

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 CO ₂ 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	刘恒嘉, 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, 顾钧, 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, 张森霖, 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价	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价	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 20 a 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)
富营养化湖泊藻华降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, 雷沛杰 (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, 潘旸, 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, 郑志成, 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, 蒋福祯, 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, 宋淑娥, 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砷累积的效应	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)
叶面调理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¹, 李兴^{1,2*}, 孙冰³

(1. 内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古师范大学内蒙古节水农业工程研究中心, 呼和浩特 010022; 3. 内蒙古自治区环境监测总站呼和浩特分站, 呼和浩特 010022)

摘要: 流域是重要的生态安全屏障和社会经济发展区域, 为了更加客观准确地评价干旱和半干旱区流域生态环境质量, 基于遥感生态指数(RSEI)引入盐度指标构建适用于干旱和半干旱区流域的遥感生态指数(AWRSEI)并以岱海流域为例分析其适用性. 基于AWRSEI模型, 采用4期 Landsat TM/OLI 合成影像, 对2001~2020年岱海流域的生态环境质量进行定量评价, 通过变异系数和空间自相关分析岱海流域生态环境质量时空演变规律, 并通过地理探测器进行成因分析和驱动因子解释力分析. 结果表明: ①AWRSEI与各生态因子的平均相关系数为0.860, 比单个指标分量更具代表性; 第一主成分的荷载正负值和排序与RSEI一致, 特征值贡献率比RSEI高3.69%, 评价结果与真实地表情况更为接近, 适合用于干旱区流域的生态环境质量评价. ②岱海流域2001~2020年AWRSEI指数的年均值为0.427, 生态环境质量基础较差, 期间AWRSEI的均值呈现波动上升的趋势, 并且在2020年年均值达到最高0.502. 整体生态环境质量明显好转, 恶化区域减少了20.51%, 改善区域增加了12.71%. 空间分布上, 岱海流域南部和西北部高海拔地区的林地生态环境质量优, 北部和南部中海拔地区生态环境质量较差, 湖区北侧生态环境质量优于南侧. ③岱海流域AWRSEI变异系数平均值为0.280, 生态环境质量状况稳定, 整体变化波动较小, 高波动主要集中在湖区南侧和居民点区域. 岱海流域生态环境质量存在显著的空间自相关性, 高-高集聚区主要分布在高海拔的林地区域和低海拔耕地区域; 低-低集聚区零星分布在中海拔区域. ④2001~2020年岱海流域生态环境的提升主要由于NDVI提高, NDBSI和NDSI降低. NDVI和NDBSI是交互作用最强的组合, 对生态环境的解释力最强. 土地利用是AWRSEI的主导因子, 解释力最强. 土地利用和气象因子的组合是交互作用最强, 且各驱动因子之间均为增强关系.

关键词: 生态环境质量; 遥感生态指数(RSEI); 岱海流域; 空间自相关; 地理探测器

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1598-17 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305059

Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI

ZHAO Jia-li¹, LI Xing^{1,2*}, SUN Bing³

(1. College of Chemistry and Environmental Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Inner Mongolia Water Saving Agricultural Engineering Research Center of Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Monitoring Station Hohhot Branch, Hohhot 010022, China)

Abstract: Watersheds are an important ecological security barrier and social and economic development area. In order to evaluate the ecological environment quality of arid and semi-arid watersheds more objectively and accurately, based on the remote sensing ecological index (RSEI), the salinity index was introduced to construct a remote sensing ecological index (AWRSEI) suitable for arid and semi-arid watersheds, and the Daihai watershed was taken as an example to analyze its applicability. Based on the AWRSEI model, four phases of Landsat TM/OLI composite images were used to quantitatively evaluate the ecological and environmental quality of the Daihai Basin from 2001 to 2020. The spatio-temporal evolution of the ecological and environmental quality of the Daihai Basin was analyzed using the coefficient of variation and spatial autocorrelation, and the cause analysis and driving factor explanation power analysis were carried out using geographic detectors. The results showed that: ① the average correlation coefficient between AWRSEI and various ecological factors was 0.860, which was more representative than that of a single index component. The load positive and negative values and ranking of the first principal component were consistent with those of RSEI, the contribution rate of eigenvalues was 3.69% higher than those of RSEI, and the evaluation results were closer to the real surface conditions, which is suitable for the ecological environment quality assessment of arid watersheds. ② The annual average of the AWRSEI index in the Daihai Basin from 2001 to 2020 was 0.427, which indicated a poor ecological environment quality basis. During the study period, the average of AWRSEI showed a fluctuating trend and reached the highest value of 0.502 in 2020. The overall ecological environment quality improved significantly, the deterioration area decreased by 20.51%, and the improvement area increased by 12.71%. In terms of spatial distribution, the ecological environment quality of forest land in the southern and northwestern high-altitude areas of the Daihai Basin was good, whereas that in the northern and southern mid-altitude areas was poor, and that in the northern area was better than that in the southern area. ③ The average variation coefficient of AWRSEI in the Daihai Basin was 0.280, the ecological environment quality was stable, and the overall change fluctuation was small; the high fluctuation was mainly concentrated in the southern part of the lake and the residential area. There was a significant spatial autocorrelation in the ecological environment quality of the Daihai Basin, and the high-high agglomeration area was mainly distributed in the forest area at high altitude and the cultivated land area at low altitude. Low-low concentration areas were scattered in the middle altitude area. ④ The improvement

收稿日期: 2023-05-07; 修订日期: 2023-06-19

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(2020ZY0026); 国家自然科学基金项目(52160022)

作者简介: 赵嘉丽(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊生态环境和水色遥感, E-mail: 361123059@qq.com

* 通信作者, E-mail: 549645024@qq.com

of the ecological environment in Daihai Basin from 2001 to 2020 was mainly due to the increase in NDVI and the decrease in NDBSI and NDSI. NDVI and NDBSI were the combination with the strongest interaction and the strongest interpretation of the ecological environment. Land use was the dominant factor of AWRSEI and had the strongest explanatory power. The combination of land use and meteorological factors was the strongest interaction, and the relationship between each driving factor was enhanced.

Key words: ecological environment quality; remote sensing ecological index (RSEI); Daihai Basin; spatial autocorrelation; geographic detector

生态环境安全是国家安全的重要组成部分,是功在当代、利在千秋的事业,是人类生存的基本保障,是经济社会持续健康发展的重要保障。“生态兴则文明兴、生态衰则文明衰”,面对生态环境问题的严峻挑战,开展生态环境质量监测评估对生态环境保护政策的制定有重要借鉴价值^[1]。习近平总书记在内蒙古代表团审议团会议上多次强调了新时代生态环境保护的极端重要性,就保持加强生态文明建设,加大生态系统保护力度,守护好祖国北疆亮丽风景线做出重要指示^[2]。内蒙古自治区是我国北方的重要生态屏障,其宏观生态系统状况不仅关系民众生存和生计,而且关系华北、东北、西北乃至全国的生态安全^[3]。内蒙古自治区大面积区域处于中国北方干旱和半干旱区,是典型的生态环境脆弱带^[4],开展干旱和半干旱区生态环境质量监测评估对内蒙古生态环境保护政策的制定有重要参考意义。

生态环境质量评价方法主要分为:单因子变化分析和多因子变化综合分析。与单因子分析相比,多因子综合分析更加全面和准确。近年来,学者们提出了多种评价指标体系,其中徐涵秋遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)^[5]具有指标多样性、权重客观性和结果可视性等优点。其基本思想是通过主成分分析^[6]将各指标对 RSEI 的贡献由其向量加载到 PC_1 进行加权,避免了固定权重的主观分配,最大限度地减少权重定义中其他属性引起的误差。因此, RSEI 具有鲁棒性^[7],且能快速、客观和定量地对区域生态环境进行评价^[8],国内外学者已将其应用于不同的区域进行生态环境评价^[9-15],也不乏学者对其进行了不同角度的改进^[16-19]。

流域作为综合区域环境特征的生态单元,既能与外界进行物质、能量和信息交换,同时又具有清晰边界且相对封闭的独立单元,被众多学者认为是生态学理论研究与实际应用相结合后最适宜实验地。冯荣荣等^[20]对泔河流域近 20 年生态环境时空变化特征及其集聚分布模式、影响区域生态环境的主导因子和交互因子展开探究;Liu 等^[21]利用 RSEI 对库耶河流域进行了生态环境质量评价;Dong 等^[22]选取 RSEI 对洱海流域 2000~2020 年的生态环境质量进行分析;Luo 等^[23]通过 GEE 平台计算乌兰木伦河流域 2000~2020 年 RSEI 空间分布;陈丽红等^[24]对 1987~2017 年疏勒河流域的生态环境质量进行综合评价及驱动力

分析。针对干旱区土壤盐碱化和沙化等问题,不少学者针对干旱和半干旱区域的 RSEI 进行了改进与适用性研究。张伟等^[25]引入综合盐度指标 CSI 和水网密度遥感估算模型 EMW 提出的改进型遥感生态指数 ERSEI;第五泾渭等^[26]利用绿度、湿度、盐度和沙度指数耦合构建了半干旱地区遥感生态指数 SARSEI;王杰等^[27]加入土地退化度构建了干旱遥感生态指数 ARSEI;刘尚钦等^[28]从生态因子选择与耦合方法两方面对其进行了优化,构建了绿洲遥感生态指数 ORSEI;罗镕基等^[29]引入荒漠化指数,构建了干旱遥感生态指数 DRSEI。针对干旱区流域,颀金凤等^[30]基于绿度、湿度、热度、盐度和荒漠化程度这 5 个指标,构建了改进遥感生态指数 IRSEI,并对 2000~2020 年石羊河流域生态环境质量进行评价。

呼伦湖、乌梁素海和岱海是内蒙古重要的三大淡水湖,在调节气候、修复生态和涵养水源方面发挥着重要作用,对区域经济发展和环境改善都起着举足轻重的作用,但由于其生态脆弱性,使得内陆湖泊对气候和人类活动的变化响应十分敏感^[31]。岱海作为内蒙古“一湖两海”的重要组成,其流域是干旱和半干旱地区东部边缘典型内陆封闭流域,自然条件决定了生态环境脆弱,同时这种独特条件下的环境演替往往具有不可逆性^[32]。近年来,岱海环境不断恶化,表现为湖泊水位下降,湖水咸化,营养物质含量升高以及水生生物种类减少等^[31],不少学者对此展开了研究^[33-35],而针对岱海流域的生态环境质量评价鲜见报道。因此,本文基于 RSEI 模型,引入盐度指标 NDSI 构建干旱区流域遥感生态指数(AWRSEI)作为流域的评价指标,以 2014 年岱海流域为例分析了 AWRSEI 的适用性。基于 AWRSEI 模型,采用 4 期 Landsat TM/OLI 合成影像,对 2001~2020 年岱海流域的生态环境质量进行定量评价,以可视化形式展现流域生态环境质量时空分布特征;同时通过变异系数、空间自相关分析流域生态环境质量时空演变规律,并通过地理探测器进行成因分析和驱动因子解释力分析,进一步探究影响该流域生态环境演变的重要因素,以期对岱海流域生态环境定量动态监测提供新思路,并为岱海流域生态环境整治以及可持续发展政策制定和规划治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

岱海位于内蒙古自治区乌兰察布市凉城县境内,是半干旱地区典型内陆湖,湖水补给主要依靠湖区降水和地表径流以及地下径流,消耗主要是湖面的垂直蒸发。岱海流域(112°16′~112°59′E,40°11′~40°48′N,图1)总面积达2 341.67 km²,地处蒙晋交界,流域北部、西部及西南部为黄河流域,东南部与海河流域相接,东北部为内陆河流域黄旗海水系。岱海流域是典型内陆封闭小流域,属黄土高原小流域

