

黄河三角洲城市景观生态风险测度及影响因素

李建春, 周晓雨, 李慧琳, 王玉婷, 袁文华

(山东师范大学商学院, 济南 250358)

摘要: [目的]黄河三角洲作为典型生态脆弱区,其景观生态风险受多重因素影响,表现尤为突出。系统认知景观风险不仅是优化景观格局的基础,更是有效应对生态风险的关键。[方法]以黄河三角洲典型城市东营市为研究区,构建生态系统服务价值和“胁迫度-脆弱度-韧性”的景观生态受损概率评估框架。采用ESDA和地理探测器模型,从网格尺度探究城市景观生态风险的空间异质性及影响因素。[结果]1)东营市景观生态风险平均值为0.15,呈北部东部高、中偏西南低的空间格局。生态系统服务价值约为3 175.99亿元,低于当年GDP,经济发展表现为不可持续增长,呈由北部、东部沿海向西南部逐步递减的空间格局。生态受损概率为0.43,呈北部东部高低交错、中偏西南较为均衡的空间格局。2)景观生态风险呈显著的空间集聚特征,全局Moran's I 指数为0.747。高高风险区主要集中在东营市北部和东部沿海,占风险区面积的32.48%。3)东营市景观生态风险主要受社会经济基础和环境区位条件影响。在全市范围内,海岸线距离是主导因素,决定度为0.43;在城镇区域,人口密度为主导因素,决定度为0.38。[结论]研究不仅在理论上丰富景观生态风险评估方法,也为黄河三角洲生态保护和风险管理提供实证支持。

关键词: 城市景观生态风险; 黄河三角洲; 异质性评估; 影响因素

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0000-00

Study on Urban Landscape Ecological Risk Measurement and the Influencing Factors in the Yellow River Delta

LI Jianchun, ZHOU Xiaoyu, LI Huilin, WANG Yuting, YUAN Wenhua

(Business School, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: [Objective] The Yellow River Delta, a typical ecological fragile area, faces prominent landscape ecological risk (LER) due to multiple factors. Systematic understanding of landscape risk is crucial for optimizing landscape patterns and effectively addressing ecological challenges. [Methods] Taking Dongying, a typical city of the Yellow River Delta, as the study area to construct an assessment framework, which consists of two parts, one containing the ecosystem service value and the other the probability of landscape ecological damage in terms of 'stress-vulnerability-resilience'. The ESDA and Geographic detector were used to explore the spatial heterogeneity and influencing factors of LER at the grid scale. [Results] 1) The average value of LER in Dongying was 0.15, generally showed a spatial pattern of high in the north and east, and low in the middle and southwest. The total value of ecosystem services was about 3 175.99 billion yuan, Which was lower than the GDP of that year, and, the economic growth was unsustainable. The ecosystem service value showed a pattern of gradual diminution from the north and eastern coast to the southwest part. The probability of ecological damage was 0.43, showing a pattern of staggered distribution of high and low in the north and east, relatively balanced in the center and southwest. 2) The LER showed a significant clustering in spatial distribution, with a global Morans I index of 0.747. In terms of agglomeration zoning, the HH risk agglomeration area accounted for 32.48% of the area of the risk zone, which was mainly distributed in the

continuous distribution zone formed by the coastal zone in the north and east of Dongying. 3) The LER of Dongying was mainly dominated by factors of socio-economic foundation and environmental location conditions. In the citywide area, the determinant degree of coastline distance was 0.43, which was the primary factor dominating the urban LER. In contrast, in the urban area, the determinant degree of population density was 0.38, which was the primary factor influencing the urban LER. [Conclusions] This study enriches the LER assessment method theoretically, and provides an empirical support for ecological protection and risk management in the Yellow River Delta.

Keywords: urban landscape ecological risk; Yellow River Delta; heterogeneity assessment; influencing factor

Received: 2024-07-25

Revised: 2024-09-21

Accepted: 2024-10-11

Online(www.cnki.net):

城镇化和工业化的快速推进在改变城市面貌和改善人民生活的同时,也加剧景观生态风险,导致部分区域生态退化、生物多样性降低、景观功能损害及自然灾害风险增加等^[1]。为应对以上挑战,我国相继出台并实施一系列政策和区域行动计划,旨在缓解景观生态风险并促进区域可持续发展。2021年10月,国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,旨在协调黄河流域典型生态脆弱区的生态保护和经济发展。2024年7月,第二十届中央委员会第三次全体会议进一步指出,“中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化”,强调要完善生态文明基础体制,健全生态环境治理体系。在此背景下,深入研究城市景观生态风险对优化城市布局并提升生态韧性具有重要意义。尤其随着黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的实施推进,深入认知黄河流域关键区域景观生态风险及其空间异质性,不仅能够完善景观生态学理论,也可为黄河流域的生态保护和高质量发展提供关键科学依据与决策支持。

景观生态风险(landscape ecological risk, LER)指人类活动或自然因素干扰对生态环境与景观格局交互作用造成的负面影响^[2]。从景观生态风险的评估指标和方法来看,主要包括2类:1)基于风险源强度的景观生态服务“源-汇”理论^[3]下的景观生态损失机制和生态风险时空分布指标和方法。例如,许学工等^[4]以黄河三角洲为研究区,将洪涝、干旱、油田污染和断流等作为风险源,将碱蓬滩涂、芦苇沼泽、旱作农田和居民点等8种生态系统作为风险受体,结合暴露与危害分析,综合评价区域生态风险值的大小;虞燕娜等^[5]以江苏省射阳县为例,提出基于多源风险的生态表征方法,该方法考虑风险的发生概率、风险受体的地域及其暴露于风险环境下可能遭受的损失;WU等^[6]基于“源-汇”景观理论和生态风险评估理论,以2000—2017年平朔煤矿区为研究区进行定量评价与诊断。2)基于景观格局的景观生态学指数的评价指标和分析方法^[7]。KAPUSTKA等^[8]基于景观生态

学理论,将景观格局分析方法引入评估人类活动对流域生态变化的影响;也有LANDIS等^[9]利用RRM模型对土地利用生态系统进行评价;国内马胜等^[10]选取破碎度、斑块数量等景观格局指数计算景观风险尺度并进行叠加分析;在此基础上,袁玉等^[11]还探究景观格局功能与区域生态安全、景观生态学与生态风险及计量地理学的交叉融合内容。已有研究虽已取得一定进展,但仍存在评估框架综合性不足、评价指标优化不够等问题。因此,构建全面且可操作的城市景观生态风险评估框架,有助于精确解析城市景观生态风险的内在机制,为管理者规划城市景观生态的未来布局提供科学依据。

三角洲地区受复杂交错的生态环境和多物种交汇的影响,通常呈现显著的生态风险和脆弱性,引起国内外学者的广泛关注。例如,HAGENLOCHER等^[12]提出基于模块化指标库的方法,评估全球沿海三角洲面临的多种风险,并提出相应的风险降低策略;ANDERSON等^[13]在密西西比河三角洲应用全球三角洲风险指数(GDRI),对景观生态灾害和暴露数据进行系统的评估整合。黄河三角洲作为世界六大河口三角洲之一,同样具有复杂性与脆弱性的特征。流域内因多物种交汇、多人口聚集、多种生态环境的交错,导致不同物质、能量、结构和功能体系交汇形成的“过渡带”极易受到干扰^[14]。近年来,关于黄河三角洲的景观生态风险研究主要集中在3个方面:1)景观格局与生态风险研究。梁加乐等^[15]对黄河流域的景观格局进行广泛的量化分析,关注景观破碎度、斑块数量等指标对生态风险的影响,部分研究者着重分析景观破碎化对生态系统服务功能的负面影响;2)生态系统恢复与重建。生态恢复旨在恢复生态系统的结构、功能和过程,使其重新具备自我维持的能力。黄河流域湿地恢复是生态系统重建的重要内容,通过恢复湿地植被、重建湿地水文条件,可显著提高湿地生态功能^[16];3)综合风险评估。刘希朝等^[17]采用多指标综合评价法、系统动力学模型和生态风险

