

城市海岸景观受损空间识别及其表征研究——以盐城市海岸带为例

侯冰钰 李哲* 吴欣莹 赵玉龙 丁昊楠

摘 要: 面向陆海统筹战略与韧性城市建设, 系统开展海岸带景观受损空间精准识别与研判, 已成为当前城市海岸景观高质量发展的前置问题, 相关分析方法有待进一步发展。基于韧性景观研究基础, 构建适用于海岸带景观受损空间量化识别与动态表征的分析框架, 依托PLUS模型开展海岸带景观受损空间模拟与解析。以盐城市海岸带为例, 协同GIS空间统计与地理探测器技术, 结合转移矩阵与空间自相关分析, 集成2010—2020年数据开展海岸带景观受损空间的量化识别与动态解析实践探索, 为海岸带景观策略制定提供分析依据。实证结果表明, 研究区受损空间的演变特征呈沿海集聚、梯度扩张的演变特征, 在沿海湿地、围垦区及城市扩张区域受损严重, 植被规模、气候温度、人口规模及用地类型调整显著影响受损空间变化, 受损景观区域的修复与优化有赖于景观空间分区调控的系统开展。研究成果为滨海城市海岸景观的科学管控与可持续治理提供分析基础与参考案例。

关 键 词: 风景园林; 海岸带景观; 受损空间; PLUS模型; 受损表征; 空间识别

文章编号: 1000-6664(2026)03-0115-09

DOI: 10.19775/j.cla.2026.03.0115

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-01-26

修回日期: 2025-05-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278051)

建设韧性、健康、可持续的海岸带景观是推动海洋强国战略和实现陆海统筹布局的关键抓手, 赓续原生景观风貌, 提升景观环境效能是保障滨海城市安全、促进海岸带景观高质量发展的核心力量。以数字技术助力海岸带景观保护与修复已成为当代海洋景观提质增效研究及其实践重点。作为滨海城市的生态屏障与资源载体, 海岸带景观兼具生态调节、环境稳定与风险缓冲等多重功能, 在支持区域经济发展、维系生态安全等方面发挥关键作用, 是滨海城市永续发展的重要空间基础^[1]。

滨海城市因其独特的景观资源与环境条件, 易受人类活动干扰而更具保护难度, 海岸带景观环境一旦遭受破坏, 难以在短期内恢复韧性^[2]。近年来, 伴随滨海城市开发强度攀升、气候变化影响加剧及居民生活方式转型, 海岸带景观面临受损扩张、结构失序与功能衰退等复合挑战, 尤需构建系统的景观保护与调控机制^[3]。以“城市体检”为代表的环境品质评价机制逐步深化, 也

为受损空间识别、功能评估及策略制定提供了技术支撑, 推动海岸带景观研究向系统诊断、综合评估、精准治理的方向发展^[4]。在相关空间分析与预测技术快速拓展的同时, 亟须发展符合风景园林特征的精细化、定量化分析方法与技术, 助力海岸景观受损空间的精准识别、表征研判与驱动解析, 从资源保护与合理开发双重目标协同推进, 提升海岸带景观保护与修复研究的分析决策能力, 为实现“依陆向海”的发展战略提供重要的科学依据与实践指引。

面向当前海岸带景观受损空间研究普遍面临系统分析薄弱、技术路径有待集成、景观管控策略粗放等现实问题, 亟须发展精准识别与科学调控的技术体系, 以支撑滨海城市海岸带景观可持续发展。综合景观韧性理论与景观生态学既有研究基础, 聚焦滨海城市景观动态演变规律, 构建海岸带景观受损空间的识别与表征分析框架, 为景观调控策略提供科学依据。依托PLUS模型集成景观受损空间动态模拟系统, 结合转移矩阵与

空间自相关分析方法, 提炼景观受损变化趋势与空间集聚模式, 搭载地理探测模型单因子与因子交互探测技术, 揭示海岸带景观受损驱动机制, 形成适用于海岸带景观受损空间可量化、可表征的方法体系, 为滨海城市景观修复与科学管控提供研究基础与技术支持。

1 海岸带景观受损空间的研究视野与趋势

1.1 海岸带景观受损空间研究的发展理论

景观受损空间指景观在自然变迁或人为活动下, 生态系统结构与功能遭受负面影响或损失的空间单元, 表征景观在空间连通性和服务效能的弱化^[5]。作为海岸带景观结构复杂性与脆弱性的空间映射, 受损空间反映景观单元在外部干扰与内部脆弱性交织下的响应强度和恢复能力。海岸带景观受损研究发轫于海洋科学与国土空间规划等领域, 以可持续发展、韧性景观理论为指引, 结合动态演化模拟、评估体系建立、空间优化决策等技术路径日益发展。

* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: lizheseu@seu.edu.cn

相关研究从景观连通性与生态安全格局视角切入海岸带景观受损空间的现实问题,围绕景观功能衰退^[6]、生态系统服务退化^[7]、滨海地区城市扩张^[8]、港口开发^[9]等人类活动影响及海岸景观资源调控^[10]等议题开展探索。如邵钰涵等^[11]系统回顾1982—2022年的海岸带景观,提出多尺度综合评估与动态监测的建议;陈崇贤等^[12]针对海平面上升对城市土地利用格局的影响,采用多情景模拟评估方法构建“敏感性-适应性”脆弱性评估体系,形成海岸带景观受损空间研究的前置框架,通过探究受损空间的演化机制,表征海岸景观在时空维度的动态特征。与此同时,现今陆海统筹目标下的海岸带景观保护与修复的重点正从静态资源评估向系统诊断与机制解析方向推进^[13],针对海岸景观受损空间可观测、可度量特征的动态表征机制仍需深入研究,相关数据分析应用的基础模型及相应技术有待进一步发展。

1.2 海岸带景观受损空间的分析技术发展

“受损”不仅是景观结构和功能在外界干扰下产生的表面弱化,更是其空间表征变迁的深层体现,而“触景入理、由损溯因”恰是风景园林研究领域中的独到视角。近年来,伴随地理空间信息技术与多源数据融合方法的协同发展,驱动景观模拟方面由静态格局解析向多模型耦合、多情景模拟转变,研究多采用马尔可夫链(Markov Chain)^[14]、元胞自动机(CA)^[15]、未来土地利用模拟(FLUS)^[16]和斑块生成土地利用模拟(PLUS)^[17]等模型对受损空间的演变路径进行模拟与预测,并初步推阐海岸带景观的空间演变规律,为城市海岸带景观受损空间的精准识别与特征联立分析建立方法论基础。

不同模型在模拟方法与使用场景上各具特点,需选取契合研究数据特征与分析需求的模型(表1)。从模型特征上看,Markov Chain基于概率转移矩阵可长期变化趋势预测,侧重静态概率假设;CA模型通过局部规则演化模拟受损空间扩展,适用于小尺度受损扩散研究;FLUS模型引入空间竞争机制能够在多类型景观变化研究中展现较好的适应性,但其参数调试复杂且模拟的景观斑块形态较为粗糙;PLUS模型融合随机种子扩展机制与多因子驱动模式,在海岸带景观模拟精度、动态演变等方面具有更高的适用性,该模型能够为海岸带景观受损空间的演化模拟提供支撑。