生态系统,是京津冀地区生态屏障的重要组成部分。流域以中低山地、丘陵和陷落盆地平原为主,主要分布有典型草原植被、高山草甸植被、沼泽植被等,属温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温5.1℃,多年平均降水量392 mm,年平均蒸发量高达1 938 mm。流域涉及12个乡镇区,分别为凉城县的六苏木镇、长汉营乡、曹碾满族乡、天城乡、岱海林场、岱海循环工业发展区、岱海旅游办事处、岱海镇和麦胡图镇,卓资县的大榆树乡和十八台镇,丰镇市的三义泉镇^[36~39],约有16.5万人口,主要从事农业与畜牧业生产。

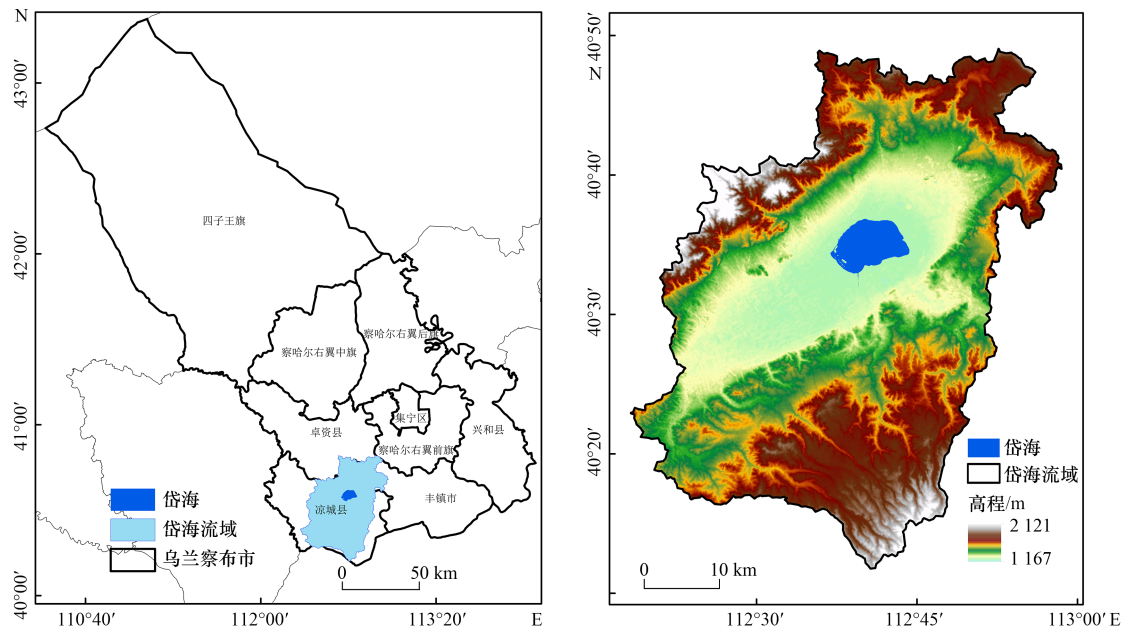


图1 岱海流域概况

Fig. 1 Overview of Daihai Basin

1.2 数据源与预处理

本研究选用数据包括:遥感影像数据数字、高程模型数据(DEM)和人口密度、GDP、土地利用数据和气象数据等辅助数据,各数据主要信息见表1。预处理中辐射定标是将遥感影像的DN值转换为传感器处反射率;FLAASH大气校正则为了消除大气和光照等因素对地物反射影响,以减少不同时期影像在光照和大气等条件产生的差异;剪裁所使用的边界来源为ArcGIS水文分析提取的岱海流域边界。由于中国科学院资源环境科学与数据中心未公布2019年降水和蒸发数据,使用2020年数据替代,其余数据均为2000年和2019年数据。

1.3 研究方法

1.3.1 AWRSEI模型

干旱区流域遥感生态指数(AWRSEI)是针对陆地开发的生态指数,大面积水域会对真实地面湿度以及主成分的载荷产生影响,需先剔除大面积水域。

本研究选用归一化水体指数(NDWI)获取流域内的水体掩模。

$$NDWI = (\rho_{Green} - \rho_{NIR}) / (\rho_{Green} + \rho_{NIR}) \quad (1)$$

式中, ρ_{Green} 为绿波段反射率; ρ_{NIR} 为近红外波段反射率。

针对干旱区流域生态系统的基本组成,以流域地表生态环境动态监测为导向,选取绿度、湿度、干度、热度和盐度这5个生态因子为主要指标,计算公式如表2所示。其中,绿度、湿度、干度和热度主要参考徐涵秋^[5]的遥感生态指数。盐度为本研究新引入的反映土壤盐分含量的指标,由土壤盐度指数(NDSI)代表^[41,42]。

AWRSEI通过主成分分析(PCA),将5个指标信息集中到第一主成分上,以单一指标形式呈现。为了避免指标量纲不统一对权重的影响,在进行主成分分析之前需对各指标进行归一化。公式如下:

$$NI_i = (I_i - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (2)$$

表 1 研究数据和处理方法¹⁾
Table 1 Research data and processing methods

数据	精度	时间	预处理方法	数据来源
Landsat TM	30 m	2001 年 8 月 24 日 2009 年 8 月 26 日	辐射定标、大气校正、去云和裁剪	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
Landsat OLI	30 m	2014 年 8 月 26 日 2020 年 8 月 24 日	辐射定标、大气校正、去云和裁剪	
DEM	30 m	—	流域提取	
年降水	1 km	2000 年和 2020 年	剪裁和重分类	资源环境科学与数据中心 https://www.resdc.cn/
年蒸发	1 km	2000 年和 2020 年		
人口密度	1 km	2000 年和 2019 年		
GDP	1 km	2000 年和 2019 年		
土地利用	30 m	2001 年和 2020 年	剪裁和重分类	文献[40]

1)“—”表示无相应属性

表 2 各指标公式¹⁾
Table 2 Calculation formula of each index

指标	公式	参数说明	文献
NDVI	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red})$	ρ_{NIR} 为近红外波段反射率; ρ_{Red} 为红波段的反射率	[43, 44]
WET	$WET(TM) = 0.0315\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2}$ $WET(OLI) = 0.1511\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}$	ρ_{Blue} 为蓝波段反射率; ρ_{Green} 为绿波段的反射率; ρ_{Red} 为红波段反射率; ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率; 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	[45]
NDBSI	$NDBSI = \frac{SI + IBI}{2}$ $SI = \frac{(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})}$ $IBI = \frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \right)$ $IBI = \frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \right)$	SI 为裸土指数; IBI 为建筑指数; ρ_{SWIR1} 为短波红外 1 波段反射率; ρ_{Red} 为红波段反射率; ρ_{Blue} 为蓝波段反射率; ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率; ρ_{Green} 为绿波段的反射率	[46]
LST	$LST = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda T_b}{\rho} \right)^\varepsilon} - 237.15$ $T_b = K_2 / \ln \left(\frac{K_1}{L_6} + 1 \right)$ $L_6 = gain \times DN + bias$	T_b 为亮度温度; λ 为热红外波段中心波长; $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; ε 为地表比辐射率; K_1 和 K_2 为定标参数; L_6 为热红波段的辐射值; gain 和 bias 为波段的增益和偏置; DN 为像元的灰度值	[47]
NDSI	$NDSI = \frac{\rho_{Red} - \rho_{NIR}}{\rho_{Red} + \rho_{NIR}}$	ρ_{Red} 为红波段反射率; ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率	[48]

1)NDVI 为绿度指标, WET 为湿度指标, NDBSI 为干度指标, LST 为热度指标, NDSI 为盐度指标

式中, NI_i 为各指标的归一化结果; I_i 为各指标在第 i 个像元值; $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别为各指标的最大值和最小值.

采用主成分分析法对归一化和剔除异常值处理后 5 个生态指数进行耦合, 得到第一主成分 PC_1 , 即未经标准化处理的初始遥感生态指数 $AWRSEI_0$. 对 $AWRSEI_0$ 进行标准化处理, 得到 AWRSEI, 计算公式如下:

$$AWRSEI_0 = PC_1 [f(NDVI, WET, NDBSI, LST, NDSI)] \quad (3)$$

$$AWRSEI = \frac{AWRSEI_0 - AWRSEI_{0min}}{AWRSEI_{0max} - AWRSEI_{0min}} \quad (4)$$

式中, $AWRSEI_{0max}$ 和 $AWRSEI_{0min}$ 分别为 $AWRSEI_0$ 的最大值和最小值, AWRSEI 值为 $[0, 1]$, 数值越接近 1 表示生态环境质量越好.

1.3.2 变异系数

变异系数^[49]是以标准差和平均值之间的关系来反映因变量的变化程度, 可用来反映多年生态环境质量年际变化的稳定程度. 该值越大, 离散程度越大, 稳定性越低^[50]. 计算公式为:

$$CV = \frac{S_D}{\overline{I_{AWRSEI}}} \quad (5)$$

式中, CV为变异系数; S_D 为某指标每一栅格的多年标准差; $\overline{I_{AWRSEI}}$ 为该指标每一栅格的多年平均值。

1.3.3 空间自相关

空间自相关常被用于研究时空格局演变, 分为全局自相关和局部空间自相关两种类型^[51]。全局自相关是在整个研究区域内对地理要素进行空间特征性描述, 通常采用全局指数(global Moran's I)来分析总体空间关联程度与空间差异性。计算模型为:

$$\text{global Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

式中, n 为流域像元总数; m 为像元单元 i 的邻近单元个数; W_{ij} 为空间权重矩阵 W 中的元素, 当像元单元 i 与 j 相邻时, $W_{ij} = 1$, 反之 $W_{ij} = 0$; x_i 和 x_j 分别为AWRSEI在空间地域单元 i 和 j 上的观测值; $\bar{x}$ 为流域AWRSEI均值。Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$, Moran's $I > 0$ 表示空间正相关, 值越大, 正相关性越显著, 空间聚集性越强; Moran's $I = 0$ 表示空间不相关, 空间单元随机分布; Moran's $I < 0$, 则表示空间负相关, 值越小, 负相关性越显著, 空间差异性越大。

为进一步揭示流域生态环境质量的高-高和低-低空间集聚区, 了解生态环境质量局部的空间分布特征, 采用局部指数(local Moran's I)进行局部空间自相关分析^[52]。计算模型为:

$$\text{Local Moran's } I = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

式中各参数含义同式(6)。

1.3.4 地理探测器

地理探测器是王劲峰等^[53]提出的探测空间分异性及揭示背后驱动因子的一种统计学方法, 其核心思想是通过分析变量空间异质性来定量探测自变量对因变量的影响程度, 已在生态环境方面得到了广泛应用。参考已有研究成果^[30, 54, 55], 本研究采用地理探测器中的因子探测器和交互作用探测器来揭示影响岱海流域AWRSEI变化主导生态因子并进行驱动因子量化分析。因子探测器, 探测各因子变化趋势对AWRSEI变化趋势的影响大小或解释力大小, 模型如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中, h 为因子; L 为因子的分层数; N_h 和 N 分别为各

因子的层 h 和整个流域的样本数; σ_h 和 σ 分别为层 h 和4期遥感影像的AWRSEI所有像元的方差。 q 为各因子对流域AWRSEI的解释力, 值域为 $[0, 1]$, 该值越大, 说明该因子对AWRSEI变化的解释力越强。

交互作用探测器, 用于判断不同因子对AWRSEI变化的交互作用。通过比较在单因子作用时的 q 值、2个单因子的 q 值之和与双因子交互作用时的 q 值, 根据三者之间的大小关系, 将交互作用类型分为5类, 如表3所示。

表3 双因子交互作用结果类型

Table 3 Two-factor interaction result type	
交互作用类型	q 值范围
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$
单线性减弱	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$
相互独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

2 结果与分析

2.1 AWRSEI模型验证

2.1.1 AWRSEI数据相关性分析

本研究对岱海流域的NDVI、WET、NDBSI、LST、NDSI和AWRSEI在ArcGIS中进行采样点间隔500 m全区均匀采样, 获得8 662个样本。通过分析各生态因子之间相关性, 来判定AWRSEI指数与各因子相关性和综合代表程度, 并对其进行数据质量检验, 结果如图2。

