

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)

城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)

天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)

清洁取暖对保定市采暖期 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的影响 罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)

大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)

2016~2020 年成都市控制 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的健康效益评价 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗攻 (3117)

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)

雅鲁藏布江水化学演变规律 江平, 张全发, 李思悦 (3165)

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)

镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 黄静文, 刘磊, 顾晓元, 凌超普 (3321)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)

植被类型对黄土高原露天复垦土壤碳循环功能基因的影响 赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N₂O 排放及其功能基因的影响 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)

云南 5 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属含量表征及健康风险 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 王美华 (3509)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 刘海, 魏伟, 潘海, 宋阳, 靳磊, 李建设, 叶林 (3531)

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)

山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)

《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析

金岩松¹, 金凯^{1,2*}, 王飞^{2,3,4}, 刘春霞¹, 秦鹏¹, 宗全利¹, 刘佩茹¹, 陈明利¹

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 植被是陆地生态系统的重要组成部分,特别是在人类活动密集地区,良好的植被覆盖对于维持区域生态环境稳定、增进居民生活福祉和促进社会经济可持续发展意义重大. 基于归一化植被指数(NDVI)、气温、降水和太阳辐射数据,采用趋势分析、偏相关分析和残差分析等方法,探究了1982~2019年中国东部沿海地区NDVI时空变化特征及其与气候因子的关系,评估了气候因素和人类活动等非气候因素对NDVI变化的影响. 结果表明:①1982~2019年研究区NDVI变化趋势具有明显区域性、阶段性和季节性差异,就区域平均而言,2000年以前(第一阶段)的生长季NDVI比2001年以后(第二阶段)增加更快,而两阶段春季NDVI增加速率均为各季节最快;②同一阶段NDVI与各气候因子的关系在不同季节存在差异,而同一季节NDVI的主要气候控制因子在不同阶段也不一致,并且NDVI与气候因子的关系具有很大空间差异. 总体上,1982~2019年研究区生长季NDVI的增加与气温的持续上升关系紧密,第二阶段降水和太阳辐射的增加也产生了积极作用;③相比于人类活动等非气候因素的影响,气候变化对近38年来研究区生长季NDVI变化的影响更大;人类活动等非气候因素和气候变化分别主导了第一和第二阶段的NDVI变化. 建议应进一步加强对不同时期NDVI变化驱动因素的探讨,以加深对陆地生态系统变化的认识.

关键词: 归一化植被指数(NDVI); 影响因素; 残差分析; 阶段性; 异质性

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3329-14 DOI: 10.13227/j.hjlx.202207039

Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China

JIN Yan-song¹, JIN Kai^{1,2*}, WANG Fei^{2,3,4}, LIU Chun-xia¹, QIN Peng¹, ZONG Quan-li¹, LIU Pei-ru¹, CHEN Ming-li¹

(1. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the datasets of normalized difference vegetation index (NDVI), temperature, precipitation, and solar radiation and the methods of trend, partial correlation, and residual analyses, this study explored the spatiotemporal variation in NDVI and its response to climate change from 1982 to 2019 in eastern coastal areas of China. Then, the effects of climate change and non-climatic factors (e.g., human activities) on NDVI trends were analyzed. The results showed that: ① the NDVI trend varied greatly in different regions, stages, and seasons. On average, the growing season NDVI increased faster during 1982-2000 (stage I) than that during 2001-2019 (stage II) in the study area. Moreover, NDVI in spring showed a more rapid increase than that in other seasons in both stages. ② For a given stage, the relationships between NDVI and each climatic factor varied in different seasons. For a given season, the major climatic factors associated with NDVI change were different between the two stages. The relationships between NDVI and each climatic factor showed great spatial differences in the study period. In general, the increase in growing season NDVI in the study area from 1982 to 2019 was closely related to the rapid warming. The increase in precipitation and solar radiation in stage II also played a positive role. ③ In the past 38 years, climate change played a greater role in the change in growing season NDVI than non-climatic factors, including human activities. Whereas non-climatic factors dominated the increase in growing season NDVI during stage I, climate change played a major role during stage II. We suggest that more attention should be paid to the impacts of various factors on vegetation cover variation during different periods to promote the understanding of terrestrial ecosystem changes.

Key words: normalized difference vegetation index (NDVI); impact factors; residual analysis; different periods; heterogeneity

持续显著的气候变化和日益增强的人类活动已对全球自然生态系统造成严重影响^[1]. 植被是陆地生态系统的重要组成部分和保护屏障,对于各圈层能量流动和物质循环具有重要调节作用,可作为全球生态系统最直接、最迅速的生物“指示器”^[2-4]. 探索植被对气候变化以及人类活动等非气候因素的响应已成为全球变化研究的重要内容,对于制定区域生态环境保护与社会经济可持续发展相关策略具有重要意义^[5-7].

归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)是目前最常用的表征植被覆盖与生长状况的指标,能够客观且有效地反映不同时空尺度

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2022-08-26

基金项目: 青岛农业大学高层次人才科研基金项目(665/1120041, 663/1120104); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-202221); 山东省自然科学基金项目(ZR2020QD114, ZR2021ME167); 青岛农业大学研究生创新计划项目(QNYCX22031)

作者简介: 金岩松(1999~),男,硕士研究生,主要研究方向为植被覆盖变化及其生态效应, E-mail: jys990817@163.com

* 通信作者, E-mail: jinkai-2014@outlook.com

下的植被覆盖动态信息^[8]. 国内外学者基于 NDVI 数据对不同区域植被变化及其驱动机制开展了大量研究^[8-10]. 例如, Tucker 等^[11] 研究发现, 1982~1999 年北半球高纬度地区 NDVI 的增加与全球气候变暖有关. Ghebregabher 等^[12] 对非洲之角的研究表明, 1982~2013 年 NDVI 与气温呈负相关, 而与降水呈正相关. 1982~2015 年太阳辐射的增加对东南亚的中南半岛地区 NDVI 起抑制作用, 而对中国森林植被区 NDVI 起促进作用^[13,14]. 可见, 气温、降水和太阳辐射均能够影响植被变化, 但响应关系存在空间差异. 此外, 人类活动对植被覆盖的影响不容忽视^[8]. 例如, 近几十年来中国大规模植树造林和集约化土地利用极大地促进了区域植被覆盖的增加, 而快速城市化、过度放牧以及大规模采矿活动等则具有显著负面影响^[15]. 气候变化趋势和人类活动形式与强度常具有很大时空异质性^[2], 因此亟需开展多尺度分析, 以明确不同时期和区域的植被变化原因与差异.

国内有关植被变化的研究主要聚焦于黄土高原^[16]、青藏高原^[17]、长江流域^[18]、黄河流域^[19]和西北草原地区^[20]等生态脆弱区. 然而, 针对东部沿海等人类活动密集地区的研究相对较少. 东部沿海地区南、北纬度跨度大, 气候条件具有地带性差异, 人类活动类型多样且区域差异明显, 其中沿海城市发展迅猛, 而河北、山东等的内陆地区农业发展迅速, 气候和人类活动的双重影响势必引发该区生态环境变化^[21,22]. 例如, 侯西勇等^[23] 研究表明, 1998~2008 年东部沿海地区 NDVI 总体呈改善趋势, 并有明显阶段性变化特征; 张学珍等^[24] 研究发现, 在春季东部沿海地区 NDVI 呈现南强北弱的特征, 且长三角和珠三角区域 NDVI 显著下降; Meng 等^[21] 研究表明, 1982~2015 年东部沿海地区 NDVI 具有季节性变化特征, 气候因素和经济因素对 NDVI 的变化有重要影响. 以往研究对于厘清我国东部沿海地区植被变化响应机制具有重要参考价值, 但对近年来的植被变化新特征以及不同时期的驱动因素差异分析较少, 限制了对该区生态环境演变的深入认识.

本研究基于 NDVI 数据以及气温、降水和太阳辐射资料, 采用变化趋势分析、偏相关分析和多元线性回归残差分析等方法, 通过明确 1982~2019 年中国东部沿海地区植被 NDVI 时空变化特征, 揭示气候变化和人类活动等非气候因素对不同阶段植被覆盖变化的作用, 以期为我国快速城镇化背景下和“双碳”目标下的区域生态环境建设与可持续发展提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国东部沿海地区介于 $113^{\circ}27' \sim 125^{\circ}46'E$, $23^{\circ}30' \sim 43^{\circ}26'N$ 之间, 包括辽宁、河北、山东、江苏、浙江和福建这 6 个省以及北京、天津和上海这 3 个直辖市(图 1). 以江苏中部为界, 研究区北部主要为温带季风气候, 广泛分布暖温带落叶阔叶林; 南部主要为亚热带季风气候, 广泛分布亚热带常绿阔叶林. 该区地处中国“第三级阶梯”, 海拔在 $-163 \sim 2\,615\text{ m}$ 之间, 北部多为平原, 南部多为丘陵. 研究区植被覆盖状况具有明显区域性差异, NDVI 总体呈南高北低的空间分布特征.

