著正相关, 且年际平均倾向率高于 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 主要出现在北方和西北地区.

NAO 被认为是 AO 在北大西洋区域的一种表现形式, 具有显著的年代际共振周期^[39]. 范可等^[40]研究发现, 当 NAO 处于正相位时, 我国东北、华北和华南等地显著增温, 西南和青藏高原地区显著降温. 龚道溢等^[41]研究指出, 冬季 NAO 位相在 20 世纪 80 年代中期出现转折, 并造成气候系统出现年代际变化. 在本研究中, 冬季 AMT 在 1985 年产生增温突变, 且与 NAO 存在年代际尺度显著共振周期(图 1 和图 3), 这与以往研究结果相吻合.

ENSO 所引起的赤道东太平洋地区的风场和海面温度振荡是全球海洋和大气相互作用最强的信号^[42]. 当发生 ENSO 事件时, 我国华北地区易产生高温, 东北地区易出现冷夏; 同时, 江淮、江南和华南等地气候变化也因受 ENSO 事件影响而发生气温突变^[29]. 相关资料显示^[43,44], 在 1986~1988、1994~1995、1997~1998、2002~2003、2004~2005 和 2006~2007 年均有 ENSO 现象发生. 本研究中各季节 AMT 发生突变的时间均与以上厄尔尼诺现象发生时间相一致(图 1).

PDO 是一种类似于 ENSO 的太平洋气候变动过程, 具有显著的年际和年代际振荡周期, 并对东亚大气环流产生重要影响^[45]. 沈皓俊等^[46]研究发现 PDO 在 2000 年左右发生显著突变; 梁苏洁等^[47]研究发现在 1978~2005 年冬季太平洋北部海温升高, 表现为 PDO 正相位. 徐忆菲等^[48]研究指出, 在年际尺度上, PDO 超前于我国冬季气温变化, 且当 PDO 为正相位时, 我国冬季气温普遍偏高. 在本研究中, 我国各季节 AMT 增温突变时间主要集中于 20 世纪 90 年代末至 21 世纪初, 并在之后呈显著增温态势(图 1); 冬季 AMT 与 PDO 在 1995~2000 年(以 2.07~3.10 a 为周期)存在显著共振, 对应频段位相表现为冬季 AMT 滞后 PDO 变化约 3 个月(图 3).

综上所述, 尽管各大气环流因子对高温天气作用方式和产生效果各不相同, 但气候系统内部变率

对我国各季节 AMT 的变化趋势与突变特征均具有重要影响.

