

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

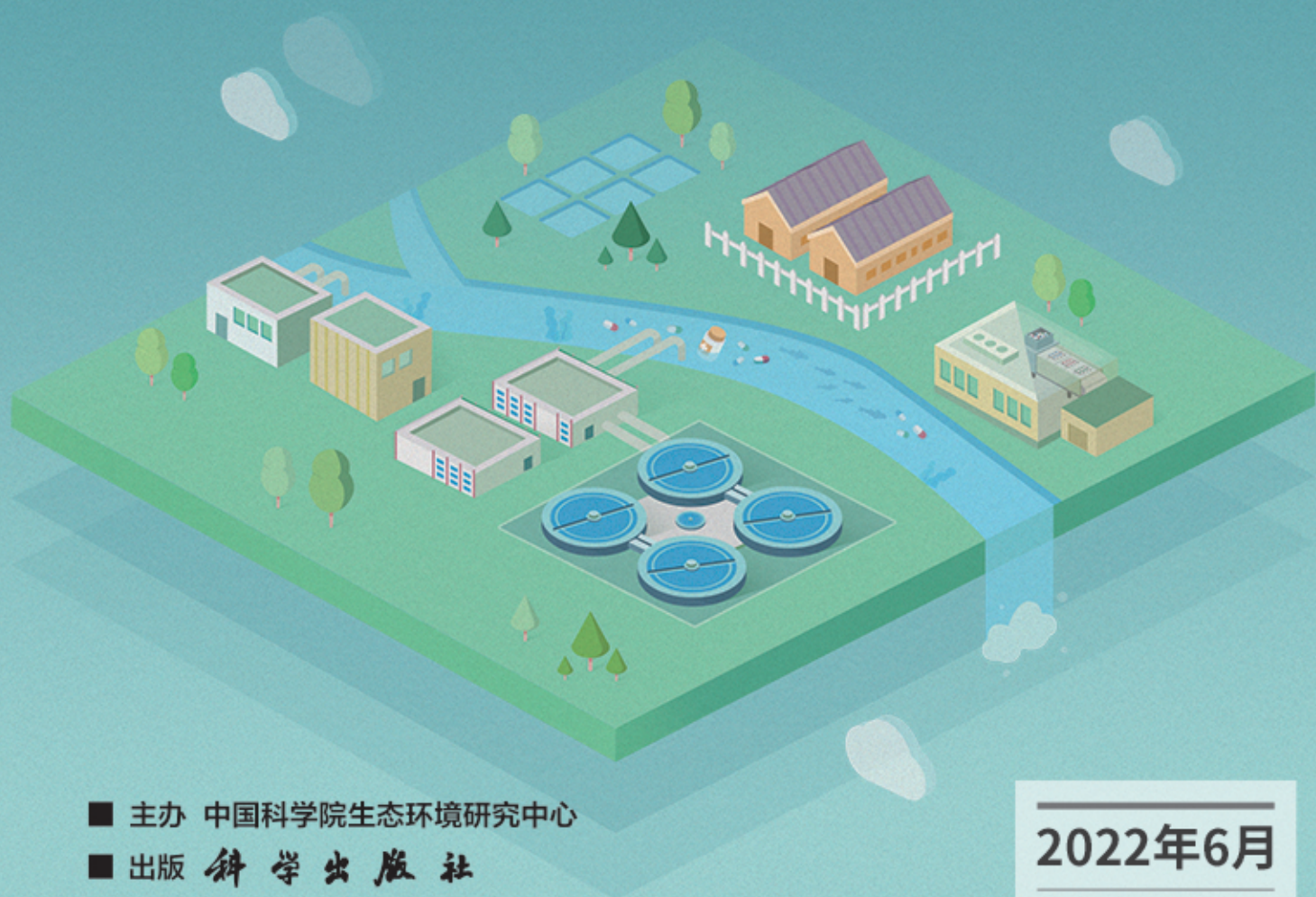
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁敏, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐藤, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征

徐勇, 黄雯婷, 窦世卿*, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利

(桂林理工大学测绘地理信息学院, 桂林 541006)

摘要: 研究植被变化及其对气候变化和人类活动的响应机制, 对区域生态保护和植被恢复具有重要现实意义. 利用 MODIS NDVI 数据, 基于站点的气象数据和土地利用数据, 结合 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性分析、残差分析、偏相关分析和复相关分析等方法, 基于不同地貌单元, 分析 2000 ~ 2020 年中国西南地区植被覆盖时空演变特征及其对气候和土地利用变化的响应特征. 结果表明, 2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 整体呈波动上升趋势, 上升斜率在空间上呈东南高和西北低的分异格局. 气候变化和人类活动对西南地区植被 NDVI 上升均以促进作用为主, 且对广西丘陵植被生长的促进作用强于其他地貌单元. 2000 ~ 2020 年间西南地区植被 NDVI 与气温和降水呈正相关, 与相对湿度和日照时数呈负相关, 且温度是影响西南地区植被 NDVI 变化的气候主导因子. 城市扩张在一定程度上减少了区域植被覆盖, 但得益于适宜的气候条件以及林业生态工程的实施, 西南地区整体植被覆盖以上升为主. 研究结果可为西南地区生态保护及经济可持续发展提供科学依据.

关键词: 西南地区; 气候变化; 人类活动; 残差分析; 偏相关分析

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3230-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202108107

Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020

XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing*, GUO Zhen-dong, LI Xin-yi, ZHENG Zhi-wei, JING Juan-li

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

Abstract: Studying vegetation cover variation and its responding mechanism to climate change and human activities is of great significance for regional ecological protection and vegetation restoration. In this study, on the basis of MODIS NDVI, in situ climate data, and land use type data using Theil-Sen Median analysis, the Mann-Kendall significance test, residual analysis, partial correlation analysis, and multi-correlation analysis, the spatial and temporal variation in vegetation cover and its response to climate change and the land use/land cover change in each geomorphological unit in southwest China were analyzed. The vegetation cover showed a fluctuant increasing trend, and the changing trend exhibited obvious spatial heterogeneity, with the increasing rate being higher in the southeast and lower in the northwest of southwest China from 2000 to 2020. The vegetation variation was dominated by positive effects of the climate change and human activities in southwest China, and the positive effects were stronger in Guangxi Hill than those in other geomorphological units. Furthermore, from 2000 to 2020 the vegetation cover was positively associated with precipitation and temperature and negatively correlated with relative humidity and sunshine duration in southwest China. Temperature was considered to be the dominate climate factor controlling the vegetation variation in the study area. Urban expansion had decreased the region vegetation cover, but the overall vegetation cover had increased in southwest China due to the suitable regional climate conditions and the implementation of ecological reforestation projection. These results can provide scientific references for ecological protection and economic sustainable development in southwest China.

Key words: southwest China; climate change; human activities; residual analysis; partial correlation analysis

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,参与自然界物质和能量循环,其变化可以有效反映气候变化和人类活动对区域及全球生态系统的影响^[1-3]. 陆地植被生态系统的时间变化、空间分布及其空间动态变化深刻地影响着全球生态、经济和人类福祉. 归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为植被遥感监测的重要参数之一,因其具有覆盖范围广、监测频次高和人力成本低等优势,被广泛应用于监测区域及全球植被覆盖变化^[3-7].

