

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 ..... 陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 ( 1 )

粤港澳大湾区大气PM<sub>2.5</sub>浓度的遥感估算模型 ..... 代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 ( 8 )

典型输送通道城市冬季PM<sub>2.5</sub>污染与传输变化特征 ..... 代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 ( 23 )

郑州市夏季PM<sub>2.5</sub>中二次无机组分污染特征及其影响因素 ..... 和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 ( 36 )

重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析 ..... 彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沫, 翟天宇 ( 48 )

2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 ..... 陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 ( 61 )

2020年“三连击”台风对我国东部地区O<sub>3</sub>污染的影响分析 ..... 花丛, 尤媛, 王晴, 张碧辉 ( 71 )

北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 ..... 张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 ( 81 )

机动车减排降碳综合评价体系综述 ..... 范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 ( 93 )

基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 ..... 杨峰, 张贵驰, 孙伟, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 ( 104 )

广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力 ..... 翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王焯嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 ( 115 )

给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 ..... 张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 ( 123 )

中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评估 ..... 襄殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 ( 131 )

太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估 ..... 张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 ( 140 )

水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价 ..... 张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈冈, 沈晓盛 ( 151 )

长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 ..... 姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 ( 159 )

珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用 ..... 李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 ( 173 )

富春江水库浮游植物功能群变化的成因 ..... 张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 ( 181 )

合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 ..... 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 ( 194 )

新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 ..... 李军, 欧阳宏涛, 周金龙 ( 207 )

京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 ..... 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰 ( 218 )

近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 ..... 王耕, 张芙蓉 ( 228 )

光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望 ..... 田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 ( 239 )

大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 ..... 石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 ( 248 )

西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 ..... 徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 ( 262 )

不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 ..... 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 ( 275 )

基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 ..... 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋珉 ( 287 )

基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 ..... 石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 ( 300 )

长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 ..... 胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨浩, 高超 ( 314 )

漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 ..... 申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 ( 323 )

不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 ..... 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 ( 335 )

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 ..... 李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 ( 343 )

氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 ..... 薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 ( 354 )

重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析 ..... 梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 ( 364 )

中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 ..... 刘浩然, 邢静怡, 任文杰 ( 376 )

基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测 ..... 解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 ( 386 )

基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 ..... 马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 ( 396 )

铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析 ..... 李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 ( 407 )

天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 ..... 李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 ( 417 )

基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 ..... 唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 ( 429 )

腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 ..... 胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍茂, 魏世强 ( 439 )

生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 ..... 吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 ( 450 )

人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 ..... 马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 ( 459 )

聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响 ..... 牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霆, 刘淑丽 ( 470 )

转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制 ..... 刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 ( 480 )

微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 ..... 赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 ( 489 )

微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 ..... 刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 ( 496 )

民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 ..... 王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 ( 508 )

不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 ..... 郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 ( 520 )

厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 ..... 刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 ( 530 )

土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 ..... 陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 ( 543 )

叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 ..... 梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二革, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 ( 555 )

昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 ..... 王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 ( 567 )

基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征 ..... 黄福义, 周曙仟, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张娴 ( 576 )

城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 ..... 刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 ( 584 )

氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 ..... 刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 ( 594 )

CO<sub>2</sub>气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb<sup>2+</sup>吸附性能对比 ..... 江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 ( 606 )

《环境科学》征订启事(70) 《环境科学》征稿简则(193) 信息(334,554,605)

# 西南地区不同类型植被 NPP 时空演变及影响因素探究

徐勇<sup>1</sup>, 郑志威<sup>1</sup>, 孟禹弛<sup>2\*</sup>, 盘钰春<sup>1</sup>, 郭振东<sup>1</sup>, 张炎<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学测绘地理信息学院, 桂林 541006; 2. 多特蒙德工业大学空间规划学院, 多特蒙德 44135)

**摘要:** 研究植被净初级生产力(NPP)时空变化规律并探明其驱动影响因素,对于深入了解植被时空变化,指导因地制宜的生态恢复与管理工程具有重要的现实意义. 以 MODIS NPP 数据为基础,结合基于站点的气象数据、土地利用数据和植被类型数据,通过 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 显著性检验探究西南地区不同类型植被 NPP 时空演变特征,并结合稳定性分析和地理探测器揭示不同类型植被 NPP 空间分异的影响因素及影响因素间的交互作用. 结果表明:①时间上,2000~2021 年西南地区植被 NPP、 $NPP_{P_{cl}}$  (仅气候变化影响下植被 NPP)和  $NPP_{Res}$  (仅人类活动影响下植被 NPP)均呈波动上升趋势. 在不同类型植被中,除乔木类植被  $NPP_{Res}$  以  $-0.183 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  的速率呈微弱下降趋势外,其余类型植被 NPP、 $NPP_{P_{cl}}$  和  $NPP_{Res}$  均呈上升趋势,其中,经济类植被 NPP、 $NPP_{P_{cl}}$  和  $NPP_{Res}$  上升速率均最显著,分别为  $5.96$ 、 $3.09$  和  $2.94 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ;空间上,下降趋势最大的乔木类植被 NPP 主要分布在西藏和云南南部,上升趋势最高的经济类植被 NPP 主要分布在四川省东部. 西南地区植被 NPP 稳定性呈“南低北高”的空间分布格局,波动系数平均值以乔木类(0.101)、灌木类(0.105)、草本类(0.110)和经济类(0.114)的顺序依次升高. 地表温度和相对湿度的交互作用是西南地区植被 NPP 空间分异的主要影响因素,而日照时数与温暖指数对西南地区植被影响提升最大,提升百分比为 30.91%;不同类型植被对不同气候因子需求存在差异,但对地表温度和温暖指数的需求存在高度一致性,当地表温度为  $21.03 \sim 28.49^\circ\text{C}$ ,温暖指数为  $106.46 \sim 167.2$  时,不同类型植被 NPP 均会达到峰值. 自然演替下,气候对植被的影响程度与植被群落稳定性成反比,稳定性高的乔木类植被群落受气候影响小,稳定性低的草本类植被群落受气候影响大,而经济类植被由于受人类活动的影响,导致气候对其影响程度与稳定性成正比. 研究结果可为调查区域气候变化对不同类型植被生长影响,制定因地制宜的西南地区生态恢复治理方案提供理论依据.

**关键词:** 中国西南地区; 不同植被类型; 植被净初级生产力; 时空演变; 地理探测器

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0262-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202302121

## Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China

XU Yong<sup>1</sup>, ZHENG Zhi-wei<sup>1</sup>, MENG Yu-chi<sup>2\*</sup>, PAN Yu-chun<sup>1</sup>, GUO Zhen-dong<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>

(1. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Department of Spatial Planning, Technical University of Dortmund, Dortmund 44135, Germany)

**Abstract:** Studying the spatiotemporal variation in vegetation net primary productivity (NPP) and exploring its influencing factors are of considerable practical significance for understanding the spatiotemporal variation in vegetation and for guiding ecological restoration and management projects based on local conditions. Based on MODIS NPP data, combined with in situ meteorological data, land use data, and vegetation type data, this study explores the spatiotemporal variation in different types of vegetation NPP in southwest China via the Mann-Kendall significance test and Theil-Sen Median slope estimator. It reveals the influencing factors of spatial differentiation of different types of vegetation NPP and the interaction between influencing factors in combination with stability analysis and Geo Detectors. The results revealed that on the temporal scale, from 2000 to 2021, vegetation NPP,  $NPP_{P_{cl}}$  (vegetation NPP exclusively under the influence of climate change), and  $NPP_{Res}$  (vegetation NPP exclusively under the influence of human activities) in southwest China showed a fluctuating upward trend. Among different vegetation types, NPP,  $NPP_{P_{cl}}$ , and  $NPP_{Res}$  exhibited an upward trend, except for a minor decline in  $NPP_{Res}$  of tree vegetation at a rate of  $-0.183 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ . Among them, NPP,  $NPP_{P_{cl}}$ , and  $NPP_{Res}$  of economic vegetation showed the most significant upward rates,  $5.96$ ,  $3.09$ , and  $2.94 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , respectively. On the spatial scale, the tree vegetation NPP with the most significant downward trend was mainly distributed in Tibet and southern Yunnan, while the economic vegetation NPP with the highest upward trend was primarily distributed in eastern Sichuan Province. The stability of vegetation NPP in southwest China presented a spatial distribution pattern of "low in the south and high in the north," and the average value of the correlation coefficient increased in the ascending order of arbor vegetation (0.101), shrub vegetation (0.105), herb vegetation (0.110), and economic vegetation (0.114). The interaction between surface temperature and relative humidity was the main influencing factor for spatial differentiation of vegetation NPP, while the interaction between sunshine duration and warmth index had the most significant impact on vegetation in southwest China, with an increasing percentage of 30.91%. Different types of vegetation had different requirements for different climatic factors, but their requirements for surface temperature and warmth index were significantly consistent. When the surface temperature was  $21.03\text{-}28.49^\circ\text{C}$ , and the warmth index was  $106.46\text{-}167.2$ , the NPP of different vegetation types peaked. Under natural succession, the impact of climate change on vegetation was inversely proportional to the stability of the vegetation community. The arbor vegetation community with high

收稿日期: 2023-02-15; 修订日期: 2023-03-27

基金项目: 广西科技基地和人才专项(桂科 AD21220133); 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297160); 桂林理工大学大学生创新创业训练计划项目(202210596381)

作者简介: 徐勇(1988~),男,博士,副教授,主要研究方向为环境遥感和植被生态遥感, E-mail: yongxu@glut.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: mengyuchile@163.com

stability was less affected, while the herb vegetation community with low stability was highly affected by climate. In contrast, the stability of economic vegetation was directly proportional to the impact of climate due to the influence of human activities. This study establishes a theoretical foundation for evaluating the impact of regional climate on the growth of different vegetation types and can be crucial for formulating ecological restoration and management strategies in southwest China that are adapted to the local conditions.

**Key words:** southwest China; different vegetation types; vegetation net primary productivity; spatio-temporal variation; Geo Detector

恢复与提升植被生态系统的质量和稳定性是现如今各大生态问题的最优解<sup>[1-3]</sup>,基于此,许多国内外学者通过研究植被生理指数以达到研究植被生态系统变化的目的,其中,植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)便是其一. 植被 NPP 作为植被光合作用效率和评估植被生长状况的一项重要指标,可用于监测植被生长状况<sup>[4,5]</sup>、评估生态环境质量<sup>[6]</sup>和探究碳循环现状<sup>[7]</sup>等.

