

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)

全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析任晓松, 李昭睿 (1243)

京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)

太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO₂协同效益评估肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)

湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)

郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)

长江中游城市群城市化对PM_{2.5}浓度的多尺度驱动机制张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)

天山北坡城市群PM_{2.5}浓度时空分布特征及影响因素分析王相男, 张喆, 刘方青 (1315)

天津市PM_{2.5}碳组分空间差异性来源解析武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)

贵阳市花溪城区大气PM_{2.5}中碳质气溶胶的变化特征及来源解析桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)

新乡市大气PM_{2.5}中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析刘桓嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)

2017~2018年冬季菏泽大气PM_{2.5}中金属元素特征及健康风险评估杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)

南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)

苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化吴也正, 张鑫, 顾韵, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)

长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张霖霖, 黄张根 (1402)

基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)

重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)

长江流域微塑料污染特征及生态风险评估李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)

宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)

汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)

宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评估高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)

浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评估钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)

杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)

不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)

长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)

富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛 (1539)

紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平林涛, 苑宇杰 (1553)

再生水消毒副产物的检测、生成与控制廖雨枫, 王正, 潘昀, 李爱民 (1561)

3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)

基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)

定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP_{GS}变化的影响徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志威, 郭振东 (1615)

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响李健明, 康雨欣, 蒋福祺, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)

连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)

4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)

不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)

黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)

秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)

基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娟, 蔡贺清 (1739)

基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)

湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)

典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)

省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉累积的效应易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)

EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)

叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)

民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)

宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)

养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)

玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)

不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析

傅楷翔¹, 贾国栋^{1,2*}, 余新晓^{1,2}, 王旭¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 青藏公路沿线生态环境是西藏地区生态文明建设的重要组成部分, 目前研究青藏高原独特的地理环境普遍存在数据获取困难、时效性过低及未考虑研究区独特的“高寒盐碱”环境状况等问题. 基于 GEE 平台及研究区独特地理环境, 对遥感生态指数 (RSEI) 进行改进, 采用主成分分析法构建一种新的适用于高寒盐碱地区的盐碱遥感生态指数 (SRSEI) 作为生态环境质量评价指标, 利用 ArcGIS 10.3 平台、地理探测器等方法在时空尺度下分析青藏公路那曲至安多段沿线生态环境质量空间分布格局与时间变异趋势, 并探究自然和人为等 8 个控制因子对 SRSEI 时空变化的驱动机制. 结果表明: ①相较于 RSEI, SRSEI 对植被更加敏感, 对植被稀疏和盐碱化严重地区的分辨能力更强, 适合高寒盐碱区生态质量评价. ②研究区生态环境质量空间尺度上存在明显的地理分异性, 生态质量较差的区域主要集中在北部安多县城, 质量等级为优和良地区主要分布在中西部和东南部那曲地区; 时间尺度上 32 年间研究区生态环境整体呈改善趋势, 中西部和东南部植被覆盖度明显增加, 对生态环境有很强的改善作用, 改善面积 1 425.98 km², 占比 99.82%. SRSEI 均值为 0.49, 总体呈波动上升趋势, 平均增幅为 0.015 7 a⁻¹. ③土地利用方式是研究区生态环境质量变化中驱动力最大的影响因子, 多年份平均 q 值 0.1576, 环境因子的影响力较低; 多因子交互结果显示, 研究区的生态环境现状是多重因素共同作用的结果, 所有因子在交互作用下均有协同增强的作用, 且人为因素的影响在逐步上升, 植被净初级生产力 (NPP) 和土地利用方式交互作用是研究区生态环境质量的主要交互控制因子. 该研究可为那曲至安多段沿线生态环境保护和可持续发展提供理论依据.

关键词: 生态环境质量; 遥感生态指数 (RSEI); 地理探测器; GEE 平台; 青藏公路沿线

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1586-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202303252

Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index

FU Kai-xiang¹, JIA Guo-dong^{1,2*}, YU Xin-xiao^{1,2}, WANG Xu¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The ecological environment along the Qinghai-Xizang highway is an important part of the construction of the ecological civilization in the Xizang region, and current research generally suffers from difficulties in data acquisition, low timeliness, and failure to consider the unique "alpine saline" environmental conditions in the study area due to the unique geographical environment of the Qinghai-Xizang plateau. Based on the GEE platform and the unique geographical environment of the study area, the remote sensing ecological index (RSEI) was improved, and a new saline remote sensing ecological index (SRSEI) applicable to the alpine saline region was constructed by using principal component analysis as an ecological environment quality evaluation index. The spatial distribution pattern and temporal variation trend of ecological environment quality along the Qinghai-Xizang Highway Nagqu-Amdo section were analyzed at multiple spatial and temporal scales using the ArcGIS 10.3 platform and geographic probes, and the driving mechanisms of eight control factors, including natural and human-made, on the spatial and temporal changes in SRSEI were investigated. The results showed that: ① compared with RSEI, SRSEI was more sensitive to vegetation and had a stronger discriminatory ability in areas with sparse vegetation and severe salinization, which is suitable for ecological quality evaluation in alpine saline areas. ② The spatial scale of ecological environment quality in the study area had obvious geographical differentiation, and the areas with poor ecological quality were mainly concentrated in the northern Amdo County, whereas the areas with excellent and good quality grades were mainly distributed in the central-western and southeastern Nagqu areas. On the temporal scale, the ecological environment of the study area as a whole showed an improvement trend over 32 years, and the vegetation cover in the central-western and southeastern areas increased significantly, which had a strong improvement effect on the ecological environment. The improvement area was 1 425.98 km², accounting for 99.82%. The mean value of SRSEI was 0.49, with an overall fluctuating upward trend and an average increase of 0.015 7 a⁻¹. ③ The land use pattern was the most driving influence factor in the change of ecological environment quality in the study area, with an average q value of 0.157 6 over multiple years, and the influence of environmental factors was low. The multi-factor interaction results showed that the ecological environment in the study area was the result of multiple factors acting together, all factors had synergistic enhancement under the interaction, the influence of human factors was gradually increasing, and the interaction of the net primary productivity (NPP) of vegetation and land use pattern was the main interactive control factor of ecological environment quality in the study area. This study can provide a theoretical basis for ecological environmental protection and sustainable development along the Nagqu to Amdo section.

收稿日期: 2023-03-30; 修订日期: 2023-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42277062)

作者简介: 傅楷翔 (1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境遥感与植被恢复, E-mail: 17861510018@163.com

* 通信作者, E-mail: jiaguodong@bjfu.edu.cn

Key words: ecological environment quality; remote sensing ecological index (RSEI); geodetector; Google earth engine; along the Qinghai-Xizang highway

青藏公路东起青海省西宁市,西止西藏拉萨市,是通往西藏里程较短和路面路基维护状况最好的公路^[1]。更是我国内地与青藏地区联系的重要交通纽带与国防战略要道^[2]。在修建过程中克服了一系列艰难条件,但与此同时不可避免地造成了沿线生态环境破坏。那曲至安多段位于青藏公路咽喉位置,是进入拉萨的必经之地,此段生态环境破坏最为严重^[3]。鉴于那曲至安多段独特的地理位置和重要的生态功能,高效、准确地获取青藏公路那曲至安多段沿线长时序生态环境质量状况空间分布格局并明晰其时间变异趋势与驱动机制具有重要意义。

青藏公路独特的地理环境使得传统研究中普遍存在数据获取困难和数据时效性过低等问题。凭借大尺度、长时序和受限少等优点,遥感技术已经成为生态环境研究领域一种不可或缺的手段^[4]。过往学者大多采用一至两个遥感指数对某一特定环境层面进行研究,如利用归一化水体指数(NDWI)监测三江源地区湖泊面积变化研究^[5]、基于地理探测器和多源数据对耕地土壤重金属来源控制因子及其交互作用识别研究^[6]。然而,自然界中生态环境变化十分复杂,使用单一遥感指数进行研究存在较大局限性与偶然性。徐涵秋^[7]于2013年提出一种集成了绿度(NDVI)、湿度(Wet)、热度(LST)和干度(NDBSI)这4个指标的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)模型可以有效地解决上述问题。该模型具有指标多样性、权重客观性、结果可视性和时空分析等优点^[8,9],为区域生态环境质量综合评价提供了新的思路。

