

目次

2018~2020年北京市大气PM<sub>2.5</sub>污染特征及改善原因 ..... 刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明 (2409)

京津冀城市群冬季二次PM<sub>2.5</sub>的时空分布特征 ..... 姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹 (2421)

COVID-19管控前后不同污染阶段PM<sub>2.5</sub>中二次无机离子变化特征 ..... 姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹 (2430)

基于在线观测的太原市冬季PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染水平及来源解析 ..... 崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明 (2441)

青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源 ..... 王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双 (2450)

湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 庞晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小明, 郭送军 (2461)

2021年夏季新乡市区臭氧超标日污染特征及敏感性 ..... 侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (2472)

台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析 ..... 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (2481)

天津市空气污染的健康影响分析 ..... 华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (2492)

2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析 ..... 杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮 (2502)

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 ..... 王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞 (2518)

长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应 ..... 钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军 (2528)

宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价 ..... 李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰 (2539)

微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析 ..... 陆嘉玮, 徐晨晔, 胡纯, 刘树仁, 李方 (2551)

黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析 ..... 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇 (2562)

三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险 ..... 张雪, 朱波 (2574)

霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价 ..... 刘海, 赵国红 (2583)

基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析 ..... 刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明 (2592)

河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析 ..... 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥 (2601)

饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向 ..... 钟婷婷, 林涛, 刘威 (2613)

镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制 ..... 张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandyar Shahab (2622)

纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑 ..... 郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞 (2635)

富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷镉的吸附性能与机制 ..... 何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂 (2646)

富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制 ..... 欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 邝晓彤 (2661)

污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制 ..... 周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣 (2671)

森林生态系统对大气氮沉降降低的响应 ..... 谢丹妮, 仰东星, 段雷 (2681)

气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响 ..... 张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲 (2694)

西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析 ..... 徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春 (2704)

不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响 ..... 马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇 (2715)

氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响 ..... 刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波 (2724)

互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响 ..... 李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞 (2735)

黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征 ..... 姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼 (2746)

黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征 ..... 许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮 (2756)

短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响 ..... 简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉 (2767)

福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应 ..... 车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明 (2775)

中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议 ..... 赵晓峰, 雷梅, 陈同斌 (2786)

基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展 ..... 龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬 (2799)

河北省土壤化学元素的背景值与基准值 ..... 张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达 (2817)

非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析 ..... 邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华 (2829)

基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价 ..... 余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀 (2838)

长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险 ..... 李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元 (2849)

贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征 ..... 马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峥, 王惠艳, 彭敏, 张富贵 (2856)

贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估 ..... 马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇 (2868)

山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价 ..... 郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉 (2879)

P对小麦Cd和As吸收与转运的影响 ..... 王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅 (2889)

施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响 ..... 李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯 (2899)

广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析 ..... 马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚 (2908)

五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征 ..... 罗正明, 刘晋仙, 胡砚秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (2918)

天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响 ..... 于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜璋琳, 王英成 (2928)

紫云英还田与化肥减量配施对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响 ..... 张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭 (2936)

长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响 ..... 胡颖榭, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森 (2945)

高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响 ..... 张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进 (2955)

菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征 ..... 赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰 (2965)

中国碳排放及影响因素的市域尺度分析 ..... 吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘 (2974)

碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验 ..... 房琪, 李绍萍 (2983)

垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例 ..... 陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽 (2995)

1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量分析 ..... 苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡 (3003)

《环境科学》征订启事(2480) 《环境科学》征稿简则(2538) 信息(2766, 2798, 2927)

# 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

王芳<sup>1,2</sup>, 李文慧<sup>1,2</sup>, 林妍敏<sup>1,2\*</sup>, 南雄雄<sup>3</sup>, 胡志瑞<sup>4</sup>

(1. 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021; 2. 教育部中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021; 3. 种苗生物工程国家重点实验室, 银川 750001; 4. 宁夏国土资源调查监测院, 银川 750002)

**摘要:** 科学评估生态环境质量是实现区域可持续发展的前提。基于 1990 ~ 2020 年 Landsat 遥感影像, 采用熵值法构建遥感生态指数 (E-RSEI), 结合 Mann-Kendall 趋势检验、Sen 倾斜度、Hurst 指数和稳定性分析, 在多时空尺度下分析黄河流域典型生态区的生态环境质量时空变化格局, 并利用地理探测器量化了环境和人为等 8 个因子对 E-RSEI 时空分布的影响。结果表明: ① 31 年间 E-RSEI 均值为 67.5%, 时间尺度上呈增加趋势, 平均增幅为  $0.066 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 空间尺度上呈东低西高、南高北低的分布特征; ② 研究区生态环境质量未来变化趋势将以持续性改善为主, 但仍有 9.33% 的区域存在退化的潜在风险。③ 降水是影响该区域 E-RSEI 空间分布的关键环境因子, 人为因子的影响力较低, 同单因子相比, 因子交互作用对生态环境质量的解释力更强, 降水与其他因子的交互作用处于主导地位。研究结果可为黄河流域生态区生态环境质量的可持续发展提供科学参考。

**关键词:** 六盘山自然保护区; 熵值法; 遥感生态指数 (RSEI); 地理探测器; 生态环境质量

中图分类号: X821 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2518-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206029

## Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020

WANG Fang<sup>1,2</sup>, LI Wen-hui<sup>1,2</sup>, LIN Yan-min<sup>1,2\*</sup>, NAN Xiong-xiong<sup>3</sup>, HU Zhi-rui<sup>4</sup>

(1. School of Geographical Science and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Region, Yinchuan 750021, China; 3. State Key Laboratory of Seedling Bioengineering, Yinchuan 750001, China; 4. Ningxia Land Resources Surveying and Monitoring Institute, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** Scientific evaluation of ecological environmental quality is the premise of realizing regional ecological sustainable development. Taking Landsat series satellite images from 1990 to 2020 as the data source, on the basis of the entropy remote sensing ecological index (E-RSEI), combining the Mann-Kendall significance test, Theil-Sen Median analysis, Hurst exponent, and stability analysis, the spatial-temporal variation characteristics of ecological environmental quality in typical ecological areas of the Yellow River Basin were analyzed in the context of multi-spatiotemporal scales. In addition, the effects of eight environmental and human factors on the change in E-RSEI were quantified using a geodetector. The results showed that: ① in the past 31 years, the average value of E-RSEI was 67.5%, which showed an increasing trend on the time scale, with an average increase of  $0.066 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ . On the spatial scale, E-RSEI was higher in the west and the south lower in the east and the north. ② The ecological environmental quality will continue to improve in the future, but 9.33% of the areas have potential risks of degradation. ③ Precipitation was the dominant environmental factor that affected the spatial distribution of E-RSEI in this area, and the influence of human factors was low. Compared with that of single factors, the interaction of factors had a stronger impact on ecological environmental quality, and the interaction between precipitation and other factors played a leading role. The results of this study can provide a scientific reference for the sustainable development of ecological environmental quality in the ecological zone of the Yellow River Basin.