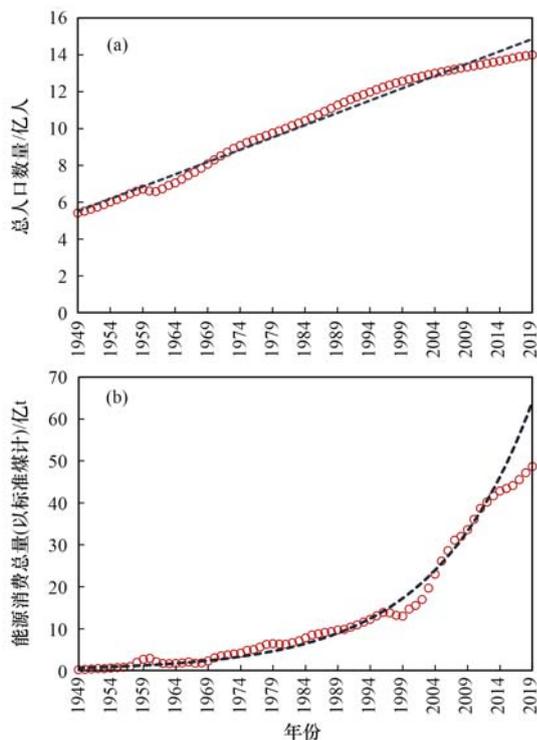
3.1.2 人类活动的影响

随着人类社会的发展, 人口急剧增加与经济社会快速发展使得我国在城市化过程、下垫面改变和能源消耗等方面发生结构性变化^[49,50], 这些因素均直接或间接地影响我国季节 AMT 变化. 对我国 1949~2019 年人口数量和能源消耗总量进行分析可知(图 5), 二者在近 70 年均呈逐年上升趋势. 人口增长与经济发展, 一方面使得我国下垫面不断改变, 从而影响区域高温天气. 自改革开放以来, 我国沿海湿地因城市化进程加快、人类活动剧增而遭受巨大损失, 填海造地使得沿海湿地面积累计损失约占我国沿海湿地总面积的 51.2%, 其中我国北部沿海地区填海造地超过填海造地总面积的 70%^[51]. 于竹筱等^[52]研究 1990~2018 年我国林地的时空变化特征, 结果发现我国林地减少主要发生在东北地区、西南地区 and 新疆北部. 本研究结果显示在 1950~2019 年我国各季节 AMT 均呈持续上升趋势且存在较大程度的空间异质性(表 2 和图 2), 其中东北地区、新疆北部和北部沿海地区升温速率较快, 可见我国自然植被破坏区域与 AMT 升高区域空间位置相一致. 另一方面, 人口数量递增, 加之科学技术和生产规模迅速扩增, 在一定程度上促进能源(如石油、天然气等)消耗^[53], 由此使得大气中二氧化碳浓度相应增高; 加之人为活动对自然植被的破坏降低了它们吸收二氧化碳的能力^[54]. 过量的二氧化碳能够强烈吸收地面辐射中的红外线, 致使区域气温不断上升, 产生“温室效应”. Skytt 等^[55]研究指出, 冬季供暖会增加以甲烷为主的天然气消耗, 产生更多温室气体, 从而使得冬季显著变暖. 同时, 在社会生产活动中过度使用氟氯化碳等化学用品会产生大量氮氧化物, 导致空气污染恶化, 严重破坏臭氧层, 从而使得低层大气变暖, 高层大气变冷, 加剧区域气温升高^[56]. 本研究中, 春冬季 AMT 在北方和西北地区增温速率较快(图 2), 这与我国北方和西北地区集体供暖关系密切.

此外, 随着自然环境重要性逐步被政府和民众认知, 我国先后启动了多项重要生态系统保护和修复工程, 如“三北森林保护工程”、“退耕还林、封山绿化”和“草原生态保护计划”等^[57]. Zheng 等^[58]研究指出, 由于“三北”防护林和退耕还林等沙地荒漠化防治工程的实施, 使得我国毛乌素沙地植被总体得到改善, 该地区近地表温度平均降低 $0.12\sim 0.32\text{ }^{\circ}\text{C}$; Yu 等^[59]利用陆地-大气耦合区域气候模式评估 2001~2017 年中国植被绿化对气候的影响,

结果发现我国大部分地区,尤其是华东地区,夏季绿化趋势显著. 本研究结果显示(图 2),华东、华南和西南地区各季节 AMT 年际平均倾向率相较其他地区更为平缓,夏季东北、西北和华北东部地区与其他季节相比,其 AMT 年际平均倾向率呈减缓趋势. 由此可见,植被修复和绿化工程的实施有效提高了我国植被覆盖率,生态系统碳循环得以良性促进,有助于减缓气温升高.

由以上可知,我国各季节 AMT 时空演变受到长期或短期以及直接或间接的人类活动影响. 人类活动具有双重效应,一方面,人口与能源消耗增加、城市快速扩张等因素加剧我国季节 AMT 增温和突变;另一方面,生态保护工程实施对气温升高起到一定的缓解作用.



数据来源于中国统计年鉴,人口数量为 1949~2019 年数据,标准煤消费总量为 1949~2019 年数据

图 5 中国地区总人口数量和标准煤消费总量变化

Fig. 5 Changes in total population and energy consumption in China

3.2 与以往研究结果的对比分析

相较于以往研究多以年为计量尺度,本研究在季节尺度上探讨我国 AMT 时空演变特征,并结合多个大气环流因子量化分析其与我国季节 AMT 变化的联系,较先前仅从气象要素本身或结合单个大气环流因子分析区域高温变化特征更为系统和准确. 同时,本研究从全国尺度刻画长时间序列的季节 AMT 时空演变特征,拓展了以往区域性空间研究的尺度,可更全面地了解我国高温整体变化情况. 此外,本研究结果显示各季节 AMT 均呈显著升温态势

