

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究

徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东

(桂林理工大学测绘地理信息学院, 桂林 541006)

摘要: 基于 2000 ~ 2020 年 MOD13A3 NDVI 时间序列、1999 ~ 2020 年气象数据以及 2000 年和 2020 年两期土地利用类型数据, 采用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、多重共线性检验、残差分析和相对作用分析等方法, 分析了西南地区植被 NDVI 时空变化特征及气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的驱动机制。结果表明, 研究时段内西南地区整体及各地貌单元植被 NDVI 均呈上升趋势, 其中, 广西丘陵和云贵高原植被 NDVI 上升趋势最为显著, 青藏高原植被 NDVI 上升趋势最为微弱。气候变化和人类活动影响下西南地区植被 NDVI 上升斜率分别为 0.0010 a^{-1} 和 0.0006 a^{-1} 。气候变化和人类活动的共同驱动是引起西南地区植被改善的主要原因。西南地区植被改善主要受区域气候条件的控制, 植被退化主要受人类活动的影响。总体上, 植被 NDVI 与最低气温、降水、最高气温、可能蒸散率和相对湿度呈正相关, 与平均气温、气压、日照时数、温暖指数和湿度指数呈负相关。最低气温、日照时数和降水是影响西南地区植被 NDVI 变化的主要气象因子。此外, 土地利用类型的变化与西南地区植被 NDVI 变化有较强相关性。林业生态工程实施是西南地区植被 NDVI 上升的重要原因, 建设用地的急剧增加是西南地区植被 NDVI 下降的重要原因。

关键词: 植被; 归一化植被指数(NDVI); 气候变化; 人类活动; 相对作用; 多重共线性检验

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0323-13 DOI: 10.13227/j.hjlx.202203154

Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020

XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, PAN Yu-chun, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong

(College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: Using the MOD13A3 NDVI time series from 2000 to 2020, climate data from 1999 to 2020, and land use type data in 2000 and 2020, the spatio-temporal variation in vegetation cover and the driving mechanisms of climate change and human activities to vegetation variation were analyzed based on Theil-Sen Median analysis, the Mann-Kendall significance test, the multi-collinearity test, residual analysis, and relative analysis. The results showed that the vegetation cover exhibited a fluctuating and increasing trend with a magnitude of 0.0016 a^{-1} in southwest China from 2000 to 2020. The increasing trend of vegetation cover was mostly significant in the Guangxi Hills and Yunnan-Guizhou Plateau and slightly significant in the Tibet Plateau. The vegetation cover had increased in the context of climate change and human activities, with an increasing rate of 0.0010 a^{-1} and 0.0006 a^{-1} , respectively. The vegetation improvement was mostly dominated by the combination effects of climate change and human activities. The vegetation improvement was dominated by climate change, and the relative role of climate change reached 61.86%. What is more, the vegetation degradation was dominated by human activities, and the relative role of human activities reached 58.39%. Vegetation cover was positively related to minimum temperature, precipitation, maximum temperature, potential evapotranspiration rate, and relative humidity and negatively related to mean temperature, atmosphere pressure, sunshine duration, warmth index, and humidity index. As a whole, the minimum temperature, sunshine duration, and precipitation were the dominant climate factors affecting the vegetation variation in southwest China. Furthermore, the land use and land cover change were significantly related to vegetation variation in southwest China. The implementation of ecological afforestation projects could be beneficial to regional vegetation improvement, whereas the vegetation degradation was mostly conducted by the built-up land expansion.

Key words: vegetation cover; normalized difference vegetation index(NDVI); climate change; human activities; relative role; multi-collinearity test

植被是连接生物圈、水圈、大气圈和土壤圈的自然纽带,在维系全球物质循环、地表能量平衡等方面起到了关键作用^[1~4]。植被覆盖变化对区域气候调节^[5,6]、水土保持和水分涵养^[7~9]等具有直接影响,从而影响整个生态系统的稳定性。已有研究表明,植被覆盖变化主要受气候变化和人类活动等因子的共同影响^[10~14]。近年来,针对植被 NDVI(normalized difference vegetation index)时空变化及其对气候变化和人类活动的响应特征的研究取得了长足的进展。已有研究主要利用植被 NDVI 和降水、气温等气象因子时间序列建立残差分析模型,实现气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化影响的定量

分离。例如,全国范围内,金凯等^[15]研究发现气候变化和人类活动的双重影响是中国植被 NDVI 上升的主要原因,人类活动对中国植被 NDVI 上升的贡献率大于气候变化。Gu 等^[16]研究发现气温和降水变化引起的周期性变暖和干燥是呼伦湖盆地植被变化的主要因素,中国草地植被改善和退化受人类活动的影响大于蒙古草地。区域尺度上, Gao 等^[17]研究

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-04-18

基金项目: 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297160); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD21220133); 国家自然科学基金项目(42061059, 42161028); 广西空间信息与测绘重点实验室项目(191851016)

作者简介: 徐勇(1988~),男,博士,讲师,主要研究方向为气候变化和植被覆盖反演, E-mail: yongxu@glut.edu.cn

发现毛乌素沙地月际和年际植被 NDVI 变化分别受气温和降水主导. 人类活动对毛乌素沙地植被生长的影响大于气候变化. Zhang 等^[18]研究发现三江源地区植被改善主要受气候变化驱动, 人类活动对三江源地区植被生长具有抑制作用, 日照时数是影响研究区植被生长的主要气象因子. 杨林山等^[19]研究发现洮河流域植被 NDVI 变化同样受气候变化和人类共同驱动, 气候变化对洮河流域植被 NDVI 上升的贡献率大于人类活动.

已有研究发现植被生长对气候变化存在明显的滞后效应, 例如, Ding 等^[20]研究发现在全球尺度上植被生长对气候变化具有明显的滞后效应和累积效应, 且呈现明显的地域差异. Kong 等^[21]研究发现黄土高原植被 NDVI 对降水和气温变化具有明显的滞后期, 且不同流域单元、不同植被区以及不同植被类型对降水和气温变化表现出不同的滞后期. 徐勇等^[14]研究发现西南地区植被生长对气温、降水、相对湿度和日照时数均存在滞后期, 且不同地貌单元植被生长对各气象因子变化的滞后期存在较大差异. 此外, 徐勇等^[22]、胡克宏等^[23]和彭文甫等^[24]研究表明, 植被 NDVI 变化受气候因子、地形因子和人文因子的共同影响, 且存在明显的地域差异. 例如, 长江流域上游植被生长主要受地形和气象因子的共同影响, 而下游植被生长主要受地形和人文因子的共同影响. 四川植被 NDVI 空间分异主要受高程、年均气温和土壤类型的影响. 以上研究表明, 植被生长受区域气候条件、地形因素以及人类活动的共同影响, 且对气候变化存在明显的滞后效应和地域差异. 已有研究通常选用残差分析来定量区分气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响^[12,14,15,25~27], 以区域整体为研究单元, 选取降水、气温、相对湿度和日照时数等为残差分析模型的输入变量, 但植被生长往往还受其他气象因子的影响^[28~30], 且在建立模型的时候应该考虑地形地貌差异、植被生长对气候变化的滞后期和气象因子间的共线性关系.

西南地区是我国典型的气候变化敏感区和生态环境脆弱区, 同时, 该区域也是我国生态环境保护工程的重点实施区, 因此, 厘清西南地区气候变化和人类活动对植被生长的驱动机制具有重要的科学意义. 参照已有研究^[14,31], 将研究区按照地貌类型划分为 6 个地貌单元, 分析 2000~2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化特征, 揭示气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的驱动机制, 以期为西南地区生态文明建设和林业资源监测提供理论参考.

1 研究区概况

研究区位于中国西南部 ($21^{\circ}08' \sim 33^{\circ}41'N$, $97^{\circ}21' \sim 110^{\circ}11'E$), 主要包含三省: 四川省、云南省和贵州省, 一市: 重庆市, 两个自治区: 西藏自治区和广西壮族自治区, 面积为 254.737 万 km^2 , 占全国国土总面积的 26.54%. 该区域高程在 $-20 \sim 8405$ m 之间(图 1), 地形复杂, 地貌以高原、山地、盆地和丘陵为主, 植被类型多样, 植被覆盖程度高. 同时, 研究区由东向西横跨我国湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区, 受亚热带季风气候和高山山地气候的影响, 降水和气温从东南到西北梯度递减, 而日照时数由东往西梯度增加, 存在明显的空间差异. 西南地区多变的地形地貌、复杂的气候条件、繁多的植被类型以及脆弱的生态环境, 使其成为中国生态环境保护的重点区域之一.

