

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)
铜陵某废弃疏铁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, 蒋珍芬, 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, 周曙仡, 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)

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, 张芙榕

(辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029)

摘要: 深入研究辽河三角洲生态系统服务价值(ESV)的时空演变特征及影响因素, 对其生态环境治理和保护具有重要意义。基于1990~2020年辽河三角洲7期土地利用数据, 利用当量因子系数修正法建立估算模型评估ESV, 综合分析研究区ESV时空演变特征, 并探究ESV驱动影响因素与机制。结果表明: ①1990~2020年辽河三角洲地区土地利用方式大部分为耕地, 30年间林地、湿地和未利用土地面积呈现下降趋势, 草地、水域和建设用地呈上升趋势, 耕地面积基本无变化。②辽河三角洲ESV呈现先减少后增加再减少的趋势, 生态系统服务总价值整体呈现出西南部价值高, 东北部价值低的空间分异规律。③辽河三角洲地区的所有土地利用类型敏感性指数均小于1, 表明ESV缺乏弹性。④辽河三角洲ESV具有空间正相关性, 整体而言, 辽河三角洲以HH和LL聚类为主, HL聚类多分布在LL聚类边界处, LH聚类分布在HH聚类周围, 少量分布在LL聚类周围。⑤辽河三角洲生态系统服务价值演变的影响因子中, DEM对ESV的影响最小, HAI对ESV影响最大, 其次是GDP, 所有影响因子的交互结果对ESV空间分布的影响均具有增强作用, 其中HAI和降水量的交互作用最强, 达到了95.58%。

关键词: 生态系统服务价值(ESV); 时空演变; 影响因素; 辽河三角洲; 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)01-0228-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202301081

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

(School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: An in-depth study of the spatiotemporal variation characteristics and driving factors of ecosystem service values in the Liaohe River Delta is of great significance to its ecological environment governance and protection. Based on the land use data of the Liaohe River Delta for seven periods from 1990 to 2020, the ecosystem service value (ESV) was evaluated according to the equivalent factor coefficient correction method, establishing models for estimating the value of ecosystem services; the spatial and temporal evolution characteristics of the ESV in the study area were comprehensively analyzed; and the driving influencing factors and mechanisms of the ESV were explored. The results showed that: ① From 1990 to 2020, the most common land use type in the Liaohe River Delta was cultivated land, and the areas of forest land, wetland, and unutilized land showed a decreasing trend; grassland, water, and construction land showed an increasing trend; and the area of cultivated land was basically unchanged during the 30 year period. ② In terms of the temporal evolution, the ESV in the study area showed a trend of first decreasing, then increasing, and then decreasing. In terms of the spatial distribution of ESV, the total value of ecosystem services as a whole showed a spatial divergence pattern of a high value in the southwest and low value in the northeast. ③ The sensitivity index of all land use types in the Liaohe River Delta was less than 1, indicating that the ESV was inelastic. ④ The value of ecosystem services in the Liaohe River Delta showed positive spatial coherence. On the whole, the Liaohe River Delta was dominated by HH and LL clusters, with HL clusters mostly distributed at the boundaries of LL clusters and LH clusters distributed at the boundaries of HH clusters. ⑤ Among the factors influencing the evolution of ESV in the Liaohe River Delta, DEM had the least influence, and HAI had the greatest influence on the ESV, followed by precipitation. The interaction results of all influencing factors had an enhancing effect on the spatial distribution of the ESV, among which HAI and precipitation had the strongest interaction effect, reaching 95.58%.

Key words: ecosystem service value(ESV); spatial and temporal evolution; influencing factors; Liaohe River Delta; geo-detector

生态系统服务是生态系统形成并维持人类赖以生存的自然环境条件与效用, 人类生存与发展的资源均来自于自然生态系统^[1]。近年来生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)的评估方法主要可分为直接评估法和间接评估法两大类^[2]。间接评估法中又包括基于价值量进行间接估算, 常用方法主要以市场价值法^[3]、替代成本法^[4]和影子工程法^[5]为主。这些方法的评价标准较片面化, 难以客观反映系统中自然资源的生态价值等。现阶段, 一部分学者选择由美国著名生态系统学家Odum^[6]创立并发展起来的能值分析法^[7,8], 可以进行长时间尺度的计算, 大多数

学者选择由谢高地在Costanza等的基础上结合200位专家的意见提出的当量因子法^[9], 研究流域^[10]、山区^[11,12]、湿地^[13]、湖泊^[14,15]和市区^[16]等尺度生态系统服务价值的流向^[17]、时空特征^[18,19]、驱动因子^[20]和预测模型^[21]。该方法利用土地利用面积对ESV进行估算, 具有操作简单、数据易获得的特点, 在实际应用中适用性较高, 常被用于区域尺度的ESV估算^[22-24], 但原估算结果的精确度不高, 因此需要引入其他方

收稿日期: 2023-01-12; 修订日期: 2023-03-30

作者简介: 王耕(1973~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为区域生态安全与环境管理, E-mail: wanggeng@lnnu.edu.cn

法进行修正,现如今的修正方法有:杨帅琦等^[25]利用产量因子修正,李坦等^[26]根据恩格尔系数修正,马伟波等^[27]将产值面积、NPP和降水数据结合修正,本文参考前人的研究^[28],采用NPP和社会发展系数相结合进行修正。虽然ESV的研究方法成熟,但研究多集中于宏观尺度,在行政区域层面的省、市、区(县),自然区域层面的重点流域和各类保护区中,小尺度的生态系统服务价值核算是未来的一个重要方向^[29]。

辽河三角洲生态系统服务功能是辽河流域人类文明和可持续发展的基础。研究辽河三角洲ESV能更有效地定量了解生态系统服务的价值,从而加深对生态系统服务的认识,进而提高人们的保护环境意识。近年来对辽河三角洲的研究大多集中在土地利用动态变化^[30]、湿地影响因子^[31]、生态系统服务时空变化^[32]和生态系统服务价值时间变化^[33],现有的ESV研究仅在谢高地全国当量表的基础上进行分析,缺少因地制宜的系数修正,并且鲜有学者使用地理探测器进行ESV的影响因素分析。本文以辽河三角洲1990~2020年每隔5a为一个时间点共7期土地利用数据为基础,运用区域差异系数和社会发展系

数修正当量因子,估算1990~2020年辽河三角洲ESV,结合土地利用动态度和空间异质性方法对辽河三角洲ESV做了详细讨论,在地理信息技术的支持下,综合分析研究区ESV时空演变特征,并通过地理探测器的方法探究其对ESV驱动机制的耦合性,旨在为辽河三角洲地区土地资源的可持续发展与生态环境保护提供理论参考,同时对河口三角洲地区研究ESV具有一定参考价值。

1 研究区概况

辽河三角洲位于辽宁省西南部盘锦市境内(图1),包括双台子区、大洼区、盘山县、兴隆台区、西市区与站前区,地处辽河、大辽河入海口交汇处,东经 $121^{\circ}31' \sim 122^{\circ}28'$,北纬 $40^{\circ}41' \sim 41^{\circ}27'$,属于温带半湿润性季风气候,拥有全国最大的湿地自然保护区——双台河口(即辽河口)国家级自然保护区。年平均降雨量为650 mm,大多降雨在6~8月,年平均温度为 8.5°C 。由于湿地资源和生物多样性的重要性,辽河三角洲滨海湿地于1986年被批准为双台河口国家级自然保护区,2005年被纳入国际重要湿地保护体系拉姆萨尔湿地。