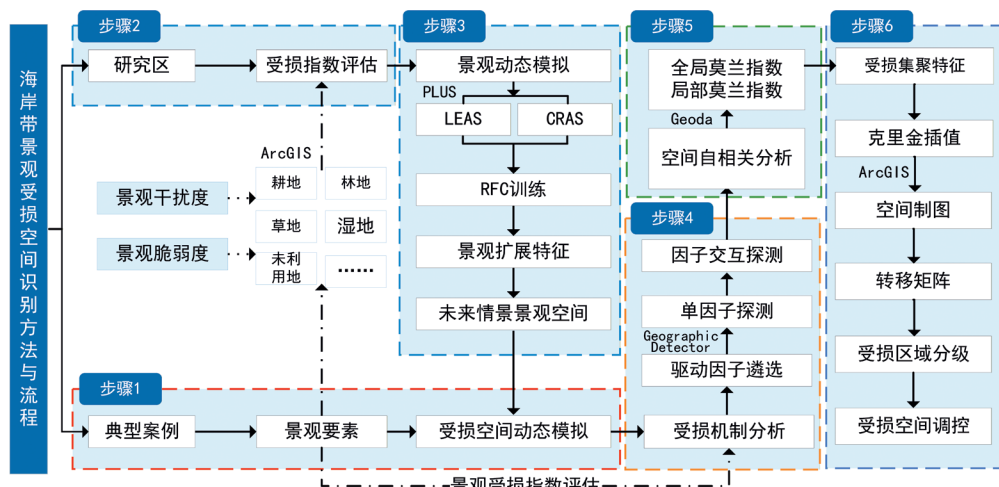


图1 海岸带景观受损空间识别方法与表征流程

总的来看,当前城市海岸景观受损研究已初步形成基于定量分析和模型模拟的框架,在受损空间的评估和演变模拟方面积累了理论支撑与技术路径,为海岸带景观受损空间的精准识别与科学表征提供新的技术维度与研究思路。探索基于多时空尺度的受损空间识别方法,量化分析海岸带景观受损空间特征及其动态变化规律,对于提升海岸带景观修复的精准施策具有积极意义。

2 海岸带景观受损空间识别方法与表征流程

本研究基于PLUS模型提出一套适用于城市海岸景观受损空间识别与解析的数字化方法,核心在于通过构建量化指标体系和动态模拟模型,识别受损空间的空间分布与扩展路径,确定其时空演变特征;借助因子探测和空间分析方法,表征受损景观的形成机制及集聚特征,最终形成“指数转译-动态模拟-因子探测-集聚解析”的研究框架(图1),具体流程如下。

1)受损空间指数转译。遴选景观干扰度与脆弱度核心指标构建海岸带景观受损体系,将景观对外界干扰的响应强度及其自身抗逆能力转化为可量化、可对比的景观受损指数。

2)受损景观动态模拟。基于PLUS模型集成LEAS与CARS提炼景观类型转换的时空演变转换规律,利用RFC训练景观扩展特征,模拟受损空间的动态演变过程。

3)受损空间因子探测。运用地理探测器解析单因子探测与因子交互效应,识别关键因子对受损空间分异的影响及因子间非线性耦合关系,揭示受损空间的关键驱动机制。

4)受损空间集聚解析。借助空间转移矩阵量化受损空间的演变路径,结合全局与局部莫兰指数解析受损空间集聚模式,搭载ArcGIS与Geoda平台实现海岸带景观受损空间可视化制图。

2.1 海岸带景观受损体系构建

海岸带景观在长期自然演进与人类活动干扰作用下,受潮汐作用与陆海交互过程影响,其空间结构特征逐步分化,衍生出复合交织的受损景观演变模式^[18]。受损空间的形成并非单一变量影响,而是外部干扰强度与景观韧性共同作用下的演变结果。综合考量景观系统受外部干扰的敏感性与恢复能力,选取景观干扰度与景观脆弱度构建景观受损度指数,以综合各景观单元在外部干扰下的空间响应机制。其中,景观干扰度衡量外部因素对景观系统的冲击强度,包括人为开发、资源利用强度、景观利用模式等对景观格局的扰动效应^[19];景观脆弱度则从生态适应性角度解析不同景观类型在外界干扰下的敏感性与恢复能力^[20]。二者彼此联立、互为补充,能够协同表征海岸带景观受损的空间分异特征,为受损特征的识别与分析提供集成指数体系。

$$R_i = \sqrt{S_i \cdot F_i} \quad (1)$$

$$ERI_k = \sum_{i=1}^N \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \quad (2)$$

式中: S_i 为景观结构指数; F_i 为景观脆弱度指数; ERI_k 为第 k 个网格的景观受损指数; A_{ki} 为第 k 个网格内景观类型 i 的面积; A_k 为第 k 个网格的面积; R_i 为 i 类景观的景观损失度指数; N 为网格内景观类型的数量; i 为耕地、林地、草地、湿地、未利用地和建设用地6种景观类型。

2.2 基于PLUS模型的景观动态变化模型建构

判读海岸带景观受损空间的时空演变特征，需要在历史数据转译的基础上，选取适宜的景观演变模拟模型，分析驱动因子对景观类型转换的综合影响^[21]。根据海岸景观数据转换机制复杂的特点，选用PLUS模型集成扩展分析策略(LEAS)和多类型随机斑块种子机制(CARS)模块进行模拟，其中LEAS通过“扩展规律-转换机制-空间推演”三步法，提取景观类型的时空转换特征，并结合随机森林分类器对不同景观类型的空间扩展进行训练和建模，进而挖掘景观变化的动态规律。CARS则通过随机生成多类型斑块，模拟景观类型在时间和空间中的复杂变化，显著提升受损空间演变模拟的生态合理性，为滨海景观保护决策提供高精度动态推演工具。

$$P_{i,k(x)}^d = \frac{\sum_{n=1}^M I[h_n(X) = d]}{M}$$

式中： $P_{i,k(x)}^d$ 为地块*i*转为*k*类景观类型的概率，*d*取0或1，*d*=0表示无法转化为*k*类景观，*d*=1表示可以转化为*k*类景观；*X*为驱动因子；*I*为决策树指数函数；*M*为决策树总数。

$$OP_{i,k}^{d=1,x} = P_{i,k(x)}^d \times \Omega_{i,k}^i \times D_k^i$$

式中：OP为总体转换概率； Ω 为地块单元的邻域效应；*D*为未来*k*类景观类型需求影响。

2.3 海岸带景观受损空间驱动因子探测

系统识别驱动因子及其作用机制是厘清景观受损空间形成逻辑与演化路径的关键环节。地理探测器作为一种面向空间异质性的统计工具，能够定量解析单因子对空间分异的解释力，检验其空间分布规律，同时通过变量叠加探测因子间的协同耦合与非线性交互关系，已成为驱动机制识别的重要诊断工具^[22]。引入地理探测模型，运用单因子探测模块识别关键因子对受损空间分异的影响强度，计算*q*值筛选主导因子；进一步利用因子交互探测模块，解析变量间的交互增强效应，量化因子组合对景观受损格局的解释力，进而揭示海岸带景观受损空间的主要驱动机制与作用路径。其中，单因子探测具体公式如下：

$$q = 1 - \frac{ssw}{ssT} \times \frac{N-L}{N-1}$$

式中：*ssw*为层内方差总和；*ssT*为全区总方差；*N*为样本总数；*L*为分层数。*q*在(0, 1]范围内，*q*值大小与影响因子对景观受损空间分异解释力相同。