由图2可知, AWRSEI服从正态分布, 能全面反映一定区域内生态环境状况。NDVI和WET与AWRSEI的Pearson相关系数均为0.926; NDBSI、LST和NDSI与AWRSEI的Pearson相关系数分别为-0.962、-0.579和-0.971, 均通过了 $P < 0.01$ 显著性检验。AWRSEI指数与5个指标分量显著相关, 比NDVI、WET、NDBSI、LST和NDSI这5个指标分量的任一单指标分量更具代表性, 能综合反映生态环境状况。

2.1.2 AWRSEI模型验证分析

RSEI和AWRSEI中各生态因子的主成分分析结果如表4所示。AWRSEI的 PC_1 贡献率为80.04%, 比RSEI高3.69%, 包含了更多信息。RSEI和AWRSEI各指标贡献率都仅在第一主成分上有着相同正负分布, 且与图2相关分析的正负贡献具有一致性, 具体为NDVI和WET在第一主成分上贡献率为正值, NDBSI、NDSI和LST为负值, 表明NDVI和WET对生态环境改善起促进作用, NDBSI、NDSI和LST对生态环境改善起抑制作用, 与实际情况相符。AWRSEI的5个指标分量对 PC_1 的荷载值绝对值排序为: NDBSI

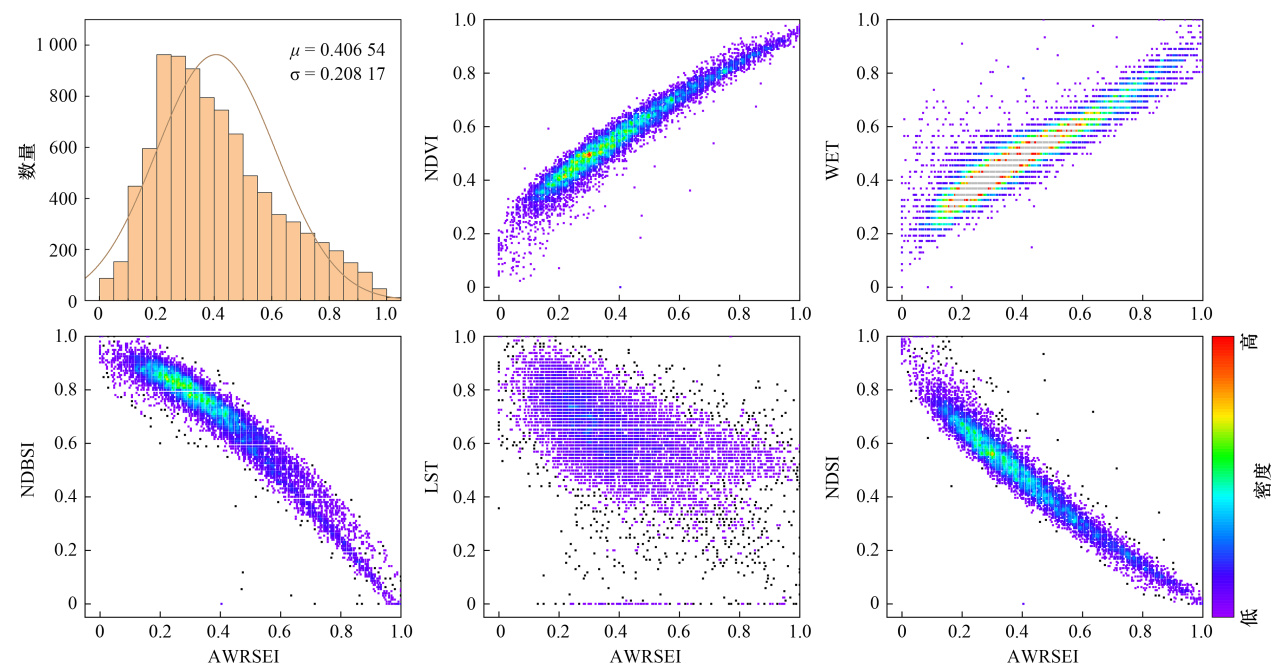


图 2 AWRSEI直方图和 AWRSEI 与 5 个指标分量的点密度
Fig. 2 AWRSEI histogram and point density map of AWRSEI with five indicator components

(-0.552) > NDSI(-0.536) > NDVI(0.447) > WET(0.384) > LST(-0.248), 这与 RSEI 的 4 个指标排序一致且与现实中 5 个指标对生态环境影响相符合。综合表明,第一主成分可以很好地集成 5 个指标分量信息,AWRSEI 模型采用 PCA 的方法来耦合 5 个指标分量可全面反映生态环境综合状况。

表 4 RSEI 和 AWRSEI 各指标主成分分析结果¹⁾

Table 4 Principal component analysis results of RSEI and AWRSEI indicators							
指标	主成分	NDVI	WET	NDBSI	LST	NDSI	PC _i 贡献率/%
RSEI	PC ₁	0.589	0.462	-0.656	-0.311	—	76.35
	PC ₂	0.106	0.135	-0.272	0.947	—	94.74
	PC ₃	0.812	-0.534	0.229	0.051	—	98.55
	PC ₄	0.266	0.695	0.665	0.063	—	100.00
AWRSEI	PC ₁	0.447	0.384	-0.552	-0.248	-0.536	80.04
	PC ₂	0.084	0.085	-0.209	0.965	-0.101	94.11
	PC ₃	0.449	-0.551	0.466	0.055	-0.524	98.95
	PC ₄	-0.087	-0.736	-0.660	-0.059	0.107	99.99
	PC ₅	-0.764	-0.007	0.004	0.001	-0.645	100.00

1) “—”表示无对应指标

2.1.3 RSEI 和 AWRSEI 模型对比分析

岱海流域内 RSEI 和 AWRSEI 评价结果如图 3 所示。从中可知,RSEI 和 AWRSEI 对岱海流域生态环境监测的大致趋势一致,但在空间分布和程度上存在差异。

为了更好地分析 RSEI 和 AWRSEI 在评价岱海流域生态环境质量方面的差异,参考 2006 年颁布的《生态环境状况评价技术规范》(HJ/T 192-2006)^[56],依据 RSEI 和 AWRSEI 指数值划分为 5 个等级:差[0, 0.2)、较差[0.2, 0.4)、一般[0.4, 0.6)、良[0.6, 0.8)和优[0.8, 1],并通过对岱海流域湖区周边、耕

地、林地、建筑用地和未利用地进行对比,量化分析 RSEI 和 AWRSEI 的差异,结果见图 4 和图 5。

岱海湖区周边由于湖泊面积缩小而导致湖泊周边土壤盐碱化,AWRSEI 与 RSEI 相比更为完整地显示了岱海湖区周边盐碱土的轮廓特征与分布形态,湖区周边 RSEI 均值为 0.428[图 5(a)],AWRSEI 均值为 0.405,对比图像纹理可知 AWRSEI 细节突出。岱海流域内广泛分布着植被,针对耕地和林地而言,耕地的 RSEI 均值为 0.602[图 5(b)],AWRSEI 均值为 0.627,林地 RSEI 均值为 0.638[图 5(c)],AWRSEI 均值为 0.682,与 RSEI 相比,AWRSEI 突出了植被覆盖,增强

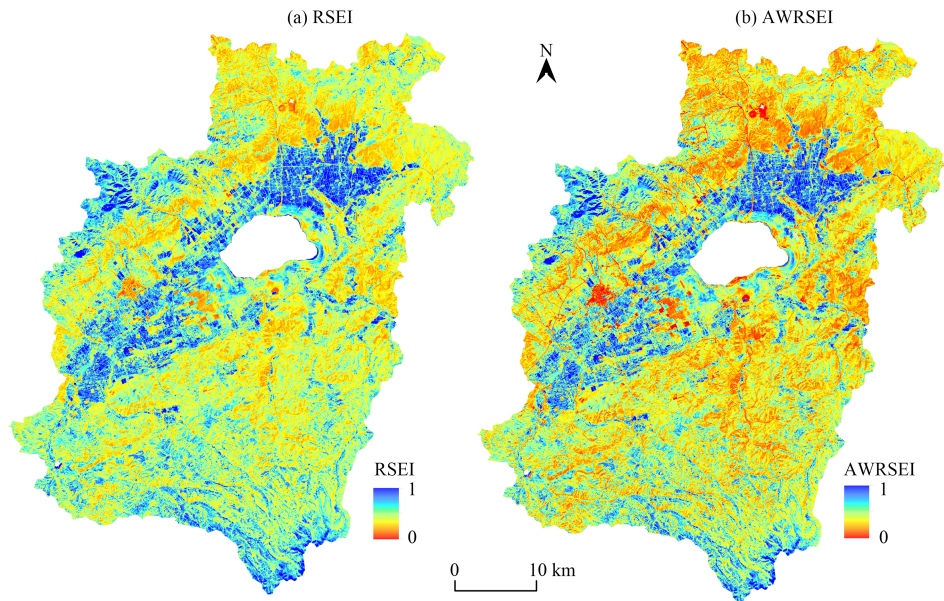


图 3 RSEI与AWRSEI对比

Fig. 3 Comparison between RSEI and AWRSEI

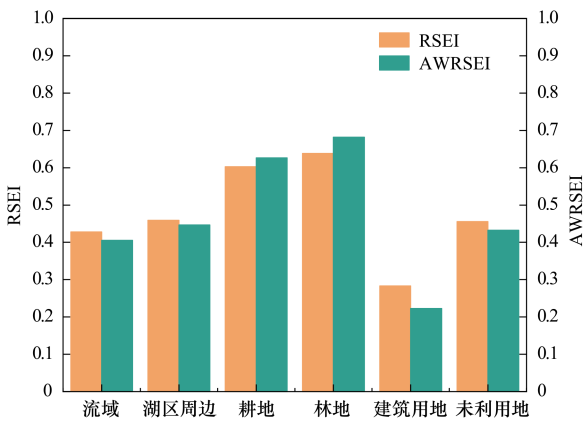


图 4 RSEI与AWRSEI局部细节统计

Fig. 4 Partial detailed statistics of RSEI and AWRSEI

了植被与周边不同地类的对比度. 图5(d)主要包括了建筑用地, 其RSEI均值为0.283, AWRSEI均值为0.223, 对比可知AWRSEI中建筑用地轮廓提取更精确. 图5(b)中, RSEI未提取出的道路在AWRSEI中可以明显被识别. 未利用地RSEI均值为0.455[图5(e)], AWRSEI均值为0.433, 对比可知AWRSEI对盐碱地监测更加灵敏. 总体而言, AWRSEI比RSEI对植被更加敏感, 对建筑用地和盐碱土分辨能力更强, 生态环境质量评价结果与真实地表情况更为接近.