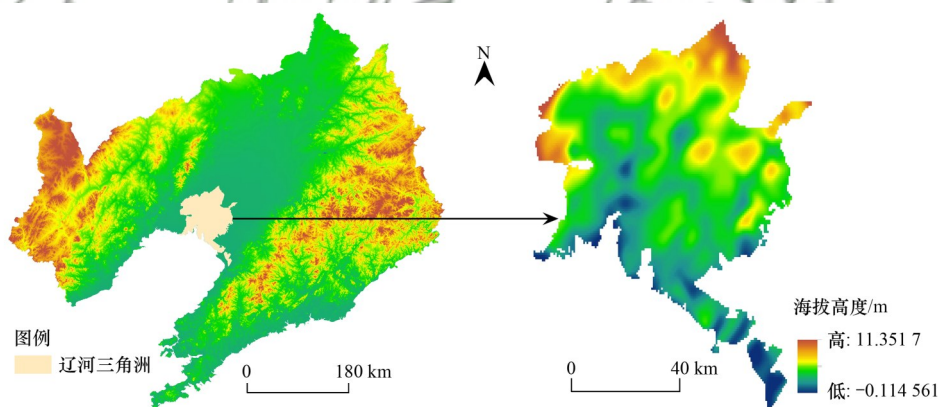


图1 辽河三角洲地理位置

Fig. 1 Geographical location of the Liaohe River Delta

2 材料与方法

2.1 数据来源及预处理

研究采用的数据包括土地利用数据、遥感数据、社会经济统计数据 and 气候气象数据。

(1)土地利用数据采用资源环境科学与数据中心^[34]的1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年和2020年的1 km和30 m土地栅格数据,将土地利用类型重分类为耕地、草地、林地、湿地、水域、建设用地和未利用土地,再进行栅格转矢量、统计和汇总得出1990~2020年7个时段的各土地利用类型总面积,因辽河三角洲面积较小,比较得出30 m

土地栅格数据结果的准确性较高,故选择30 m土地栅格数据。

(2)遥感数据包括数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据和NDVI数据,均来源于地理空间数据云平台。NDVI是基于连续时间序列的SPOT/VEGETATION NDVI卫星遥感数据,采用最大值合成法生成,以上数据经过拼接、裁剪、重采样操作得到1 km $\times$ 1 km分辨率的NDVI和DEM数据。坡度数据由ArcGIS10.2计算得出。

(3)社会经济统计数据包括人口密度数据(population density, POP)和国内生产总值(gross domestic product, GDP),均来源于中国科学院地理科

学与资源研究所. 辽河三角洲社会经济数据包括粮食产量、播种面积、粮食价格等均来源于辽宁省统计年鉴. 用电量栅格数据来源于文献[35]. 夜间灯光数据通过整合 DMSP-OLS 和 SNPP-VIIRS 数据矫正得到中国范围的类 DMSP-OLS 数据. 人为影响指数(HAI)根据公式^[36]计算得出.

(4) 气候气象数据从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取研究区 2015 年的年降水量和平均气温(T)的实测数据, 对以上气象数据进行普通克里金插值并裁切, 得到 1 km×1 km 分辨率气象栅格数据.

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用动态度

土地利用动态度是衡量不同土地利用类型一定时间内的变化速度, 是反映土地利用动态变化的重要指标^[37], 包括单一土地利用动态度和综合土地利用动态度. 计算公式为:

$$K = [(U_b - U_a) / U_a] \times [1 / (t_2 - t_1)] \times 100\% \quad (1)$$

$$C = \sum_{i=1}^n \Delta V_{ij} / \left(2 \times \sum_{i=1}^n \Delta A_i \right) \times [1 / (t_2 - t_1)] \times 100\% \quad (2)$$

式中, K 为 $t_2 - t_1$ 时期内某种土地利用类型的单一土地利用动态度, U_b 和 U_a 分别为研究期初和期末某种土地利用类型的面积, $t_2 - t_1$ 为研究时长. C 为研究期内研究区的综合土地利用动态度, ΔV_{ij} 为 $t_2 - t_1$ 时段内第 i 类土地转变为非 i 类土地的绝对值, A_i 为区域内第 i 类土地类型在监测初始阶段 t_1 时期的面积.

2.2.2 生态系统服务价值评估方法

(1) 当量系数修正 不同地区的生态环境和人文环境不同, 为了生态系统服务价值的计算更为精确, 采用区域差异系数和社会发展系数进行时空修正^[38]. 本文采用净初级生产潜力(NPP)代替生物量, 用生物生产力指标中某类植被的自然植被净初级生产潜力值与所有类型植被的平均净初级生产力的比值对生态系统服务区域差异性系数(Q_i)进行修正, 计算公式如下:

$$Q_i = \text{NPP} / \text{NPP}_{\text{mean}} \quad (3)$$

式中, Q_i 为第 t 年的区域差异系数, NPP 为自然植被的净初级生产潜力, NPP_{mean} 为所有类型植被的平均净初级生产潜力.

$$\text{NPP} = 3000 [1 - e^{-0.000969(z-20)}] \quad (4)$$

$$Z = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + (1 + 1.05R/H)^2}} \quad (5)$$

$$H = 3000 + 25t + 0.05t^3 \quad (6)$$

式中, Z 为研究区一年内实际蒸散量(mm), e 为自然常数, H 为研究区一年内的平均蒸散量(mm), t 为研

究区一年内的平均气温($^{\circ}\text{C}$), R 为研究区一年内的降水总量(mm).

社会发展阶段系数反映的是在不同社会经济水平和人民生活水平下, 人们对生态价值的支付意愿的相对水平. 具体计算公式为:

$$l = l_1 M_1 + l_2 M_2 \quad (7)$$

$$D_t = l_{\text{研究区}} / l_{\text{全国平均}} \quad (8)$$

式中, l 为辽河三角洲综合发展系数, l_1 为城镇社会发展系数, M_1 为城镇人口的占比, l_2 为农村社会发展系数, M_2 为农村人口的占比, D_t 为第 t 年的社会发展修正系数.

(2) 生态系统服务价值计算 根据辽河三角洲 1990 ~ 2020 年土地利用面积统计中水田与旱地的面积之比加权计算出耕地的 ESV 系数; 草地采用草原和草甸 ESV 系数的均值; 林地、水域、湿地和未利用土地分别采用阔叶林、水系、湿地和荒漠中裸地的 ESV 系数; 建设用地的 ESV 系数为 0, 故本文未考虑其生态价值. 谢高地等^[39]的研究结果中当量因子采用粮食净价值, 是实际粮食价值扣除生产成本后的价值. 经测算, 将其定义为粮食单产价值的 1/7, 1990 ~ 2020 年辽河三角洲地区平均粮食产量为 8 487.83 kg·hm⁻², 2020 年平均粮食价格为 2.6985 元·kg⁻¹, 因此辽河三角洲地区一个生态系统服务价值当量因子为 3 272.06 元·hm⁻², 整合得出辽河三角洲单位面积 ESV 系数表(表 1), 辽河三角洲地区的生态系统服务价值的计算公式为:

$$\text{ESV} = \sum (A_k \times \text{VC}_k \times D_t \times Q_i) \quad (9)$$

$$\text{ESV}_f = \sum (A_k \times \text{VC}_{fk} \times D_t \times Q_i) \quad (10)$$

式中, ESV 为研究区总的生态系统服务价值, A_k 为土地利用类型 k 的面积, VC_k 为第 k 类土地利用的单位面积生态系统服务价值系数, ESV_f 为生态系统第 f 项服务功能价值, VC_{fk} 为土地利用类型 k 的第 f 项服务功能价值系数.