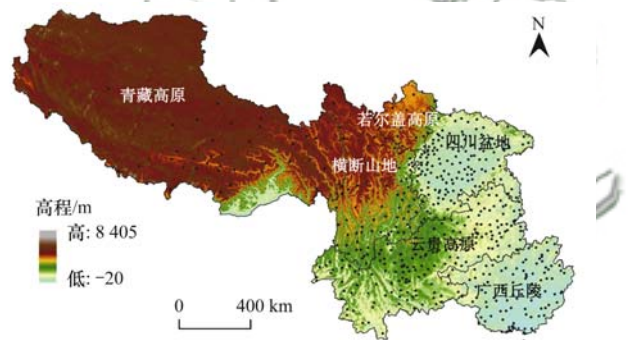


图 1 研究区气象站及高程空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of elevation and meteorological stations of the study area

2 材料与方法

2.1 数据来源和预处理

本文采用的中高分辨率 (moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) NDVI 数据来自第六代 MOD13A3 产品数据集, 时间分辨率为月, 空间分辨率为 1km, 由美国国家航空航天局 (national aeronautics and space administration, NASA, <https://earthdata.nasa.gov/>) 对外发布. 首先, 采用 MRT 对原始数据进行拼接和重采样等预处理, 得到月 NDVI 时间序列; 然后, 使用最大值合成法 (maximum value composite, MVC) 获取 2000~2020 年植被 NDVI 年最大值时间序列, 消除数据缺失、云和气溶胶等对研究结果造成的影响.

参照已有研究^[29,30], 本文选取: 平均气温、最高气温、最低气温、降水、相对湿度、气压、日照时数、温暖指数、寒冷指数、湿度指数、可能蒸散量和可能蒸散率共计 12 个气象因子作为影响植被 NDVI 变化的变量, 其中, 逐日平均气温、最高气温、最低气温、

降水、相对湿度、气压和日照时数来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 研究区共包含气象站点 528 个. 对于站点年数据量缺失值少于 5% 的站点, 采用线性回归的方式进行插补, 反之则舍弃. 根据谢春平等^[29]的研究, 基于降水和气温计算得到温暖指数、寒冷指数、湿度指数、可能蒸散量和可能蒸散率. 同时, 本文考虑植被生长对气候变化的滞后效应, 选取气象数据时间跨度为 1999 ~ 2020 年.

土地利用类型数据由中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 提供, 空间分辨率为 1 km, 本文主要利用 2000 和 2020 年两期数据. 根据土地利用现状分类标准 (GB/T 21010-2007), 将土地利用类型分成耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地.

2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen Median 趋势分析法和 Mann-Kendall 显著性检验

Theil-Sen Median 趋势分析法是一种不受异常值影响, 且不要求数据服从正态分布的非参数统计趋势分析方法, 常用于分析气象、水文和植被 NDVI 等长时间序列的变化趋势^[32,33]. 计算公式如下:

$$\theta_{\text{NDVI}} = \text{Median} \left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i} \right) \quad (2000 \leq i < j \leq 2020) \quad (1)$$

式中, i 和 j 为时间变量, 取值区间为 2000 ~ 2020, NDVI_i 和 NDVI_j 分别为第 i 和 j 年对应的年 NDVI 最大值. Mann-Kendall 显著性检验被用来确定植被 NDVI 在研究时段内的变化斜率是否具有显著性及显著性程度^[32,33]. 综合 θ_{NDVI} 和 Mann-Kendall 显著性检验结果可得植被 NDVI 变化的 6 种情境: 当 $\theta_{\text{NDVI}} > 0$, 且通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验时, 表明植被 NDVI 呈极显著上升趋势; 通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验时, 表明植被 NDVI 呈显著上升趋势; 未通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验时, 表示植被 NDVI 呈不显著上升趋势; 同理可得植被 NDVI 呈下降趋势的 3 种情境.

2.2.2 相关分析和偏相关分析

相关分析可用来分析两个或者两个以上变量之间的相关关系^[34], 探究变量之间的密切程度, 相关系数越大, 证明两者间具有的相关性越强, 反之则证明两者间相关性越不明显. 本文利用相关分析探究植被 NDVI 和各气象因子的相关关系. 公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

偏相关分析是在剔除其他变量影响的情况下,

探究两变量之间的相关关系^[34]. 本文利用偏相关分析探究植被 NDVI 与各气象因子之间的偏相关关系. 公式如下:

$$r_{xy \cdot z_1, z_2, \dots, z_n} = \frac{r_{xy \cdot z_1, z_2, \dots, z_{n-1}} - r_{xz_n \cdot z_1, z_2, \dots, z_{n-1}} r_{yz_n \cdot z_1, z_2, \dots, z_{n-1}}}{\sqrt{(1 - r_{xz_n \cdot z_1, z_2, \dots, z_{n-1}}^2)(1 - r_{yz_n \cdot z_1, z_2, \dots, z_{n-1}}^2)}} \quad (3)$$

式中, x 和 y 为方程自变量, x_i 和 y_i 分别为变量 x 和 y 第 i 年的值, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为变量 x 和 y 的多年平均值, r_{xy} 为变量 x 和 y 之间的相关系数; $r_{xy \cdot z_1, z_2, \dots, z_n}$ 为控制自变量 $z_1, z_2, \dots, z_n$ 时, 变量 x 和 y 的偏相关系数. 本文使用偏相关分析分别计算植被 NDVI 和前 0 ~ 12 个月各气象因子的偏相关系数, 并根据一阶偏导法, 得到植被 NDVI 与各气象因子的最大偏相关系数, 并得到其对应的滞后期; 并采用 t 检验法对最大偏相关系数进行显著性检验, 定义 $P < 0.01$ 为极显著相关; $0.01 \leq P < 0.05$ 为显著相关; $P \geq 0.05$ 为不显著相关.

2.2.3 多元回归分析和残差分析

为提高研究结果的精度, 本文在地貌单元上构建多元回归分析和残差分析模型, 模型构建步骤如下: 首先, 通过对植被 NDVI 与 12 个气象因子的前 0 ~ 12 个月时间序列进行相关分析, 得到它们之间的相关系数, 在此基础上, 利用一阶偏导法选取相关系数的第一个峰值作为植被 NDVI 与气象因子的最大相关系数, 分别得到植被 NDVI 与 12 个气象因子的最大相关系数和滞后期; 然后, 对最大相关系数进行显著性检验, 保留通过 t 检验 ($P < 0.1$) 的气象因子, 删除未通过显著性检验的气象因子; 接下来, 根据植被 NDVI 和各气象因子的最大相关系数所对应的滞后期挑选出各气象因子所对应的时间序列, 选取与植被 NDVI 相关性最大的气象因子为控制变量, 计算控制变量与其他气象因子之间的方差膨胀系数 (VIF)^[35,36], 如果 $VIF > 10$, 说明气象因子之间存在多重共线性的问题, 剔除掉 VIF 值最大所对应的气象因子, 之后, 重复上述步骤, 直至各气象因子之间的 $VIF < 10$, 得到各地貌单元对植被 NDVI 具有显著影响且不存在多重共线性的气象因子, 技术流程详见图 2, 气象因子筛选结果见表 1.

最后, 基于植被 NDVI 和各气象因子对应滞后期的时间序列, 建立多元回归分析模型 [式 (2)] 和残差分析模型^[14] [式 (3)], 分别得到植被 NDVI 预测值 (NDVI_{Pre}) 和植被 NDVI 残差值 (NDVI_{Res}).

$$\text{NDVI}_{\text{Pre}} = \left(\sum a_i b_i \right) + c \quad (4)$$

$$\text{NDVI}_{\text{Res}} = \text{NDVI}_{\text{Obs}} - \text{NDVI}_{\text{Pre}} \quad (5)$$

式中, a_i 为方程自变量回归系数; b_i 为自变量, 即主

导气象因子时间序列; i 为主导气象因子; c 为常数项. 植被 $NDVI_{Pre}$ 为正, 表示气候变化对植被生长表现为正向影响; 为负, 表示气候变化对植被生长表现为负向影响. 同理可知人类活动对植被生长的影响.