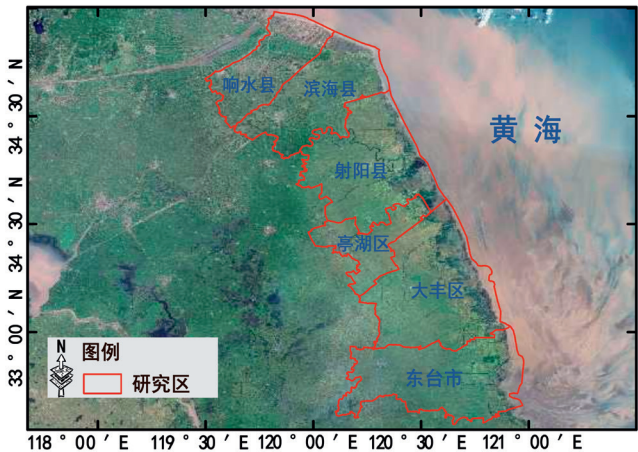


图2 盐城市海岸带区位示意图

2.4 海岸带景观受损空间数据集成与特征解析

科学表征海岸带景观受损空间的动态特征，需要量化受损空间的空间分布、变化趋势与集聚模式，并借助数字制图进行表达，帮助使用者理解、管控景观受损空间。采用网格划分方法生成空间单元，在统计分析模块中对样地中心点数据进行半变异函数拟合，利用克里金插值法和统计分析方法直观展示不同时期城市海岸景观受损空间分布与面积变化。在此基础上，引入转移矩阵方法量化分析各类受损空间的转移路径，辨析其空间扩展与缩减特征，揭示城市海岸景观受损空间时空尺度的演变规律。

后续为进一步表征受损空间的集聚特征，采用Geoda软件计算全局莫兰指数，评估不同阶段景观受损的空间自相关性。指数取值范围[-1, 1]，值越接近1，表示空间集聚程度越高；接近-1，则反映出空间离散与异质聚集特征；接近0，则说明空间分布接近随机状态^[23]。同时，结合局部空间自相关分析识别城市海岸景观受损的局部集聚现象，以期为滨海城市海岸景观的保护与管理提供科学依据。

3 实证研究——以盐城市海岸带为例

3.1 研究区域概况

盐城市地处江苏东部滨海区域，总面

积1 0480 km²，涵盖滨海、响水、射阳、亭湖、大丰和东台等沿海县市(图2)。作为江苏省内海岸线最长的滨海城市，盐城市是长三角城市群唯一的海岸带绿色发展示范区，在维护海洋权益和推进区域协同发展中发挥关键作用，其景观动态深刻反映快速城镇化与生态保护的博弈过程，成为研究陆海交互作用与受损机制的理想场景^[24]。研究以区划尺度为分析单元，确保研究对象与地方治理政策深度融合，为制定科学的海岸带景观保护与修复策略提供依据，进而助推区域海岸带的综合管理与可持续发展。

3.2 研究数据与驱动因子提取

依托ArcGIS平台对2010、2015和2020年的景观历史数据进行重分类，划分为耕地、林地、草地、湿地、未利用地和建设用地六大景观类型。结合开放街道地图数据获取的道路网信息，将空间数据统一转换为Xian_1980_3_Degree_GK_CM_120E投影坐标系。在PLUS模型中，通过CARS模块设置湿地面积零缩减为刚性约束，LEAS模块计算各景观类型扩展概率，并采用10折交叉验证进行参数校准，确保模拟合理性。

基于景观受损空间的影响机制，构建涵盖自然条件、气候环境、人类活动与社会经济的驱动因子数据库。其中，自然因子包括基于USGS/

表1 海岸带景观模拟预测模型比较

模型原理	代表模型	优势	不足
基于概率转移	Markov Chain	长期预测模拟	忽略空间关联、静态概率假设
基于规则演化	CA	局部空间动态	依赖预设规则
基于空间约束	FLUS	多类型用地竞争	斑块生成粗糙
基于随机种子扩展	PLUS	复杂空间演变	计算步骤复杂、依赖高质量数据

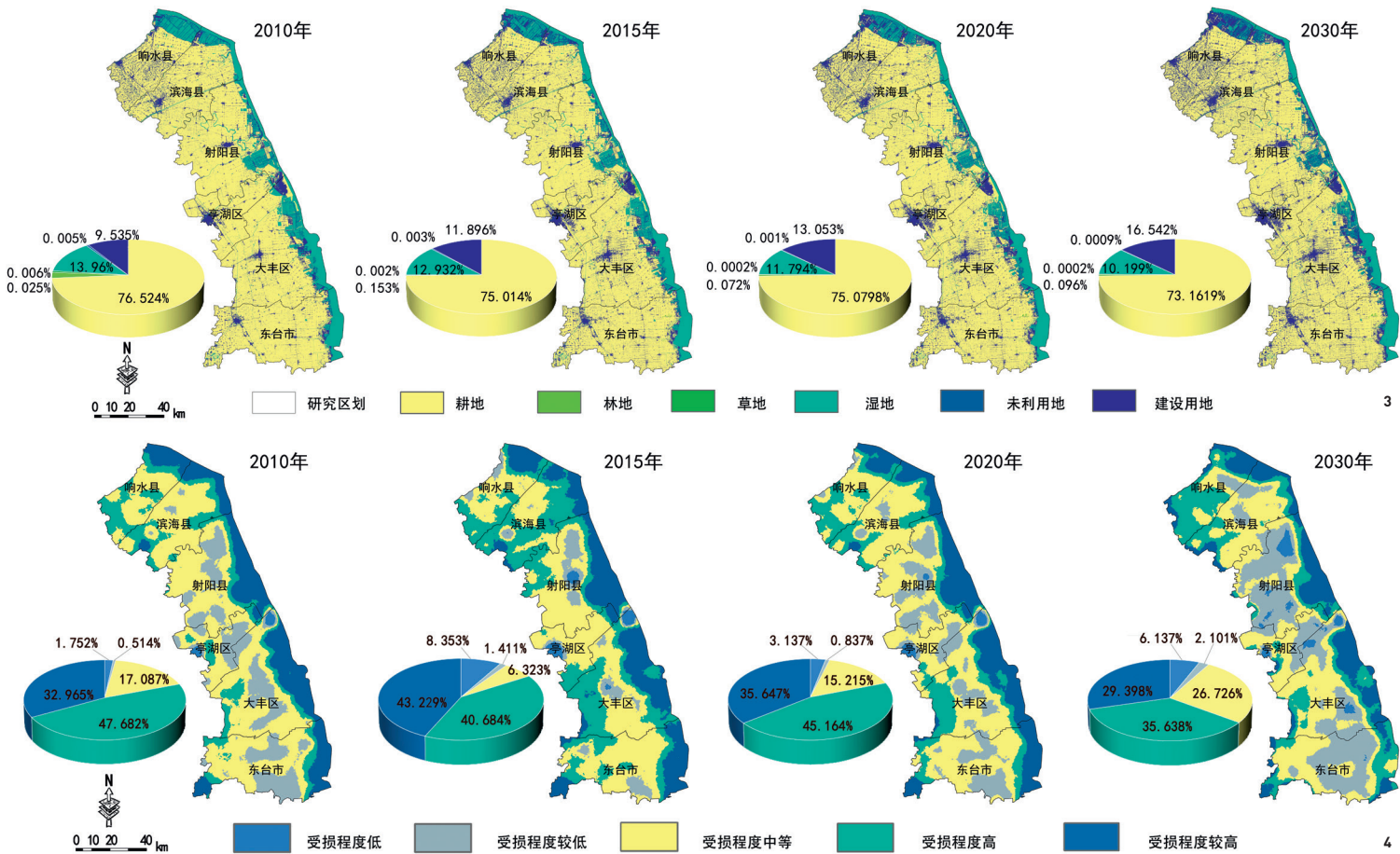


图3 研究区景观变化与占比图
图4 研究区景观受损空间分布与占比图

SRTMGL1_003数据获取的数字高程(DEM)、坡度(Slope)与坡向(Aspect);植被状况采用MODIS/061/MOD13A1产品计算获取NDVI与基于EVI的FVC指数;气候因子方面,地表温度(LSTd)源于MODIS/061/MOD11A2,降水(Pre)来自国家地球系统科学数据中心,蒸散量(ET)选自MODIS/061/MOD16A2GF产品;人类活动因子基于武汉大学黄昕团队的土地利用数据集;社会经济因子则引入徐新良发布的中国GDP空间数据与WorldPop数据库中的人口密度数据(POP)。