(3) 敏感性指数 敏感性指数(CS)可以确定 ESV 随时间变化对 VC 的依赖程度, 以此为依据验证所选 VC 是否适合本研究区. 若 CS 值小于 1, 则代表生态系统服务价值对生态系统服务价值系数不具有弹性, 研究结果可信度较高^[40], 计算公式为:

$$\text{CS} = \left| \frac{(\text{ESV}_j - \text{ESV}_i) / \text{ESV}_i}{(\text{VC}_{jk} - \text{VC}_{ik}) / \text{VC}_{ik}} \right| \quad (11)$$

式中, CS 为敏感性指数, ESV_i 和 ESV_j 分别为初始生态系统服务价值和调整后的生态系统服务总价值, VC_{ik} 和 VC_{jk} 分别为初始和调整后的生态系统服务价值系数.

表 1 辽河三角洲地区土地利用类型生态系统服务价值系数

Table 1 Ecosystem service value coefficients for land use types in the Liaohe River Delta

服务类别	单项服务	耕地	林地	草地	湿地	水域	未利用土地
供给服务	食物生产	4 283.13	948.90	523.53	1 668.75	2 617.65	0.00
	原料生产	395.92	2 159.56	768.93	1 636.03	752.57	0.00
	水资源供给	-7 738.42	1 112.50	425.37	8 474.64	27 125.38	0.00
调节服务	气体调节	3 488.02	7 100.37	2 699.45	6 216.91	2 519.49	65.44
	气候调节	1 796.36	21 268.39	7 133.09	11 779.42	7 493.02	0.00
	净化环境	533.35	6 315.08	2 355.88	11 779.42	18 159.93	327.21
	水文调节	8 098.35	15 509.56	5 218.94	79 282.01	334 535.41	98.16
支持服务	土壤保持	366.47	8 670.96	3 288.42	7 558.46	3 043.02	65.44
	维持养分循环	598.79	654.41	261.76	588.97	229.04	0.00
	生物多样性	660.96	7 885.66	2 993.93	25 751.11	8 343.75	65.44
文化服务	美学景观	284.67	3 468.38	1 325.18	15 476.84	6 184.19	32.72
合计		12 767.58	75 093.78	26 994.50	170 212.56	411 003.46	654.41

2.2.3 生态系统服务价值空间异质性方法

(1)全局空间自相关 全局空间自相关可以反映特定区域某一变量的空间依赖程度和空间差异程度,采用莫兰指数(Moran's I)描述 ESV 的空间自相关特征.当 Moran's $I > 0$ 时,说明 ESV 具有正向空间自相关,值越大正向自相关性越强;当 Moran's $I < 0$ 时,说明具有负向空间自相关,值越小负向自相关性越强;当 Moran's $I = 0$ 时,说明没有相关性,即呈随机分布^[41].

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \left(\sum_{j=1}^n W_{ij} \right)} \quad (12)$$

式中, x_i 和 x_j 分别为单元*i*和*j*的值; n 为研究区样本总量; $\bar{x}$ 为区域平均值; W_{ij} 为基于距离函数邻接关系建立的空间权重矩阵.

(2)聚类 and 异常值分析法 聚类 and 异常值分析法可以分析研究区内土地利用时空格局影响下生态系统服务价值变化的空间分异规律,公式如下^[42]:

$$\text{LISA}_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{m_0} \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (13)$$

$$m_0 = \sum_i (x_i - \bar{x})/n \quad (14)$$

式中, W_{ij} 为单元*i*与单元*j*之间的空间权重矩阵, x_i 为单元*i*的属性值, x_j 为单元*j*的属性值, $\bar{x}$ 为所有属性值的平均值, n 为区域单元的总数. LISA 值 > 0 ,表示空间单元的生态系统服务是高-高值或低-低值的空间聚集;相反, LISA 值 < 0 ,表示空间单元的生态系统服务为高-低值或低-高值的空间聚集.

2.2.4 生态系统服务价值影响因素分析

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[43].本文选择了因子探测和交互作用探测进行定量阐述和分析.公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (15)$$

式中, q 为某一因子对辽河三角洲 ESV 空间分布的解释程度,值域为 $[0, 1]$, $h=1, 2, \dots, L$ 为自然因子分类数, N_h 和 N 分别为层*h*和研究区的单元数, σ_h^2 和 σ^2 分别为层*h*和全区的 ESV 的方差.交互作用检验的是因子之间共同作用相对于单因子对 ESV 变化的影响^[44].

3 结果与分析

3.1 土地利用变化时空演变

30年间辽河三角洲地区土地利用方式大部分为耕地,约占总面积的53%,其次是湿地和建设用地,分别占总面积的27%和14%,各土地类型面积占比为:耕地>湿地>建设用地>水域>林地>草地>未利用土地,土地类型的面积变化率为:林地>草地>建设用地>湿地>水域>耕地>未利用土地.1990~2020年林地、湿地和未利用土地的单一土地利用动态度呈负向趋势,其中面积下降最快的是林地,单一土地利用动态度为-0.14%,其次是未利用土地及湿地,分别为-0.05%和-0.04%.

根据土地利用动态度结果可知(表2),2010~2015年所有单一土地利用动态度均为正向趋势,这与2010年辽宁省提出的湿地保护计划有关.1990~2020年间综合土地利用动态度为1.37%,表明这30年间辽河三角洲地区土地利用经历了较大的变化.

3.2 生态系统服务价值时空演变

3.2.1 生态系统服务价值时间尺度分析

本文以5 a为一个时间尺度,估算了1990~2020年辽河三角洲地区的ESV(表3),总体ESV呈下降趋势,减少了118.75亿元.从不同土地利用类

表 2 1990~2020 年辽河三角洲土地利用动态度/%

Table 2 Attitudes towards land use dynamics in the Liaohe River Delta from 1990 to 2020/%

项目	1990 ~ 1995 年	1995 ~ 2000 年	2000 ~ 2005 年	2005 ~ 2010 年	2010 ~ 2015 年	2015 ~ 2020 年	1990 ~ 2020 年
单一土地利用动态度	草地	-0.02	0.05	0.04	0.22	0.08	-0.06
	耕地	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
	建设用地	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
	林地	-0.09	-0.02	-0.01	-0.09	0.00	-0.14
	湿地	-0.01	0.00	-0.01	-0.02	0.00	-0.04
	水域	0.00	0.01	0.02	0.09	0.00	0.15
	未利用土地	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.01	-0.05
综合土地利用动态度	0.44	0.05	0.16	0.73	0.21	0.07	1.37

型来看,耕地、林地、湿地和未利用土地的 ESV 总体减少,草地和水域 ESV 总体增加,辽河三角洲 ESV 贡献率为:湿地 > 水域 > 耕地 > 林地 > 草地 > 未利用土地。辽河三角洲土地以耕地和湿地为主,近年来湿地面积减少,耕地面积增加导致湿地 ESV 不断降低,从而造成辽河三角洲总体 ESV 的降低。湿地的 ESV

在 2010 年显著上升,由 2005 年的 164.91 亿元增加到 2010 年的 174.81 亿元,这是因为 2009 年 10 月 20 日,辽宁省政府决定启动湿地保护工程,到 2010 年,已经可以基本遏制自然湿地面积萎缩和功能退化的趋势。2015 年盘锦市启动“退养还湿”,2015~2020 年湿地的 ESV 减少速率明显比 1990~2005 年慢。