全球范围内, Li 等<sup>[8]</sup>通过研究全球植被 NPP 变化规律,发现在全球变暖背景下,全球热液平衡对植被 NPP 变化起到正向作用. Bejagam 等<sup>[9]</sup>基于印度植被生态系统 NPP,发现降水是印度植被生态系统 NPP 的主导控制因素,气候因素促进了印度生态系统植被 NPP 的上升,而人类活动则存在抑制作用. 在中国,石智宇等<sup>[10]</sup>和 Yu 等<sup>[11]</sup>研究发现,近 20 年来,中国植被 NPP 在空间上呈现“东南高西北低”的分布格局,时间上呈波动增加趋势,气候变化主导的植被 NPP 上升区主要集中在东北和华北等地,人类活动主导植被 NPP 上升区主要集中在华中和西北等地区,而在华北的内蒙地区,植被 NPP 的变化在不同季节略有不同,在生长季和夏秋季植被 NPP 总体呈下降趋势,而春季略有上升趋势. 现如今,针对西南地区植被 NPP 变化及驱动因素的研究也逐渐深入,外部驱动因素对西南地区植被 NPP 的影响也逐渐明朗,徐勇等<sup>[12,13]</sup>、Linger 等<sup>[14]</sup>和茆杨等<sup>[15]</sup>将地形地貌、不同气候因子、气候变化的滞后效应和气候的季节变化等多因素考虑在内,对西南地区植被 NPP 的时空变化规律及驱动因素进行了细致的研究. 以上研究均致力于外部影响因素对植被生长的影响,忽略了不同植被类型生长本身存在的客观差异,且已有研究表明,不同类型的植被对碳循环的影响存在差异,不同植被类型对土壤生物群落和碳循环基因丰度等均有显著影响<sup>[16,17]</sup>. 现如今针对植被自身客观差异的影响研究,均以研究不同类型植被 NDVI 为主<sup>[18-21]</sup>,以不同类型植被 NPP 为主体的研究较少. 鉴于此,本文依据植被结构的不同,同时考虑到人文因素对某些植被存在较大干预,将植被分为乔木、灌木、草本、经济类和其他. 本文假定在研究时段内土地利用类型发生改变,但土地利用未发生变化的部分植被类型不随时间的迁移发生改变,将存在植被衍生和消亡的区域(即土地利用类型发生改变的区域)进

行删除,增加实验的可靠性,以研究 2000~2021 年西南地区不同类型植被 NPP 时空变化规律,并利用稳定性分析与地理探测器,揭示不同类型植被自身和气候影响因素对植被生长影响间的关系,以期为更好厘定植被生长差异与气候影响因素的驱动机制提供新思路.

## 1 研究区概况

研究区地处中国的西南部,位于 78°25'~110°11'E, 21°08'~36°53'N 间,含西藏、四川、重庆、贵州和云南这 5 个省级行政单元,面积达 234 万 km<sup>2</sup>. 研究区是我国重要生态经济发展区,植被类型丰富,含乔木、灌木、草本和经济类等多种类型植被(如图 1),受热带、亚热带季风气候和高山高原气候影响,研究区平均气温维持在-2.78~23.93°C 间,年累计降雨量为 24~2 638 mm,平均相对湿度约 58%,水热条件适宜的同时,每年 2 200 h 左右的日照时数为研究区植被的生长提供了充足的能量来源. 然而,研究区地势起伏较大,海拔在 62~8 405 m 之间,加上研究区为典型的喀斯特地貌区,使得生态环境脆弱敏感的同时,经济发展较为缓慢.

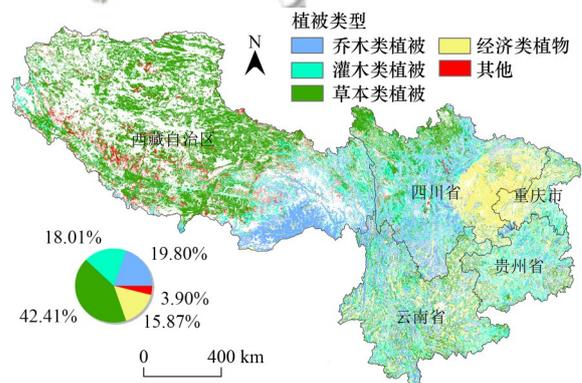


图 1 研究区植被类型空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of vegetation types in the study area

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

空间分辨率为 500 m 的 MODIS NPP 数据来源于 National Aeronautics and Space Administration (NASA) 发布的 MOD17A3 C6 产品 (<https://earthdata.nasa.gov/>),原始数据格式为 HDF,每年一期. 原始数据需进行滤波、镶嵌、重采样和重投影等预处理,从而获取 1 km × 1 km 覆盖西南地区的 2000~2021 年植被

NPP 时间序列. DEM 数据、2000 年和 2020 年土地利用数据和 1990 年代中国 1:100 万植被类型空间分布数据均来源于中国科学院资源环境数据云平台 (<https://www.resdc.cn/>), 以上数据空间分辨率均为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ .

1999 ~ 2021 年气候因子(最低气温、最高气温、平均气温、降水、相对湿度、日照时数、气压和地表温度)来源于国家气象科学数据中心提供的逐日数据 (<https://data.cma.cn/>), 共 2 416 个气象站点. 首先, 需要剔除原始数据缺失造成的影响; 然后, 使用 ANUSPLIN 进行空间插值以获取覆盖研究区、空间分辨率为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  的气象数据时间序列. 通过平均气温和降水时间序列, 计算获取可能蒸散率、生物干燥指数、湿润指数、温暖指数和寒冷指数时间序列, 因此, 本文选取以上 13 个因子作为影响植被 NPP 变化的气候因子. 本实验以全国 2 416 个气象站点经插值处理后取得全国气象栅格数据, 经裁剪后取得研究区数据.

本文假设 2000 ~ 2020 年土地利用类型不发生变化的部分植被类型不随时间发生改变. 为降低植被类型因时间迁移发生改变的客观影响, 首先, 通过对 2000 年和 2020 年土地利用类型做叠置分析, 提取研究时段内土地利用类型不发生变化的部分; 然后, 将其与植被类型进行叠加, 从而获取研究时段内西南地区不同类型植被分布区域.

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 气候变化和人类活动对植被 NPP 影响的定量剥离

植被 NPP 变化受多种气候因子的调控影响, 且不同类型植被生长所需自然环境存在一定差异, 在考虑到植被生长对气候变化存在滞后效应的情况下, 本文通过联合相关分析、显著性检验和一阶偏导法<sup>[13]</sup>, 为多元回归分析模型进行主导气候因子的选取. 考虑到主要影响因素间可能会存在严重的多重共线性问题, 这会导致数据冗余的同时造成残差模型失真和预测结果的不稳定, 对此, 本文通过使用方差膨胀系数 (variance inflation factor, VIF) 检验并消除主要影响因子间的多重共线性影响. 多元回归分析模型因子筛选结果如表 1 所示.

基于上述因子选取结果, 同时结合不同类型植被 NPP 观测值(即植被 NPP), 建立基于不同植被类型的多元回归分析模型, 生成不同气候条件影响下的不同类型植被 NPP 值( $NPP_{pre}$ , 下同), 以此探究不同类型植被 NPP 在气候变化下的时空变化; 同时, 建立基于不同植被类型的残差分析模型, 在剥离气候因素影响的条件下, 计算出反映人类活动影响下的不同

表 1 不同植被类型主导气候因子筛选结果

Table 1 Result of the selection of dominant climate factors of different vegetation types

植被类型	气候因子 <sup>1)</sup>	滞后期/月	最大相关系数	VIF 值
乔木类植被	地表温度	0	0.643	— <sup>2)</sup>
	最高气温	1	0.514	1.433
	湿润指数	0	0.42	5.152
	可能蒸散率	1	-0.499	6.105
	日照时数	1	0.431	1.786
灌木类植被	地表温度	0	0.840	—
	最高气温	1	0.769	7.499
	湿润指数	2	-0.477	9.048
	可能蒸散率	0	0.428	6.195
	相对湿度	1	-0.539	4.917
草本类植被	地表温度	0	-0.765	—
	最高气温	1	-0.569	6.614
	生物干燥度	3	0.404	5.486
	气压	7	-0.525	2.392
	相对湿度	2	0.579	3.712
经济类植被	温暖指数	1	-0.655	3.683
	气压	6	-0.724	—
	最高气温	3	0.413	8.67
	地表温度	2	0.523	8.628
	最低温度	0	0.565	3.827
其他	最低温度	0	0.747	—
	最高气温	1	0.591	6.815
	气压	7	0.620	3.817
	相对湿度	3	-0.535	8.281

1) 黑体字为 VIF 检验时的工具变量; 2) “—”表示在 VIF 检验时作为工具变量, 无值

类型植被 NPP 值( $NPP_{res}$ , 下同), 以探究不同类型植被 NPP 在人类活动影响下的时空变化. 植被  $NPP_{pre}$  和植被  $NPP_{res}$  计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$NPP_{pre} = \left( \sum b_i C_i \right) + \varepsilon \quad (1)$$

$$NPP_{res} = NPP - NPP_{pre} \quad (2)$$

式中,  $b_i$  为系数;  $C_i$  为不同类型植被 NPP 变化对应的主导因子;  $\varepsilon$  为常量.