3.3 数据处理过程

首先,对研究区采用2.5 km × 2.5 km的网格划分生成2 168个空间单元,基于2010与2015年景观历史数据,借助PLUS模型模拟2020年景观情景,模型精度通过Kappa系数验证,系数达到0.86,表现出较高的拟合精度。在此基础上,预测2030年的景观分布,生成景观类型的空间分布图及面积占比图(图3)。

表2

半变异函数值					
年份	模型	块	基石	范围/m	块/基石
2010	球形	0.000 113	0.000 332	57 900	0.661
2015	指数形	0.000 087	0.000 187	69 000	0.535
2020	球形	0.000 130	0.000 386	57 200	0.663
2030	球形	0.000 749	0.002 238	64 800	0.665

其次,对各景观类型数据进行归一化处理,权重系数分别为建设用地0.047 62、林地0.095 24、草地0.142 86、耕地0.190 48、湿地0.238 10、未利用地0.285 71。结合GS+9.0软件拟合半方差函数完成参数分析(表2),以自然间断法将景观受损等级划分为5类,得到景观受损的空间分布图与占比图(图4)。同时,搭载Geoda系统进行热点分析,生成显著性空间聚类图(表3,图5)。表3显示在研究期间Moran's I值持续维持正相关状态,表明研究区受损空间地理聚集显著。

最后,在地理探测器中选用equal、quantile、geometric 3种离散化方法,分类数

表3

盐城市海岸带的Moran's I			
年份	Moran's I	Sd(I)	z
2010	0.635 4	0.010 3	61.426 50
2015	0.506 7	0.009 6	52.863 24
2020	0.641 1	0.010 4	61.570 60
2030	0.619 0	0.007 6	81.507 30

设置为3~7类,对连续变量进行离散化。其中,DEM和CLCD设置为类型变量。通过对比不同分类方法与分类数的组合,筛选出q值最高的驱动因子离散化方案,并以q值的90%分位数达到最高值的空间尺度作为最优离散化方案,进行因子探测和因子交互探测计算(图6)。

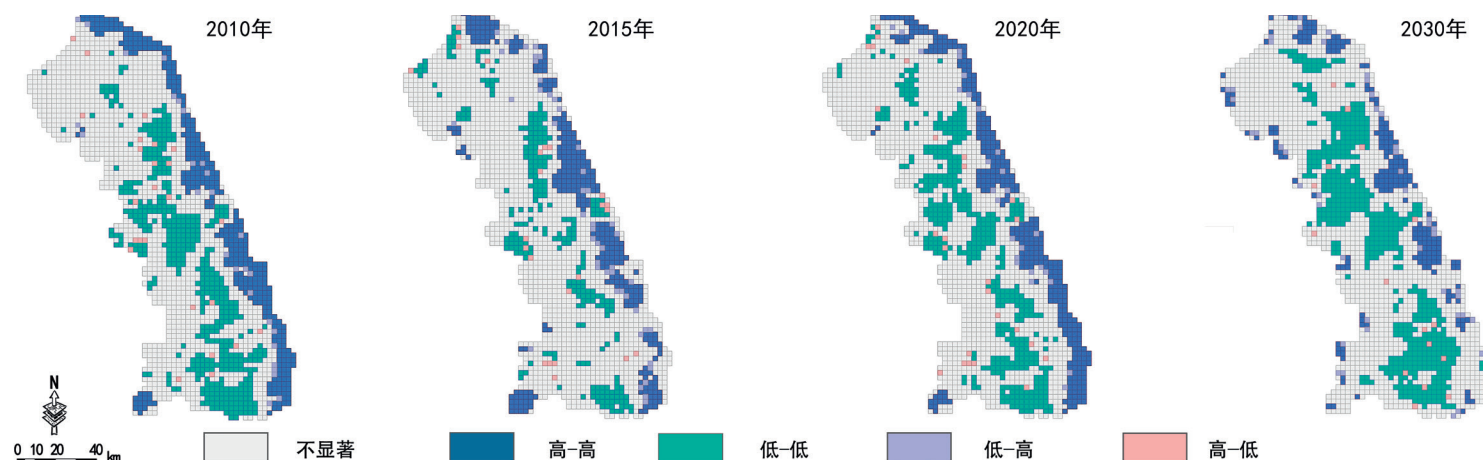


图5 研究区景观受损空间的局部空间自相关分析图

3.4 盐城市海岸带景观受损空间判读与表征解析

制图分析显示,盐城市海岸带景观受损空间呈现显著的空间分异与时序演变特征。结合动态模拟与制图识别受损空间的分布格局及变化趋势,借助转移矩阵与空间自相关方法解析景观类型的受损过程及空间聚集规律,并结合因子探测揭示其受损形成机制。该判读与特征解析框架为滨海城市景观的科学管理与调控优化提供量化依据,有助于实现海岸带景观资源合理配置与韧性提升。

3.4.1 海岸带景观受损空间识别与特征判读

从受损空间的识别与量化统计视角看,研究区受损空间的分布特征存在显著的空间差异(图3、4)。高受损空间以人工设施密集区和植被覆盖率较低的开阔绿地为主,在沿海东部及西南、西北部持续扩展,集中分布于开发强度较高的区域及农田景观。相较之下,射阳、东台和亭湖等区域内低受损空间则多由滨海湿地和自然空地构成,景观连续性较好,受损程度较低。此区域内景观管理应着眼于保护其自然景观特征,优先实施防护林和绿地廊道修复,提升景观韧性。

进一步量化解析景观类型的动态变化(图7)显示,2010—2020年,建设活动加剧导致开发性景观的扩展达到峰值,面积增加2 921.61和1 430.95 km²,扩展速率达1.006%。与此同时,伴随退耕还林和生态修复政策的推动,林植绿地覆盖面积逐步扩大,成为区域内维持生态系统的重要支撑。预计2020—2030年,开发性景观的扩展速率趋于缓和,但预计仍将

增加至4 352.56 km²。因此,滨海城市海岸带景观的开发过程中需在景观资源配置与开发建设密度之间寻求平衡,优化绿地、农田及自然保护地的空间分配,以维持区域内景观完整性。