国内外学者在不同时空尺度上研究了植被覆盖变化及其驱动因素,并取得了丰硕的成果. De Jong 等^[4]的研究分析了 1981 ~ 2006 年全球植被覆盖变化趋势,结果表明,印度西部、澳大利亚西部以及加

拿大、美国 and 萨赫勒部分地区植被呈显著上升趋势. Emamian 等^[8]的研究发现 2004 ~ 2015 年伊朗东北部的 Khorasan Razavi 省绝大部分地区植被无显著变化,植被覆盖上升的区域主要集中在沙丘、植树造林和黏土坑区. Ghebregabher 等^[9]的研究发现 1982 ~ 2013 年非洲之角的植被覆盖呈先上升后下降的变化趋势,且植被 NDVI 与降水呈正相关,与气温呈负相关. 有学者针对我国青藏高原^[10,11]、“三

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2021-10-23

基金项目: 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297160); 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); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202110596006)

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

* 通信作者, E-mail: doushiqing@glut.edu.cn

北”防护林地区^[12,13]、黄土高原^[14,15]、京津冀^[16,17]、黄河流域^[3,18]和长江流域^[13,19,20]等生态敏感地区的植被覆盖变化及其驱动因素方面进行了研究. 随着研究的不断深入, 针对西南地区植被 NDVI 变化及其驱动因素的研究也取得了长足的进步, 肖建勇等^[21]的研究发现, 喀斯特地区植被 NDVI 空间分布相比非喀斯特地区更易受气候差异及人类活动的双重影响. 丁文荣^[22]的研究表明气候变化与人类活动皆对滇东南地区植被 NDVI 上升具有促进或抑制作用, 且呈现出明显的空间分布差异. 有研究分析了西南地区植被 NDVI 变化及其驱动因素^[23~26], 发现除气候变化外, 植被 NDVI 还受非气候因子的影响.

目前, 针对西南地区的植被变化的研究中, 大部分是基于西南地区整体或者省市级行政单元进行的, 考虑的气候因子多为气温和降水, 忽略了植被生长在不同地貌环境存在的差异以及其他气候因子对植被生长的影响, 且已有研究大多侧重定性讨论, 未将气候变化和人类活动对植被覆盖变化的影响进行定量剥离. 鉴于此, 本文以西南地区为研究区, 以地貌类型为研究单元, 探究气候变化和人类活动影响下西南地区植被 NDVI 时空演变特征, 分析西南地区植被 NDVI 对气候和土地利用变化的响应机制, 以为西南地区石漠化防治与生态恢复以及区域经济发展提供理论参考和科学依据.

1 研究区概况

西南地区在行政区域上包括四川省、云南省、贵州省、重庆市和广西壮族自治区, 地理范围在

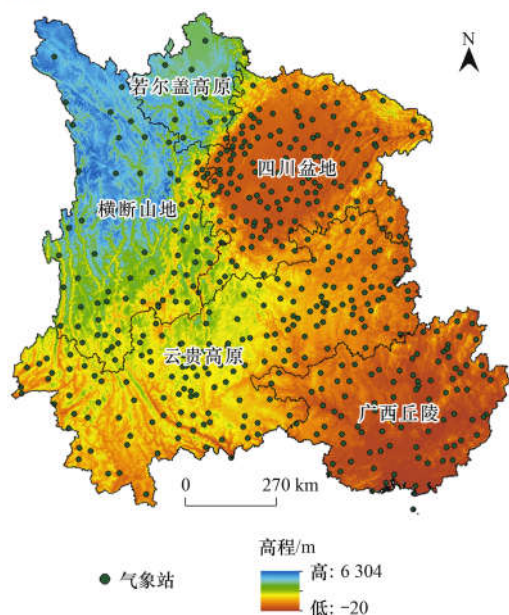


图 1 研究区气象站及高程空间分布示意

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

20°54′~34°19′N, 97°21′~112°04′E 之间. 研究区地势呈现西北高、东南低的空间分布格局, 海拔从 -20~6 304 m, 地貌类型多样, 可划分为若尔盖高原、横断山地、四川盆地、云贵高原和广西丘陵 5 大地貌单元(图 1). 研究区内喀斯特地貌分布广泛, 生态环境脆弱, 石漠化问题与贫困问题交织. 在热带季风气候和亚热带季风气候的交替影响下, 热量丰富, 降水充沛, 雨热同期, 年平均气温在 -2.8~23.9℃ 之间, 年累积降水量在 54.6~2 675.6 mm 之间, 年平均相对湿度在 46.6%~85.0% 之间, 年累积日照时数在 844~2 531 h 之间. 研究区土地利用类型以林地、草地和耕地为主.

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

本文使用的植被遥感数据 MODIS NDVI 来源于美国国家航空航天局发布的 MOD13A3 产品, 时间范围为 2000 年 2 月至 2020 年 12 月, 时间分辨率为 1 个月, 空间分辨率为 1 km. 为剔除缺失值、水、云、重气溶胶和云影对实验结果的影响, 本文采用最大值合成法得到年植被 NDVI 最大值时间序列. 气象数据使用中国 2 416 个气象站点逐日气温、降水、相对湿度和日照时数数据, 来源于国家气象科学数据中心. 利用 ANUSPLIN 插值软件引入 DEM 作为协变量对气象数据进行插值, 得到覆盖全国, 且空间分辨率和投影与 MODIS NDVI 一致的气象栅格数据, 然后通过裁剪得到覆盖研究区的气候因子时间序列. DEM 数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 (shuttle radar topography mission, SRTM). 2000 和 2020 年中国土地利用数据来源于资源环境科学与数据中心, 空间分辨率为 1 km. 通过对数据进行裁剪、掩膜和重分类等处理, 得到西南地区 6 类土地利用类型数据: 耕地、林地、草地、水体、城镇用地和未利用地.

2.2 研究方法

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

Theil-Sen Median 趋势分析法是一种稳健的非参数斜率估计方法, 抗噪性强, 受异常值影响小, 可用于长时间序列数据变化趋势的研究中^[27,28], 能够科学直观地反映时间序列数据在一段时间内的变化趋势, 评估其变化趋势. 计算公式如下:

$$\text{Slope} = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \quad \forall j > i \quad (1)$$

式中, x_i 和 x_j 分别为第 i 和第 j 年的植被 NDVI 值, 其中 $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$; median 为取中值函数. 当

Slope > 0 时,表示植被 NDVI 整体呈上升趋势,地区植被覆盖状况趋于改善;当 Slope = 0 时,表示植被 NDVI 整体基本保持不变,地区植被覆盖状况趋于平稳;Slope < 0 时,表示植被 NDVI 整体呈下降趋势,地区植被覆盖状况趋于恶化。

Mann-Kendall 显著性检验法^[27,28]作为常用的非参数检验法,适用范围广,具有不要求样本遵循一定的分布特征和不受少数异常值影响等优点。本文运用该方法对植被 NDVI 时间序列变化趋势进行显著性检验,对于给定的置信水平 α ,当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,可以认为在 α 水平上 NDVI 时间序列有显著变化趋势,反之则为轻微变化。本文定义变化趋势在 $\alpha = 0.05$ 下显著时,为显著变化;在 $\alpha = 0.01$ 下显著时,为极显著变化。

2.2.2 多元线性回归分析和残差分析

本文通过多元线性回归分析和残差分析^[29,30]实现气候变化和人类活动对植被覆盖变化影响的定量分离。考虑到植被生长对气候变化具有一定的滞后效应^[31,32],首先,采用相关分析法,计算不同的地貌单元植被 NDVI 与前 0 ~ 12 月气温、降水、相对湿度和日照时数的相关系数;然后,采用一阶偏导法,得到不同的地貌单元植被 NDVI 与气温、降水、相对湿度和日照时数的绝对值最大的相关系数(即