1.2 数据来源

本研究采用 GIMMS NDVI3g V1.0 (简称 GIMMS3g) 和 SPOT-VGT NDVI 数据集. GIMMS3g 来源于美国航空航天局 (<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>), 其覆盖时间为 1981 年 7 月至 2015 年 12 月, 时间分辨率为 15 d, 空间分辨率为 8 km, 该数据已被广泛应用于我国不同地区植被覆盖变化研究中^[25-27]. SPOT-VGT NDVI 数据集包含 2005~2019 年空间分辨率为 1 km 的逐月数据, 由中国科学院资源环境科学与数据中心提供 (<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=336>)^[28]. 两套 NDVI 数据都已经过几何校正、辐射

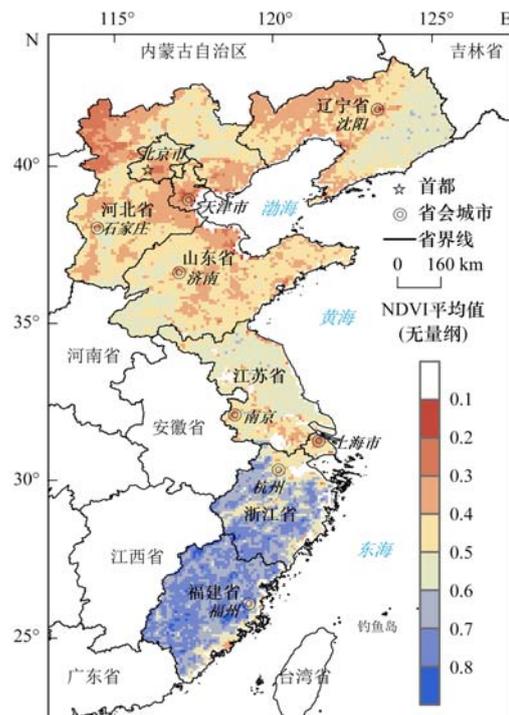


图 1 中国东部沿海地区地理位置与多年平均 NDVI 空间分布

Fig. 1 Geographical location of eastern coastal areas of China and spatial distribution of mean annual NDVI in the study area

校正和大气校正等处理。

1982~2019 年的气温和降水月值数据来自于气候研究中心 (CRU) 时间序列 4.01 版本^[29], 空间分辨率为 0.5°。逐月太阳辐射数据来自于 CRU JRA (Japanese reanalysis) V2.1 数据集^[29], 其分辨率和时间跨度与气温和降水数据相同。以上气候数据已被广泛应用于全球植被和气候变化相关研究^[30~32]。

1.3 研究方法

1.3.1 NDVI 和气候数据预处理

根据 GIMMS3g 和 SPOT-VGT NDVI 之间的关系方程以及 SPOT-VGT 月值数据估算 2016~2019 年的逐月 NDVI 数据, 并将其与 GIMMS3g 数据序列拼接, 以获得 1982~2019 年的 NDVI 序列。由于两种 NDVI 数据采用了不同的传感器, 因此在数据拟合与拼接之前需要对它们进行一致性检验, 以减少非同源数据产生的误差^[7]。首先, 采用最大值合成法对 1982~2015 年 GIMMS3g 数据进行处理, 以获得逐月 NDVI 最大值数据, 使之与 SPOT-VGT 数据的时间分辨率保持一致; 其次, 将 SPOT-VGT 数据重采样至 8 km, 使之与 GIMMS3g 数据的空间分辨率保持一致; 然后选取 GIMMS3g (因变量) 和 SPOT-VGT NDVI (自变量) 序列重合部分 (2005~2015 年逐月 NDVI), 建立二者之间的一元线性回归方程, 即 $y = 0.8783x + 0.0741$ ($R^2 = 0.9658$, $P < 0.01$)。可见, 二者之间具有高度一致性。基于此, 本文对 2016~2019 年 NDVI 月值进行拟合, 并与 2015 年以前的 GIMMS3g 数据拼接, 最终获得 1982~2019 年空间分辨率为 8 km 的逐月 NDVI 序列数据。此外, 根据前人研究经验^[8], 剔除了多年平均 NDVI 小于 0.1 的非植被覆盖区 (如水体和湖泊等), 仅分析多年平均 NDVI 大于 0.1 的植被覆盖区域 (图 1)。

根据已有研究^[26,33], 将研究区植被生长季定义为 4~10 月, 春季、夏季和秋季分别定义为 3~5、6~8 和 9~11 月。根据 NDVI、气温、降水和太阳辐射的月值数据, 进一步计算了生长季和各季节的平均气温、累计降水量和平均太阳辐射量数据, 然后将气象数据线性插值到 NDVI 格点上, 使 NDVI 数据与气象数据的空间分辨率保持一致。

1.3.2 趋势分析

采用一元线性回归分析计算 1982~2019、1982~2000 年 (第一阶段) 以及 2001~2019 年 (第二阶段) NDVI 和各气候因子的变化趋势率^[34]。以 NDVI 为例, 其变化趋势率计算公式为:

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

式中, Slope 为变化趋势率; NDVI_i 为第 i 年的 NDVI 值; n 为研究时段的年数; i 为时间变量 (1 至 n 的整数)。Slope > 0 表示在此研究时段内 NDVI 呈增加趋势, Slope < 0 表示在此研究时段内 NDVI 呈减少趋势, Slope 绝对值越大表示变化速率越快。

1.3.3 偏相关性分析

采用偏相关分析计算 NDVI 与各气候因子的偏相关系数, 以探究 NDVI 与各气候因子的关系。偏相关分析是在不考虑其他变量的影响下, 仅分析剩余两个变量的相关性^[35,36]。其计算公式如下:

$$R_{y_j} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(j_i - \bar{j})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (j_i - \bar{j})^2}} \quad (2)$$

$$R_{y_j,c} = \frac{R_{y_j} - R_{y_c}R_{j_c}}{\sqrt{(1 - R_{y_c}^2)(1 - R_{j_c}^2)}} \quad (3)$$

$$R_{y_j,ck} = \frac{R_{y_j,c} - R_{y_k,c}R_{j_k,c}}{\sqrt{(1 - R_{y_k,c}^2)(1 - R_{j_k,c}^2)}} \quad (4)$$

式中, R_{y_j} 为两个变量之间的相关系数, y_i 和 j_i 分别为第 i 年的 y 值和 j 值, \bar{y} 和 \bar{j} 分别为研究时段内 y 和 j 的平均值; $R_{y_j,c}$ 为控制变量 c 的情况下 y 和 j 的偏相关系数, R_{y_j} 、 R_{y_c} 和 R_{j_c} 分别为对应两个变量的相关系数; $R_{y_j,ck}$ 为控制变量 c 和 k 的情况下 y 和 j 的偏相关系数, $R_{y_j,c}$ 、 $R_{y_k,c}$ 和 $R_{j_k,c}$ 分别为对应变量的偏相关系数; 当 $R_{y_j,ck} > 0$ 表示两个变量呈正相关, 当 $R_{y_j,ck} < 0$ 表示两个变量呈负相关, 其绝对值越大说明二者的关系越紧密。

采用 t 检验来判断偏相关系数的显著性, 其统计量计算公式为:

$$t = \frac{R_{y_j,ck}}{\sqrt{1 - R_{y_j,ck}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (5)$$

式中, $R_{y_j,ck}$ 为偏相关系数; n 为样本数量; m 为自变量个数。通过查询 t 分布表来检验偏相关系数的显著程度。

1.3.4 多元回归残差分析

采用多元线性回归残差分析区分气候变化和人类活动等非气候因素对 NDVI 变化的影响^[8,37,38]。首先, 以气温、降水和太阳辐射为自变量, NDVI 为因变量建立线性回归模型, 计算模型参数; 然后, 基于气温、降水和太阳辐射数据以及构建的回归模型, 计算 NDVI 预测值 (NDVI_{pre}), 并用其趋势率 (Slope_{pre}) 表示

气候变化对 NDVI 变化趋势的影响;最后计算 NDVI 观测值($NDVI_{obs}$)与 $NDVI_{pre}$ 之差,得到 NDVI 残差值($NDVI_{res}$),其趋势率($Slope_{res}$)可用于反映人类活动等非气候因素对 NDVI 变化趋势的影响^[38].多元线性回归模型及残差分析的计算公式如下:

$$NDVI_{pre} = a \times T + b \times P + c \times SR + d + \varepsilon \quad (6)$$

$$NDVI_{res} = NDVI_{obs} - NDVI_{pre} \quad (7)$$

式中, $NDVI_{obs}$ 、 $NDVI_{pre}$ 和 $NDVI_{res}$ 分别为基于遥感影像的 NDVI 观测值、基于回归模型的 NDVI 预测值以及 NDVI 残差值(无量纲); a 、 b 、 c 和 d 为回归模型系数, ε 为随机误差; T 、 P 和 SR 分别为平均气温、累计降水量和平均太阳辐射量,单位分别为 $^{\circ}C$ 、

mm 和 $W \cdot m^{-2}$.

2 结果与分析

2.1 NDVI 时空变化特征

整体上,1982~2019年中国东部沿海地区生长季和各季节 NDVI 均呈显著上升趋势,且春季最快 [$Slope = 0.0165 (10 a)^{-1}$, $P < 0.01$]、夏季最慢 [$Slope = 0.0051 (10 a)^{-1}$, $P < 0.05$] (图 2).在第一阶段和第二阶段,生长季及各季节 NDVI 均呈上升趋势,但趋势率不同,其中第一阶段生长季和春季 NDVI 的增加明显快于第二阶段,夏季和秋季则相反.

