

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价	窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍彦, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素

李魁明^{1,2}, 王晓燕^{1*}, 姚罗兰³

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 防灾科技学院应急管理学院的, 三河 065201; 3. 北京农业职业学院国际教育学院, 北京 100012)

摘要: 厘清区域生态系统健康水平及其影响因素对促进可持续发展意义重大. 通过构建生态系统健康评价模型, 分析了京津冀地区2000年、2010年和2020年生态系统健康时空演变特征, 利用地理探测器与地理加权回归模型(GWR)识别了生态系统健康水平的影响因子. 结果表明, 研究期内京津冀地区生态系统自然健康指数整体上为上升趋势, 北部和西部区县优于东南部区县; 京津冀地区生态系统服务指数整体上为下降趋势, 呈现出北高南低的空间分异格局; 京津冀地区生态系统健康水平呈现先上升再下降趋势, 在空间分布上呈现显著的空间异质性, 大城市的中心城区生态健康水平较低, 燕山和太行山区以及环渤海区县, 生态系统健康水平较高; 研究期内京津冀地区生态系统健康的空间格局保持相对稳定, 热点区及次热点区主要分布在冀北山地和太行山区, 冷点区及次冷点区主要分布在东南平原区和部分大城市周边地区. 人口密度、年均气温、人均耕地面积和城镇化水平为京津冀地区生态系统健康的主导因子, 均与其呈现负相关驱动特征.

关键词: 京津冀地区; 生态系统健康; 时空演变; 影响因素; GWR模型; 地理探测器

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0218-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202301077

Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region

LI Kui-ming^{1,2}, WANG Xiao-yan^{1*}, YAO Luo-lan³

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. College of Emergency Management, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China; 3. International Education College, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing 100012, China)

Abstract: Exploring ecosystem health and its influencing factors is of great significance for promoting regional sustainable development. An ecosystem health assessment model was constructed, and the spatial-temporal evolution characteristics of ecosystem health in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2000, 2010, and 2020 were analyzed. The geographical detector and GWR were used to identify the dominant factors affecting ecosystem health. The main conclusions were as follows: during the study period, the index of ecosystem natural health in the Beijing-Tianjin-Hebei Region was generally better in the north and west than that in the southeast, and it showed an overall upward trend. The index of ecosystem services in the Beijing-Tianjin-Hebei Region presented as a spatial differentiation pattern of high in the north and low in the south, and it showed a downward trend. The ecosystem health level in the Beijing-Tianjin-Hebei Region showed a trend of rising first and then declining, showing significant heterogeneity in spatial distribution. The ecological health level in the central urban area of large cities was mostly poor, and the ecosystem health level in the Yanshan and Taihang Mountains and Bohai Rim was better. During the study period, the spatial pattern of ecosystem health in the Beijing-Tianjin-Hebei Region remained relatively stable. The hot spots and sub-hot spots were mainly distributed in the northern mountainous areas of Hebei Province and the Taihang Mountains, and the cold spots and sub-cold spots were mainly distributed in the southeast plain and the surrounding areas of some big cities. Population density, annual average temperature, per capita cultivated land area, and urbanization level were the dominant factors of ecosystem health in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, and they were all negatively correlated with ecosystem health.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei Region; ecosystem health; spatial-temporal evolution; influencing factor; GWR model; geographical detector

生态系统健康指一个生态系统在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力^[1]. 随着城镇化进程加快, 人类活动加剧了生态系统结构的变化, 生态环境问题日益凸显. 评估区域生态系统健康状况, 有助于保障生态安全和提高资源管理水平^[2].

当前国内外学者基于研究侧重点的不同对生态系统健康评价框架的构建进行了深入探究: 宁立新等^[3]基于PSR模型评价了京津冀地区2000年和2015年栅格尺度的生态系统健康空间分布和时空变化; Su等^[4]提出了“结构-功能-过程-发展”(SFPD)城市生态系统健康评估框架, 评估了丝绸之路沿线中国段14个典型城市的生态系统健康状况; Shen等^[5]从

“结构-功能-过程-人类健康-发展”这5个维度, 对长江中游经济带31个地级市的生态系统健康状况进行分等定级; 李佳豪等^[6]利用活力-组织力-恢复力(VOR)模型计算了广西2014年及2019年的生态系统健康等级空间分布. 综上, 现有评价框架为评价生态系统健康状况提供了多种视角, 但生态系统对人类社会发展的支撑作用的重要性考虑不足, 更多的学者开始注重人类福祉, 将生态系统服务纳入生态系统健康评价^[7], 相关学者在“活力-组织力-恢复力

收稿日期: 2023-01-11; 修订日期: 2023-03-14

基金项目: 北京市自然科学基金委员会-北京市教育委员会联合项目(KZ201810028047)

作者简介: 李魁明(1989~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为区域生态系统健康评价, E-mail: 809927535@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangxy@cnu.edu.cn

(VOR)”基础上提出了“活力-组织力-恢复力-生态系统服务功能(VORS)”评估框架,并进行了实证探究,如He等^[8]构建了VORS评估框架体系对全国生态系统健康状况进行评估;陈万旭等^[9]将VORS评估框架拓展到区域尺度,系统分析了长江中游经济带生态系统健康时空分异特征。但是,如何将生态系统服务与以往的“生态系统活力-组织力-恢复力(VOR)”逻辑关系有机衔接需要进一步探索。同时,以往生态系统健康的研究集中在河流^[10-12]、湿地^[13,14]、森林^[15-17]、草地^[18,19]等自然生态系统和流域^[20,21]、行政区^[22-24]等社会-经济-环境复合系统等方面,但对城市群地区生态系统健康状态时空分异特征关注较少^[9,25]。另外,现有研究多通过相关指标与生态系统健康的回归结果解释影响因素^[26],对生态系统健康的影响因素尤其是各主导因子空间分异的研究鲜见报道。

京津冀地区是华北最大规模的城市群,《京津冀协同发展规划纲要》提出,京津冀地区要加强生态环境保护和治理,扩大区域生态空间。因此本研究在VORS框架基础上引入生态系统价值指标建立评价

框架,对京津冀地区的生态系统健康水平进行评估,利用地理探测器识别主要影响因子,运用地理加权回归(GWR)识别主要影响因子的空间差异,有助于为合理开发利用资源和恢复区域生态系统健康提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