[$0.02 \sim 0.19 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$],其突变时间主要集中在 20 世纪 90 年代至 21 世纪初,且与 AO 和 PDO 的相关性较强、与 ENSO 和 NAO 的相关性较弱,这与已有研究的结果相一致^[22,26,60,61]. 对比以往针对区域的研究,由于其区域范围、时间尺度和数据来源与本研究存在不同,其研究结果与本研究略有差异,例如:史雯雨等^[20]基于金沙江流域 39 个气象站点 1960~2016 年逐日平均最高气温数据分析发现该区季节平均最高气温均呈波动上升趋势 [$0.08 \sim 0.25 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$],贾玲等^[62]基于疏勒河流域 1951~2018 年月最高气温数据得出研究区季节最高气温均呈上升趋势 [$0.01 \sim 0.36 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$],这与本研究在具体数值上存在略微差异;李虹雨等^[63]基于观测站点数据分析 1951~2014 年内蒙古地区季节最高气温变化特征,结果显示研究区整体呈升温趋势,但其变化速率的空间分布在局部地区与本研究略有不同.

3.3 不确定性分析

由于高温变化是一个长期而复杂的过程,探究高温天气在较长时间序列下的变化特征具有重要意义,而本研究的分析时段为近 70 年,相对于地球宏观周期性气候变化而言,时长较短,研究结果存在不确定性. 此外,影响高温天气变化的因素众多,例如,平流层水汽增加、太阳活动增强和火山活动等亦可使得区域辐射持续上升,进而影响区域气温变化. Solomon 等^[64]研究发现平流层水汽增加导致全球地表变暖加速;Huang 等^[65]和郭纪君等^[66]认为太阳活动对全球变暖起着决定性作用,当太阳黑子活动增强时,地球表面气温呈升温态势;温飞等^[67]研究指出火山活动和太阳辐射量变化等均能显著影响地表气候变化. 但由于本研究缺少相关实测数据,无法对以上因素作进一步探讨. 此外,本研究仅从统计分析来探讨我国季节 AMT 与大气环流因子间的关系,而各大气环流因子位相间的变化机制未作深入分析,具有一定的局限性. 鉴于以上,今后研究需着重以下工作的开展:重建和预测历史高温天气变化,模拟和分析大气环流因子间相互作用机制,以此对高温天气的变化趋势以及影响因素进行全面的分析和研究,以实现更精确的判断.

4 结论

(1) 1950~2019 年我国各季节 AMT 均呈显著上升趋势,春季升温速率最快,秋季、夏季和冬季次之. 各季节 AMT 产生增温突变的时间各不相同,主要集中于 20 世纪 90 年代至 21 世纪初.

(2) 我国各季节 AMT 年际平均倾向率存在明

显的空间异质性.除夏季以外,其它季节 AMT 的年际平均倾向率均由南向北逐渐增加,西北和东北地区增温幅度最为明显.

(3)各季节 AMT 与大气环流因子存在复杂联系,且在不同时频域作用强度各异.其中,春季 AMT 与 AO 呈正相关,夏季 AMT 与 PDO 呈负相关,秋季 AMT 主要受各大气环流因子较长年际周期影响,冬季 AMT 与 AO、NAO 存在显著共振周期.

参考文献:

- [1] 孙颖. 全球变暖趋势日益明晰[J]. 中国科学基金, 2021, **35**(2): 226-228.
- [2] IPCC. 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 & New York: Cambridge University Press, 2014.
- [3] Press F. Earth science and society[J]. Nature, 2008, **451**(7176): 301-303.
- [4] 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析[J]. 气候与环境研究, 2007, **12**(3): 464-474.
Peng J B, Zhang Q Y, Cholaw B. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan-Chongqing region in 2006 [J]. Climatic and Environmental Research, 2007, **12**(3): 464-474.
- [5] 孙劭, 李多, 王遵娅, 等. 2018 年全球重大天气气候事件及其成因[J]. 气象, 2019, **45**(4): 533-542.
Sun S, Li D, Wang Z Y, et al. Global major weather and climate events in 2018 and the possible causes [J]. Meteorological Monthly, 2019, **45**(4): 533-542.
- [6] 贾斌英. 2010—2019 年中国东北地区森林火灾时空特征研究[J]. 防护林科技, 2021, (4): 18-21.
Jia B Y. Temporal and spatial characteristics of forest fires in northeast China from 2010 to 2019[J]. Protection Forest Science and Technology, 2021, (4): 18-21.
- [7] Schweinsberg S, Darcy S, Beirman D. 'Climate crisis' and 'bushfire disaster': Implications for tourism from the involvement of social media in the 2019-2020 Australian bushfires[J]. Journal of Hospitality and Tourism Management, 2020, **43**: 294-297.
- [8] Song J, Pan R B, Yi W Z, et al. Ambient high temperature exposure and global disease burden during 1990-2019: An analysis of the global burden of disease study 2019[J]. Science of the Total Environment, 2021, **787**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147540.
- [9] Schär C, Jendritzky G. Hot news from summer 2003 [J]. Nature, 2004, **432**(7017): 559-560.
- [10] Li X, Ren G Y, Wang S Y, et al. Change in the heatwave statistical characteristics over China during the climate warming slowdown [J]. Atmospheric Research, 2021, **247**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105152.
- [11] 冯相昭, 邹骥, 马珊, 等. 极端气候事件对中国农村经济影响的评价[J]. 农业技术经济, 2007, (2): 19-25.
Feng X Z, Zou J, Ma S, et al. The impact of extreme climate on rural economy in China: An evaluation [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2007, **160**(2): 19-25.
- [12] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究, 2005, **10**(4): 701-716.
Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, **10**(4): 701-716.
- [13] 陈建宇, 邵天杰, 赵景波. 陕西榆林地区 1954—2013 年极端气温变化特征[J]. 中国沙漠, 2016, **36**(5): 1426-1434.
Chen J Y, Shao T J, Zhao J B. Extreme temperature changes from 1954 to 2013 in Yulin, Shaanxi, China [J]. Journal of Desert Research, 2016, **36**(5): 1426-1434.
- [14] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia [J]. Global and Planetary Change, 2013, **100**: 172-182.
- [15] Zuo J Q, Ren H L, Li W J, et al. Interdecadal variations in the relationship between the winter North Atlantic oscillation and temperature in south-Central China [J]. Journal of Climate, 2016, **29**(20): 7477-7493.
- [16] 翟盘茂, 余荣, 郭艳君, 等. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报, 2016, **74**(3): 309-321.
Zhai P M, Yu R, Guo Y J, et al. The strong El Niño in 2015/2016 and its dominant impacts on global and China's climate [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2016, **74**(3): 309-321.
- [17] 田立鑫, 韩美, 徐泽华, 等. 近 50 年淮河流域气温时空变化及其与 PDO 的关系[J]. 水土保持研究, 2019, **26**(6): 240-248.
Tian L X, Han M, Xu Z H, et al. Temporal and spatial change of temperature in the Huaihe River Basin during the past 50 years and its relationship with PDO [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, **26**(6): 240-248.
- [18] 马双梅, 祝从文, 刘伯奇. 2019 年 4~6 月云南持续性高温天气的大气环流异常成因[J]. 大气科学, 2021, **45**(1): 165-180.
Ma S M, Zhu C W, Liu B Q. Possible causes of persistently Extreme-Hot-Days-Related circulation anomalies in Yunnan from April to June 2019 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, **45**(1): 165-180.
- [19] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019, **11**(4): 1931-1946.
- [20] 史雯雨, 杨胜勇, 李增永, 等. 近 57 年金沙江流域气温变化特征及未来趋势预估[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(1): 211-217.
Shi W Y, Yang S Y, Li Z Y, et al. Variation characteristics and the future trend estimation of temperature in Chinsha River Basin over the past 57 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(1): 211-217.
- [21] 刘丹, 赵景波. 黑龙江哈尔滨地区近 60 年极端气温变化研究[J]. 地球与环境, 2017, **45**(6): 587-599.
Liu D, Zhao J B. Extreme temperature changes in Harbin region, Heilongjiang Province, China over the past 60 years [J]. Earth and Environment, 2017, **45**(6): 587-599.
- [22] Huang Y F, Lu C Y, Lei Y F, et al. Spatio-temporal variations of temperature and precipitation during 1951-2019 in arid and semiarid region, China [J]. Chinese Geographical Science, 2022, **32**(2): 285-301.
- [23] 江铭诺, 李冠毅, 何婉文, 等. 1951—2020 年广州地区极端气温指数年尺度变化研究[J]. 热带气象学报, 2022, **38**(2): 239-252.
Jiang M N, Li G Y, He W W, et al. A study on the annual and monthly variations of the extreme temperature index in Guangzhou from 1951 to 2020 [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2022, **38**(2): 239-252.