2.2 岱海流域生态环境质量综合分析

2.2.1 生态因子主成分分析

由表5可知, 4期的第一主成分(PC₁)贡献率均大

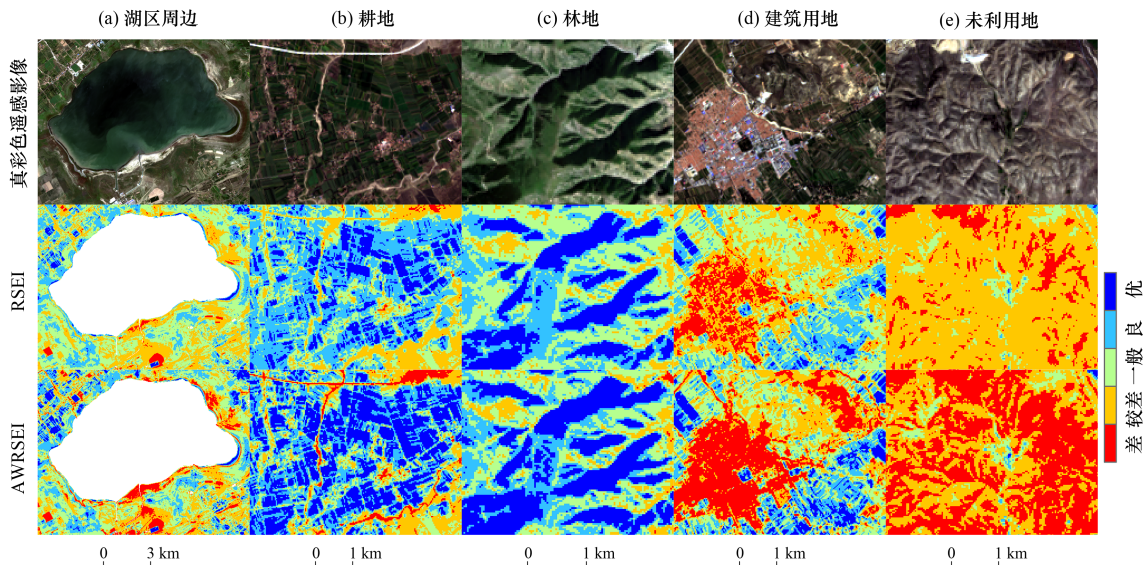


图 5 RSEI与AWRSEI局部细节对比

Fig. 5 Comparison of local details between RSEI and AWRSEI

于 74%,且各生态因子 PC_1 贡献率在第一主成分上有着相同正负分布. 5 个生态因子对 PC_1 荷载值均值绝对值排序为: $NDVI(0.505) > NDBSI(-0.538) > NDSI(-0.514) > WET(0.353) > LST(-0.178)$,这与现实

中 5 个指标对生态环境影响相符合. 综合表明, PC_1 可以很好地集成 5 个指标分量信息,本研究区可采用第一主成分 PC_1 来提取 AWRSEI,能够全面反映岱海流域生态环境的综合状况.

表 5 2001、2009、2014 和 2020 年各指标主成分分析结果
Table 5 Principal component analysis results of each index in 2001, 2009, 2014 and 2020

年份	第一主成分(PC_1)					PC_1 贡献率/%
	NDVI	WET	NDBSI	LST	NDSI	
2001	0.641	0.223	-0.413	-0.036	-0.606	74.64
2009	0.479	0.386	-0.557	-0.321	-0.456	76.19
2014	0.447	0.383	-0.552	-0.248	-0.536	80.04
2020	0.452	0.420	-0.631	-0.109	-0.458	81.18

2.2.2 生态环境质量时空变化分析

为了更好地分析岱海流域的生态环境质量,对岱海流域 AWRSEI 指数进行分级,见图 6. 在此基础上统计岱海流域各年生态环境质量等级累计比例及均值^[56],见表 6.

通过统计岱海流域 2001~2020 年 AWRSEI 值发现, AWRSEI 值位于等级优(0.8~1)的比例较少,流域生态环境质量基础较差. 2001~2020 年 AWRSEI 指数

年均值为 0.427; 2020 年岱海流域均值达峰值为 0.502,生态环境质量最佳;而 2001 年生态环境质量最差,AWRSEI 均值为 0.377. 20 年间,整体生态环境质量明显好转,等级差和良的面积占比变化显著,等级差占比减少了 20.51%,等级良占比增加了 12.71%. 总体而言,2001~2020 年 AWRSEI 的均值呈现波动上升趋势,并且在 2020 年均值达到最高,说明研究期内岱海流域生态环境质量呈现改善趋势.

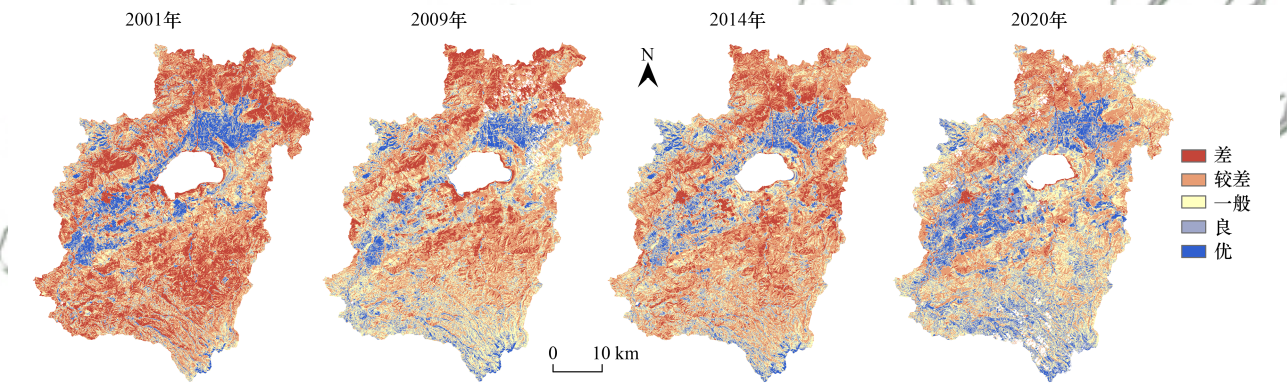


图 6 岱海流域 AWRSEI 指数分级
Fig. 6 AWRSEI index classification of Daihai Basin

表 6 岱海流域 AWRSEI 指数各等级占比与均值统计
Table 6 Statistical of the proportion and mean value of AWRSEI index in Daihai Basin

年份	等级比例/%					均值
	差[0, 0.2)	较差[0.2, 0.4)	一般[0.4, 0.6)	良[0.6, 0.8)	优[0.8, 1]	
2001	25.93	35.47	20.87	9.83	7.90	0.377
2009	12.37	37.46	31.03	13.89	5.25	0.425
2014	14.40	41.16	25.91	13.01	5.52	0.405
2020	5.42	28.89	33.72	22.54	9.42	0.502

从空间变化角度分析,岱海生态环境质量总体处于较差水平. 生态环境质量等级较差和差的区域主要分布在凉城县城、湖区周边、流域北部中海拔地区和南部中海拔地区,这些区域海拔相对较低,人类活动频繁. 生态环境质量等级良和优的区域主要分布在流域南部和西北部高海拔地区,这些区域主要为林地,植被覆盖率高且人类活动少. 总体而言,

生态环境质量等级以较差和一般等级为主,平均占比为 35.745% 和 27.883%. 其中,等级差和较差主要分布于中海拔地区;等级良和等级优面积占比最少,主要分布于高海拔地区林地和低海拔耕地.

2.2.3 生态环境质量等级转移分析

为突出岱海流域 AWRSEI 指数变化情况,本研究对 4 期岱海流域的 AWRSEI 指数进行了差值处理. 差

值结果级差范围为 $[-4, 4]$,其中, -4 和 -3 为明显恶化, -2 和 -1 为轻微恶化, 0 为不变, 1 和 2 为轻微改善, 3

和 4 为明显改善,共5个等级变化,通过正负将等级变化分为恶化、不变和改善这3大类,见图7和图8.

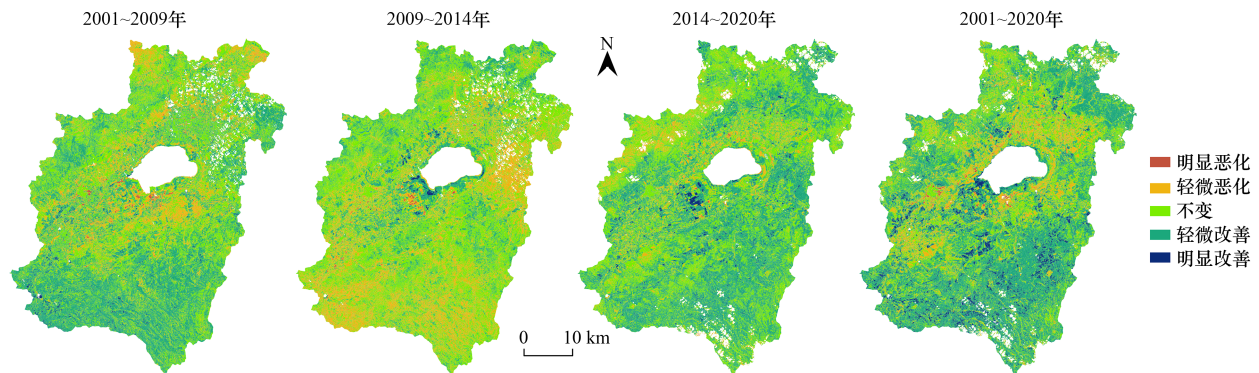


图7 岱海流域 AWRSEI 指数等级变化

Fig. 7 Chart of AWRSEI index level change in Daihai Basin

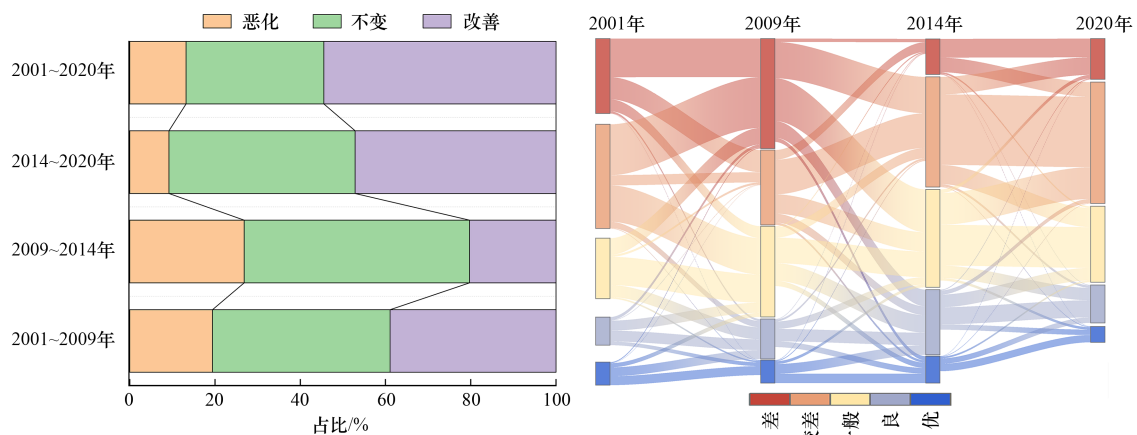


图8 岱海流域各期 AWRSEI 等级变化统计

Fig. 8 Statistical chart of AWRSEI grade changes in different periods of Daihai Basin

统计分析表明,生态环境质量以改善为主,2001~2020年生态环境质量改善区域占比54.48%,主要分布在中高海拔地区;生态环境质量恶化区域占比12.23%,主要分布在湖区周边和西北部中高海拔区域.其中,2009年到2014年,恶化区域占比26.82%,为4期影像中恶化占比最高,主要区域集中在凉城县城和湖区周边.2014年到2020年生态环境整体变化最明显,改善区域占比47.11%.总体来看,生态环境质量改善区域远大于恶化区域,岱海流域生态环境质量有所改善.

2.2.4 生态环境质量变异波动分析

为直观表示生态环境质量变化稳定性,通过计算2001~2020年岱海流域 AWRSEI 的变异系数 CV 反映生态环境质量波动程度,并将变异系数 CV 在 ArcGIS 中通过自然间断点划分为低波动、较低波动、中波动、较高波动和高波动这5个等级,结果见图9.