评估模型,对黄河流域自然灾害、环境污染、生态退化等多种风险进行综合分析,揭示该流域风险的复杂性和动态变化特征,为流域管理提供系统性解决方案。

尽管已有研究为黄河流域的景观生态风险提供丰富的见解,但现有文献仍存在一些不足:1)相关研究集中在宏观尺度,缺乏对中观尺度或局部区域的精细化分析,尤其是对典型城市的研究较少;2)评估方法和指标多为传统生态建模,缺乏统一标准,难以横向比较,并且未充分考虑多种风险源的交互效应,影响评估的准确性;3)研究对景观生态风险的时空异质性关注不足,限制对风险动态变化的理解与预测。本文以黄河三角洲的东营市为研究区,从中观尺度出发,在网格层面对景观生态风险进行定量评估。通过构建景观生态风险评估的框架、原则和指标体系,采用高精度遥感影像数据,对景观生态服务价值和景观生态受损概率进行测算,形成完整的技术框架和参数体系。结合空间探索性统计方法和地理探测器模型,分析引发景观生态风险的影响因子,旨在优化景观生态风险评估框架,提升对城市景观生态风险的理解,从而为城市景观生态风险的管控和生态文明建设提供理论依据。

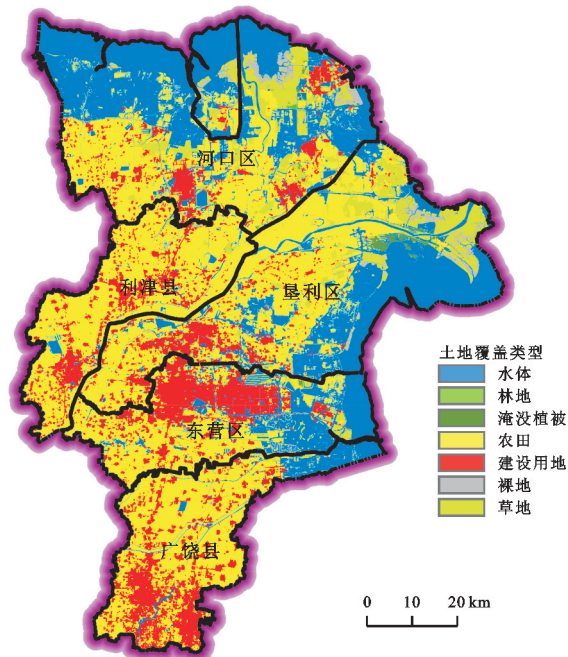
1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲位于山东省东部沿海(118°33′~119°20′E, 37°35′~38°12′N,图 1),介于渤海湾和莱州湾之间,以垦利区宁海为顶点,北起套尔河口,南至淄脉河口,呈扇形地貌。黄河三角洲地势平坦,总面积达 5 450 km²,其中,约有 95%位于东营市境内。作为黄河流域唯一的河海交汇地带,以其丰富的自然资源和独特的生态系统,赋予东营市推动黄河三角洲生态保护与高质量发展的双重使命和巨大潜力。研究区属暖温带半湿润大陆季风气候,冬寒夏热,四季分明,湿地资源广袤,约占山东省总面积的 41.58%,生物多样性较为丰富。截至 2022 年,全市总人口数达 220.9 万人,GDP 为 3 620.7 亿元。作为一座典型的资源型城市,全市累计已探明的石油地质储量高达 57.36 亿 t。然而,该区域由于成陆时间短,土地盐碱化,地下水位高及矿化度严重,加之频繁的生态灾害,构成当地敏感与脆弱的生态基础。人类在资源开发中对石油资源的过度依赖,导致产业结构的单一化,进一步加剧生态压力。此外,黄河断流现象的频发也对该地的生态平衡构成额外威胁。综上所述,东营市正面临着严峻的景观生态风险挑战,深入探究城市景观生态风险的空间机理及其对人类活动的深远影响,对推动该区域的可持续发展转型至关重要。

1.2 数据来源

城市景观生态风险的测度需要综合考虑多重因素的综合作用,既包括资源环境方面相关数据,也包括社会经济数据,数据类型较为丰富。从评价因子选择构成看,研究采用的土地利用地表覆盖数据来源于 ESRI Sentinel-210 m Land Use 数据库(<https://livingatlas.arcgis.com/landcover>),该数据空间分辨率与地类解释精度较高;植被净初级生产力(NPP)数据、NDVI 数据来源于地球资源数据云平台(<http://www.gis5.g.com>);夜间灯光数据源于 Harvard Dataverse 平台(<https://doi.org/10.7910/DVN/YGIVCD>)。从城市景观生态受损概率选取的指标来看,道路数据主要源于 OSM 数据库(<https://www.Openstreetmap.org>);人口密度栅格、国内生产总值栅格、高程数据、平均气温和降水量空间分布等数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。景观生态风险探测因子的选取主要来源于《东营市统计年鉴》^[18]及政府部门发布相关资料,空间方面的数据参考高德地图、城市规划等资料进行综合完善,将非空间数据关联到相应的统计尺度,并统一坐标系统为 CGCS 2000_3_Degree_GK_Zone_39。通过空间配准的方式,将规划图件整合到空间数据库中。



注:该图基于全国地理信息资源目录服务系统网站下载的审图号为 GS(2016)2556 号的标准地图制作,底图无修改。下同。

图 1 研究区位置

Fig.1 Location map of the study area

1.3 研究框架

景观生态风险评估能够量化干扰源对区域生态系统造成的不利影响,解决传统景观生态风险评价中,评价指标综合性较弱、多源胁迫下风险时空分异

性表征困难等问题。通过构建景观生态风险分析框架,对城市景观生态风险时空变化及影响因素进行研究。首先,对景观生态服务价值和景观生态受损概率进行评估,构建城市景观生态风险评估框架;其次,采用空间探索性统计方法剖析景观生态风险的空间相

关性特征,并基于地理探测器模型,诊断引起景观生态风险的经济、区位和规划因素;最后,针对景观生态风险的空间分布与影响因素,从宏观、中观和微观视角,提出系统性的政策建议,为城市景观生态风险的防控和管理提供科学依据和理论参考(图 2)。