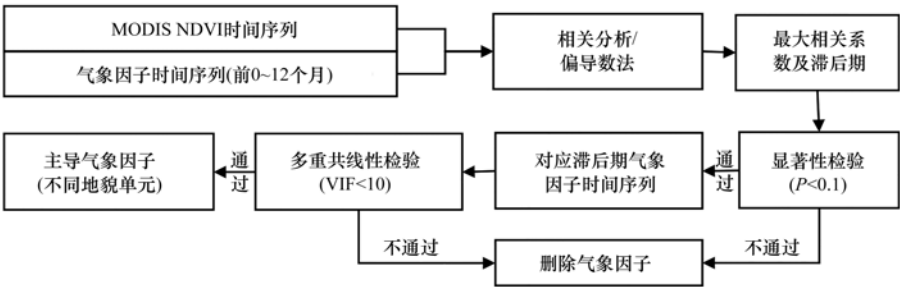


图 2 主导气象因子选取技术路线
Fig. 2 Workflow of dominant climate factor selection

表 1 西南地区主导气象因子及滞后期¹⁾

地貌单元	广西丘陵	横断山地	若尔盖高原	四川盆地	青藏高原	云贵高原
气象因子	最低气温	最低气温	平均气温	可能蒸散率	最低气温	最高气温
滞后期	1	2	1	4	0	8
气象因子	平均气温	最高气温	可能蒸散率	最低气温	日照时数	平均气温
滞后期	1	5	0	3	4	3
气象因子	日照时数	相对湿度	降水	降水	气压	温暖指数
滞后期	2	0	0	2	0	0
气象因子	降水	气压	日照时数	日照时数		气压
滞后期	2	6	0	2		6
气象因子	气压	湿度指数	温暖指数	湿度指数		
滞后期	6	3	1	2		
气象因子		温暖指数	气压	气压		
滞后期		0	6	7		

1) 数值表示时长,单位月

2.2.4 相对作用分析

相对作用分析法可用来定量分离气候变化和人类活动对植被 $NDVI$ 变化的相对作用^[17,30]. 首先, 根据植被 $NDVI$ 、 $NDVI_{Pre}$ 和 $NDVI_{Res}$ 时间序列, 计算其变化斜率, 分别标记为 θ_{NDVI} 、 $\theta_{NDVI_{Pre}}$ 和 $\theta_{NDVI_{Res}}$; 接下

来, 根据 θ_{NDVI} 的取值区间将研究区分成植被改善区和植被退化区; 然后, 根据 $\theta_{NDVI_{Pre}}$ 和 $\theta_{NDVI_{Res}}$ 的取值区间, 构建气候变化和人类活动驱动植被改善和植被退化的 6 种模式, 见表 2, 完成气候变化和人类活动对植被 $NDVI$ 变化相对作用的定量分离.

表 2 气候变化和人类活动对植被 $NDVI$ 变化相对作用评价模型¹⁾

驱动模式		$\theta_{NDVI_{Pre}}$	$\theta_{NDVI_{Res}}$	气候变化的相对作用	人类活动的相对作用	说明
植被改善	模式 1	>0	>0	$\frac{ \Delta NDVI_{Pre} }{ \Delta NDVI_{Pre} + \Delta NDVI_{Res} } \times 100\%$	$\frac{ \Delta NDVI_{Res} }{ \Delta NDVI_{Pre} + \Delta NDVI_{Res} } \times 100\%$	植被改善受气候变化和人类活动共同驱动
	模式 2	>0	<0	100%	0%	植被改善受气候变化单独驱动
	模式 3	<0	>0	0%	100%	植被改善受人类活动单独驱动
植被退化	模式 1	<0	<0	$\frac{ \Delta NDVI_{Pre} }{ \Delta NDVI_{Pre} + \Delta NDVI_{Res} } \times 100\%$	$\frac{ \Delta NDVI_{Res} }{ \Delta NDVI_{Pre} + \Delta NDVI_{Res} } \times 100\%$	植被退化受气候变化和人类活动共同驱动
	模式 2	<0	>0	100%	0%	植被退化受气候变化单独驱动
	模式 3	>0	<0	0%	100%	植被退化受人类活动单独驱动

1) 式中, $\Delta NDVI_{Pre}$ 为 2020 年气候变化影响下的 $NDVI_{Pre}$ 与 2000 年 $NDVI_{Pre}$ 的差值; $\Delta NDVI_{Res}$ 为 2020 年人类活动影响下的 $NDVI_{Res}$ 与 2000 年 $NDVI_{Res}$ 的差值

3 结果与分析

3.1 气候变化和人类活动影响下植被 $NDVI$ 时空变化

3.1.1 植被 $NDVI$ 时空变化特征

由图 3 可知, 时间尺度上, 西南地区植被 $NDVI$

以 0.0016 a^{-1} 的速率上升. 植被 $NDVI$ 平均值在 $0.553 \sim 0.589$ 之间, 多年平均值为 0.573 . 西南地区植被 $NDVI$ 在 2000 ~ 2005 年和 2006 ~ 2010 年上升较快, 但在 2012 ~ 2014 年和 2017 ~ 2019 年出现较大幅度持续下降. 各地貌单元植被 $NDVI$ 变化趋势

一致,均呈波动上升趋势,变化斜率依次为:广西丘陵(0.0034 a^{-1}) > 云贵高原(0.0031 a^{-1}) > 四川盆地(0.0026 a^{-1}) > 横断山地(0.0016 a^{-1}) > 若尔盖高原(0.0012 a^{-1}) > 青藏高原(0.0007 a^{-1})。由图 4(a) 可知,空间尺度上,西南地区植被 NDVI 变化速率呈“东南高、西北低”的空间分布格局,变化速率为 $-0.034\sim0.038\text{ a}^{-1}$ 。西南地区有 80.53% 的区域植被覆盖得到改善,其中,显著改善的区域占比为 40.27%,集中分布在广西丘陵、云贵高原和四川盆地 [图 4(b)]。地貌单元上,植被覆盖得到改

善的区域占比依次为:广西丘陵(94.43%) > 云贵高原(92.91%) > 四川盆地(87.30%) > 若尔盖高原(80.03%) > 横断山地(79.60%) > 青藏高原(71.88%)。广西丘陵、云贵高原和四川盆地植被显著改善的区域占比高于其他地貌单元,分别占其总面积的 75.55%、67.99% 和 65.81%。综上可知,西南地区及各地貌单元植被覆盖均表现为改善态势。各地貌单元植被 NDVI 上升斜率和改善面积占比呈现较好的一致性,广西丘陵植被 NDVI 上升斜率和改善面积占比均最高,青藏高原均最低。

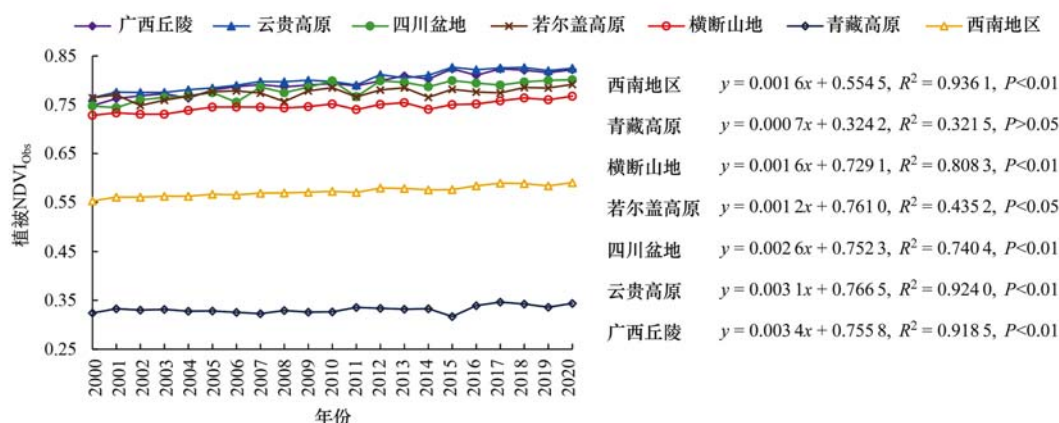


图 3 2000~2020 年西南地区植被 NDVI 时间变化

Fig. 3 Temporal variation in vegetation variation in southwest China from 2000 to 2020

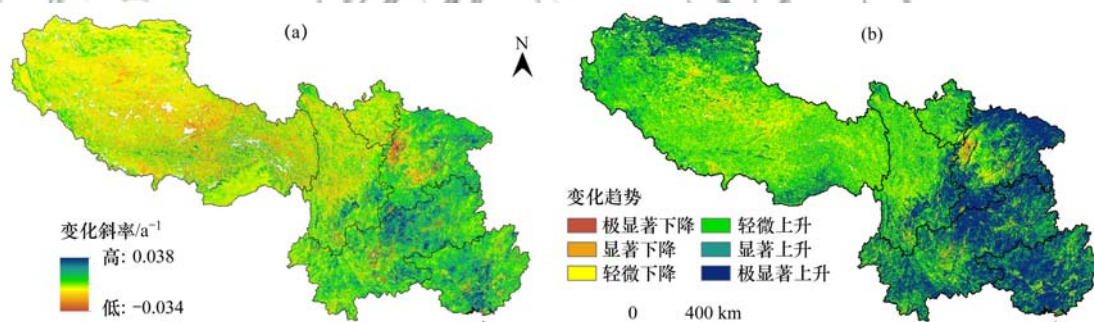


图 4 2000~2020 年西南地区植被 NDVI 空间变化

Fig. 4 Spatial variation in observed NDVI in southwest China from 2000 to 2020

3.1.2 气候变化影响下植被 NDVI 时空变化特征

由图 5 可知,时间尺度上,西南地区植被 NDVI_{pre} 以 0.0010 a^{-1} 的速率上升。各地貌单元植被 NDVI 上升斜率表现出较大的差异,但均表现为上升趋势,上升斜率依次为:云贵高原(0.0019 a^{-1}) > 广西丘陵(0.0018 a^{-1}) > 四川盆地(0.0012 a^{-1}) $\approx$ 横断山地(0.0012 a^{-1}) > 若尔盖高原(0.0009 a^{-1}) > 青藏高原(0.0005 a^{-1})。由图 6(a) 可知,空间尺度上,西南地区植被 NDVI_{pre} 变化速率呈“两边高、中间低”的空间分布格局,变化速率为 $-0.030\sim0.030\text{ a}^{-1}$ 。在气候变化影响下,西南地区有 81.20% 的区域植被覆盖得到改善,其中,显著改善的区域占比为 64.11%,主要分布在云贵高