**Key words:** Liupanshan nature reserve; entropy method; remote sensing ecological index (RSEI); geodetector; ecological environmental quality

六盘山自然保护区坐落于湿润与干旱气候的过渡带, 是宁夏生态立区的重要战略基地和黄河流域典型生态区的重要单元, 更是我国西北干旱半干旱区最具代表性的温带山地森林生态系统和重要的水源涵养林分布区<sup>[1]</sup>。但由于滥垦乱伐等原因, 六盘山曾一度成为遭受严重破坏的天然次生林。为构筑六盘山生态安全屏障, 提升其生态环境承载力, 宁夏于 2018 年 4 月全面打响新时代黄河保卫战。鉴于六盘山独特的地理位置和强大的生态功能, 科学评估其生态环境质量, 明晰其驱动机制, 对区域生态环境保护、生态危机预防和生态规划管理具有重要意义。

生态环境质量时空分异特征明显, 传统的评价

指标受尺度、时间和地域等限制, 数据难以获取<sup>[2]</sup>。随着遥感技术的快速发展, 陆面生态状况监测取得了显著进展, 为区域生态环境质量评估提供了新的方法<sup>[3,4]</sup>, 如何完全基于遥感影像对生态环境进行快速评价已成为研究热点<sup>[5,6]</sup>。徐涵秋<sup>[7]</sup>于 2013 年提出一种基于主成分分析和无主观干扰的遥感生态评价模型 (remote sensing ecological index, RSEI), 其

收稿日期: 2022-06-02; 修订日期: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42067022); 宁夏自然科学基金项目 (2022AAC03024, 2021AAC03528); 宁夏青年科技人才托举工程项目 (TJGC2019003); 研究生课程思政示范课建设项目 (KCSZ202203)

作者简介: 王芳 (1983 ~ ), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为生态环境质量评价与植被覆盖反演, E-mail: fangwang0820@163.com

\* 通信作者, E-mail: linyanmin07@163.com

具有计算速度快、所需辅助参数少和结果可视化佳等优点<sup>[8~10]</sup>。然而,RSEI 在应用中仍然存在许多不确定性。首先,由于特征向量方向的差异使计算的第一主成分(PC1)可能需要基于先验知识进行反转<sup>[11,12]</sup>,导致 RSEI 结果具有随机性;其次,基于主成分分析构建 RSEI 模型具有不稳定性,无法保证较高的贡献度<sup>[13~15]</sup>,造成信息利用不充分,导致 RSEI 结果被低估或高估<sup>[16]</sup>。RSEI 的不确定性极大地限制了其批量应用。熵值法可以克服人为权重无法避免的随机性和臆断性问题,消除多指标变量间信息冗余<sup>[17]</sup>,是一种客观赋权法,同时,基于熵值法构建遥感生态指数(entropy remote sensing ecological index, E-RSEI)既可以有效解决数据利用不充分问题,又能够确保 E-RSEI 结果与生态质量呈正比,使批量计算生态环境质量应用程序的实现成为可能。

目前,国内外学者大多针对六盘山自然保护区植被状况<sup>[18]</sup>和生物多样性<sup>[19,20]</sup>等进行分析评价,但较少考虑区域生态环境质量的时空变化格局和变化过程的空间异质性,定量探测生态环境质量的驱动因子也较为鲜见。鉴于此,本文以黄河流域典型生态区——六盘山自然保护区为研究对象,基于熵值法构建遥感生态指数(E-RSEI),并以 E-RSEI 为因变量,选取 8 个驱动因子作为自变量,探究生态环境质量对环境与人为因子的响应特征,以期为实现黄河流域生态保护和高质量发展提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

六盘山自然保护区(35°15'~35°41'N, 106°09'~106°30'E)位于黄河流域内,地处宁夏回族自治区南部(图 1),海拔 1 612~2 942 m,总面积 678 km<sup>2</sup>,具有大陆性和海洋季风边缘气候特点,年平均气温 5.8℃,年降水量 676 mm,年平均相对湿度 60%~70%。其土地利用类型以草地、疏林地和灌木林为主,植被主要分为温性针叶林、落叶阔叶林、灌丛、草原、草甸和栽培植被等 7 个类型,土壤分为山地

草甸土、灰褐土、新积土、红土、潮土和粗骨土这 6 种类型。

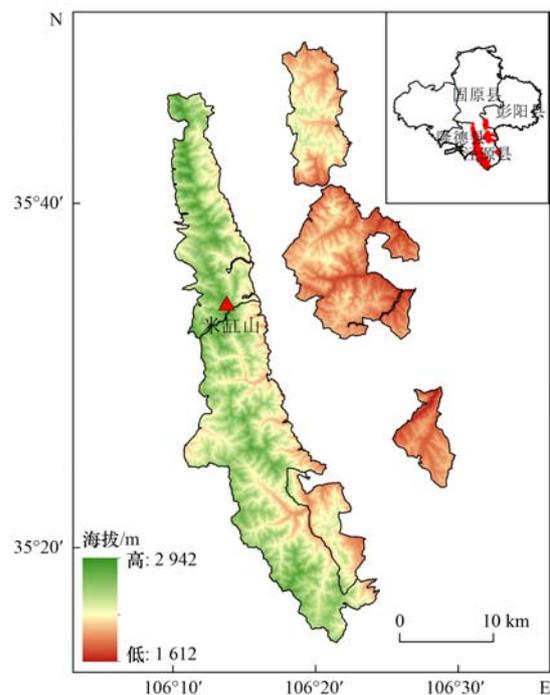


图 1 研究区概况示意

Fig. 1 Location of the study area

### 1.2 数据来源及预处理

如表 1 所示,本研究使用的数据包括 Landsat 5/7/8 遥感影像、降水量、气温、海拔、土壤类型、植被类型和夜间灯光数据。为保证数据的可靠性和结果的可比性,故选取研究区范围内无云且处于植被繁茂期(6~9月)的遥感影像(表 2)。本研究的数据处理具体包括:在 ENVI 5.3 中对影像数据进行几何校正、辐射定标、大气校正和图像裁剪等预处理工作;在 ArcGIS 10.2 中对气温和降水数据进行空间插值计算;在 ArcGIS 10.2 中创建渔网工具,生成 15 002 个采样点,利用自然断点法将降水、气温、海拔和夜间灯光亮度分为五类,坡度和坡向分为九类,土壤和植被分别分为六类和七类,利用等距离法将 NDVI、WET、NDSI 和 LST 划分为 5 类,提取样点后输入至地理探测器中,以进行驱动因子量化分析。

表 1 数据源详细说明

Table 1 Detailed description of data

数据名	分辨率	单位	数据来源
Landsat5/7/8	30 m	—	美国地质调查局( <a href="https://glovis.usgs.gov/app">https://glovis.usgs.gov/app</a> )
降水量	1 km	mm	国家气象科学数据中心( <a href="http://data.cma.cn">http://data.cma.cn</a> )
气温	1 km	℃	国家气象科学数据中心( <a href="http://data.cma.cn">http://data.cma.cn</a> )
海拔	30 m	m	地理空间数据云( <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a> )
土壤类型	1 km	—	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
植被类型	1 km	—	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
夜间灯光	1 km	—	地球观测组( <a href="https://eogdata.mines.edu/products/dmsp/">https://eogdata.mines.edu/products/dmsp/</a> )