京津冀地区总面积 21.6 万 km²,属暖温带半湿润大陆性季风气候,区域地形地貌复杂多样[图 1(a)],西北部坝上高原与北部燕山山区地势较高,林地与草地占主导优势,东南部为华北平原地形平坦,土地利用类型以耕地为主[图 1(b)]。京津冀地区是中国重要的经济核心区,2020 年常住人口 1.1 亿人,占全国的 7.8%,地区生产总值 8.6 万亿元,占全国的 8.5%。该区域城市化进程的加快,造成土地沙化、河流断流和湿地萎缩等资源环境问题日益凸出^[27],随着京津冀协同发展战略的推进,三省市按照各自功能定位,近年来生态环境得到了明显改善。

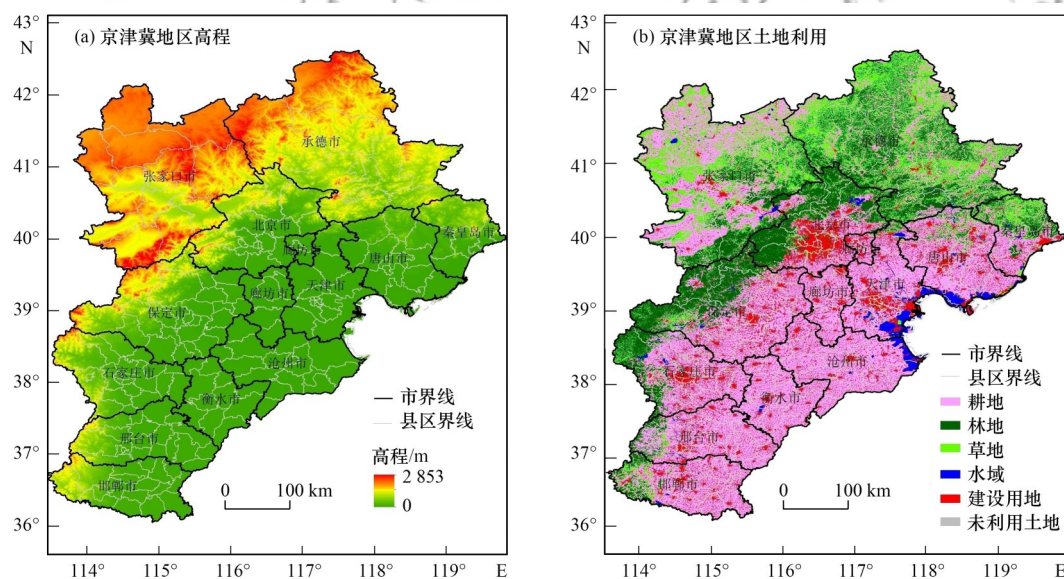


图1 研究区现状

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源

生态系统健康评价数据包括土地利用数据和植被覆盖指数等,其中土地利用源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>) Landsat ETM 数据经解译后获得,植被覆盖指数源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。生态系健康影响因素数据包括降水、气温、高程、GDP、城乡居民收入、人均耕地面积、人口密度和城镇化水平等,其中降水和气温源于中国科学院资源环境科学数据中心

(<https://www.resdc.cn/>),高程源于美国国家航空航天局(<https://earthdata.nasa.gov/>),人均耕地面积通过土地利用数据计算获取,其他社会经济数据源于京津冀三省市统计年鉴或相关县市区的统计公报经简单计算获得。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统健康评价模型构建

本研究把表征生态系统服务的生态系统服务价值纳入生态系统健康评估理论框架,构建基于“生态

系统自然健康(生态系统活力-组织力-弹性)——生态系统服务”的生态系统健康评估框架体系,公式如下:

$$HI = \sqrt{PH \times CESI} \quad (1)$$

式中,HI为生态系统健康指数;PH为生态系统自然健康指数;CESI为综合生态系统服务指数。

(1)生态系统自然健康指数测度 参考文献[28,29],生态系统组织、活力和弹性均为生态系统自然健康评估的关键要素,将其设置为相同的权重,具体计算公式为:

$$PH = \sqrt[3]{EV \times EO \times ER} \quad (2)$$

式中,PH为生态系统自然健康指数;EV、EO和ER分别为生态系统活力、组织力和弹性,均采用归一化方法进行标准化处理。

生态系统活力(EV)用来描述生态系统的初级生产力和代谢能力,一般通过植物净初级生产力或植物覆盖度指数等指标表示。由于归一化植被指数(NDVI)与初级生产力密切相关,因此被广泛应用于表征生态系统活力[22,30]。

生态系统组织力(EO)用来描述生态系统结构的稳定性,参考前人计算方法[31,32],得到生态系统组织力水平。

$$\begin{aligned} EO &= 0.35 LH + 0.35 LC + 0.30 IPC \\ &= (0.25 SHDI + 0.10 AWMPFD) + (0.25 FI_1 + 0.10 CONT) + (0.10 FI_2 + 0.05 COHESION_1) + \\ &\quad (0.10 FI_3 + 0.05 COHESION_2) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,EO为生态系统组织力;LH为景观异质性;LC为景观连通性;IPC为重要生态系统的斑块连通性指数;SHDI为香浓多样性指数;AWMPFD为分形维数;FI₁和CONT分别为整体景观破碎度和景观蔓延指数;FI₂和FI₃分别为林地和水域的破碎度指数,COHESION₁和COHESION₂分别为林地和水域的斑块凝聚度指数。

生态系统弹性(ER)是指生态系统在受到人为或自然干扰后恢复其原有结构和功能的能力,可以通过抵抗力和恢复力来表征,参考文献[33,34],计算京津冀地区生态系统弹性值。

具体公式如下:

$$ER = 0.4 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_{resistan,i} + 0.6 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_{resilien,i} \quad (4)$$

式中,ER为生态系统恢复力,A_i为区域内第i类土地利用类型面积比例,C_{resistan,i}和C_{resilien,i}分别为土地利用类型i的抵抗力系数和恢复力系数。