最后, 基于上述计算得到的气候变化影响下植被  $NPP_{pre}$ 、人类活动影响下植被  $NPP_{res}$  和不同类型植被 NPP 观测值, 利用 Theil-Sen Median 趋势分析法对上述不同影响条件情景下植被 NPP 时间序列数据的趋势进行估计<sup>[22-24]</sup>, 其计算公式为:

$$\beta = \text{median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad \forall j > i \quad (3)$$

式中,  $x_i$  和  $x_j$  分别为第  $i$  年和第  $j$  年的植被 NPP 值; median 为取中值函数.  $\beta$  为变化斜率, 将  $\beta > 0$ 、 $\beta < 0$  和  $\beta = 0$  作为植被 NPP 上升、下降和不变的判定条件. 同时, 结合 Mann-Kendall 显著性检验法对西南地区植被 NPP 变化趋势进行显著性检验<sup>[25, 26]</sup>, 当  $|MK| >$

2.58 时,在  $P = 0.01$  水平上显著,记为极显著变化;当  $1.96 < |MK| \leq 2.58$  时,在  $P = 0.05$  水平上显著,记为显著变化;其余记为不显著变化。

### 2.2.2 不同类型植被 NPP 变化探测

首先,本文在像元尺度上计算了 2000 ~ 2021 年西南地区不同类型植被 NPP 的变异系数,用于评估植被 NPP 在时间序列上的稳定性<sup>[27]</sup>。计算公式如下:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (4)$$

式中, CV 为植被 NPP 变异系数;  $\sigma$  为植被 NPP 标准差;  $\bar{x}$  为植被 NPP 平均值。 CV 值越大,表示数据分布越离散,植被 NPP 年际变化越大;反之,则表示数据分布紧凑,植被 NPP 年际变化较为稳定。根据自然间断点法将植被 NPP 的稳定性分成 5 类:低波动变化(0.006 ~ 0.049)、较低波动变化(0.049 ~ 0.100)、中度波动变化(0.100 ~ 0.185)、较高波动变化(0.185 ~ 0.392)和高波动变化(0.392 ~ 1.000)。

其次,通过地理探测器<sup>[28,29]</sup>探究气候要素对不同类型植被 NPP 空间分异的影响机制。地理探测器是探测空间分异性并揭示其背后驱动力的一组统计学方法,若某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性是其核心思想。地理探测器包含因子探测、交互探测、生态探测和风险区探测 4 个模块,本研究通过因子探测探究西南地区不同类型植被 NPP 空间分异与影响因子的定量关系;通过交互作用探测探究气候因子间的相互作用对不同类型植被 NPP 的内在联系;通过生态探测研究气候因子交互作用对不同类型植被 NPP 变化的显著性;最后通过风险区探测研究不同类型植被对生长气候条件需求的差异性。

因子探测是研究属性  $Y$  的空间分异性及影响因素  $X$  对属性  $Y$  的空间分异性的解释力度,以  $q$  值度量,计算公式如下。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

式中,  $h$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层,  $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数,  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为层  $h$  和全区的  $Y$  值的方差,  $SSW$  和  $SST$  分别为层内方差之和和全区总方差。  $q$  的值域为  $[0, 1]$ ,  $q$  值越大,表示  $X$  对  $Y$  的解释力越大。

为更好地研究真实情景下不同类型植被 NPP 与气候因子的关系,本文在探测气候影响因素对不同类型植被 NPP 的驱动关系时,将所有气候影响因素均假定为影响植被 NPP 的主要影响因素,但考虑到数据冗余的问题,对此,基于已有的 13 种气象因子数

据,使用 VIF 检验法,剔除因子间多重共线性问题,避免数据的冗余。最后选取寒冷指数( $X_1$ )、地表温度( $X_2$ )、气压( $X_3$ )、相对湿度( $X_4$ )、日照时数( $X_5$ )和温暖指数( $X_6$ ),共计 6 个气候因子作为影响植被 NPP 空间分异的气候因子。本文使用 2000 ~ 2021 年植被 NPP 和 6 个气候因子的多年平均值作为地理探测器的输入数据。

## 3 结果与分析

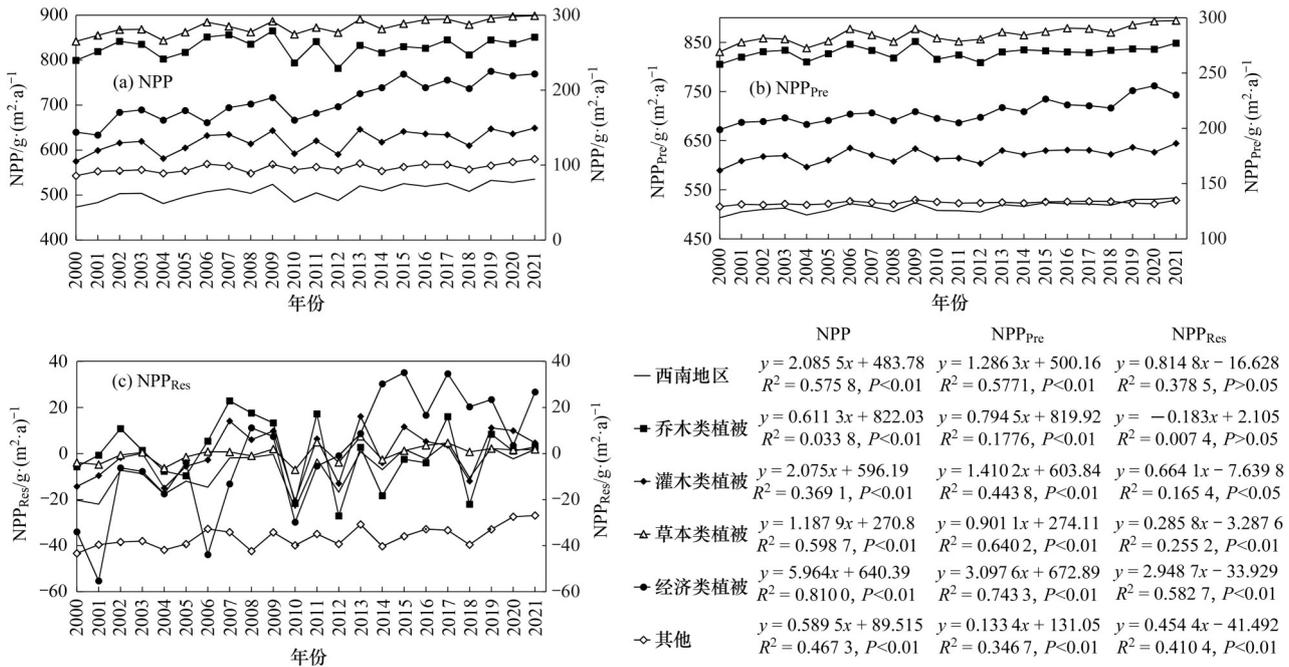
### 3.1 西南地区不同植被 NPP、 $NPP_{Pre}$ 、 $NPP_{Res}$ 时空变化特征

#### 3.1.1 不同植被 NPP、 $NPP_{Pre}$ 、 $NPP_{Res}$ 时间变化特征

如图 2 所示,2000 ~ 2021 年,西南地区整体植被 NPP、 $NPP_{Pre}$  和  $NPP_{Res}$  多年平均值分别为 507.77、514.96 和  $-7.26 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。不同影响条件下,其时间变化均呈上升趋势,上升速率分别为 2.09、1.29 和  $0.81 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。在西南地区不同类型植被中,实际情景下和仅气候变化影响下,乔木类植被 NPP 和  $NPP_{Pre}$  多年平均值均最高,均为  $829.06 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,其次为经济类植被 NPP 和  $NPP_{Pre}$ ,分别为  $708.97 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  和  $708.6 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,最低的为草本类植被,均不足  $300 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。仅人类活动影响下,不同类型植被  $NPP_{Res}$  多年平均值均低于  $-0.02 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。从变化趋势看,除乔木类植被  $NPP_{Res}$  呈微弱下降趋势外,其余类型植被 NPP、 $NPP_{Pre}$  和  $NPP_{Res}$  均呈波动上升趋势,其中,经济类植被 NPP、 $NPP_{Pre}$  和  $NPP_{Res}$  上升趋势最为显著,上升速率分别为 5.96、3.09 和  $2.94 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,其次为灌木类植被;乔木类和草本类植被 NPP、 $NPP_{Pre}$  和  $NPP_{Res}$  上升速率较不显著,上升速率均不足  $1 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。综上可知,2000 ~ 2021 年西南地区整体植被 NPP 呈上升趋势,植被 NPP 和  $NPP_{Pre}$  平均值最高均为乔木类植被。从上升趋势看,除乔木类植被  $NPP_{Res}$  出现微弱下降外,其余类型植被 NPP、 $NPP_{Pre}$  和  $NPP_{Res}$  均为波动上升趋势,其中经济类植被上升趋势最为显著。

#### 3.1.2 西南地区植被 NPP 空间变化

如图 3 所示,2000 ~ 2021 年西南地区植被 NPP 多年平均值在空间上主要呈“南高北低”的分布特征,变化趋势在  $-65.27 \sim 79 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  之间,变化趋势在空间上主要呈“东高西低”的分布特征。由表 2 可知,在变化趋势面积占比上,79.13% 西南地区植被 NPP 呈上升趋势,其中,呈显著和极显著上升趋势面积占比为 37.42%,集中分布在西南地区中部、东北部和西北小部分地区。此外,研究区东北地区是经济类植被生长的主要分布区,西北地区则主要是以草



“草本类植被”和“其他”使用右侧纵坐标轴  
图2 2000~2021年西南地区各类型植被NPP时间变化趋势

Fig. 2 Temporal variation in NPP of different vegetation types in southwest China from 2000 to 2021

本类植被为主. 2000~2021年,西南地区经济类植被NPP呈上升趋势面积占比为85.64%,其中,呈极显著上升趋势面积占比为63.04%,集中在西南地区东北部;草本类植被中,85.59%地区呈上升趋势,其中,呈极显著上升趋势面积占比为20.30%,主要分布在西南地区西北部;乔木和灌木类植被NPP呈上升趋势面积占比均低于西南地区平均值,其中,乔木类植被NPP呈上升趋势面积占比最低,仅58.42%.在植被NPP呈下降趋势地区中,主要以乔木类植被为

主,乔木类植被NPP呈显著和极显著下降面积占比为10.38%,集中分布在西藏和云南南部,西南地区其余类型植被NPP呈显著和极显著下降面积占比均低于5%. 综上可知,空间上,2000~2021年西南地区植被NPP变化趋势呈“东高西低”的空间分布,草本类和经济类植被NPP上升趋势面积占比最大,其中,经济类植被NPP呈极显著上升趋势的面积占比最大.相较于其他类型植被,乔木类植被NPP呈显著和极显著下降趋势面积占比最大.