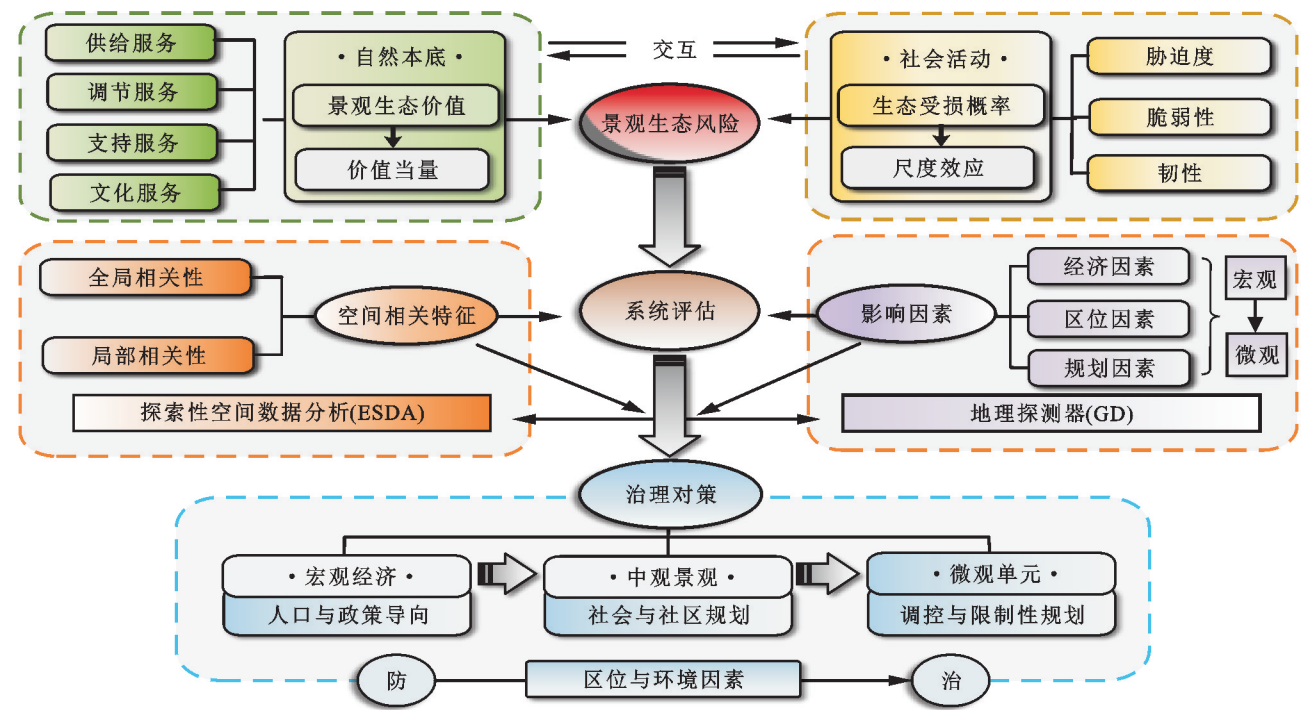


图 2 城市景观生态风险评估治理研究思路

Fig.2 Research ideas of urban LER assessment and management

1.4 景观生态风险评估方法

1.4.1 景观生态服务价值 景观生态服务价值可通过景观生态系统的服务价值来综合确定。依据联合国千年生态系统评估框架^[19],生态系统服务被划分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务 4 个主要类别经进一步细化,供给服务、调节服务、支持服务和文化服务被分为 11 种具体的生态功能,涵盖食物生产、原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、土

壤保持、维持养分循环、生物多样性和美学景观。基于中国自然生态系统服务价值当量标准^[20],系统对标地表覆盖类型,确定综合当量因子^[21]并依据黄河三角洲区域特定景观要素的生态服务价值基准数据进行综合修正。粮食单产水平拟定为研究区 2021 年的年平均值 5 369 kg/km²,粮食价格拟定为 2022 年小麦最低收购价格 2.77 元/kg,综合计算景观生态服务价值量(表 1)。

表 1 城市景观生态服务价值

Table 1 Scale of urban landscape ecological service value in the Yellow River Delta								万元/km ²
一级类型	二级类型	水体	林地	淹没植被	农田	建设用地	裸地	草地
供给服务	食物生产	1.190	0.376	0.758	1.643	0	0	0.565
	原料生产	0.342	0.863	0.744	0.364	0	0	0.833
	水资源供给	12.329	0.446	3.852	—1.941	0	0	0.461
调节服务	气体调节	1.145	2.837	2.826	1.324	0	0.030	2.930
	气候调节	3.406	8.488	5.354	0.692	0	0	7.748
	净化环境	8.254	2.487	5.354	0.201	0	0.149	2.558
	水文调节	152.051	5.555	36.035	2.223	0	0.045	5.681
支持服务	土壤保持	1.383	3.454	3.435	0.773	0	0.030	3.569
	维持养分循环	0.104	0.264	0.268	0.231	0	0	0.268
	生物多样性	3.792	3.145	11.704	0.253	0	0.030	3.242
文化服务	美学景观	2.811	1.379	7.034	0.112	0	0.015	1.428
总价值		186.807	29.294	77.364	8.217	0	0.299	29.283

景观生态服务价值由单位面积景观生态服务价值与相应面积的乘积得出,具体计算公式为:

Value=∑_{n=1}^j(f_{n,m}×K_m) (1)

式中:Value 为生态系统服务价值,万元;f_{n,m} 为第 m 种生态类型提供的第 n 项生态服务的单位面积价值,万元/km²;K_m 为第 m 种生态类型的总面积,km²。在研究区域内,共有 j 种不同的土地利用覆被类型。

1.4.2 景观生态受损概率 景观生态受损概率是通过综合分析风险源在环境中的分布、风险源与受体间的潜在或实际接触程度及其模式,以及受体对风险源胁迫的响应能力和恢复程度,评估景观系统面临生态灾害可能性的结果。本文从“胁迫度-脆弱度-韧性”3 个维度建立景观生态受损概率评价指标体系,共选取 11 个关键景观生态参数以量化城市景观生态受损的可能性。其中,胁迫度主要聚焦于景观网格的内在特性及经济活动的干扰程度,考虑农业生产、城市生活、

工业聚集度和交通道路的影响。脆弱度主要考虑植被覆盖度、景观丰富度、景观形状指数、生境退化程度等因素。韧性反映景观动态过程中维持或恢复稳定状态的能力。考虑到外界干扰和生态系统演替的双重影响,选取夜间灯光强度变化、植被净初级生产力(NPP)变化和空气质量变化趋势指标评估韧性(表 2)。

参考前人^[22]相关研究,采用德尔菲法确定各指标权重。通过实地访谈、专家经验总结和对已有资源的系统搜集,采用极值归一化对各项指标(N_n)的权重(W_n)赋值。按照“胁迫度-脆弱度-韧性”3 个特征属性,划分胁迫度风险值(R_p)、脆弱度风险值(R_c)和韧性风险值(R_r)。通过指标叠加得出 3 类风险总值(R_n)(公式 2),进一步加权求和得到景观生态受损概率(公式 3)。

R_n=∑_{n=1}^j(W_n×N_n) (2)

Prob=W_p×R_p+W_c×R_c+W_r×R_r (3)

式中:R_n 为 3 类风险总值;W_n 为相应权重;N_n 为归一化风险指标;Prob 为景观生态受损概率。

表 2 景观生态受损概率评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of the landscape ecological damage probability

维度	指标	内涵	性质	指标权重
胁迫度 R _p (0.40)	农业生产	网格单元内耕地所占比例	正向	0.313
	城市生活	网格单元内建设用地所占比例	正向	0.278
	工业企业聚集度	利用工业企业点计算核密度,分析经济社会发展情况	正向	0.107
	交通设施影响	测度至主要道路的欧式距离	反向	0.302
脆弱度 R _c (0.35)	植被覆盖度	网格单元内植被覆盖比例	反向	0.305
	景观丰富度	利用 Fragstat 测算网格单元内景观类型多样化程度(SHDI)	反向	0.204
	景观形状指数	利用 Fragstat 测算网格单元内景观格局中的斑块形状指数(LSI)	反向	0.164
	生境退化程度	利用 InVest 模型生境质量模块计算网格内景观类型的相对生境退化水平(deg_sum)	正向	0.327
韧性 R _r (0.25)	植被净初级生产力变化	根据近 10 年生态系统的抗干扰恢复能力变化趋势,测算植被净初级生产力(NPP)变化率	反向	0.411
	夜间灯光强度变化	根据近 10 年社会经济发展对生态系统的干扰趋势,测算校正后夜间灯光亮度变化率	正向	0.307
	空气污染程度变化	根据近 10 年空气中 PM2.5(CHAP)数据变化,测算 PM2.5 浓度变化率	正向	0.282

1.4.3 景观生态风险 景观生态风险是对景观生态服务价值和景观生态系统受损概率的全面综合评价。结合曹祺文等^[23]的研究,景观生态风险可用景观生态服务价值与景观生态受损概率的乘积计算,具体计算公式为:

Risk=normalize(Value)×normalize(Prob) (4)

式中:Risk 为景观生态风险;normalize 为归一化函数,用以消除二者间因量纲不同产生的影响;Value 为景观生态服务价值;Prob 为景观生态受损概率。

1.5 探索性空间数据分析

探索性空间数据分析(exploring spatial data analysis, ESDA)是用于揭示数据间空间关系和模式的空间分析方法^[24]。选取全局空间自相关指数 Moran's I,反映城市景观生态风险的空间相关性,定量测度研究区内景观生态风险的空间集聚趋势,计

算公式为:

I= (n∑_{i=1}ⁿ∑_{j=1}ⁿW_{ij}(x_i-x̄)(x_j-x̄)) / (∑_{i=1}ⁿ∑_{j=1}ⁿW_{ij}∑_{i=1}ⁿ(x_j-x̄)²) (5)

式中:n 为区域总数;x_i和 x_j分别为未知空间 i 和 j 的观测值;x̄ 为所有区域的平均值;W_{ij}为空间权重矩阵。全局 Moran's I 指数的取值为[-1,1]。

通常采用 Z 检验标准化 Moran's I 值是否具有自相关性,当 Z 值为正且显著时,表明存在正空间自相关;当 Z 值为负且显著时,表明存在负空间自相关;当 Z 值为 0 时,表明观测值成独立随机分布。

Z(I)= (I-Q(I)) / √VAR(I) (6)

式中:Z(I)为 Moran's I 显著水平;Q(I)为指数平均值;VAR(I)为 Moran's I 方差。

1.6 地理探测器

城市景观生态风险受多重因素影响,呈复杂的非线性特点。由于传统回归模型难以准确描绘各因素的复杂关联,采用地理探测器定量分析城市景观生态风险的影响因素。在模型数据处理中,对不同影响因素采用自然间断点分级法、分位数分类法、几何间隔法、标准差法进行离散化处理,将最优 q 对应的 p 值确定为因子最佳探测值。地理探测器模型公式为:

$$P_{D,U}=1-\frac{1}{n\sigma_U^2}\sum_{i=1}^m n_{D,i}\sigma_{UD,i}^2 \tag{7}$$

式中: $P_{D,U}$ 为影响因子 D 对城市景观生态风险空间分异的解释程度,取值为 $[0,1]$; n 为单元个数, $n_{D,i}$ $\sigma_{UD,i}^2$ 分别为 $i(i=1,2,\cdots,m)$ 的层样本量和方差; σ_U^2 为城市景观生态风险规模或强度的方差。 $P_{D,U}$ 值越大,说明 D 因素对研究区景观生态风险的规模或强度变化的影响越大。

本研究在梳理已有研究^[25]基础上,主要从 3 方面筛选研究区景观生态风险影响因子:1)社会经济基础。作为城市发展的核心驱动力,社会经济变化不仅能引发产业结构转移,还对生态系统产生深远影响。2)环境区位条件。优越的地理位置不仅能够丰富城市功能,也能为景观生态系统的多样性提供有力支撑。3)规划建设水平。适宜的城市规划设计对促进社会经济与景观生态的协调发展具有关键作用。综合以上 3 个维度,最终筛选出 14 个关键影响因子,构成影响因子探测指标体系(表 3)。

表 3 影响因子探测指标体系

Table 3 Index system for detecting the influencing factors					
类别	编号	影响因子	类别	编号	影响因子
社会经济基础	X_{11}	经济发展水平	环境区位条件	X_{21}	商贸中心可达性
	X_{12}	人口密度		X_{22}	办公场所可达性
	X_{13}	土地城镇化率		X_{23}	公共服务可达性
	X_{14}	产业结构		X_{24}	主要河流距离
规划建设水平	X_{31}	城市建设强度		X_{25}	海岸线距离
	X_{32}	基准地价水平		X_{26}	年均降水量
	X_{33}	城市功能分区		X_{27}	地形起伏度

2 结果与分析

2.1 东营市景观生态风险评估结果

2.1.1 城市景观生态系统服务价值特征 采用直径为 3 km 的六边形网格作为基本单元,利用 2021 年 ESRI Sentinel-2 土地利用覆被数据,统计不同土地利用覆被类型的面积。通过城市景观生态服务价值量表,计算景观生态服务价值。由图 3 可知,东营市 2021 年生态系统服务价值为 3 175.99 亿元,约为当年 GDP 的 93%。在整体上,生态系统服务价值低于当前 GDP 总量,经济发展表现出一定的不可持续性。

从生态系统服务的结构上看,供给、调节、支持、文化 4 种不同类型的生态服务价值比值为 1.00 : 11.29 : 1.15 : 0.44。生态系统服务价值中,调节服务占主导,表明黄河三角洲的景观生态系统在维持环境稳定性和平衡方面发挥着至关重要的作用。从空间分布上看,黄河三角洲东营市景观生态系统服务价值呈由北部和东部沿海向西南内陆逐步递减的格局。高值区聚集于河口区、利津县北部和东营区、垦利区东部,主要由水域、湿地和林地组成;低值聚区位于中部偏西南的广饶县、利津县等地,主要由耕地和建设用地组成。由于植被覆盖度较低,该区域的景观生态系统服务价值较低,不利于生态系统的稳定发展。从供给服务价值来看,主要呈由西南内陆向东北沿海逐步递减的空间格局。西南部地区作为城市建成区,对能源供给、建材和食物生产需求旺盛,沿海地区主要为滨海湿地,供给服务发挥空间不足。东营市景观生态系统的调节、支持和文化服务价值在空间分布上存在相似性,均呈北部东部高、中偏西南低的空间格局。从生态调节服务价值来看,西部、南部的内陆区县湿地生态系统敏感脆弱,发育成熟度低,生态调节功能较弱。北部、东部区域靠近渤海,受海洋环境影响,具有独特的滨海湿地特征,生态系统类型多样,生态调节能力较强。从支持服务价值来看,高值区主要分布在利津县、河口区北部和垦利区、东营区东部的近海区域,该地属于黄河三角洲国家级自然保护区,湿地面积大,土壤氮质量分数高,有机质丰富,极适宜鸟类聚集。中部及西南部沿黄地区由于黄河下游水沙减少,湿地淡水资源短缺,土壤盐碱化加速,造成自然生态系统破碎,生物多样性减少,支持服务功能较低。从文化服务价值来看,高值区位于利津县和河口区北部、垦利区东部和东营区东部。利津县北部和垦利区东部作为黄河入海口,文化内涵丰富,区域内生态景观带、文化展示区、水利观光区建设完备。东营区作为中国重要的石油生产基地,肩负国家能源战略重任,为彰显当代石油精神,该区着力建设众多生产科普和研学基地,使其生态系统文化服务价值显著提升。

2.1.2 城市景观生态受损概率特征 通过综合多因子,构建基于“胁迫度-脆弱度-韧性”的景观生态受损概率评价指标体系,通过栅格叠加分析,计算东营市城市景观生态受损概率。由图 4 可知,东营市景观生态受损概率平均值为 0.43,标准差为 0.04,景观受到的威胁程度较高。从构成因素来看,胁迫度、脆弱度、韧性的平均值分别为 0.41、0.42、0.46,构成因素差距较小,区域的环境韧性风险相对较高,表明东营市在调控外部生态受损时的恢复力较差,采用先污染后治理的发

展模式,将造成生态不可持续。东营市景观生态受损概率在空间上呈明显的差异化特点,展现出北部东部高低交错、中偏西南较为均衡的空间格局。北部和东

部地区存在高低风险区域交错分布的复杂情况,高值区主要分布在河口区中部、东部地区及东营区北部、垦利区东部沿海和广饶县。

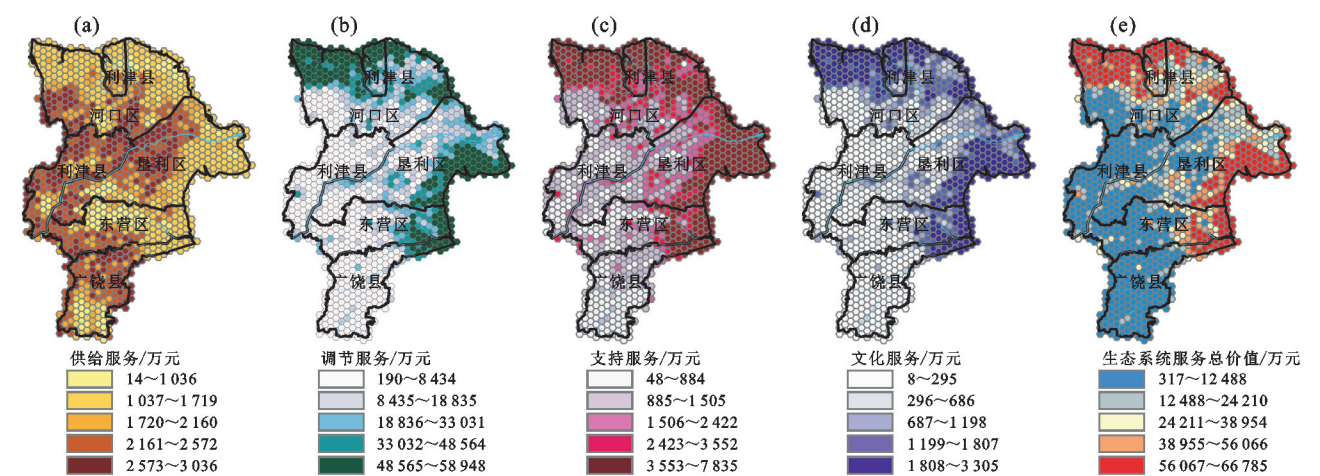


图 3 黄河三角洲东营市景观生态服务价值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of landscape ecological service value in Dongying City, Yellow River Delta