RSEI凭借自身优势目前已被广泛应用于煤矿开采区^[10]、内陆河流域^[11]以及城市内部^[12]等地的生态环境评价研究。但RSEI主要是针对城市生态环境创建^[13],在青藏高原冻土和盐渍土占较大比重,若仅使用单一地面干度指标会对环境评价结果产生较大误差。正是由于研究区独特的生态环境条件使得原本的RSEI已经不适用做环境评价,因此需要针对研究区自身的生态特点对RSEI进行改进,使之更契合当前研究区的生态环境状况。在高寒盐渍化地区由于种植密度以及存活率等问题在一定程度上导致植被稀疏,使得RSEI中绿度指标(NDVI)的提取易受到背景的影响导致提取精度不高,SAVI指数(soil-adjusted vegetation index)在中、低植被覆盖区的提取总精度比NDVI高出2%~7%^[14],已被广泛应用到草地、干旱半干旱区以及生态修复地区的植被提取。土地盐渍化会造成土壤肥力下降,导致区域生态环境加速恶化,

归一化盐分指数(normalized differential salinity index, NDSI)基于多源卫星数据波段运算而来,可以精准监测研究区土壤盐渍化程度。参考国内外相关的标准、规范以及相关的研究成果^[15-18],在生态脆弱区进行道路沿线生态环境研究时,路域范围不应小于公路用地界外300 m。在充分考虑研究区域特殊的生态环境条件的基础上,将该区域高速公路路域适当地拓宽,使路域基本能够涉及到高速公路建设和运营过程中产生直接或间接影响的区域。因此,本文将生态脆弱区高速公路路域生态环境评价范围界定为公路中线两侧各5 km。

目前,国内外学者大多针对青藏公路那曲至安多段生态现状以及公路建设对生态环境线性切割影响等进行分析评价,但较少考虑区域生态环境质量的空间分布格局和时间变异趋势,定量探测生态环境质量的控制因子也较为鲜见。综上所述,本文基于GEE平台,以青藏公路那曲至安多段中线两侧各5 km为研究区域,选用1990~2022年Landsat影像作为数据源。在RSEI原基础上引入土壤调节植被指数(SAVI)和归一化盐分指数(NDSI),构建改进型盐渍遥感生态指数(salinity remote sensing ecological index, SRSEI),使之更适用于高寒盐渍化地区研究,从而更加正确地反映研究区生态质量状况。并以SRSEI为因变量,选取8个控制因子作为自变量,探究生态环境质量对自然与人为因子的响应特征,旨在为当地生态环境监测与治理提供科技方法支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

划定青藏公路那曲至安多段中轴线两侧各延伸5 km为研究区(图1),面积为1 428.6 km²。海拔范围介于4 449~5 138 m之间。气象特征主要表现为高原亚寒带季风半干旱和干旱气候。全区地貌以山地和丘陵为主,全区地带性土壤为棕壤,土壤类型主要为草毡土和草甸土,小部分沼泽土和风沙土。全年大风日100 d左右,多年平均气温-1.3~2.9℃,最高温24.2℃,最低温-40.5℃,年均降水量293~430 mm。全年日照时数为2 886 h以上。

1.2 数据来源与处理

如表1所示,本研究所用的数据包括Landsat5/8遥感影像、年均降水量、年均气温、高程(DEM)、植被净初级生产力(NPP)、PM_{2.5}浓度、经济生产总值(GDP)、人口密度(POP)和土地利用方式。本研究数据处理具体如下:在GEE平台中首先生成目标年份

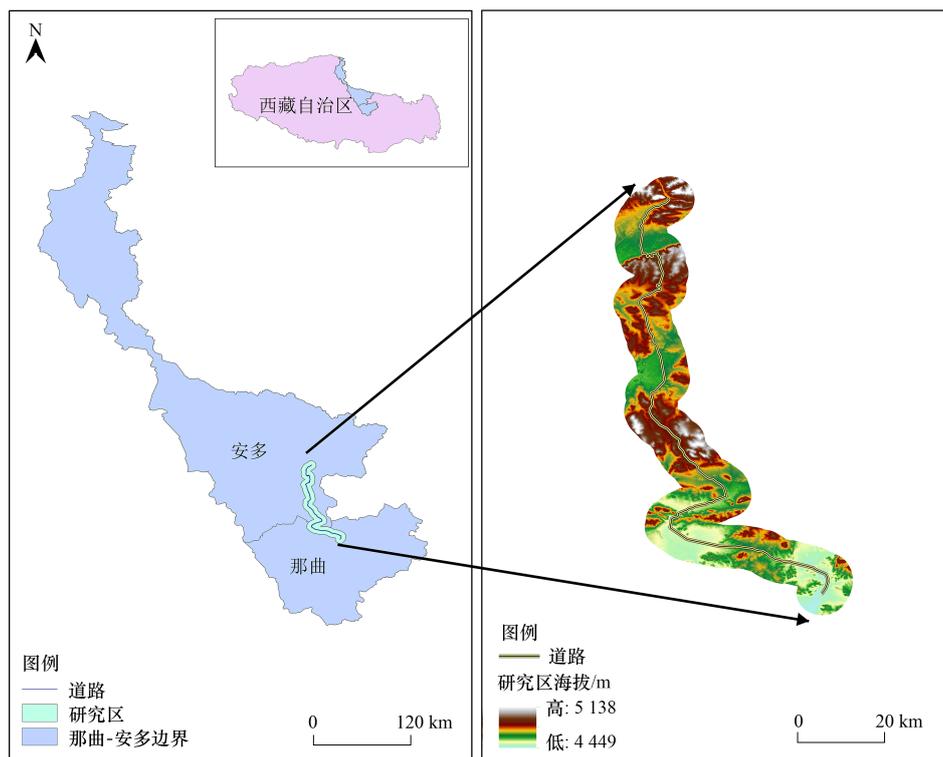


图1 研究区位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the location of the study area

6~9月(生长季)的Landsat 5-8影像,并利用去云函数进行去云处理.同时,使用JRC Monthly Water History, v1.4数据产品,进行水体掩膜以避免大范围水体对湿度主成分荷载分布的影响,得到目标年份的无云中值合成影像.随后在RSEI原基础上引入土壤调节植被指数(SAVI)和归一化盐分指数(NDSI),利用主成分分析法构建改进型盐渍遥感生态指数(SRSEI)并

使用研究区矢量边界裁剪出经过预处理后的研究区影像.再以研究区目标年份SRSEI均值作为因变量.利用ArcGIS 10.3平台在研究区创建600 m×600 m网格,将所有控制因子数据提取至对应SRSEI,去除异常值点,共5 493个样本点.最后将数据导入到基于RStudio的地理探测器中进行因子探测,探究各控制因子对SRSEI变化的驱动力解释强度.

表1 数据主要信息与来源

Table 1 Ecological factors main information and sources

| 类型 | 数据名称 | 分辨率/m | 数据来源 |
|------|----------------------|-------|--|
| 自然因子 | Landsat5/8 | 30 | Google Earth Engine (GEE) |
| | 年均降水量 | 1 000 | 中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.gscloud.cn) |
| | 年均气温 | 1 000 | 中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.gscloud.cn) |
| | 高程(DEM) | 30 | 中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.gscloud.cn) |
| | 植被净初级生产力(NPP) | 250 | Google Earth Engine (GEE) |
| | PM _{2.5} 浓度 | 500 | Google Earth Engine (GEE) |
| 人为因子 | 经济生产总值(GDP) | 1 000 | 国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn) |
| | 人口密度(POP) | 100 | 国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn) |
| | 土地利用方式 | 30 | 中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.gscloud.cn) |

1.3 改进型盐渍遥感生态指数(SRSEI)构建

1.3.1 遥感指数计算

根据前文提出的改进型遥感指数(SRSEI),计算并构建绿度、湿度、干度、盐度和热度这5个遥感指数.参考相关研究^[19-23],各指数所用指标和计算方法

如表2所示.在本研究中,改进型遥感指数(SRSEI)表达式为:

$$SRSEI = f(SAVI, WET, NDBSI, NDSI, LST) \quad (1)$$

式中,SRSEI为改进型遥感生态指数;SAVI为土壤调节植被指数;WET为湿度分量;NDBSI为干度指数;