3.4.2 海岸带景观类型受损动态变化与表征解析

从海岸带景观受损空间的共时性特征来看(图5),不同阶段景观受损空间均表现出较强的空间自相关性。高-高集聚区域主要分布于东部沿海湿地、围垦区及城市扩张前沿,呈现连续或条带状分布特征;低-低集聚区域则集中在滨海保护区及生态缓冲带。2015年,高-高集聚区域短暂减少,2020年有所扩展,2030年呈现一定分散趋势。低-高和高-低类型零散分布,反映景观受损空间在不同地类间的动态迁移特征。

进一步结合受损等级的历时性演变特征(图8),盐城市海岸带景观受损空间在不同景观类型间差异显著。2010—2020年,中等受损扩展面积达792.38 km²,受损等级呈现由低至高的演变趋势。2015—2020年,林地高受损比例增长231.7%,草地增长94.5%,表明该阶段人类活动开发与植被破坏显著加剧。耕地和湿地则呈递进式受损,2010—2020年,耕地高受损比例增长1.9倍,其中2015—2020年增幅达63.9%;湿地在2020—2030年进入加速受损期,高受损比例增长29.8%,表明潮间带开发与围垦活动的强化对湿地生态系统造成更为严重的冲击。整体来看,2010—2015年以低-中受损扩展为主,2015—2020年进入高受损加剧期,2020—2030年湿地受损加剧,而林地、农田等

景观类型的受损增速则有所放缓。

3.4.3 海岸带景观受损空间驱动机制与调控导向

从受损空间的驱动机制来看(表4,图6),景观受损过程受自然环境与人类活动的双重影响,并在不同阶段呈现差异化影响特征。因子探测分析显示,2010年,植被覆盖度、温度变化与经济活动对受损影响最为显著;2015年,降水、人口密度和地表蒸散发对空间受损作用增强,特别是在城市扩张前沿区和农业用地转换区域,受损空间扩展速率提升;2020年,地表温度和经济开发活动的影响增强显著,同时湿地与耕地受损率加剧,尤其沿海湿地高受损比例增长,表明潮间带围垦与滨海城镇化对海岸带景观系统的影响日趋显著。

因子交互探测分析显示,在2010年地表温度与植被覆盖度交互作用明显;2015年降水和人口密度的交互作用有所减弱,而土地利用变化与经济活动的交互作用逐渐加强,表示此阶段土地利用冲突加剧,对农田和湿地景观造成更大压力;在2020年地表温度、植被覆盖度和经济活动的交互达到峰值,反映出经济扩张和温度变化的协同作用加速受损空间扩展。整体来看,滨海城市海岸带景观受损空间的形成机制表现出经济扩张、土地利用变化和气候变化的耦合效应,其中经济活动驱动的土地利用变迁、地表热环境变化及植被覆盖度变化是影响景观受损的核心因素。

在此基础上,结合2010—2020与2020—2030年的受损空间演变模式(图9),将研究区可划分为受损恶化区、受损改善区和受损稳定区,

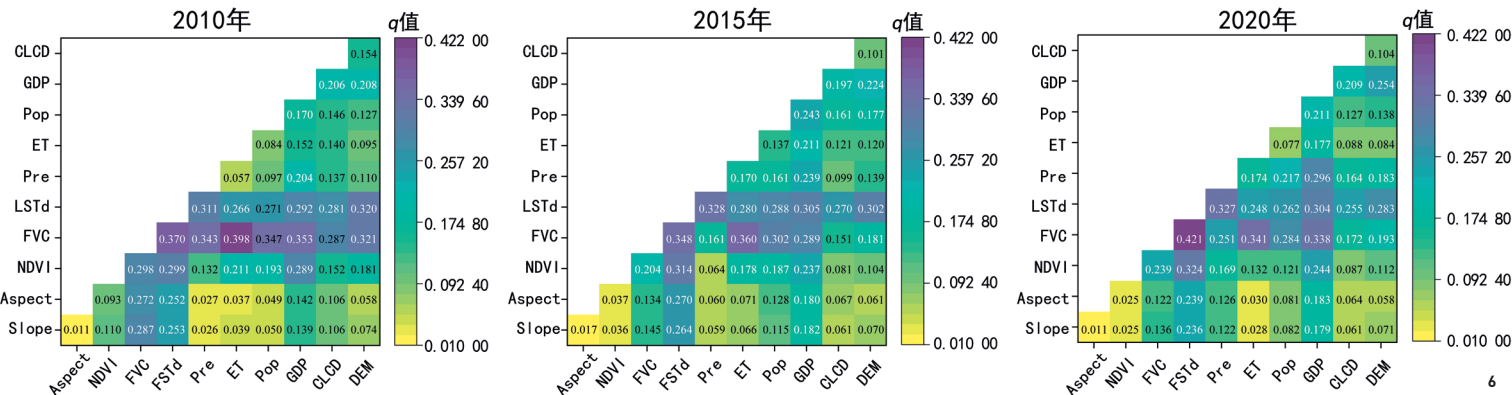


图6 研究区景观受损空间因子交互探测图
图7 海岸带景观类型变化动态度
图8 海岸带各景观类型受损空间动态变化图

为区域修复策略提供可视化依据，以促进正向效应的发挥。在沿海东部的湿地高受损区，需强化生态屏障，减少围垦干扰并优化潮间带开发模式，避免进一步侵占生态缓冲区^[25]；在西南、西北部的农业景观受损区，受损空间扩展受土地利用变化和经济开发活动影响较大，应通过优化农田景观布局提升生态连通性，减少城镇扩张的空间挤压^[26]；在受损改善区，应继续推动生态修复工程，加强植被恢复以提升碳汇能力；对于受损稳定区如沿海中部地带，应注重低干预的管理，动态监测受损状况，实现海岸带景观的长期韧性发展^[27]。

4 分析与讨论

面向滨海城市海岸带景观受损空间的精准识别与科学表征需求，基于PLUS模型构建受损空间模拟与量化解析体系，结合空间统计分析方法搭建从景观演变模拟到受损空间特征判读的研究框架，为城市海岸带景观的科学管理与可持续发展提供技术支撑和理论基础。

1)分析探讨了以PLUS模型为核心工具的海岸带景观受损空间动态识别的可行性。以滨海城市海岸带景观为研究对象，初步构建了以“景观空间预测-受损空间识别-演变特征解析”为基本流程的景观受损空间研究框架。实证结果表明，PLUS模型能够有效模拟海岸带景观受损空间的分布规律，并结合动态度变化描述不同景观类型的演变特征，为精准预测滨海景观受损趋势提供数据支撑。未来研究可进一步拓展数据类型，如结合气候数据、污染指数、人类活动数据等信息，以期加强模型的动