2001~2020年岱海流域生态环境质量变异系数 CV 最高值1.730,平均值0.280,表明生态环境质量状况较为稳定.图9显示,生态环境质量变异程度低

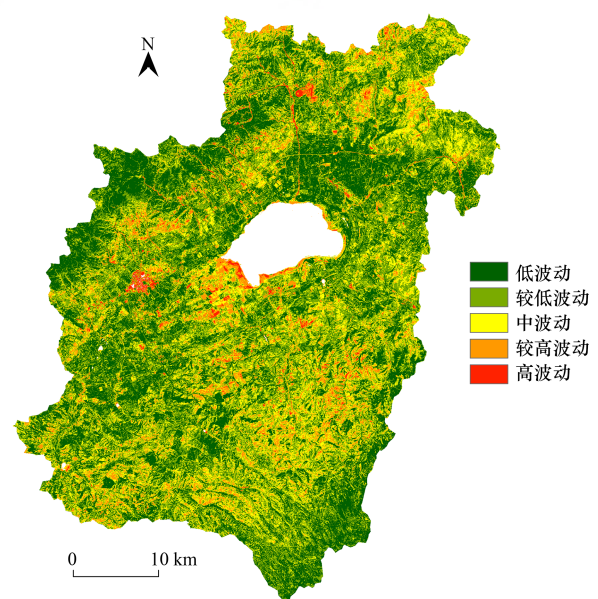


图9 岱海流域 AWRSEI 指数变异波动

Fig. 9 AWRSEI index variation fluctuation in Daihai Basin

波动、较低波动、中波动、较高波动和高波动区域面积占比分别为11.61%、30.36%、30.69%、19.41%和7.93%.低波动和较低波动区域主要分布在高海

拔林地和低海拔耕地区域;中波动区域分布在流域中海拔区域;较高波动和高波动区域主要分布在湖区南侧和居民点区域。整体而言,岱海流域除居民点区域和湖区南侧外,大部分地区生态环境质量波动较小。

2.2.5 生态环境质量空间相关性分析

地理学第一定律指出,任何事物间都有联系且

距离相近的事物联系更为密切,表现出事物的联系性特征。与此同时,具有空间特性的事物也表现出空间分异性。为了分析岱海流域 AWRSEI 的空间联系与分异性,将 AWRSEI 在 ArcGIS 中转为 250 m×250 m 的矢量点数据,通过空间自相关检验后,使用聚类 and 异常值工具分析岱海流域 AWRSEI 指数的空间自相关并绘制 LISA 聚类^[57,58],结果见图 10。

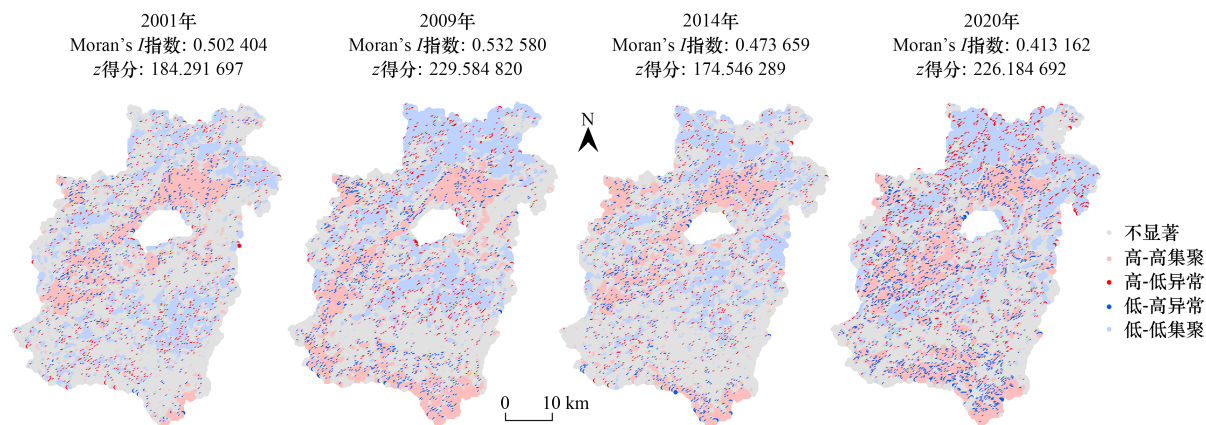


图 10 岱海流域 AWRSEI 指数 LISA 聚类图

Fig. 10 LISA cluster diagram of AWRSEI index in Daihai Basin

图 10 表明,4 期岱海流域 Moran's I 指数和 z 得分均表示 Moran's I 指数显著,通过了显著性水平 5% 的检验,说明岱海流域生态环境质量空间分布存在显著相关性。整体上岱海流域生态环境质量高-高集聚区主要分布在高海拔林地区域和低海拔耕地区域;低-低集聚区零星分布在中海拔区域。2009 年之前岱海流域生态环境质量空间分布较稳定,2009 年后高-高集聚区范围扩大,但内部高-低异常区明显增多,表明 2009~2020 年生态环境质量等级良的区域高-高集聚的稳定性变差。从局部来看,变化最明显区域有流域北部中海拔区域和南部中高海拔区域。北部中海拔区域呈现低-低集聚区域扩大,生态环境质量变差。南部中高海拔区域 2001 年和 2014 年呈现不显著的高-高集聚的空间集聚状况,而 2009 年和 2020 年高-高集聚范围扩大,表明此区域的生态环境质量稳定性极差,极易受到自然及人为因素的扰动。

2.3 岱海流域生态环境质量变化原因分析

为了更好地分析岱海流域生态环境质量变化,本研究利用地理探测器揭示 NDVI、WET、NDBSI、LST 和 NDSI 在 4 期影像中生态环境质量变化的解释力强度。在 ArcGIS 将 4 期影像的因变量和自变量使用 1 km×1 km 格网重采样工具统一各因子尺度,获得 2 166 个采样点,并采用自然间断法重分类为 6 类后通过地理探测器分析^[55],得到各生态因子对岱海流域生态环境的解释程度。

2.3.1 单因子探测分析

由表 7 和表 8 可知,所有探测因子 P 值均小于 0.01,表明所选探测因子均通过显著性检验,可作为影响因素进行成因分析。2001 年、2009 年、2014 年和 2020 年岱海流域 NDVI、NDBSI 和 NDSI 是 AWRSEI 的主导因子,LST 解释力最低。2001~2020 年岱海流域 NDVI 提升 0.262,NDBSI 和 NDSI 分别下降 0.081 和 0.261。NDVI 与 AWRSEI 变化趋势一致,呈现“先下降后上升”趋势;NDBSI 与 AWRSEI 变化趋势相反,呈现“先上升后下降”趋势;NDSI 呈现“波动下降”的趋势。整体而言,岱海流域生态环境提升主要由于植被归一化指数提高,土壤干度和盐度的降低。

2.3.2 交互式探测分析

将 2001、2009、2014 和 2020 年岱海流域因变量 AWRSEI 与 5 个自变量进行交互式探测分别得到 15 种结果,探测结果均为双因子和非线性增强两类,表明交互式探测作用效果高于单个因子作用效果。

图 11 结果表明,岱海流域 4 期影像中 NDVI 和 NDBSI 的组合是交互作用最强组合,q 值最高达 0.970,即 NDVI 显著变化增加了 NDBSI 作为自变量对生态环境的解释力。此外,NDVI 与其他因子交互作用也产生了较高的 q 值,表明岱海流域生态环境是由多个因子相互作用的,而不是简单的叠加或者独立影响。

表 7 岱海流域各期生态因子解释力探测结果

Table 7 Explanatory power detection results of ecological factors in each period of Daihai Basin

生态因子	2001 年		2009 年		2014 年		2020 年	
	P 值	q 值	P 值	q 值	P 值	q 值	P 值	q 值
NDVI	0.000	0.948	0.000	0.845	0.000	0.909	0.000	0.861
WET	0.000	0.532	0.000	0.698	0.000	0.817	0.000	0.785
NDBSI	0.000	0.818	0.000	0.824	0.000	0.893	0.000	0.914
LST	0.000	0.023	0.000	0.451	0.000	0.311	0.000	0.145
NDSI	0.000	0.945	0.000	0.844	0.000	0.910	0.000	0.871

表 8 岱海流域各期主导因子和 AWRSEI 变化

Table 8 Changes of dominant factors and AWRSEI in each period of the Daihai Basin

生态因子	2001 年	2009 年	2014 年	2020 年
NDVI	0.442	0.565	0.556	0.704
NDBSI	0.660	0.641	0.676	0.579
NDSI	0.546	0.431	0.485	0.285
AWRSEI	0.377	0.425	0.405	0.502

2.4 岱海流域生态环境质量驱动因子分析

为探究岱海流域生态环境质量变化的驱动机制,根据流域近年来演变特征并参考已有研究成果,本研究选取 2001 年和 2020 年气象因子、地形因子和人类活动这 3 个方面因素,利用地理探测器揭

示其对岱海流域生态环境质量变化的解释力^[31]. 岱海流域是半干旱区封闭小流域,无人工生态补水,降水和蒸发波动对该流域生态环境变化影响显著,故本研究采用降水(pre)和蒸发(evap)两个指标代表气象因子. 由于地形、地貌在不同海拔段的变化,加之坡向的分异,形成了岱海流域地理生态环境差异性,故本研究利用海拔(dem)、坡度(slope)和坡向(aspect)这 3 个指标代表地形因子. 为了更好地分析人类活动对岱海流域生态环境质量的影响,本研究采用人口密度(pop)、国内生产总值(GDP)和土地利用(lucc)这 3 个指标代表人类活动. 在 ArcGIS 将 8 个的因变量和自变量统一尺度

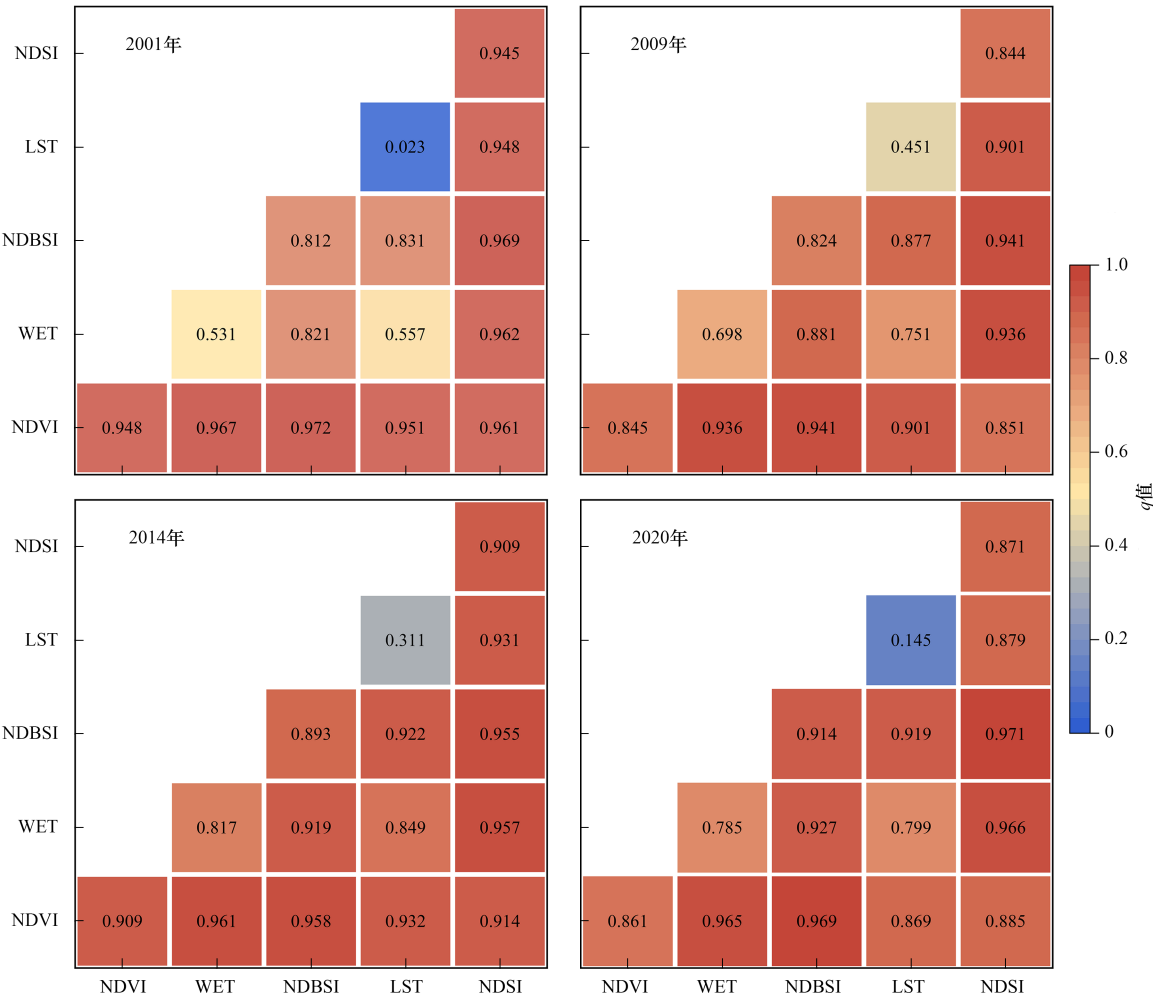


图 11 生态因子交互式探测结果

Fig. 11 Interactive detection results of ecological factors

后采用自然间断法重分类为 4~9 类后通过地理探测器分析^[55],得到各驱动因子对岱海流域生态环境的解释程度。

2.4.1 单因子探测分析

因子探测结果表明(表 9),岱海流域生态环境质量受自然因素和人为因素共同影响,不同驱动因子对 AWRSEI 空间分布的解释力有明显差异。除坡向外,所有探测因子 P 值均小于 0.05,表明所选探测因