表 2 遥感影像数据来源

Table 2 Remote sensing image data source

影像获取日期(年-月-日)	影像类型	卫星轨道号	平均云量/%	分辨率/m
1990-06-08	Landsat 5 TM	P129/R35	2.00	30
1996-09-12	Landsat 5 TM	P129/R35	3.00	30
2002-09-21	Landsat 7 ETM	P129/R35	1.00	30
2008-06-25	Landsat 5 TM	P129/R35	1.00	30
2013-06-07	Landsat 8 OLI	P129/R35	3.08	30
2020-08-13	Landsat 8 OLI	P129/R35	14.23	30

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 基于熵值法的 E-RSEI 计算

本研究利用 RSEI 模型中原有的 4 个指标<sup>[7]</sup>, 基于熵值法构建生态环境质量评估模型(E-RSEI), 计算公式如下:

$$\text{E-RSEI} = w_1 \times \text{NDVI} + w_2 \times \text{WET} + w_3 \times \text{NDSI} + w_4 \times \text{LST} \quad (1)$$

式中, E-RSEI 为基于熵值法的遥感生态指数, NDVI、WET、NDSI、LST 分别为绿度指标、湿度分量、干度指标、地表温度这 4 个评价指标, 具体计算公式见文献[7, 21~23].  $w_i$  为第  $i$  个指标的权重, 利用 4 个指标的均值计算, 每个指标有 6 个评价对象, 公式为<sup>[24]</sup>:

$$w_i = (1 - H_i) / \left( m - \sum_{i=1}^m H_i \right) \quad (2)$$

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \times \ln(f_{ij}), \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$f_{ij} = \text{NI}_{ij} / \sum_{j=1}^n \text{NI}_{ij}, f_{ij} = 0 \text{ 时: } f_{ij} \ln(f_{ij}) = 0 \quad (4)$$

$$\text{NI}_{ij} = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (5)$$

$$\text{NI}_{ij} = (I_{\max} - I) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (6)$$

式中,  $H_i$  为第  $i$  个指标的熵,  $m$  为评价指标的数目,  $n$  为被评价对象的数目,  $k = 1/\ln m$ ,  $\text{NI}_{ij}$  为第  $i$  个指标的第  $j$  个归一化值,  $I$  为某一像元值,  $I_{\min}$  和  $I_{\max}$  分别为最小值和最大值. 为消除异常像元的影响,  $I_{\min}$  和  $I_{\max}$  选取 2%~98% 的置信区间. 绿度和湿度对生态环境起优化作用<sup>[25]</sup>, 采用正向指标归一化公式(5)计算; 热度和干度对生态环境起破坏作用<sup>[23]</sup>, 采用负向指标归一化公式(6)计算.

#### 1.3.2 趋势分析

(1) 稳定性分析(CV) 变异系数 CV 反映数据的离散程度, 可用于评估 E-RSEI 的稳定性, 公式为<sup>[26]</sup>:

$$\text{CV} = \text{Std}/\text{Mean} \quad (7)$$

式中, Std 为标准差, Mean 为均值. 根据 Nielsen 的划分标准<sup>[24]</sup>, 分为弱变异( $\text{CV} \leq 10\%$ ), 中等程度变异

( $0\% < \text{CV} < 100\%$ ), 强变异( $\text{CV} \geq 100\%$ ).

(2) Mann-Kendall 趋势检验及 Sen 倾斜度 Mann-Kendall 趋势检验是使用最为广泛的非参数检验方法, 其样本无需遵循特定的分布, 且不受异常值干扰, 具体公式见文献[27].

利用 Sen 倾斜度表示趋势性大小及变化方向, 公式见文献[28]:

$$\beta = \text{median} \left( \frac{\text{E-RSEI}_j - \text{E-RSEI}_i}{j - i} \right), \quad (1 < i < j < n) \quad (8)$$

式中,  $\beta > 0$  时, E-RSEI 呈改善趋势;  $\beta < 0$  时, E-RSEI 呈退化趋势.

(3) Hurst 指数 Hurst 指数可用于判断时间序列未来变化趋势, 定量描述长时间序列信息相关性, 具体原理见文献[29]. 当  $0 < H < 0.5$ , E-RSEI 未来变化趋势与过去相反,  $H$  越小, 反持续性越强; 当  $H = 0.5$ , E-RSEI 为随机序列, 无长期相关性; 当  $0.5 < H < 1$ ,  $H$  越大, 持续性越强. 将 Sen 倾斜度同 Hurst 指数结果叠加, 分析 E-RSEI 持续性变化趋势.

#### 1.3.3 地理探测器

地理探测器非线性假设且物理意义明确<sup>[30]</sup>. 本文选取降水、气温、海拔、坡度、坡向、植被类型、土壤类型和可代表全球和区域范围内人类活动强度的夜间灯光数据作为自变量, 利用因子探测<sup>[31, 32]</sup>、交互探测<sup>[33, 34]</sup> 和风险探测<sup>[35]</sup> 对 E-RSEI 进行驱动因子量化分析.

(1) 分异及因子探测 探测评价指标  $X$  (自变量) 对生态环境质量 (因变量  $Y$ ) 的影响力, 用  $q$  值度量:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (9)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \text{SST} = N \sigma^2 \quad (10)$$

式中,  $h = 1, 2, \dots, L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层;  $N$  和  $N_h$  分别为全区和层  $h$  的单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  为层  $h$  和全区的  $Y$  值方差; SSW 和 SST 为层内方差之和与全区总方差.  $q$  值为评价指标  $X$  对  $Y$  的影响力, 值越

大影响力越强; 反之亦然.

(2)交互作用探测 识别评价指标  $X_1$  和  $X_2$  共同作用对  $Y$  的影响. 根据两种指标对  $Y$  的  $q$  值 [ $q(X_1)$  和  $q(X_2)$  ]、交互  $q$  值 [ $q(X_1 \cap X_2)$  ] 和  $q$  值之和 [ $q(X_1) + q(X_2)$  ] 的关系, 将交互作用分为 5 类 (表 3).

表 3 探测因子交互作用类型

Table 3 Interaction types of the detection factors

交互作用类型	判断准则
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱	$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
相互独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

(3)风险区探测 搜索生态环境质量状况好的区域, 用  $t$  来检验:

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[ \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

式中,  $Y_h$  为子区域  $h$  内  $Y$  属性均值;  $n_h$  为子区域  $h$  内样本数量; Var 为方差.

## 2 结果与分析

### 2.1 E-RSEI 模型精度验证

依据绿度、湿度、干度和热度这 4 个指标均值, 基于熵值法计算指标权重分别为 0.268 0、0.230 1、0.261 2 和 0.240 7, 表明各个指标分量对生态环境质量的影响程度不同, 绿度的影响力最大, 干度次之, 其次是热度, 湿度对生态环境质量的影响最小.