最大相关系数,下同)及其对应的滞后期,结果如表 1 所示;接下来,通过 T 检验法判断其相关性是否显著,若最大相关系数通过 $P < 0.1$ 显著性检验,则认为该气候因子对植被 NDVI 影响显著。在此基础上,以植被 NDVI 观测值($NDVI_{Obs}$,即植被 NDVI,下同)和通过显著性检验的最大相关系数对应滞后期的气温、降水、相对湿度和日照时数为自变量,分区建立多元回归分析模型生成植被 NDVI 预测值($NDVI_{Pre}$),如式(2),植被 $NDVI_{Pre}$ 看作气候变化影响下的植被 NDVI。忽略其他非主要影响因素的条件下,建立残差分析模型,如式(3),即可算出植被 NDVI 残差值($NDVI_{Res}$),从而剥离气候变化的影响,得到人类活动作用下的植被 NDVI 值。

$$NDVI_{Pre} = \left(\sum b_i c_i \right) + \varepsilon \quad (2)$$

$$NDVI_{Res} = NDVI_{Obs} - NDVI_{Pre} \quad (3)$$

式中, b_i 为系数; c_i 为最大相关系数对应滞后期的各气候因子; i 为气候因子类别,包括气温、降水、相对湿度和日照时数; ε 为常数。当 $NDVI_{Res} > 0$ 时,说明人类活动对植被生长具有促进作用;当 $NDVI_{Res} = 0$,说明人类活动对植被生长的作用力微弱;当 $NDVI_{Res} < 0$ 时,说明人类活动对植被生长具有抑制作用。

表 1 植被 NDVI 与气候因子最大相关系数及滞后期¹⁾

Table 1 Maximum correlation coefficient and its lag time between NDVI and climate factors

气候因子		横断山地	若尔盖高原	四川盆地	云贵高原	广西丘陵
气温	最大相关系数	0.667 ***	0.591 ***	0.206	0.664 ***	0.510 **
	滞后期(月)	5	1	1	3	1
降水	最大相关系数	-0.483 **	0.721 ***	0.663 ***	0.059	0.390 *
	滞后期(月)	0	2	2	0	2
相对湿度	最大相关系数	-0.515 **	0.147	-0.113	-0.114	0.253
	滞后期(月)	6	2	0	0	1
日照时数	最大相关系数	-0.445 **	-0.740 ***	-0.384 *	-0.369 *	-0.414 *
	滞后期(月)	1	0	1	1	2

1) * 表示 $P < 0.1$, ** 表示 $P < 0.05$, *** 表示 $P < 0.01$

2.2.3 相关分析、偏相关分析和复相关分析

本文采用相关分析^[33]探究植被 NDVI 与气温、降水、相对湿度和日照时数的相关关系。相关分析可用于计算两个因子之间的相关程度,计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中, x 和 y 是自变量, r_{xy} 为变量 x 和变量 y 的相关系数。

当多个因子同时与 NDVI 存在相关关系时,使

用偏相关分析^[34]可以剔除其余因子的影响,单独分析单一因子与 NDVI 的相关程度。偏相关分析的计算公式如下:

$$r_{xy \cdot z_1 z_2 \cdots z_g} = \frac{r_{xy \cdot z_1 z_2 \cdots z_{g-1}} - r_{xz_g \cdot z_1 z_2 \cdots z_{g-1}} r_{yz_g \cdot z_1 z_2 \cdots z_{g-1}}}{\sqrt{(1 - r_{xz_g \cdot z_1 z_2 \cdots z_{g-1}}^2)(1 - r_{yz_g \cdot z_1 z_2 \cdots z_{g-1}}^2)}} \quad (5)$$

式中, $r_{xy \cdot z_1 z_2 \cdots z_g}$ 为基于 $z_1, z_2, \dots, z_g$ 控制变量的 x 和 y 变量的偏相关系数。

复相关分析^[27]能够综合考虑多种因子的协同作用,反映一个要素与多个要素之间的线性相关关系。复相关系数的计算公式为:

$$r_{x,yz,\dots,z_g} = [1 - (1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz,y}^2) \cdots$$
$$(1 - r_{xz_g,yz,\dots,z_{(g-1)}}^2)]^{1/2} \quad (6)$$

式中, $r_{x,yz,\dots,z_g}$ 为变量 x 与 $y, z, \dots, z_g$ 自变量之间的复相关系数。

依据计算出的偏相关系数和复相关系数, 采用 T 检验法进行显著性检验, 将植被 NDVI 与气候因子的相关程度划分为极显著相关 ($P < 0.01$)、显著相关 ($0.01 \leq P < 0.05$) 和不显著相关 ($P \geq 0.05$)。

3 结果与分析

3.1 植被 NDVI 时空演变特征

由图 2 可知, 整体上, 2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 呈波动上升趋势, 上升斜率为 0.0024 a^{-1} , 但植被 NDVI 在 2011 年和 2014 年出现明显下降趋势。2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 均值为 0.779, 最大值出现在 2020 年, 为 0.802, 最小值出现在 2000 年, 为 0.750。2000 ~ 2020 年各地貌单元植被 NDVI 均呈上升趋势, 其中广西丘陵植被 NDVI 上升趋势最为显著, 为 0.0034 a^{-1} , 云贵高原上升速率次之, 为 0.0031 a^{-1} , 横断山地和若尔盖高原上升速率较低, 分别为 0.0016 a^{-1} 和 0.0012 a^{-1} 。云贵高原 2000 ~ 2020 年平均植被 NDVI 最高, 为 0.800, 其次为广西丘陵, 为 0.794, 最低为横断山地, 为 0.746。综上可知, 2000 ~ 2020 年西南地区整体及各地貌单元的植被 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, 云贵高原整体植被覆盖状况优于其他地貌单元。

如图 3(a) 所示, 2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 变化斜率在 $-0.034 \sim 0.038 \text{ a}^{-1}$ 之间。整体

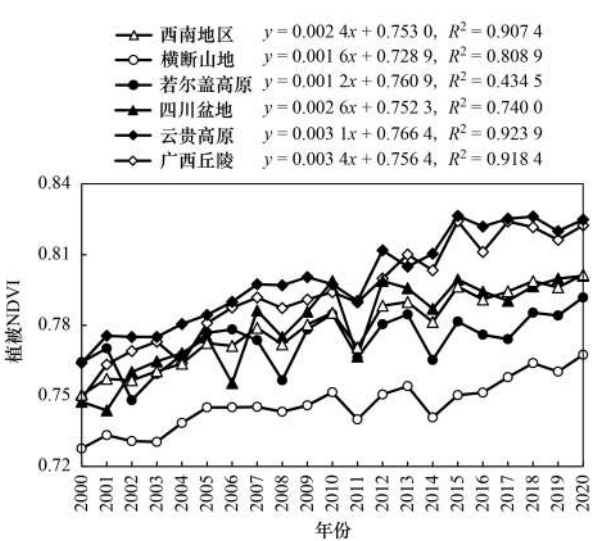


图 2 2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 变化趋势
Fig. 2 Temporal variation in observed NDVI in southwest China from 2000 to 2020

上, 植被 NDVI 呈上升趋势的面积大于呈下降趋势的面积。植被 NDVI 呈上升趋势的面积占 88.15%, 其中, 呈极显著上升和显著上升区域的面积占 57.93%, 主要分布在横断山地东南部、四川盆地四周、云贵高原中部和南部以及广西丘陵中部和西部 [图 3(b)]。植被 NDVI 呈下降趋势的面积占 11.85%, 其中, 呈极显著下降和显著下降区域仅占 1.94%, 主要分布在四川盆地西北部和东南部以及云贵高原中部和西部的城市群。