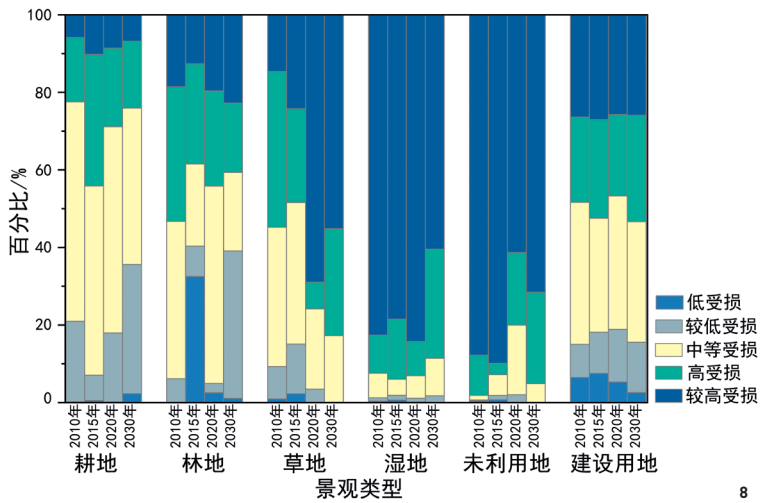
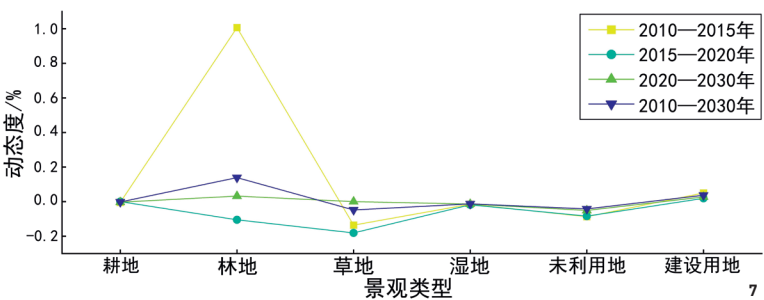


表4 盐城市海岸带景观因子探测结果

年份	Slope	Aspect	NDVI	FVC	LSTd	Pre	ET	Pop	GDP	CLCD
2010	0.004***	0.006*	0.082*	0.262***	0.244***	0.020*	0.029*	0.041***	0.131***	0.099*
2015	0.004***	0.008*	0.004*	0.104*	0.255*	0.041*	0.056*	0.104*	0.163**	0.053*
2020	0.004***	0.007*	0.015*	0.109*	0.227***	0.111***	0.021*	0.067*	0.164***	0.055*

注：*表示 $p>0.05$ ；**表示 $p<0.05$ ；***表示 $p<0.001$ 。

态适应性和响应能力。

2)从空间测量角度初步揭示了盐城市海岸带景观受损空间的集聚特性及演进机制。通过对各类景观空间分布量化解析与自相关分析,为传统“描述性解读”海岸带景观识别指向提供了具备分析、归纳和溯源的量化依据,提升了景观受损空间表征的可解释性。当前对于驱动因素采用以可收集到的开源数据为主,且解析尚未充分考虑因子间的非线性关系,未来研究可借助机器学习方法如随机森林回归、XGBoost等算法,探索受损空间与驱动因子之间的复杂耦合关系,提升对景观受损成因的科学解读能力。

3)相关技术同样具备广阔的纵深发展和横向拓展的潜力。研究视角方面,当前受损空间的评估体系主要基于景观格局变化与土地利用转换,未来可结合环境承载力、碳汇功能等指标,构建更具综合的受损评价体系,强化空间识别与动态表征的技术联动。此外,在受损机制解析方面存在局限,受损空间不仅涉及物理环境的变化,同时与政策调控密切相关,研究选用驱动因子仅为开源数据,未来可引入社会数据构建景观受损与社会福祉之间的驱动机制,以综合研判海岸带景观受损空间的形成模式。研究范畴方面,当前以盐城市海岸带为研究案例,但我国东部沿海地区海岸带景观类型多样、分布广泛,针对典型海岸带区域开展类型化研究,探索不同环境条件下景观受损空间特征及其修复策略。

5 结束语

在当前海岸带景观受损空间识别、动态表征与机制解析的研究背景下,本文基于PLUS模型结合GIS空间分析与地理探测方法,构建了海岸带景观受损空间的识别与表征研究框架,结合景观动态模拟、空间自相关聚类及因子交互探测,量化解析受损空间的分布特征、演变趋势与驱动机理。以盐城市海岸带为实证对象,结果表明研究区受损空间呈现显著的集聚与动态扩展特征,高受损空间集中在沿海湿地、围垦区及城市扩张前沿,受损强度受景观资源利用模式、经济开发活动及气候变化等因素影响明显,并在此基础上提出分类调控方案。以数字模拟与空间解析构建海岸带景观受损空间识别与动态研判体系,一定程度上丰富和拓展了滨海城市景观受损研究的深度与精度,为“保护修复”提供了数据支撑,为

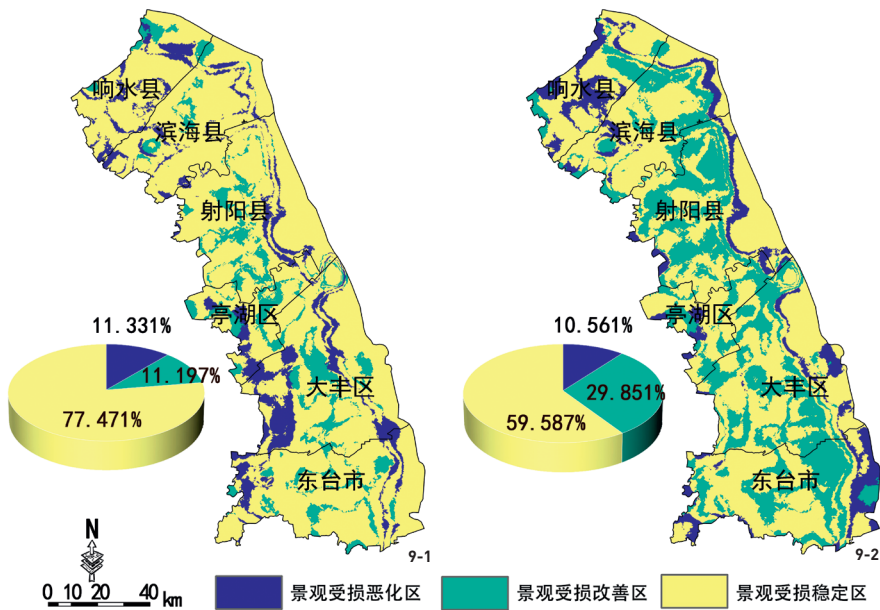


图9 2010—2020年(9-1)和2020—2030年(9-2)海岸带景观受损空间变化分布与面积占比图

“依陆向海”的可持续发展提供空间优化路径与景观调控方案。

推而广之,以模型优化驱动精准识别,以数据融合助力动态监测,以景观韧性调控支撑科学治理,海岸带景观受损空间研究正逐步迈向定量化、精细化、智能化的融合发展阶段。滨海城市的景观安全格局,不仅承载着海岸生态屏障的韧性需求,更映射出城市空间治理与景观修复的共生逻辑。

立足当下,未来研究应围绕不同类型的海岸带受损空间构建适应性修复技术体系,形成符合不同地域背景的修复策略,以提升景观调控的精准性。依托空间计算、机器学习与遥感大数据,推进海岸带景观受损监测检测与预警系统的构建,促使海岸带景观保护由静态研判向动态响应跃升,由局部解析向整体统筹拓展。

展望未来,海岸带景观研究需以系统思维锚固生态基底,以数据融通创新治理路径,构建陆海联动的保护响应机制。在时代变革的浪潮中,唯有在科学认知的基础上,兼顾现实诉求与远景规划,碧海银滩也可转化成金山银山,让景观之美与人居福祉共融共生,这正是风景园林专业在海洋研究中必须肩负的时代使命与实践担当。

注:文中图片均由作者绘制。

参考文献:

[1] 陈崇贤, 禹舜尧, 李志雄, 等. 海岸带韧性景观理论与实践研究进展[J]. 风景园林, 2023, 30(5): 19-27.
CHEN C X, YU S Y, LI Z X, et al. Research Progress in Theory and Practice of Resilient Landscape in Coastal Zone[J]. Landscape Architecture, 2023, 30(5): 19-27.