表 2 SRSEI 各部分遥感生态指数计算公式

Table 2 Calculation formula for remote sensing ecological index of each part of SRSEI

| 表征 | 计算方法 | 参数含义 |
|------------|---|---|
| 绿度 (SAVI) | $SAVI = (1+L) \times (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red} + L)$ (2) | |
| 湿度 (WET) | $Wet_{TM} = 0.0315 \rho_{blue} + 0.2021 \rho_{green} + 0.3102 \rho_{red} + 0.1594 \rho_{NIR} - 0.6806 \rho_{SWIR1} - 0.6109 \rho_{SWIR2}$ (3) | |
| | $Wet_{OLI} = 0.1511 \rho_{blue} + 0.1973 \rho_{green} + 0.3283 \rho_{red} + 0.3407 \rho_{NIR} - 0.7117 \rho_{SWIR1} - 0.4559 \rho_{SWIR2}$ (4) | |
| 干度 (NDBSI) | $SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) - (\rho_{blue} + \rho_{NIR})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) + (\rho_{blue} + \rho_{NIR})]$ (5) | L 为土壤调节参数, 经验取值 0.5; ρ_{NIR} 为近红外波段反射率; ρ_{red} 为红波段反射率; ρ_{blue} 为蓝波段反射率; ρ_{green} 为绿波段反射率; ρ_{SWIR1} 为短波红外 1 波段反射率; ρ_{SWIR2} 为短波红外 2 波段反射率; SI 为裸土指数; IBI 为应用建筑指数 |
| | $IBI = \left\{ \frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \left[\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} + \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR1}} \right] \right\} / \left\{ \frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \left[\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} + \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR1}} \right] \right\}$ (6) | |
| 盐度 (NDSI) | $NDSI = (\rho_{red} - \rho_{NIR}) / (\rho_{red} + \rho_{NIR})$ (7) | |
| 热度 (LST) | $LST = T_b / [1 + (\lambda T_b / \rho) \ln \varepsilon] - 273.5$ (8) | T_b 为传感器处温度值, $L_{6/10}$ 为 TM 影像第 6 波段或 OLI 影像第 10 波段在传感器处的辐射值, λ 为热红外波段的中心波长, $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$, K_1 和 K_2 分别为传感器定标参数, ε 为地表比辐射率, DN 为影像像元的灰度值, gain 和 bias 分别为波段的增益和偏置值 |
| | $T_b = K_2 / \ln \left(\frac{K_1}{L_{6/10}} + 1 \right)$ (9) | |
| | $L_{6/10} = \text{gain} \times \text{DN} + \text{bias}$ (10) | |

NDSI 为盐度指数; LST 为地表温度。

1.3.2 SRSEI 模型构建

盐渍遥感生态指数 (SRSEI) 主要是利用主成分分析法 (PCA), 将上述 5 个生态指标进行耦合。各指标的权重由主成分变换生成的荷载值来客观确定。为避免因量纲不同所造成的 PCA 计算过程中各指标权重失衡问题, 需要在进行主成分变换之前对各指标进行归一化处理, 将其量纲都统一在 [0, 1] 之间。各指标通用归一化公式:

$$N_i = (I_i - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (11)$$

式中, N_i 为归一化后的各指标值; I_i 为归一化之前的指标值; I_{min} 和 I_{max} 分别为归一化之前的指标最小值和最大值。

进行归一化处理得到盐渍遥感生态指数 (SRSEI), 其值介于 [0, 1] 之间。SRSEI 值越接近 1, 生态环境状况越好, 反之越差。当 SAVI 和 WET 指标在 PC1 的载荷为负值, NDBSI、NDSI 和 LST 在 PC1 的载荷为正值时, 必须采用 “1 - PC1” 进行还原^[24]。

1.4 地理探测器模型

利用地理探测器中的因子探测和交互探测^[25], 分析影响青藏公路那曲至安多段沿线生态环境质量的驱动力。因子探测器所得结果 q 值越大, 说明该控制因子对生态环境的影响力越大。因子探测器计算公式及多因子交互类型为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\delta^2} \sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2 \quad (12)$$

式中, q 为某影响因子对 SRSEI 的影响力, $h = 1, 2, \dots, L$; L 为因变量 SRSEI 和自变量因子的分类数; N_h 和 N 分别为不同分级的区域和全区域内的样本数; δ_h^2 和 δ^2

分别为不同分级的区域和全区域内 SRSEI 的方差。

2 结果与分析

2.1 SRSEI 有效性及适用性分析

表 3 为 SRSEI 主成分分析结果, 9 个年份中 PC1 贡献率平均值 78.26%, 均大于 70%。说明第一主成分可以表征 5 个指标的大部分特征, 用主成分分析法研究目标区域生态环境状况是有效可行的。

5 个指标中绿度 (SAVI)、湿度 (Wet)、干度 (NDBSI) 和归一化盐分指数 (NDSI) 和热度 (LST) 平均荷载为 0.2824、0.4686、-0.4323、-0.3948 和 -0.5785, 表明各个指标分量对生态环境质量 SRSEI 的影响程度不同。热度的影响力最大, 湿度次之, 其次是干度、归一化盐分指数, 绿度对生态环境质量的影响最小。5 个指标中绿度与湿度荷载为正, 干度、归一化盐分指数和热度荷载为负。说明绿度与湿度对研究区 SRSEI 起到正面效应; 干度、归一化盐分指数和热度对研究区 SRSEI 起负面效应。这也符合真实的情况, 进而证明了 SRSEI 具有明显的适用性与生态意义。

2.2 研究区生态环境质量 SRSEI 时空变化特征

2.2.1 研究区生态环境质量 SRSEI 时间变化特征

图 2 反映了 1990~2022 年青藏公路那曲至安多段沿线 SRSEI 变化情况。结果表明: 研究区 SRSEI 呈现出 “先下降后上升” 的趋势, 1990~2022 年研究区生态环境质量整体向好; 1990 年 SRSEI 平均值仅为 0.39, 但 2022 年 SRSEI 平均值达 0.74, 增长幅度 87.6%, 增长率约为 0.0157 a^{-1} ; 1990~2000 年研究区 SRSEI 平均值由 0.39 降至 0.25, 下降幅度达 35.7%;

表 3 研究区 SRSEI 第一主成分分析
Table 3 Study area SRSEI first principal component analysis

| 年份 | 第一主成分 PC1 | | | | | 特征值 | 贡献率/% |
|------|-----------|----------|------------|----------------|----------|---------|-------|
| | 绿度 (SAVI) | 湿度 (Wet) | 干度 (NDBSI) | 归一化盐分指数 (NDSI) | 热度 (LST) | | |
| 1990 | 0.253 0 | 0.528 2 | -0.453 3 | -0.467 1 | -0.472 0 | 0.184 7 | 81.48 |
| 1995 | 0.301 3 | 0.585 6 | -0.331 2 | -0.293 2 | -0.608 5 | 0.248 4 | 77.10 |
| 2000 | 0.139 4 | 0.584 5 | -0.481 9 | -0.417 6 | -0.481 9 | 0.315 0 | 80.39 |
| 2005 | 0.305 9 | 0.536 1 | -0.423 0 | -0.397 5 | -0.531 0 | 0.229 7 | 71.86 |
| 2010 | 0.294 3 | 0.531 8 | -0.418 6 | -0.351 8 | -0.575 8 | 0.177 9 | 79.53 |
| 2015 | 0.297 1 | 0.476 2 | -0.445 4 | -0.378 2 | -0.586 2 | 0.087 0 | 82.49 |
| 2020 | 0.280 3 | 0.361 6 | -0.439 0 | -0.421 7 | -0.648 2 | 0.099 0 | 80.33 |
| 2021 | 0.325 1 | 0.313 1 | -0.421 1 | -0.388 6 | -0.684 1 | 0.087 0 | 74.40 |
| 2022 | 0.345 1 | 0.328 0 | -0.464 8 | -0.421 6 | -0.616 0 | 0.109 5 | 78.02 |
| 平均值 | 0.282 4 | 0.468 6 | -0.432 3 | -0.394 8 | -0.578 5 | 0.169 4 | 78.26 |

2000年至2022年由于国家大力推行西藏地区生态环境建设,研究区SRSEI平均值波浪式上升,从2000年的0.25增至2022年的0.74,增长幅度极大。

从SRSEI的5个分指标来看(图3),1990~2022年,表征研究区地表植被覆盖与土壤含水量的绿度(SAVI)和湿度(Wet)分别上升0.1071和0.1847,平均增幅为 $0.0051(10a)^{-1}$ 、 $0.0582(10a)^{-1}$,变化趋势与SRSEI极度吻合;对SRSEI起负荷载的干度(NDBSI)、归一化盐分指数(NDSI)和热度(LST)分别下降0.1056、0.0334和0.0108,平均降幅 $0.0331(10a)^{-1}$ 、 $0.0105(10a)^{-1}$ 和 $0.0034(10a)^{-1}$,与SRSEI变化趋势相反,说明干度、归一化盐分指数和热度越高,地表土壤板结、土壤盐渍化以及岩石裸露、地表温度偏高等问题越严重,研究区生态环境质量越差。