2000 ~ 2020 年各地貌单元植被 NDVI 呈上升趋势的面积均大于呈下降趋势的面积。横断山地、若尔盖高原、四川盆地、云贵高原和广西丘陵植被 NDVI 呈上升趋势的面积分别占其总面积的

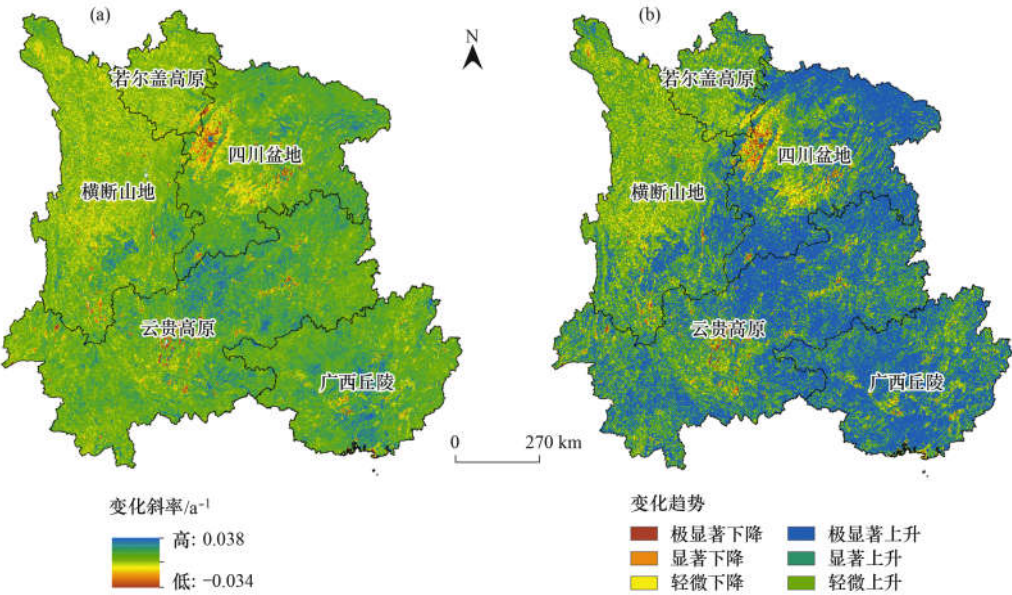


图 3 2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 空间变化特征
Fig. 3 Spatial variation in observed NDVI in southwest China from 2000 to 2020

79.61%、80.07%、87.28%、92.90%和94.43%。四川盆地、广西丘陵和云贵高原的植被NDVI变化以极显著上升为主,改善面积比例和强度均明显高于若尔盖高原和横断山地。

3.2 气候变化影响下植被NDVI时空演变特征

由图4可知,2000~2020年西南地区植被NDVI_{Pre}呈波动上升趋势,上升斜率为0.001 a⁻¹。气候变化影响下,广西丘陵植被NDVI_{Pre}上升趋势最为明显,为0.0013 a⁻¹,横断山地和云贵高原植被NDVI_{Pre}上升斜率为0.001 a⁻¹,略低于广西丘陵,四川盆地植被NDVI_{Pre}上升速率最低,为0.0008 a⁻¹。综上可知,气候变化影响下,各地貌单元植被NDVI_{Pre}均呈上升趋势,上升斜率差异较小。

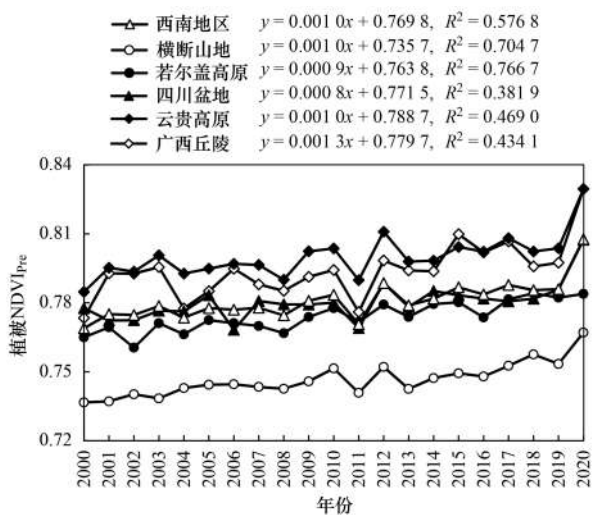


图4 2000~2020年西南地区植被NDVI_{Pre}变化趋势

Fig. 4 Temporal variation in predicted NDVI in southwest China from 2000 to 2020

由图5(a)可知,2000~2020年植被NDVI_{Pre}变化斜率呈现明显空间异质性,植被NDVI_{Pre}变化斜率为-0.024~0.029 a⁻¹。整体上,西南地区植被NDVI_{Pre}以上升为主,呈上升趋势的区域占84.56%,其中,48.03%的区域呈极显著上升和显著上升,主要分布在横断山地、若尔盖高原、四川盆地东南部、云贵高原和广西丘陵西北部。极显著下降和显著下降的面积仅占4.11%,在四川盆地西北部和云贵高原中部分布集中,在若尔盖高原和横断山地零星分布[图5(b)]。

气候变化影响下,广西丘陵和云贵高原植被NDVI_{Pre}呈上升趋势的面积分别占其总面积的90.42%和85.68%,高于四川盆地、若尔盖高原和横断山地。虽然若尔盖高原植被NDVI_{Pre}呈上升趋势的面积仅占82.43%,但在各地貌单元植被NDVI_{Pre}上升区域中,呈极显著上升面积占比最大的是若尔盖高原,为56.60%,其次为横断山地,为43.14%,最小的为四川盆地,仅占9.83%。综上可知,气候变化对西南地区各地貌单元植被生长具有双重作用,但整体上气候变化对各地貌单元植被生长的促进作用大于抑制作用。广西丘陵和云贵高原植被NDVI_{Pre}上升趋势的面积占比大于四川盆地、横断山地和若尔盖高原,但若尔盖高原植被NDVI_{Pre}呈极显著上升趋势的比率大于其他地貌单元。

3.3 人类活动影响下植被NDVI时空演变特征

如图6所示,整体上,2000~2020年西南地区植被NDVI_{Res}呈上升趋势,上升斜率为0.0015 a⁻¹。人类活动影响下,不同地貌单元植被NDVI_{Res}均呈波动上升趋势,但上升速率有所不同。广西丘陵、云贵

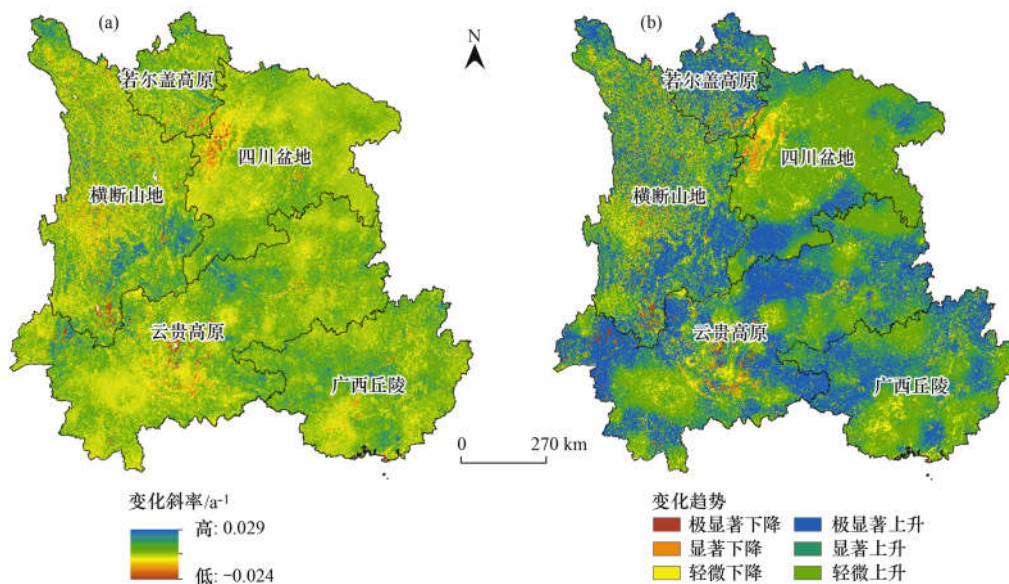


图5 2000~2020年西南地区植被NDVI_{Pre}空间变化特征

Fig. 5 Spatial distribution of predicted NDVI changing trend in southwest China from 2000 to 2020