(2)生态系统服务指数测度 采用生态系统服务价值来表征京津冀地区生态系统服务能力大小,为消除各评价单元面积差异,引入地均生态系统服

务价值[35,36],然后将各单元地均生态系统服务价值进行归一化,得到各评价单元的生态系统服务指数。

$$ESV = \sum_{i=1}^n (U_i \times VC_i) \quad (5)$$

$$AESV = \sum_{i=1}^n (U_i \times VC_i) / \sum_{i=1}^n U_i \quad (6)$$

$$CESI = \frac{AESV - AESV_{min}}{AESV_{max} - AESV_{min}} \quad (7)$$

式中,ESV为生态系统服务价值,U_i为第i种生态系统面积,VC_i为第i种生态系统服务价值,AESV为地均生态系统服务价值,CESI为综合生态系统服务指数,AESV_{max}为区域内评价单元地均生态系统服务价值的最大值,AESV_{min}为区域内评价单元地均生态系统服务价值的最小值。

(3)生态系统健康分级 目前有关生态系统健康评价没有统一的标准,有的使用五等分法[37],有的根据评价结果使用固定阈值划分[38],有的使用自然断点法进行分类[28]。本研究将各年份各评价单元健康指数进行组合,采用自然断点法分为5个等级:差、较差、一般、较优和优。

1.3.2 空间差异性及其影响因素分析方法

本研究选用全局莫兰指数和冷热点分析等对京津冀地区生态系统健康状况进行差异性分析,运用地理探测器模型探寻主要影响因子,然后采用OLS模型和GWR模型探讨影响因子的空间异质性,具体公式见表1。

2 结果与分析

2.1 京津冀地区生态系统健康时空演变

2.1.1 生态系统自然健康指数时空变化

综合生态系统活力、组织力和恢复力这三方面,计算出京津冀地区生态系统自然健康指数,按自然断点法将生态系统自然健康指数划分为5个区间:0.644~1.000为高值区、0.425~0.643为较高值区、0.275~0.424为中值区、0.166~0.274为较低值区和0~0.165为低值区,如图2所示。

从空间分布来看,研究期内京津冀地区生态系统自然健康状况总体呈现北部和西部优于东南部地区。以2020年为例,生态系统自然健康指数高值区主要分布于北部燕山山区和西部太行山区,这部分地区多是由林地构成,植被覆盖度较高,生态系统活力、组织力和恢复力均处于较高的水平;生态系统自然健康指数低值区主要分布于大城市及周边区域,例如北京、天津、唐山和石家庄等大城市的中心城区;生态系统自然健康指数较低值区主要分布于东南部华北平原农业耕作区。

表 1 空间差异性及其影响因素分析方法
Table 1 Analysis method of spatial difference and influencing factors

具体研究方法	公式	公式释义	地理意义	文献
全局莫兰指数	$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	x_i 和 x_j 分别为区域 i 和 j 中生态健康值; $\bar{x}$ 为均值; W_{ij} 为空间权重矩阵; n 为县区数	$I > 0$, 生态系统健康水平呈正相关; $I < 0$, 生态系统健康水平呈负相关; $I = 0$, 呈独立随机分布	[39]
冷热点分析	$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{\sqrt{\left[\frac{n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{ij} \right)^2}{n-1} \right]}}$	G_i^* 为 i 地区局部自相关指数, n 为评价单元数, x_j 为 j 单元的指数值, W_{ij} 为空间权重矩阵, S 为标准差, $\bar{X}$ 为均值	$G_i^* > 0$, 表示该区域为聚集的热点区; $G_i^* < 0$, 表示该区域为负聚集的热点区; $G_i^* = 0$, 表示该结果是随机产生的, 无统计学意义	[40]
地理探测器	$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^l N_h \sigma_h^2$	q 为某因子对生态系统健康空间分异的影响力; σ_h^2 和 σ^2 分别为评价单元和全区域的方差; N 为研究区的评价单元数	q 取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大, 该因子对生态系统健康空间分异的影响越大	[41]
OLS 模型	$y_i = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \varepsilon_i$	β_0 为常数项, β_i 为回归系数, ε_i 为随机误差项	解释因变量 y_i (生态系统健康) 与自变量 x_i (影响因子) 之间关系的多元线性函数	[42]
GWR 模型	$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_m \beta_m(u_i, v_i) x_{im} + \varepsilon_i$	y_i 为被解释变量; 目标区域 i 的坐标为 (u_i, v_i) ; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距项; x_{im} 为解释变量; $\beta_m(u_i, v_i)$ 在地理位置 i 上的回归系数; m 为评价单元数; ε_i 为随机误差项	建立在 OLS 模型基础上, 探索生态系统健康在区县的空间变化及相关驱动因素, 考虑了空间对象的局部效应, 结果更准确, 更客观实际	[42]

从时间变化来看,研究区生态系统自然健康状况总体呈上升趋势,200个区县的生态系统自然健康指数从2000年的0.337上升到2010年的0.358再到2020年的0.369,说明京津冀地区2000~2020年生态环境状况得到逐步改善.2000~2020年,生态系统自然健康水平下降区域占区县总数的4.00%,集中于大

城市及周边区域,主要由于这些区域近年来一直处于高强度开发过程,导致生态系统活力、恢复力以及生态系统供给能力明显下降;2000~2020年,生态系统自然健康水平上升区域占区县总数的21.00%,主要分布于华北平原区,表明河北省近年来注重生态环境建设取得了较好成效.

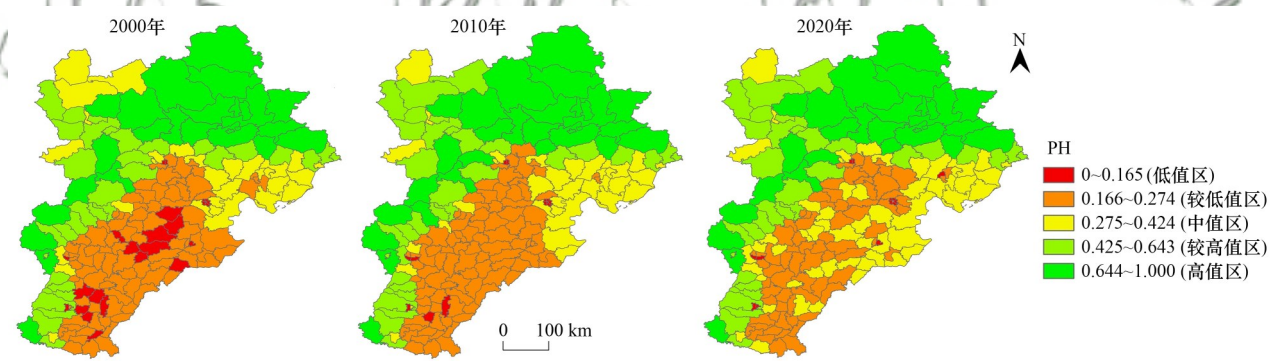


图 2 京津冀地区生态系统自然健康指数空间分异
Fig. 2 Spatial differentiation of ecosystem natural health index in Beijing-Tianjin-Hebei Region

2.1.2 生态系统服务指数时空变化

按照自然断点法将生态系统服务指数划分为5个区间:0.730~1.000为高值区、0.495~0.729为较高值区、0.274~0.494为中值区、0.128~0.273为较低值区和0~0.127为低值区,如图3所示.