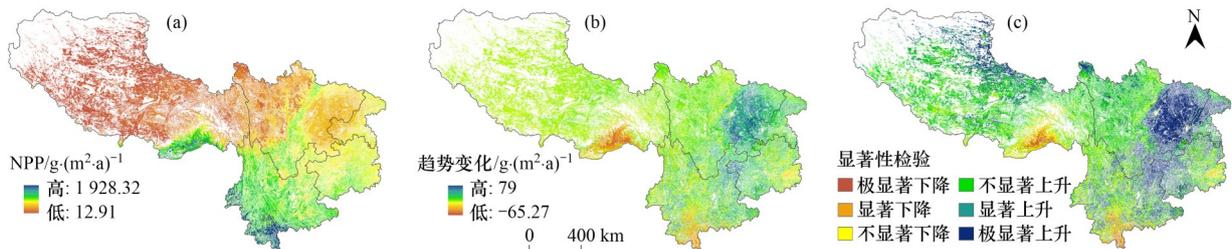


图3 2000~2021年西南地区植被NPP空间变化

Fig. 3 Spatial variation in vegetation NPP in southwest China from 2000 to 2021

表2 西南地区不同类型植被NPP变化统计/%

Table 2 Statistical results of NPP variation of different vegetation types in southwest China/%

项目	极显著下降	显著下降	不显著下降	不显著上升	显著上升	极显著上升
西南地区	1.79	2.28	16.80	41.71	11.67	25.75
乔木类植被	4.51	5.87	31.21	35.57	7.38	15.46
灌木类植被	1.53	2.08	19.12	46.75	11.66	18.86
草本类植被	0.59	0.95	12.87	48.84	16.45	20.30
经济类植被	2.20	2.29	9.87	14.94	7.66	63.04
其他	0.11	0.19	10.94	62.46	15.22	11.08

3.1.3 西南地区植被 NPP<sub>pre</sub> 空间变化

由图 4 和表 3 可知,气候变化影响下,西南地区植被 NPP<sub>pre</sub> 多年平均值在空间上呈“南高北低”的分布格局,变化趋势在  $-54.36 \sim 26.18 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,其中,西南地区 76.13% 植被 NPP<sub>pre</sub> 呈上升趋势,显著和极显著上升趋势面积占 39.76%,植被显著上升区主要集中在西南地区中部的东北和西南部. 气候变化影响下,西南地区植被 NPP<sub>pre</sub> 同样存在显著下降现象,超 20% 西南地区植被 NPP<sub>pre</sub> 呈下降趋势,其中,显著下降区主要分布在西藏和云南南部. 气候变化影响下,西南地区经济类植被 NPP<sub>pre</sub> 上升趋势面积占比最大,2000 ~ 2021 年,西南地区经济类植被 NPP<sub>pre</sub> 呈上升趋势面积占比为 85.04%,其中,呈显著和极显著上升趋势面积占比为 58.49%,主要分布在西南地区东北部;草本类植被 NPP<sub>pre</sub> 是气候变化影响下上升

趋势面积占比排第二的植被类型,超 80% 的草本类植被 NPP<sub>pre</sub> 呈上升趋势,呈显著和极显著上升趋势面积占比为 43.74%,集中分布在西藏和四川北部;乔木和灌木类植被 NPP<sub>pre</sub> 在气候变化影响下,其上升趋势面积同样大于下降趋势面积,但乔木类植被 NPP<sub>pre</sub> 呈上升趋势面积占比相对较低,呈显著和极显著上升趋势面积占比仅为 23.40%. 气候变化影响下,乔木类植被 NPP<sub>pre</sub> 呈显著和极显著下降趋势面积占比为 10.10%,主要分布在西藏和云南南部;其余类型植被 NPP<sub>pre</sub> 呈显著和极显著下降面积占比均低于 6.00%. 综上可知,气候变化影响下,西南地区不同类型植被 NPP<sub>pre</sub> 呈上升趋势的面积均大于呈下降趋势的面积,经济类植被 NPP 呈上升趋势面积占比最大,主要分布在四川东部,其次为草本类植被,主要分布在西藏和四川北部.

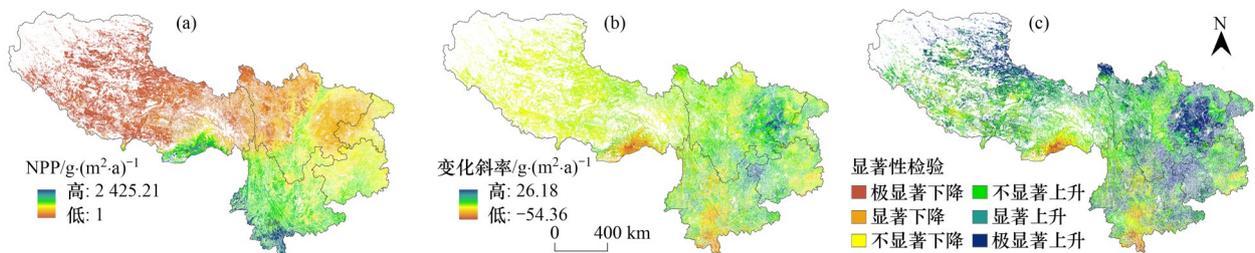


图 4 2000 ~ 2021 年气候变化影响下西南地区植被 NPP 空间变化

Fig. 4 Spatial variation in vegetation NPP under the influence of climate change in the southwest China from 2000 to 2021

表 3 气候变化影响下西南地区不同类型植被 NPP 变化统计/%

Table 3 Statistical results of NPP variation of different vegetation types under the influence of climate change in southwest China/%

项目	极显著下降	显著下降	不显著下降	不显著上升	显著上升	极显著上升
西南地区	2.35	3.05	18.47	36.37	15.07	24.69
乔木类植被	3.90	6.20	28.65	37.85	10.54	12.86
灌木类植被	1.45	2.76	21.11	45.35	14.86	14.47
草本类植被	1.28	2.05	16.66	36.27	16.99	26.75
经济类植被	3.01	2.00	9.95	26.55	17.65	40.84
其他	2.11	2.24	15.97	35.83	15.33	28.52

3.1.4 西南地区植被 NPP<sub>res</sub> 空间变化

由图 5 和表 4 可知,人类活动影响下,西南地区植被 NPP<sub>res</sub> 多年平均值只在西藏地区存在相对显著的区别,而在其余地区其植被 NPP<sub>res</sub> 多年平均值均主要在  $0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  上下浮动. 西南地区总体植被 NPP<sub>res</sub> 变化趋势在  $-49.77 \sim 31.03 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,其中,

70.68% 的西南地区植被 NPP<sub>res</sub> 呈上升趋势,呈显著和极显著上升趋势面积占 17.58%,植被 NPP<sub>res</sub> 显著上升区主要集中在四川东部. 人类影响下,西南地区部分地区植被 NPP<sub>res</sub> 同样存在一定的下降现象,其中,呈显著和极显著下降趋势占 0.41%,主要分布在西藏和云南南部. 人类活动影响下,西南地区经济

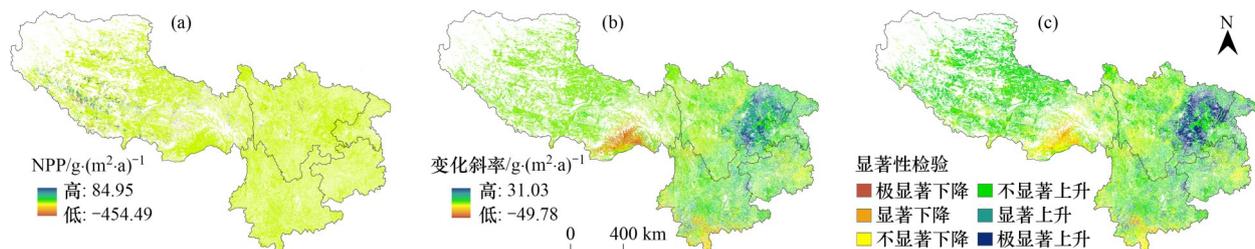


图 5 2000 ~ 2021 年人类活动影响下西南地区植被 NPP 空间变化

Fig. 5 Spatial variation in vegetation NPP under the influence of human activities in southwest China from 2000 to 2021

类植被  $NPP_{Res}$  呈上升趋势面积占比最大, 83.04% 地区的经济类植被呈上升趋势, 其中, 呈显著和极显著上升趋势面积占比为 40.85%, 主要分布在四川东部; 乔木、灌木和草本类植被  $NPP_{Res}$  呈上升趋势面积占比均大于 49%, 其中, 草本类植被  $NPP_{Res}$  呈上升趋势面积占比为 71.63%, 乔木类植被  $NPP_{Res}$  呈上升趋势面积占比仅为 49.15%, 但灌木类植被  $NPP_{Res}$  呈显著和

极显著上升趋势面积占比高于乔木和草本类植被, 为 10.48%. 综上可知, 人类活动影响下, 西南地区植被  $NPP_{Res}$  以不显著上升趋势为主. 植被类型中, 经济类植被  $NPP_{Res}$  在人类活动下呈上升趋势面积占比最大, 主要分布在四川东部. 乔木类植被  $NPP_{Res}$  在人类活动影响下同样存在一定下降区域, 主要分布在西藏和四川南部.

表 4 人类活动影响下西南地区不同类型植被 NPP 变化统计/%

Table 4 Statistical results of NPP variation of different vegetation types under the influence of human activities in southwest China

项目	极显著下降	显著下降	不显著下降	不显著上升	显著上升	极显著上升
西南地区	0.41	1.38	27.53	53.10	8.64	8.94
乔木类植被	1.14	4.15	45.56	40.28	4.79	4.08
灌木类植被	0.50	1.45	35.31	52.26	6.62	3.86
草本类植被	0.07	0.31	27.99	68.84	1.69	1.10
经济类植被	0.24	0.85	15.87	42.19	16.47	24.38
其他	0.08	0.12	12.92	61.92	13.65	11.31

### 3.2 不同类型植被生长稳定性分析

如图 6 所示, 空间上, 2000 ~ 2021 年西南地区植被 NPP 波动变化呈“南低北高”的空间分布格局, 各类型植被 NPP 变化主要表现为较低波动和中波动变化, 各类植被 NPP 呈较低波动变化和中波动变化的占比之和均超过 85%. 波动系数平均值以乔木类 (0.101)、灌木类 (0.105)、草本类 (0.110) 和经济类 (0.114) 的顺序依次升高. 乔木类和灌木类植被 NPP 主要呈较低波动变化, 二者呈较低波动变化的占比分别为 54.05% 和 52.87%, 其中, 乔木类植被 NPP 呈较低波动变化主要分布在西藏和云南南部, 而灌木类植被 NPP 呈较低波动变化主要分布在云南和贵州地区. 草本类和经济类植被 NPP 主要为中波动变化, 其植被 NPP 呈中波动变化百分比分别为 53.48% 和 44.31%, 其中草本类植被 NPP 呈中波动变化主要分布在西藏中部, 经济类植被 NPP 呈中波动变化则主要分布在四川东部, 但分布在四川东部的经济类植被 NPP 存在一定的较高波动变化, 占比为 8.22%. 综上可知, 西南地区植被 NPP 波动变化呈“南低北高”

的空间分布格局, 整体表现为较低波动和中波动变化, 其中乔木类和灌木类植被 NPP 变化以较低波动变化为主, 草本类和经济类植被 NPP 变化以中波动变化为主.