高原和四川盆地植被 $NDVI_{Res}$ 上升趋势较为明显, 分别为 0.0021 、 0.002 和 0.0018 a^{-1} , 而横断山地和若尔盖高原植被 $NDVI_{Res}$ 上升速率较低, 分别为 0.0006 a^{-1} 和 0.0002 a^{-1} . 综上可知, 人类活动对西南地区各地貌单元植被生长具有促进作用, 且对广西丘陵、云贵高原和四川盆地植被生长的促进作用强于横断山地和若尔盖高原.

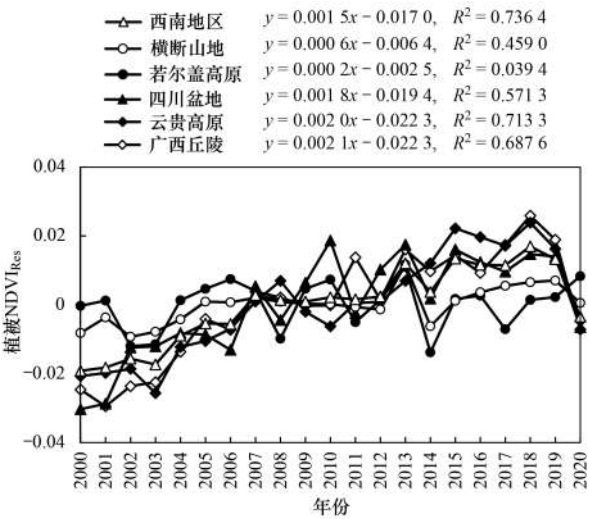


图 6 2000 ~ 2020 年西南地区植被 $NDVI_{Res}$ 变化趋势
Fig. 6 Temporal variation in residual NDVI in southwest China from 2000 to 2020

由图 7(a) 可知, 2000 ~ 2020 年西南地区植被 $NDVI_{Res}$ 变化斜率为 $-0.024 \sim 0.025\text{ a}^{-1}$, 变化斜率整体呈东高西低的空间分布格局. 植被 $NDVI_{Res}$ 呈上升趋势的区域占 82.94% , 呈下降趋势的区域占 17.06% . 以上结果表明, 人类活动对西南地区植被生长具有双重影响, 但整体上以正向促进为主. 植被

$NDVI_{Res}$ 呈极显著上升区域占 18.51% , 主要分布在四川盆地东北部和西南部、云贵高原南部及其东北部以及广西丘陵中部和南部; 呈下降趋势的区域分布零散, 主要分布在各省会城市及其周边地区 [图 7(b)].

人类活动影响下, 广西丘陵、云贵高原和四川盆地植被 $NDVI_{Res}$ 呈上升趋势的区域分别占 92.39% 、 90.68% 和 84.16% , 远高于横断山地和若尔盖高原. 四川盆地、广西丘陵和云贵高原植被 $NDVI_{Res}$ 呈极显著上升和显著上升的面积分别占其总面积的 51.94% 、 49.24% 和 43.87% , 而横断山地和若尔盖高原极显著上升和显著上升的面积仅占其总面积的 6.60% 和 2.55% . 综上可知, 人类活动对西南地区各地貌单元植被生长均以正向促进为主, 但对四川盆地、广西丘陵和云贵高原植被生长的促进作用远高于横断山地和若尔盖高原.

3.4 植被 NDVI 与气候因子的相关性分析
3.4.1 植被 NDVI 与气候因子的偏相关关系

西南地区植被 NDVI 与气候因子偏相关关系空间分布如图 8 所示, 整体上, 西南地区植被 NDVI 与气温和降水呈正相关关系. 植被 NDVI 与气温的最大偏相关系数平均值为 0.191 , 呈东南强西北弱的空间响应特征. 研究区 73.06% 的区域的植被 NDVI 与气温呈正相关, 其中极显著正相关的区域主要分布在横断山地东南部、四川盆地东北部、云贵高原中部、东部和广西丘陵西部. 植被 NDVI 与降水的最大偏相关系数平均值低于气温, 为 0.122 , 空间上表现为两边低、中部高的空间分布格局. 研究区 65.95% 的区域植被 NDVI 与降水呈正相关, 植被 NDVI 与降水相关性呈

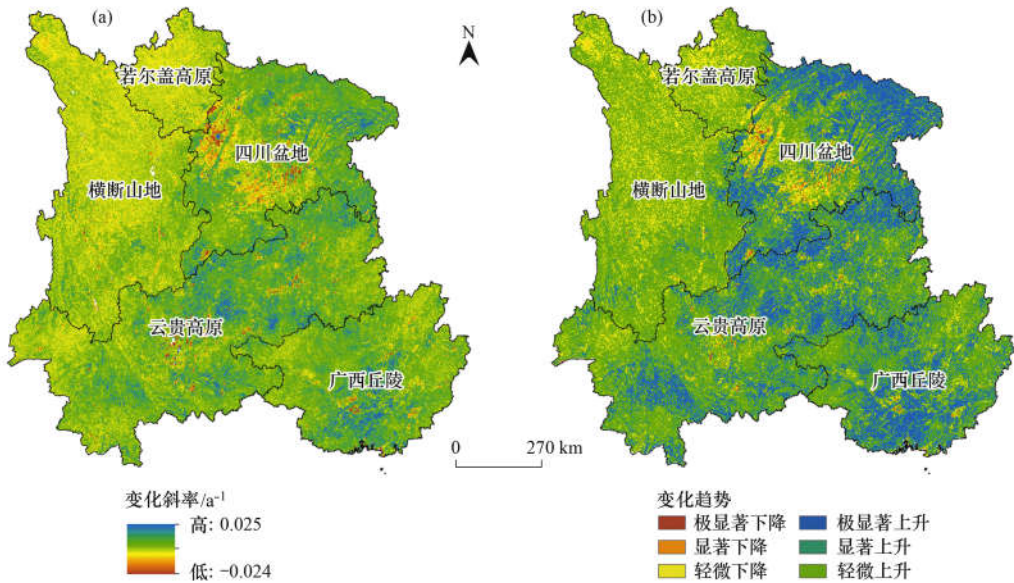


图 7 2000 ~ 2020 年西南地区植被 $NDVI_{Res}$ 空间变化特征

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

显著正相关和极显著正相关的区域占 16.50%, 主要分布在横断山地西南部、若尔盖高原、四川盆地中部、西部和广西丘陵西北部。

西南地区植被 NDVI 与相对湿度和日照时数整体呈微弱负相关, 最大偏相关系数平均值分别为 -0.009 和 -0.178 。植被 NDVI 与相对湿度和日照

时数呈现负相关的区域分别占 50.41% 和 72.92%。植被 NDVI 与相对湿度呈极显著负相关的区域主要集中在横断山地南部和四川盆地中北部地区。植被 NDVI 与日照时数呈现极显著负相关的区域主要分布在四川盆地东部、云贵高原东部和广西丘陵北部。