以 20% 为间隔, 将 RSEI 和 E-RSEI 等级依次划分为差、较差、中、良和优这 5 个等级. RSEI 计算的 PC1 贡献度为 76.31%, 信息利用率较低, 使结果

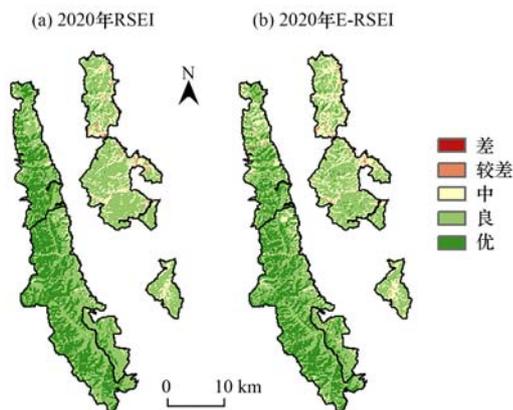


图 2 2020 年 RSEI 和 E-RSEI 空间分布对比

Fig. 2 Comparison of spatial distribution between RSEI and E-RSEI in 2020

产生误差. 其次, 利用 RSEI 模型计算六盘山自然保护区生态环境质量, 需要对 PC1 进行反转, 采用“1-PC1”进行还原, 限制了模型的批量应用. 由图 2 可以看出, RSEI 和 E-RSEI 均值分别为 73.21% 和 74.39%, 均呈现出西高东低的空间分布趋势. 整体上, E-RSEI 结果高于 RSEI, 而对于低覆盖度草地, E-RSEI 略低于 RSEI, 在疏林地处, E-RSEI 高于 RSEI. 改进后的 E-RSEI 模型可以保证高值部分代表生态优, 能够更为真实地反映生态环境质量的空间分布情况, 实现生态环境质量状况的批量计算. 由此看来, 本研究选用 E-RSEI 模型来反演各研究年份的生态环境质量更具适宜性.

### 2.2 研究区生态环境质量 E-RSEI 时空变化特征

#### 2.2.1 研究区生态环境质量 E-RSEI 时间变化特征

从 1990 ~ 2020 年 4 个指标及 E-RSEI 均值的时间变化来看 (图 3), 31 年间, 六盘山自然保护区 E-RSEI 整体向好, 由 1990 年的 0.553 7 提升至 2020 年的 0.757 0, 平均增幅为  $0.066 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 增长率为 36.72%; 从单一指标来看, 绿度和湿度分别上升 0.219 9 和 0.050 3, 上升率分别为 34.18% 和 13.35%, 且变化趋势与 E-RSEI 基本吻合, 说明绿度和湿度越高, 则地表植被覆盖越高, 土壤水分越充足, 生态环境质量越好, 二者对生态环境起积极作用. 干度和热度 31 年间分别下降 0.235 9 和 0.234 8, 下降幅度分别为 55.61% 和 36.16%, 与 E-RSEI 变化趋势相反, 说明干度和热度越高, 土壤沙化和岩石裸露等问题越严重, 生态环境质量越差, 二者对生态

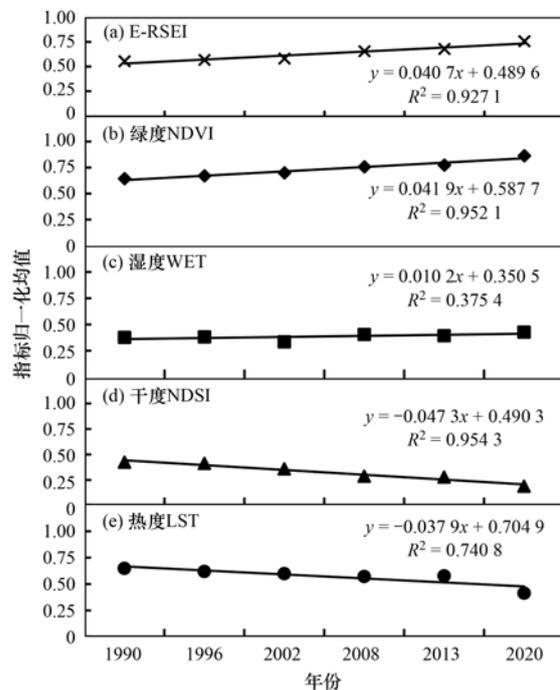


图 3 1990 ~ 2020 年 E-RSEI 及各指标变化情况

Fig. 3 Changes in E-RSEI and its indicators from 1990 to 2020

环境起消极作用。

### 2.2.2 研究区生态环境质量 E-RSEI 空间变化特征

以 20% 为间隔,对 1990 ~ 2020 年 E-RSEI 进行等级划分(图 4),并统计各生态等级和占比(图 5). 31 年间,研究区 E-RSEI 等级为差的区域面积占比最低,在 5% 以下,呈波动性下降趋势,主要分布在米缸山以北、彭阳县与泾源县交界处以及研究区东南部;较差等级区域面积呈持续性下降趋势,由 1990 年的 22.14% 下降至 2020 年的 1.15%;中等等级区域呈先上升后下降趋势,其面积占比在 1996 年出现峰值 (50.87%), 最低值出现在 2020 年 (18.81%),空间上由全区均匀分布向东部集中转化;优良等级区域呈整体向好趋势,分别由 1990 年的 28.00% 和 8.66% 上升至 2020 年的 44.91% 和 34.95%,尤其是 2008 年以来,优等级区域大幅度提升,主要分布在米缸山以南和研究区中东部. 31 年间,E-RSEI 优势区域等级由中等(1990 ~ 2002 年)向良好等级(2008 ~ 2020 年)转变。

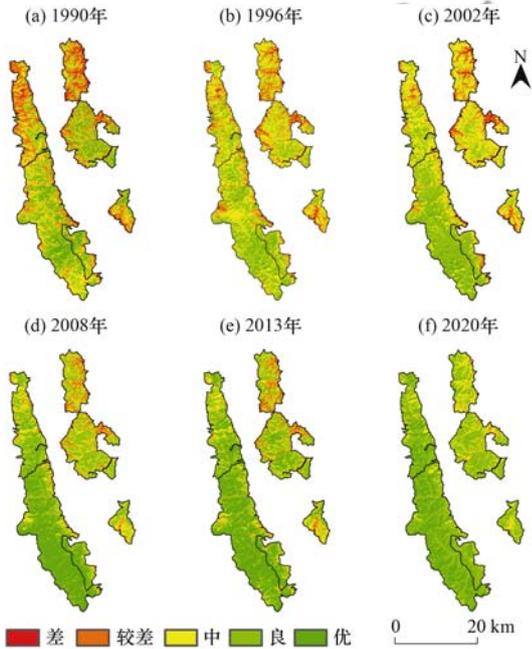


图 4 1990 ~ 2020 年研究区 E-RSEI 空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of E-RSEI from 1990 to 2020 in the study area