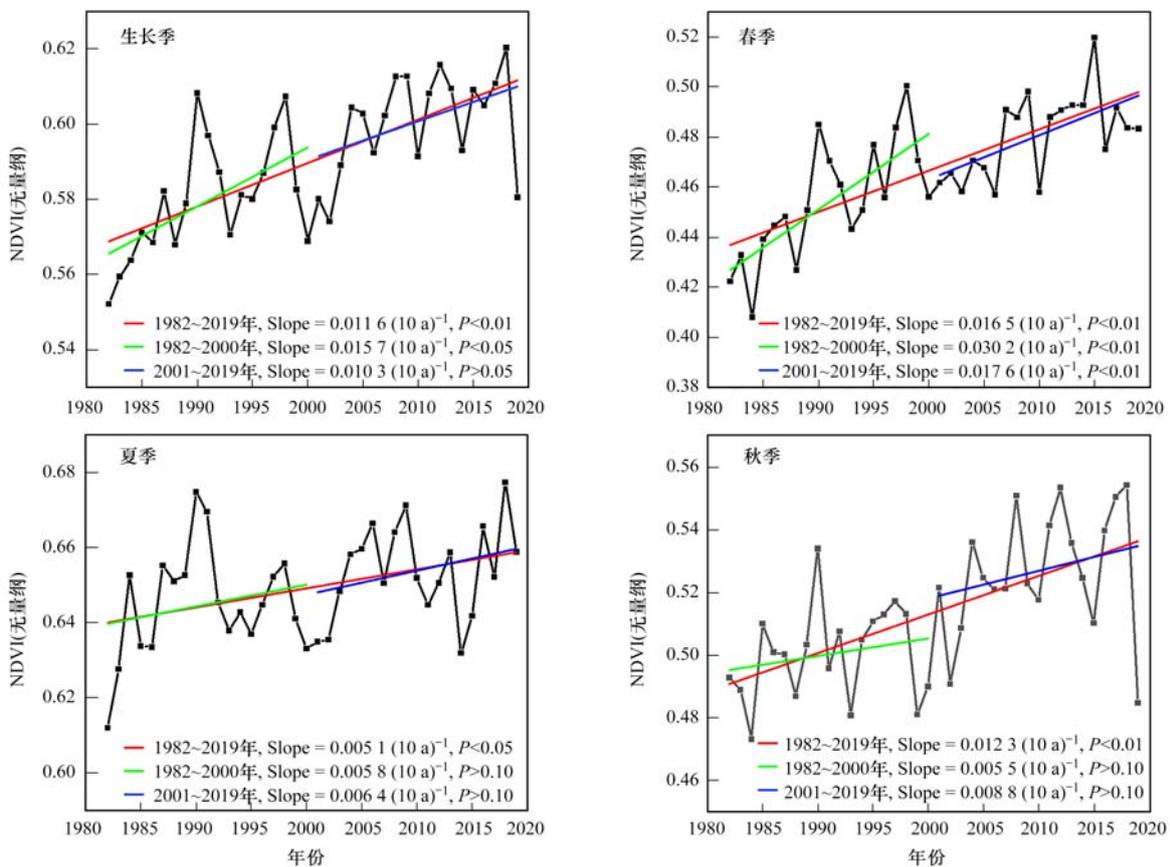


图 2 1982~2019年中国东部沿海地区平均 NDVI 年际变化趋势

Fig. 2 Interannual variation in regional average NDVI in eastern coastal areas of China from 1982 to 2019

1982~2019年研究区生长季及各季节 NDVI 变化速率均具有很大空间差异,前后两阶段 NDVI 趋势率空间分布也不一致(图 3).1982~2019年生长季 NDVI 呈下降趋势的区域主要分布于辽宁东部和长三角地区,其余区域以增加趋势为主,其中呈显著增加和显著减小趋势的区域面积占比分别为 64.2%和 9.2%(图 4);春季 NDVI 呈显著增加趋势的区域面积占比最大(60.2%),而夏季 NDVI 呈显著减小趋势的区域面积占比最大(18.4%).第一阶段生长季 NDVI 呈增加趋势的区域主要分布在研

究区北部,而南部以减小趋势为主;春季 NDVI 呈显著增加趋势的区域明显多于夏季和秋季,且主要集中于北方地区,而夏季 NDVI 呈显著减小趋势的区域多于春季和秋季,占总面积的 7.3%,主要集中于长三角和福建沿海地区.相比于第一阶段,第二阶段生长季和各季节 NDVI 呈下降趋势的区域更加分散,其中,辽宁省 NDVI 呈下降趋势的区域明显扩大;在长江以南,有相当数量的像元,NDVI 由前一阶段的下降或不显著增加趋势转变为显著增加趋势(图 4).

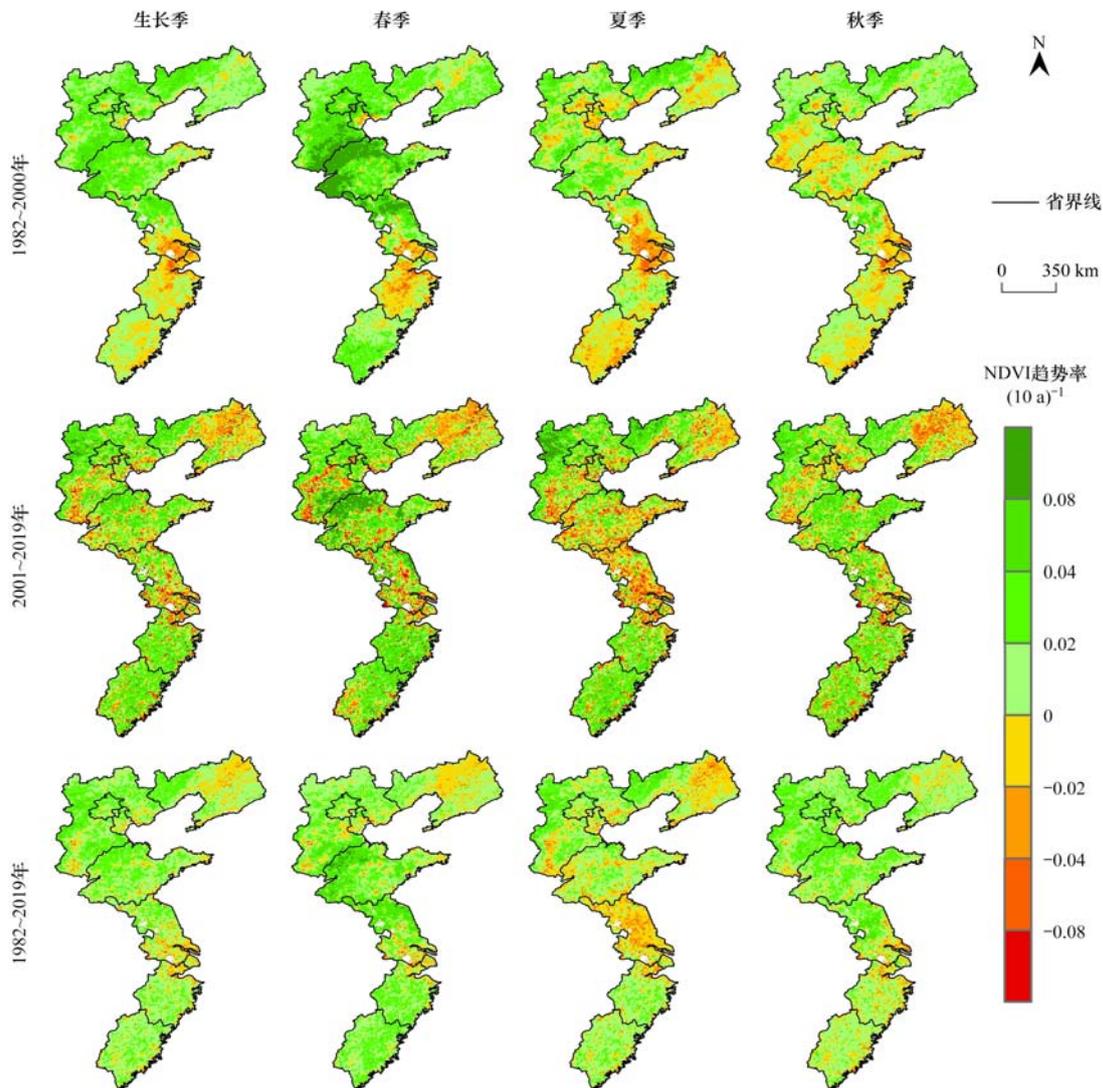


图3 中国东部沿海地区 NDVI 变化趋势空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of NDVI trend in eastern coastal areas of China

2.2 NDVI 与气候因子的关系

2.2.1 区域尺度分析

1982~2019年研究区生长季气温呈极显著上升趋势($P < 0.01$),生长季降水呈不显著上升趋势,太阳辐射呈显著下降趋势($P < 0.05$),其中第二阶段的气温和降水增加速率明显快于第一阶段,而太阳辐射由前一阶段的下降趋势转变为上升(表1).1982~2019年各季节升温趋势率排序为春季 > 秋

季 > 夏季,这与各季节 NDVI 趋势率排序一致(图2).相比于第一阶段,第二阶段春季升温较慢,而夏季和秋季升温更快,这与各季节 NDVI 变化的阶段性差异一致;第一阶段仅夏季降水量呈增加趋势,而第二阶段各季节降水量均增加;第一阶段各季节太阳辐射均呈不显著下降趋势,而第二阶段春季和夏季太阳辐射转变为上升趋势,秋季则呈显著下降趋势($P < 0.05$).

表1 1982~2019年中国东部沿海地区气温、降水量和太阳辐射年际变化趋势率¹⁾

Table 1 Trend rates of temperature, precipitation, and solar radiation in eastern coastal areas of China in the study periods

时间	1982~2000年			2001~2019年			1982~2019年		
	气温	降水	太阳辐射	气温	降水	太阳辐射	气温	降水	太阳辐射
生长季	0.26	3.35	-1.82	0.32**	35.47	1.14	0.31**	6.67	-1.37*
春季	0.40	-6.39	-3.01	0.37	6.06	2.65	0.41**	-5.33	-0.68
夏季	0.27	28.51	-1.10	0.39*	30.80*	0.80	0.27**	10.10	-1.62**
秋季	0.09	-17.94	-0.49	0.31	12.03	-2.49*	0.29**	0.76	-1.56**

1) * 和 ** 分别为变化趋势在 0.05 和 0.01 水平上显著; 气温、降水和太阳辐射的变化趋势率单位分别为: $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}$

偏相关分析结果表明(表 2),1982~2019 年生长季 NDVI 与气温之间存在极显著正相关关系($P < 0.01$),与降水以及太阳辐射的相关性不显著;各季节 NDVI 与气温的相关性也明显强于降水和太阳辐射,特别是春季 NDVI 与气温呈极显著正相关关系($P < 0.01$). 因此,气温的迅速上升可能是近 38 年来 NDVI 显著增加的主要气候驱动力. 第一、二阶段生长季及各季节 NDVI 与 3 个气候因

子相关性均不显著,但两阶段的偏相关系数差异较大,甚至符号相反. 例如,春季 NDVI 与太阳辐射的偏相关系数由第一阶段的负值变为第二阶段的正值,表明其对 NDVI 的增加由抑制作用转变为促进作用. 由表 2 可知,第一、二阶段生长季 NDVI 分别与降水和太阳辐射的关系最为紧密,春季分别为气温和太阳辐射,夏季与春季相反,而秋季则均为太阳辐射.