子均通过显著性检验,可作为影响因素进行分析。2001 和 2020 年岱海流域土地利用是 AWRSEI 的主导因子, q 值达 0.328,说明土地利用在岱海流域生态环境质量中起到较明显的解释作用,且相较于 2001 年,2020 年土地利用的 q 值增长 100.056%。20 年间,气象因子和地形解释力有所下降,人类活动解释力明显上升。整体而言,岱海流域生态环境变化主要受人类活动影响。

表 9 岱海流域驱动因子解释力探测结果
Table 9 Exploration results of driving factor interpretation power in the Daihai Basin

年份	项目	pre	evp	dem	slope	aspect	pop	GDP	lucc
2001	q 值	0.127	0.153	0.203	0.074	0.008	0.052	0.036	0.161
	P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.082	0.000	0.000	0.000
2020	q 值	0.076	0.064	0.098	0.052	0.020	0.068	0.070	0.328
	P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

此外,将 AWRSEI 均值与地形因子进行叠加分析^[59],结果如图 12 所示。分析表明,AWRSEI 均值随着海拔升高呈现先降低再升高的趋势,与 2.2.2 节 AWRSEI 时空变化分析中的结果一致。在海拔 1 400~1 500 m 时最低,随着海拔的升高,AWRSEI 均值逐渐升高,在海拔 2 000~2 121 m 时达到最大(0.580)。AWRSEI 均值随着坡面角度变大,面积占比逐渐减少。AWRSEI 均值在坡度小于 6° 时,变化趋势与坡度成反比;当坡度大于 6° 时,AWRSEI 均值变化趋势与坡度成正比。AWRSEI 均值在平面的值最大(0.490),说明平地生态环境质量相对好,这与耕地分布高度一致。阴坡与阳坡的 AWRSEI 均值分别为 0.426 和 0.422,即 AWRSEI 在阴坡和阳坡的差别不大。

2.4.2 交互式探测分析

将 2001 年和 2020 年岱海流域的 AWRSEI 与驱动因子进行交互式探测分别得到 36 种结果,探测结果均为双因子和非线性增强两类,表明交互式探测作用效果要高于单个因子作用效果。图 13 结果表明,2001 年土地利用和海拔、气象因子的组合是交互作用最强组合,即土地利用显著变化增加了海拔、降水和蒸发作为自变量对生态环境的解释力。2020 年土地利用和降水的组合是交互作用最强组合, q 值最高达 0.384,即土地利用显著变化增加了降水作为自变量对生态环境的解释力。土地利用与其他因子交互作用也产生了较高的 q 值,这也表明岱海流域生态环境是由多个因子相互作用的,而不是简单的叠加或者独立影响。

3 讨论

3.1 AWRSEI 模型优势

AWRSEI 指数从干旱区流域生态特性出发,有效

集成了绿度、湿度、干度、热度以及盐度这 5 个生态指标,相较于任一单指标分量更具代表性,且相较于 RSEI 更适用于干旱区流域,能综合反映生态环境状况。本研究结果表明,AWRSEI 各生态因子的平均相关系数为 0.860,比单个指标分量更具代表性。AWRSEI 引入盐度指标后第一主成分的荷载值正负和排序与 RSEI 一致,这与其他学者对 RSEI 的研究结论一致^[60],其特征值贡献率比 RSEI 高 3.69%,即 AWRSEI 包含了更多信息。相较于 RSEI,AWRSEI 对植被更加敏感,对建筑用地和未利用地(盐碱土)的分辨能力更强,适合干旱区流域生态环境质量评价。

3.2 岱海流域生态环境质量时空变化特征

基于 AWRSEI 模型,本研究对岱海流域 2001~2020 年生态环境质量进行了评价。结果表明,2001~2020 年岱海流域 AWRSEI 均值介于 0.377~0.502,流域整体生态环境质量较差。流域生态环境质量总体呈现先减小后上升的趋势,生态环境质量改善区域远大于恶化区域,AWRSEI 均值呈上升趋势,生态环境质量有所改善。通过计算变异系数,表明岱海流域变异系数 CV 标准差低,生态环境质量状况稳定,整体变化波动较小,高波动主要集中在湖区南侧和居民点区域,这与流域内土地利用变化一致^[61]。流域内城镇化建设会带来一定的生态环境恶化^[62],2001 年不透水面面积为 9.840 km²,2020 年面积为 24.536 km²,从流域现有生态环境质量空间分布可以看出(图 6),生态环境质量较差的区域与不透水面分布接近。因此,结合流域生态环境质量现状,岱海流域应进一步加强城镇化地区生态系统保护与修复工作。空间自相关性分析发现,岱海流域生态环境质量存在显著的空间自相关性,这与其他学者在其他研究区所得结论一致。

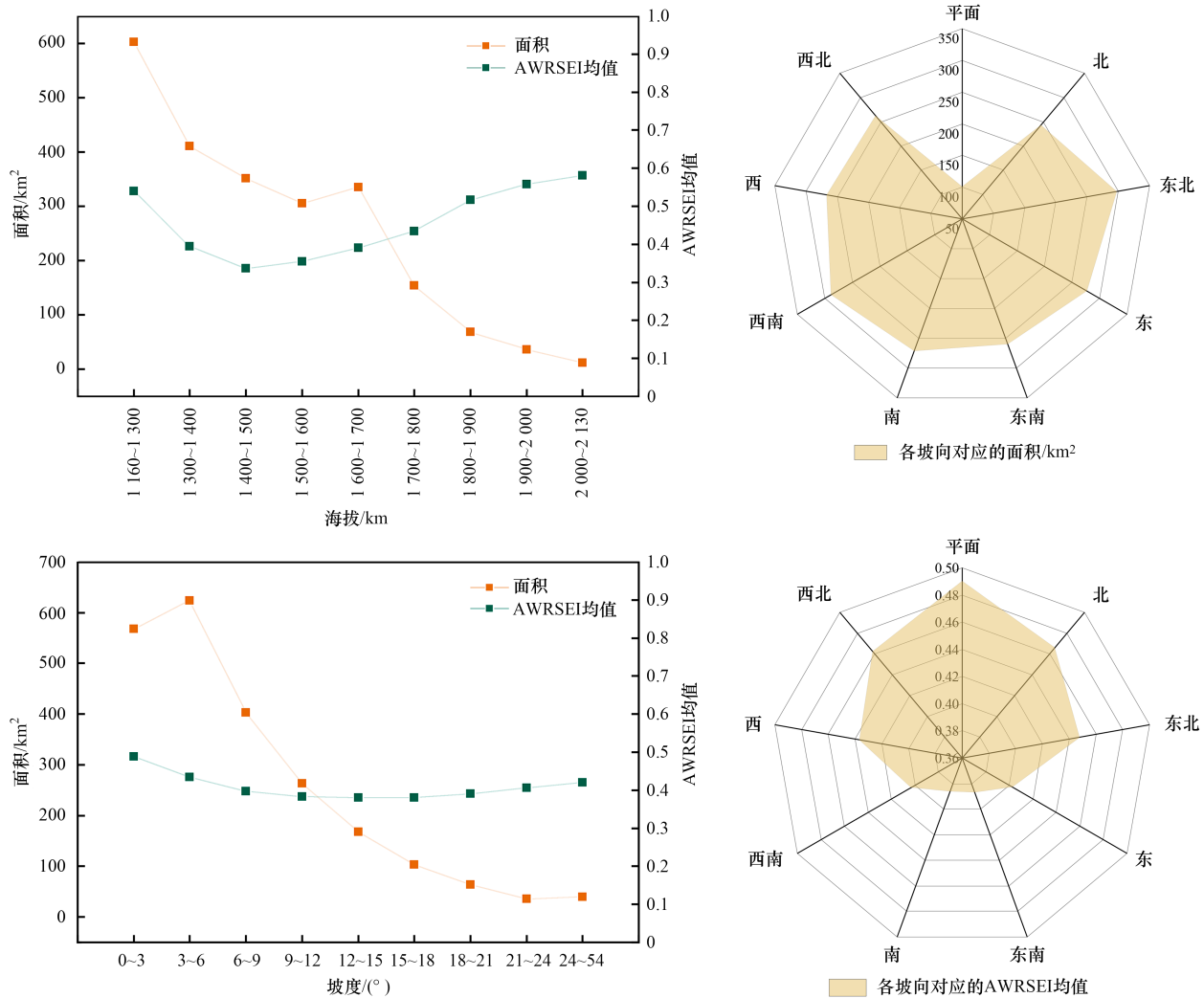


图 12 岱海流域 AWRSEI 指数对地形因子的相应

Fig. 12 Correspondence of the AWRSEI index to the topographic factor in the Daihai Basin

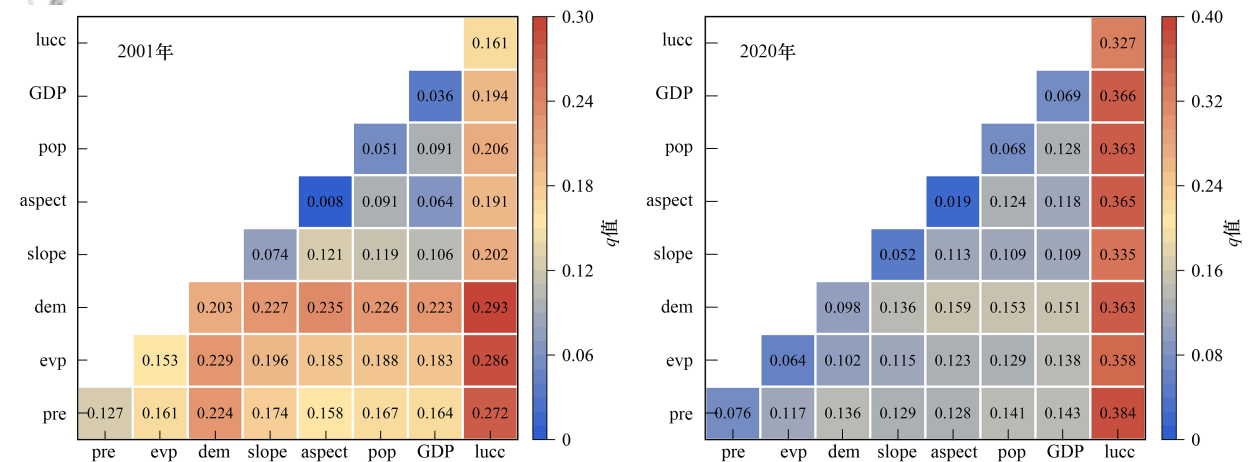


图 13 驱动因子交互式探测结果

Fig. 13 Interactive detection results of driving factors

3.3 岱海流域生态环境质量变化原因

通过地理探测器对生态因子分析表明,2001~2020年岱海流域生态环境的提升主要由于植被归一化指数提高,土壤干度和盐度的降低,其中2014年和

2020年NDVI均值分别为0.556、0.704。通过查阅相关文献可知,2014年岱海被国家列入规划保护的365个好湖泊之一,有关部门在岱海周边造林绿化,并实施“退耕还湿”和“退耕还林还草”政策^[61],这与本研究