原、广西丘陵和青藏高原的西北部 [图 6(b)]。地貌单元上,植被覆盖得到改善的区域占比依次为:广西丘陵(92.85%) > 云贵高原(90.84%) > 四川盆地(89.42%) > 若尔盖高原(80.99%) > 横断山地(77.97%) > 青藏高原(74.29%),其中,云贵高原和广西丘陵植被覆盖显著改善的区域分别占其总面积的 70.28% 和 66.78%。综上可知,在气候变化影响下,西南地区及各地貌单元的植被覆盖均以改善为主,其中,广西丘陵和云贵高原植被覆盖改善占比高于其他地貌单元,青藏高原植被覆盖退化的占比最高。

3.1.3 人类活动影响下植被 NDVI 时空变化特征

由图 7 可知,时间尺度上,西南地区植被

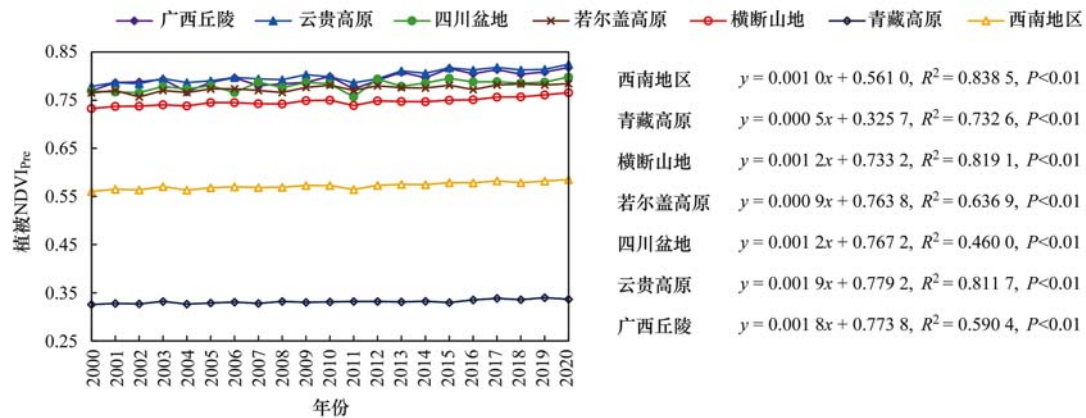


图5 2000~2020年西南地区植被NDVI预测值时间变化

Fig. 5 Temporal variation in predicted NDVI in southwest China from 2000 to 2020

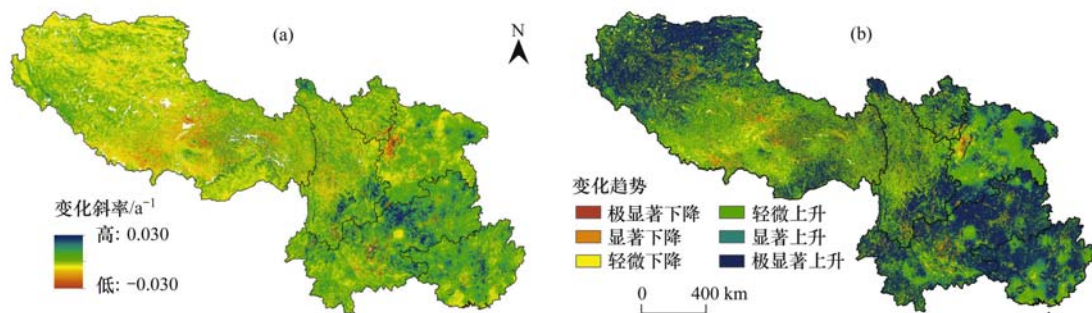


图6 2000~2020年西南地区植被NDVI预测值空间变化

Fig. 6 Spatial variation in predicted NDVI in southwest China from 2000 to 2020

$NDVI_{Res}$ 以 $0.0006 a^{-1}$ 的速率上升. 各地貌单元植被 $NDVI_{Res}$ 表现为不同程度的上升, 上升斜率依次为: 广西丘陵 ($0.0016 a^{-1}$) > 四川盆地 ($0.0014 a^{-1}$) > 云贵高原 ($0.0012 a^{-1}$) > 横断山地 ($0.0004 a^{-1}$) > 若尔盖高原 ($0.0002 a^{-1}$) > 青藏高原 ($0.0001 a^{-1}$). 由图8(a)可知, 空间尺度上, 西南地区植被 $NDVI_{Res}$ 变化速率呈现“东高西低”的空间分布格局, 变化速率为 $-0.024 \sim 0.033 a^{-1}$. 在人类活动影响下, 西南地区有 68.10% 的区域植被覆盖得到改善, 其中, 显著改善的区域占比仅为 15.99%, 零

星分布在四川盆地、云贵高原和广西丘陵[图8(b)]. 地貌单元上, 植被覆盖得到改善的区域占比依次为: 广西丘陵 (89.54%) > 云贵高原 (86.05%) > 四川盆地 (81.66%) > 横断山地 (65.87%) > 若尔盖高原 (60.99%) > 青藏高原 (57.22%), 其中, 云贵高原植被覆盖显著改善的区域占比最高, 为 41.82%, 而横断山地、青藏高原和若尔盖高原植被显著改善的区域占比仅为 3.13%、2.54% 和 2.11%. 综上所述, 在人类活动影响下, 西南地区整体及各地貌单元的植被覆盖均以改善为主, 但呈现明显的地域差异, 广西丘陵、云贵高原和四川盆地