表 3 1990~2020 年辽河三角洲各土地利用类型生态系统服务价值变化/ 10^8 元Table 3 Changes in ecosystem service values by land use type in the Liaohe River Delta from 1990 to 2020/ 10^8 yuan

土地利用 类型	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	1990 ~ 2020 年 变化量	增长率 /%
耕地	27.359 78	28.288 53	24.770 22	23.537 86	29.693 22	18.226 54	17.733 64	-9.626 14	-35.18
林地	6.741 32	3.201 63	2.488 72	2.264 38	1.193 21	0.738 99	0.698 75	-6.042 57	-89.63
草地	0.193 06	0.172 56	0.194 92	0.228 56	0.641 59	0.600 16	0.367 53	0.174 47	90.37
湿地	217.597 73	206.929 23	179.895 38	164.909 93	174.811 24	109.115 15	105.511 73	-112.086 01	-51.51
水域	58.537 16	59.206 29	53.543 85	58.143 10	109.205 67	68.404 83	67.598 23	9.061 07	15.48
未利用土地	0.000 41	0.000 41	0.000 35	0.000 33	0.000 35	0.000 23	0.000 17	-0.000 24	-57.64
合计	311.085 77	298.477 23	261.487 63	249.648 79	316.257 55	197.523 11	192.335 44	-118.750 32	-38.17

从各生态系统服务来看(表 4),1990~2020 年辽河三角洲 ESV 表现为:调节服务 > 支持服务 > 供给服务 > 文化服务。调节服务中的气体调节、气候调节、净化环境和水文调节主要受湿地、林地和草地面积的影响,与面积变化保持一致,呈现出快速降低、显著升高后又快速降低的趋势。供给服务中的食物生产功能主要受耕地的影响,1990~2020 年耕地面积变化较小,但由于土壤肥力、气候的变化,所以食物生产功能价值呈现出增长后降低、降低后又增长的波动趋势,总体上呈降低的趋势,减少了 4.343 亿元。原料生产受林地、草地的影响,除 2010 年呈增加的趋势以外,其他所有年份均呈下降的趋势,其服务价值减少了 1.528 亿元。支持服务中的土壤保持的 ESV 变化最为显著。

3.2.2 生态系统服务价值空间维度分析

基于 ArcGIS 软件,将辽河三角洲 ESV 进行空间可视化,并利用自然间断点法将其分为 5 个区间(图 2)。由图 2 可知,ESV 空间格局与土地利用分布密切

相关,湿地和水域的 ESV 较高,建设用地和未利用地 ESV 较低,林地、草地和耕地的 ESV 处于中间区间,7 个时期 ESV 分布特征基本相似,整体呈现东南低、西部高的空间格局,高值区主要集中在西部的兴隆台区、大洼区和盘山县,这是由于这些地区受辽河三角洲滨海湿地的影响,海拔相对较低,植被覆盖率高,拥有双台河口自然保护区,受人类活动冲击较小,ESV 相对较高;低值区集中在站前区和西市区,这是由于这些地区地势较为平坦,地类以建设用地和未利用土地为主,其中西市区、站前区是城区,人类活动密集,开发利用程度高,建设用地规模较大,因此这些地区的 ESV 较低。对比 1990 年和 2020 年辽河三角洲 ESV 结果可知:高值和低值区域在空间呈现一定的极化效应。低值区呈放射状扩大,低值区域主要位于主城区附近,表明近年来城市扩张速度加快;高值区南移,从河流周围转移到沿海地区,得益于辽河三角洲良好的自然环境和水域面积的增加。

表 4 辽河三角洲各生态系统服务价值/亿元

Table 4 Value of various ecosystem services in the Liaohe River Delta/10⁸ yuan

服务项目		1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	1990 ~ 2020 年 变化量	增长率 /%
供给服务	食物生产	11.773	11.940	10.450	9.916	12.398	7.641	7.430	-4.343	-36.89
	原料生产	3.246	3.072	2.672	2.493	2.854	1.778	1.718	-1.528	-47.07
	水资源供给	-1.783	-2.885	-2.483	-2.181	-2.058	-1.079	-1.018	0.765	-42.92
调节服务	气体调节	16.438	15.969	13.921	13.047	15.343	9.514	9.216	-7.222	-43.94
	气候调节	21.936	20.332	17.667	16.486	18.774	11.731	11.324	-10.611	-48.37
	净化环境	19.372	18.403	16.077	15.175	18.320	11.450	11.120	-8.252	-42.60
	水文调节	167.783	163.213	143.637	139.579	189.516	118.331	115.631	-52.153	-31.08
支持服务	土壤保持	11.683	10.830	9.407	8.718	9.639	6.033	5.820	-5.863	-50.18
	维持养分循环	2.129	2.105	1.838	1.729	2.075	1.283	1.244	-0.885	-41.57
	生物多样性	36.254	34.328	29.868	27.611	30.397	18.984	18.367	-17.887	-49.34
文化服务	美学景观	21.597	20.493	17.840	16.510	18.287	11.421	11.057	-10.540	-48.80
合计		310.429	297.799	260.893	249.084	315.545	197.086	191.910	-118.519	-38.18

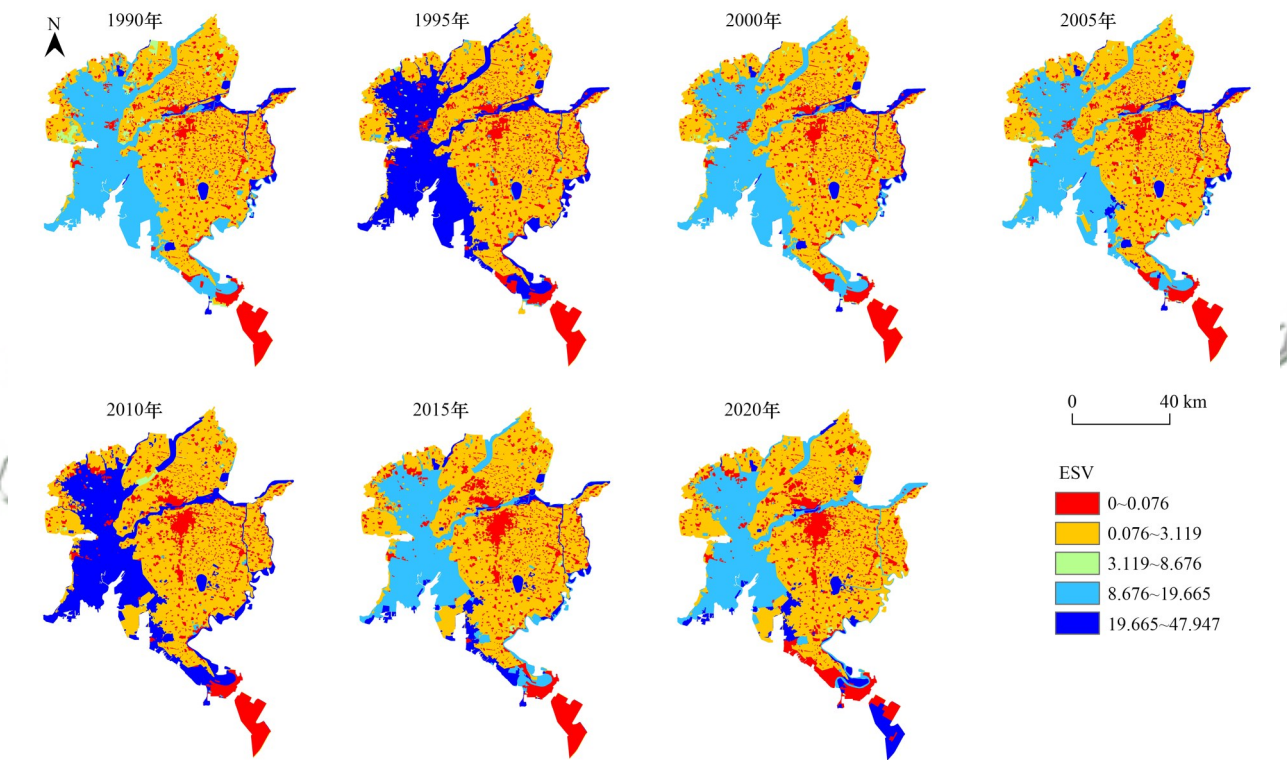


图 2 1990 ~ 2020 年辽河三角洲 ESV 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ESVs in the Liaohe River Delta from 1990 to 2020