### 2.3 研究区生态环境质量 E-RSEI 空间变化趋势

由图 6(a)可知,生态环境质量改善地区相对聚集且呈面状分布;稳定区域相对分散,呈点状与改善区交错分布;生态环境质量退化区域面积较小,主要分布在研究区南部的六盘山国家级森林公园和东南部地区. 由表 4 可知,研究区生态环境质量呈改善的区域面积为 571.03 km<sup>2</sup>, 约占总面积的 84.22%, 稳定区面积为 86.92 km<sup>2</sup>, 约占总面积的 12.82%, 退化面积为 20.04 km<sup>2</sup>, 约占 2.96%. 整体

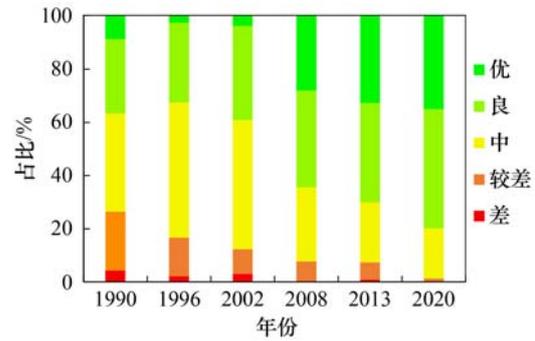


图 5 研究区生态等级面积和比例

Fig. 5 Area and percent change of graded E-RSEI from 1990 to 2020 in the study area

而言,六盘山自然保护区 31 年间生态环境质量改善区域面积远大于退化区域面积,表明研究区生态呈改善趋势。

由表 4 可知,生态环境质量呈正向持续性变化 (Hurst > 0.5) 的面积为 78.69%, 反向持续化 (Hurst < 0.5) 的面积为 8.49%, 说明未来的该区域生态环境质量在短期内将保持现有的发展趋势, 即未来生态环境质量变化呈改善趋势. 未来生态环境质量以持续性改善为主, 面积占比 76.79%, 生态环境质量呈稳定发展的面积占比为 12.82%, 生态环境质量由改善向退化方向变化的面积约占 7.43%, 生态环境质量呈持续退化及未来改善的面积占比分别为 1.90% 和 1.06%. 由图 6(b) 可知, 未来生态环境质量呈持续性改善的区域主要分布于米缸山以北以及研究区东北部彭阳县与泾源县交界处, 稳定区主要分布于米缸山以南国家级森林公园和研究区中东部秋干架地区, 生态环境质量由改善向退化方向变化区域主要分布在研究区中西部海拔较高地区。

如图 6(c) 所示, 1990 ~ 2020 年六盘山自然保

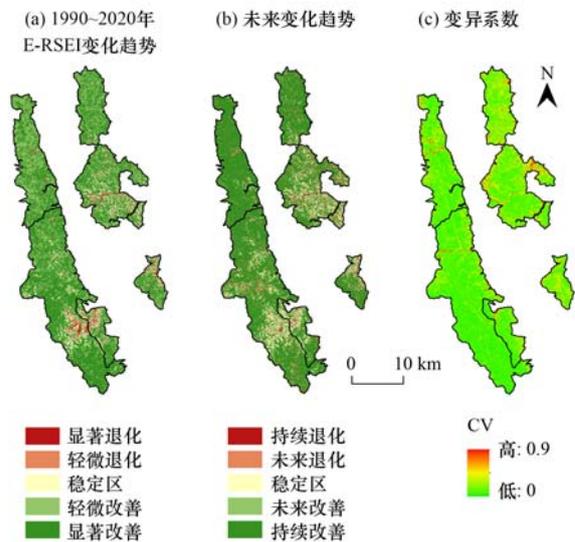


图 6 E-RSEI 变化趋势空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of E-RSEI variation trend

护区生态环境质量整体稳定性较好,平均变异系数为 0.031. 弱变异等级区域占研究区总面积的 98.97%,中等程度变异主要分布在西北部隆德县边界及东部泾源县边界,面积占比为 1.03%. 综上

可知,1990 ~ 2020 年六盘山自然保护区整体生态系统较为稳定,但西北部隆德县边界及东部泾源县边界生态环境质量变化较大,生态系统相对脆弱.

表 4 E-RSEI 空间变化趋势面积占比

Table 4 Area proportion of E-RSEI spatial variation trend

E-RSEI 变化趋势			未来变化趋势		
等级划分	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	等级划分	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
极显著退化	20.00	2.95	持续退化	12.89	1.90
显著退化	0.04	0.01	未来退化	50.40	7.43
稳定区	86.92	12.82	稳定区	86.92	12.82
显著改善	125.44	18.50	未来改善	7.16	1.06
极显著改善	445.59	65.72	持续改善	520.63	76.79

2.4 研究区生态环境质量 E-RSEI 驱动因子地理探测

2.4.1 单驱动因子影响力探测

各因子对生态环境质量空间分布影响程度排序为:NDVI > NDSI > LST > WET > 降水 > 气温 > 海拔 > 植被类型 > 坡向 > 土壤类型 > 夜间灯光 > 坡度 (图 7),这进一步说明模型因子中 NDVI 对生态环境质量的影响力最大,与熵值法结果一致. 在环境与人为驱动因子中,降水、气温和海拔是区域内生态环境质量空间分布的主要驱动因子,解释力超过 30%; 植被类型和坡向是次影响因子,解释力在 10% 以上; 土壤类型、夜间灯光亮度和坡度对生态环境质量解释力较小.

2.4.2 驱动因子交互作用探测

由于模型因子本身与 E-RSEI 关联性较大,故重

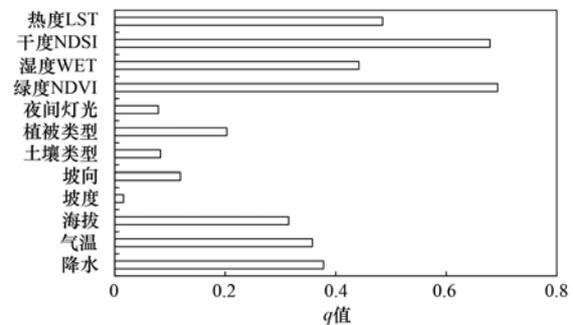


图 7 因子探测结果

Fig. 7 Results of factor detector

点分析了模型因子以外的其他因子的影响力. 通过因子探测结果可知,生态环境质量的驱动因子交互作用均呈增强效应(图 8),其中 79.05% 呈双因子增强效应,20.95% 呈非线性增强效应,不存在独立