中绿度指标上升趋势的结果相吻合。交互式探测分析表明, NDVI 的显著变化增加了 NDBSI 作为自变量对生态环境的解释力, 这与汪孝贤等^[63]在祁连山国家级自然保护区生态环境质量评价中结果一致。

3.4 驱动因子对岱海流域生态环境质量的贡献

通过地理探测器分析表明, 岱海流域生态环境质量受多种因素共同影响, 不同驱动因子对 AWRSEI 空间分异解释力差异明显, 且均为双因子或非线性增强, 这与其他学者所得结论一致^[31]。岱海流域 AWRSEI 的主导因子是土地利用, q 值达 0.328。土地利用类型影响着地表覆被情况, 会对流域内生态过程产生影响, 进而引起生态环境质量的变化。建设用地规划是国土空间规划中的重要内容, 与区域生态空间、生态安全与生态敏感性等都有着极为密切的关系^[63]。通过地形叠加 AWRSEI 指数分析发现, 生态环境质量随着坡度的升高呈降低趋势, 而坡向对生态环境质量无明显响应。地形因子中, 植被生长易随海拔所带来的气温与光照的差异而出现一定的垂直分带现象, 坡度则直接关系到土壤的肥力及保水性, AWRSEI 模型中的 NDVI 能够直观地体现植被茂密程度和生长状况, 故而高程与坡度因子对流域生态环境空间分异有较大影响^[63]。气象因子中, 降水和蒸发虽与植被生长、土壤盐碱化和水土保持等密切相关, 但个别年份的降水变化很难对生态环境造成直接明显的影响^[63]。此外, 岱海流域降水量相对匮乏, 应是降水和蒸发对 AWRSEI 影响较小的原因。

3.5 不足与展望

本研究虽然在 RSEI 的基础上增加盐度指标构建了适合干旱区流域的 AWRSEI 指数, 但并未考虑水土流失、荒漠化以及流域水源涵养能力^[64]等生态因子, 同时缺少了对水体的评价, 此外, 本研究仅在岱海流域进行了研究, 未对其他干旱区流域的适用性进行研究。因此, 在后期的研究中, 需完善水体遥感生态指数评价, 增加并优化指标体系^[65], 选取更多干旱区流域进行研究, 更好地服务于半干旱区流域生态环境质量监测。本研究采用单一时刻遥感影像进行生态环境质量监测与评价, 容易受到天气等偶然因素的影响, 导致遥感生态指数可能存在一定的差异。因此, 在后续研究中, 可选择 GEE 平台对数据进行植被生长期影像均值合成、最大值合成等预处理得到更为稳定且更具代表性的数据, 将是下一步研究应当考虑的重点。本研究未开展生态评价预测方面工作, 在后续的研究中可尝试利用 CA-Markov 模型^[66]对流域生态环境质量进行预测。

4 结论

(1) AWRSEI 模型从干旱区流域生态特性出发, 有效集成了绿度、湿度、干度、热度以及盐度这 5 个生态指标, 与各生态因子平均相关系数为 0.860, 即 AWRSEI 比 5 个指标分量的任一单指标分量更具代表性, 能综合反映生态环境状况。引入 NDSI 指标后, AWRSEI 的 PC_1 荷载值的正负和排序与 RSEI 一致, 且 PC_1 贡献率比 RSEI 高出 3.69%, 即 AWRSEI 包含了更多信息, 能够全面反映岱海流域生态环境的综合状况。AWRSEI 比 RSEI 更为清晰地显示了岱海流域的生态环境质量, 图像纹理特征区分更加明显, 特别是在高植被覆盖区域、建筑用地和未利用地(盐碱土), 评价结果与真实地表情况更为接近。总体而言, AWRSEI 增强了 RSEI 适用区域的广度, 尤其对于干旱区流域的适用性有了较大的提升。

(2) 岱海流域 2001~2020 年 AWRSEI 值位于 [0.8, 1] 的比例较少, 均值为 0.427, 流域生态环境质量基础较差, 均值呈现波动上升趋势, 并在 2020 年均值达到最高 0.502。整体生态环境质量明显好转, 等级差和良的面积占比变化显著, 差占比减少了 20.51%, 良占比增加了 12.71%。空间分布上, 岱海流域南部和西北部高海拔地区林地生态环境质量优, 北部和南部中海拔地区生态环境质量较差, 湖区北侧生态环境质量优于南侧。生态环境质量等级以较差和一般为主, 差与较差等级主要分布于中海拔地区; 等级良与优面积占比最少, 主要分布于高海拔地区林地和低海拔耕地。生态环境质量改善区域远大于恶化区域, AWRSEI 总体呈上升趋势, 生态环境质量有所改善。

(3) 岱海流域 AWRSEI 变异系数 CV 最高值为 1.73, 平均值为 0.28, 生态环境质量状况稳定, 整体变化波动较小, 高波动主要集中在湖区南侧和居民点区域。岱海流域生态环境质量存在显著的空间自相关性。生态环境质量高-高集聚区主要分布在高海拔林地区域和低海拔耕地区域; 低-低集聚区零星分布在中海拔区域。2009 年之后高-高聚类中高-低异常区明显增多, 即生态环境质量等级为良的区域高-高聚类的稳定性差。从局部来看, 变化最明显的区域有流域北部中海拔区域和南部中高海拔区域。其中, 北部中海拔区域生态环境质量变差, 南部中高海拔区域生态环境质量好转。

(4) 2001~2020 年岱海流域生态环境的提升主要由于植被归一化指数提高, 土壤干度和盐度的降低。NDVI 和 NDBSI 的组合是交互作用最强的组合对生态环境的解释力最强。从不同驱动因子对生态环境

质量影响作用分析中可以发现,土地利用是AWRSEI的主导因子,解释力最强.土地利用和气象因子的组合是交互作用最强,且各驱动因子之间均为增强关系,即岱海流域生态环境是由多个因子相互作用的,而不是简单的叠加或者独立影响.此外,岱海流域AWRSEI指数随着海拔升高呈现先降低再升高的趋势;随着坡度的升高呈降低趋势;坡向对生态环境无明显响应.

参考文献:

- [1] 陈俊. 现实·理论·实践: 深刻把握习近平生态文明思想的三个维度——基于对党的二十大精神的学习与研究[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2022, doi: 10.11835/j.issn.1008-5831.zs.2022.12.005.
Chen J. Reality·Theory·Practice: Deeply grasp the three dimensions of Xi Jinping thought on ecological civilization: based on the study and research of the spirit of the 20th CPC national congress [J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2022, doi: 10.11835/j.issn.1008-5831.zs.2022.12.005.
- [2] 王利. 探索以生态优先、绿色发展为导向的高质量发展新路子——学习贯彻习近平总书记在内蒙古代表团重要讲话精神专题研讨会综述[J]. 理论研究, 2019, (2): 78-80.
- [3] 王婉莹, 刘琳, 李梦娇, 等. 生态-经济发展情景下内蒙古宏观生态系统模拟与分析[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5888-5898.
Wang W Y, Liu L, Li M J, et al. Scenario-based simulation and analysis of future terrestrial ecosystem changes in Inner Mongolia under different ecological-economic development pathways [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5888-5898.
- [4] 刘洁. 近60年来中国北方半干旱区界线与范围时空变化特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2019.
Liu J. Study on spatial and temporal variation of the boundary and area of the semi-arid region in Northern China over the past 60 years [D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [5] 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. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [6] 徐涵秋, 李春强, 林梦婧. RSEI应使用主成分分析或核主成分分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(4): 506-513.
Xu H Q, Li C Q, Lin M J. Should RSEI use PCA or kPCA? [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(4): 506-513.
- [7] Xu H Q, Duan W F, Deng W H, et al. RSEI or MRSEI? Comment on Jia et al. evaluation of eco-environmental quality in Qaidam basin based on the ecological index (MRSEI) and GEE. Remote Sens. 2021, 13, 4543 [J]. Remote Sensing, 2022, 14(21), doi: 10.3390/rs14215307.
- [8] 滑永春, 孙小添, 白澳, 等. 基于遥感黄河流域内蒙古段十大孔兑生态环境质量监测评价[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 199-205.
Hua Y C, Sun X T, Bai A, et al. Monitoring and evaluation of ten kongdai eco-environmental quality changes in Inner Mongolia section of the Yellow River Basin based on remote sensing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 199-205.
- [9] 赵管乐, 彭培好. 基于RSEI的典例干热河谷区——四川省攀枝花市生态环境变化分析[J]. 山地学报, 2021, 39(6): 842-854.
Zhao G Y, Peng P H. RSEI - based evaluation on ecological environment changes in typical dry hot valley — Panzhihua city, Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(6): 842-854.
- [10] 温小乐, 陈旭, 徐涵秋. 基于遥感生态指数的京郊南部城市生态评价——以涿州市、固安县为例[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 286-292.
Wen X L, Chen X, Xu H Q. Ecological evaluation of cities in southern Beijing suburbs based on remote sensing ecological Index: taking Zhuozhou City and Gu'an County as examples [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2022, 50(2): 286-292.
- [11] Ling C, Zhang G P, Deng X Y, et al. A study on the drivers of remote sensing ecological index of Aksu Oasis from the perspective of spatial differentiation [J]. Water, 2022, 14(24), doi: 10.3390/w14244052.
- [12] Hu X S, Xu H Q. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China [J]. Ecological Indicators, 2018, 89: 11-21.
- [13] Wang S X, Zhang M, Xi X. Ecological environment evaluation based on remote sensing ecological index: A case study in East China over the past 20 years [J]. Sustainability, 2022, 14(23), doi: 10.3390/su142315771.
- [14] Tang H, Fang J W, Xie R J, et al. Impact of land cover change on a typical mining region and its ecological environment quality evaluation using remote sensing based ecological index (RSEI) [J]. Sustainability, 2022, 14(19), doi: 10.3390/su141912694.
- [15] Zhang Y, She J Y, Long X R, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of eco-environmental quality based on RSEI in Chang-Zhu-Tan metropolitan circle, central China [J]. Ecological Indicators, 2022, 144, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109436.
- [16] 郭泽呈, 魏伟, 庞素菲, 等. 基于SPCA和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析——以石羊河流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2558-2572.
Guo Z C, Wei W, Pang S F, et al. Spatio-Temporal evolution and motivation analysis of ecological vulnerability in Arid Inland River Basin based on SPCA and remote sensing index: A case study on the Shiyang River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2558-2572.
- [17] 朱冬雨, 陈涛, 牛瑞卿, 等. 利用移动窗口遥感生态指数分析矿区生态环境[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 341-347.
Zhu D Y, Chen T, Niu R Q, et al. Analyzing the ecological environment of mining area by using moving window remote sensing ecological index [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(3): 341-347.
- [18] Sun C, Li J L, Liu Y C, et al. Ecological quality assessment and monitoring using a time-series remote sensing-based ecological index (ts-RSEI) [J]. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1): 1793-1816.
- [19] Wang Z W, Chen T, Zhu D Y, et al. RSEIFE: A new remote sensing ecological index for simulating the land surface eco-environment [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 326, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116851.
- [20] 冯荣荣, 张凯莉, 韩佳宁, 等. 沔河流域生态环境质量的遥感评价及影响因子分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(7): 860-871.
Feng R R, Zhang K L, Han J N, et al. Remote sensing evaluation and influence factor analysis of ecological environment quality in