### 3.3 不同类型植被 NPP 与气候因子间的关系

#### 3.3.1 因子探测

如图 7 所示, 地表温度和相对湿度对西南地区植被 NPP 空间分异的解释力最高, 其  $q$  值均为 0.62, 其次为气压和温暖指数,  $q$  值分别为 0.57 和 0.55, 最低为寒冷指数,  $q$  值仅为 0.31. 在不同类型植被中, 乔木类植被 NPP 空间分异受气候因子影响最低, 气候因子对乔木类植被 NPP 空间分异的解释力均值仅为 0.18, 其中日照时数  $q$  值最低, 仅为 0.03; 相比于乔木类植被 NPP, 经济类植被 NPP 空间分异与气候因子存在更高的相关性, 气候因子对经济类植被 NPP 空间分异的解释力均值达 0.33, 其中, 日照时数和寒冷指数对经济类植被 NPP 空间分异的解释力最大, 其  $q$  值

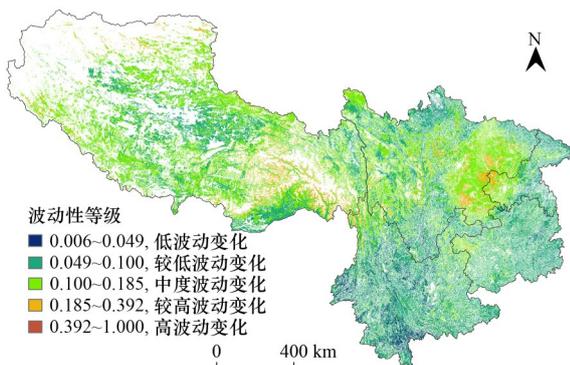


图 6 西南地区植被 NPP 稳定性空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the stability of the vegetation NPP in southwest China

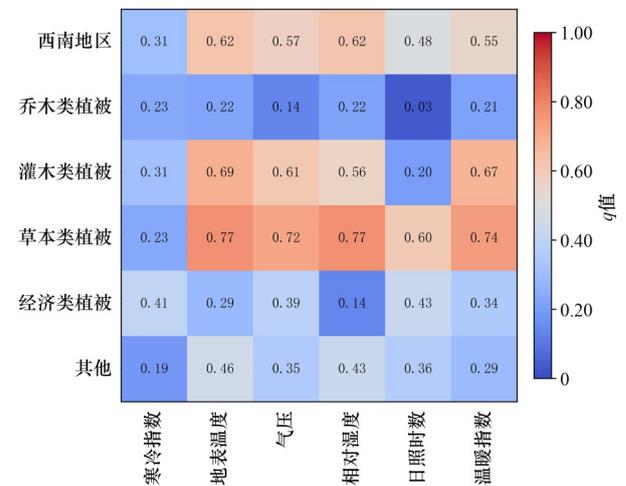


图 7 因子探测结果

Fig. 7 Results of factor detection

分别为 0.43 和 0.41,相对湿度对经济类植被 NPP 的解释力最低,其  $q$  值仅为 0.14;气候因子对灌木和草本类植被 NPP 整体空间分异的解释力相对较高, $q$  值均值分别为 0.51 和 0.64,其中,地表温度、温暖指数、气压和相对湿度对灌木类植被 NPP 空间分异的影响较大,而在草本类植被中,日照时数的影响力同样不可忽视. 综上可知,地表温度、气压、相对湿度、日照时数和温暖指数对西南地区植被 NPP 空间分异的影响较大,而在不同类型植被中,气候因子对植被 NPP 空间分异的解释力度存在显著差异,其中,对草本类植被 NPP 空间分异呈现较高的解释力,而对乔木类植被 NPP 空间分异的解释力相对较低.

### 3.3.2 交互探测

如图 8 所示,从交互作用结果看,西南地区气候因子的双因子作用  $q$  值均大于单因子  $q$  值,气候因子交互作用结果均表现为双因子增强或非线性增强,其中,相对湿度 $\cap$ 地表温度和相对湿度 $\cap$ 日照时数的  $q$  值最高,均为 0.75. 由此可知,相对湿度和地表温度及日照时数的交互作用是影响西南地区植被生长的主要气候因素. 在不同类型植被中,乔木类植被 NPP 受相对湿度 $\cap$ 日照时数的影响最大,其  $q$  值为 0.46;灌

木类植被 NPP 受地表温度 $\cap$ 相对湿度、地表温度 $\cap$ 日照时数和日照时数 $\cap$ 气压的影响最大,其  $q$  值均为 0.74;草本类植被 NPP 受日照时数 $\cap$ 温暖指数的影响最大,交互后  $q$  值达 0.86;经济类植被 NPP 受气压 $\cap$ 日照时数的影响最大,交互后  $q$  值为 0.54. 由此可知,不同类型植被 NPP 受气候因子交互影响存在显著的异质性,其中,日照时数与不同气候因子的交互作用是影响各类型植被生长的最大因素;如图 8 所示,从交互作用提升效果看,日照时数 $\cap$ 温暖指数对西南地区植被 NPP 分异的影响力提升最大,达 30.91%. 在不同类型植被中,交互作用对乔木类植被 NPP 空间分异的影响力提升最为显著,其中,相对湿度与其他气候因子交互效果最为显著,除相对湿度 $\cap$ 气压的影响力提升 54.55% 外,相对湿度与其他气候因子交互影响力提升均超过 90%. 综上可知,相对湿度 $\cap$ 地表温度和相对湿度 $\cap$ 日照时数是影响西南地区植被生长的主要因素,日照时数 $\cap$ 温暖指数的交互作用对西南地区植被 NPP 影响力提升最大,而在各类型植被中,日照时数与不同气候因子的交互作用是影响植被生长的共同因素,而相对湿度与其他气候影响因子的交互作用对乔木类植被 NPP 影响力提升最大.

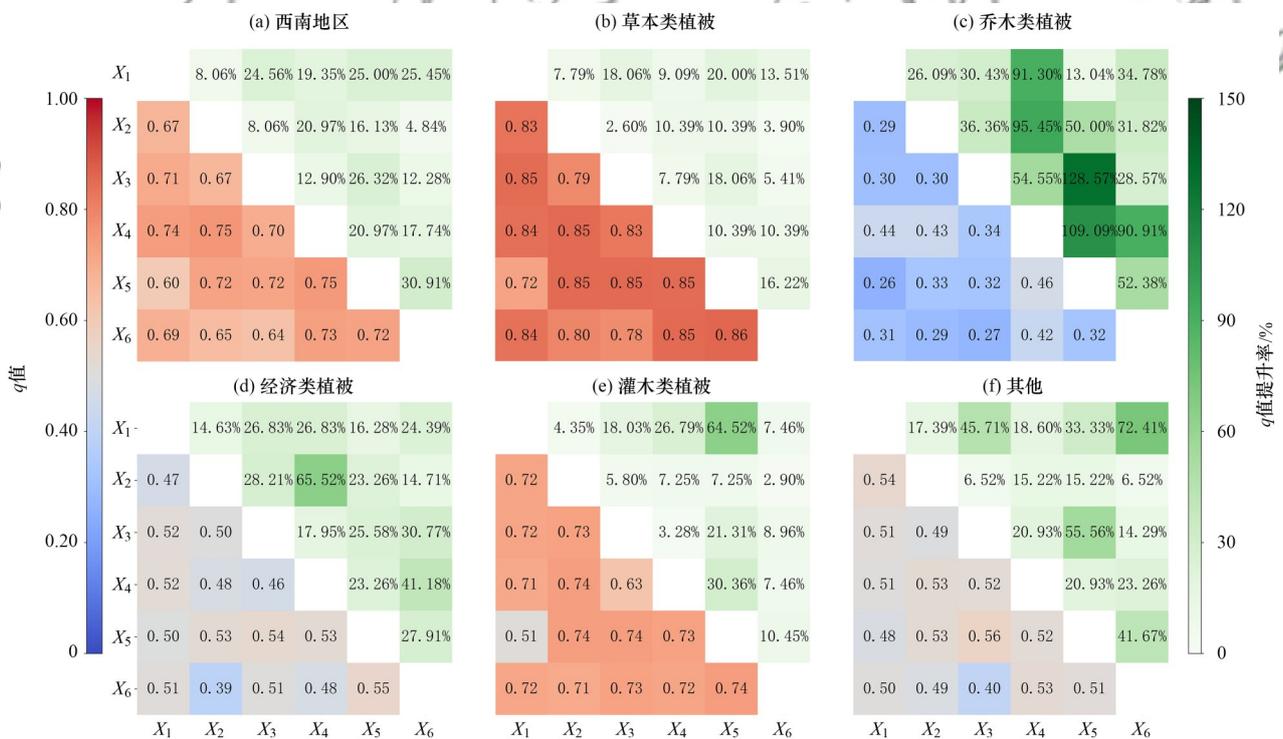


图 8 交互探测结果和交互作用探测  $q$  值相较于因子探测  $q$  值提升率

Fig. 8 Results of interaction detection and growth rate of  $q$  value of interaction detection compared with factor detection

### 3.3.3 生态探测

如图 9 所示,在西南地区整体生态探测中,除气压和相对湿度、日照时数和温度指数、寒冷指数和不同气候因子组合间对植被 NPP 的影响均存在显著

的差异性外,其余因子组合对植被 NPP 空间分异均不存在显著差异的影响,这表明了寒冷指数对西南地区植被生长影响不同于其他气候影响因子,这与因子探测中,寒冷指数对植被 NPP 空间分异的解释

力显著低于其他气候影响因子的结果存在高度相关性. 在西南地区不同类型植被生态探测中, 乔木和经济类植被生态探测结果存在高度一致性, 除经济类植被中的寒冷指数与日照时数间存在显著差异性外, 在乔木和经济类植被中, 地表温度与其他气候因子间均无显著差异性. 灌木和草本类植被生态探测结果存在高度一致性, 除寒冷指数与日照时数在灌木类植被中表现为存在显著差异性外, 其余情况均

为存在显著差异性, 剩余气候因子组合间几乎表现为无显著差异性, 结合因子探测结果可知, 气候因子对乔木和经济类植被 NPP 空间分异的影响呈高度相似性, 对灌木和草本类植被 NPP 空间分异的影响呈高度相似性. 综上可知, 寒冷指数与其他气候因子组合对西南地区植被生长的空间分异存在显著差异, 主要发生在灌木和草本类植被中, 在乔木和经济类植被中则相反.