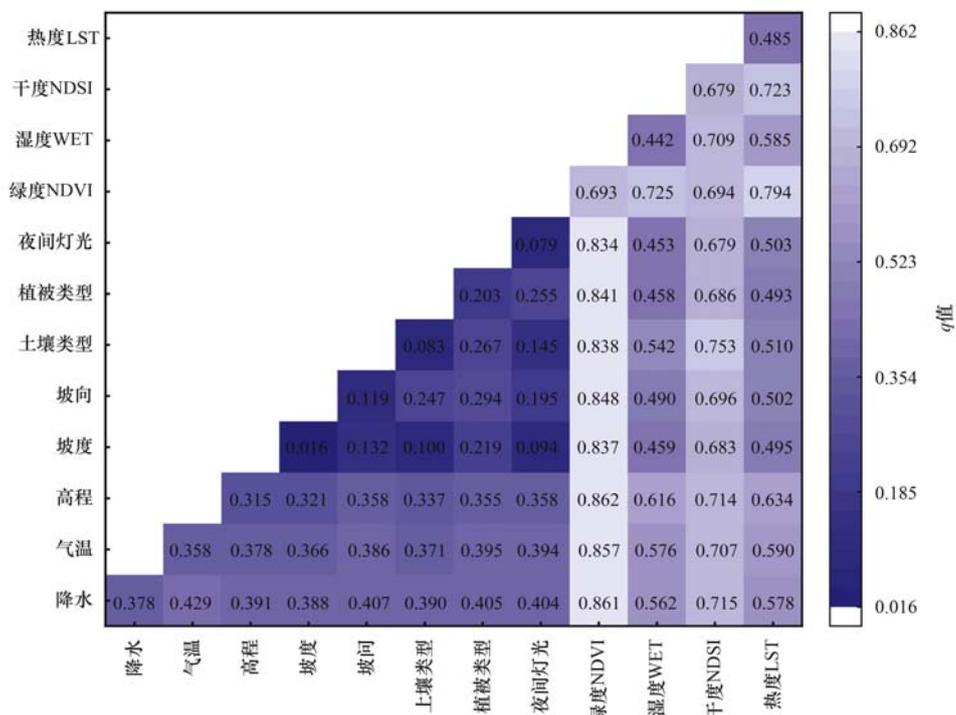


图 8 研究区各因子交互探测影响力 (q)

Fig. 8 Interactive detection explanatory power (q) of various factors in the study area

起作用的因子,表明任何两个驱动因子的交互作用对六盘山自然保护区生态环境质量空间分布的影响力均大于单一因子.其中,降水 $\cap$ 气温( $q$ 值为0.429)交互作用影响力排名第一,其次是降水 $\cap$ 坡向( $q$ 值为0.407),降水与其他探测因子交互作用的结果进一步表明降水较大程度影响了该区域的生态环境质量.人类活动的单因子解释力较低,但是与环境因子的交互作用解释力较强,表明人类活动是影响生态环境质量空间分异格局的间接因素.

### 2.4.3 驱动因子适宜性探测

根据风险探测器的研究结果,得到了六盘山生态恢复的最适宜范围(表5),且在95%置信水平上通过了统计意义检验.随着降水量、海拔不断增加、气温不断降低,E-RSEI均值呈现增加趋势,降水量在889.6~936.7 mm、气温在3.6~4.9℃的气候范围内,海拔在2552.0~2942.0 m、坡度在9.1°~17.6°、坡向在西北向292.5°~337.5°的地形因子范围内,最利于研究区生态的恢复治理;植被、土壤类型不同,E-RSEI均值也会随之波动变化,阔叶林植被、山地草甸土的E-RSEI均值最高,分别为0.7482和0.6845;随着夜间灯光亮度的增强,E-RSEI均值呈下降趋势,说明在人类活动干扰小的条件下,生态环境质量状况较好.在模型因子NDVI和WET处于高值、NDSI和LST处于低值时,E-RSEI均值最大,生态环境质量状况较好.

表5 探测指标适应类型或范围

评价指标	E-RSEI 适宜范围(类型)	E-RSEI 均值
降水量	889.6~936.7 mm	0.8757
气温	3.6~4.9℃	0.8567
海拔	2552.0~2942.0 m	0.8558
坡度	9.1°~17.6°	0.6679
坡向	292.5°~337.5°(西北)	0.7765
土壤类型	山地草甸土	0.6845
植被类型	阔叶林	0.7482
夜间灯光	0~5	0.6410
绿度 NDVI	0.8~1	0.9619
湿度 WET	0.8~1	0.8993
干度 NDSI	0~0.2	0.9274
热度 LST	0~0.2	0.8929

## 3 讨论

### 3.1 E-RSEI 模型适用性

RSEI模型因其指标获取简易、无人为权重且结果能够合理反映区域生态状况等优点,自2013年提出以来被广泛应用<sup>[7,11,36~38]</sup>.Li等<sup>[39]</sup>以平余县为研究区,解释RSEI计算结果的随机性源于特征向量方向的差异,指出当NDVI和WET分量的特征向量值小于0时,需要对PC1进行反转,这与本研究

的计算结果一致.由于主成分分析得到的特征向量方向和大小不唯一且PC1贡献度不稳定<sup>[14]</sup>,限制了模型的批量使用.本研究结果表明,基于熵值法计算的E-RSEI结果高于RSEI,但整体上空间分布趋势与RSEI基本一致.E-RSEI模型既可以保证指标信息被充分利用,又能够确定结果的方向,其可以定量地反映生态环境质量空间分布及其变化情况,为未来学者进行批量计算提供了科学依据.

本研究选取了人类能够直观感受生态优劣的绿度、湿度、干度和热度这4个指标,虽然这些指标具有较好的代表性,但在生态评价模型的构建中,指标的选择会带有一定的主观性,不同的地区也很难使用统一的指标,导致其成为多指标建模的难题.因此未来的研究中,将结合研究区自然基底信息,对评价指标体系做进一步完善,全面客观地评价该区的生态环境质量.

### 3.2 研究区生态环境质量 E-RSEI 时空分异特征

六盘山自然保护区1990~2020年生态环境质量E-RSEI整体呈上升趋势,该结论同前人研究的结果一致<sup>[20]</sup>.生态向好态势一方面与区域气候环境关联密切<sup>[40]</sup>,另一方面与区域治理措施密不可分,过去战争破坏和因人口增加等导致滥垦乱伐,使该区域生态环境严重恶化.自2000年以来,得益于三北防护林工程、天然林保护工程、水源涵养林工程、退耕还林工程、400 mm降水线绿化造林工程和“四个一”林草产业示范工程等林业生态工程的相继实施,以及“山水林田湖草”生态保护修复项目的实行和新时代黄河保卫战的推进,促进了植被群落的繁衍和演替进程,从而提高了生态环境质量,筑牢六盘山生态安全屏障,这与已有的研究结果一致<sup>[41]</sup>.

生态环境质量E-RSEI呈下降趋势的区域主要分布在六盘山国家级森林公园和东南部地区,且未来仍存在退化的潜在风险.六盘山国家级森林公园植物群落类型多样,生态系统稳定,但对气候变化的响应较为敏感,气候条件成为影响该区域生态恢复的主要因素;研究区东南部区域海拔较低,人类活动和农业活动导致部分地区土壤质地变差、土壤肥力下降、土壤侵蚀和水土流失加剧,人类活动对该区生态环境的干扰力超过了其生态系统自身的修复力和外界治理力度,从而导致生态环境质量E-RSEI出现退化.