京津冀地区生态系统服务指数整体上呈现出北高南低的空分格局.生态系统服务指数高值区主要分布在燕山山区、太行山区以及沿海区域.山区土地利用类型以林地为主,对生态系统服务价值贡献较大;邻渤海地区,地势较低,水域面积广大,在土地利用类

型中,水域生态系统服务价值系数最大.低值区主要分布在东南平原地区,耕地面积占比特别大,对生态系统服务价值的贡献较低,故生态系统服务指数较低.

2000年、2010年和2020年京津冀地区生态系统服务指数平均值分别为0.321、0.318和0.308.本研究期间,京津冀地区生态系统服务指数总体呈下降趋势.整体上看,2000~2020年各县区生态系统服务指数级别变化不大,仅有10.85%的区县生态系统服务指数级别发生变化,其中8.50%的区县下降,2.00%的区县上升.

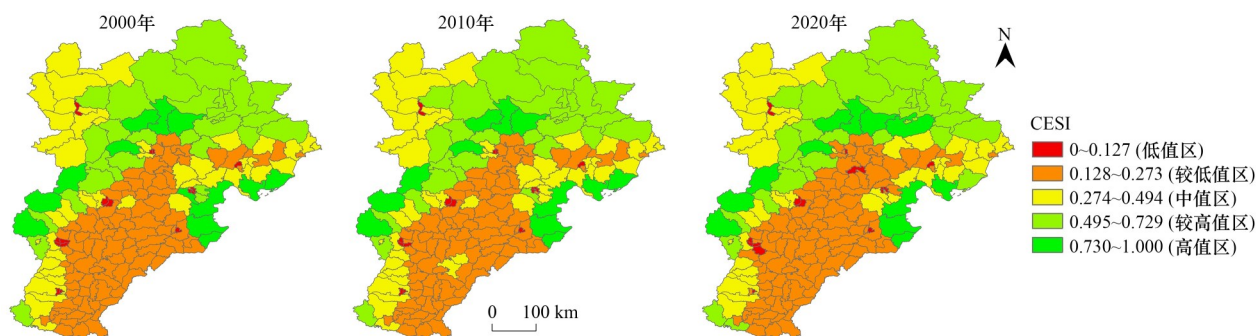


图3 京津冀地区生态系统服务指数空间分异

Fig. 3 Spatial differentiation map of ecosystem service index in Beijing-Tianjin-Hebei Region

2.1.3 生态系统健康评价

为更加清晰地表达京津冀地区生态系统健康水平的空间演变趋势,按照自然断点法将各区县生态系统健康指数统一划分为5个等级:差(0~0.143)、较差(0.144~0.261)、一般(0.262~0.405)、较优(0.406~0.592)和优(0.593~1.000),如图4所示。

2000年、2010年和2020年京津冀地区生态系统健康指数平均值分别为0.323、0.331和0.330,总体上有所上升,呈现先上升再下降趋势。研究期间,低于生态系统健康指数均值的县区比例分别为62.00%、59.50%和63.50%。生态系统健康状态处于较差级别的区县比重最高,2000年、2010年和

2020年分别为46.00%、45.50%和48.00%;生态系统健康状态处于差级别的区县比重最低,2000年、2010年和2020年均均为8.50%;生态系统健康状态处于一般、较优和优级别的区县比例均为15.00%左右。

在空间分布上,京津冀地区的生态系统健康水平具有显著的空间异质性(图4),与生态系统自然健康指数和生态系统服务指数空间分布具有一致性。大城市的中心城区生态健康水平多为“差”的级别,在东南平原区域多为较差级别,燕山和太行山区以及环渤海区县,生态系统健康水平呈现“较优”或“优”。

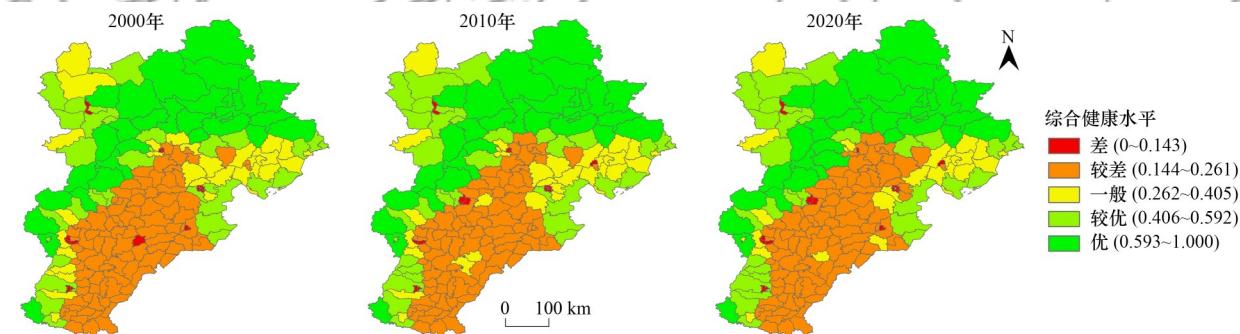


图4 京津冀地区生态系统健康水平空间分异

Fig. 4 Spatial differentiation map of ecosystem health level in Beijing-Tianjin-Hebei Region

2000年、2010年和2020年京津冀地区生态系统健康水平全局莫兰指数分别为0.411、0.420和0.386,且在0.001水平上显著。可以看出研究期内京津冀地区生态系统健康存在显著空间依赖性。为进一步分析生态系统健康水平在空间上的集聚态势,采用热点分析工具绘制京津冀地区生态系统健康水平冷热点分布(图5)。整体来看,京津冀地区生态系统健康的空间格局保持相对稳定,热点区及次热点区主要分布冀北山地和太行山区,冷点区及次冷点区主要分布在东南平原区、部分大城市周边地区。

