

山东省县域海岸带韧性时空格局演变及影响因素研究

谭子怡¹, 盖 美²

¹辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连

²辽宁师范大学海洋可持续发展研究院, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年10月13日; 录用日期: 2025年11月12日; 发布日期: 2025年11月19日

摘 要

海岸带作为社会-自然耦合系统, 其人地系统韧性演变对可持续发展具有重要意义。本文以山东省34个沿海区县为研究对象, 基于2005~2022年长时序数据, 从“人”“地”“人地冲突”三个维度构建评价指标体系, 运用可变模糊识别模型与障碍度模型, 探究海岸带人地系统韧性的时空格局演变及影响因素。结果表明: 1) 时序上, 研究期内山东省沿海区县韧性水平整体呈波动上升趋势, 2015年后进入加速提升阶段; 空间上, 高韧性区县集中于青岛核心区域, 烟台、威海部分区县因环境承载力与政策调整限制, 韧性提升滞后, 形成“东高西低、南快北缓”的梯度格局。2) 障碍度分析显示, 系统层障碍度呈“人 > 人地冲突 > 地”的上升态势, 指标层主导障碍因子从2005~2015年的风暴潮发生频次转变为2020~2022年的生活垃圾无害化处理率, 港口货物吞吐量持续为关键障碍因子。研究可为优化海岸带治理策略、平衡生态保护与经济发展提供理论支撑, 丰富人地系统韧性研究的微观尺度实证案例。

关键词

山东省, 区县级, 海岸带, 人地系统韧性, 障碍度

Study on the Temporal and Spatial Pattern Evolution and Influencing Factors of County-Level Coastal Zone Resilience in Shandong Province

Ziyi Tan¹, Mei Gai²

¹School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

²Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Received: October 13, 2025; accepted: November 12, 2025; published: November 19, 2025

文章引用: 谭子怡, 盖美. 山东省县域海岸带韧性时空格局演变及影响因素研究[J]. 可持续发展, 2025, 15(11): 207-222. DOI: 10.12677/sd.2025.1511324

Abstract

As a social-ecological coupled system, coastal zone human-land system resilience evolution is critical for sustainable development. This study examines 34 coastal counties in Shandong Province (2005~2022), constructing an evaluation framework across “human”, “land” and “human-land conflict” dimensions using variable fuzzy recognition and obstacle degree models. Results show: 1) Temporally, resilience exhibited fluctuating growth with accelerated improvement post-2015. Spatially, high-resilience areas concentrated in Qingdao's core, while Yantai and Weihai counties lagged due to environmental carrying capacity and policy constraints, forming an “east-high-west-low, south-fast-north-slow” gradient. 2) Obstacle degree analysis reveals system-level barriers in ascending order: “human > human-land conflict > land”. Dominant factors shifted from storm surge frequency (2005~2015) to domestic waste treatment rate (2020~2022), with port cargo throughput remaining a key constraint. This research provides theoretical support for coastal governance optimization and ecological-economic balance, enriching micro-scale empirical studies on human-land system resilience.

Keywords

Shandong Province, County-Level, Coastal Zone, Human-Land System Resilience, Obstacle Degree

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海岸带作为海洋和陆地的过渡地带,具有丰富的自然资源和复杂的生态系统,承载着重要的环境、经济和社会功能。但由于社会经济发展速度过快造成环境污染、自然灾害频发、自然资源萎缩和浪费、生态系统破坏等问题[1],增加海岸带脆弱且敏感特性,导致海岸带抵抗灾害能力下降、海岸带人地冲突越来越明显[2][3]。为缓解越发激烈的人地冲突,中国政府为此不断探索海岸带治理和管理措施,并出台《海岸线保护与管理条例》,明确规定了海岸带的保护措施和管理责任[4];进一步完善有关海岸带及其他海洋区域的综合治理。海岸带在发展过程同时受到人为因素与自然因素的双重作用。海岸带人地系统受自然与人为因素双重胁迫,在长期的发展过程中生态退化、人地矛盾凸显,海岸带人地系统韧性断层下降[5]。通过本项研究,其意在解析人地系统协调作用机理,破解发展与保护冲突,增强系统抗扰能力及恢复能力,为优化治理策略、平衡生态与社会经济发展、提升可持续性提供理论支撑[6]。