3.3 生态系统服务价值空间异质性分析

1990 ~ 2000 年上升,2000 ~ 2015 年下降,2015 ~ 2020 年上升, P 值均为 0,表明研究区生态系统服务价值具有空间正相关性。

3.3.1 生态系统服务价值全局空间自相关分析

研究区 1990 ~ 2020 年 7 期 Moran's I 均大于 0,

表 5 辽河三角洲生态系统服务价值的全局 Moran's I

Table 5 Global Moran's I for the value of ecosystem services in the Liaohe River Delta

项目	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
Moran's I	0.697	0.704	0.712	0.696	0.687	0.679	0.686
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

3.3.2 生态系统服务价值聚类及异常值分析

利用 ArcGIS 的渔网工具,以 1 km × 1 km 的格网为研究单元,使用 ArcGIS 中的聚类及异常值分析,得到辽河三角洲 1990 ~ 2020 年 ESV 变化的空间相关度分布格局(图 3)。HH、HL、LH 和 LL 分别表示高-高值、高-低值、低-高值和低-低值这 4 类空间聚类类

型. 整体而言, 辽河三角洲以 HH 和 LL 聚类为主. HH 聚类主要分布于辽河三角洲东南部, 以站前区为主; LL 聚类多分布在西部, 以兴隆台区、大洼区为主; HL 聚类多分布在 LL 聚类边界处, 呈包围状; LH 聚类多分布在 HH 聚类周围, 少量分布在 LL 聚类周围. HH 和 LL 聚类同时呈大面积分布, 但占辽河三角洲总面积较小, 表明辽河三角洲的生态环境的平衡性受到一定破坏, 但大部分地区并未受到影响.

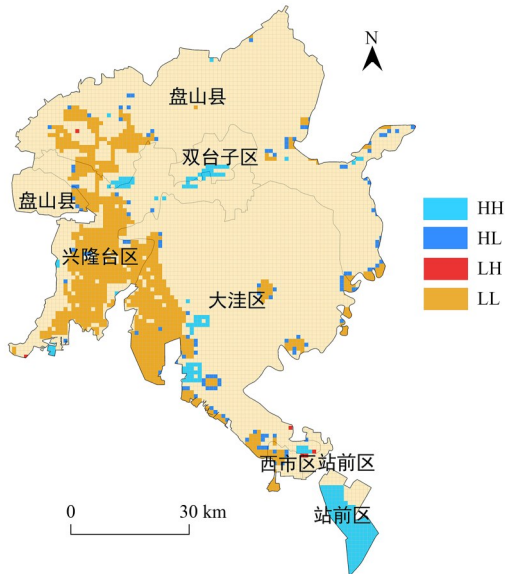


图 3 1990 ~ 2020 年辽河三角洲 ESV 变化空间相关度分布格局
Fig. 3 Spatial correlation distribution pattern of ESV changes in the Liaohe River Delta from 1990 to 2020

3.4 生态系统服务价值敏感性分析

将所有土地利用类型的 VC 上下调整 50%, 得出各土地类型的 CS, 求出各土地类型的 CS 占比情况, 整合得出 ESV 敏感性百分比堆积(图 4), 比较不同年份的各土地类型的 CS, 得出不同年份 ESV 敏感性年际变化(图 4). 辽河三角洲地区的所有土地利用类型 CS 均小于 1, 表明 ESV 缺乏弹性, 该估算结果是可靠的. 其中, 湿地和水域的 CS 占比较大, 表明这 2 种土地利用类型在辽河三角洲生态系统中占据重要地位. 其次为耕地和林地, CS 值均小于 0.1, 表明其对应 ESV 的弹性差异较小. 未利用土地的

CS 无限接近于 0, 这表明当未利用土地的 ESV 系数上下调整 50% 时对辽河三角洲地区的 ESV 几乎没有影响. 从图 4 折线图可以看出, 辽河三角洲地区各土地利用类型的 CS 差异较大, 除湿地、水域以外, 不同时期同一地类的 CS 差异较小, 湿地的 CS 随着年份的增加而减少, 这表明湿地在辽河三角洲地区生态系统服务中的地位降低, 相反, 水域的地位略上升.

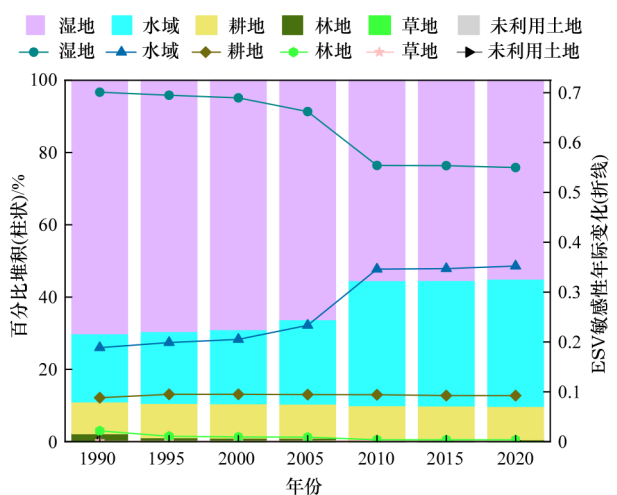


图 4 ESV 敏感性百分比堆积和 ESV 敏感性年际变化
Fig. 4 ESV sensitivity percentage stacking chart and ESV sensitivity interannual variation

3.5 生态系统服务价值影响因素分析

3.5.1 生态系统服务价值单因子探测结果

本文选用的指标主要从影响 ESV 空间分异的自然和人文两方面出发, 根据已有研究结果^[36,45], 并考虑到数据可获取性, 最终拟定 2 类 10 项影响因素. 自然因素包括: 高程、坡度、NDVI、降水和 T ; 人文因素包括: HAI、POP、夜间灯光、GDP 和用电量. 采用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析, 选出其中对研究区 ESV 时空变化影响较显著的指标作为 ESV 时空变化的主要驱动因素, 并使用地理探测器进一步分析. 结果显示(表 6), HAI、DEM、用电量、GDP、降水量、POP、 T 和夜间灯光相关性显著, 选取这 8 种因素进行地理探测器分析.