### 3.3 研究区生态环境质量 E-RSEI 驱动因子分析

降水、气温和海拔是影响六盘山自然保护区整体生态变化的关键因素,而气候因子是引起生态环境质量E-RSEI空间分布的主导因素,该研究结果与前人一致<sup>[42,43]</sup>.研究区植被覆盖状况NDVI主导生

态环境质量,而植被对气候变化相当敏感,尤其是在干旱半干旱地区,气候是对植被具有决定性影响的自然驱动力<sup>[44]</sup>。研究表明,与气温因素相比,降水对研究区生态环境质量的影响更为明显,由于六盘山自然保护区处于半干旱地区,光照资源丰富,所以水分条件对生态环境质量空间分布可能更为重要。随着海拔的升高,六盘山自然保护区降水分布逐渐增大,气温直减率为 $0.51\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ ,因此海拔成为影响生态环境质量的次关键因素。

人类活动对研究区生态环境质量的单因子解释力较低,这是由于六盘山自然保护区居民点分布较少,且随着生态旅游的发展逐渐迁出研究区,但人类活动与环境因子的交互作用解释力显著增强,说明其是生态环境质量的重要影响因子<sup>[45]</sup>:一方面,通过封山禁牧和人工育林等生态工程提高生态环境质量;另一方面,滥垦乱伐等活动破坏了当地生态。在今后的研究中,将会在人为因子中补充政策因素,更为深入地探究生态环境质量变化的驱动机制。

#### 4 结论

(1)1990~2020年六盘山自然保护区生态环境质量呈增加趋势,平均增幅为 $0.066\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ,多年平均E-RSEI为67.5%,呈现出南高北低、东低西高的空间分布特征。

(2)31年间研究区生态环境改善区域面积比重达84.22%。未来持续性改善区域面积达76.79%,但仍有9.33%的区域生态环境存在持续退化或由改善向退化转变的潜在风险,全面恢复六盘山自然保护区生态依然任重道远。

(3)降水、气温和海拔是影响区域E-RSEI空间分布的主导因子。因子间的交互作用以双因子增强趋势为主,其中降水与其他因子的交互作用起主导作用。本文揭示了驱动因子对生态环境质量的影响,探究了最适宜生态环境质量恢复治理的驱动因子范围。

#### 参考文献:

- [1] 席建超,胡传东,武国柱,等.六盘山生态旅游区旅游步道对人类践踏干扰的响应研究[J].自然资源学报,2008,23(2):274-284.
- Xi J C, Hu C D, Wu G Z, et al. Response of Liupan Mountain ecological tourism' trail to human trampling disturbance [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 274-284.
- [2] 吴宜进,赵行双,奚悦,等.基于MODIS的2006-2016年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J].地理学报,2019,74(7):1438-1449.
- Wu Y J, Zhao X S, Xi Y, et al. Comprehensive evaluation and spatial-temporal changes of eco-environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006-2016 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1438-1449.
- [3] He F H, Gu L J, Wang T, et al. The synthetic geo-ecological environmental evaluation of a coastal coal-mining city using spatiotemporal big data: a case study in Longkou, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 854-866.
- [4] Yang X Y, Meng F, Fu P J, et al. Spatiotemporal change and driving factors of the Eco-Environment quality in the Yangtze River Basin from 2001 to 2019 [J]. Ecological Indicators, 2021, 131, doi:10.1016/j.ecolind.2021.108214.
- [5] Ivits E, Buchanan G, Olsvig-Whittaker L, et al. European farmland bird distribution explained by remotely sensed phenological indices [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2011, 16(4): 385-399.
- [6] Alcaraz-Segura D, Lomba A, Sousa-Silva R, et al. Potential of satellite-derived ecosystem functional attributes to anticipate species range shifts [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 57: 86-92.
- [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] Wu S P, Gao X, Lei J Q, et al. Ecological environment quality evaluation of the Sahel region in Africa based on remote sensing ecological index [J]. Journal of Arid Land, 2022, 14(1): 14-33.
- [9] 孔玲玲,冯险峰,武爽,等.拉萨城市圈1994—2017年生态质量的时空动态监测及驱动力分析[J].地理科学进展,2022,41(3):437-450.
- Kong L L, Feng X F, Wu S, et al. Spatiotemporal dynamics and driving factor analysis of ecological quality change in the Lhasa urban circle from 1994 to 2017 [J]. Progress in Geography, 2022, 41(3): 437-450.
- [10] 林妍敏,南雄雄,胡志瑞,等.西北典型生态脆弱区植被覆盖度时空变化及其生态安全评价:以宁夏贺兰山为例[J].生态与农村环境学报,2022,38(5):599-608.
- Lin Y M, Nan X X, Hu Z R, et al. Fractional vegetation cover change and its evaluation of ecological security in the typical vulnerable ecological region of Northwest China: Helan Mountains in Ningxia [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(5): 599-608.
- [11] Jiang F, Zhang Y Q, Li J Y, et al. Research on remote sensing ecological environmental assessment method optimized by regional scale [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(48): 68174-68187.
- [12] Zheng Z H, Wu Z F, Chen Y B, et al. Instability of remote sensing based ecological index (RSEI) and its improvement for time series analysis [J]. Science of the Total Environment, 2022, 814, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152595.
- [13] 单薇,金晓斌,孟宪素,等.基于多源遥感数据的土地整治生态环境质量动态监测[J].农业工程学报,2019,35(1):234-242.
- Shan W, Jin X B, Meng X S, et al. Dynamical monitoring of ecological environment quality of land consolidation based on multi-source remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 234-242.
- [14] Li Y D, Li Z J, Wang J J, et al. Analyses of driving factors on the spatial variations in regional eco-environmental quality using two types of species distribution models: a case study of Minjiang River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 139, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108980.
- [15] 程琳琳,王振威,田素锋,等.基于改进的遥感生态指数的