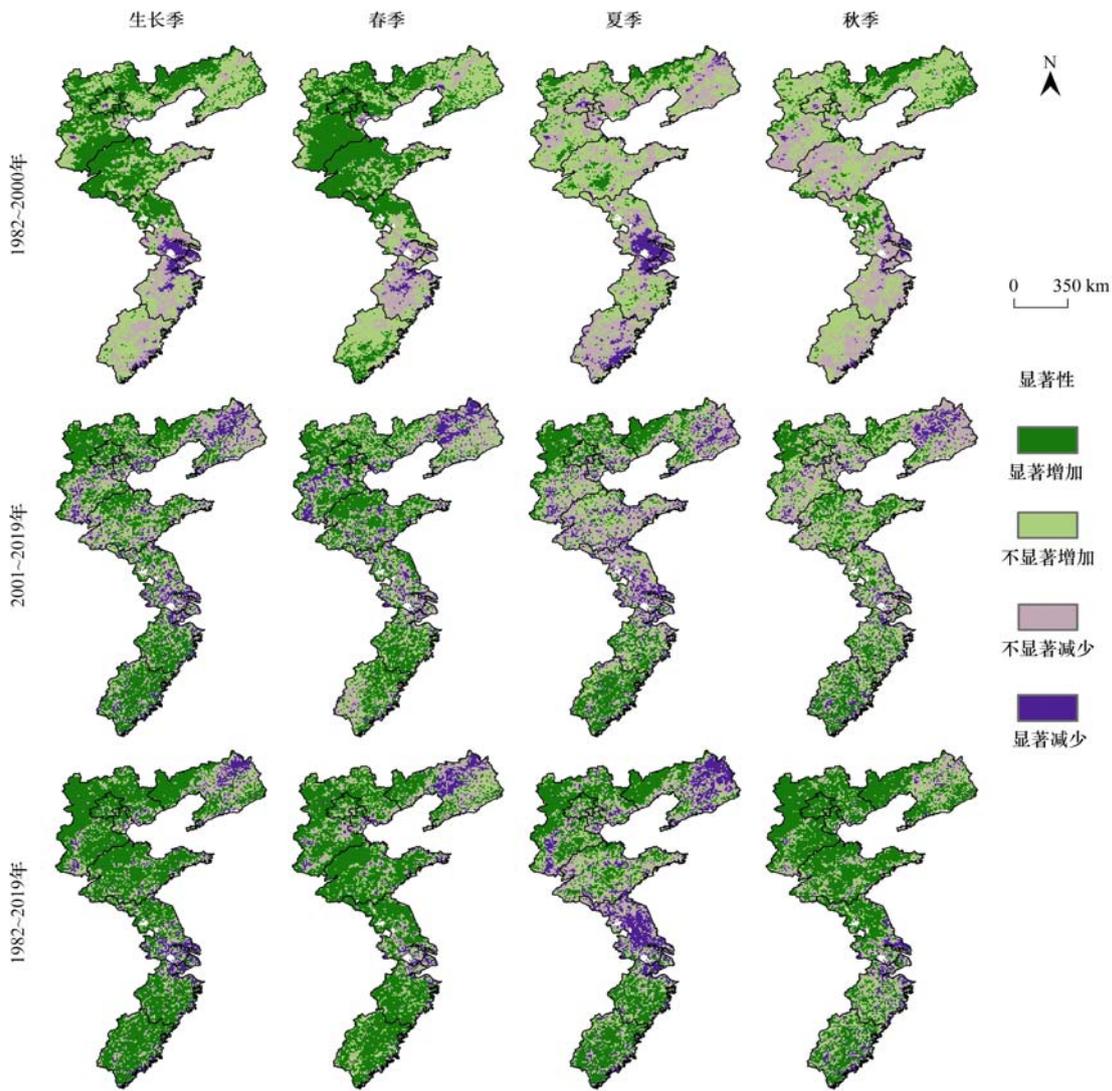


图 4 中国东部沿海地区 NDVI 变化趋势显著性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the significance of NDVI change in eastern coastal areas of China

表 2 中国东部沿海地区生长季和各季节 NDVI 与不同时段气温、降水和太阳辐射的偏相关系数¹⁾

Table 2 Partial correlation coefficients between NDVI and temperature, precipitation, and solar radiation for growing season and different seasons in different periods in eastern coastal areas of China

时间	1982~2000 年			2001~2019 年			1982~2019 年		
	气温	降水	太阳辐射	气温	降水	太阳辐射	气温	降水	太阳辐射
生长季	0.132	0.302	0.054	0.006	0.287	0.318	0.484 **	0.130	0.005
春季	0.443	0.133	-0.126	0.263	0.111	0.409	0.573 **	-0.039	-0.065
夏季	0.161	0.098	0.179	0.381	-0.016	-0.165	0.402 *	0.018	-0.004
秋季	0.235	0.140	0.252	-0.013	-0.014	-0.135	0.302	0.094	-0.014

1) * 和 ** 分别为偏相关系数在 0.05 和 0.01 水平上显著

2.2.2 像元尺度分析

研究区生长季及各季节 NDVI 与气温、降水和太阳辐射的关系均存在很大时空差异(图 5~7). 1982~2019 年生长季 NDVI 与气温呈正相关的区域面积占比为 78.5%, 且多数区域为显著正相关, 呈显著负相关的区域面积占比为 13.6%, 主要分布于太湖流域; 与第一阶段相比, 第二阶段生长季 NDVI

与气温呈显著正相关的区域明显增加, 其中浙江和福建变化最大(图 5). 季节尺度上, 1982~2019 年春季 NDVI 与气温呈正相关的区域面积占比最多(81.6%), 可见, 春季 NDVI 对气温的变化最为敏感, 而夏季 NDVI 与气温呈负相关的区域面积占比最多(38.0%); 第一、二阶段春季 NDVI 与气温呈正相关的区域面积均大于相同时段夏季和秋季.

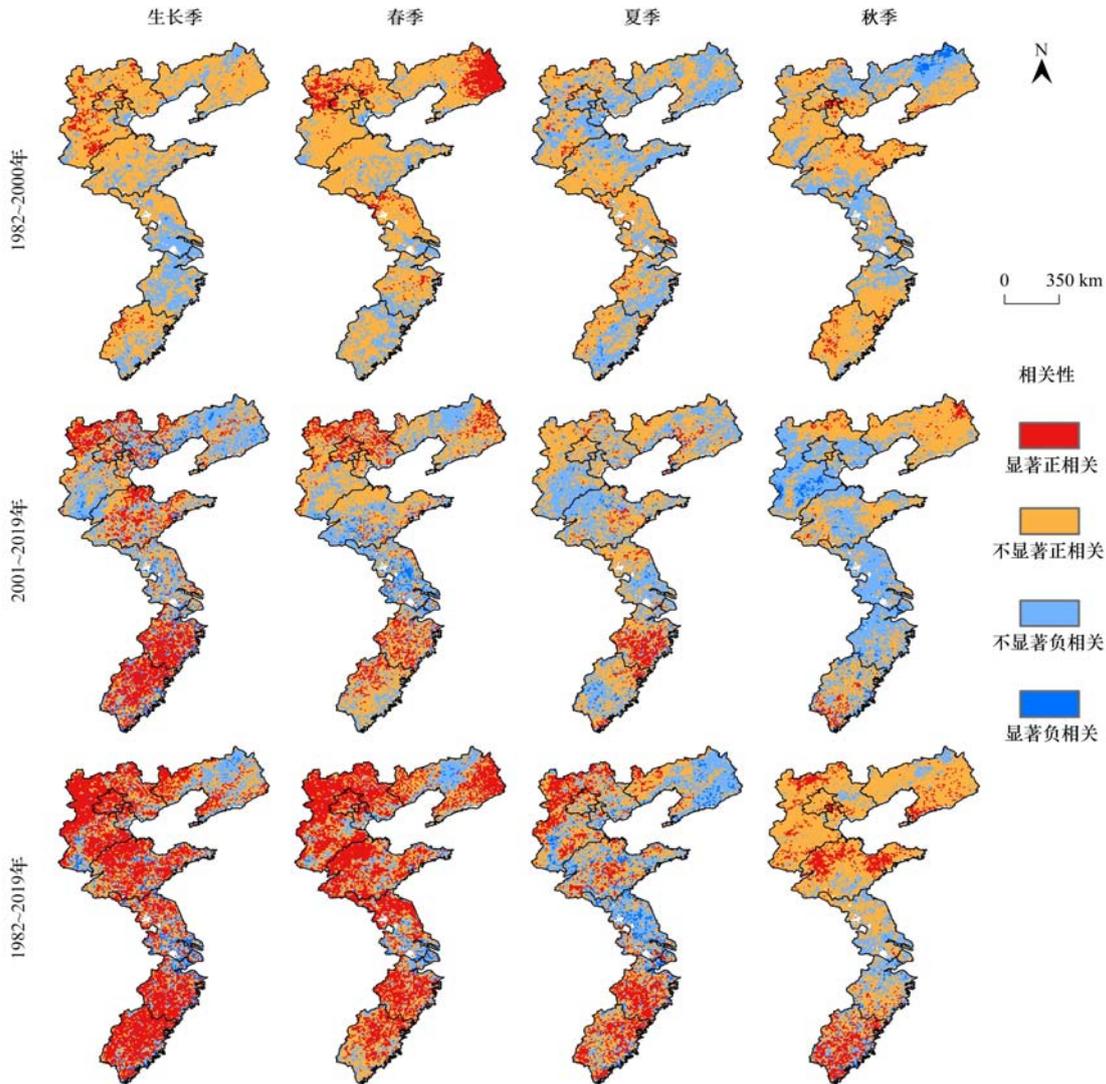


图 5 中国东部沿海地区各季节 NDVI 与气温偏相关分析

Fig. 5 Partial correlation analysis between NDVI and temperature in various seasons in eastern coastal areas of China