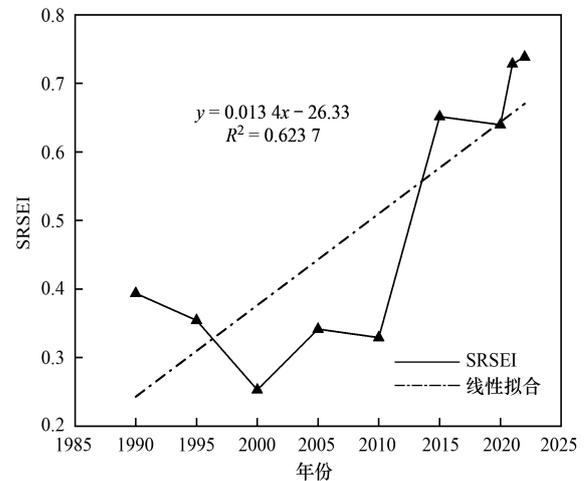


图 2 1990~2022年研究区 SRSEI 变化情况与线性拟合结果
Fig. 2 Changes in SRSEI in the study area from 1990 to 2022 with linear fit results

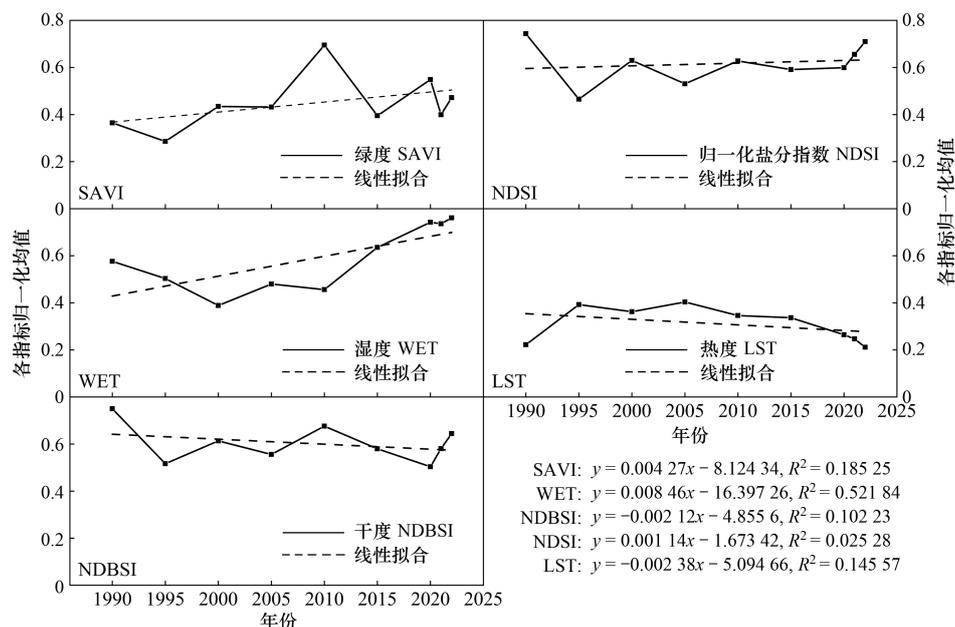


图 3 1990~2022年研究区 SRSEI 各分指标变化情况与线性拟合结果

Fig. 3 Changes in SRSEI sub-indicators in the study area from 1990 to 2022 with linear fit results

2.2.2 研究区生态环境质量 SRSEI 空间变化特征

为了从空间角度更直观、定量地分析研究区生态质量 SRSEI, 基于 ArcGIS 10.3 平台生成研究区 9 个时相 SRSEI 空间分布格局(图 4)。由图 4 知, 研究区 SRSEI 值表现出明显的地理分异性, 呈现出“北低南高”态势。结合外业调查及遥感影像解译, 研究区北部为那曲市安多县, 安多县平均海拔 4 800 米以上, 永久冻土及高大冰川广为分布, 植被稀疏, 生态环境恶劣。而南部为那曲市色尼区, 海拔较北部偏低, 有少量植被。SRSEI 值与生态环境实际状况完全吻合。

通过等间距分级法将 SRSEI 分为优(0.8~1.0]、良(0.6~0.8]、中(0.4~0.6]、较差(0.2~0.4]和差[0.0~0.2]这 5 个等级^[26], 统计各年份不同等级面积情况(图 5)。结果表明: 32 年间, 研究区整体生态环境

质量良好, 等级为优和良的区域占比明显增加、为差和较差区域占比有所降低, SRSEI 优势区域等级由较差(1990~2010 年)向良好等级(2015~2022 年)转变。其中 SRSEI 等级为差、较差和中等的区域面积占比分别呈先上升后下降、波动性下降和持续性下降趋势, 差等级区域面积占比在 2000 年出现峰值(25.43%), 最低值出现在 2022 年(不足万分之一), 空间上由全区均匀分布向北部集中转化; 较差等级区域面积从 1990 年的 804.66 km² 下降至 2022 年的 0.04 km²; 中等等级区域面积占比由 1990 年的 40.74% 下降至 2022 年的 0.01%; SRSEI 等级为良和优的区域呈向好趋势, 所占比例由 1990 年的 2.17% 提高到了 2022 年的 99.23%, 生态环境得到明显改善。尤其是 2015 年以来, 优等级区域面积大幅度提升, 主要分布在安多县城以南和研究区中部。

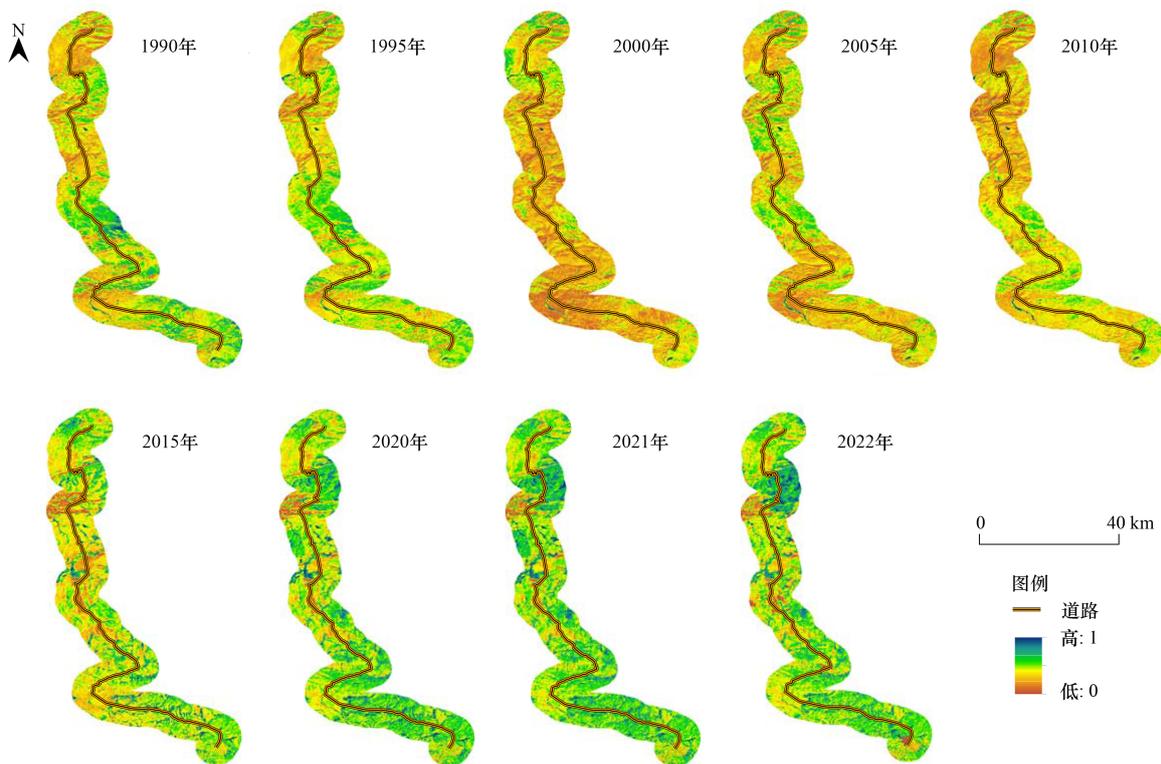


图 4 1990~2022 年 SRSEI 空间分布格局

Fig. 4 Spatial distribution pattern of SRSEI from 1990 to 2022

2.3 研究区生态环境质量 SRSEI 时间变异趋势

为进一步明晰研究区生态环境变化趋势, 1990~2020 年以 10 a 为间隔; 2020~2022 年以 1 a 为间隔, 表 4 和图 6 反映了研究区生态环境质量面积变化情况及时间变异趋势。结果表明: 1990~2022 年, 研究区生态环境处于明显改善的趋势, 从整体来看, 研究区 32 年间生态改善面积 1 425.98 km² 占比 99.82%, 生态退化面积 2.62 km² 占比 0.18%, 生态改善面积远大于生态退化面积。