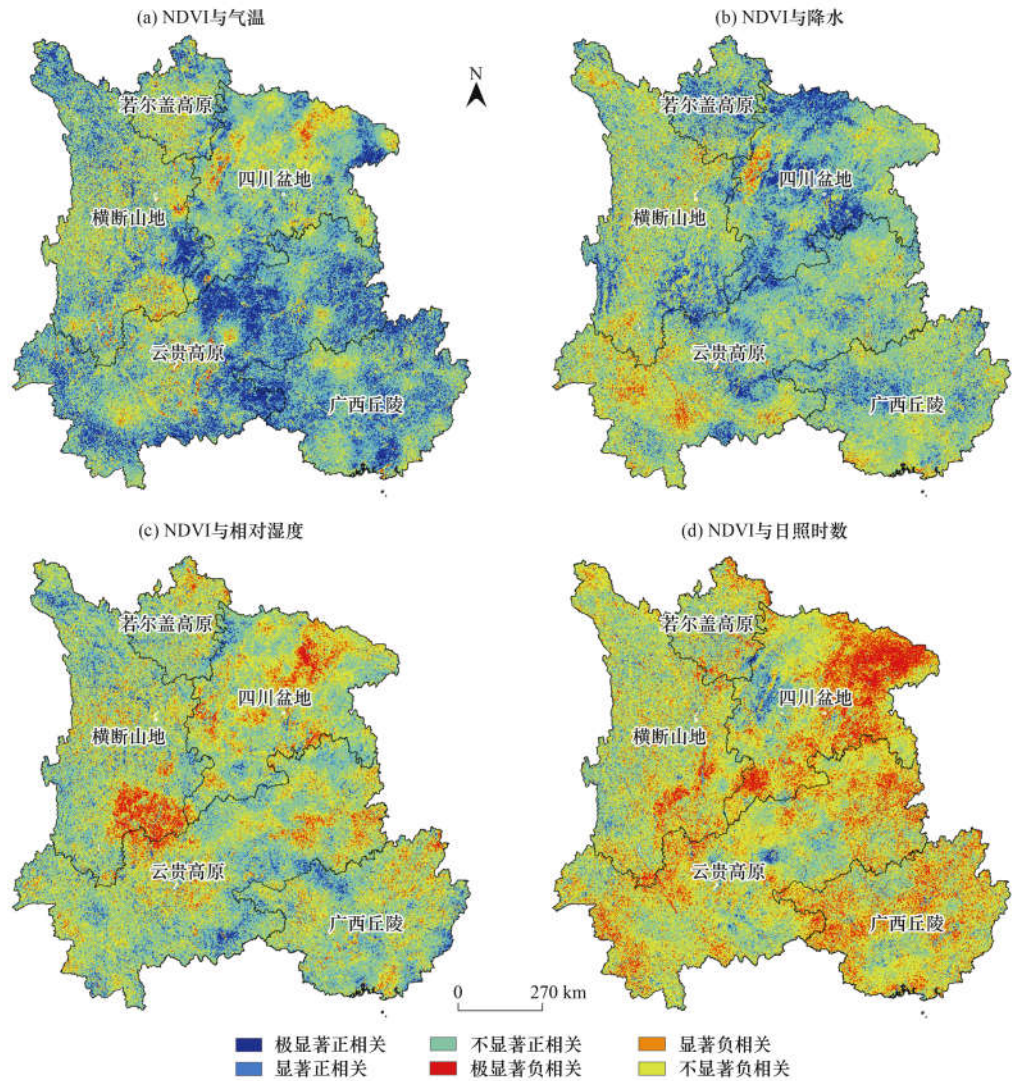


图 8 西南地区植被 NDVI 与气候因子偏相关关系空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the partial correlation coefficients between NDVI and climate factors in southwest China

3.4.2 植被 NDVI 与气候因子的复相关关系

复相关分析用来确定西南地区植被 NDVI 与气温、降水、相对湿度和日照时数的复相关关系, 以探究气候变化对植被生长的综合作用。西南地区植被 NDVI 与气候因子的复相关系数介于 0.046 ~ 0.967 之间, 说明气候变化的综合作用促进了西南地区植被生长。植被 NDVI 与气候因子变化的复相关性呈现明显的空间异质性。如图 9 所示, 整体上, 植被 NDVI 与气候因子的最大复相关系数呈东高西低, 南高北低的空间分布格局。西南地区植被 NDVI 与气候因子呈极显著正相关的区域占 58.38%。其

中, 四川盆地植被 NDVI 与气候因子复相关关系呈极显著相关的面积占其总面积的 64.82%, 高于其他地貌单元。

3.5 植被 NDVI 与土地利用变化的关系

土地利用类型的变化在宏观上反映了人类活动对自然的改造过程, 2000 ~ 2020 年间, 西南地区土地利用类型发生变化的区域占 39.66%。如图 10 所示, 总体上, 城镇用地和未利用地的面积有所增加, 变化率分别为 101.76% 和 11.15%。不同土地利用类型间的转变对区域植被覆盖变化的作用存在差异。2000 ~ 2020 年研究区内有 101 760 km² 的耕地转

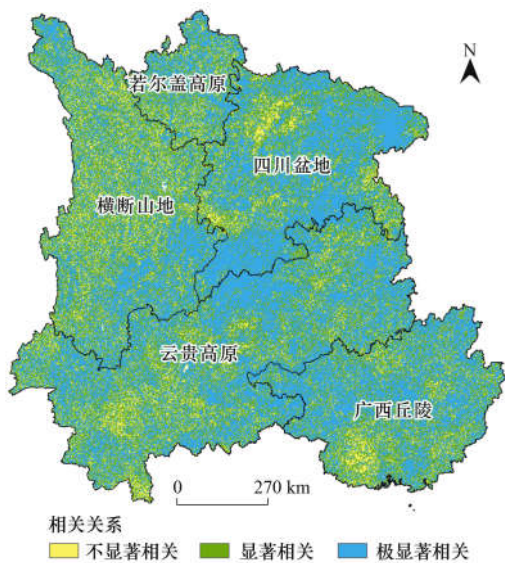


图9 西南地区植被NDVI与气候因子的复相关关系空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of multiple correlation coefficients between NDVI and climatic factors in southwest China

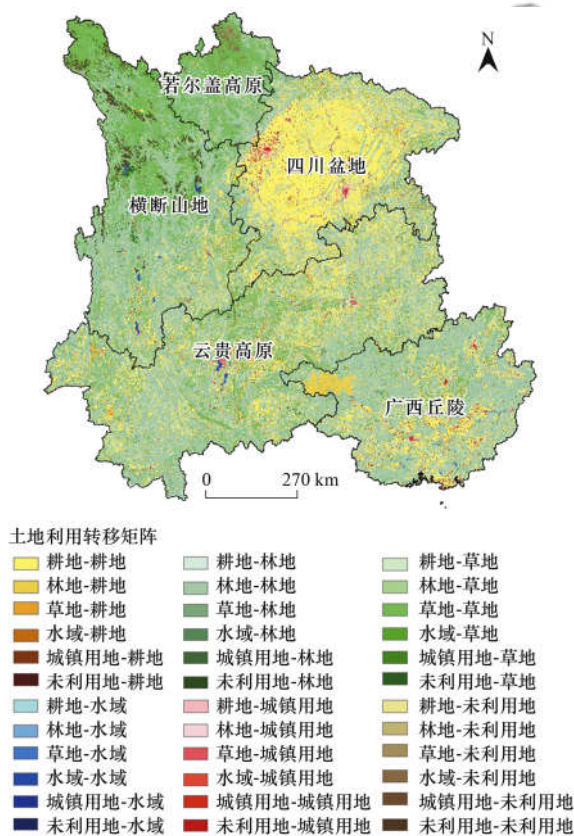


图10 2000~2020年西南地区土地利用转移
Fig. 10 Spatial distribution of land use transformation of southwest China from 2000 to 2020