具体来看,2000~2010年,京津冀地区生态系统健康冷热点变化县区主要为沧州市下辖区县,其中

新华区和孟村回族自治县由冷点区转为次冷点区,沧县、南皮县、东光县和运河区由冷点区转为次冷点区;2010~2020年,京津冀地区的生态系统健康冷热点变化县区主要分布在东南平原区,主要有北京市2区、天津市6区和廊坊市香河县、衡水市东南3县、沧州市3区县、邯郸市2区、石家庄市元氏县和保定市2县,再次表明平原区域人类活动对生态系统健康影响大。

2.2 京津冀地区生态系统健康空间分异影响因素

2.2.1 影响因子选取与识别

为探测京津冀地区生态系统健康的影响因素,参照前人成果^[43,44],选用了2020年年均气温(X1)、年

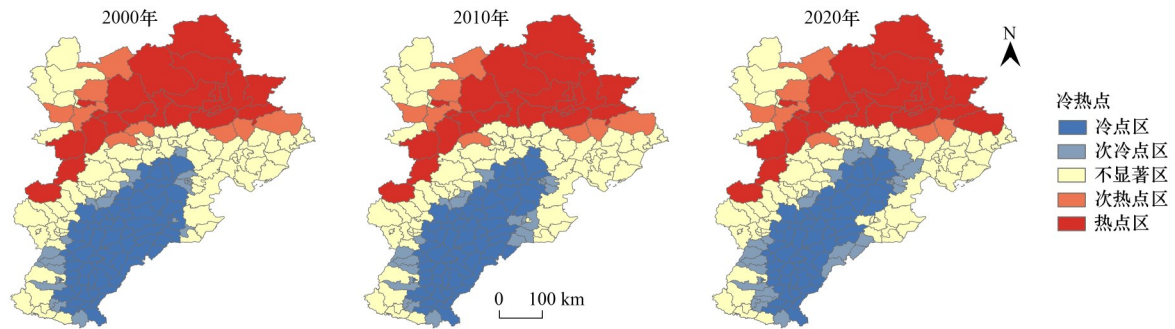


图5 京津冀地区生态系统健康水平冷热点空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of cold and hot spots of ecosystem health level in Beijing-Tianjin-Hebei Region

均降水(X2)、DEM(X3)、人均GDP(X4)、地均GDP(X5)、城乡居民收入(X6)、人均耕地面积(X7)、人口密度(X8)和城镇化水平(X9),构建了京津冀地区生态系统健康的初选影响因素(表2)。

表2 京津冀地区生态系统健康的初选影响因素

Table 2 Primary influencing factors of ecosystem health in Beijing-Tianjin-Hebei Region

影响因素	影响因子	单位	编号
自然因素	年均气温	℃	X1
	年均降水	mm	X2
	DEM	m	X3
经济因素	人均GDP	元	X4
	地均GDP	万元·km ⁻²	X5
	城乡居民收入	元	X6
社会因素	人均耕地面积	hm ²	X7
	人口密度	人·km ⁻²	X8
	城镇化水平	%	X9

表3 初选影响因素地理探测器结果

Table 3 Geodetector results of primary impact factors

项目	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
<i>q</i>	0.598 068	0.069 587	0.686 1	0.037 046	0.465 628	0.115 667	0.264 398	0.598 492	0.156 301
<i>P</i>	0.000	0.309	0.000	0.887	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000

将4个主导因子与生态系统健康进行OLS经典线性回归,结果见表4。

表4 OLS回归分析结果(n=200)

Table 4 OLS regression results (n=200)

变量	回归系数	标准差	<i>t</i>	<i>P</i>	VIF
常数	1.390 9	0.085 3	16.294 7	0.000 0	— ¹⁾
年均气温	-0.068 9	0.004 8	-14.478 1	0.000 0	1.916 7
人均耕地面积	-0.032 0	0.004 7	-6.764 6	0.000 0	2.095 8
人口密度	-0.000 5	0.000 1	-2.314 7	0.021 7	1.558 3
城镇化水平	-0.002 1	0.000 6	-3.493 2	0.000 6	1.780 9

1) “—”表示不存在相关数值

2.2.2 基于GWR的影响因子空间异质性分析

从AICc、*R*²与调整后*R*²可以看出,GWR模型比OLS模型拟合结果更优(表5),如图6所示,GWR模

为避免初选因子出现多重共线性问题,实现有效降维,引入地理探测器,通过对初选因子的筛选,识别无效因子与主导因子,探测结果如表3所示。

由表3可知:X2、X4和X6因子的*P*值均大于0.01,显著性不强,故删除。其余6个因子中,*P*值均为0,通过了显著性检验。根据*q*值大小,将影响因子解释力排序,X3(DEM)>X8(人口密度)>X1(年均气温)>X5(地均GDP)>X7(人均耕地面积)>X9(城镇化水平),其中X3、X8和X1的*q*值均高于0.50,说明上述3个因子的解释贡献度最高。将6个主导因子运用OLS经典线性回归,其中X1(年均气温)和X3(DEM)的VIF大于7.5,产生共线,经核验,剔除DEM后拟合度较好。X5(地均GDP)概率和稳健概率较低,故剔除。因此,将人口密度、年均气温、人均耕地面积和城镇化水平4个确定为京津冀地区生态系统健康的主导因子。

型在不同区县的回归系数不同,反映出年均气温、人均耕地面积、人口密度和城镇化水平在不同区县的作用强度存在差别。

表5 OLS与GWR模型对比

Table 5 Comparison of OLS and GWR models

模型	AICc	<i>R</i> ²	调整后的 <i>R</i> ²
OLS	-236.641 9	0.584 0	0.575 5
GWR	-242.545 3	0.602 3	0.588 8

温度对京津冀地区生态系统健康呈现较明显的负相关驱动特征。从驱动强度空间分布趋势上来看,以唐山—秦皇岛一带为核心,温度对京津冀地区生态系统健康负向驱动力向外逐级降低,大致为东南向西北递减的趋势,呈现了较明显的带状式分布特征。主要驱动成因是东部和南部生态系统以农田和