从不同年份间生态环境变化面积来看(表 4), 1990~2000 年研究区生态环境整体呈急剧恶化的趋势, 恶化面积占比达 96.93%, 研究区全域均出现恶化情况; 2000~2010 年研究区生态环境出现明显改善趋势, 占比 87.49%, 虽然在北部安多县城及其附近地区仍存在生态恶化现象, 但是生态改善面积首次超过生态恶化面积, 表明这 10 年间研究区整体生态环境得到了明显的改善; 2010~2020 年和 2020~2021 年, 研究区生态环境改善趋势均有所提高且全域出现改善

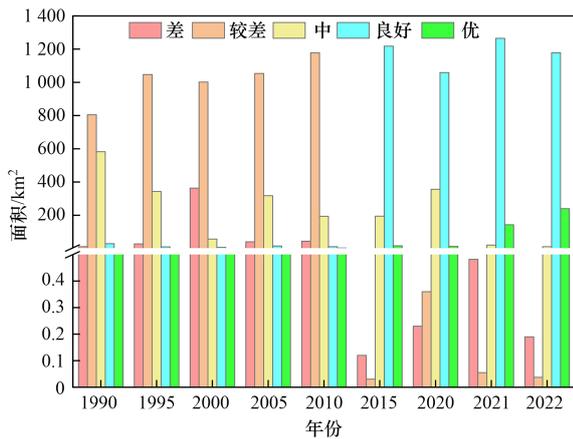


图5 1990~2022年研究区不同等级生态环境面积
Fig. 5 Ecological environment area at different levels in the study area from 1990 to 2022

情况,生态改善面积占比分别为 99.50% 和 99.99%,较 2000~2010 年分别提高了 12.0% 和 12.49%;2021~2022 年研究区生态环境仍处改善趋势但改善幅度减弱,质量改善面积占比为 99.82%,低于 2020~2021 年 (99.99%)。

2.4 生态环境质量 SRSEI 控制因子分析

2.4.1 单因子探测结果

基于 RStudio 地理探测器单因子探测结果如表 5 所示,自然因素中,植被净初级生产力(NPP)是研究区生态环境 SRSEI 变化中驱动力最高的控制因子,其与 PM_{2.5} 浓度多年平均 q 值为 0.133 2 和 0.063 3,在所有因子中排序 2、3,二者对 SRSEI 变化的驱动力强度

较大;年平均气温多年 q 值介于 0.026 9~0.080 4 之间,年平均降水量多年 q 值介于 0.015 9~0.069 6 之间,表明气象因素相较其它因子 q 值较低,对研究区 SRSEI 空间变化驱动力强度不高,且年平均气温的影响力小于年平均降水量;高程因子多年份最高排序 4,平均排序 7,说明地形因素对研究区 SRSEI 变化无明显驱动作用。

人为因素中,土地利用方式的多年 q 值高于其它因子,在所有控制因子中对 SRSEI 变化的驱动力最大,表明 32 年来研究区生态环境变化受当地人为活动因素的影响高于自然因素。其它人为因素中,人口密度(POP)与地区生产总值(GDP)平均排序 6、8,表明研究区 SRSEI 变化与人口空间分布及相关经济活动关系较弱。

所有研究年份中控制因子的驱动力强度均发生了一定变化,多数因子的驱动力相对强度未发生较大改变,然而近 15 年(2005~2020 年)来植被净初级生产力(NPP)的驱动力强度持续增强, q 值从 2005 年的 0.006 4 提升至 2020 年的 0.237 2,驱动力强度排序也由 2005 年的第 8 位上升至 2020 年的第 1 位,PM_{2.5} 浓度从 2005 年的第 7 位(0.035 7)升至 2020 年的第 4 位(0.048 9),根据现有政策及研究结果,2010 年以来,国家高度重视西藏地区生态文明建设及青藏公路路域植被保护与恢复。西藏地区植被覆盖度显著提升,结合其 q 值的变化可以发现,研究区域内生态环境质量受植被净初级生产力及空气质量的影响越来越大。

表 4 研究区 1990~2022 年 SRSEI 时间变异趋势

Table 4 Trends in temporal variation of SRSEI in the study area from 1990 to 2022

| 变化类型 | 1990~2000 年 | 2000~2010 年 | 2010~2020 年 | 2020~2021 年 | 2021~2022 年 | 1990~2022 年 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 恶化面积/km ² | 1 384.79 | 178.68 | 7.1 | 0.054 | 186.87 | 2.62 |
| 改善面积/km ² | 43.81 | 1 249.92 | 1 421.5 | 1 428.55 | 1 241.73 | 1 425.98 |
| 变异趋势 | 急剧恶化 | 明显改善 | 改善且趋势增加 | | 改善但趋势降低 | 明显改善 |

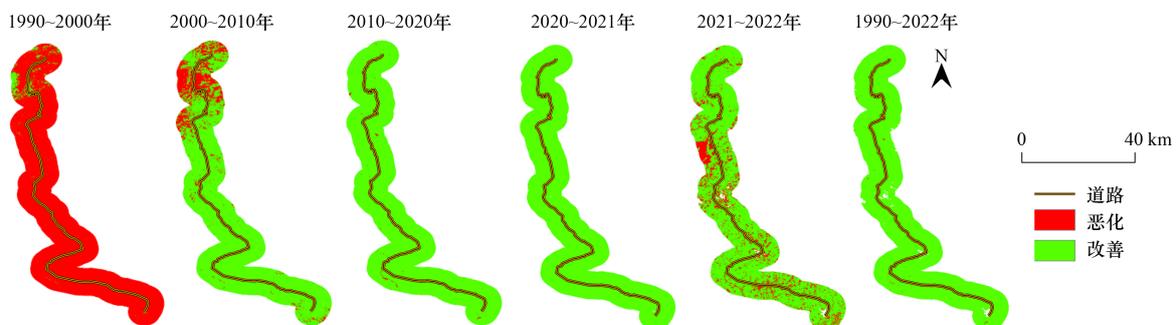


图 6 不同年份间生态环境状况变异趋势

Fig. 6 Trends in variation of ecological conditions between years

2.4.2 交互探测结果

地理探测器交互结果如图 7 所示:与单因子比

较,青藏公路那曲至安多沿线生态环境质量 SRSEI 变化对任意双因子交互作用的响应更加强烈,所有交

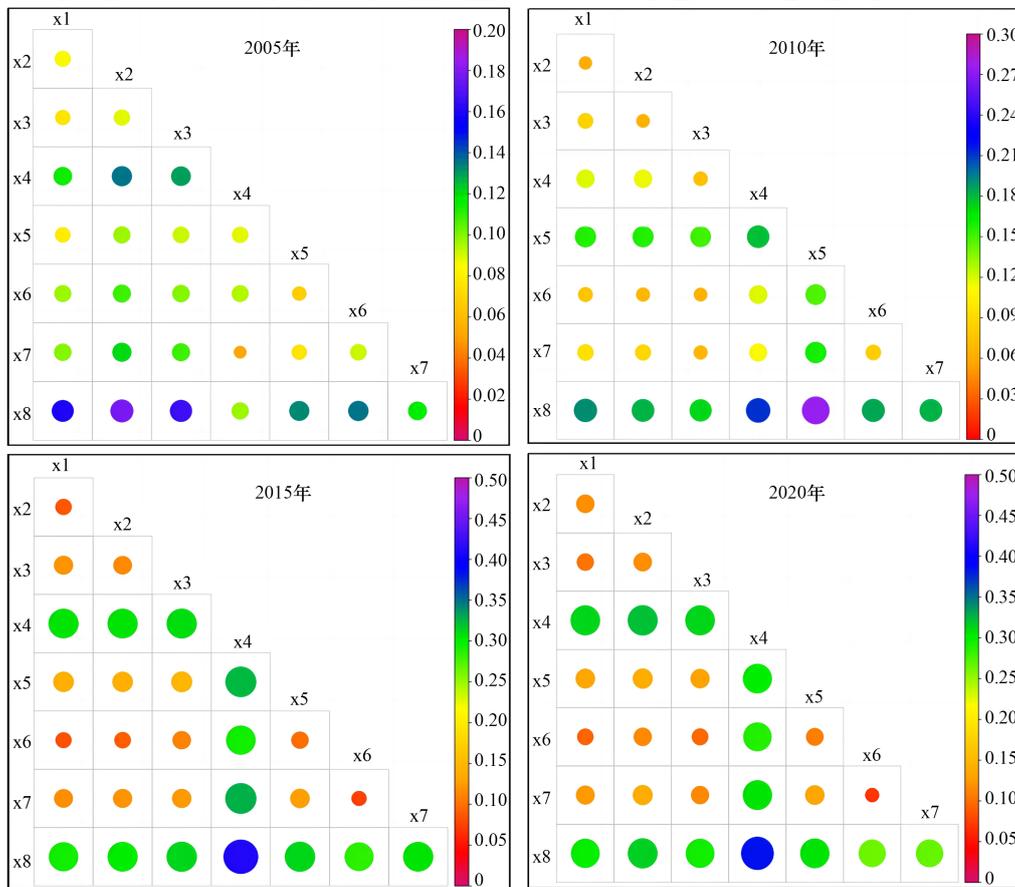
表 5 不同年份因子探测结果
Table 5 Factor detection results in different years