为草地和林地,在耕地转化为草地和林地的区域中,植被NDVI呈上升趋势的区域占93.95%,主要分布在四川盆地、云贵高原和广西丘陵。2000~2020年,由非城镇用地转为城镇用地的区域中,植被NDVI呈现下降趋势的面积占51.83%,远高于非林地转为林地(8.80%)、非耕地转为耕地(8.29%)、非草地

转为草地(11.50%)、非水域转为水域(18.34%)和非未利用地转为未利用地(23.45%)的区域。尤其是四川成都、重庆渝中区、贵州贵阳、云南昆明、大理和广西南宁等建筑用地扩张显著的区域,植被NDVI主要呈显著下降或极显著下降趋势。植被NDVI变化与土地利用类型变化具有较强的相关性,城市发展以及建筑用地扩张是区域植被NDVI降低的一个重要原因。

4 讨论

4.1 植被NDVI时空演变特征

2000~2020年西南地区植被NDVI整体呈上升趋势,上升斜率为 0.0024 a^{-1} ,而植被NDVI在2011年和2014年出现明显下降,这与2009~2010年以及2013年中国西南地区出现的重大旱灾有关^[35~38]。干旱一方面使得土壤水分出现盈亏,导致植被光合作用能力降低,另一方面由于蒸散发速率的加快,致使植被生长面临更加严峻的水分胁迫^[6,32],但植被生长对气候变化的响应存在滞后效应^[35],故2011年和2014年西南地区植被NDVI值较低。

2000~2020年若尔盖高原、横断山地和四川盆地东南部、云贵高原和广西丘陵西北部地区植被改善明显,这与已有的研究结果一致^[23,24,39,40]。自2000年以来,得益于长江中上游防护林工程、天然林保护工程、退耕还林还草工程、岩溶地区石漠化综合治理工程和封山(沙)育林等林业生态工程的相继实施,西南地区林地、灌丛和草地等面积得到大幅度提升,使得西南地区大部分地区植被覆盖呈上升趋势。四川盆地西北部和云贵高原中部部分地区植被退化明显,主要有以下两个方面的原因:一方面,四川盆地中西部地区毗邻横断山脉和若尔盖高原,地势起伏大,气候条件较为恶劣,而云贵高原水土流失严重,土壤肥力低,加之非法砍伐和过度放牧,导致部分地区生态环境恶化;另一方面,四川盆地和云贵高原各大中城市城市化进程加快,使得大量林地和草地转化为建设用地,导致各大中城市及其周边地区植被NDVI呈下降趋势,这与已有的研究结果一致^[21,26,41,42]。

4.2 气候变化和人类活动影响下植被NDVI时空演变特征

在气候变化影响下,2000~2020年西南地区各地貌单元植被NDVI_{Pre}呈上升趋势,但四川盆地植被NDVI_{Pre}上升速率最低,这是由于四川盆地土地利用类型以耕地为主,土地覆被主要以农作物为主,农田水利基础设施的建设、田间灌溉工程和排水工程的

修建以及科学的田间管理技术使得该地区植被覆盖一直处于较好的状态,故上升趋势较其他地貌单元平缓.气候变化和人类活动对各地貌单元植被生长的促进作用均强于抑制作用,尤其是在人类活动强度大的四川盆地、云贵高原和广西丘陵,植被生长主要受人类活动的影响,人类活动对植被生长具有较强的促进作用.而在受人为干扰较小的横断山地和若尔盖高原,气候变化对植被生长的促进作用强于人类活动,这是因为横断山地和若尔盖高原植被覆盖以林地和草地为主,且地势较高、地广人稀,植被生长受人类活动的影响较小.由此可见,气候变化和人类活动对植被生长的影响具有双重性,气候变化和人类活动共同影响着西南地区植被 NDVI 时空演变.

4.3 不同驱动因子对植被 NDVI 时空演变的影响

气候变化对西南地区植被生长具有双重作用,气温和降水对西南地区植被生长以正向促进作用为主,而相对湿度和日照时数对该地区植被生长具有抑制作用.整体上,植被 NDVI 与气温的偏相关系数大于降水、相对湿度和日照时数.以上结论与已有的研究结果一致^[21,26,40].受水热等自然条件的影响,不同气候因子对植被生长的作用机制不同,同一气候因子对植被生长的影响具有地域差异.气候变化的综合作用对四川盆地植被生长的促进作用强于其他地貌单元,这与四川盆地土地利用类型以草地和农用地为主有关,相较于稳定的森林生态系统,农田和草地生态系统受气候变化影响较大,相关性更加明显,这与已有的研究结果一致^[43~45].

21 世纪以来,国家高度重视西南地区的生态环境保护,在四川盆地、云贵高原和广西丘陵等区域积极开展林业生态工程,使得这些区域植被覆盖状况持续改善,生态效益成果明显^[16,17,32,33].2000~2020 年四川成都、重庆渝中区、贵州贵阳、云南昆明、大理和广西南宁等地社会经济发展速度均居所在省市前列.例如,根据四川统计年鉴 2001~2020,成都的国民经济生产总值从 2000 年的 1 312.99 亿元上升到 2019 年的 46 615.82 亿元,增量居四川省第一;根据广西统计年鉴 2020,南宁市的市镇人口从 2005 年的 286.58 万人增加到 2019 年的 467.88 万人,人口增量广西第一.经济快速发展,城市化进程加快,导致人口大量流入,建设用地需求随之增加,林地和农田被侵占,区域植被覆盖减少^[21,26,40,41].综上可知,在林业生态工程实施背景下,四川盆地、云贵高原和广西丘陵植被覆盖明显改善的同时,局部地区的快速城镇化进程会在一定程度上导致区域植被退化,但研究区植被覆盖整体呈

上升趋势.

5 结论

(1)2000~2020 年西南地区及各地貌单元植被 NDVI 均呈上升趋势,其中,广西丘陵和云贵高原植被 NDVI 上升趋势最为明显.西南地区植被 NDVI 呈极显著上升和显著上升区域主要分布在若尔盖高原、横断山地、四川盆地东南部、云贵高原和广西丘陵西北部.

(2)气候变化和人类活动对西南地区植被 NDVI 的影响均具有双重性,且均以正向促进作用为主.气候变化和人类活动影响下,广西丘陵植被 NDVI 上升趋势大于其他地貌单元.

(3)西南地区植被 NDVI 与气温和降水之间存在正相关关系,与相对湿度和日照时数之间存在负相关关系,且气温对植被 NDVI 的作用强于其他气候因子.通过复相关分析可知,气候变化对西南地区植被生长具有促进作用.植被 NDVI 变化与土地利用类型变化具有较强的相关性,城市发展以及建筑用地扩张是区域植被 NDVI 降低的一个重要原因.