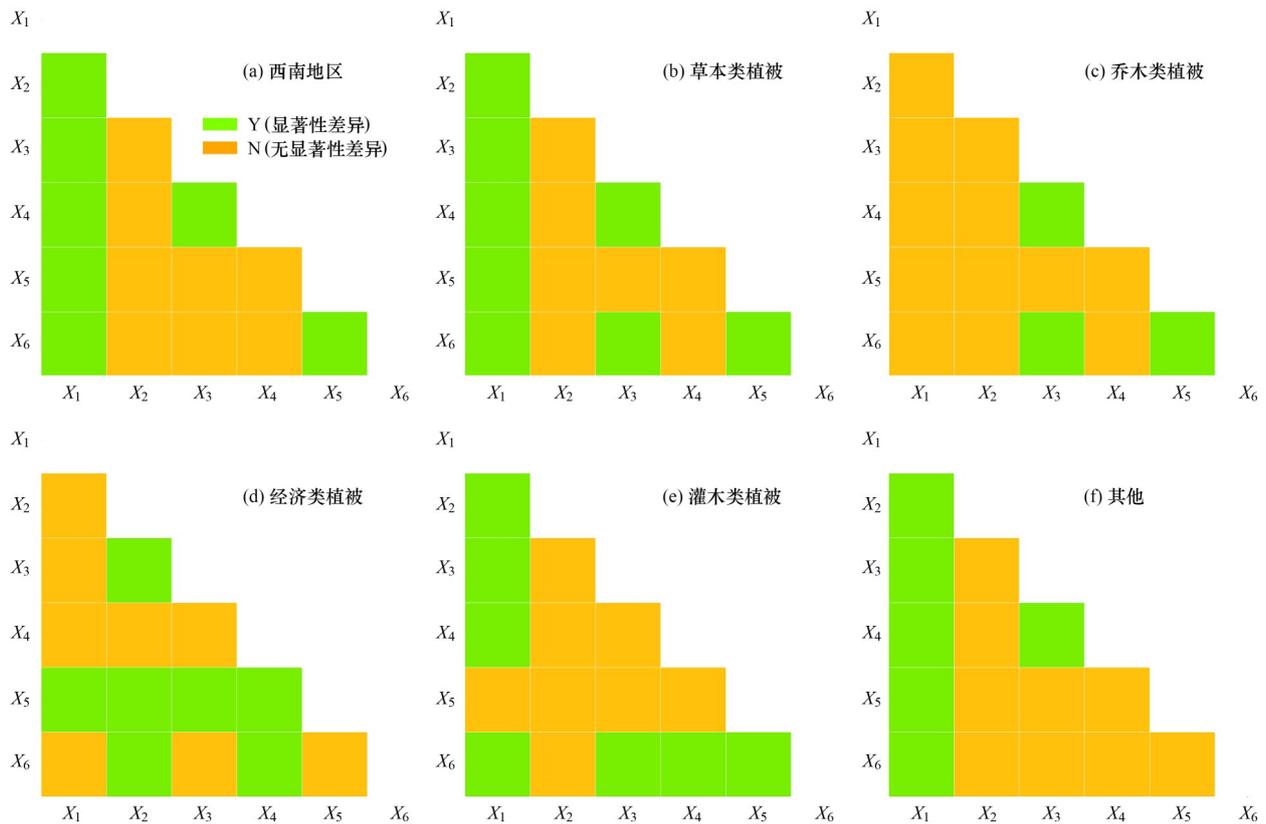


图9 因子生态探测结果

Fig. 9 Results of ecological detection

### 3.3.4 风险区探测

西南地区及不同类型植被生长最佳条件如表5所示, 地表温度和相对湿度是西南地区植被 NPP 空间分异影响最大的两个因子, 当地表温度在  $21.03 \sim 28.49^\circ\text{C}$  时, 植被  $\text{NPP}_{\max}$  可达  $1\,162.6\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ , 而当相对湿度达最佳值域  $67.05\% \sim 74.68\%$  时, 植被  $\text{NPP}_{\max}$  为  $892.83\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ . 气压、日照时数和温暖指数对西南地区植被 NPP 空间分异的影响同样较大, 当气压在  $851.41 \sim 917.11\text{ hPa}$  时, 植被  $\text{NPP}_{\max}$  可达  $1\,033.63\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ , 当温暖指数在  $106.46 \sim 167.2$  间时, 植被  $\text{NPP}_{\max}$  可达西南地区最高值  $1\,226.27\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ , 由此可知, 适宜的地温与有效的积温是植被 NPP 上升的一大重要原因, 在此基础上, 控制植被生长环境的湿度, 可保持植被生长的持续性.

在西南地区不同类型植被 NPP 风险区探测中,

不同类型植被对环境条件的要求存在显著的异同, 差异性表现在: 寒冷指数只在草本类植被中表现出较大差异, 草本类植被中, 寒冷指数的最适区域为  $-97.82 \sim -84.07$ , 而在其他类型植被中需求度均低于  $-122.63$ ; 气压在乔木、灌木和草本类植被中最适值域均为  $851.41 \sim 917.11\text{ hPa}$ , 而在经济类植被中为  $777.49 \sim 851.41\text{ hPa}$ ; 相对湿度除在经济类植被中最适值域为  $41.49\% \sim 49.11\%$  外, 其余植被类型均要求相对湿度大于  $60\%$ ; 在日照需求方面, 大于  $2\,000\text{ h}$  的日照是乔木和经济类植被的最佳条件, 而灌木和草本类植被对日照的需求相对较低. 相同性表现在: 在地表温度和温暖指数方面, 各类型植被的需求呈高度一致性, 均为  $21.03 \sim 28.49^\circ\text{C}$  和  $106.46 \sim 167.2$ , 当不同类型植被在地表温度和温暖指数达到相同的最适区间时, 均会达到不同的植被 NPP 峰值. 综上可

表 5 风险区探测结果<sup>1)</sup>  
Table 5 Results of risk detection

类型	项目	寒冷指数	地表温度/ $^{\circ}\text{C}$	气压/hPa	相对湿度/%	日照时数/h	温暖指数
西南地区	最适区间	-122.63 ~ -109.78	21.03 ~ 28.49	851.41 ~ 917.11	67.05 ~ 74.68	1 825.68 ~ 2 176.19	106.46 ~ 167.2
	$\text{NPP}_{\text{max}}/\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	714.47	1 162.60	1 033.63	892.83	813.98	1 226.27
乔木类植被	最适区间	-143.55 ~ -132.79	21.03 ~ 28.49	851.41 ~ 917.11	67.05 ~ 74.68	2 585.12 ~ 2 964.83	106.46 ~ 167.2
	$\text{NPP}_{\text{max}}/\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	1 223.55	1 241.16	1 079.42	971.32	907.00	1 291.55
灌木类植被	最适区间	-132.79 ~ -122.63	21.03 ~ 28.49	851.41 ~ 917.11	74.68 ~ 84.98	852.05 ~ 1 368.08	106.46 ~ 167.2
	$\text{NPP}_{\text{max}}/\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	1 066.20	1 191.35	1 005.60	905.19	752.86	1 249.66
草本类植被	最适区间	-97.82 ~ -84.07	21.03 ~ 28.49	851.41 ~ 917.11	74.68 ~ 84.98	1 368.08 ~ 1 825.68	106.46 ~ 167.2
	$\text{NPP}_{\text{max}}/\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	482.76	1 066.22	954.48	937.27	750.00	1 194.19
经济类植被	最适区间	-143.55 ~ -132.79	21.03 ~ 28.49	777.49 ~ 851.41	41.49 ~ 49.11	2 176.19 ~ 2 585.12	106.46 ~ 167.2
	$\text{NPP}_{\text{max}}/\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	1 118.31	1 145.59	1 005.88	891.82	1 032.50	1 291.35
其他	最适区间	-97.82 ~ -84.07	21.03 ~ 28.49	917.11 ~ 989.39	74.68 ~ 84.98	852.05 ~ 1 368.08	106.46 ~ 167.2
	$\text{NPP}_{\text{max}}/\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	180.06	498.56	503.42	494.93	337.89	515.53

1)  $\text{NPP}_{\text{max}}$  表示植被 NPP 在该气候条件下可达到的最大值

知,地表温度和温暖指数对西南地区植被 NPP 积累的影响最大,且不同类型植被对地表温度和温暖指数的需求相同,而寒冷指数、气压、相对湿度和日照时数则在不同类型植被中存在一定差异性。

## 4 讨论

### 4.1 西南地区不同类型植被 NPP 时空演变差异

从时间上看,2000 ~ 2021 年,西南地区整体植被 NPP 呈上升趋势,气候变化和人类活动影响下,各类型植被 NPP 均主要呈上升趋势,这与已有研究一致<sup>[12,13,30]</sup>。2000 ~ 2021 年,西南地区年平均温度为  $9.3^{\circ}\text{C}$ ,年累计降水均值为  $767.49\text{ mm}$ ,比全国年累计降水均值  $662.85\text{ mm}$  高出  $104.64\text{ mm}$ ,大量的降水导致了西南地区常年相对湿度维持在  $32.21\% \sim 84.98\%$ ,加上西南地区地处我国中低纬度地区,充足的光照为植被的生长提供了稳定的能量来源。此外,自 2000 年来,在人类有计划的干预下,我国针对西南地区各项生态问题,实施了退耕还林、西南地区石漠化综合治理和长江防护林工程等生态工程,同样为西南地区的生态恢复与发展做出了巨大贡献<sup>[31,32]</sup>。