| 控制因子 | 2005年 | | 2010年 | | 2015年 | | 2020年 | | 2005~2020平均值 | |
|----------------------|---------|----|---------|----|---------|----|---------|----|--------------|----|
| | q 值 | 排序 | q 值 | 排序 |
| 高程(DEM) | 0.067 5 | 4 | 0.022 1 | 7 | 0.023 1 | 7 | 0.030 9 | 6 | 0.035 9 | 7 |
| 年均气温 | 0.080 4 | 1 | 0.035 9 | 5 | 0.026 9 | 6 | 0.057 9 | 3 | 0.050 3 | 4 |
| 年均降水量 | 0.069 6 | 3 | 0.015 9 | 8 | 0.042 4 | 4 | 0.037 6 | 5 | 0.041 4 | 5 |
| 植被净初级生产力(NPP) | 0.006 4 | 8 | 0.054 2 | 4 | 0.234 9 | 1 | 0.237 2 | 1 | 0.133 2 | 2 |
| PM _{2.5} 浓度 | 0.035 7 | 7 | 0.122 8 | 2 | 0.045 6 | 3 | 0.048 9 | 4 | 0.063 3 | 3 |
| 经济生产总值(GDP) | 0.052 2 | 5 | 0.030 6 | 6 | 0.014 5 | 8 | 0.004 6 | 8 | 0.025 5 | 8 |
| 人口密度(POP) | 0.048 8 | 6 | 0.059 9 | 3 | 0.029 1 | 5 | 0.007 1 | 7 | 0.036 2 | 6 |
| 土地利用方式 | 0.079 1 | 2 | 0.148 4 | 1 | 0.200 0 | 2 | 0.202 8 | 2 | 0.157 6 | 1 |

互探测结果均属于双因子增强和非线性增强两种交互作用类型. 4个研究年份中交互作用最强驱动力分别是: 年均气温∩土地利用方式(2005年, $q = 0.1788$)、PM_{2.5}浓度∩土地利用方式(2010年, $q = 0.2738$)和植被净初级生产力(NPP)∩土地利用方式(2015、2020年, $q = 0.3633$ 、 0.3870). 2005~2020年所有因子交互探测结果显示: 土地利用方式和植被净初级生产力(NPP)与其他因子间交互作用的驱动力明显要高于其余控制因子间的交互作用, 结合前文中单因子探测结果可以看出, 研究区 SRSEI 变化

与这2个因子密切相关.

植被净初级生产力(NPP)与土地利用方式的交互作用对研究区 SRSEI 影响最大, 植被覆盖度提高对研究区生态环境治理和恢复起着关键作用. 土地利用方式变化主要受城市扩张影响. 因此恢复和保护当地生态环境, 要注重保护植被和合理开发利用土地资源. 此外, 植被净初级生产力(NPP)与土地利用方式的交互作用在 2005、2015 和 2020 年均未呈现非线性增强的协同作用, 表明以植被净初级生产力(NPP)为代表的植被状况变化在不同人为活动背景,



x1 表示高程, x2 表示年均气温, x3 表示年均降水量, x4 表示植被净初级生产力(NPP), x5 表示 PM_{2.5} 浓度, x6 表示地区生产总值(GDP), x7 表示人口密度(pop), x8 表示土地利用方式; 色柱由红色至紫色表示交互作用对生态环境质量的驱动力逐渐增强

图 7 不同年份交互探测结果

Fig. 7 Interactive detection results in different years

尤其是在不同土地利用方式下,对SRSEI变化的驱动力并不明显.究其原因,应是由于国家大力在藏区及青藏公路路域进行生态环境建设和植被恢复,因此即使当地人为活动逐年增加,也不会对研究区生态环境改善产生遏制作用.

3 讨论

3.1 生态环境质量SRSEI时间变化特征与空间分布格局

时间尺度上,在环境变化与人为活动的双重影响下,1990~2022年研究区生态环境质量SRSEI呈“先下降后上升”趋势.该结论同前人的研究结果一致^[27],一方面归功于研究区近年来不断增加的降水量以及充足的日照时长给植被生长提供了良好的环境条件,促进生态环境恢复^[28];另一方面与研究区治理措施密不可分,过去开发建设项目的动工和因人口增加等导致研究区域生态环境严重恶化.自2000年以来,归功于“西藏生态安全屏障保护与建设”、“建设美丽西藏”、“西藏两江四河流域造林绿化”、“退化草原修复治理”和“重点区域防护林体系建设”等一系列重大林业生态工程的相继实施,以及统筹山水林田湖草沙冰一体化保护和系统化治理、切实保护好地球第三极生态工作的开展,促进了研究区植被恢复与生态系统修复,从而提高了生态环境质量SRSEI.这与已有研究结果一致^[29].但生态环境质量SRSEI在2005~2010年和2015~2020年持续下降(图2),这主要是受青藏公路第五次改建工程和以城市扩张为代表的社会经济活动增强的影响,从而引起的区域生态环境质量下降,这与丁佳等^[30]研究的结果一致.

空间尺度上,研究区SRSEI整体呈“北低南高”的空间分布格局,结合行政区划,研究区北部为安多县城,一方面,北部地区平均海拔4800m以上,永久冻土和高大冰川广为分布,植被类型单一,植被基底差,生态环境恶劣;另一方面,北部地区水热条件差,降水稀少,热量匮乏,不利于植被生长,加之相关的林业生态工程很难在此地发挥作用,因此北部地区SRSEI较南部低^[31].而南部为那曲市色尼区,海拔较北部偏低,地形以浑圆状高原丘陵为主,植被类型较丰富,水热条件好.虽然较北部地区人类活动强度大,城市化进程快,但作为地级市,南部那曲市生态建设规划合理,生态安全屏障构建完备,生态保护措施得当,林业生态工程可持续发挥较大作用,故南部地区SRSEI高于北部地区^[32].

3.2 生态环境质量SRSEI时间变异趋势

1990~2022年,从整体来看,研究区生态环境质量SRSEI处于明显改善的趋势,32年间先后经历“急剧恶化”、“明显改善”、“改善且趋势增加”和“改善但趋势降低”这4个阶段.这与王洁等^[33]和Zhang等^[34]研究的结果基本一致.1990~2000年,研究区生态环境恶化区域面积为1384.79km²,占比达96.93%.通过相关研究可知1991年8月至1996年8月^[35],交通部投资8.5亿元对青藏公路的病害路段进行整治.对339.27km的路段进行了整治和改造.改造期间不可避免地对生态系统造成负面影响.这与本文的结果相吻合.进入21世纪以来,那曲市生态环境状况显著改善.2000~2010年生态改善面积为1249.92km²,占比87.49%,生态改善面积大于生态退化面积.这与已有研究的结果一致^[36],应是由于此阶段西藏自治区在注重公路交通发展的同时也开展公路沿线生态保护与植被恢复工作.2010~2021年得益于《西藏生态安全屏障保护与建设规划》(2010年)获得国务院批准,青藏公路沿线生态文明建设进一步扎实推进,公路生态环境继续保持改善且趋势增加,该结论同前人的研究结果一致^[37].结合研究区内现有生态环境的发展现状,青藏公路那曲至安多段沿线生态环境建设下一步应当以加强土地利用方式管理、促进植被恢复和提高PM_{2.5}浓度检测水平与空气质量为主.

3.3 不同控制因子对生态环境质量SRSEI变化的影响

区域生态因素变化对生态环境质量的影响已经被广泛关注^[38-41],不同控制因子通过单因子或者与其他因子进行交互作用来对生态环境质量产生影响^[42],诸多与生态环境质量变化有关的研究表明,不同控制因子对生态环境变化驱动力存在明显区别,不同研究区域驱动力最强因子也有较大差别^[43].在本研究中,青藏公路那曲至安多段沿线SRSEI受自然因子与人为因子协同影响,不同控制因子对SRSEI驱动力差异明显.