参考文献:

- [1] Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, *et al.* Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the three-river source region, China from 1982 to 2012 [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **563-564**: 210-220.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] de Jong R, de Bruin S, de Wit A, *et al.* Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(2): 692-702.
- [5] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, *et al.* Global land change from 1982 to 2016 [J]. *Nature*, 2018, **560**(7720): 639-643.
- [6] 徐兴奎,陈红,张凤. 中国西北地区地表植被覆盖特征的时空变化及影响因子分析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 41-47.
Xu X K, Chen H, Zhang F. Temporal and spatial change of vegetation cover in the northwest of China and factors analysis influencing on vegetations variation [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(1): 41-47.
- [7] 王莉雯,卫亚星,牛铮. 基于遥感的青海省植被覆盖时空变化定量分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1754-1760.
Wang L W, Wei Y X, Niu Z. Analysis of vegetation spatial and temporal variations in Qinghai province based on remote sensing [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(6): 1754-1760.
- [8] Emamian A, Rashki A, Kaskaoutis D G, *et al.* Assessing

- vegetation restoration potential under different land uses and climatic classes in northeast Iran [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **122**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107325.
- [9] 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.
- [10] Guo B, Han B M, Yang F, *et al.* Determining the contributions of climate change and human activities to the vegetation NPP dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau, China, from 2000 to 2015[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(10), doi: 10.1007/s10661-020-08606-6.
- [11] Liu Q H, Liu L S, Zhang Y L, *et al.* Identification of impact factors for differentiated patterns of NDVI change in the headwater source region of Brahmaputra and Indus, Southwestern Tibetan Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107604.
- [12] Hu Y G, Li H, Wu D, *et al.* LAI-indicated vegetation dynamic in ecologically fragile region: a case study in the Three-North Shelter Forest program region of China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **120**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106932.
- [13] Zeng Y, Yang X K, Fang N F, *et al.* Large-scale afforestation significantly increases permanent surface water in China's vegetation restoration regions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, **290**, doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108001.
- [14] Wang J J, Liu Z P, Gao J L, *et al.* The Grain for Green project eliminated the effect of soil erosion on organic carbon on China's Loess Plateau between 1980 and 2008 [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **322**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107636.
- [15] 郭永强, 王乃江, 褚晓升, 等. 基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(11): 4804-4811.
- Guo Y Q, Wang N J, Chu X S, *et al.* Analyzing vegetation coverage changes and its reasons on the Loess Plateau based on Google Earth Engine[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(11): 4804-4811.
- [16] 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.
- [17] Tian F, Liu L Z, Yang J H, *et al.* Vegetation greening in more than 94% of the Yellow River Basin (YRB) region in China during the 21st century caused jointly by warming and anthropogenic activities[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107479.
- [18] Yang H F, Zhong X N, Deng S Q, *et al.* Assessment of the impact of LUCC on NPP and its influencing factors in the Yangtze River basin, China[J]. *CATENA*, 2021, **206**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105542.
- [19] 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.
- [20] Chen S S, Wen Z F, Zhang S L, *et al.* Effects of long-term and large-scale ecology projects on forest dynamics in Yangtze River Basin, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **496**, doi: 10.1016/j.foreco.2021.119463.
- [21] 肖建勇, 王世杰, 白晓永, 等. 喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2018, **38**(24): 8799-8812.
- Xiao J Y, Wang S J, Bai X Y, *et al.* Determinants and spatial-temporal evolution of vegetation coverage in the karst critical zone of South China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(24): 8799-8812.
- [22] 丁文荣. 滇东南喀斯特地区植被覆盖变化及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2016, **23**(6): 227-231, 237.
- Ding W R. Temporal and spatial evolution characteristics of vegetation NDVI and its driving factors in Karst area of southeast Yunnan, China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(6): 227-231, 237.
- [23] 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.
- [24] Qiao Y N, Jiang Y J, Zhang C Y. Contribution of karst ecological restoration engineering to vegetation greening in southwest China during recent decade[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **121**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107081.
- [25] Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, *et al.* Relationship among land surface temperature and LUCC, NDVI in typical karst area[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-017-19088-x.
- [26] 马海云, 张林林, 魏学琼, 等. 2000-2015 年西南地区土地利用与植被覆盖的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(2): 618-628.
- Ma H Y, Zhang L L, Wei X Q, *et al.* Spatial and temporal variations of land use and vegetation cover in Southwest China from 2000 to 2015 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(2): 618-628.
- [27] 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.
- [28] Gao X, Huang X X, Lo K, *et al.* Vegetation responses to climate change in the Qilian Mountain Nature Reserve, Northwest China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, **28**, doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01698.
- [29] Mechiche-Alami A, Abdi A M. Agricultural productivity in relation to climate and cropland management in West Africa[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-59943-y.
- [30] Berdimetov T, Ilyas S, Ma Z G, *et al.* Climatic change and human activities link to vegetation dynamics in the Aral Sea basin using NDVI[J]. *Earth Systems and Environment*, 2021, **5**(2): 303-318.
- [31] 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.

- [32] Wu D H, Zhao X, Liang S L, *et al.* Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. *Global Change Biology*, 2015, **21**(9): 3520-3531.
- [33] 孙爽, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1585-1593.
- Sun S, Li L J, Zhao W J, *et al.* Variation in pollutant concentrations and correlation analysis with the vegetation index in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1585-1593.
- [34] 覃巧婷, 陈建军, 杨艳萍, 等. 黄河源植被时空变化及其对地形和气候的响应[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(8): 3832-3841.
- Qin Q T, Chen J J, Yang Y P, *et al.* Spatiotemporal variations of vegetation and its response to topography and climate in the source region of the Yellow River [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(8): 3832-3841.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 王先伟, 刘梅, 柳林. MODIS 光谱指数在中国西南干旱监测中的应用[J]. *遥感学报*, 2014, **18**(2): 432-452.
- Wang X W, Liu M, Liu L. Responses of MODIS spectral indices to typical drought events from 2000 to 2012 in southwest China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, **18**(2): 432-452.
- [38] 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.
- [39] 张扬, 周忠发, 黄登红, 等. 喀斯特山区耕地时空演变与影响因子分析[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(22): 266-275.
- Zhang Y, Zhou Z F, Huang D H, *et al.* Spatio-temporal evolution of cultivated land and analysis of influence factors in karst mountainous areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(22): 266-275.
- [40] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 等. 20 世纪 90 年代以来中国西南地区土地覆被变化 [J]. *生态学报*, 2016, **36**(23): 7858-7869.
- Zheng Z J, Zeng Y, Zhao Y J, *et al.* Analysis of land cover changes in southwestern China since the 1990s [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(23): 7858-7869.
- [41] 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.
- [42] Wan L, Tong J, Zhou J X, *et al.* Variation of vegetation ecological water consumption and its response to vegetation coverage changes in the rocky desertification areas in South China [J]. *PLoS One*, 2016, **11**(10), doi: 10.1371/journal.pone.0163566.
- [43] 田义超, 梁铭忠. 北部湾沿海地区植被覆盖对气温和降水的旬响应特征[J]. *自然资源学报*, 2016, **31**(3): 488-502.
- Tian Y C, Liang M Z. The NDVI characteristics of vegetation and its ten-day response to temperature and precipitation in Beibu Gulf Coastal Region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(3): 488-502.
- [44] 曹云, 钱永兰, 孙应龙, 等. 基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(5): 857-865.
- Cao Y, Qian Y L, Sun Y L, *et al.* Spatial-temporal variations of forest vegetation and climatic driving force analysis in southwest China based on MODIS NDVI and climate data [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(5): 857-865.
- [45] 崔林丽, 史军, 肖风劲, 等. 中国东部 NDVI 的变化趋势及其与气候因子的相关分析[J]. *资源科学*, 2010, **32**(1): 124-131.
- Cui L L, Shi J, Xiao F J, *et al.* Variation trends in vegetation NDVI and its correlation with climatic factors in Eastern China [J]. *Resources Science*, 2010, **32**(1): 124-131.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)