- [24] 李卓群, 刘星才. 1961—2019 年辽宁省高温天气变化特征[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(11): 4059-4067.
Li Z Q, Liu Q C. Variations of high temperature from 1961 to 2019 in Liaoning Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(11): 4059-4067.
- [25] 李春兰, 包玉海, 包刚, 等. 近 57 年锡林浩特市平均最高、最低气温变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(5): 257-260, 265.
Li C L, Bao Y H, Bao G, *et al.* Changes characteristic of mean maximum and minimum temperature in Xilinhot City in recent 57 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, **20**(5): 257-260, 265.
- [26] 者萌, 张雪芹, 沈鹏珂, 等. 京津冀地区 1957-2017 年气温变化时空格局[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(5): 194-201.
Zhe M, Zhang X Q, Shen P K, *et al.* Spatial-temporal pattern of temperature variation in Beijing-Tianjin-Hebei region over the period 1957-2017[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, **27**(5): 194-201.
- [27] 徐乔婷, 陈涟, 范月华, 等. 基于 SPEI 指数的兰州干旱特征与气候指数的关系[J]. 水文, 2021, **41**(2): 56-62.
Xu Q T, Chen L, Fan Y H, *et al.* Relationship between Lanzhou drought and climate indices based on SPEI index[J]. Journal of China Hydrology, 2021, **41**(2): 56-62.
- [28] Li Y L, Wen Y L, Lai H X, *et al.* Drought response analysis based on cross wavelet transform and mutual entropy [J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, **59**(3): 1223-1231.
- [29] 高弋斌, 路春燕, 钟连秀, 等. 1951—2016 年中国沿海地区气温与降水量的时空特征[J]. 森林与环境学报, 2019, **39**(5): 530-539.
Gao Y B, Lu C Y, Zhong L X, *et al.* Temporal and spatial characteristics of temperature and precipitation in China's coastal areas from 1951 to 2016[J]. Journal of Forest and Environment, 2019, **39**(5): 530-539.
- [30] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981~2010 年中国气候区划[J]. 科学通报, 2013, **58**(30): 3088-3099.
Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, *et al.* The climate regionalization in China for 1981-2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(30): 3088-3099.
- [31] 庞家泰, 段金亮, 张瑞, 等. 2000-2019 年渭河流域植被覆盖度时空演变特征及气候响应[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(5): 230-237.
Pang J T, Duan J L, Zhang R, *et al.* Characteristics of spatiotemporal evolution and climate response of vegetation cover in the wei river basin from 2000 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(5): 230-237.
- [32] 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1839-1846.
Li M L, Jia M D, Sun T C, *et al.* Spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in the Three Gorges reservoir area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1839-1846.
- [33] 王景才, 郭佳香, 徐蛟, 等. 近 55 年淮河流域气候要素多时间尺度演变特征及关联性分析[J]. 地理科学, 2017, **37**(4): 611-619.
Wang J C, Guo J X, Xu J, *et al.* Multi-time scales change characteristics and relationship of meteorological variables in the upper and middle regions of the Huaihe River Basin in recent 55 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, **37**(4): 611-619.