东营市地处渔业养殖区及石油资源开采区,人地矛盾突出,景观生态受损概率最严重区域达 0.61;低值区位于垦利区东北部、河口区北部、东营区东部及西南地区,景观生态受损概率最低为0.23。从胁迫强度看,东营市人为胁迫强度呈中偏西南高、北部东部低的空间格局。高值胁迫度地区主要分布在广饶县、东营区西部等西南部建成区,该区域开发建设程度高,人类活动频繁,胁迫度最高为 0.68;低值胁迫度地区主要分布在利津县、河口区北部和垦利区、东营区东部,此地区工业企业核密度低,受人为胁迫影响较小,胁迫度最低为 0.23。从脆弱程度来看,东营市生态脆弱程度整体呈北部东部高、中偏西南低的空间格局。生态脆弱程度高的区域主要集中在河口区、利津县靠近海洋区域和垦利区、东营区东部等沿海区域,

该海域因油气资源开发、渔业养殖造成生境退化严重、生态系统破碎化程度高,脆弱度最高为 0.78;生态脆弱程度低的区域分布在广饶县、利津县等内陆地区,受资源开发影响较小,脆弱度最低为 0.18。从生态韧性来看,东营市生态韧性程度呈由北部和东部沿海向西南部内陆地区逐步递减的空间特征。高韧性地区主要集聚在利津县、河口区北部、垦利区东南部和东营区东部等近海区域,生态韧性最高为 0.81。中部偏北的沿黄流域也呈零散分布的高生态韧性空间,主要是退耕还草和生态保护政策的实施,使部分流域生态环境得到改善,生态韧性增强;低韧性区域主要集中在中部偏西南地区,韧性最低为 0.09,主要是由于城镇建筑用地的扩张和人类活动扰动,使生态系统长期处于低生态韧性水平。

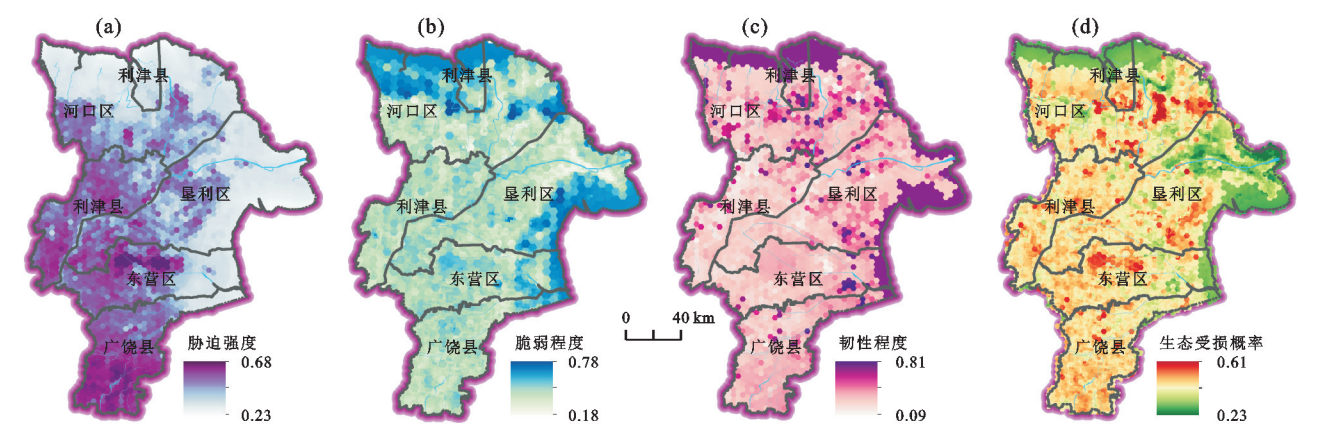


图 4 黄河三角洲东营市景观生态受损概率及风险准则层指标空间分布

Fig.4 Spatial distribution of landscape ecological damage probability and risk criterion layer in Dongying City, Yellow River Delta

2.1.3 城市景观生态风险综合评价 综合黄河三角洲东营地区景观生态服务价值、景观生态受损概率的测算结果,利用公式(4)在 3 km 网格尺度上归一化

计算研究区景观生态风险指数(图 5a)。东营市景观生态风险指数的平均值为 0.15,标准差为 0.14,表现出明显的由低到高的长尾分布特征,低于平均值的单

元占据主体,景观生态风险主要集中发生在一些关键单元。从空间分布上来看,东营市景观生态风险值呈北部东部高、中偏西南低的空间格局。景观生态风险高与较高的区域主要集聚在三角洲前缘和海岸线靠近内陆 3~5 km 区域。该区域处于黄河-渤海交汇区域,生态系统具有复杂性。一方面,黄河流域固有的水沙失衡和人类活动高强度的干预,加剧区域内的水土流失,压缩盐沼与自然湿地的生存空间,使生态系统极易陷入退化状态;另一方面,由于对渤海海域的陆海统筹不足,大量的围垦、养殖、水利设施建设等活动,显著改变当地的水文特征,对该地的景观生态系统施加空前压力,破坏生态平衡与生物多样性;景观生态风险值较低区域主要分布在广饶县、利津县等靠近内陆的地区,此区域受自然灾害影响较小,景观生态风险较低。

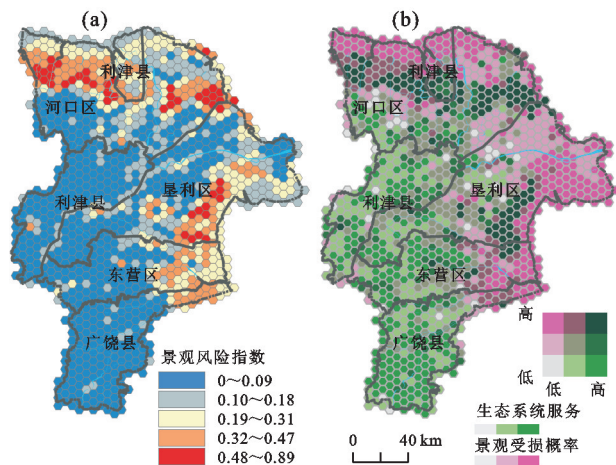


图 5 黄河三角洲东营市景观生态风险值及分区

Fig.5 LER value and zoning map of Dongying City, Yellow River Delta

在景观生态服务价值评估和景观生态受损概率分析的基础上,进一步诊断东营市景观生态风险的强度分区,根据等分位法,将景观生态服务和景观生态受损概率分为低、中、高 3 个等级,通过乘积形成 9 种类型(图 5b)。景观生态风险分区在空间上呈由东北部沿海向西南部内陆逐步递减的整体格局。生态系统服务价值和景观生态受损概率双低区域主要分布在垦利区和东营区西部、河口区南部,呈散乱空间分布形态,约占总面积的 2.64%,此区域的经济的发展方式与生态系统的协调水平较高,生态系统较为成熟,景观生态风险尚未显化;中生态系统服务价值和景观生态受损概率分布在东营市中偏东北部的沿黄区域,约占总面积的 13.27%,生态系统受自然和人为因素双重影响。一方面,黄河沉积形成的冲积平原带来湿润的土壤与丰富的生物多样性;另一方面,城市化进程和工