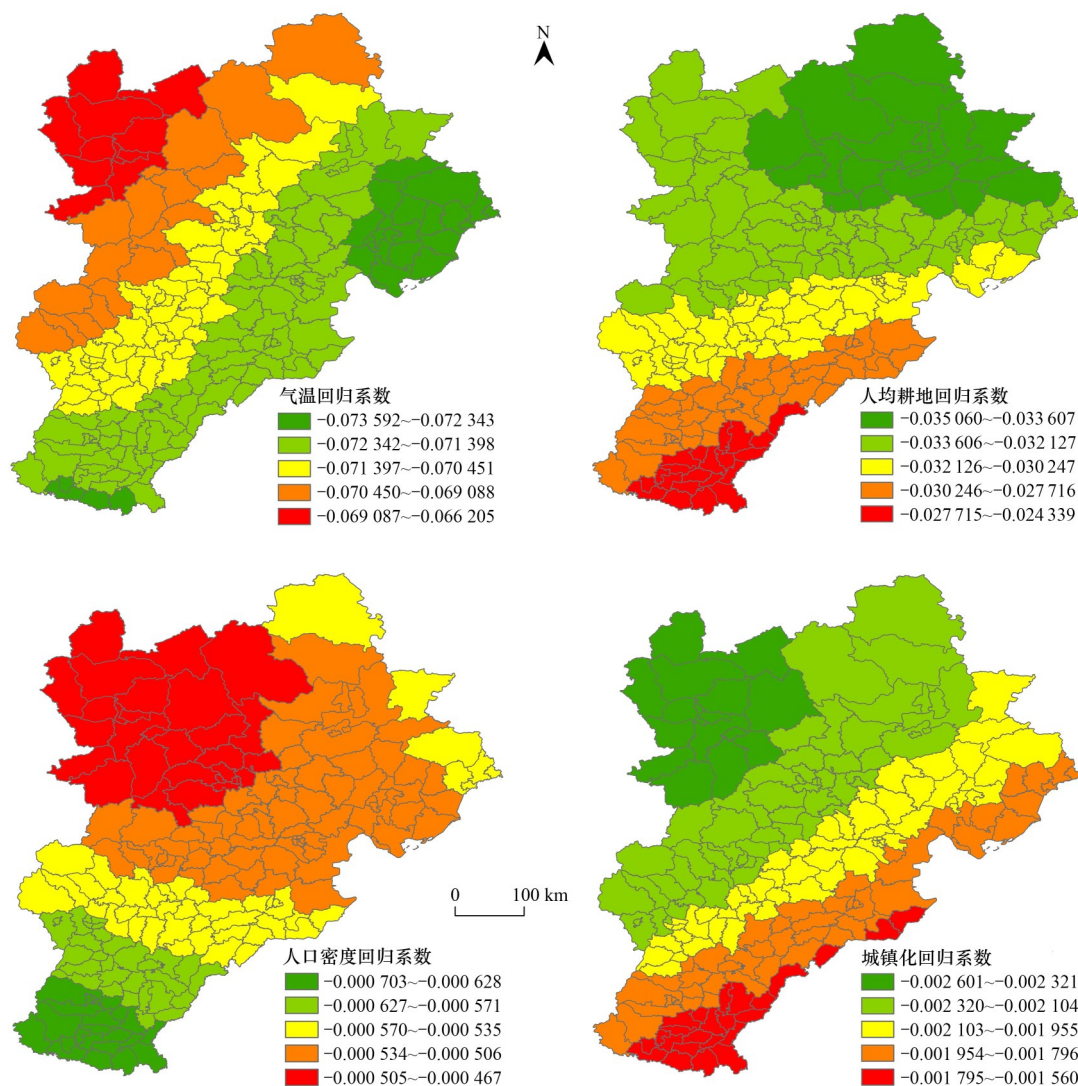


图6 京津冀地区生态系统健康影响因子的空间异质性

Fig. 6 Spatial heterogeneity of ecosystem health impact factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region

城市等非自然生态系统为主,受气温影响较大;而西北部山地地势高温度相对较低,多为森林生态系统,受气温影响相对较小。

人均耕地面积对京津冀地区生态系统健康呈现较明显的负相关驱动特征。这是由于随着人均耕地面积的提高,导致区域人类活动对自然系统进行干扰强度提升,进而造成生态系统健康水平的下降。驱动强度呈现北高南低的趋势,是因为北部山区比南部平原区的耕地开发活动对生态系统健康的影响更大。

人口密度的影响系数绝对值远低于其他因素,但也对京津冀地区生态系统健康呈现负相关驱动特征。人口密度的提升导致的资源利用开发等相关活动对整体生态系统功能会产生一定的负面影响。整体驱动特征空间分布上来看,大致呈现北高南低的态势。南部平原区多为已开发区域,多为人为生态系

统,人口密度远高于北部山区,人口密度的提升导致人类活动对生态系统的破坏高于北部山区。

城镇化对京津冀地区生态系统健康也呈现出负相关驱动特征,城镇化进程改变了区域生态系统的结构、功能以及空间演化过程,最终影响到生态系统服务功能和健康。京津冀地区城镇化驱动以张家口为核心大致为西北向东南递减的趋势,呈现了较明显的带状式分布特征。

3 讨论

本研究结合生态系统健康和生态系统服务价值理论,构建了京津冀地区生态系统健康评价模型,对京津冀地区200个区县进行了评价。因生态系统健康研究无成熟、统一的评价指标体系^[45]和方法^[46],特别是针对城市群的研究相对较少,还有待进一步加深。虽然本研究将生态系统服务价值纳入生态系

统健康评价,且利用地理探测器与GWR识别影响生态系统健康的主导因子及各主导因子的空间异质性特征,但也存在不足之处:本研究利用生态系统服务价值计算生态系统服务指数,该方法过分依赖土地利用分类,下一步考虑采用InVEST模型估算各类主要生态系统功能,使研究结果更加科学化;生态系统健康水平受多重因素的共同作用,可能不是简单的正负驱动关系,单纯从贡献度或正负关系难以全面摸清生态系统健康的影响因素。因此需继续探讨生态系统健康的变化过程与影响机制,这也将是下一步的研究重点。

4 结论

(1)京津冀地区生态系统自然健康状况总体呈现北部和西部优于东南部地区,研究期内生态系统自然健康状况总体呈上升趋势;京津冀地区生态系统服务指数整体上呈现出北高南低的空间分异格局;研究期间京津冀地区生态系统服务指数总体呈下降趋势。