- [34] 段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 等. 粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3652-3662.
Duan J L, Ju T Z, Huang R R, *et al.* Analysis of ultraviolet aerosol index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3652-3662.
- [35] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter[J]. Monthly Weather Review, 1981, **109**(4): 784-812.
- [36] 谭本植, 陈文. 中高纬度大气遥相关动力学及其对东亚冬季气候影响的研究进展[J]. 气象学报, 2014, **72**(5): 908-925.
Tan B K, Chen W. Progress in the study of the dynamics of extratropical atmospheric teleconnection patterns and their impacts on East Asian climate [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, **72**(5): 908-925.
- [37] Wu B Y, Wang J. Possible impacts of winter arctic oscillation on Siberian high, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, **19**(2): 297-320.
- [38] 龚道溢, 王绍武. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响[J]. 地理学报, 2003, **58**(4): 559-568.
Gong D Y, Wang S W. Influence of arctic oscillation on winter climate over China [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, **58**(4): 559-568.
- [39] 李忠贤, 于怡秋, 邓伟涛, 等. 春季北大西洋三极型海温异常变化及其与 NAO 和 ENSO 的联系[J]. 气象科学, 2019, **39**(6): 721-730.
Li Z X, Yu Y Q, Deng W T, *et al.* Variation characteristics of North Atlantic Tri-Polar Sea surface temperature in spring and its relationship with NAO and ENSO [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, **39**(6): 721-730.
- [40] 范可, 刘辉. 近百年东亚冬季气温及其大气环流变化型态[J]. 大气科学, 2013, **37**(2): 383-394.
Fan K, Liu H. Winter temperature over east Asia and atmospheric circulation patterns in the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, **37**(2): 383-394.
- [41] 龚道溢, 王绍武. 北大西洋涛动指数的比较及其年代际变率[J]. 大气科学, 2000, **24**(2): 187-192.
Gong D Y, Wang S W. The North Atlantic oscillation index and its interdecadal variability [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, **24**(2): 187-192.
- [42] 叶许春, 许崇育, 张丹, 等. 长江中下游夏季降水变化与亚洲夏季风系统的关系[J]. 地理科学, 2018, **38**(7): 1174-1182.
Ye X C, Xu C Y, Zhang D, *et al.* Variation of summer precipitation and its connection with Asian monsoon system in the middle-lower Yangtze River basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, **38**(7): 1174-1182.
- [43] 吴国丽, 李思航, 刘子洲, 等. 2015/2016 年超强厄尔尼诺期间热带西太平洋海洋环流变化特征[J]. 海洋科学, 2020, **44**(1): 8-18.
Wu G L, Li S H, Liu Z Z, *et al.* Variations in the tropical western pacific gyre during the 2015/2016 super El Niño event [J]. Marine Sciences, 2020, **44**(1): 8-18.
- [44] 严韬, 徐明洁, 葛非凡, 等. 厄尔尼诺/拉尼娜事件对区域气温的影响与预测——以沈阳地区为例[J]. 安徽农业大学学报, 2019, **46**(1): 57-64.
Yan T, Xu M J, Ge F F, *et al.* The effect and forecaster of the El Niño/La Niña events on climate in Shenyang [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, **46**(1): 57-64.
- [45] Fang C F, Wu L X, Zhang X. The impact of global warming on the pacific decadal oscillation and the possible mechanism [J].