业发展等人类活动对沿黄地区的过度开发,导致生态建设历史欠账过多,造成中部沿黄地区生态系统复杂的景观特征;生态系统服务价值和景观生态受损概率双高区域主要分布在河口区、利津县北部和垦利区、东营区东部等沿海一线和黄河入海口处,约占总面积的 9.18%。与西部、南部建成区相比,该区域缺乏相对适宜的整体规划和统筹安排,入海流路单一,极易引发湿地生态系统逆向演替,使生态系统的良性调节循环遭到破坏,景观生态风险较为严峻。

2.2 东营市景观生态风险空间探索性分析

为揭示景观生态风险的空间相关特征,运用空间探索性分析(ESDA)方法和 ROOK 邻接规则,构建空间权重矩阵,分析网格单元的空间关系,以探讨研究区景观生态风险在各单元中的集聚趋势。全局 Moran's I 指数为 0.747,在 5% 置信水平上显著为正,其中显著性单元占比为 43.03%,表明东营市景观生态风险呈明显的空间相关性,进一步说明景观生态风险在空间上呈显著的集聚态势和外部性,可能产生群聚效应,凸显实施空间管控策略的必要性。

为进一步分析东营市景观生态风险的空间异质性,采用局部 Moran's I 散点图进行可视化(图 6b)。景观生态风险的空间分布趋势明显,散点主要集中在第 1、3 象限,表明景观生态风险在空间上呈高高(HH)和低低(LL)集聚态势,具有较强的正向空间关联特征。其中,HH 集聚区占比为 32.48%,在空间上呈集中连片分布,主要集聚在河口区北部、利津县靠近海洋区域部分、垦利区和东营区东部等沿海区域,该区域属于景观生态风险的核心区,景观生态风险可能具有集聚负外部性。LL 集聚区面积最大,占比 57.14%,分布于东营市中偏西南部的大片内陆区域。从城市景观生态风险管理角度来看,区域整体政策规划和统筹安排较为得当,景观生态系统与城市建设协调发展,能够有效防范和化解城市景观生态风险。第 2、4 象限的少量散点分别位于低高(LH)和高低(HL)集聚区。LH 集聚区占比为 6.55%,零散分布于 HH 集聚区,防范周边高风险区域带来的负外部性影响是该区域面临的主要问题。分析与借鉴相似案例,找出缓解城市景观生态风险的关键因子,是推动该区域实现景观生态可持续发展的关键举措。HL 集聚区占比为 3.83%,呈点状分布于 LL 集聚区内部。作为城市景观生态风险的重点阻断区域,应不断积累并创新有效的景观生态风险空间治理手段,为更广泛地区的实践提供宝贵经验与参考。

2.3 东营市景观生态风险因子诊断

城市景观生态风险的形成与演化是一个多维且

复杂的过程,受到经济发展水平、环境区位和规划建设等多方面因素的交互影响。基于前文网格层面的研究发现,景观生态风险具有空间集聚态势及负外部性。因而,空间特征也构成影响城市景观生态风险的重要因素之一。为深入探讨城市景观生态风险的主

导影响因素,运用地理探测器模型,从社会经济基础、环境区位条件和规划建设水平 3 个维度出发,遴选 14 个关键因子。通过对因子诊断分析,更清晰地把握城市景观生态风险的影响机制,为制定有效的风险管控策略提供科学依据(表 4)。

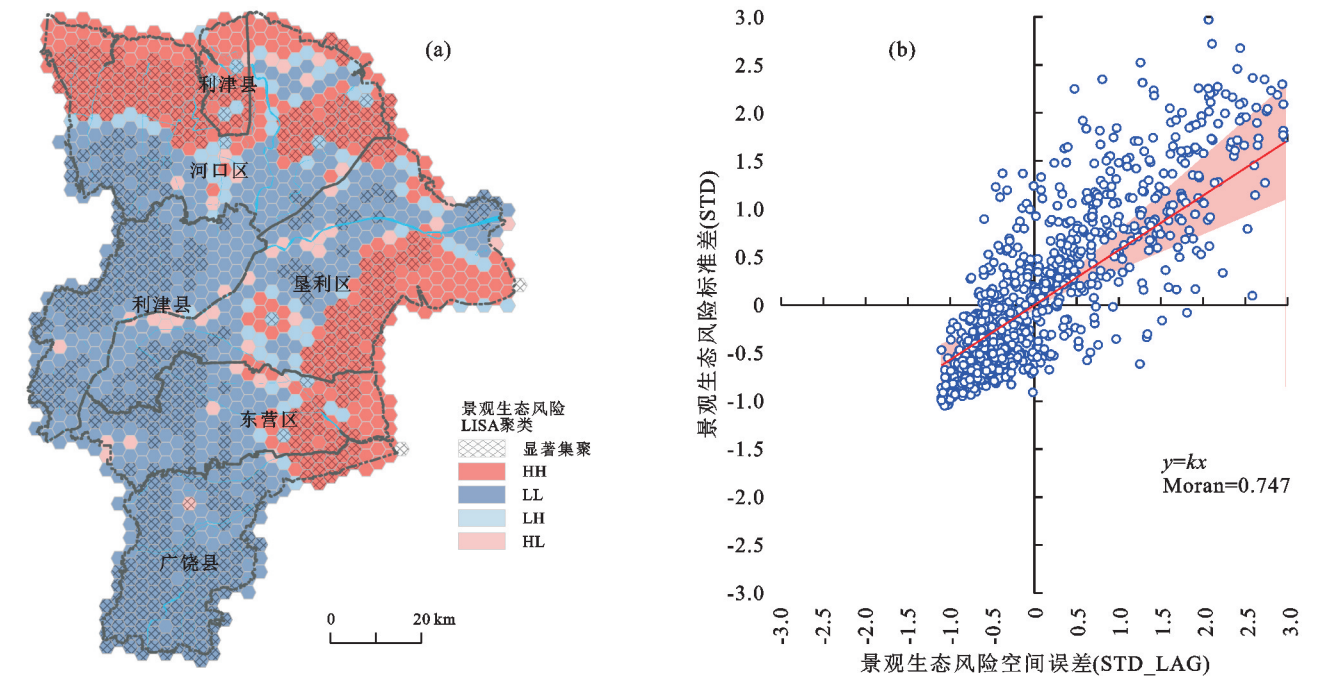


图 6 基于网格尺度的景观生态风险评价莫兰指数 LISA 集聚

Fig.6 LISA cluster map of LER assessment Moran's *I* index based on the grid scale

表 4 城市景观生态风险的诊断因子及说明

Table 4 Explanation of the detecting factors for urban LER

类别	编号	影响因子	因子量化方法	尺度
社会经济基础	X ₁₁	经济发展水平	采用中国科学院资源平台 GDP km 栅格数据(2019),利用 2022 年统计年鉴修正	栅格
	X ₁₂	人口密度	采用中国科学院资源平台人口 km 栅格数据(2019),利用 2022 年统计年鉴修正	栅格
	X ₁₃	土地城镇化率	基于土地利用调查数据,统计乡镇层面土地利用类型中建设用地占比	乡镇
	X ₁₄	产业结构	统计区县内农业、工业和服务业在区域经济结构中所占比重	区县
环境区位条件	X ₂₁	商贸中心可达性	采用欧式距离估算城区内的商贸中心距离,计算网格内的平均可达性	栅格
	X ₂₂	办公场所可达性	采用欧式距离估算研究区内的办公场所距离,计算网格内的平均可达性	栅格
	X ₂₃	公共服务可达性	采用欧式距离估算研究区内的公共设施距离,计算网格内的平均可达性	栅格
	X ₂₄	主要河流距离	采用欧式距离估算研究区内的主要河流距离,统计到网格单元	栅格
	X ₂₅	海岸线距离	采用欧式距离估算研究区内的海岸线距离,统计到网格单元	栅格
	X ₂₆	年平均降水量	利用中国气象要素年降水量栅格数据集,统计到网格单元	栅格
	X ₂₇	地形起伏度	采用 GIS 的焦点分析,计算 ASTER 高程数据集在 300 m 范围内的平均起伏差	栅格
规划	X ₃₁	城市建设强度	利用高德地图 AOI 数据,结合网格内楼层平均高度,评估建设强度	格网
建设	X ₃₂	基准地价水平	整合东营市城市基准地价(2019 年)与土地出让价格,统计到乡镇层面	乡镇
水平	X ₃₃	城市功能分区	商业 100,文化娱乐 90,行政办公 80,住宅 70,交通 60,医疗 50,其他用地 40	格网