- the Fenghe River watershed [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, **38**(7): 860-871.
- [21] Liu Q, Yu F H, Mu X M. Evaluation of the ecological environment quality of the Kuye River Source Basin using the remote sensing ecological index [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19** (19), doi: 10.3390/ijerph191912500.
- [22] Dong Y K, Ma W, Tan Z W, *et al.* Spatial and temporal variation of multiple eco-environmental indicators in Erhai Lake Basin of China under land use transitions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **30**(6): 16236-16252.
- [23] Luo M, Zhang S W, Huang L, *et al.* Temporal and spatial changes of ecological environment quality based on RSEI: A case study in Ulan Mulun River Basin, China [J]. *Sustainability*, 2022, **14** (20), doi: 10.3390/su142013232.
- [24] 陈丽红, 刘普幸, 花亚萍. 基于 RSEI 的疏勒河流域生态质量综合评价及其成因分析[J]. *土壤通报*, 2021, **52**(1): 25-33.
- Chen L H, Liu P X, Hua Y P. Comprehensive evaluation of ecological quality and its factors analysis in the Shule River Basin Based on RSEI [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52** (1): 25-33.
- [25] 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]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, **27**(2): 299-317.
- [26] 第五泾渭, 梅家龙, 余翰名, 等. 半干旱地区遥感生态指数的构建及应用[J]. *环境监测管理与技术*, 2022, **34**(4): 21-26.
- Diwu J W, Mei J L, Yu H M, *et al.* Construction and application of remote sensing ecological index in semi-arid region [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2022, **34**(4): 21-26.
- [27] 王杰, 马佳丽, 解斐斐, 等. 干旱地区遥感生态指数的改进——以乌兰布和沙漠为例[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(11): 3795-3804.
- Wang J, Ma J L, Xie F F, *et al.* Improvement of remote sensing ecological index in arid regions: Taking Ulan Buh Desert as an example [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(11): 3795-3804.
- [28] 刘尚钦, 张福浩, 赵习枝, 等. 干旱区绿洲遥感生态指数的改进[J]. *测绘科学*, 2022, **47**(6): 143-151, 203.
- Liu S Q, Zhang F H, Zhao X Z, *et al.* Improvement of remote sensing ecological index in oasis in arid area [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, **47**(6): 143-151, 203.
- [29] 罗镕基, 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.
- [30] 颀金凤, 赵军, 卿苗, 等. 基于 IRSEI 的石羊河流域生态环境质量时空变化及驱动力分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, **37**(5): 104-111.
- Xie J F, Zhao J, Qing M, *et al.* Changes in spatial-temporal patterns of ecological environment quality in Shiyang River and driving forces: An analysis based on improved remote sensing ecological index [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, **37**(5): 104-111.
- [31] 周云凯, 姜加虎. 近 50 年岱海生态与环境变化分析[J]. *干旱区研究*, 2009, **26**(2): 162-168.
- Zhou Y K, Jiang J H. Changes in the ecological environment in the Daihai Lake basin over the last 50 years [J]. *Arid Zone Research*, 2009, **26**(2): 162-168.
- [32] 孙占东, 姜加虎, 黄群. 近 50 年岱海流域气候与湖泊水文变化分析[J]. *水资源保护*, 2005, **21**(5): 16-18, 26.
- Sun Z D, Jiang J H, Huang Q. Analysis of climate and lake hydrological change in Daihai Basin in the late 50 years [J]. *Water Resources Protection*, 2005, **21**(5): 16-18, 26.
- [33] 赵茜宇. 岱海湖滨带土壤盐碱化特征及生态修复技术研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- Zhao Q Y. Study on soil salinization characteristics and ecological restoration technology of Daihai lakeside [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [34] 程玉琴, 郑丽娟, 付志强. 岱海湖泊萎缩原因分析及流域生态保护建议[J]. *内蒙古气象*, 2017, (5): 24-26.
- Cheng Y Q, Zheng L J, Fu Z Q. Analysis of cause of Daihai lake shrinkage and water conservation recommendations [J]. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2017, (5): 24-26.
- [35] 闫乐乐. 岱海水生态环境对周边乡镇农业生产影响效应与对策研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2022.
- Yan L L. Study on the effect and countermeasure of the ecological environment of Daihai water on agricultural production in surrounding towns [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2022.
- [36] 王苏民等. 岱海 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [37] 李金雷, 刘欢, 哈斯娜, 等. 岱海流域土地利用动态模拟及生态系统服务价值测算 [J]. *生态学杂志*, 2022, **41**(2): 343-350.
- Li J L, Liu H, Ha S N, *et al.* Simulation of land use and evaluation of ecosystem service value in Daihai Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(2): 343-350.
- [38] 王书航, 白妙馨, 陈俊伊, 等. 典型农牧交错带山水林田湖草生态保护修复——以内蒙古岱海流域为例 [J]. *环境工程技术学报*, 2019, **9**(5): 515-519.
- Wang S H, Bai M X, Chen J Y, *et al.* Research on the ecological protection and restoration of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland system in typical farming-pastoral ecotone: taking Daihai Lake Basin in Inner Mongolia as an example [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, **9**(5): 515-519.
- [39] 张祥洋, 春喜, 周海军, 等. 内蒙古岱海流域生态保护红线划定研究 [J]. *人民黄河*, 2021, **43**(4): 100-105.
- Zhang Y Y, Chun X, Zhou H J, *et al.* Study on delimitation of ecological protection Red Line of Daihai Lake Basin in Inner Mongolia [J]. *Yellow River*, 2021, **43**(4): 100-105.
- [40] Huang X, Li J Y, Yang J, *et al.* 30 m global impervious surface area dynamics and urban expansion pattern observed by Landsat satellites: From 1972 to 2019 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **64**(11): 1922-1933.
- [41] 贾萍萍, 尚天浩, 张俊华, 等. 利用多源光谱信息反演宁夏银北地区干湿季土壤含盐量 [J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(17): 125-134.
- Jia P P, Shang T H, Zhang J H, *et al.* Inversion of soil salinity in dry and wet seasons based on multi-source spectral data in Yinbei area of Ningxia, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(17): 125-134.
- [42] 吴霞, 王长军, 樊丽琴, 等. 基于多光谱遥感的盐渍化评价指标对宁夏银北灌区土壤盐度预测的适用性分析 [J]. *国土资源遥感*, 2021, **33**(2): 124-133.
- Wu X, Wang Z J, Fan L Q, *et al.* An applicability analysis of salinization evaluation index based on multispectral remote

- sensing to soil salinity prediction in Yinbei irrigation area of Ningxia[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2021, **33**(2): 124-133.
- [43] Chu H S, Venevsky S, Wu C, *et al.* NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2051-2062.
- [44] Zhai Y G, Roy D P, Martins V S, *et al.* Conterminous United States Landsat-8 top of atmosphere and surface reflectance tasseled cap transformation coefficients [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, **274**, doi: 10.1016/j.rse.2022.112992.
- [45] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, **17**(3):301-306.
- [46] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(7):91-97.
- Xu H Q. Assessment of ecological change in soil loss area using remote sensing technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(7): 91-97.
- [47] Alexander C. Normalised difference spectral indices and urban land cover as indicators of land surface temperature (LST) [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, **86**, doi:10.1016/j.jag.2019.102013.
- [48] Allbed A, Kumar L, Aldakheel Y Y. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries; Applications in a date palm dominated region[J]. *Geoderma*, 2014, **230-231**: 1-8.
- [49] Kesteven G L. The coefficient of variation[J]. *Nature*, 1946, **158**(4015): 520-521.
- [50] 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.
- [51] 陈培阳, 朱喜钢. 基于不同尺度的中国区域经济差异[J]. *地理学报*, 2012, **67**(8): 1085-1097.
- Chen P Y, Zhu X G. Regional inequalities in China at different scales[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(8): 1085-1097.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 张华, 宋金岳, 李明, 等. 基于 GEE 的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(6): 1883-1894.
- Zhang H, Song J Y, Li M, *et al.* Eco-environmental quality assessment and cause analysis of Qilian Mountain National Park based on GEE [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(6): 1883-1894.
- [55] 李灏欣, 万华伟, 孙林, 等. 新疆生态系统健康遥感评估及关键驱动因子研究[J]. *干旱区地理*, 2021, **44**(2): 460-470.
- Li H X, Wan H W, Sun L, *et al.* Remote sensing assessment and key driving factors of ecosystem health in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2021, **44**(2): 460-470.
- [56] HJ/T 192-2006, 生态环境状况评价技术规范(试行)[S].
- [57] 刘玉佳, 彭建, 李刚勇, 等. 基于 GEE 的库鲁斯台草原生态环境评价[J]. *生态学杂志*, 2023, **42**(11): 2776-2785.
- Liu Y J, Peng J, Li G G, *et al.* Eco-environmental assessment of Kurustai grassland based on GEE [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(11): 2776-2785.
- [58] 张晓山, 张旺锋, 高新宇, 等. 基于 RSEI 的张掖市甘州区生态环境质量动态评估[J]. *人民黄河*, 2023, **45**(2): 114-120.
- Zhang X S, Zhang W F, Gao X Y, *et al.* Dynamic assessment of ecological environment quality in Ganzhou District of Zhangye City based on RSEI [J]. *Yellow River*, 2023, **45**(2): 114-120.
- [59] 李婷婷, 马超, 郭增长. 基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态环境质量评价及影响因素分析[J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(4): 1154-1165.
- Li T T, Ma C, Guo Z C. Ecological quality evaluation and influencing factors analysis of Helan Mountain based on RSEI [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(4): 1154-1165.
- [60] 王丽霞, 赵蕊, 刘招, 等. 基于 RSEI 的延河流域生态环境质量监测与预估[J]. *干旱区研究*, 2022, **39**(3): 943-954.
- Wang L X, Zhao R, Liu Z, *et al.* Monitoring and prediction of ecological environmental quality in the Yanhe River Basin based on the remote sensing ecological index [J]. *Arid Zone Research*, 2022, **39**(3): 943-954.
- [61] 梁旭, 刘华民, 纪美辰, 等. 北方半干旱区土地利用/覆被变化对湖泊水质的影响: 以岱海流域为例(2000-2018年)[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(3): 727-736.
- Liang X, Liu H M, Ji M C, *et al.* Effects of land use/cover change on lake water quality in the semi-arid region of northern China: A case study in Lake Daihai Basin (2000-2018) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(3): 727-736.
- [62] 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.
- [63] 汪孝贤, 张秀霞, 李旺平, 等. 基于遥感生态指数(RSEI)改进模型的祁连山国家级自然保护区生态环境质量评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, **39**(7): 853-863.
- Wang X X, Zhang X X, Li W P, *et al.* Assessment of ecological environment quality in Qilian Mountain National Nature Reserve based on improved RSEI model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, **39**(7): 853-863.
- [64] 许丽婷, 刘海红, 黄丽洁, 等. 2000-2020 年汾河流域生态环境与水源涵养时空变化[J]. *干旱区研究*, 2023, **40**(2): 313-325.
- Xu L T, Liu H H, Huang L J, *et al.* Spatial and temporal changes of ecological environment and water conservation in Fenhe River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Arid Zone Research*, 2023, **40**(2): 313-325.
- [65] 张亚球, 姜放, 纪梦达, 等. 基于遥感指数的区县级生态环境评价[J]. *干旱区研究*, 2020, **37**(6): 1598-1605.
- Zhang Y Q, Jiang F, Ji M D, *et al.* Assessment of the ecological environment at district and county level based on remote sensing index [J]. *Arid Zone Research*, 2020, **37**(6): 1598-1605.
- [66] Yang X D, Bai Y P, Che L, *et al.* Incorporating ecological constraints into urban growth boundaries: A case study of ecologically fragile areas in the Upper Yellow River [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **124**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107436.

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-rui (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, YANG Yu-jing, <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-lie, <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-pe, <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)