表 6 ESV 与影响因素相关性分析¹⁾

Table 6 Correlation analysis between ESV and influencing factors

相关性	HAI	DEM	用电量	GDP	降水量	NDVI	POP	T	坡度	夜间灯光
ESV	-0.761**	-0.082**	-0.117**	-0.148**	-0.101**	-0.005	-0.113**	0.068**	0.010	-0.091**

1)** 表示在 0.01 水平相关性显著

结果显示(表 7), 各因子 q 统计量依次为: HAI (0.930) > GDP (0.252) > 用电量 (0.096) > 降水量 (0.080) > T (0.048) > POP (0.039) > 夜间灯光指数 (0.034) > DEM (0.032). 所有因子的 P 值均等于 0,

代表结果差异极显著, 可靠性较高, 可以看出, HAI 对 ESV 影响最强, 其次是 GDP、用电量和降水量, HAI 代表了人类复杂的经济社会活动对环境产生的干扰, 降水量影响着湿地的发展, 湿地面积大小对辽河三

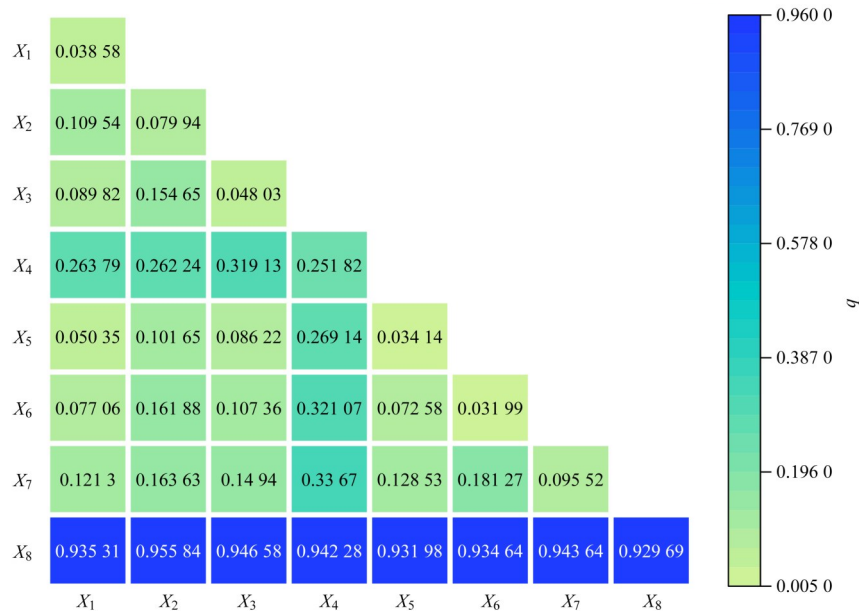
表 7 辽河三角洲生态系统服务价值驱动因子分异结果
Table 7 Results of the variance of the drivers of ecosystem service values in the Liaohe River Delta

驱动因子	GDP	用电量	DEM	HAI	夜间灯光	T	降水量	POP
q 统计量	0.252	0.096	0.032	0.930	0.034	0.048	0.080	0.039
P 值	0	0	0	0	0	0	0	0

角洲 ESV 的高低影响较大。用电量反映着经济发展程度,但对 ESV 的影响没有 GDP 直接,DEM 对 ESV 的影响最小,辽河三角洲为平原地区,地势起伏不高,植被类型较少,夜间灯光一般代表着城市经济水平和人口集中的分布情况。辽河三角洲建筑地区面积较少,大部分为湿地耕地,人口稀少,所以 POP 对辽河三角洲的 ESV 空间分异影响较小。 T 对植物生长有着重要作用,但辽河三角洲地区面积较小,温度变化趋于平缓,对 ESV 的影响较小。

3.5.2 生态系统服务价值因子交互作用探测结果
各因子交互探测结果如图 5,其中两两交互的类

型主要为双因子增强和非线性增强^[46]。交互探测结果显示,所有影响因子的交互作用结果均大于单因子作用结果^[47],证明辽河三角洲 ESV 受到多因子相互作用影响,而并不是单一因子影响。其中降水量(X_2)和 HAI(X_8)的交互作用最强,达到了 95.58%,其次为平均气温 $T(X_3)$ 和 HAI(X_8),交互作用达到 94.66%。HAI 与其他 7 个影响因子交互作用均强烈,对 ESV 变化解释程度在 30% 以上的还有 GDP(X_4)和用电量(X_7)、GDP(X_4)和 DEM(X_6)、GDP(X_4)和 $T(X_3)$ 。其余因子交互程度虽然低于 30%,但大部分高于 10%,多因子对 ESV 空间分异起到明显增强效果。



X_1 为人口密度(POP), X_2 为降水量, X_3 为平均气温(T), X_4 为 GDP, X_5 为夜间灯光数据, X_6 为 DEM, X_7 为用电量, X_8 为人为影响指数(HAI)
图 5 辽河三角洲 ESV 空间分异影响因子交互作用的 q 统计量

Fig. 5 The q -statistics of the interaction of ESV spatial differentiation influences in the Liaohe River Delta

4 讨论

本文在研究辽河三角洲 ESV 时空演变特征及影响因素分析时,由于不同地区的生态条件和社会发展状况不同,为了 ESV 的计算更为精确,故对其进行系数修正。采用 NPP 代替生物量的区域差异系数进行空间修正,采用与支付意愿有关的社会发展系数进行时间修正。本文还存在以下局限性需要在未来的研究中得到考虑并解决:

(1)本研究在采用谢高地等提出的方法计算辽河三角洲生态系统服务价值时,将建设用地的生态系统服务价值当量因子赋值为 0,同时根据已有的土

地利用类型将水田与旱地的面积之比加权计算出耕地的 ESV 系数;林地采用阔叶的 ESV 系数;草地采用草原和草甸的均值作为该地区草地的 ESV 系数,然而在实际中可能会造成误差,需要在以后的研究中进一步完善。

(2)本研究是在空间分辨率为 30 m 的土地利用栅格数据基础上进行的,受数据可获得性的影响,GDP、人口密度、坡度、NDVI、用电量、夜间灯光、气温和降水量等影响因子的数据空间分辨率均为 1 km 栅格大小,导致结果可能会存在差异。

(3)影响辽河三角洲生态系统服务价值时空演变的因素错综复杂,除本文所选取的因素外,政策制

度、价值观念等的阶段性变化也可能是导致价值变化的重要因素,本文仅考虑了各时期内政策可能导致的结果,但在定量研究中往往因其难以量化而被忽视,本研究同样存在这个不足之处,考虑如何量化这些因素以使其与其他因素具有可比性还需要在未来的研究中去进一步探讨。

5 结论

(1)30年间辽河三角洲地区土地利用类型大部分为耕地,林地、湿地和未利用土地面积呈现下降趋势,草地、水域和建设用地呈上升趋势,耕地面积基本无变化。

(2)辽河三角洲ESV在30年间呈现先减少后增加再减少的趋势,总体减少了118.75亿元,辽河三角洲ESV表现为调节服务>支持服务>供给服务>文化服务。辽河三角洲ESV整体呈现出西南部高,东北部低的空间分异规律。高值区主要集中在西部的兴隆台区、大洼区和盘山县,低值区集中在站前区和西市区。30年以来低值区呈放射状扩大,低值区域主要位于主城区附近,高值区南移,从河流周围转移到沿海地区。

(3)不同土地利用类型间的CS差距较大,除湿地、水域以外,不同时期同一地类的CS差异较小,湿地在辽河三角洲地区生态系统服务中的地位降低,相反,水域的地位略上升。

(4)辽河三角洲ESV有空间正相关性,整体而言,辽河三角洲以HH和LL聚类为主,HL聚类多分布在LL聚类边界处,LH聚类分布在HH聚类周围,少量分布在LL聚类周围。