1982~2019 年以及第一、二阶段, 生长季 NDVI 与降水的相关性在空间分布上有明显的区域特征(图 6), 呈正相关的区域主要分布于半湿润区(辽宁西部、京津冀地区和山东), 而呈负相关的区域主要分布于湿润区(辽宁东部、长三角地区和福建). 季节尺度上, 1982~2019 年秋季 NDVI 与降水呈显著正相关的区域最多; 而在第一、二阶段夏季 NDVI 与降水呈显著正相关的区域最多, 其主要分布于环渤海区域; 1982~2019 年及第一、二阶段, 江苏夏季 NDVI 与降水呈显著负相关的区域明显多于同时

段春季和秋季.

1982~2019 年以及第一、二阶段, 生长季 NDVI 与太阳辐射以正相关为主, 部分地区呈现显著正(负)相关关系(图 7). 季节尺度上, 1982~2019 年春季 NDVI 与太阳辐射呈正相关的区域面积占比为 53.8%, 其中, 浙江区域呈显著正相关, 而夏季和秋季 NDVI 与太阳辐射以负相关为主, 且均主要分布于环渤海区域; 第一阶段春季 NDVI 与太阳辐射呈负相关的区域面积占比为 50.6%, 其中, 在河北北部呈显著负相关; 相比于第一阶段, 第二阶段春季

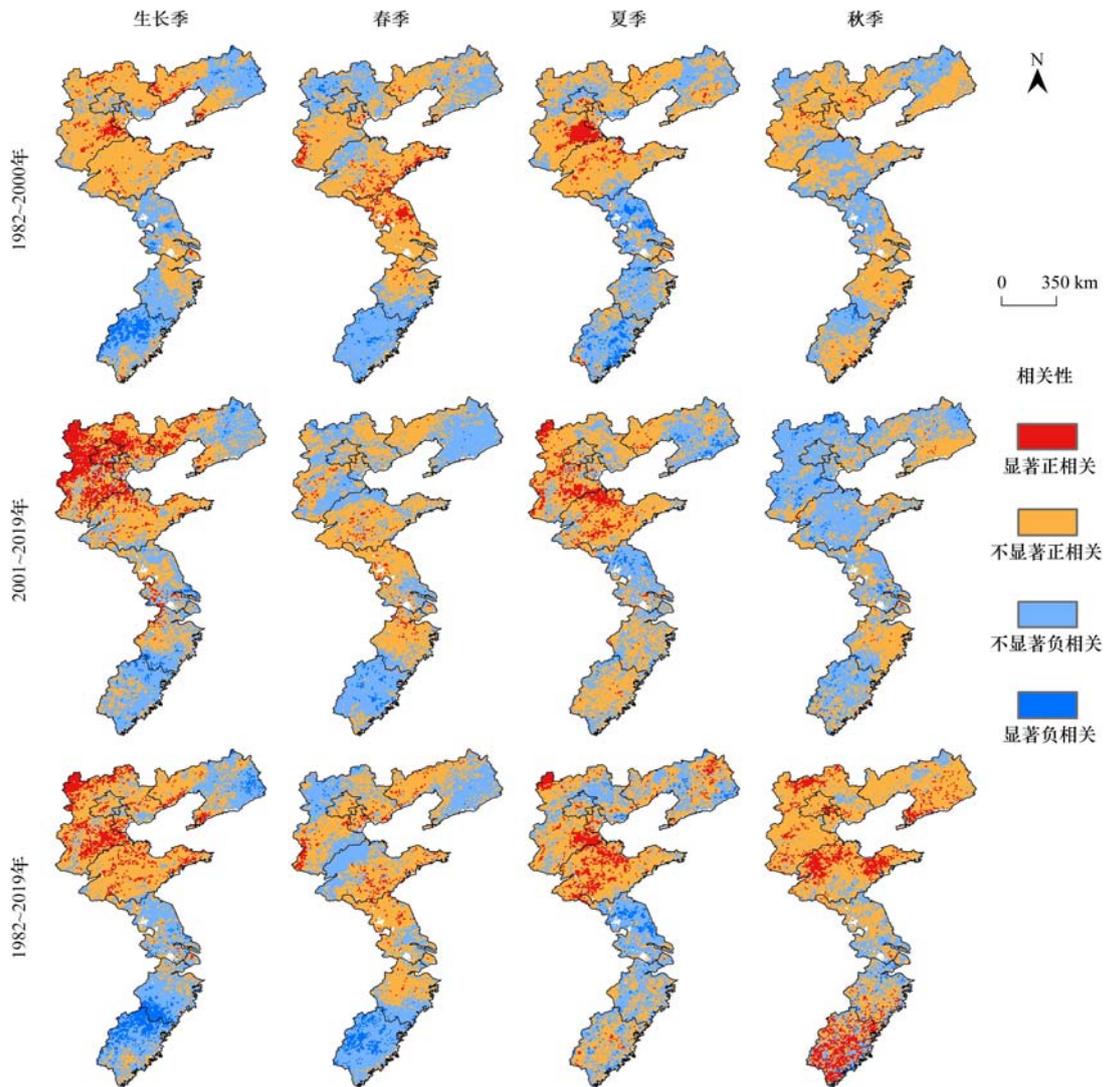


图6 中国东部沿海地区各季节 NDVI 与降水量偏相关分析

Fig. 6 Partial correlation analysis between NDVI and precipitation in various seasons in eastern coastal areas of China

NDVI 与太阳辐射呈正相关的区域面积占比 (78.8%) 大幅上升, 而夏季和秋季大幅下降。

2.3 气候变化和人类活动等非气候因素对 NDVI 变化的影响

图8表明, 1982~2019年 $Slope_{pre}$ 和 $Slope_{res}$ 的空间分布具有一致性, 大多数区域 $NDVI_{pre}$ 和 $NDVI_{res}$ 均呈增加趋势, 但趋势率多在 $0 \sim 0.02 (10 a)^{-1}$; $Slope_{pre} > 0.02 (10 a)^{-1}$ 的区域面积多于 $Slope_{res} > 0.02 (10 a)^{-1}$ 的区域, 且主要分布于研究区北部; $Slope_{pre}$ 和 $Slope_{res}$ 为负值的区域较少, 均集中于长三角和辽宁东部地区。图9表明, 1982~2019年 $NDVI_{pre}$ 和 $NDVI_{res}$ 呈显著增加(减小)趋势的区域面积占比分别为 69.1% (14.1%) 和 35.1% (4.1%)。因此, 相比于人类活动等非气候因素的影响, 气候变化对近 38 年来研究区 NDVI 变化的影响更大。

第一阶段, $Slope_{pre}$ 为正值区域 (64.8%) 明显

少于 $Slope_{res}$ 为正值区域 (79.0%), 且均集中于研究区北部, 其中 $Slope_{pre}$ 主要在 $0 \sim 0.02 (10 a)^{-1}$, 而 $Slope_{res} > 0.04 (10 a)^{-1}$ 的区域明显多于 $Slope_{pre}$ (图8)。此外, $NDVI_{pre}$ 和 $NDVI_{res}$ 呈显著增加(减小)趋势的区域面积占比分别为 8.9% (0.7%) 和 31.3% (3.6%) (图9)。可见, 人类活动等非气候因素为研究区第一阶段 NDVI 变化的主导因素。

第二阶段, $Slope_{pre}$ 为正值区域面积占比 (68.3%) 略多于 $Slope_{res}$ (61.9%), 但其空间分布差异较大, 其中河北和山东多数地区的 $Slope_{pre}$ 较 $Slope_{res}$ 大, 多在 $0.02 (10 a)^{-1}$ 以上 (图8)。此外, $NDVI_{pre}$ 呈显著增加和减小趋势的区域面积占比分别为 41.1% 和 12.5%, 约为 $NDVI_{res}$ 呈显著增加和减小趋势的区域面积的两倍 (图9)。相比于第一阶段, 第二阶段气候变化对研究区 NDVI 变化的影响明显增加, 已成为 NDVI 变化的主导因素, 而人类活动等