- 北京市门头沟区生态环境质量评价[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(4): 1177-1185.
- Cheng L L, Wang Z W, Tian S F, *et al.* Evaluation of eco-environmental quality in Mentougou District of Beijing based on improved remote sensing ecological index[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(4): 1177-1185.
- [16] 宋美杰, 罗艳云, 段利民. 基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价[J]. 干旱区研究, 2019, **36**(6): 1521-1527.
- Song M J, Luo Y Y, Duan L M. Evaluation of ecological environment in the Xilin Gol Steppe based on modified remote sensing ecological index model[J]. Arid Zone Research, 2019, **36**(6): 1521-1527.
- [17] 顾晓响, 徐宗学, 刘麟菲, 等. 北京北运河河流生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2576-2587.
- Gu X Y, Xu Z X, Liu L F, *et al.* Health assessment of the stream ecosystem in the north canal river basin, Beijing, China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2576-2587.
- [18] 杜鑫, 赵鹏祥, 陈海波, 等. 六盘山自然保护区38年来植被覆盖与气候变化关系分析[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(11): 6558-6561, 6601.
- Du X, Zhao P X, Chen H B, *et al.* Analysis on relationship between the change of vegetation coverage and climate in Liupan mountain nature reserve during recent 38 years[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, **39**(11): 6558-6561, 6601.
- [19] 刘学琴, 贺达汉, 王新谱. 宁夏六盘山国家级自然保护区眼蝶群落多样性[J]. 生物多样性, 2020, **28**(8): 973-982.
- Liu X Q, He D H, Wang X P. Diversity of satyrinae in the Liupanshan national nature reserve of Ningxia[J]. Biodiversity Science, 2020, **28**(8): 973-982.
- [20] 曾锦源, 胡洁, 宋景舒, 等. 宁夏六盘山国家级自然保护区林下鸟兽多样性调查[J]. 生态与农村环境学报, 2022, **38**(2): 209-216.
- Zeng J Y, Hu J, Song J S, *et al.* A survey of mammal and bird diversity using camera-trapping in Liupanshan national nature reserve in Ningxia [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, **38**(2): 209-216.
- [21] Xu H Q, Wang Y F, Guan H D, *et al.* Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis [J]. Remote Sensing, 2019, **11**(20), doi: 10.3390/rs11202345.
- [22] 杨泽康, 田佳, 李万源, 等. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J]. 生态学报, 2021, **41**(19): 7627-7636.
- Yang Z K, Tian J, Li W Y, *et al.* Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(19): 7627-7636.
- [23] 孙从建, 李晓明, 张文强, 等. 基于遥感信息的吕梁山贫困区生态安全评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(12): 5352-5360.
- Sun C J, Li X M, Zhang W Q, *et al.* Evaluation of ecological security in poverty-stricken region of Lüliang Mountain based on the remote sensing image [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(12): 5352-5360.
- [24] Huang Y L, Wang J Q, Li J M, *et al.* Ecological and environmental damage assessment of water resources protection mining in the mining area of Western China [J]. Ecological Indicators, 2022, **139**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108938.
- [25] 农兰萍, 王金亮. 基于RSEI模型的昆明市生态环境质量动态监测[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(6): 2042-2050.
- Nong L P, Wang J L. Dynamic monitoring of ecological environment quality in Kunming based on RSEI model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(6): 2042-2050.
- [26] 马晓妮, 任宗萍, 谢梦瑶, 等. 砭砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析——基于地理探测器[J]. 生态学报, 2022, **42**(8): 3389-3399.
- Ma X N, Ren Z P, Xie M Y, *et al.* Quantitative analysis of environmental driving factors of vegetation coverage in the Pisha sandstone area based on geodetector[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(8): 3389-3399.
- [27] 田智慧, 任祖光, 魏海涛. 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 743-751.
- Tian Z H, Ren Z G, Wei H T. Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 743-751.
- [28] Yu H C, Bian Z F, Mu S G, *et al.* Effects of climate change on land cover change and vegetation dynamics in Xinjiang, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(13), doi: 10.3390/ijerph17134865.
- [29] Hurst H E. Methods of using long-term storage in reservoirs[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1956, **5**(5): 519-543.
- [30] Deng X J, Hu S, Zhan C S. Attribution of vegetation coverage change to climate change and human activities based on the geographic detectors in the Yellow River Basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(29): 44693-44708.
- [31] 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.
- [32] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被NDVI变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, **74**(9): 1758-1776.
- Peng W F, Zhang D M, Luo Y M, *et al.* Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(9): 1758-1776.
- [33] Duan Q W, Tan M H. Using a geographical detector to identify the key factors that influence urban forest spatial differences within China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, **49**, doi: 10.1016/j.ufug.2020.126623.
- [34] 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.
- [35] Zhu L J, Meng J J, Zhu L K. Applying Geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. Ecological Indicators, 2020, **117**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106545.
- [36] 潘洪义, 李加安, 张琴. 基于RSEI的地震区生态环境质量恢复研究——以汶川县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(3): 745-757.
- Pan H Y, Li J A, Zhang Q. Study on restoration of ecological environment quality in earthquake area based on RSEI: a case study of Wenchuan county [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(3): 745-757.

- [37] 苏朔, 宫兆宁, 张文静, 等. 北运河流域植被覆盖度变化及其生态环境质量评估[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(1): 19-27.  
Su S, Gong Z N, Zhang W J, *et al.* Change of vegetation coverage and assessment of ecological environment quality in Beiyun River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(1): 19-27.
- [38] 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.
- [39] Li N, Wang J Y, Qin F. The improvement of ecological environment index model RSEI [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, **13**(11), doi: 10.1007/s12517-020-05414-7.
- [40] Gu Z J, Duan X W, Shi Y D, *et al.* Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, **93**: 54-64.
- [41] 王一超, 郝海广, 翟瑞雪, 等. 农户退耕还林生态补偿预期及其影响因素——以哈巴湖自然保护区和六盘山自然保护区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2017, **31**(8): 69-75.  
Wang Y C, Hao H G, Zhai R X, *et al.* Determinants of farm households' ecological compensation expectation to the Grain for Green Project: an empirical analysis based on Haba Lake National Nature Reserve and Liupanshan Mountain National Nature Reserve [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, **31**(8): 69-75.
- [42] 王建, 赵牡丹, 李健波, 等. 基于 MODIS 时序数据的秦巴山区生态环境质量动态监测及驱动力分析[J]. 山地学报, 2021, **39**(6): 830-841.  
Wang J, Zhao M D, Li J B, *et al.* Dynamic monitoring and driving forces of eco-environmental quality in the Qinba Mountains based on MODIS time-series data [J]. *Mountain Research*, 2021, **39**(6): 830-841.
- [43] 戴君虎, 王红丽, 王焕炯, 等. 六盘山景观格局及与主要气候因子的关系[J]. 地理研究, 2013, **32**(12): 2222-2232.  
Dai J H, Wang H L, Wang H J, *et al.* Studies on landscape pattern of Liupan Mountains and the relationship with main climate factors [J]. *Geographical Research*, 2013, **32**(12): 2222-2232.
- [44] 李晓东, 傅华, 李凤霞, 等. 气候变化对西北地区生态环境影响的若干进展[J]. 草业科学, 2011, **28**(2): 286-295.  
Li X D, Fu H, Li F X, *et al.* Research progress on effects of climate change on ecological environment in Northwest China [J]. *Pratacultural Science*, 2011, **28**(2): 286-295.
- [45] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(3): 425-438.  
Deng C H, Bai H Y, Gao S, *et al.* Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(3): 425-438.

## CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM <sub>2.5</sub> in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM <sub>2.5</sub> in Winter in Urban Taiyuan, China; Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite@Activated Carbon Composite Under Batch Experiments; Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity; Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions; A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)