从空间上看,乔木类植被下降区主要集中在西藏和云南南部,西藏和云南南部虽然分别为我国藏东南高原边缘森林生态功能区和川滇森林及生物多样性功能区,但由于成立时间均在 2010 年之后,创立时间较短,加之林业活动和农业扩张等人类活动的影响<sup>[33]</sup>,导致西南地区 2001 ~ 2019 年间森林损失面积达  $375.27\text{ 万 hm}^2$ ,这同样是乔木类植被 NPP 在人类活动影响下呈下降趋势的一大原因。经济类植被 NPP 作为上升趋势最显著的植被类型,主要分布在四川盆地,四川盆地本身得天独厚的地理气候条件,其土壤本身富含多种有利于植被生长氮磷等矿物

质<sup>[34,35]</sup>,加之我国经济的不断快速发展,四川盆地土地资源得到不断开发,农业基础得以不断完善,四川盆地农业发展蒸蒸日上,这与已有研究的结果一致<sup>[30]</sup>。

### 4.2 西南地区植被生长波动变化与影响因素间的潜在关系

西南地区不同类型植被中,经济类植被 NPP 变化波动最高,其次是草本和灌木类植被,乔木类植被 NPP 变化波动最低。这与植被的演替密切相关,随着植物群落的演替,植物群落发展由低级到高级,由简单到复杂,植被群落的稳定性不断提高,而经济类植被虽然不作为植被自然演替的结果,但其作为人类在衣、食、住和医药等方面息息相关的植被类型,受人为调控影响较大,对此波动变化相较自然演替形成的群落其波动变化最大,这与已有研究结论相似<sup>[36]</sup>。在本实验中可发现,除经济类植被外,植被 NPP 的波动大小与气候因子对其空间影响存在密切联系,波动变化越大,气候因子对植被生长的空间分异的解释力就相对越大。乔木群落因其稳定的生态结构使其受气候影响较低,而草本类植被因其不稳定的生态群落而受气候影响调控较大,但经济类植被因其受人文因素的影响较大,其植被 NPP 波动变化大小与气候对其影响的大小成反比。

交互作用结果显示,双因子交互作用会加强气候影响因素对植被 NPP 空间分异的影响强度,这与已有研究结果一致<sup>[37,38]</sup>,其中,地表温度和相对湿度的交互作用是西南地区植被生长空间分异的主要影响因素,而气压与日照时数的交互作用对西南地区植被 NPP 影响提升最大。从不同类型植被与气候因子间的关系看,乔木类植被 NPP 生长变化主要受相对湿度、地表温度、寒冷指数和温暖指数影响,同时

相对湿度与其他气候影响因子的交互作用对乔木类植被 NPP 影响提升巨大,这与已有研究结论较一致<sup>[30,39-41]</sup>. 乔木类植被作为最高等级植被,其完善的生理结构使其受气候影响相对较低. 灌木类植被 NPP 生长变化主要受地表温度、气压、相对湿度和温暖指数调控,而草本类植被在此基础上,同样受日照时数影响较大,这与已有研究的结果相一致<sup>[30,42-44]</sup>. 温度、水分和能量来源是植被生长的三大重要影响因素,灌木和草本类植被作为中低等级的植被群落,受其影响变化较为显著,其中草本类植被作为最低等级的植被群落,因其植被群落功能结构最为简单,受光照的影响最为敏感,对此,光照的长短,更是决定着草本类植被生长发育和繁殖的重要因素. 同时,日照时数也是影响经济类植被 NPP 最大的气候因子,这与已有研究的结果一致<sup>[12,13,30,45]</sup>,经济类植被作为为人类提供经济价值的植被,其合成有机物效率高是其一大特点,而充足的光照是其进行光合反应的一大重要保障,加之经济类植被本身作为人类林业活动和农业劳动的主要对象,受人类活动影响巨大,对此,气候因素的影响就相对较低.

## 5 结论

(1) 时间上,2000~2021 年西南地区植被 NPP 呈上升趋势,空间上,西南地区植被 NPP 呈“东高西低”的分布格局. 不同类型植被中,除人类活动影响下的乔木类植被 NPP 存在微弱下降的现象外,其余类型植被 NPP 均为波动上升趋势,其中不同影响条件下经济类植被 NPP 上升趋势均最为显著,聚集分布在四川省东部.

(2) 西南地区植被 NPP 受主要地表温度和相对湿度的影响,在不同类型植被中,不同类型植被对地表温度和温暖指数的需求一致,当地表温度为 21.03~28.49℃,温暖指数为 106.46~167.2 时,不同类型植被 NPP 均会达到峰值,但对寒冷指数、气压、相对湿度和日照时数存在一定的需求差异.

(3) 交互作用结果显示,日照时数∩温暖指数对西南地区植被 NPP 影响提升最大,而在不同类型植被中,乔木类植被受交互作用影响最为显著,其中相对湿度和其他气候因子的交互作用对乔木类植被 NPP 影响提升最大.

(4) 植被 NPP 波动大小与气候因子对植被 NPP 空间分异的解释力间存在密切联系,自然条件下,植被群落演替等级越高,波动变化幅度越低,气候因子对植被 NPP 空间分异解释力也越小,而经济类植被存在截然相反的结果.

## 参考文献:

- [1] Liu Y, Ding Z, Chen Y N, *et al.* Restored vegetation is more resistant to extreme drought events than natural vegetation in Southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **866**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161250.
- [2] 许小明, 张晓萍, 何亮, 等. 黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5263-5273.  
Xu X M, Zhang X P, He L, *et al.* Carbon sequestration characteristics of different restored vegetation types in Loess Hilly region[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5263-5273.
- [3] 张雄一, 邵全琴, 宁佳, 等. 三北工程区植被恢复对土壤风蚀的影响及植被恢复潜力研究[J]. *地球信息科学学报*, 2022, **24**(11): 2153-2170.  
Zhang X Y, Shao Q Q, Ning J, *et al.* Effect of vegetation restoration on soil wind erosion and vegetation restoration potential in the three-north afforestation program [J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2022, **24**(11): 2153-2170.
- [4] Shen J L, Zhang H Y, Zhao Y K, *et al.* An examination of the mitigation effect of vegetation restoration on regional water poverty: Based on panel data analysis of 9 provinces in the Yellow River basin of China from 1999 to 2019 [J]. *Ecological Indicators*, 2023, **146**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.109860.
- [5] Gao J, Ji Y H, Zhang X. Net primary productivity exhibits a stronger climatic response in planted versus natural forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, **529**, doi: 10.1016/j.foreco.2022.120722.
- [6] Sun H Z, Chen Y B, Xiong J N, *et al.* Relationships between climate change, phenology, edaphic factors, and net primary productivity across the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, **107**, doi: 10.1016/j.jag.2022.102708.
- [7] Liu X, Wang P, Song H, *et al.* Determinants of net primary productivity: Low-carbon development from the perspective of carbon sequestration [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, **172**, doi: 10.1016/j.techfore.2021.121006.
- [8] Li C H, Zhou M, Dou T B, *et al.* Convergence of global hydrothermal pattern leads to an increase in vegetation net primary productivity [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **132**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108282.
- [9] Bejagam V, Sharma A. Impact of climatic changes and anthropogenic activities on ecosystem net primary productivity in India during 2001-2019 [J]. *Ecological Informatics*, 2022, **70**, doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101732.
- [10] 石智宇, 王雅婷, 赵清, 等. 2001-2020 年中国植被净初级生产力时空变化及其驱动机制分析[J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(11): 2111-2123.  
Shi Z Y, Wang Y T, Zhao Q, *et al.* The spatiotemporal changes of NPP and its driving mechanisms in China from 2001 to 2020 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(11): 2111-2123.
- [11] Yu D S, Li Y H, Yin B L, *et al.* Spatiotemporal variation of net primary productivity and its response to drought in Inner Mongolian desert steppe [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, **33**, doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01991.
- [12] 徐勇, 黄雯婷, 郑志威, 等. 基于空间尺度效应的西南地区植被 NPP 影响因子探测[J]. *环境科学*, 2023, **44**(2): 900-911.  
Xu Y, Huang W T, Zheng Z W, *et al.* Detecting influencing factor of vegetation NPP in southwest China based on spatial scale effect [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 900-911.
- [13] 徐勇, 郑志威, 戴强玉, 等. 顾及时滞效应的西南地区植被 NPP 变化归因分析[J]. *农业工程学报*, 2022, **38**(9):