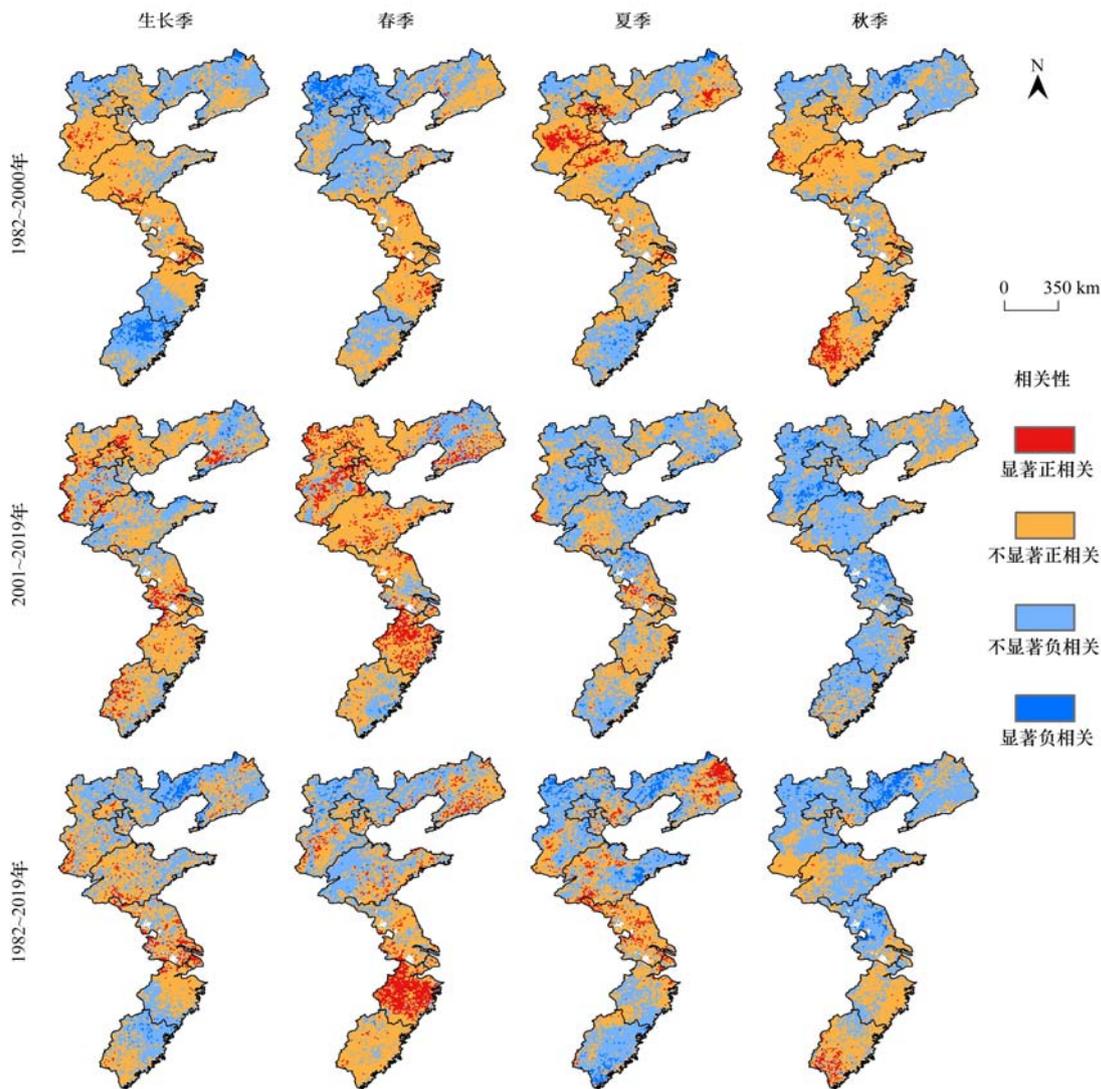


图7 中国东部沿海地区各季节 NDVI 与太阳辐射偏相关分析

Fig. 7 Partial correlation analysis between NDVI and solar radiation in various seasons in eastern coastal areas of China

非气候因素的影响有所下降,转变为次要因素。

3 讨论

本研究表明,1982~2019年中国东部沿海地区 NDVI 增加速率与气温上升速率的季节性差异具有一致性,这与 Meng 等^[21]对该地区的研究结果一致。其中,近38年来研究区春季 NDVI 和气温增加速率均为各季节最快,二者相关性也最强(偏相关系数达0.573, $P < 0.01$)。因此,研究区 NDVI 的显著增加与气温的快速上升密切相关。气温上升有利于土壤有机质和营养元素的分解与释放,同时可增强植被光合作用,春季气温上升还可能导致植被物候开始时间提前,以上均对地表植被生长具有重要促进作用^[21,39]。研究区生长季 NDVI 与降水的响应关系具有明显区域性特征。其中,辽宁西部、京津冀和山东等半湿润地区 NDVI 与降水多呈正相关,而辽宁东部、长三角和福建等湿润地区 NDVI 与降水多呈

负相关。通常,半湿润地区降水少且潜在蒸发量大,降水是植被生长的主要限制因素之一,因此,降水增加会促进植被生长。相反,在湿润地区,充足的降水一般可以满足植被生长需求,降水过多反而会增加云量,进而使日照时数和太阳辐射量减少,植物光合作用效益减弱,对植被生长造成不利影响^[40]。此外,本研究发现,江苏省夏季 NDVI 与降水呈显著负相关的区域均明显多于春季和秋季,这可能与夏季极端降雨频发有关。李建国等^[41]研究表明,1982~2015年中国东部沿海地区暴雨发生次数明显增加,且集中在夏季,暴雨灾害频发对江苏 NDVI 增加有显著抑制性,这与本研究观测到的结果一致。

除植被变化驱动因素的季节性差异外,本文发现气候变化和人类活动等非气候因素对研究区 NDVI 变化影响也存在明显阶段性差异。其中,人类活动等非气候因素对第一阶段的生长季 NDVI 增加起主导作用。一方面,该时期人类活动对 NDVI 增加

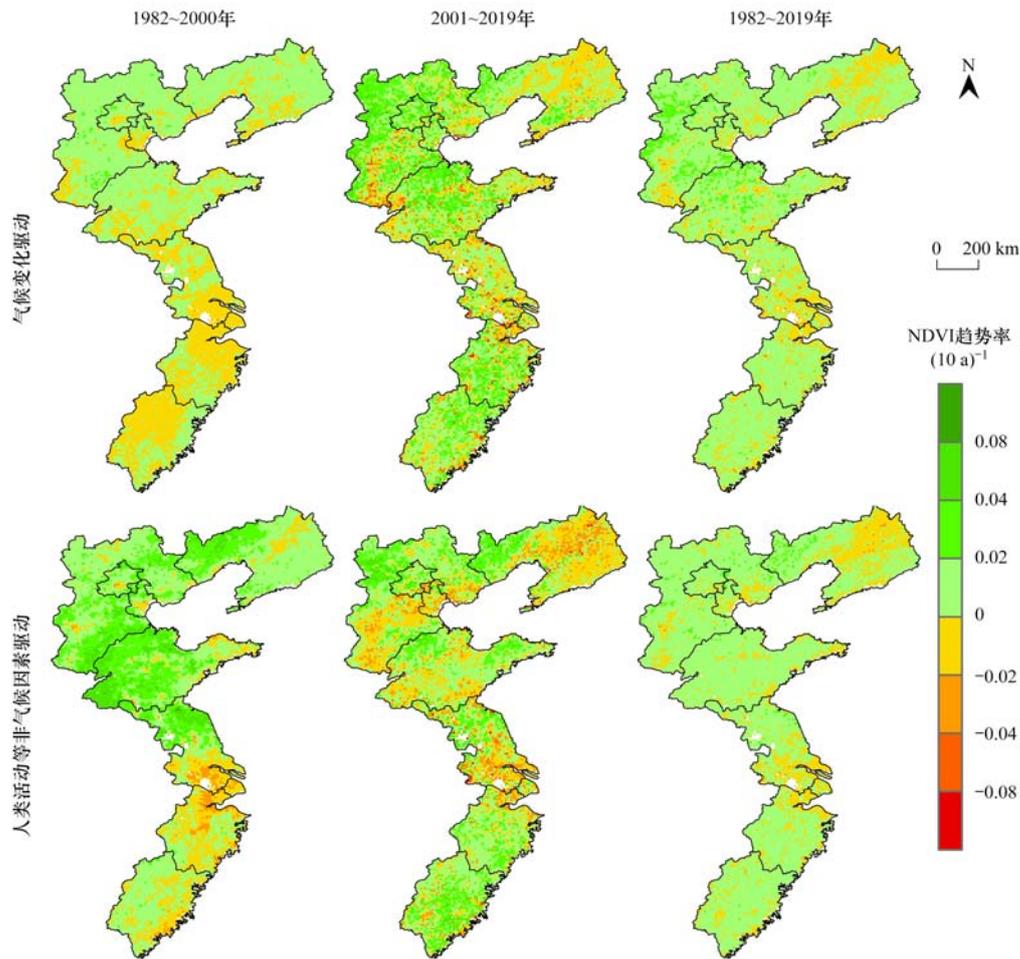


图8 气候变化和人类活动等非气候因素对中国东部沿海地区生长季NDVI变化趋势的影响空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of effects of climate change and non-climatic factors on the trend of growing season NDVI in eastern coastal areas of China

影响较大的区域主要分布于辽宁西部、河北、山东和江苏北部,其土地利用类型以耕地为主,农业技术进步和管理水平提高(如农业灌溉率、开垦面积、农药使用量和施肥量增加)可能是导致植被覆盖增加的重要原因^[8].另一方面,1991年以来研究区相继实施了沿海防护林体系建设工程和淮河太湖流域综合治理防护林体系建设工程,这对植被覆盖的增加同样具有积极作用^[16,42].在第二阶段,气候变化成为研究区生长季NDVI增加的主要驱动力.进入21世纪,我国城市化发展迅速,特别是环渤海地区、长三角以及珠三角地区城市扩张速度明显加快,大量耕地、林地和草地被城市用地占据,对植被覆盖具有明显负面影响^[43~45].图10表明,研究区第二阶段建设用地面积增加速率明显大于第一阶段,第二阶段建设用地快速扩张的区域与NDVI_{res}明显下降的区域在空间上高度一致(图8).相反,第二阶段研究区生长季降水和太阳辐射相比于第一阶段增加明显,京津冀地区以及福建北部一些区域降水对NDVI的作用明显增强,福建、浙江等地气温和太阳辐射

对NDVI的作用明显增强.以上结果与图8所示NDVI_{pre}的变化趋势相符.在区域尺度上看,降水和太阳辐射的增加是第二阶段NDVI变化的重要影响因素(表2).