自然因子中,植被净初级生产力(NPP)与PM_{2.5}浓度是驱动研究区生态环境质量SRSEI变化的关键因素.该研究结果与前人一致.植被净初级生产力(NPP)与PM_{2.5}浓度会对研究区空气质量产生影响且与区域生态敏感性、空气质量安全等都拥有着极为密切的关系^[44],是对SRSEI具有决定性影响的自然驱动力.因子探测结果显示,二者对青藏公路那曲至安多段沿线生态环境质量空间分异的影响均有所提升,与PM_{2.5}浓度相比,植被净初级生产力(NPP)对研究区生态环境质量SRSEI的影响更为明显.由于研究

区处于青藏高原地区,空气污染较轻,所以植被净初级生产力(NPP)对生态环境质量空间分布可能更为重要. 年均气温与年均降水量是驱动研究区生态环境质量SRSEI变化的次关键因素,该研究结果与前人的一致. 气温受太阳红外波段辐射与大气逆反射综合作用的影响,主要通过影响植物的呼吸、光合、蒸腾等生理代谢过程来影响其生存和生长发育状况^[45]. 与SRSEI中热度指标有直接关系,而降水虽与植被生长、水土保持和生物群落丰富度等自然现象密切相关^[46],但个别年份的降水变化很难对生态环境造成明显影响,此外,青藏公路那曲至安多降水量相对稀少^[47],故热量条件可能对研究区内SRSEI空间分异更加重要并与降水发生协同作用,应是二者对SRSEI影响不大且排序相近的原因.

人为因子中,土地利用方式是驱动研究区生态环境质量SRSEI变化的关键因素,同时也是包括自然因子在内的所有因子中驱动力最强的控制因子,该研究结果与前人的一致^[48]. 土地利用方式会直接改变地表状况,进而引起SRSEI变化. 有相关研究表明青藏公路那曲至安多段沿线生态环境质量与研究区内城市化发展及生态移民的关系最为密切. 人口密度(POP)与经济生产总值(GDP)是驱动研究区生态环境质量SRSEI变化的次关键因素,两者能够直观反映研究区内人类聚集程度与经济发展水平,经济活动在产生GDP的同时也必然对生态环境产生影响^[49]. 地区生产总值(GDP)因子的解释力强度在近年来均不高,同时人口密度(POP)的驱动力强度相较于地区生产总值(GDP)增加更为明显,一定程度说明研究区内SRSEI与人口分布的关系更为密切,该结论同前人的研究结果一致^[50].

3.4 不足与改进

本研究运用GEE平台构建SRSEI并引用地理探测器对其进行驱动机制分析,其中存在一些不足. 首先本文采用的8种控制因子遥感图像分辨率不统一,会对结果有微量影响. 今后的研究尽量沿用同一分辨率影像集,其次本研究根据研究区域特点选用了8种控制因子,对于推广到其他人口更为密集,经济活动更加频繁的地区有一定难度,在以后的研究中可以加入例如夜间灯光指数进一步优化.

4 结论

(1)基于GEE平台构建改进型盐渍遥感生态指数(SRSEI),可以高效精准地获取研究区SRSEI空间分布格局与时间变异趋势,且与原始RSEI相比SRSEI对高寒环境下植被稀疏、盐渍化严重地区的遥感指数提取更加精确.

(2)1990~2022年青藏公路那曲至安多段沿线SRSEI时间上呈“先下降后上升”趋势,增长幅度87.6%,增长率约为 0.0157 a^{-1} ,空间上呈现出“北低南高”的分布格局. 生态环境处于明显改善的趋势,生态改善面积 1425.98 km^2 占比99.82%.

(3)从对研究区32年间SRSEI控制因子驱动力强度分析来看,土地利用方式是最强的单因子驱动力,植被净初级生产力(NPP)∩土地利用方式是最强的交互驱动力. 植被净初级生产力(NPP)对SRSEI的驱动力强度上升趋势明显,表明研究区SRSEI与植被保护的关系更加密切.

参考文献:

- [1] Yao T D, Thompson L, Yang W, *et al.* Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Nature Climate Change*, 2012, **2**(9): 663-667.
- [2] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极 [J]. *中国科学院院刊*, 2017, **32**(9): 924-931.
Yao T D, Chen F H, Cui P, *et al.* From Tibetan Plateau to third pole and pan-third pole [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, **32**(9): 924-931.
- [3] 柏建坤, 王建力, 李潮流, 等. 藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1498-1501.
Bai J K, Wang J L, Li C L, *et al.* Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1498-1501.
- [4] Shan W, Jin X B, Ren J, *et al.* Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **239**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118126.
- [5] 郝亚蒙. 基于遥感的三江源湖泊面积变化及影响因子分析 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
Hao Y M. Variation of lake area and its impact factors in Three-river Headwaters Region based on remote sensing [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [6] 张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 等. 基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 2177-2191.
Zhang H Z, Cui W G, Liu S H, *et al.* Identifying driving factors and their interacting effects on sources of heavy metal in farmland soils with geodetector and multi-source data [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2177-2191.
- [7] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(5): 889-897.
Xu H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(5): 889-897.
- [8] Liao W H, Jiang W G. Evaluation of the spatiotemporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(15), doi: 10.3390/rs12152462.
- [9] Huang H P, Chen W, Zhang Y, *et al.* Analysis of ecological quality in Lhasa metropolitan area during 1990-2017 based on remote sensing and Google Earth Engine platform [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, **31**(2): 265-280.
- [10] 季翔林, 阎跃观, 郭伟, 等. 耦合遥感生态指数模型的山西省及规划矿区生态环境评价 [J]. *煤田地质与勘探*, 2023, **51**(3): 103-112.

- Ji X L, Yan Y G, Guo W, *et al.* Ecological environment assessment of Shanxi Province and planned mining area based on coupling remote sensing ecological index (RSEI) model[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, **51**(3): 103-112.
- [11] 田智慧, 尹传鑫, 王晓蕾. 鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(2): 816-827.
- Tian Z H, Yin C X, Wang X L. Dynamic monitoring and driving factors analysis of ecological environment quality in Poyang Lake basin[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 816-827.
- [12] 罗镛基, 王宏涛, 王成. 基于改进遥感生态指数的甘肃省古浪县生态质量评价[J]. *干旱区地理*, 2023, **46**(4): 539-549.
- Luo R J, Wang H T, Wang C. Ecological quality evaluation of Gulang County in Gansu Province based on improved remote sensing ecological index[J]. *Arid Land Geography*, 2023, **46**(4): 539-549.
- [13] 张静, 杨丽萍, 贡恩军, 等. 基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测[J]. *生态学报*, 2023, **43**(5): 2114-2127.
- Zhang J, Yang L P, Gong E J, *et al.* Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(5): 2114-2127.
- [14] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, **25**(3): 295-309.
- [15] Forman R T T, Friedman D S, Fitzhenry D, *et al.* Ecological effects of roads: Toward three summary indices and an overview for North America[A]. *Habitat Fragmentation and Infrastructure*[C]. The Netherlands: Ministry of Transport, Public Works and Water Management, 1998. 207-231.
- [16] Forman R T T. Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States[J]. *Conservation Biology*, 2000, **14**(1): 31-35.
- [17] 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 等. 高速公路沿线PM_{2.5}中重金属污染特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3916-3923.
- Li X B, Liao Z W, Zhao H, *et al.* Huang P. Pollution characteristics of heavy metals in PM_{2.5} near highway [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3916-3923.
- [18] 彭宇. 山区高速公路生态环境评价理论与方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- Peng Y. Expressway ecological environment evaluation theory and method[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [19] 姜俊狄, 李嘉, 陈焱明, 等. 适用于秋冬季节RSEI的三峡库区生态质量评估[J]. *测绘通报*, 2023, (10): 14-19.
- Jiang J D, Li J, Chen Y M, *et al.* Ecological quality assessment of the Three Gorges Reservoir area for fall and winter RSEI [J]. *Surveying and Mapping Bulletin*, 2023, (10): 14-19.
- [20] Ali Baig M H, Zhang L F, Shuai T, *et al.* Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance [J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, **5**(5): 423-431.
- [21] Van Nguyen O, Kawamura K, Trong D P, *et al.* Temporal change and its spatial variety on land surface temperature and land use changes in the Red River Delta, Vietnam, using MODIS time-series imagery [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(7): 464.
- [22] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. *生态学报*, 2013, **33**(24): 7853-7862.
- Xu H Q. Creation of an urban remote sensing ecological index and its application [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(24): 7853-7862.
- [23] Khan N M, Rastoskuev V V, Sato Y, *et al.* Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, **77**(1-3): 96-109.
- [24] 徐涵秋, 邓文慧. MRSEI指数的合理性分析及其与RSEI指数的区别[J]. *遥感技术与应用*, 2022, **37**(1): 1-7.
- Xu H Q, Deng W H. Rationality analysis of MRSEI and its difference with RSEI [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, **37**(1): 1-7.
- [25] Shi T Z, Hu Z W, Shi Z, *et al.* Geo-detection of factors controlling spatial patterns of heavy metals in urban topsoil using multi-source data [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**: 451-459.
- [26] 王芳, 李文慧, 林妍敏, 等. 1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2518-2527.
- Wang F, Li W H, Lin Y M, *et al.* Spatiotemporal pattern and driving force analysis of ecological environmental quality in typical ecological areas of the Yellow River basin from 1990 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2518-2527.
- [27] 刘洋洋, 章钊颖, 同琳静, 等. 中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(2): 349-363.
- Liu Y Y, Zhang Z Y, Tong L J, *et al.* Spatiotemporal dynamics of China's grassland NPP and its driving factors [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(2): 349-363.
- [28] 王小丹, 程根伟, 赵涛, 等. 西藏生态安全屏障保护与建设成效评估[J]. *中国科学院院刊*, 2017, **32**(1): 29-34.
- Wang X D, Cheng G W, Zhao T, *et al.* Assessment on protection and construction of ecological safety shelter for Tibet [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, **32**(1): 29-34.
- [29] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2000—2015年青藏高原植被NPP时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(10): 2511-2527.
- Chen S T, Guo B, Yang F, *et al.* Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(10): 2511-2527.
- [30] 丁佳, 刘星雨, 郭玉超, 等. 1980—2015年青藏高原植被变化研究[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(2): 288-296.
- Ding J, Liu X Y, Guo Y C, *et al.* Study on vegetation change in the Qinghai-Tibet Plateau from 1980 to 2015 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(2): 288-296.
- [31] 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 He, 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.
- [32] 王玉琦. 21世纪青藏高原植被变化的预测[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- Wang Y Q. Projected future changes in vegetation over the Tibetan Plateau in the twenty-first century [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2018.
- [33] 王洁, 摆万奇, 田国行. 青藏高原景观生态风险的时空特征[J]. *资源科学*, 2020, **42**(9): 1739-1749.
- Wang J, Bai W Q, Tian G X. Spatiotemporal characteristics of landscape ecological risks on the Tibetan Plateau [J]. *Resources Science*, 2020, **42**(9): 1739-1749.
- [34] Zhang X Z, Li M, Wu J S, *et al.* Alpine grassland aboveground biomass and theoretical livestock carrying capacity on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, **13**(1):