(5)辽河三角洲ESV演变的影响因子中,DEM对ESV的影响最小,HAI对ESV影响最大,其次是GDP,所有影响因子的交互作用结果均大于单因子作用结果,各影响因子间所产生的协同增强效应共同影响了辽河三角洲ESV空间分异效果。

参考文献:

- [1] 李建蓉,乔庆华,桑会勇,等.土地利用与生态系统服务价值演变及其关联性[J].测绘科学,2021,46(12):179-185.
Li J R, Qiao Q H, Sang H Y, et al. The evolution and correlation of land use and ecosystem service value[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(12): 179-185.
- [2] 杨婷,张代青,沈春颖,等.基于能值分析的流域生态系统服务功能价值评估——以东江流域为例[J].水生生态学杂志,2023,44(1):9-15.
Yang T, Zhang D Q, Shen C Y, et al. Valuation of river basin ecosystem services based on emergy analysis: a case study of Dongjiang River basin[J]. Journal of Hydroecology, 2023, 44(1): 9-15.
- [3] 肖骁,李京忠,杨新军,等.黄河流域中上游林草生态调节服务功能价值核算[J].生态学报,2022,42(19):7830-7844.
Xiao X, Li J Z, Yang X J, et al. Evaluation of forest-grassland ecosystem services value in the upper and middle reaches of the Yellow River Basin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7830-7844.
- [4] 王娇月,祁龙飞,尹岩,等.湿地生态系统服务功能及其价值核算——以福州市为例[J].应用生态学报,2021,32(11):3824-3834.
Wang J Y, Bing L F, Yin Y, et al. Wetland ecosystem service function and its value accounting: a case study of Fuzhou City, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3824-3834.
- [5] 廖雨辰,史雪威,刘俊雁,等.九寨沟国家级自然保护区地震前后生态系统服务价值评估[J].生态学报,2022,42(6):2063-2073.
Liao Y C, Shi X W, Liu J Y, et al. Ecosystem service values assessment before and after earthquake in Jiuzhaigou National Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2063-2073.
- [6] Odum H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [7] 李丽,王心源,骆磊,等.生态系统服务价值评估方法综述[J].生态学杂志,2018,37(4):1233-1245.
Li L, Wang X Y, Luo L, et al. A systematic review on the methods of ecosystem services value assessment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1233-1245.
- [8] 严雨桐,陈花丹,游巍斌,等.基于能值分析的天宝岩泥炭沼泽生态系统服务价值评估[J].生态与农村环境学报,2023,39(3):335-343.
Yan Y T, Chen H D, You W B, et al. Assessment of ecosystem service values of peat swamp in Tianbaoyan national nature reserve by using emergy analysis[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(3): 335-343.
- [9] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189-196.
- [10] 王颖慧,丁建丽,李晓航,等.伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响——基于强度分析模型[J].生态学报,2022,42(8):3106-3118.
Wang Y H, Ding J L, Li X H, et al. Impact of LUCC on ecosystem services values in the Yili River Basin based on an intensity analysis model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3106-3118.
- [11] 杨雪婷,邱孝枰,徐云,等.典型山区生态系统服务对居民福祉影响的空间差异及动态特征——以川西山区为例[J].生态学报,2021,41(19):7555-7567.
Yang X T, Qiu X P, Xu Y, et al. Spatial heterogeneity and dynamic features of the ecosystem services influence on human wellbeing in the West Sichuan Mountain Areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7555-7567.
- [12] 张娜丽.2000-2020年阿尔泰山土地利用与生态系统服务价值的动态变化[J].土壤通报,2022,53(6):1286-1294.
Zhang N L. Dynamic changes of land use and ecosystem services value in Altai Mountains[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6): 1286-1294.
- [13] 曹波,蔡春轶,张勇,等.汉石桥湿地自然保护区土地利用格局及其生态系统服务价值动态[J].湿地科学,2022,20(6):778-784.
Cao B, Cai C Z, Zhang Y, et al. Dynamics of land use patterns

- and ecological service values of Hanshiqiao Wetland nature reserve [J]. *Wetland Science*, 2022, **20**(6): 778-784.
- [14] 王佳恒, 颜蔚, 段学军, 等. 湖泊生态缓冲带识别与生态系统服务价值评估——以滇池为例[J]. *生态学报*, 2023, **43**(3): 1005-1015.
- Wang J H, Yan W, Duan X J, *et al.* Lake ecological buffer zone identification and ecosystem service value evaluation: a case study of Lake Dianchi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(3): 1005-1015.
- [15] 魏佳豪, 温玉玲, 龚志军, 等. 近 30 年鄱阳湖滨岸缓冲带土地利用变化及生态系统服务价值[J]. *生态学报*, 2022, **42**(22): 9261-9273.
- Wei J H, Wen Y L, Gong Z J, *et al.* Land use changes and ecosystem service value in the buffer zone of Poyang Lake in recent 30 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(22): 9261-9273.
- [16] 邓伟, 周渝, 张勇, 等. 重庆市生态保护红线区生态系统服务价值时空演变特征及其驱动[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29**(1): 79-89.
- Deng W, Zhou Y, Zhang Y, *et al.* Spatio-temporal evolution characteristics of ecosystem service value in Chongqing ecological red line area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(1): 79-89.
- [17] 张翔, 陈德超, 范金鼎, 等. 生态系统服务价值变化及其与人类活动关联性研究——以常州市为例[J]. *环境工程技术学报*, 2022, **12**(6): 2124-2131.
- Zhang X, Chen D C, Fan J D, *et al.* Study on the change of ecosystem service value and its correlation with human activities: taking Changzhou City as an example[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, **12**(6): 2124-2131.
- [18] 陈阳, 张建军, 杜国明, 等. 三江平原北部生态系统服务价值的时空演变[J]. *生态学报*, 2015, **35**(18): 6157-6164.
- Chen Y, Zhang J J, Du G M, *et al.* Temporal and spatial changes in ecosystem service values in the northern Sanjiang plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(18): 6157-6164.
- [19] 赵海溶, 莫宏伟. 长株潭城市群生态系统服务价值时空变化分析[J]. *测绘科学*, 2022, **47**(12): 206-215.
- Zhao H R, Mo H W. Spatial-temporal change of ecosystem service value in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, **47**(12): 206-215.
- [20] 李静芝, 王苗, 冯文静, 等. 湘西州地区生态系统服务价值时空特征及驱动分析[J]. *自然资源遥感*, 2022, **34**(3): 207-217.
- Li J Z, Wang M, Feng W J, *et al.* The characteristics and driving factors of spatiotemporal changes in the ecosystem service value in Xiangxi, Hunan, China [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, **34**(3): 207-217.
- [21] 张晓瑶, 张潇, 李冬花, 等. 城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟——以深圳市为例[J]. *生态学报*, 2022, **42**(6): 2086-2097.
- Zhang X Y, Zhang X, Li D H, *et al.* Multi-Scenario simulation of the impact of urban land use change on ecosystem service value in Shenzhen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(6): 2086-2097.
- [22] 周浩浩, 徐清昊. 基于土地利用变化的陕北地区生态系统服务价值分析[J]. *农业与技术*, 2022, **42**(24): 77-81.
- [23] 戚丽萍, 闫丹丹, 李静泰, 等. 江苏省生态系统服务价值对土地利用/土地覆盖变化的动态响应[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, **57**(2): 255-264.
- Qi L P, Yan D D, Li J T, *et al.* Dynamics of ecosystem services value in response to land use/land cover changes in Jiangsu province [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, **57**(2): 255-264.
- [24] 罗仁娟, 陈新, 张林波, 等. 基于土地利用的云南省县域生态系统服务价值时空演变[J]. *安徽农业科学*, 2022, **50**(24): 45-48, 85.
- Luo R J, Chen X, Zhang L B, *et al.* Spatial-temporal evolution of ecosystem service value of counties in Yunnan Province based on land utilization[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, **50**(24): 45-48, 85.
- [25] 杨帅琦, 王金叶, 李何英. 基于生态系统服务价值的漓江流域生态补偿额度测算[J/OL]. *水生态学杂志*, 2022. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202207030247>, 2022-11-24.
- Yang S Q, Wang J Y, Li H Y. Calculation of ecological compensation amount in Lijiang River basin based on ecosystem service value[J/OL]. *Journal of Hydroecology*, 2022. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202207030247>, 2022-11-24.
- [26] 李坦, 陈天宇, 惠宝航. 基于 Meta 分析的黄山市森林生态系统服务价值研究[J]. *地理科学*, 2022, **42**(12): 2179-2188.
- Li T, Chen T Y, Hui B H. Economic value of forest ecosystem services in Huangshan city based on meta-analysis[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, **42**(12): 2179-2188.
- [27] 马伟波, 杨帆, 王楠, 等. 长三角城市群地区生态系统服务价值时空演变及驱动因素研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, **38**(11): 1365-1376.
- Ma W B, Yang F, Wang N, *et al.* Study on spatial-temporal evolution and driving factors of ecosystem service value in the Yangtze River Delta urban agglomerations [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, **38**(11): 1365-1376.
- [28] 李晓赛, 朱永明, 赵丽, 等. 基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, **23**(3): 373-381.
- Li X S, Zhu Y M, Zhao L, *et al.* Ecosystem services value change in Qinglong County from dynamically adjusted value coefficients [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, **23**(3): 373-381.
- [29] 徐子蒙, 李广泳, 周旭, 等. 基于地理国情普查成果的生态系统服务价值核算方法[J]. *测绘学报*, 2018, **47**(10): 1396-1405.
- Xu Z M, Li G Y, Zhou X, *et al.* The evaluation method for ecosystem service value based on national census geography results [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, **47**(10): 1396-1405.
- [30] 智烈慧, 李心, 马田田, 等. 辽河三角洲土地利用变化轨迹、驱动过程及生态系统服务时空演变[J]. *环境科学学报*, 2022, **42**(1): 141-150.
- Zhi L H, Li X, Ma T T, *et al.* The spatiotemporal evolution of land use trajectories, drivers and the ecosystem services in Liao River Delta in the past four decades[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(1): 141-150.
- [31] 孙湘儒, 陈佳勃, 王艳杰. 近 40 年辽河保护区湿地生态环境演变过程及驱动因子分析[J]. *人民珠江*, 2021, **42**(7): 61-67, 101.
- Sun X R, Chen J B, Wang Y J. Analysis of evolution of the wetland ecosystem of the Liaohe River nature reserve over the Past 40 Years and its driving factors[J]. *Pearl River*, 2021, **42**(7): 61-67, 101.
- [32] 尹小岚, 侯英姿, 王方雄. 基于 GIS 的辽河三角洲土地利用动态变化研究[J]. *国土与自然资源研究*, 2019, (2): 63-65.
- Yin X L, Hou Y Z, Wang F X. Dynamic change of land use in Liaohe Delta based on GIS [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2019, (2): 63-65.
- [33] 王蕊. 辽河三角洲地区土地利用及生态服务价值变化研究