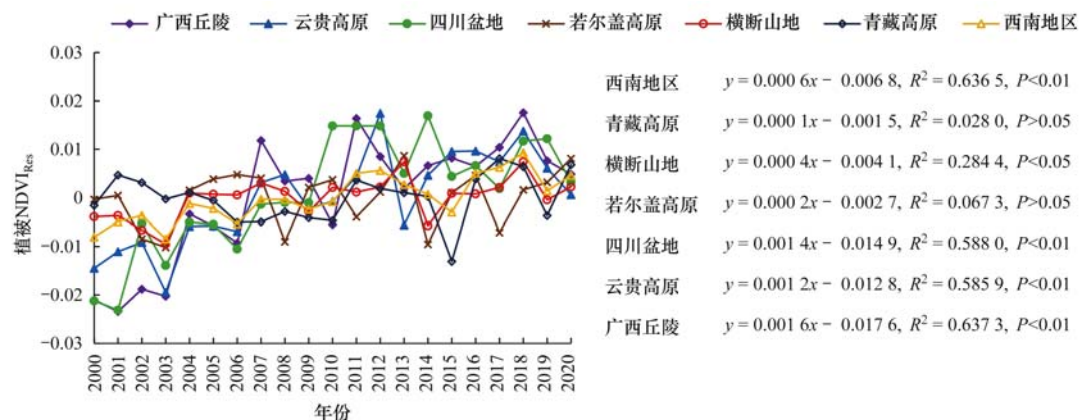


图7 2000~2020年西南地区植被NDVI残差值时间变化

Fig. 7 Temporal variation in residual NDVI in southwest China from 2000 to 2020

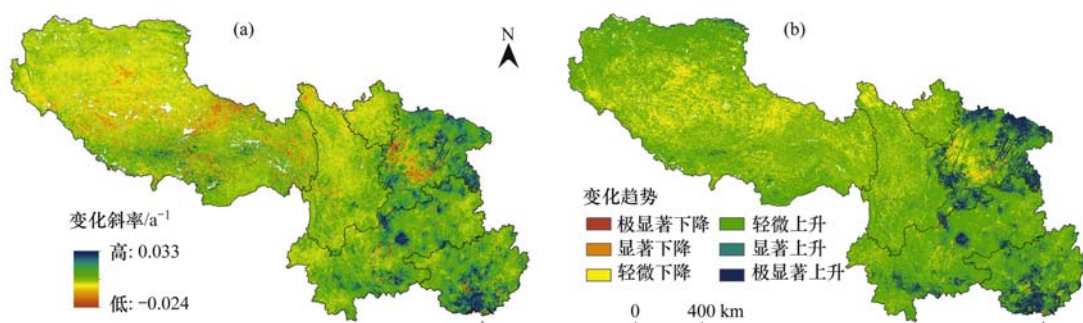


图 8 2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 残差值空间变化

Fig. 8 Spatial variation in residual NDVI in southwest China from 2000 to 2020

植被覆盖改善速率和改善面积占比均大于若尔盖高原、横断山地和青藏高原。

3.2 气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的相对作用

3.2.1 植被 NDVI 变化的驱动机制

由图 9 可知,气候变化和人类活动共同驱动西南地区植被 NDVI 上升区域的占比为 59.80%,主要分布在青藏高原西北部、横断山地东南部和广西丘陵、横断山地、云贵高原、若尔盖高原的大部分地区。而单独气候变化驱动和单独人类活动驱动植被 NDVI 上升区域的占比分别为 14.92% 和 6.14%。气候变化和人类活动共同驱动、单独气候变化驱动和单独人类活动驱动植被 NDVI 下降区域的占比分别为 8.54%、6.54% 和 4.04%。其中,气候变化和人类活动共同驱动植被 NDVI 下降的区域主要分布在青藏高原中部、横断山地中南部和四川盆地西部。综上所述,西南地区植被生长受气候变化和人类活动的双重作用,气候变化和人类活动的共同驱动是引起西南地区植被 NDVI 变化的主要原因,气候变化对植被 NDVI 变化的影响大于人类活动。

3.2.2 气候变化和人类活动对植被改善的相对作用

气候变化和人类活动对西南地区植被改善的平均相对作用分别为 61.86% 和 38.14%。气候变化和人类活动对植被改善的相对作用在空间上呈现出

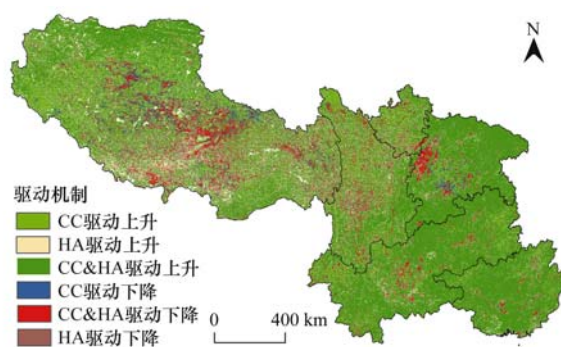


图 9 西南地区植被 NDVI 变化驱动机制空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of driving mechanism of vegetation variation in southwest China

显的空间异质性。由图 10(a)可知,以气候变化为主导,植被改善区占改善区总面积的 65.75%,主要分布在青藏高原北部、四川盆地中部和广西丘陵、横断山地、云贵高原、若尔盖高原的大部分地区。由图 10(b)可知,以人类活动为主导,植被改善区占改善区总面积的 34.25%,主要分布在青藏高原南部、广西丘陵东南部和四川盆地北部。地貌类型上,各地貌单元植被改善以气候变化为主导的面积占比均大于人类活动。云贵高原植被改善以气候变化为主导的面积占比最高,为 73.11%,横断山地次之,为 71.46%,四川盆地占比最低,为 52.43%。综上所述,气候变化是促进西南地区整体各地貌单元植被改善的主要因素。云贵高原和横断山地植被改善受气候

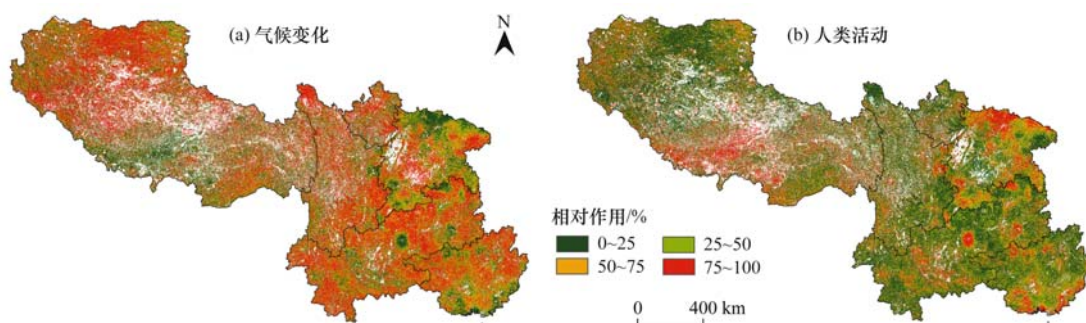


图 10 西南地区气候变化和人类活动在植被改善区的相对作用

Fig. 10 Spatial distribution of the relative role on vegetation improvement in southwest China

变化的影响大于其他地貌单元,四川盆地植被改善受气候变化和人类活动的影响较为接近。

3.2.3 气候变化和人类活动对植被退化的相对作用

气候变化和人类活动对西南地区植被退化的平均相对作用分别为 41.61% 和 58.39%,人类活动对西南地区植被退化的相对作用高于气候变化。由图 11(a)可知,以气候变化为主导,植被退化区占退化区总面积的 44.86%,均匀分布在研究区内。由图 11(b)可知,以人类活动为主导,植被退化区占退化区总面积的 55.14%,主要分布在青藏高原和四川盆地

中部。地貌类型上,青藏高原、四川盆地、广西丘陵和若尔盖高原植被退化以人类活动为主导的区域大于以气候变化为主导的区域,其中,青藏高原和四川盆地的占比最高,分别占其退化总面积的 63.04% 和 60.86%,而云贵高原和横断山地植被退化以气候变化为主导的区域分别占 62.25% 和 56.10%。综上可知,人类活动是导致西南地区整体植被退化的主要原因。地貌类型上,青藏高原、四川盆地、广西丘陵和若尔盖高原植被退化主要受人类活动的影响,横断山地和云贵高原植被退化主要受气候变化影响。

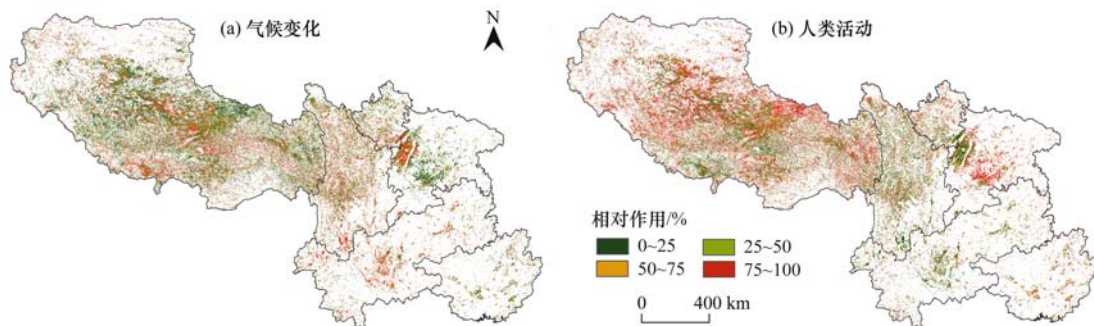


图 11 西南地区气候变化和人类活动在植被退化区的相对作用

Fig. 11 Spatial distribution of the relative role on vegetation degradation in southwest China

3.3 植被 NDVI 对气候变化和土地利用类型变化的响应

3.3.1 植被 NDVI 与气象因子的偏相关关系

西南地区植被 NDVI 与气象因子偏相关关系在空间上呈明显空间异质性,如图 12 所示。西南部分地区蒸散率和湿度指数可能为无值区,因此图 12(d)和 12(j)中部分地区偏相关系数为空值。西南地区植被 NDVI 与最低气温、降水、最高气温、可能蒸散率和相对湿度总体上呈正相关关系,根据偏相关系数平均绝对值排序,依次为:最低气温(0.149) > 降水(0.062) > 最高气温(0.029) > 相对湿度(0.011) ≈ 可能蒸散率(0.011)。植被 NDVI 与以上气象因子呈正相关的面积均大于呈负相关的面积,其中,植被 NDVI 与最低气温呈正相关的面积占比最大,为 65.38%,主要分布在广西丘陵、云贵高原东北部、横断山地北部、若尔盖高原和青藏高原中部;植被 NDVI 与可能蒸散率呈正相关的面积占比最小,为 51.03%,主要分布在四川盆地中部。