- 297-305.
- Xu Y, Zheng Z W, Dai Q Y, *et al.* Attribution analysis of vegetation NPP variation in Southwest China considering time-lag effects [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, **38**(9): 297-305.
- [14] Linger E, Hogan J A, Cao M, *et al.* Precipitation influences on the net primary productivity of a tropical seasonal rainforest in Southwest China: A 9-year case study [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **467**, doi: 10.1016/j.foreco.2020.118153.
- [15] 茆杨, 蒋勇军, 张彩云, 等. 近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化及影响因素及其对生态工程响应[J]. *生态学报*, 2022, **42**(7): 2878-2890.
- Mao Y, Jiang Y J, Zhang C Y, *et al.* Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in southwest China in the past 20 years and its response to ecological engineering [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(7): 2878-2890.
- [16] Yang F, Zhong Y J, Han G Z, *et al.* Effect of different vegetation restoration on soil organic carbon dynamics and fractions in the Rainy Zone of Western China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **331**, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117296.
- [17] 赵姣, 马静, 朱燕峰, 等. 植被类型对黄土高原露天复垦土壤碳循环功能基因的影响[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3386-3395.
- Zhao J, Ma J, Zhu Y F, *et al.* Effects of vegetation types on carbon cycle functional genes in reclaimed soil from open pit mines in the loess plateau [J]. *Environmental Science* 2023, **44**(6): 3386-3395.
- [18] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 等. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应[J]. *生态学报*, 2022, **42**(9): 3557-3568.
- Geng Q L, Chen X Q, He X H, *et al.* Vegetation dynamics and its response to climate change and human activities based on different vegetation types in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(9): 3557-3568.
- [19] 卢乔倩, 江涛, 柳丹丽, 等. 中国不同植被覆盖类型 NDVI 对气温和降水的响应特征[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(1): 23-34.
- Lu Q Q, Jiang T, Liu D L, *et al.* The response characteristics of NDVI with different vegetation cover types to temperature and precipitation in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(1): 23-34.
- [20] 陈琪, 杨九艳, 闫瑞玲, 等. 荒漠区不同植被类型 NDVI 变化特征分析——以内蒙古阿拉善盟为例[J]. *中国草地学报*, 2022, **44**(3): 17-28.
- Chen Q, Yang J Y, Yan R L, *et al.* Analysis of NDVI variation characteristics of different vegetation types in desert areas——a case study of Alxa League, Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, **44**(3): 17-28.
- [21] 缪利, 陆晴, 刘根林, 等. 1999-2019 年青藏高原不同植被类型 NDVI 时空演变特征及其对气候因子的响应[J]. *水土保持研究*, 2023, **30**(1): 97-105.
- Miao L, Lu Q, Liu G L, *et al.* Spatiotemporal evolution characteristics of NDVI of different vegetation types and its response to climate factors on the Qinghai-Tibet plateau from 1999 to 2019 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, **30**(1): 97-105.
- [22] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, **63**(324): 1379-1389.
- [23] 杨靖, 戴君虎, 姚华荣, 等. 1992—2020 年横断山区植被分布与植被活动变化[J]. *地理学报*, 2022, **77**(11): 2787-2802.
- Yang J, Dai J H, Yao H R, *et al.* Vegetation distribution and vegetation activity changes in the Hengduan Mountains from 1992 to 2020 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, **77**(11): 2787-2802.
- [24] 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 等. 2000—2020 年中国典型经济区 PM<sub>2.5</sub> 时空变化及其与植被景观格局的关系[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 1852-1864.
- Xu Y, Li X Y, Huang W T, *et al.* Spatio-temporal variation in PM<sub>2.5</sub> concentration and its relationship with vegetation landscape patterns in typical economic zones in China from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1852-1864.
- [25] 吴秦豫, 姚喜军, 梁洁, 等. 鄂尔多斯市煤矿区植被覆盖改善和退化效应的时空强度[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, **36**(8): 101-109.
- Wu Q Y, Yao X J, Liang J, *et al.* Spatial and temporal intensity of vegetation cover improvement and degradation in coal mining areas of Erdos city [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, **36**(8): 101-109.
- [26] 李婷婷, 郭增长, 马超. 中国第二、三级阶梯地形过渡带山前植被物候时空变化探析[J]. *地理研究*, 2022, **41**(11): 3000-3020.
- Li T T, Guo Z Z, Ma C, *et al.* Spatiotemporal changes of piedmont phenology in the transitional zone between the second and third steps, China [J]. *Geographical Research*, 2022, **41**(11): 3000-3020.
- [27] 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 in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River basin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3730-3740.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, **72**(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [29] 徐勇, 郭振东, 郑志威, 等. 运用地理探测器研究京津冀城市群 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2023, **36**(4): 649-659.
- Xu Y, Guo Z D, Zheng Z W, *et al.* Study of the PM<sub>2.5</sub> concentration variation and its influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration using geo-detector [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, **36**(4): 649-659.
- [30] 徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 等. 西南地区陆地植被生态系统 NPP 时空演变及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2704-2714.
- Xu Y, Huang H Y, Dai Q Y, *et al.* Spatial-temporal variation of net primary productivity in terrestrial vegetation ecosystems and its driving forces in southwest China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2704-2714.
- [31] 张杰. 基于时序遥感数据的西南喀斯特地区石漠化信息提取研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- Zhang J. Extraction of rocky desertification information in karst area of southwest China based on time-series remote sensing data [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [32] 叶鑫, 顾羊羊, 张琨, 等. 西南喀斯特地区石漠化治理现状分析与对策研究——以贵州省黔西南州为例[J]. *环境保护*,

- 2020, **48**(22): 30-34.
- Ye X, Gu Y Y, Zhang K, *et al.* Current Situation analysis and countermeasures of rocky desertification control in southwest karst region: a case Study of Qianxinan prefecture in Guizhou province [J]. *Environmental Protection*, 2020, **48**(22): 30-34.
- [33] 王淑静, 赖佩玉, 郝斌飞, 等. 西南地区 2001~2019 年森林损失特征遥感监测与时空分析[J]. *遥感技术与应用*, 2021, **36**(3): 552-563.
- Wang S J, Lai P Y, Hao B F, *et al.* Remote sensing monitoring and spatio-temporal pattern of deforestation in southwest China from 2001 to 2019 [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, **36**(3): 552-563.
- [34] 家伟, 聂富育, 杨万勤, 等. 四川盆地西缘 4 种人工林土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, **24**(1): 112-118.
- Jia W, Nie F Y, Yang W Q, *et al.* Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus within soil aggregates of four plantations in the western edge of Sichuan basin [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, **24**(1): 112-118.
- [35] 袁余洋, 刘属灵, 雒昆利, 等. 四川盆地典型农业区土壤中铜、钴、钼和锌的空间分异及其影响因素[J]. *高校地质学报*, 2022, **28**(4): 506-515.
- Yuan Y Y, Liu S L, Luo K L, *et al.* Study on the spatial variation and driving factors of copper, cobalt, molybdenum and zinc in Top soil of typical agricultural region in Sichuan Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, **28**(4): 506-515.
- [36] 王婧姝, 毕如田, 贺鹏, 等. 气候变化下黄土高原植被生长期 NDVI 动态变化特征[J]. *生态学杂志*, 2023, **42**(1): 67-76.
- Wang J S, Bi R T, He P, *et al.* Variations of NDVI during main growing season in the Loess Plateau under climate change [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(1): 67-76.
- [37] Shi S H, Wang X L, Hu Z R, *et al.* Geographic detector-based quantitative assessment enhances attribution analysis of climate and topography factors to vegetation variation for spatial heterogeneity and coupling [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2023, **42**, doi: 10.1016/j.gecco.2023.e02398.
- [38] Peng W F, Kuang T T, Tao S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **233**: 353-367.
- [39] 余舒含. 中国森林、草地生态系统生物量分配格局及影响因素分析[D]. 拉萨: 西藏大学, 2021.
- Yu S H. Biomass and allocation of Chinese forest and grassland ecosystem [D]. Lasa: Tibet University, 2021.
- [40] 李树强, 高丽, 李桦, 等. 陕西省国有林场森林植被固碳量时空演变及其驱动因素研究[J]. *林业经济*, 2022, **44**(11): 58-75.
- Li S Q, Gao L, Li H, *et al.* Study on spatial-temporal evolution and driving factors of forest vegetation carbon sequestration in state forest farms in Shaanxi province [J]. *Forestry Economics*, 2022, **44**(11): 58-75.
- [41] Wang C L, Jiang Q O, Engel B, *et al.* Analysis on net primary productivity change of forests and its multi-level driving mechanism - A case study in Changbai Mountains in Northeast China [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, **153**, doi: 10.1016/j.techfore.2020.119939.
- [42] 刘杰, 汲玉河, 周广胜, 等. 2000—2020 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用[J]. *应用生态学报*, 2022, **33**(6): 1533-1538.
- Liu J, Ji Y H, Zhou G S, *et al.* Temporal and spatial variations of net primary productivity (NPP) and its climate driving effect in the Qinghai-Tibet Plateau, China from 2000 to 2020 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(6): 1533-1538.
- [43] 胡志强, 宋孝玉, 覃琳, 等. 2001—2020 年内陆干旱草原县域尺度植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因素[J]. *水土保持通报*, 2022, **42**(5): 213-221.
- Hu Z Q, Song X Y, Qin L, *et al.* Spatio-temporal variation characteristics and its driving factors of NDVI at county scale for an inland arid grassland during 2001-2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42**(5): 213-221.
- [44] Ma R, Shen X J, Zhang J Q, *et al.* Variation of vegetation autumn phenology and its climatic drivers in temperate grasslands of China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, **114**, doi: 10.1016/j.jag.2022.103064.
- [45] Yang S J, Song S, Li F D, *et al.* Evaluating farmland ecosystem resilience and its obstacle factors in Ethiopia [J]. *Ecological Indicators*, 2023, **146**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.109900.

## CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning .....	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> ( 1 )
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> ( 8 )
Variation Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter .....	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> ( 23 )
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou .....	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> ( 36 )
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter .....	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> ( 48 )
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022 .....	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> ( 61 )
Analysis of O <sub>3</sub> Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China .....	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> ( 71 )
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer .....	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> ( 81 )
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction .....	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> ( 93 )
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model .....	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> ( 104 )
Driving Forces and Mitigation Potential of CO <sub>2</sub> Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China .....	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> ( 115 )
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant .....	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> ( 123 )
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years .....	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> ( 131 )
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment .....	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> ( 140 )
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment .....	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> ( 151 )
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment .....	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> ( 159 )
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary .....	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-ru, <i>et al.</i> ( 173 )
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir .....	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> ( 181 )
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City .....	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> ( 194 )
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang .....	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long ( 207 )
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan ( 218 )
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years .....	WANG Geng, ZHANG Fu-rong ( 228 )
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect .....	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> ( 239 )
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone .....	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> ( 248 )
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China .....	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> ( 262 )
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin .....	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> ( 275 )
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model .....	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> ( 287 )
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model .....	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> ( 300 )
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain .....	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> ( 314 )
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors .....	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> ( 323 )
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region .....	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> ( 335 )
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area .....	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> ( 343 )
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations .....	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> ( 354 )
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing .....	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> ( 364 )
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils .....	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie ( 376 )
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model .....	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> ( 386 )
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented .....	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> ( 396 )
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China .....	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> ( 407 )
Source Apportionment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City .....	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> ( 417 )
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials .....	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> ( 429 )
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety .....	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> ( 439 )
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic .....	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> ( 450 )
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks .....	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> ( 459 )
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i> .....	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> ( 470 )
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum .....	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> ( 480 )
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil .....	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> ( 489 )
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities .....	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge ( 496 )
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest .....	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> ( 508 )
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity .....	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei ( 520 )
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function .....	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> ( 530 )
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper .....	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> ( 543 )
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water .....	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> ( 555 )
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County .....	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> ( 567 )
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> ( 576 )
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas .....	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> ( 584 )
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw .....	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> ( 594 )
Comparison of Pb <sup>2+</sup> Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO <sub>2</sub> Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid .....	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> ( 606 )