- [J]. 环境保护科学, 2017, **43**(1): 114-118.
- Wang R. Land use pattern and ecological service changes in Liaohhe Delta [J]. Environmental Protection Science, 2017, **43**(1): 114-118.
- [34] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用遥感监测数据集[EB/OL]. 资源环境科学数据注册与出版系统, <https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIid=54>, 2022-08-10.
- [35] Chen J D, Gao M, Cheng S L, *et al.* Global 1 km $\times$ 1 km gridded revised real gross domestic product and electricity consumption during 1992-2019 based on calibrated nighttime light data [J]. Scientific Data, 2022, **9**, doi: 10.1038/s41597-022-01322-5.
- [36] 陈睿, 杨灿, 杨艳, 等. 洞庭湖生态经济区生态系统服务价值的时空演绎及其驱动因素[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(1): 169-179.
- Chen R, Yang C, Yang Y, *et al.* Spatial-temporal evolution and drivers of ecosystem service value in the Dongting Lake Eco-economic Zone, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(1): 169-179.
- [37] 王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 等. 基于RS与GIS的沙坡头区生态系统服务价值研究[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(4): 250-256.
- Wang P, Wang Y J, Liu X P, *et al.* Study on ecosystem service value in the Shapotou district based on RS and GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(4): 250-256.
- [38] 刘倩, 李葛, 张超, 等. 基于系数修正的青龙县生态系统服务价值动态变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2019, **27**(6): 971-980.
- Liu Q, Li G, Zhang C, *et al.* Study on dynamic changes in ecosystem service values in Qinglong county based on coefficient correction [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, **27**(6): 971-980.
- [39] 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.
- [40] 吕明权, 王延平, 王继军. 吴起县土地利用变化及其生态服务价值研究[J]. 水土保持研究, 2010, **17**(1): 144-148, 153.
- Lv M Q, Wang Y P, Wang J J. Impacts of land use changes on ecosystem services value in Wuqi County [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, **17**(1): 144-148, 153.
- [41] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970-2015年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J]. 地理学报, 2019, **74**(9): 1904-1920.
- Huang M Y, Yue W Z, Fang B, *et al.* Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain area, central China from 1970 to 2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(9): 1904-1920.
- [42] 舒波, 李雨哲, 王玲, 等. 乐山市土地利用与生态系统服务价值时空动态变化分析[J]. 生态科学, 2022, **41**(1): 159-168.
- Shu B, Li Y Z, Wang L, *et al.* Spatial and temporal dynamic changes of land use and ecosystem service value in Leshan City [J]. Ecological Science, 2022, **41**(1): 159-168.
- [43] 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.
- [44] 李理, 赵芳, 朱连奇, 等. 淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测[J]. 生态学报, 2021, **41**(19): 7568-7578.
- Li L, Zhao F, Zhu L Q, *et al.* Geographical detection of ecosystem services trade-offs and their spatial variation mechanism in Qihe River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(19): 7568-7578.
- [45] 方林, 蔡俊, 刘艳晓, 等. 长三角地区生态系统服务价值动态演化及驱动力分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, **38**(5): 556-565.
- Fang L, Cai J, Liu Y X, *et al.* Dynamic evolution of ecosystem service value in Yangtze River Delta and analysis on the driving factors [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, **38**(5): 556-565.
- [46] 张泽, 丘海红, 胡宝清. 基于地理探测器的空间格局与自然因子关系研究——以桂西南喀斯特—北部湾海岸带为例[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2021, **44**(2): 39-47.
- Zhang Z, Qiu H H, Hu B Q. Study on the relationship between spatial population pattern and natural factors based on geodetector: a case study of Karst-Beibu gulf coastal zone in Southwest Guangxi [J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2021, **44**(2): 39-47.
- [47] 王波, 杨太保. 1980-2018年银川市生态系统服务价值评价及驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2021, **44**(2): 552-564.
- Wang B, Yang T B. Value evaluation and driving force analysis of ecosystem services in Yinchuan City from 1980 to 2018 [J]. Arid Land Geography, 2021, **44**(2): 552-564.

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)