在全市层面上,社会经济基础和环境区位条件是影响景观生态风险的关键因子(图 7)。从具体因素来看,海岸线距离(0.43)是影响城市景观生态风险的首要因素。反映沿海地区急剧的岸线开发和扰动带来严重的生态负面影响,导致近海生态系统服务能力下降,生态受损率激增,景观生态风险极为严峻;

在社会经济因素中,人口密度(0.4)和经济发展水平(0.37)的决定度较高,城市人口高度集中和经济快速发展对生态环境造成显著压力。随着人口密度的增加,对自然资源的需求和环境改造程度加剧,进一步提高景观生态风险;在规划建设层面,各影响因子决定度相比前 2 类较低,城市建设强度(0.16)在该层面

中决定度最高,城市建设带来的高开发强度和高集聚人口,在一定程度上导致生态系统服务价值下降,城市景观生态风险增强。

从探测因子在区域和结构上的差异性角度出发,不同因子在各个区域对城市景观生态风险的影响呈显著差异性。具体来看,环境区位条件($X_{21} \sim X_{27}$)在全市范围及各区域均显示出较高的决定度,规划建设水平($X_{31} \sim X_{33}$)普遍呈较低决定程度,社会经济基础($X_{11} \sim X_{14}$)影响程度较为离散,其中如人口密度(X_{12})和经济发展水平(X_{11})对全市和区域作用明显,而土地城镇化率(X_{13})和产业结构(X_{14})对全市和区域的决定度较低。从单个因素决定度来看,人口密度(X_{12})、经济发展水平(X_{11})、海岸线距离(X_{25})和公共服务可达性(X_{23})等因子在各区域的决定度较为一致,而主要河流距离(X_{24})、城市建设强度(X_{31})、办公场所可达性(X_{22})在不同区域对景观生态风险的决定度差异较大;从区域角度来看,影响城镇景观生态风险的核心因子为人口密度(0.4)、办公场所可达性(0.29)、经济发展水平(0.25)和海岸线距离(0.24),影响工业区景观生态风险的核心因素为海岸线距离(0.5)、人口密度(0.42)、经济发展水平(0.41)和地形起伏度(0.37),影响乡村景观生态风险的核心因素为海岸线距离(0.46)、经济发展水平(0.38)、人口密度(0.33)和地形起伏度(0.28)。综上所述,景观生态风险主要受社会经济基础和环境区位条件的影响较大,在全市范围内,海岸线距离是主导城市景观生态风险的首要因素。而在城镇区域,人口密度是影响景观生态风险的主导因素。下一步应针对探测因子制定兼顾生态保护与经济社会发展的空间治理措施,以实现研究区景观生态的可持续健康发展。

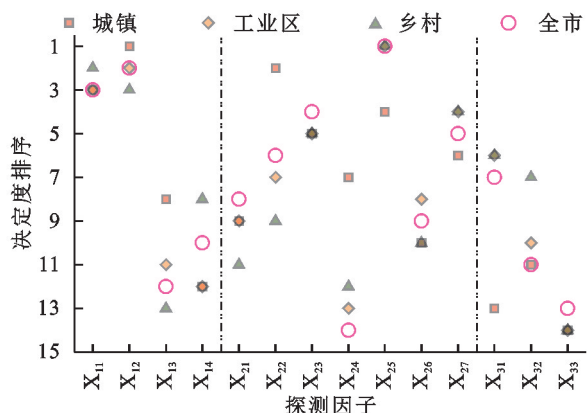


图 7 探测因子决定度

Fig.7 The determinants of the detection factors

3 讨论

城镇与工业化的快速发展给城市资源本底和生

态环境带来巨大压力,导致生态系统功能退化,生态环境质量下降。面对严峻挑战,亟需采取有效措施进行管控。在此背景下,实施景观生态风险评估成为促进生态环境可持续发展的关键。本文从中观层面、网格尺度出发,突破传统研究尺度的局限性,既避免宏观尺度下对景观生态风险的过度概括化,又避免微观尺度下对景观生态风险整体认识不足等问题,旨在为城市景观生态风险的系统认知和科学管控提供理论指导和新的研究思路。

针对城市景观生态风险的实证测度结果,提出 3 方面的建议:第一,城市景观生态风险治理的时序安排。根据格网区域风险等级、占地面积、结构特征,综合确定治理的优先顺序。对于风险高且治理难度小的区域应优先治理,此类区域易于改善和治理,对缓解城市景观生态风险问题有显著成效。对于风险高且治理难度大的区域应系统治理,此区域生态系统脆弱,需在政府主导下,整合各方资源,形成协同治理。对于风险低且治理难度小的区域应灵活治理,区域治理重点在于维持现状的稳定性,应实施定期监测维护,促进可持续发展。对于风险低且治理难度大的区域应防范治理,应鼓励社区自治防范,创新方法,克服治理难点。第二,城市景观生态风险的空间治理策略。根据空间探索性数据分析结果,对不同类型的区域制定相应策略。HH 集聚区作为治理主场,应重点整治并控制风险扩散。LL 集聚区应在保持现状的基础上,进一步优化和创新治理模式。HL 集聚区应注重“内外兼修”,在强化自身生态修复与风险管控的基础上,防止风险扩散,加强对周边低风险区的保护。LH 集聚区应发挥示范作用,在维护自身生态优势的基础上,协助周边高风险区域改善生态环境。第三,城市景观生态风险的系统性治理措施。根据地理探测器分析结果,从宏观和微观 2 个层面提出建议。宏观上看,应积极调整社会发展政策,建立区域内流域段景观生态协同体系。对于沿海经济发展区、人口密集区等高风险区域,应以解决人地矛盾为主,开展资源环境承载能力评价,优化国土空间结构。对沿黄流域的中风险区域,应构建“黄河-湿地-海洋”生态廊道,串联起黄河三角洲自然保护区、黄河口湿地自然保护区和渤海湾滨海区域。在黄河流域上下游、左右岸的生态系统服务价值差异区,建立横向生态补偿机制。对于西南部的低风险区域,应采取预防为主、优化为辅的措施,以维持和提升现有良好生态状况。从微观上看,应根据景观生态风险的差异化特征,采取针对性的治理策略。首先,针对沿海和入海口高风险

区域,应针对不同类型的受损生态系统,制定并实施精细化修复方案。如对退化的湿地进行分区治理,恢复水文连通性,对盐碱地采用耐盐植物和改良技术进行修复,增加区域内绿地斑块和生态廊道的数量,提高生态系统连通性。对于低风险内陆区域,尽管整体风险较低,但局部地区仍面临人口密集和生态脆弱的挑战,建议在城市周边推行生态缓冲带策略,如设立生态隔离带、建设城市公园等。以上措施可有效降低人类活动对生态系统的直接干扰,同时提升居民生活质量,实现生态效益与社会效益的双赢。