(2)京津冀地区生态系统健康水平呈现先上升再下降趋势,在空间分布上呈现显著的空间异质性,大城市的中心城区生态健康水平多为差的级别,燕山和太行山区以及环渤海区县,生态系统健康水平较好;研究期内京津冀地区生态系统健康的空间格局保持相对稳定,热点区及次热点区主要分布在冀北山地和太行山区,冷点区及次冷点区主要分布在东南平原区、部分大城市周边地区。

(3)人口密度、年均气温、人均耕地面积和城镇化水平为京津冀地区生态系统健康的主导因子,均与其呈现负相关驱动特征。

参考文献:

- [1] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, **13** (10): 397-402.
- [2] Rapport D J, Maffi L. Eco-cultural health, global health, and sustainability [J]. *Ecological Research*, 2011, **26** (6): 1039-1049.
- [3] 宁立新, 梁晓瑶, 程昌秀. 京津冀地区生态系统健康评估及时空变化[J]. *生态科学*, 2021, **40**(6): 1-12.
Ning L X, Liang X Y, Cheng C X. Spatiotemporal variations of ecosystem health of Jing-Jin-Ji region based on the PSR model[J]. *Ecological Science*, 2021, **40**(6): 1-12.
- [4] Su M R, Xie H, Yue W C, et al. Urban ecosystem health evaluation for typical Chinese cities along the Belt and Road[J]. *Ecological Indicators*, 2019, **101**: 572-582.
- [5] Shen W, Zheng Z C, Pan L, et al. A integrated method for assessing the urban ecosystem health of rapid urbanized area in China based on SFPD framework [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **121**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107071.
- [6] 李佳豪, 罗洁, 徐勇, 等. 基于VOR模型的广西2014与2019年生态健康时空变化特征研究[J]. *无线电工程*, 2021, **51** (10): 1134-1141.
- Li J H, Luo J, Xu Y, et al. Research on the spatiotemporal characteristics of ecological health in Guangxi in 2014 and 2019 based on VOR model [J]. *Radio Engineering*, 2021, **51** (10): 1134-1141.
- [7] 刘焱序, 徐光, 姜洪源, 等. 东北林区生态系统服务与健康协同分析[J]. *地理科学进展*, 2015, **34**(6): 761-771.
Liu Y X, Xu G, Jiang H Y, et al. Synergy between ecosystem services and ecosystem health in the forest area of Northeast China [J]. *Progress in Geography*, 2015, **34**(6): 761-771.
- [8] He J H, Pan Z Z, Liu D F, et al. Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **673**: 553-564.
- [9] 陈万旭, 赵雪莲, 钟明星, 等. 长江中游城市群生态系统健康时空演变特征分析[J]. *生态学报*, 2022, **42**(1): 138-149.
Chen W X, Zhao X L, Zhong M X, et al. Spatiotemporal evolution patterns of ecosystem health in the Middle Reaches of the Yangtze River Urban Agglomerations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42** (1): 138-149.
- [10] 顾晓昀, 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.
- [11] Zhao C S, Shao N F, Yang S T, et al. Integrated assessment of ecosystem health using multiple indicator species [J]. *Ecological Engineering*, 2019, **130**: 157-168.
- [12] 苏瑶, 许育新, 安文浩, 等. 基于微生物物完整性指数的城市河道生态系统健康评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1270-1279.
Su Y, Xu Y X, An W H, et al. Assessment of ecosystem health of an urban river based on the microbe index of biotic integrity (M-IBI) [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1270-1279.
- [13] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 等. 海南省湿地生态系统健康评价体系构建与应用[J]. *湿地科学*, 2020, **18**(5): 555-563.
Lei J R, Chen Z Z, Chen Y Q, et al. Development and application of wetland ecosystem health evaluation system in Hainan province [J]. *Wetland Science*, 2020, **18**(5): 555-563.
- [14] Liu W W, Cui L J, Guo Z L, et al. Wetland ecosystem health improvement from ecological conservation and restoration offset the decline from socio-economic development [J]. *Land Degradation & Development*, 2023, **34**(1): 283-295.
- [15] Meng Y, Cao B H, Dong C, et al. Mount Taishan forest ecosystem health assessment based on forest inventory data [J]. *Forests*, 2019, **10**(8), doi: 10.3390/f10080657.
- [16] 曹美芹, 陈芸芝, 汪小钦, 等. 荒漠森林生态系统健康评价与分析——以塔里木河下游为例[J]. *遥感信息*, 2021, **36**(2): 72-80.
Cao M Q, Chen Y Z, Wang X Q, et al. Evaluation and analysis of desert forest ecosystem health: taking lower reaches of Tarim River for an example [J]. *Remote Sensing Information*, 2021, **36**(2): 72-80.
- [17] Cai H Y, Lu H F, Tian Y, et al. Effects of invasive plants on the health of forest ecosystems on small tropical coral islands [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **117**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106656.
- [18] 陈春波, 彭建, 李刚勇. 新疆草地生态系统健康评价体系构建[J]. *干旱区研究*, 2022, **39**(1): 270-281.
Cheng C B, Peng J, Li G Y. Evaluating ecosystem health in the grasslands of Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2022, **39**(1):