本研究结果对于理解和认识东部沿海地区植被覆盖变化时空差异与驱动机制具有一定积极作用,但在以下3个方面仍可能存在不确定性或局限性.首先,本研究采用的NDVI遥感数据的空间分辨率较低,且可能受卫星传感器、云和噪声等的影响,因此难以准确反映城市等局部区域的植被覆盖变化情况;同时NDVI数据在植被覆盖状况好的地区易出现饱和现象,即对植被覆盖的变化不敏感,进而导致低估NDVI变化速率,这也可能是本研究区夏季NDVI上升缓慢的原因之一^[46].其次,在像元尺度上建立的多元线性回归模型可能存在拟合度较低的情况,增加了对气候和非气候因素影响评价的不确定性.此外,由于非气候因素众多,包含土地利用变化和农业生产等人类活动、火灾和水灾等自然灾害以及气候波动等,而本研究并未

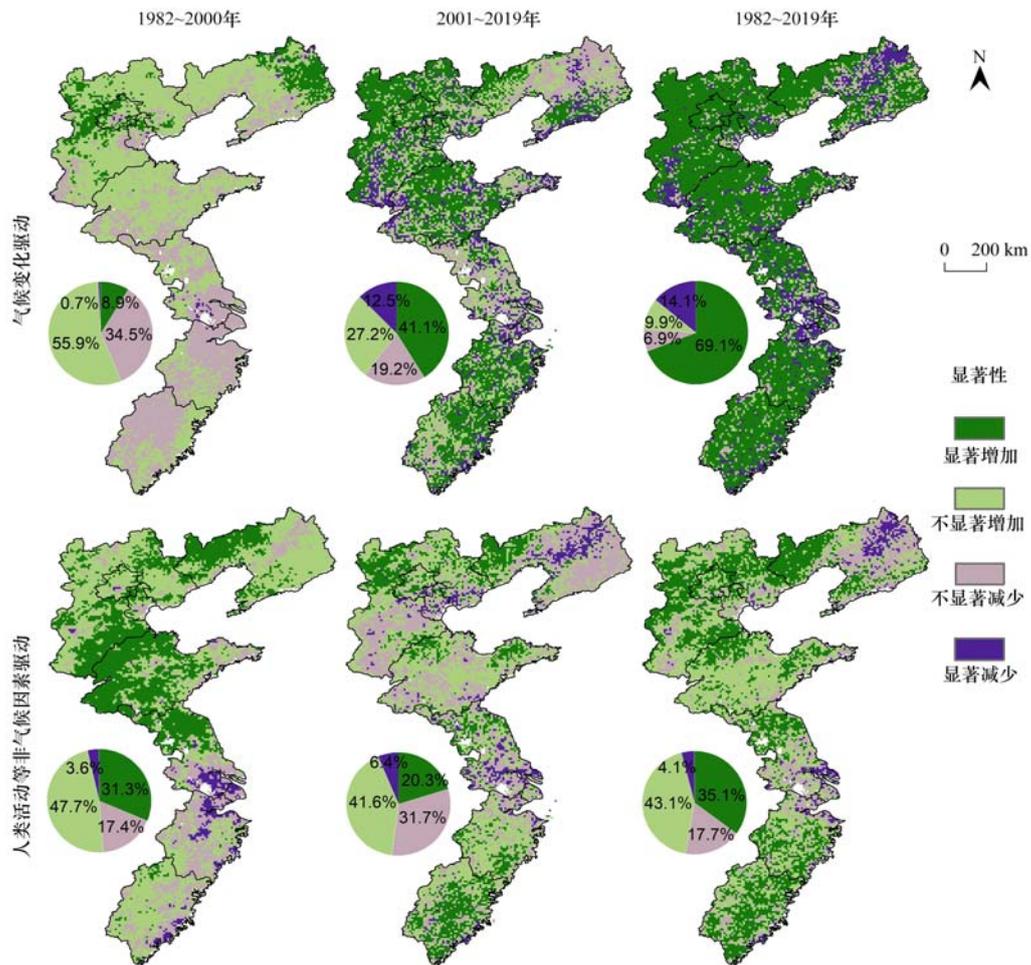


图9 气候变化和人类活动等非气候因素导致的生长季 NDVI 变化趋势显著性空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of the significance of trends in growing season NDVI caused by climate change and non-climatic factors in eastern coastal areas of China

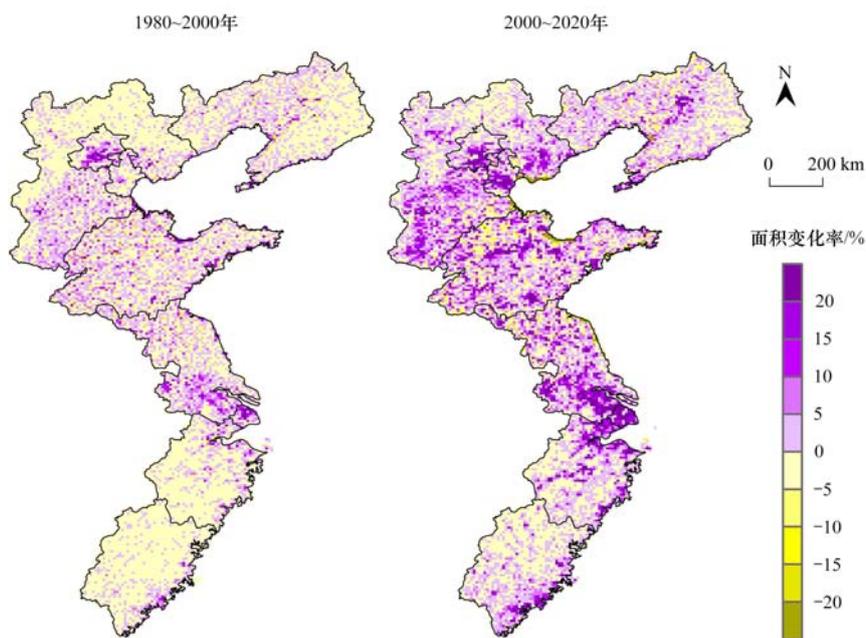


图10 中国东部沿海地区建设用地面积变化空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of change in construction land area in eastern coastal areas of China

详细区分各因素的影响,仅对人类活动相关作用进行了讨论,如何更准确地判别各因素的影响有

待进一步探讨. 总之,采用更高质量的遥感影像资料以及更为稳健的研究方法,综合多种影响因素

和时空尺度开展研究,将有助于进一步厘清区域植被覆盖变化驱动机制。

4 结论

(1)中国东部沿海地区 NDVI 变化具有区域性、阶段性和季节性差异.其中,1982~2019 年生长季、春季和秋季 NDVI 均呈极显著增加趋势,且春季增加最为明显.就生长季而言,第一阶段 NDVI 显著增加区域集中于北方地区,而显著下降区域集中于长三角等南方地区;第二阶段北方地区 NDVI 显著减少的区域以及南方地区 NDVI 显著增加的区域明显增多。

(2)就区域平均而言,近 38 年来生长季和各季节 NDVI 与气温的关系最为紧密,但 NDVI 与各气候因子的关系在不同阶段和地区差异明显,起主导作用的气候因子也不相同.其中,绝大多数区域近 38 年来生长季 NDVI 与气温均呈显著正相关关系,而春季气温对 NDVI 增加的促进作用最明显;秋季降水对 NDVI 增加的促进作用较春、夏季节强;春季太阳辐射对 NDVI 起促进作用的区域集中于南方.总体上,气温升高对近 38 年来研究区 NDVI 的增加作用最大,降水和太阳辐射变化也有不可忽视的作用。

(3)气候变化和人类活动等非气候因素对研究区生长季 NDVI 变化的影响具有阶段性差异,二者分别主导了第二和第一阶段的 NDVI 变化.整体上,气候变化对近 38 年来研究区 NDVI 变化的影响更大.然而,气候和非气候因素的影响呈现很大空间异质性,其中第一阶段 NDVI_{res}呈显著上升的区域主要分布于研究区北部;第二阶段 NDVI_{pre}呈显著上升的区域主要分布于京津冀、福建和浙江地区。

参考文献:

- [1] IPCC. Summary for policymakers [A]. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al* (Eds.). 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: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 崔浩楠, 罗海江, 张学珍. 1982-2019 年长江经济带植被覆盖变化的时空特征 [J]. 生态学杂志, 2021, **40** (8): 2517-2529.
- Cui H N, Luo H J, Zhang X Z. Temporal and spatial characteristics of green vegetation cover changes in the Yangtze River Economic Belt from 1982 to 2019 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40** (8): 2517-2529.
- [3] 崔利芳, 王伦澈, 屈赛, 等. 气温, 降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响 [J]. 地球科学, 2020, **45** (6): 1905-1917.
- Cui L F, Wang L C, Qu S, *et al*. Impacts of temperature, precipitation and human activity on vegetation NDVI in Yangtze River Basin, China [J]. Earth Science, 2020, **45** (6): 1905-1917.
- [4] 王建邦, 赵军, 李传华, 等. 2001-2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局 [J]. 地理学报, 2019, **74** (3): 504-519.
- Wang J B, Zhao J, Li C H, *et al*. The spatial-temporal patterns of the impact of human activities on vegetation coverage in China from 2001 to 2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74** (3): 504-519.
- [5] 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 等. 1998-2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 [J]. 环境科学, 2021, **42** (11): 5100-5108.
- Yang Y L, Yang K, Luo Y, *et al*. Effect of vegetation coverage on the temporal and spatial distribution of PM_{2.5} concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016 [J]. Environmental Science, 2021, **42** (11): 5100-5108.
- [6] 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 等. 2000-2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 [J]. 环境科学, 2022, **43** (6): 3230-3240.
- Xu Y, Huang W T, Dou S Q, *et al*. Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in southwest china from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science, 2022, **43** (6): 3230-3240.
- [7] 孙天瑶, 李雪梅, 许民, 等. 2000-2018 年塔里木河流域植被覆盖时空格局 [J]. 干旱区地理, 2020, **43** (2): 415-424.
- Sun T Y, Li X M, Xu M, *et al*. Spatial-temporal variations of vegetation coverage in the Tarim River Basin from 2000 to 2018 [J]. Arid Land Geography, 2020, **43** (2): 415-424.
- [8] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982-2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响 [J]. 地理学报, 2020, **75** (5): 961-974.
- Jin K, Wang F, Han J Q, *et al*. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, **75** (5): 961-974.
- [9] Eckert S, Hüsler F, Liniger H, *et al*. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia [J]. Journal of Arid Environments, 2015, **113**: 16-28.
- [10] 田智慧, 任祖光, 魏海涛. 2000-2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 [J]. 环境科学, 2022, **43** (2): 743-751.
- Tian Z H, Ren Z G, Wei H T. Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science, 2022, **43** (2): 743-751.
- [11] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, *et al*. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999 [J]. International Journal of Biometeorology, 2001, **45** (4): 184-190.
- [12] Ghebregabher M G, Yang T B, Yang X M, *et al*. Assessment of NDVI variations in responses to climate change in the Horn of Africa [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2020, **23** (3): 249-261.
- [13] 钱满亿. 中南半岛地区植被与气候的联系及其未来预估 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [14] 刘雪佳. 中国陆地主要植被类型生产力及其与气候因子的关系 [D]. 太原: 山西大学, 2019.
- Liu X J. Main land vegetation productivity and their relationship with climatic factors in China [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.
- [15] Feng D R, Fu M C, Sun Y Y, *et al*. How large-scale anthropogenic activities influence vegetation cover change in China? A review [J]. Forests, 2021, **12** (3), doi: 10.3390/

- f12030320.
- [16] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(3): 449-460.
Zhao A Z, Zhang A B, Liu H X, *et al.* Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of grain for green project in the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(3): 449-460.
- [17] 杨达, 易桂花, 张廷斌, 等. 青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(4): 1361-1372.
Yang D, Yi G H, Zhang T B, *et al.* Spatiotemporal variation and driving factors of growing season NDVI in the Tibetan Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(4): 1361-1372.
- [18] 张亮, 丁明军, 张华敏, 等. 1982-2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(12): 2084-2097.
Zhang L, Ding M J, Zhang H M, *et al.* Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze River Basin during 1982-2015 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(12): 2084-2097.
- [19] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000-2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学, 2021, **43**(4): 849-858.
Zhang Z Q, Liu H, Zuo Q T, *et al.* Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000-2019 [J]. *Resources Science*, 2021, **43**(4): 849-858.
- [20] 张华, 徐存刚, 王浩. 2001-2018 年西北地区植被变化对气象干旱的响应[J]. 地理科学, 2020, **40**(6): 1029-1038.
Zhang H, Xu C G, Wang H. Response of vegetation change to meteorological drought in Northwest China from 2001 to 2018 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(6): 1029-1038.
- [21] Meng Z Q, Liu M, Gao C C, *et al.* Greening and browning of the coastal areas in mainland China: spatial heterogeneity, seasonal variation and its influential factors [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **110**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105888.
- [22] 韩贵锋. 中国东部地区植被覆盖的时空变化及其人为因素的影响研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
Han G F. Spatio-temporal change of vegetation cover in east China and influence of artificial factors [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.
- [23] 侯西勇, 应兰兰, 高猛, 等. 1998-2008 年中国东部沿海植被覆盖变化特征[J]. 地理科学, 2010, **30**(5): 735-741.
Hou X Y, Ying L L, Gao M, *et al.* Character of vegetation cover change in China's eastern coastal Areas 1998-2008 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, **30**(5): 735-741.
- [24] 张学珍, 戴君虎, 葛全胜. 1982-2006 年中国东部春季植被变化的区域差异[J]. 地理学报, 2012, **67**(1): 53-61.
Zhang X Z, Dai J H, Ge Q S. Spatial differences of changes in spring vegetation activities across eastern China during 1982-2006 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(1): 53-61.
- [25] Jin K, Wang F, Zong Q L, *et al.* Spatiotemporal differences in climate change impacts on vegetation cover in China from 1982 to 2015 [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(7): 10263-10276.
- [26] 金凯. 中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Jin K. Spatio-temporal variations of vegetation cover and its relationships between climate change and human activities over China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [27] 杜加强, 舒俭民, 赵晨曦, 等. 两代 AVHRR GIMMS NDVI 数据集的对比分析——以新疆地区为例 [J]. 生态学报, 2016, **36**(21): 6738-6749.
Du J Q, Shu J M, Zhao C X, *et al.* Comparison of GIMMS NDVI3g and GIMMS NDVIg for monitoring vegetation activity and its responses to climate changes in Xinjiang during 1982-2006 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(21): 6738-6749.
- [28] Liu L B, Wang Y, Wang Z, *et al.* Elevation-dependent decline in vegetation greening rate driven by increasing dryness based on three satellite NDVI datasets on the Tibetan Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **107**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105569.
- [29] Harris I, Osborn T J, Jones P, *et al.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset [J]. *Scientific Data*, 2020, **7**(1), doi: 10.1038/s41597-020-0453-3.
- [30] Liu Q, Zhang J H, Zhang H R, *et al.* Evaluating the performance of eight drought indices for capturing soil moisture dynamics in various vegetation regions over China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **789**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147803.
- [31] Verhoeve S L, Keijzer T, Kaitila R, *et al.* Vegetation resilience under increasing drought conditions in northern Tanzania [J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(22), doi: 10.3390/rs13224592.
- [32] Liu Y, Yue Q M, Wang Q Y, *et al.* A framework for actual evapotranspiration assessment and projection based on meteorological, vegetation and hydrological remote sensing products [J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(18), doi: 10.3390/rs13183643.
- [33] 张学珍, 朱金峰. 1982-2006 年中国东部植被覆盖度的变化 [J]. 气候与环境研究, 2013, **18**(3): 365-374.
Zhang X Z, Zhu J F. Variations in fractional vegetation coverage over eastern China during 1982-2006 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, **18**(3): 365-374.
- [34] 赵倩倩, 张京朋, 赵天保, 等. 2000 年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应 [J]. 高原气象, 2021, **40**(2): 292-301.
Zhao Q Q, Zhang J P, Zhao T B, *et al.* Vegetation changes and its response to climate change in china Since 2000 [J]. *Plateau Meteorology*, 2021, **40**(2): 292-301.
- [35] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [36] 王一, 郝利娜, 赵美龄, 等. 2001-2018 年重庆植被 NDVI 变化及其对气候因子和人类活动的响应 [J]. 水土保持研究, 2021, **28**(5): 222-229.
Wang Y, Hao L N, Zhao M L, *et al.* Variation of vegetation NDVI and its response to climatic factors and human activities in Chongqing from 2001 to 2018 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(5): 222-229.
- [37] Jin K, Jin Y S, Wang F, *et al.* Impacts of anthropogenic activities on vegetation cover changes in the Circum-Bohai-Sea region, China [J]. *Geocarto International*, 2021, doi: 10.1080/10106049.2021.2017016.
- [38] 刘海, 黄跃飞, 郑粮. 气候与人类活动对丹江口水源区植被覆盖变化的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, **36**(6): 97-105.
Liu H, Huang Y F, Zheng L. Effects of climate and human activities on vegetation cover changes in Danjiangkou Water Source Areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(6): 97-105.
- [39] 李净, 刘红兵, 李彩云, 等. 基于 GIMMS 3g NDVI 的近 30 年中国北部植被生长季始期变化研究 [J]. 地理科学, 2017, **37**(4): 620-629.

- Li J, Liu H B, Li C Y, *et al.* Changes of green-up day of vegetation growing season based on GIMMS 3g NDVI in Northern China in recent 30 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, **37**(4): 620-629.
- [40] 赵茂盛, 符淙斌, 延晓冬, 等. 应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系[J]. *地理学报*, 2001, **56**(3): 287-296.
- Zhao M S, Fu C B, Yan X D, *et al.* Study on the relationship between different ecosystems and climate in china using NOAA/AVHRR data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(3): 287-296.
- [41] 李建国, 袁冯伟, 赵宴青, 等. 中国东部沿海地区暴雨对植被活动的影响[J]. *地理科学*, 2020, **40**(2): 324-334.
- Li J G, Yuan F W, Zhao Y Q, *et al.* Effect of rainstorms on vegetation activities in eastern coastal area of China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(2): 324-334.
- [42] 徐勇, 黄雯婷, 靖娟利, 等. 京津冀地区植被 NDVI 动态变化及其与气候因子的关系[J]. *水土保持通报*, 2020, **40**(5): 319-327.
- Xu Y, Huang W T, Jing J L, *et al.* Dynamic variation of vegetation cover and its relation with climate variables in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, **40**(5): 319-327.
- [43] Jiang L J, Guli Jiapaer, Bao A M, *et al.* Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 967-980.
- [44] Jin K, Wang F, Li P F. Responses of vegetation cover to environmental change in large cities of China[J]. *Sustainability*, 2018, **10**(1), doi: 10.3390/su10010270.
- [45] Fang J Y, Piao S L, He J S, *et al.* Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982-1999 [J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2004, **47**(3): 229-240.
- [46] 王正兴, 刘闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. *生态学报*, 2003, **23**(5): 979-987.
- Wang Z X, Liu C, Huete A. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(5): 979-987.



CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)