[2] 周燕, 刘梦瑶, 王丽娜, 等. 基于生态网络优化对比的国土空间生态修复策略研究[J]. 中国园林, 2024, 40(9): 43-49.
ZHOU Y, LIU M Y, WANG L N, et al. Research on Ecological Restoration Strategy of Territorial Space Based on Ecological Network Optimization and Comparison[J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40(9): 43-49.

[3] 文超祥, 刘健泉. 基于陆海统筹的海岸带空间规划综述与展望[J]. 规划师, 2019, 35(7): 5-11.
WEN C X, LIU J X. Review and Prospect of Coastal Zone Planning Based on Land and Sea Integration[J]. Planners, 2019, 35(7): 5-11.

[4] 王凯, 徐辉, 骆羊伊, 等. 基于城市空间复杂性关系的城市体检方法研究[J]. 自然资源学报, 2025, 40(1): 91-103.
WANG K, XU H, LUO Q Y, et al. Research on urban health check methods based on the complexity of urban spatial relationships[J]. Journal of Natural Resources, 2025, 40(1): 91-103.

[5] 沈杨, 汪晗, 聂鑫. 基于景观生态风险和生态系统服务价值的海岸带地区生态修复分区研究: 以防城市为例[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(3): 1066-1076.
SHEN Y, WANG H, NIE X. Research on ecological restoration zoning in coastal zone based on landscape ecological risk and ecosystem service value: A case study of

- Fangchenggang City[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(3): 1066–1076.
- [6] LIN S. Impact of Forest Landscape Patterns on Ecological Quality in Coastal Cities of Fujian, China, from 2000 to 2020[J]. Forests, 2024, 15(11): 1925.
- [7] 陈慕婷, 周剑云, 鲍梓婷, 等. 省域湿地退化风险评价研究: 基于地理格网与景观特征单元的多尺度分析[J]. 中国园林, 2023, 39(4): 52–58.
- CHEN M T, ZHOU J Y, BAO Z T, et al. Study on Risk Assessment of Provincial Wetland Degradation: Based on Multi-scale Analysis of Geographical Grids and Landscape Character Units[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(4): 52–58.
- [8] 张华兵, 王娟, 刘玉卿, 等. 人类活动与互花米草扩张对滨海湿地生境质量演变的影响: 以盐城国家级珍禽自然保护区核心区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1153–1163.
- ZHANG H B, WANG J, LIU Y Q, et al. Effects of Human Activities and the Expansion of *Spartina Alterniflora* on the Evolution of Habitat Quality of the Coastal Wetland: Taking the Core Area of Yancheng National Nature Reserve as An Example[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(5): 1153–1163.
- [9] 张海涛, 李加林, 刘永超. 2001—2020年东海区大陆海岸带复合生态系统韧性时空演变[J]. 海洋通报, 2024, 43(1): 127–139.
- ZHANG H T, LI J L, LIU Y C. Spatiotemporal evolution of the resilience of the coastal complex ecosystem in the East China Sea from 2001 to 2020[J]. Marine Science Bulletin, 2024, 43(1): 127–139.
- [10] WANG C, WANG G, DAI L, et al. Diverse usage of waterbird habitats and spatial management in Yancheng coastal wetlands[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106583.
- [11] 邵钰涵, 孟钰, 殷雨婷. 1982—2022年海岸带景观研究进展与启示[J]. 风景园林, 2023, 30(5): 10–18.
- SHAO Y H, MENG Y, YIN Y T. Achievements and Implications of the Research on Landscape in Coastal Zone from 1982 to 2022[J]. Landscape Architecture, 2023, 30(5): 10–18.
- [12] 陈崇贤, 方言, 闫倩倩, 等. 应对海平面上升问题的城市土地利用格局脆弱性多情景模拟评估及应对策略[J]. 中国园林, 2023, 39(3): 27–33.
- CHEN C X, FANG Y, YAN Q Q, et al. Multi-scenario Simulation Assessment of Landuse Pattern Vulnerability and Coping Strategies in Response to Sea Level Rise[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(3): 27–33.
- [13] 袁涵蒙, 唐豪, 许植桐, 等. 陆海统筹视角下滨海地区国土空间生态修复路径与实践[J]. 规划师, 2024, 40(2): 89–97.
- YUAN H M, TANG H, XU Z T, et al. Path and Practice of Territorial Space Ecological Restoration in Coastal Areas from the Perspective of Land-Sea Integration[J]. Planners, 2024, 40(2): 89–97.
- [14] BISWAS M, BANERJI S, MITRA D. Land-use – land-cover change detection and application of Markov model: A case study of Eastern part of Kolkata[J]. Environment Development and Sustainability, 2020, 22(4): 4341–4360.
- [15] FENG Y, YANG Q, HONG Z, et al. Modelling coastal land use change by incorporating spatial autocorrelation into cellular automata models[J]. Geocarto international, 2018(4/6): 33.
- [16] LIU P, HU Y, JIA W. Land use optimization research based on FLUS model and ecosystem services – setting Jinan City as an example[J]. Urban Climate, 2021, 40: 100984.
- [17] LIANG X, GUAN Q, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.
- [18] 禹舜尧, 陈崇贤. 基于网络图像的海岸带景观感知意象及空间分异研究: 以中国12个沿海城市为例[J]. 园林, 2024, 41(1): 101–109.
- YU S Y, CHEN C X. Perception Image and Spatial Differentiation of Coastal Landscape Based on Internet Photos: Taking 12 Coastal Cities in China as Examples[J]. Landscape Architecture Academic Journal, 2024, 41(1): 101–109.
- [19] 黄晓杰, 丁金华, 汪大庆. 苏南水网地区绿色空间景观生态风险时空演变与调控策略[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(6): 1283–1292.
- HUANG X J, DING J H, WANG D Q. Spatiotemporal evolution and regulation strategies of ecological risks in green space landscape in the water network area of southern Jiangsu[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(6): 1283–1292.
- [20] 倪畅, 周凯, 郑曦. 基于景观生态风险评价的景观格局优化: 以北京市浅山区为例[J]. 风景园林, 2021, 28(5): 80–85.
- NI C, ZHOU K, ZHENG X. Landscape Pattern Optimization Based on Landscape Ecological Risk Assessment: A Case Study of Shallow Mountain Area in Beijing[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(5): 80–85.
- [21] 李哲, 卢馨逸, 施佳颖, 等. 基于小圩形态指数的宣芜平原圩田景观肌理量化研究: 以固城湖永丰圩为例[J]. 中国园林, 2023, 39(1): 41–46.
- LI Z, LU X Y, SHI J Y, et al. Quantitative Research of Landscape Texture for Polders in Xuanwu Plain Based on Morphological Index: A Case Study of Yongfeng Polder, Gucheng Lake[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(1): 41–46.
- [22] ZHOU T, LIU H, GOU P, et al. Conflict or Coordination? Measuring the relationships between urbanization and vegetation cover in China[J]. Ecological Indicators, 2023, 147: 109993.
- [23] LIU W, XUE Y, SHANG C. Spatial distribution analysis and driving factors of traditional villages in Henan province: a comprehensive approach via geospatial techniques and statistical models[J]. Heritage Science, 2023, 11(1): 1–21.
- [24] 张华兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 自然和人工管理驱动下盐城海滨湿地景观格局演变特征与空间差异[J]. 生态学报, 2012, 32(1): 101–110.
- ZHANG H B, LIU Y H, HAO J F, et al. Spatiotemporal characteristics of landscape change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 101–110.
- [25] GIUPPONI C. Coastal Socio-Ecological Systems Adapting to Climate Change: A Global Overview[J]. Sustainability, 2024, 16(22): 10000.
- [26] 黄欢, 马海艳, 杨秀群. 基于自然的解决方案(NbS)视角下低成本蓝绿空间景观提升策略: 以盐城外滩·新洋港南岸景观带为例[J]. 中国园林, 2022, 38(S2): 17–20.
- HUANG H, MA H Y, YANG X Q. Low-cost Landscape Promotion Strategy of Bluegreen Space Based on Nature-based Solutions (NbS): A Case Study of Yancheng Xinyang Port South Bank Landscape Belt Design[J]. Chinese Landscape Architecture, 2022, 38(S2): 17–20.
- [27] 唐欣瑜, 李永. 海岸带开发利用与生态保护综合管理的机制优化[J]. 环渤海经济瞭望, 2024(2): 49–51.
- TANG X Y, LI Y. Optimization of the Mechanism for Integrated Management of Coastal Zone Development and Utilization and Ecological Protection[J]. Economic Outlook the Bohai Sea, 2024(2): 49–51.