- Advances in Atmospheric Sciences, 2014, **31**(1): 118-130.
- [46] 沈皓俊, 游庆龙, 王朋岭, 等. 1961—2014 年中国高温热浪变化特征分析[J]. 气象科学, 2018, **38**(1): 28-36.
Shen H J, You Q L, Wang P L, *et al.* Analysis on heat waves variation features in China during 1961—2014[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2018, **38**(1): 28-36.
- [47] 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究[J]. 大气科学, 2014, **38**(5): 974-992.
Liang S J, Ding Y H, Zhao N, *et al.* Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature over mainland China's mainland and regional atmospheric circulation characteristics during 1960- 2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, **38**(5): 974-992.
- [48] 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, **45**(4): 669-677.
Xu Y F, Peng L X, Li J, *et al.* Relationship between PDO and interdecadal change of winter temperature in China from 1951 to 2013[J]. Meteorological Science and Technology, 2017, **45**(4): 669-677.
- [49] 李宇, 周德成, 闫章美, 等. 中国主要城市的城市化对局地增温的贡献[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2822-2830.
Li Y, Zhou D C, Yan Z M, *et al.* Contribution of urbanization to local warming in major cities of China [J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2822-2830.
- [50] Sun Y X, Liu S L, Dong Y H, *et al.* Spatio-temporal evolution scenarios and the coupling analysis of ecosystem services with land use change in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **681**: 211-225.
- [51] Tian B, Wu W T, Yang Z Q, *et al.* Drivers, trends, and potential impacts of long-term coastal reclamation in China from 1985 to 2010[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, **170**: 83-90.
- [52] 于竹筱, 张红旗, 许尔琪. 基于“三生”视角的中国林地分类提取[J]. 自然资源学报, 2021, **36**(5): 1136-1148.
Yu Z X, Zhang H Q, Xu E Q. Classification and extraction of forest land in China based on the perspective of “production-living-ecology” [J]. Journal of Natural Resources, 2021, **36**(5): 1136-1148.
- [53] 曹孜, 陈洪波. 城市化和能源消费的门槛效应分析与预测[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, **25**(11): 59-68.
Cao Z, Chen H B. Threshold effects analysis and prediction for China's urbanization and energy consumption [J]. China Population, Resources and Environment, Resources and Environment, 2015, **25**(11): 59-68.
- [54] 陈朝军, 袁道先, 程海, 等. 人类活动和气候变化触发了中国西南石漠化的扩张[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, **51**(11): 1950-1963.
Chen C J, Yuan D, Cheng H, *et al.* Human activity and climate change triggered the expansion of rocky desertification in the karst areas of Southwestern China[J]. Science China Earth Sciences, 2021, **64**(10): 1761-1773.
- [55] Skytt T, Nielsen S N, Jonsson B G. Global warming potential and absolute global temperature change potential from carbon dioxide and methane fluxes as indicators of regional sustainability-A case study of Jämtland, Sweden[J]. Ecological Indicators, 2020, **110**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105831.
- [56] Luo Z B, Lam S K, Fu H, *et al.* Temporal and spatial evolution of nitrous oxide emissions in China: assessment, strategy and recommendation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **223**: 360-367.
- [57] Cai D W, Ge Q S, Wang X M, *et al.* Contributions of ecological programs to vegetation restoration in arid and semiarid China[J]. Environmental Research Letters, 2020, **15**(11), doi: 10.1088/1748-9326/abbde9.
- [58] Zheng Y, Dong L, Xia Q, *et al.* Effects of revegetation on climate in the Mu Us Sandy Land of China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139958.
- [59] Yu L X, Liu Y, Liu T X, *et al.* Impact of recent vegetation greening on temperature and precipitation over China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, **295**, doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108197.
- [60] 周莹, 马龙, 梁珑腾. 内蒙古气温突变及其影响因子间的响应关系[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(3): 184-193.
Zhou Y, Ma L, Liang L T. Response of temperature mutation in inner Mongolia to its influencing factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(3): 184-193.
- [61] 梁珑腾, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951—2014 年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(12): 2149-2166.
Liang L T, Ma L, Liu Y X, *et al.* The seasonal spatiotemporal variation of the temperature mutation and warming hiatus over northern China during 1951- 2014 [J]. Journal of Natural Resources, 2018, **33**(12): 2149-2166.
- [62] 贾玲, 孙栋元, 牛最荣, 等. 疏勒河流域最高、最低气温变化规律[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(1): 281-287.
Jia L, Sun D Y, Niu Z R, *et al.* Pattern of maximum and minimum temperature variation in Shule River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, **29**(1): 281-287.
- [63] 李虹雨, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951-2014 年内蒙古地区气温、降水变化及其关系[J]. 冰川冻土, 2017, **39**(5): 1098-1112.
Li H Y, Ma L, Liu Y X, *et al.* Change and relationship of temperature and precipitation in Inner Mongolia during 1951-2014[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, **39**(5): 1098-1112.
- [64] Solomon S, Rosenlof K H, Portmann R W, *et al.* Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming[J]. Science, 2010, **327**(5970): 1219-1223.
- [65] Huang C, Rao Z G, Li Y X, *et al.* Holocene summer temperature in arid central Asia linked to millennial-scale north Atlantic climate events and driven by centennial-scale solar activity [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, **556**, doi: 10.1016/j.palaeo.2020.109880.
- [66] 郭纪君, 郭治龙, 王宁练. 1880 年以来地球陆地-海洋温度指数中的太阳黑子活动周期研究[J]. 高原气象, 2020, **39**(4): 851-858.
Guo J J, Guo Z L, Wang N L. Study on the cycles of sunspots in the Earth's land-ocean temperature index since 1880[J]. Plateau Meteorology, 2020, **39**(4): 851-858.
- [67] 温飞, 游爱华, 薛积彬. 过去 2000 年中国东南地区气温与降水的集成重建与分析[J]. 热带地理, 2021, **41**(4): 778-789.
Wen F, You A H, Xue J B. Integrated reconstruction and analysis of temperature and precipitation changes in southeastern China during the last 2000 years[J]. Tropical Geography, 2021, **41**(4): 778-789.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China; Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite@Activated Carbon Composite Under Batch Experiments; Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity; Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions; A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)