- 129-141.
- [35] 莫兴国, 刘文, 孟铖铖, 等. 青藏高原草地产量与草畜平衡变化[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(7): 2415-2425.
Mo X G, Liu W, Meng C C, *et al.* Variations of forage yield and forage-livestock balance in grasslands over the Tibetan Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(7): 2415-2425.
- [36] 冯雨晴. 青藏高原冰川冻土变化及其生态与水文效应研究——以黄河源、雅鲁藏布江流域和冻土退化带为典型区[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
Feng Y Q. Changes of glaciers and permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and their ecological and hydrological effects—take the Yellow River source, Brahmaputra river basin and permafrost degradation turning Zone as typical study region [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [37] 张晓瑶, 陆林, 虞虎, 等. 青藏高原土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(3): 887-898.
Zhang X Y, Lu L, Yu H, *et al.* Multi-scenario simulation of the impacts of land-use change on ecosystem service value on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(3): 887-898.
- [38] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 等. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策[J]. 中国科学院院刊, 2021, **36**(11): 1298-1306.
Fu B J, Ouyang Z Y, Shi P, *et al.* Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, **36**(11): 1298-1306.
- [39] Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss [J]. Nature Climate Change, 2018, **8**(2): 135-140.
- [40] Huang W J, Duan W L, Chen Y N. Unravelling lake water storage change in Central Asia: Rapid decrease in tail-end lakes and increasing risks to water supply [J]. Journal of Hydrology, 2022, **614**. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128546.
- [41] Deng H J, Chen Y N. Influences of recent climate change and human activities on water storage variations in Central Asia [J]. Journal of Hydrology, 2017, **544**: 46-57.
- [42] 张伟, 杜培军, 郭山川, 等. 改进型遥感生态指数及干旱区生态环境评价[J]. 遥感学报, 2023, **27**(2): 299-317.
Zhang W, Du P J, Guo S C, *et al.* Enhanced remote sensing ecological index and ecological environment evaluation in arid area [J]. Journal of Remote Sensing, 2023, **27**(2): 299-317.
- [43] Hu C, Song M, Zhang A L. Dynamics of the eco-environmental quality in response to land use changes in rapidly urbanizing areas: A case study of Wuhan, China from 2000 to 2018 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2023, **33**(2): 245-265.
- [44] 杨欣, 杨元琴, 李红, 等. 基于气象条件指数的我国重点区域PM_{2.5}和臭氧复合污染气象影响评估[J]. 环境科学, 2022, **44**(12): 6433-6440.
Yang X, Yang Y Q, Li H, *et al.* Meteorological impact assessment of PM_{2.5} and O₃ complex pollution in key regions of China based on meteorological conditions index [J]. Environmental Science, 2022, **44**(12): 6433-6440.
- [45] 苏天成, 王姚瑶, 向琳, 等. 营林措施对成都绕城高速路域杨树人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28**(5): 1144-1150.
Su T C, Wang Y Y, Xiang L, *et al.* Effects of forest management on community structure and species diversity in poplar plantations of the Chengdu ring expressway area [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, **28**(5): 1144-1150.
- [46] 王泰华, 杨大文. 2001—2020年三江源冻土区植被物候变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2023, **45**(2): 1-13.
Wang T H, Yang D W. Variation characteristics of vegetation phenology during 2001-2020 on the frozen ground zone of the Three-River source region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, **45**(2): 1-13.
- [47] 田立德, 姚檀栋, 沈永平, 等. 青藏高原那曲河流域降水及河流水体中氧稳定同位素研究[J]. 水科学进展, 2002, **13**(2): 206-210.
Tian L D, Yao T D, Shen Y P, *et al.* Study on stable isotope in river water and precipitation in Naqu River basin, Tibetan Plateau [J]. Advances in Water Science, 2002, **13**(2): 206-210.
- [48] Chen C, Park T, Wang X H, *et al.* China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. Nature Sustainability, 2019, **2**(2): 122-129.
- [49] 李思雅, 梁伟, 吕一河, 等. 黄河流域经济发展与生态环境压力的脱钩关系及驱动效应分析[J/OL]. 生态学报, 2023, **43**(13). <https://www.ecologica.cn/stxb/article/abstract/stxb202206091640>, 2023-03-07.
Li S Y, Liang W, Lv Y H, *et al.* Decoupling relationship and driving effect between economic development and eco-environmental pressure in the Yellow River Basin [J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(13). <https://www.ecologica.cn/stxb/article/abstract/stxb202206091640>, 2023-03-07.
- [50] 蒋焕洲, 刘娇. 西藏经济社会发展与生态环境耦合协调研究[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2023, **37**(1): 104-111.
Jiang H Z, Liu J. Study on the coupling coordinating of economic society development and ecological environment in Tibet autonomous region [J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2023, **37**(1): 104-111.

CONTENTS

| | |
|---|---|
| Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China | LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233) |
| Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle | REN Xiao-song, LI Zhao-ru (1243) |
| Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region | TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254) |
| Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan | XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265) |
| Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province | LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274) |
| Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study | ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285) |
| Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou | ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293) |
| Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River | ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304) |
| Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains | WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315) |
| Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin | WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328) |
| Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang | GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337) |
| Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China | LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349) |
| Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018 | DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361) |
| Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing | PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371) |
| Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer | LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382) |
| Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation | WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392) |
| Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River | LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402) |
| Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model | CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415) |
| Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing | ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428) |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin | LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439) |
| Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City | DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448) |
| Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section) | ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457) |
| Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia | GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468) |
| Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province | ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480) |
| Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake | MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492) |
| Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years | WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502) |
| Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example | DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512) |
| Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin | LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525) |
| Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes | ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539) |
| Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process | LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553) |
| Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water | LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561) |
| Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System | HE Qiang, CHEN Bo-wen, HAN Ling, LIU Ming, <i>et al.</i> (1577) |
| Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index | FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586) |
| Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI | ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598) |
| Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River | XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615) |
| Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis | LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629) |
| Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon | LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644) |
| Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil | DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655) |
| Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages | SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665) |
| Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River | WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674) |
| Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field | SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684) |
| Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China | HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692) |
| Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland | CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, <i>et al.</i> (1702) |
| Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model | WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713) |
| Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin | LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724) |
| Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi | YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739) |
| Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model | YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749) |
| Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province | XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760) |
| Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil | SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769) |
| Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province | DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781) |
| Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice | YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793) |
| Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor | LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803) |
| Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland | XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, <i>et al.</i> (1812) |
| Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis | LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821) |
| Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis | LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830) |
| Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms | BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840) |
| Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River | GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849) |
| Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos | YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859) |