(编辑/金花)

作者简介:

侯冰钰

1998年生/女/山东菏泽人/东南大学建筑学院景观学系在读博士研究生/研究方向为风景园林规划与设计(南京 210096)

李 哲

1976年生/男/黑龙江大庆人/东南大学建筑学院景观学系系主任, 教授, 博士生导师/研究方向为园林与景观设计、数字景观及其技术(南京 210096)

吴欣莹

2002年生/女/广东中山人/东南大学建筑学院景观学系在读硕士研究生/研究方向为数字景观及其技术(南京 210096)

赵玉龙

2000年生/男/湖北十堰人/东南大学建筑学院景观学系在读硕士研究生/研究方向为园林与景观设计(南京 210096)

丁昊楠

2001年生/男/江苏南京人/东南大学建筑学院景观学系在读硕士研究生/研究方向为园林与景观设计(南京 210096)

Spatial Identification and Representation of Damaged Landscapes in Coastal City Zones: A Case Study of the Yancheng Coastal Zone

HOU Bingyu, LI Zhe*, WU Xinying, ZHAO Yulong, DING Haonan

Abstract: Addressing the Land-Sea Coordination plan and the development of resilient cities, the systematic identification and dynamic evaluation of damaged coastal landscape areas have increasingly emerged as critical concerns for the high-quality advancement of coastal city landscapes in China. Damaged space, which exhibits clear signs of problems such as reduced function, weakened structure, and lower health in coastal landscapes, is the primary target for assessing the quality and strength of urban coastal areas. In recent years, mechanisms for evaluating environmental quality, exemplified by Urban Physical Examination, have been progressively and comprehensively refined. These identified mechanisms may offer technical support for the identification, assessment, and management of degraded landscape areas and facilitate the transition of coastal landscape research from static evaluation to systematic diagnosis and targeted governance. Despite the rapid advancement of spatial analysis and prediction technologies, it is of paramount importance to develop quantitative, parameterized methods and tools tailored to the needs of damaged landscapes. This development is essential for the precise identification, characterization, and analysis of coastal landscape damage, as well as for effectively interpreting driving mechanisms and ultimately improving the efficacy of decision-making in urban coastal landscape regulation strategies. This study addresses current challenges in research on damaged coastal landscapes, including insufficient systematic analysis, incomplete identification systems, low simulation accuracy, and unclear regulatory strategies. This study integrates landscape resilience theory with existing research in landscape ecology. The researcher concentrates explicitly on elucidating the dynamic evolution patterns inherent in coastal city landscapes and seeks to establish a robust technical framework for the identification and representation of damaged coastal landscape spaces. Regarding the research methodology, the PLUS model is adopted to develop a dynamic simulation and representation analysis system that is specifically designed for landscape degradation. By leveraging GIS platforms to integrate land-use transfer matrix analysis and spatial autocorrelation techniques, this study distills core degradation trends and reveals spatial aggregation patterns. Additionally, it incorporates both single-factor and interaction-detection algorithms from geographic detector models to conduct precise identification, dynamic simulation, and mechanistic analysis of degradation spaces within urban coastal landscapes. In terms of empirical

investigation, the researcher specifically selected the coastal zone of Yancheng City in Jiangsu Province to conduct a representative case study. Specifically, landscape-type data spanning 2010-2020, together with a comprehensive database of natural and socio-economic driving factors, were used for the assessment. The PLUS model and geographic detector were employed to simulate and analyze the evolutionary trajectories and spatial clustering characteristics of degraded areas. The analytical process then examined the pathways of landscape transformation and assessed the impacts of various driving processes. The empirical findings of this study reveal that damaged landscape areas within the study region exhibit a general spatial pattern characterized by aggregation along the coastline and expansion toward the interior. Specific locales, including coastal wetlands, reclaimed land areas, and the peripheries of urban expansion zones, are identified as notably high-value clusters of landscape degradation. Among natural landscape types, forests and wetlands have undergone considerable damage. The results from factor detection indicate that vegetation cover scale, climatic temperature conditions, population density, and land-use changes are the primary determinants of the evolution of degraded areas. These factors demonstrate not only significant individual explanatory power but also notable synergistic effects and interactive influences. Consequently, restoration and rehabilitation initiatives should be executed in a scientifically coordinated manner. In addition, strategic focus should be directed towards the multi-level governance of affected landscape areas and the integrated management of the principal driving variables and their interaction mechanisms. This paper presents a methodological framework for identifying and representing damaged coastal landscapes using the PLUS model. This framework allows researchers to perform accurate detection and simulation of damaged areas by integrating multi-source spatiotemporal data. Apart from that, the proposed approach offers robust technical support for the systematic diagnosis and strategic spatial planning of urban coastal landscapes. Furthermore, this paper provides a replicable methodological reference for future practices in landscape assessment, monitoring, and regulatory decision-making. The study results can also offer contributions to the broader goals of sustainable coastal zone management and resilient urban development.

Keywords: landscape architecture; coastal zone landscape; damaged space; PLUS model; damaged representation; spatial identification

Biography

HOU Bingyu, female, born in 1998 in Heze, Shandong Province, Ph.D. candidate of Department of Landscape Architecture, School of Architecture, Southeast University, research area: garden and landscape design (Nanjing 210096)

LI Zhe, male, born in 1976 in Daqing, Heilongjiang Province, Head, Professor, and Doctoral Supervisor of Department of Landscape Architecture, School of Architecture, Southeast University, research area: garden and landscape design, digital landscape and technology (Nanjing 210096)

WU Xinying, female, born in 2002 in Zhongshan, Guangdong Province, Master's student of Department of Landscape Architecture, School of Architecture, Southeast University, research area: digital landscape and technology (Nanjing 210096)

ZHAO Yulong, male, born in 2000 in Shiyan, Hubei Province, Master's student of Department of Landscape Architecture, School of Architecture, Southeast University, research area: garden and landscape design (Nanjing 210096)

DING Haonan, male, born in 2001 in Nanjing, Jiangsu Province, Master's student of Department of Landscape Architecture, School of Architecture, Southeast University, research area: garden and landscape design (Nanjing 210096)