西南地区植被 NDVI 与平均气温、气压、日照时数、温暖指数和湿度指数总体上呈负相关关系,根据偏相关系数平均绝对值排序,依次为:日照时数(-0.068) > 气压(-0.049) ≈ 湿度指数(-0.049) > 平均气温(-0.044) > 温暖指数(-0.015)。植被 NDVI 与以上气象因子呈负相关的面积均大于呈正

相关的面积。植被 NDVI 与日照时数、湿度指数、气压和平均气温呈负相关关系的面积较为接近,占比分别为 57.54%、56.01%、55.60% 和 55.32%,与温暖指数呈负相关关系的面积与呈正相关关系的面积较为接近,占比分别为 51.40% 和 48.60%。植被 NDVI 与日照时数、湿度指数、气压、平均气温和温暖指数呈负相关的区域较为集中,主要分布在广西丘陵、云贵高原、四川盆地和青藏高原西北部。

综上可知,西南地区植被生长受气候变化的双重影响,且呈现出明显的空间异质性。最低气温、降水、最高气温、可能蒸散率和相对湿度对西南地区植被生长的促进作用大于抑制作用,而平均气温、气压、日照时数、温暖指数和湿度指数对西南地区植被生长的抑制作用大于促进作用。总体上,西南地区植被生长受气温、日照时数和降水的影响最大。

3.3.2 植被 NDVI 与土地利用类型变化的关系

土地利用类型的转变能够直观地反映人类活动的方向和强度,因此可以通过土地利用类型之间的转移来分析人类活动对植被 NDVI 的影响(图 13)。如表 3 所示,2000~2020 年西南地区除草地面积减少外,耕地、林地、水体和建设用地的面积都有所增加。研究时段内,西南地区草地的减少面积最大,为 640 337 km²,草地主要向林地转化,得益于近 20 年来天然林保护、退耕还林还草工程和长江中上游

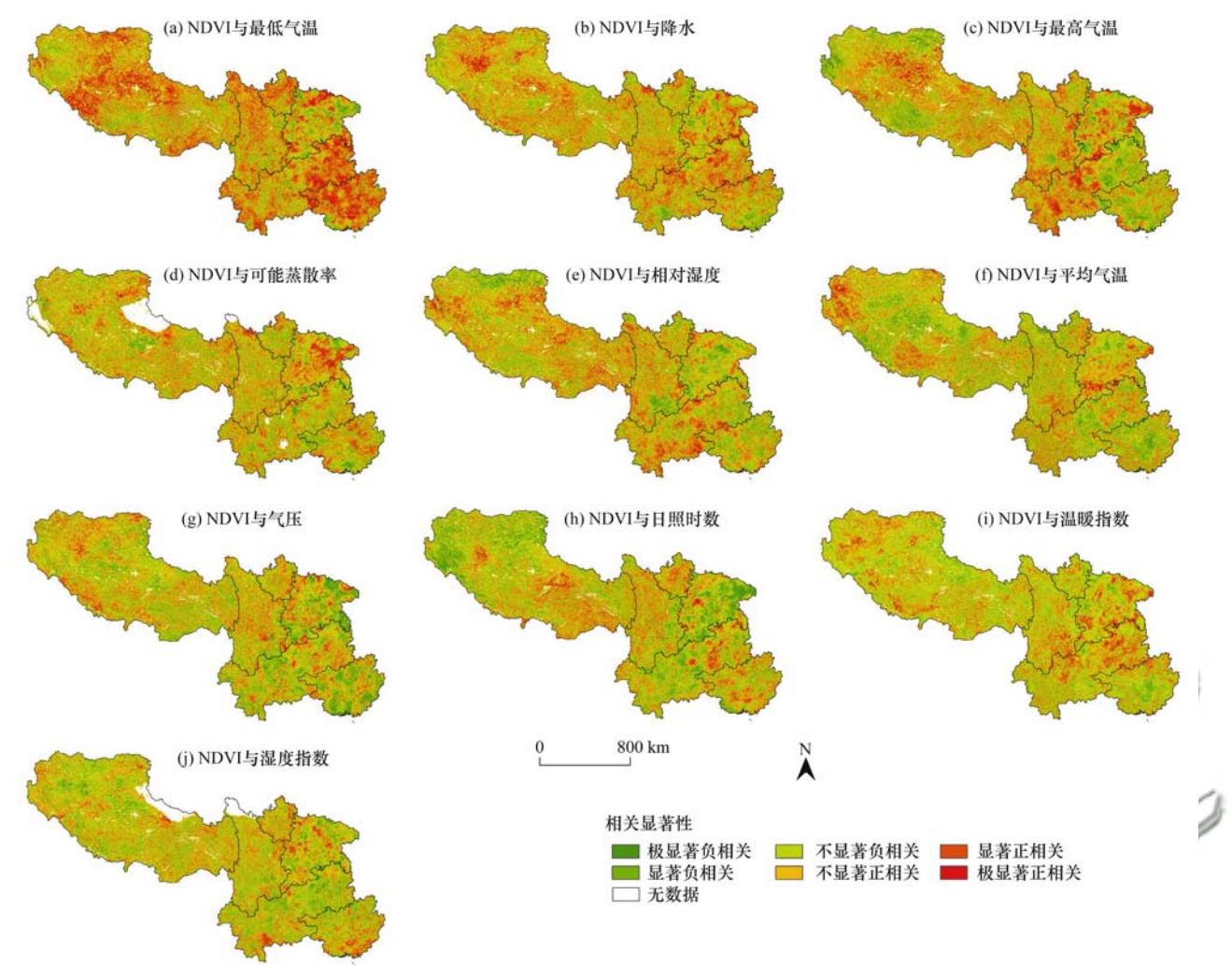


图 12 西南地区植被 NDVI 与气象因子偏相关关系空间分布
Fig. 12 Spatial distribution of the partial correlation coefficients between NDVI and climate factors in southwest China

表 3 2000 ~ 2020 年西南地区土地利用类型转移矩阵/ km^2
Table 3 Transformation matrix of land use type in southwest China from 2000 to 2020/ km^2

2000 年	2020 年						
	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地	总计
耕地	191 093	99 058	37 517	5 137	12 566	379	345 750
林地	104 377	579 991	126 442	5 304	3 980	7 137	827 231
草地	42 142	168 970	725 933	43 225	2507	383 493	1 366 270
水体	3 826	4 848	14 213	41 821	718	16 094	81 520
建设用地	4 694	1 637	656	364	3 615	21	10 987
未利用地	381	21 684	91 761	16 126	34	99 314	229 300
总计	346 513	876 188	996 522	111 977	23 420	506 438	2 861 058

防护林工程等林业生态工程的实施促进了林地的增加,使得以上区域植被 NDVI 呈上升趋势^[31,37,38]。

此外,随着人口密度的增加和城市化进程的加快,适宜耕作和开垦的林地被大量转化为耕地和草地。林地转出部分主要分布在青藏高原东南部、横断山地南部、四川盆地周边以及云贵高原和广西丘陵大部分区域,这些区域的植被 NDVI 均呈上升趋势。城镇扩张导致建设用地急剧增加,建设用地主要由耕地、林地和草地转变而来,主要分布在各城市

中心及城郊附近,以上区域植被 NDVI 呈下降趋势。由上可知,植被覆盖变化受土地利用类型变化的影响较大,耕地、林地和草地之间的转化能有效提高植被覆盖,促进植被改善,但建设用地的扩张降低了植被覆盖,使得部分地区植被呈退化趋势。

4 讨论

4.1 植被 NDVI 时空变化特征

时间尺度上,在气候变化和人类活动的双重影

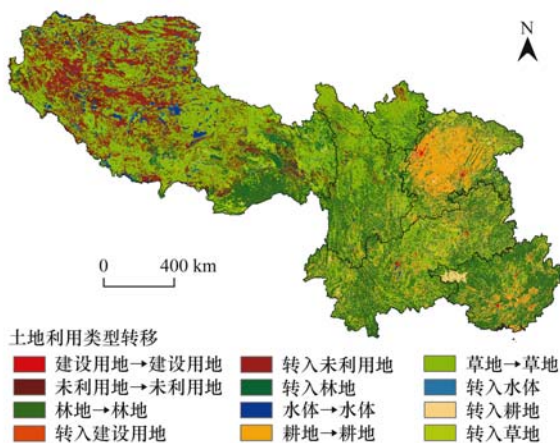


图 13 2000 ~ 2020 年西南地区土地利用类型转移

Fig. 13 Transformation of land use type in southwest China from 2000 to 2020

响下,研究时段内西南地区植被 NDVI 呈波动上升的趋势.一方面得益于西南地区丰沛的降水、充足的热量和纵横交错的水系给植被生长提供了有利的环境,促进植被生长^[31,39];另一方面得益于天然林保护工程、退耕还林还草工程、石漠化综合治理工程等生态林业工程的实施和集体林权制度改革、全国生态保护与建设规划、全国水土保持规划等政策的落实,有效推进了该地区的生态建设,使得西南地区整体植被覆盖明显改善,这与已有研究结果一致^[31,37~39].但植被 NDVI 在 2012 ~ 2014 年和 2017 ~ 2019 年持续下降,这主要是受西南地区接连发生的极端干旱和地质灾害的影响,从而引起的区域植被覆盖退化,这与已有研究结果一致^[40~42].