本研究为东营市景观的生态风险评估提供宝贵见解,但仍存在一定局限性。虽然,选取高精度遥感影像作为数据源,但仅提供一种客观视角,难以全面呈现研究区的真实全貌。未来可考虑结合多种方法,为城市景观生态风险分析奠定更坚实的基础。本研究采用六边形网格作为评价单元,初步揭示栅格尺度下的东营市景观生态风险的基本情况。然而,从流域尺度、城市层面系统解构与评价景观生态风险的研究方法仍处于探索的阶段。在未来,建议融合多学科视角,引入更精细的指标,探究现象背后的深层机制,分析长期时空演变趋势,并提出创新性的适应策略,以促进城市与生态环境的和谐共存与互融共生。

4 结论

1)在理论层面,系统构建景观生态风险评估体系,并在典型人地关系脆弱区进行实证检验,分析生态系统服务价值和景观生态受损概率的空间分布情况,以二者为基础集成景观生态风险指数。

2)通过区域分异与空间集聚特点分析发现,研究区景观生态风险在空间分布上呈现显著的集聚性和负外部性,高高集聚区域主要分布在东营市北部和东部海岸带形成的连续分布的高风险带。

3)景观生态风险指数的高低源于经济、区位和规划等不同层面要素的交互作用,通过测度景观生态风险因子的非线性效应显示,东营市景观生态风险主要受社会经济基础、环境区位条件等因素主导,在全市范围内,海岸线距离是主导城市景观生态风险的首要因素。而在城镇区域,人口密度是影响景观生态风险的主导因素。

参考文献:

- [1] 邓毛颖,韦晓莉,张国俊.中国新型城镇化与绿色发展协调演进关系研究[J].自然资源学报,2024,39(7):1682-1697.
DENG M Y, WEI X L, ZHANG G J. Research on the coordinated evaluation relationship between new urbanization and green development in China[J]. Journal of

Natural Resources,2024,39(7):1682-1697.

- [2] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.
PENG J, DANG W X, LIU Y X, et al. Review on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(4):664-677.
- [3] 倪庆琳,侯湖平,丁忠义,等.基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区:以徐州市贾汪区为例[J].自然资源学报,2020,35(1):204-216.
NI Q L, HOU H P, DING Z Y, et al. Ecological remediation zoning of territory based on the ecological security pattern recognition: Taking Jiawang district of Xuzhou city as an example[J]. Journal of Natural Resources,2020,35(1):204-216.
- [4] 许学工,林辉平,付在毅,等.黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J].北京大学学报:自然科学版,2001,37(1):121-127.
XU X G, LIN H P, FU Z Y, et al. Regional ecological risk assessment of wetland in the Huanghe River delta [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2001,37(1):121-127.
- [5] 虞燕娜,朱江,吴绍华,等.多风险源驱动下的土地生态风险评价:以江苏省射阳县为例[J].自然资源学报,2016,31(8):1264-1274.
YU Y N, ZHU J, WU S H, et al. Assessment of land ecological risks driven by multi-sources: A case study of Sheyang County, Jiangsu Province[J]. Journal of Natural Resources,2016,31(8):1264-1274.
- [6] WU J, ZHU Q, QIAO N, et al. Ecological risk assessment of coal mine area based on“source-sink”landscape theory: A case study of Pingshuo mining area[J]. Journal of Cleaner Production,2021,295:e126371.
- [7] 胡云锋,高戈.城市景观生态风险评估框架与实践:以北京天坛地区为例[J].生态学报,2020,40(21):7805-7815.
HU Y F, GAO G. Framework and practice of urban landscape ecological risk assessment: A case study of the Tiantan region in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(21):7805-7815.
- [8] KAPUSTKA L A, GALBRAITH H, LUXON B M, et al. Using landscape ecology to focus ecological risk assessment and guide risk management decision-making[J]. Toxicology and Industrial Health,2001,17(5-10):236-246.
- [9] LANDIS W G, WIEGERS J A. Design considerations and a suggested approach for regional and comparative ecological risk assessment [J]. Human and Ecological Risk Assessment,1997,3(3):287-297.
- [10] 马胜,梁小英,刘迪,等.生态脆弱区多尺度景观生态风险评价:以陕西省米脂县高渠乡为例[J].生态学杂志,

- 2018, 37(10):3171-3178.
- MA S, LIANG X Y, LIU D, et al. Multi-scale landscape ecological risk assessment in ecologically fragile regions: A case study in Gaoqu Town in Mizhi County, Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(10):3171-3178.
- [11] 袁玉, 方国华, 陆承璇, 等. 基于景观生态学的城市化背景下洪灾风险评估[J]. 地理学报, 2020, 75(9):1921-1933.
- YUAN Y, FANG G H, LU C X, et al. Flood risk assessment under the background of urbanization based on landscape ecology[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9):1921-1933.
- [12] HAGENLOCHER M, RENAUD F G, HAAS S, et al. Vulnerability and risk of deltaic social-ecological systems exposed to multiple hazards[J]. The Science of the Total Environment, 2018, 631/632:71-80.
- [13] ANDERSON C, RENAUD F, HAGENLOCHER M, et al. Assessing multi-hazard vulnerability and dynamic coastal flood risk in the Mississippi delta: the global delta risk index as a social-ecological systems approach[J]. Water, 2021, 13(4):e577.
- [14] 许学工. 黄河三角洲生态环境的评估和预警研究[J]. 生态学报, 1996(5):460-468.
- XU X G. Study on evaluation and pre-warning of ecological environment in the Yellow River Delta[J]. Journal of Ecology, 1996(5):460-468.
- [15] 梁加乐, 陈万旭, 李江风, 等. 黄河流域景观破碎化时空特征及其成因探测[J]. 生态学报, 2022, 42(5):1993-2009.
- LIANG J L, CHEN W X, LI J F, et al. Spatiotemporal patterns of landscape fragmentation and causes in the Yellow River Basin[J]. Journal of Ecology, 2022, 42(5):1993-2009.
- [16] 于法稳, 方兰. 黄河流域生态保护和高质量发展的若干问题[J]. 中国软科学, 2020(6):85-95.
- YU F W, FANG L. Issues regarding the ecological protection and high-quality development of Yellow River Basin[J]. Soft Science of China, 2020(6):85-95.
- [17] 刘希朝, 李效顺, 蒋冬梅. 基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4):265-274.
- LIU X C, LI X S, JIANG D M. Landscape pattern identification and ecological risk assessment using land-use change in the Yellow River Basin[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2021, 37(4):265-274.
- [18] 东营市统计局. 东营市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Statistics Bureau of Dongying City. Dongying statistical year book[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [19] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6):571-576.
- FU B J, ZHOU G Y, BAI Y F, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(6):571-576.
- [20] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9):1740-1746.
- XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9):1740-1746.
- [21] 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. Spatio-temporal evolution and drivers of ecosystem service value in the Dongting Lake eco-economic zone, China[J]. Journal of Applied Ecology, 2022, 33(1):169-179.
- [22] 翟培秀, 李飞雪, 邱小倩, 等. 长三角地区景观生态风险时空演变评估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4):245-255.
- ZHAI P X, LI F X, QIU X Q, et al. Assessment on Spatial-temporal evolution of landscape ecological risk in the Yangtze River Delta[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2023, 30(4):245-255.
- [23] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 等. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK[J]. 地理学报, 2018, 73(5):843-855.
- CAO Q W, ZHANG X W, MA H K, et al. Review of landscape ecological risk and an assessment framework based on ecological services: ESRISK[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5):843-855.
- [24] 马晓熠, 裴韬. 基于探索性空间数据分析方法的北京市区域经济差异[J]. 地理科学进展, 2010, 29(12):1555-1561.
- MA X Y, PEI T. Exploratory spatial data analysis of regional economic disparities in Beijing[J]. Progress in Geography, 2010, 29(12):1555-1561.
- [25] 郑可君, 李琛, 吴映梅, 等. 云南边境山区景观生态风险时空演变及其影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(18):7458-7469.
- ZHENG K J, LI C, WU Y M, et al. Temporal and spatial variation of landscape ecological risk and influential factors in Yunnan border mountainous area[J]. Journal of Ecology, 2022, 42(18):7458-7469.