- 270-281.
- [19] 刘思怡, 丁建丽, 张钧泳, 等. 艾比湖流域草地生态系统环境健康遥感诊断[J]. 草业学报, 2020, **29**(10): 1-13.
Liu S Y, Ding J L, Zhang J Y, *et al.* Remote sensing diagnosis of grassland ecosystem environmental health in the Ebinur Lake Basin [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, **29**(10): 1-13.
- [20] 刘娟, 王飞, 韩文辉, 等. 汾河上中游流域生态系统健康评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, **29**(3): 91-98.
Liu J, Wang F, Han W H, *et al.* The ecosystem health evaluation in the upper and middle reaches of Fen River Basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, **29**(3): 91-98.
- [21] 汪小钦, 林梦婧, 丁哲, 等. 基于指标自动筛选的新疆开孔河流域生态健康评价[J]. 生态学报, 2020, **40**(13): 4302-4315.
Wang X Q, Lin M J, Ding Z, *et al.* Ecological health assessment of Kaikong River Basin based on automatic screening of indicators in Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(13): 4302-4315.
- [22] Peng J, Liu Y X, Li T Y, *et al.* Regional ecosystem health response to rural land use change: A case study in Lijiang City, China [J]. *Ecological Indicators*, 2017, **72**: 399-410.
- [23] 姚焱中, 李诗婷, 苏美蓉, 等. 区县生态系统健康评价方法——以东莞市各镇区为例[J]. 生态学报, 2021, **41**(15): 5998-6011.
Yao Y Z, Li S T, Su M R, *et al.* County ecosystem health assessment: A case study of 32 counties in Dongguan city, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(15): 5998-6011.
- [24] 窦世卿, 张楠, 靖娟利, 等. 基于耦合模型的广东省生态系统健康时空动态变化[J]. 科学技术与工程, 2022, **22**(27): 12223-12232.
Dou S Q, Zhang N, Jing J L, *et al.* Spatio-temporal dynamic changes of ecosystem health in Guangdong province based on coupling model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, **22**(27): 12223-12232.
- [25] Gao B P, Wu Y M, Li C, *et al.* Ecosystem health responses of urban agglomerations in central Yunnan based on land use change [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**(19), doi: 10.3390/ijerph191912399.
- [26] 卢应爽, 韩蕊, 石宇, 等. 黔东南苗族侗族自治州生态系统健康的时空变化[J]. 生态学报, 2021, **41**(14): 5557-5569.
Lu Y S, Han R, Shi Y, *et al.* Ecosystem health assessment of Qiandongnan Miao and Dong autonomous prefecture [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(14): 5557-5569.
- [27] 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 等. 2000~2018年京津冀城市群PM_{2.5}时空演变及其与城市扩张的关联[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2274-2283.
Zhao A Z, Xiang K Z, Liu X F, *et al.* Spatio-temporal evolution patterns of PM_{2.5} and relationship with urban expansion in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2018 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2274-2283.
- [28] 袁毛宁, 刘焱序, 王曼, 等. 基于“活力—组织力—恢复力—贡献力”框架的广州市生态系统健康评估[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(4): 1249-1257.
Yuan M N, Liu Y X, Wang M, *et al.* Ecosystem health assessment based on the framework of vigor, organization, resilience and contribution in Guangzhou City [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(4): 1249-1257.
- [29] 陈万旭. 长江中游城市群生态系统健康时空演变及其城镇化驱动机制研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
Chen W X. Spatiotemporal evolution of ecosystem health and Its driving mechanism of urbanization in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomerations [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- [30] Liao C J, Yue Y M, Wang K L, *et al.* Ecological restoration enhances ecosystem health in the karst regions of southwest China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **90**: 416-425.
- [31] 郭珊珊. 黄河流域生态系统健康与城镇化耦合协调研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
Guo S S. Research on the coupling and coordination of ecosystem health and urbanization in the Yellow River basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
- [32] Xiao R, Liu Y, Fei X F, *et al.* Ecosystem health assessment: a comprehensive and detailed analysis of the case study in coastal metropolitan region, Eastern China [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **98**: 363-376.
- [33] Das M, Das A, Pereira P, *et al.* Exploring the spatio-temporal dynamics of ecosystem health: A study on a rapidly urbanizing metropolitan area of Lower Gangetic Plain, India [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107584.
- [34] 何新, 姜广辉, 张瑞娟, 等. 基于PSR模型的土地生态系统健康时空变化分析——以北京市平谷区为例[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(12): 2057-2068.
He X, Jiang G H, Zhang R J, *et al.* Temporal and spatial variation of land ecosystem health based on the pressure-state-response model: A case study of Pinggu District, Beijing [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(12): 2057-2068.
- [35] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(8): 1243-1254.
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, *et al.* Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(8): 1243-1254.
- [36] 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰, 等. 京津冀地区生态系统服务价值时空变化及驱动因子分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, **12**(4): 1114-1122.
Li K M, Wang X Y, Yao L L, *et al.* Spatio-temporal change and driving factor analysis of ecosystem service value in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, **12**(4): 1114-1122.
- [37] 燕守广, 李辉, 李海东, 等. 基于土地利用与景观格局的生态保护红线生态系统健康评价方法——以南京市为例[J]. 自然资源学报, 2020, **35**(5): 1109-1118.
Yan S G, Li H, Li H D, *et al.* Ecosystem health assessment method of eco-redline based on land use and landscape pattern in Nanjing [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(5): 1109-1118.
- [38] 欧维新, 张伦嘉, 陶宇, 等. 基于土地利用变化的长三角生态系统健康时空动态研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, **28**(5): 84-92.
Ou W X, Zhang L J, Tao Y, *et al.* A land-cover-based approach to assessing the spatio-temporal dynamics of ecosystem health in the Yangtze River Delta region [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, **28**(5): 84-92.
- [39] 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 等. 基于GIS对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(11): 5192-5204.
Zhang K K, He J, Zhong Y X, *et al.* Identification of soil heavy metal sources around a copper-silver mining area in Ningxia based on GIS [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5192-5204.
- [40] 潘晓东, 李品, 冯兆忠, 等. 2000~2015年中国地级市化肥使

- 用量的时空变化特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4733-4742.
- Pan X D, Li P, Feng Z Z, *et al.* Spatial and temporal variations in fertilizer use across prefecture-level cities in China from 2000 to 2015[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4733-4742.
- [41] 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.
- [42] 耿甜伟, 陈海, 张行, 等. 基于GWR的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2020, **35**(7): 1714-1727.
- Geng T W, Chen H, Zhang H, *et al.* Spatiotemporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi province based on GWR[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(7): 1714-1727.
- [43] 杨倩. 基于土地利用的江苏省市县生态系统健康评估研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- Yang Q. Study on ecosystem health assessment at municipal- and county-levels in Jiangsu province based on land use analysis[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [44] 马振刚, 李黎黎, 杨润田, 等. 京张区域生态系统健康评价与应对策略[J]. 干旱区研究, 2019, **36**(1): 228-236.
- Ma Z G, Li L L, Yang R T, *et al.* Assessment and countermeasures of ecosystem health in the Beijing-Zhangjiakou area[J]. *Arid Zone Research*, 2019, **36**(1): 228-236.
- [45] Dobbs C, Kendal D, Nitschke C R. Multiple ecosystem services and disservices of the urban forest establishing their connections with landscape structure and sociodemographics [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **43**: 44-55.
- [46] Kang P, Chen W P, Hou Y, *et al.* Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 1442-1454.



CONTENTS

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