空间尺度上,植被 NDVI 呈上升趋势的面积主要分布在广西丘陵、云贵高原、四川盆地四周和青藏高原西北部.广西丘陵和云贵高原植被 NDVI 上升趋势最为显著,整体植被覆盖状况优于其他地貌单元.一方面,以上地区为中低纬度地区,地形以丘陵和高原为主,植被类型丰富,植被基底好,植被覆盖度高;另一方面,以上地区水热条件好,降水丰沛,热量充足,有利于植被生长,加之受一系列林业生态工程的影响,极大提高了植被覆盖程度,因此以上地区植被覆盖上升趋势较为明显^[14,31,37~39].植被 NDVI 呈下降趋势的区域主要集中分布在四川盆地中部和西部、青藏高原中部和云贵高原部分地区,这主要是由于以上区域地处成渝城市群、藏中南城市群和西南城市群,以上地区植被基底差、人类活动强度大,城市化进程和人类负向扰动破坏了植被生长环境,造成植被覆盖呈下降趋势^[14,43,44].

4.2 气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的相对作用

气候变化对西南地区植被改善的相对作用大于

人类活动,而人类活动对西南地区植被退化的相对作用大于气候变化,由此可知,西南地区植被生长受气候变化和人类活动的共同影响,气候变化是西南地区植被改善的主要驱动力,而人类活动对西南地区植被生长抑制作用大于促进作用.以气候变化为主导的植被覆盖改善区占总改善区面积的 65.75%,说明气候变化是驱动西南地区植被改善的主要原因,主要是由于西南地区气候复杂多样,山地面积广,地形起伏大,适宜的环境使得植被能够在此生长.此外,人类活动导致部分地区植被改善,这是由于西南地区一直致力于推进生态文明建设,推行了一系列的林业生态工程,使得区域内植被状况得到了显著改善^[31,37~39,45].

在植被退化区,人类活动是驱动西南地区植被退化的主要原因,以人类活动为主导的区域主要分布在青藏高原中部、横断山地北部和四川盆地中部,主要由于以上区域人口密集、人类活动强度高,在西部大开发的发展政策下,区域工业化和城镇化进程加快,城市建设和工业建筑等建设导致大量的林地、草地和耕地被侵占,使得区域植被覆盖度减少,植被 NDVI 呈下降趋势,这与已有研究结果一致^[31,39,46,47].此外,气候变化也是部分地区植被 NDVI 下降的重要原因,受常年发生的干旱、地震等自然灾害的影响,部分地区植被生长受到限制,导致植被覆盖减少,使得植被 NDVI 呈下降趋势^[40~42].

4.3 不同驱动因子对植被 NDVI 变化的影响

气候变化对西南地区植被生长具有双重作用,最低气温、降水、最高气温、可能蒸散率和相对湿度对西南地区植被生长以正向促进作用为主,而平均气温、气压、日照时数、温暖指数和湿度指数对西南地区植被生长具有抑制作用.其中,最低气温和最高气温与平均气温对植被生长的影响不同,这主要是由于纬度较低的区域平均气温较高,较高的气温加剧了地表及植被水分的流失,对植被生长产生了负向作用.同时,对于海拔较高的区域,昼夜温差大,而高寒植被的生长在白天主要受最高气温的刺激,夜晚受低温的刺激,因此最低气温和最高气温对植被生长产生正向作用,这与已有研究结果一致^[48,49].总体来说,气温、降水和日照时数是影响西南地区植被 NDVI 变化的主要气象因子,这是由于西南地区受季风环流和地形地貌的影响,降水充沛、热量条件充足,适宜的气温延长了植被生长季,加速了土壤有机物的分解和营养物质的释放,能有效促进植被生长和植被群落繁衍,这与已有的研究结果一致^[14,31,50].日照时数对西南地区植被 NDVI 的负向抑制作用最大.这主要是由于西南地区整体地势

较高,气温和气压随着海拔的升高而逐渐降低,太阳辐射强度增强,导致湿度下降,不利于植被的生长,这与已有研究结果一致^[14]。同时,西南地区植被 NDVI 与最低气温、日照时数、最高气温、平均气温之间呈显著相关的区域远大于其他气象因子,表明气温和日照时数是影响西南地区植被 NDVI 的重要气象因子。

植被 NDVI 变化与土地利用类型变化具有较强的相关性。研究时段内随着土地利用类型的转变,存在大量植被 NDVI 低值区(耕地和未利用地)转化为 NDVI 高值区(草地和林地),这主要是由于西南地区全面推行的林业生态工程使得区域内林地面积迅速扩大,导致区域植被 NDVI 上升。同时,也存在大量植被 NDVI 高值区(林地和草地)转化为 NDVI 低值区(水体、未利用地和建设用地),这主要是由于城市化建设和扩张侵占大量林地、草地和耕地,加之过度开发利用引起的生态环境恶化,最终导致区域植被 NDVI 下降。由此可知,生态工程建设是西南地区植被 NDVI 上升的重要原因,城市扩张是西南地区植被 NDVI 下降的重要原因,这与已有的研究结果一致^[14,31,37~39,43]。

5 结论

(1)研究时段内西南地区植被 NDVI 整体呈波动上升趋势,区域内各地貌单元植被 NDVI 均呈上升趋势。气候变化和人类活动对西南地区植被生长均以正向促进作用为主。气候变化影响下,云贵高原植被 NDVI 上升趋势强于其他地貌单元。人类活动影响下,广西丘陵植被 NDVI 上升趋势强于其他地貌单元。

(2)气候变化和人类活动的共同驱动是引起西南地区植被 NDVI 变化的主要原因,气候变化对植被 NDVI 变化的影响大于人类活动。在植被改善区,气候变化是促进西南地区植被改善的主要原因。在植被退化区,人类活动是驱动西南地区植被退化的主要原因。

(3)最低气温、降水、最高气温、可能蒸散率和相对湿度对西南地区植被生长的促进作用强于抑制作用,而平均气温、气压、日照时数、温暖指数和湿度指数对西南地区植被生长的抑制作用大于促进作用。总体上,西南地区植被生长受最低气温、日照时数和降水的影响最大。林业生态工程的实施是西南地区植被 NDVI 上升的重要原因,城市扩张是西南地区植被 NDVI 下降的重要原因。

参考文献:

- [1] Forzieri G, Miralles D G, Ciais P, *et al.* Increased control of vegetation on global terrestrial energy fluxes[J]. *Nature Climate Change*, 2020, **10**(4): 356-362.
- [2] Camps-Valls G, Campos-Taberner M, Moreno-Martínez Á, *et al.* A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere[J]. *Science Advances*, 2021, **7**(9), doi: 10.1126/sciadv.abc7447.
- [3] Wang S H, Zhang Y G, Ju W M, *et al.* Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis[J]. *Science*, 2020, **370**(6522): 1295-1300.
- [4] Sha Z Y, Bai Y F, Li R R, *et al.* The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, **3**(1), doi: 10.1038/s43247-021-00333-1.
- [5] Zhao Y, Tzedakis P C, Li Q, *et al.* Evolution of vegetation and climate variability on the Tibetan Plateau over the past 1.74 million years[J]. *Science Advances*, 2020, **6**(19), doi: 10.1126/sciadv.aay6193.
- [6] Li Y, Piao S L, Li L Z X, *et al.* Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China[J]. *Science Advances*, 2018, **4**(5), doi: 10.1126/sciadv.aar4182.
- [7] Miguez-Macho G, Fan Y. Spatiotemporal origin of soil water taken up by vegetation[J]. *Nature*, 2021, **598**(7882): 624-628.
- [8] Huang T, Yu D Y. Water-soil conservation services dynamic and its implication for landscape management in a fragile semiarid landscape[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **130**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108150.
- [9] Wu G L, Liu Y F, Cui Z, *et al.* Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: a meta-analysis[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, **57**(5): 875-885.
- [10] Alkama R, Forzieri G, Duveiller G, *et al.* Vegetation-based climate mitigation in a warmer and greener World[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1), doi: 10.1038/s41467-022-28305-9.
- [11] Heimhofer U, Wucherpfennig N, Adatte T, *et al.* Vegetation response to exceptional global warmth during Oceanic Anoxic Event 2[J]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1), doi: 10.1038/s41467-018-06319-6.
- [12] Ge W Y, Deng L Q, Wang F, *et al.* Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **773**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145648.
- [13] Shi S Y, Yu J J, Wang F, *et al.* Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **755**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142419.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Gu Y Y, Pang B, Qiao X N, *et al.* Vegetation dynamics in response to climate change and human activities in the Hulun Lake basin from 1981 to 2019[J]. *Ecological Indicators*, 2022, **136**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108700.
- [17] Gao W D, Zheng C, Liu X H, *et al.* NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: a case study in the Mu Us Sandy Land, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, **137**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108745.
- [18] Zhang X C, Jin X M. Vegetation dynamics and responses to climate change and anthropogenic activities in the Three-River Headwaters Region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **131**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108223.
- [19] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 气候变化和人类活动对洮河流域植被动态的影响研究[J]. *资源科学*, 2014, **36**(9): 1941-1948.
- Yang L S, Li C B, Wang S B, *et al.* Impacts of climate change and human activities on vegetation dynamics in two geo-ecologic regions in the Taohe River basin, northwest China[J]. *Resources Science*, 2014, **36**(9): 1941-1948.
- [20] Ding Y X, Li Z, Peng S Z. Global analysis of time-lag and-accumulation effects of climate on vegetation growth[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, **92**, doi: 10.1016/j.jag.2020.102179.
- [21] Kong D X, Miao C Y, Wu J W, *et al.* Time lag of vegetation growth on the Loess Plateau in response to climate factors: Estimation, distribution, and influence[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140726.
- [22] 徐勇, 郑志威, 郭振东, 等. 2000~2020年长江流域植被NDVI动态变化及影响因素探测[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3730-3740.
- Xu Y, Zheng Z W, Guo Z D, *et al.* Dynamic variation of vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3730-3740.
- [23] 胡克宏, 张震, 郜敏, 等. 中国丝绸之路经济带沿线植被覆盖变化及自然影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(17): 149-157.
- Hu K H, Zhang Z, Gao M, *et al.* Variations in vegetation cover and natural factors of provinces in China along Silk Road Economic Belt during 2000- 2018[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(17): 149-157.
- [24] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被NDVI变化的地理探测[J]. *地理学报*, 2019, **74**(9): 1758-1776.
- Peng W F, Zhang D M, Luo Y M, *et al.* Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(9): 1758-1776.
- [25] Zheng K Y, Tan L S, Sun Y W, *et al.* Impacts of climate change and anthropogenic activities on vegetation change: evidence from typical areas in China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **126**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107648.
- [26] 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.
- [27] 涂义, 姜亮亮, 刘睿, 等. 1982—2015年中国植被NDVI时空变化特征及其驱动分析[J]. *农业工程学报*, 2021, **37**(22): 75-84.
- Tu Y, Jiang L L, Liu R, *et al.* Spatiotemporal changes of vegetation NDVI and its driving forces in China during 1982-2015[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(22): 75-84.
- [28] Yang L S, Feng Q, Adamowski J F, *et al.* The role of climate change and vegetation greening on the variation of terrestrial evapotranspiration in northwest China's Qilian Mountains[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **759**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143532.
- [29] 谢春平, 吴显坤, 薛晓明, 等. 浙江楠适生区与气候环境关系的分析[J]. *四川农业大学学报*, 2020, **38**(3): 264-271.
- Xie C P, Wu X K, Xue X M, *et al.* Analysis on relationship between suitable habitat of phoebe chekiangensis and climatic environmental factors[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2020, **38**(3): 264-271.
- [30] 刘斌, 孙艳玲, 王中良, 等. 华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(1): 12-23.
- Liu B, Sun Y L, Wang Z L, *et al.* Analysis of the vegetation cover change and the relative role of its influencing factors in north China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(1): 12-23.
- [31] Jiang S S, Chen X, Smettem K, *et al.* Climate and land use influences on changing spatiotemporal patterns of mountain vegetation cover in southwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **121**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107193.
- [32] 赵伟, 高博, 卢清, 等. 2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 97-105.
- Zhao W, Gao B, Lu Q, *et al.* Ozone pollution trend in the Pearl River Delta region during 2006- 2019[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.
- [33] Thakur S, Mondal I, Bar S, *et al.* Shoreline changes and its impact on the mangrove ecosystems of some islands of Indian Sundarbans, North-East coast of India[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **284**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124764.
- [34] 赵杰, 杜自强, 武志涛, 等. 中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响[J]. *地理学报*, 2018, **73**(3): 395-404.
- Zhao J, Du Z Q, Wu Z T, *et al.* Seasonal variations of day-and nighttime warming and their effects on vegetation dynamics in China's temperate zone[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(3): 395-404.
- [35] 王伟, 纪翌佳, 金凤君. 基于动态空间面板模型的中国港口竞争与合作关系研究[J]. *地理研究*, 2022, **41**(3): 616-632.
- Wang W, Ji Y J, Jin F J. The competition and cooperation relationship of Chinese ports based on dynamic spatial panel model[J]. *Geographical Research*, 2022, **41**(3): 616-632.
- [36] Gholami H, Mohamadifar A, Rahimi S, *et al.* Predicting land susceptibility to atmospheric dust emissions in central Iran by combining integrated data mining and a regional climate model[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(4): 172-187.
- [37] Yue Y M, Liao C J, Tong X W, *et al.* Large scale reforestation of farmlands on sloping hills in South China karst[J]. *Landscape*

- Ecology, 2020, **35**(6): 1445-1458.
- [38] He Y H Z, Wang L, Niu Z, *et al.* Vegetation recovery and recent degradation in different karst landforms of southwest China over the past two decades using GEE satellite archives [J]. Ecological Informatics, 2022, **68**, doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101555.
- [39] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 等. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究[J]. 生态学报, 2021, **41**(3): 1138-1147.
- Li M L, Yin L C, Zhang Y, *et al.* Spatio-temporal dynamics of fractional vegetation coverage based on MODIS-EVI and its driving factors in Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(3): 1138-1147.
- [40] Wang M, Ding Z, Wu C Y, *et al.* Divergent responses of ecosystem water-use efficiency to extreme seasonal droughts in Southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **760**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143427.
- [41] 熊俊楠, 李进, 程维明, 等. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素[J]. 地理学报, 2019, **74**(7): 1374-1391.
- Xiong J N, Li J, Cheng W M, *et al.* Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(7): 1374-1391.
- [42] Li X Y, Li Y, Chen A P, *et al.* The impact of the 2009/2010 drought on vegetation growth and terrestrial carbon balance in Southwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, **269-270**: 239-248.
- [43] 李茜荣, 杨东, 冯磊, 等. 成渝经济圈 2000-2018 年植被 NDVI 的动态变化[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(9): 2967-2977.
- Li X R, Yang D, Feng L, *et al.* Dynamics of vegetation NDVI in Chengdu-Chongqing economic circle from 2000 to 2018 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(9): 2967-2977.
- [44] 李红英, 张存桂, 汪生珍, 等. 近 40a 青藏高原植被动态变化对水热条件的响应[J]. 生态学报, 2022, **42**(12): 4770-4783.
- Li H Y, Zhang C G, Wang S Z, *et al.* Response of vegetation dynamics to hydrothermal conditions on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(12): 4770-4783.
- [45] 马炳鑫, 靖娟利, 徐勇, 等. 2000—2019 年滇黔桂岩溶区植被 NPP 时空变化及与气候变化的关系研究[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(12): 2285-2293.
- Ma B X, Jing J L, Xu Y, *et al.* Spatial-temporal changes of NPP and its relationship with climate change in karst areas of Yunnan, Guizhou and Guangxi from 2000 to 2019 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(12): 2285-2293.
- [46] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 等. 近 15 年中国西南地区植被覆盖度动态变化[J]. 国土资源遥感, 2017, **29**(3): 128-136.
- Zheng Z J, Zeng Y, Zhao Y J, *et al.* Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in southwestern China over the past 15 years based on MODIS data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2017, **29**(3): 128-136.
- [47] 马瑞雪. 西南地区植被覆盖时空演变特征及其驱动力分析[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
- Ma R X. Spatiotemporal evolution of vegetation cover and its driving forces in Southwest China[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021.
- [48] 邓礼强. 2001-2016 年黄土高原植被物候和生产力变化及其对气候因子的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- Deng L Q. Changes in vegetation phenology and productivity and their responses to climate factors on the Loess Plateau during 2001-2016[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [49] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982-2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析[J]. 地理学报, 2019, **74**(3): 534-543.
- Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982-2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(3): 534-543.
- [50] 张笑鹤, 张远东, 顾峰雪, 等. 西南地区灌丛归一化植被指数动态及其与气候因子的相关性[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(11): 2577-2583.
- Zhang X H, Zhang Y D, Gu F X, *et al.* Dynamics of shrubs normalized difference vegetation index and its correlations with climatic factors in Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(11): 2577-2583.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-jan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)