随着韧性的研究内容不断丰富,学者们对于海岸带有关韧性的研究主要聚焦于以下:1) 有关海岸带韧性的概念确定。学者们主要通过对海岸带不同的研究角度出发如海岸带灾害韧性[7]、海岸带地貌韧性[8]、海岸带生态韧性、海岸带社会经济韧性等来对海岸带韧性的概念进行确定[9]。2) 有关海岸带韧性的测度。韧性测度研究的主要内容是对海岸带韧性的研究构建一套兼具理论严谨性与实践可行性的评估体系[10]-[12],本质是通过将韧性概念拆解、多维度指标体系整合、动态量化分析,将海岸带系统的韧性这一抽象属性转化为可感知、可比较、可应用的科学结论。研究的测度多是用 InVEST 模型、灾害风险评估框架等模型对海岸带韧性进行测度,但这些模型大多数都是从比较单一的维度出发进行分析,缺少多层次、多维度的综合分析模型[13]。3) 部分学者聚焦海岸带韧性影响因素,从自然或人为单一维度展开研

究, 采用单项指标分析, 未充分结合因素, 对各个因素的动态交互及协同/拮抗机制探究不足, 并且对多方面尺度、长时序的交互效应研究薄弱, 缺乏深化理论框架。

海岸带作为典型社会-自然耦合系统, 其韧性内涵需立足人地系统交互逻辑: 既有研究对韧性的界定多聚焦自然或社会单维特征, 未能充分彰显人地“结构-过程”的韧性关系本质。山东省沿海区县兼具环渤海区位禀赋与陆海统筹发展特性, 人地关系的时空异质性为解析韧性演化提供独特样本。本文立足人地系统韧性的内涵, 以可变识别模糊模型、障碍度模型为核心, 突破传统测度的单维局限, 尝试从人地冲突关系视角解构海岸带韧性的时空演化机制, 为后续维度分析奠定理论与方法基石[14][15]。因此, 本文主要提供的价值在于: 第一, 与以往学者的研究多聚焦于市区乃至省份的研究格局不同, 本研究从微观角度出发, 聚焦于山东省沿海区县, 开展海岸带研究范围新领域, 并将地理学长期以来探究的人地关系为核心目标与系统韧性研究相结合, 探索在新视角下海岸带韧性变化受到的自然和人为因素的影响, 拓展韧性研究内容。第二, 针对既往海岸带韧性测度中指标边界模糊化、等级划分及人地冲突因素相结合解析不足的缺陷, 引入可变识别模糊模型优化韧性等级判别。该模型突破传统静态阈值约束, 通过“空间异质性-时间动态性”双维识别框架, 精准捕捉海岸带韧性从“量变”到“质变”的模糊过渡; 结合自然本底(如生态能力)与人文扰动(如开发强度), 解析人地系统从“协调”到“冲突”的临界状态; 并与障碍度模型协同, 以韧性等级为基准, 从因素贡献再到指标偏离的双维度拆解主导因素制约机制, 为韧性提升的靶向设计奠定方法基础。第三, 运用障碍度模型, 解析指标体系内对人地系统韧性演变的主要与次要影响, 在此基础上, 进一步探究各主要与次要因素与人地系统韧性空间演变特征和规律, 弥补当前研究中对各个因素协同解析的不足, 重点强化对“各因素扰动/支持”动态交互过程[16][17], 厘清因素作用过程中的协同/拮抗机制, 聚焦多尺度、长时序维度下的相互效应, 深化动态关联的理论框架, 为揭示人地系统韧性演化的复杂路径提供理论支撑[18][19]。

2. 研究方法 with 数据来源

2.1. 人地系统韧性形成的影响机理

基于人地系统耦合理论与可持续性科学框架, 海岸带人地系统韧性的形成是“人-地-冲突”三维子系统动态交互的涌现性结果。该系统通过物质循环、能量流动与信息反馈实现耦合, 其韧性水平取决于子系统内部结构稳定性及系统间协同调节能力。

2.1.1. “人”子系统的能动反馈机制

作为系统的能动主体, “人”子系统通过社会经济结构、技术创新与政策调控三重路径影响韧性水平。根据社会-生态系统(SES)理论, 人口密度与产业结构构成韧性调节的基础变量: 高人口密度区域虽面临资源分配压力, 但人力资本集聚可提升灾害响应效率; 第三产业占比提升通过降低资源依赖度增强经济缓冲能力, 而重化工业主导模式则可能因产业链刚性削弱系统韧性[20]。城市化进程呈现双重效应: 土地利用强度增加导致生态缓冲空间压缩, 但基础设施投资(如海防工程、污染治理设施)可显著提升系统抗扰能力。障碍度模型显示, “人均GDP”与“人口素质”存在交互效应, 当大专以上人口比例达到一定程度时, 环保投入的程度也会提升, 说明了人力资本对韧性的正向调节作用。

2.1.2. “地”子系统的生态支撑机制

自然本底条件构成韧性的物质基础, 其核心是生态系统的抵抗力与恢复力。基于生态系统服务理论, 海岸线类型与滨海湿地面积决定系统缓冲容量: 淤泥质海岸带的消浪能力较砂质海岸低, 但盐沼湿地的碳汇功能可提升气候适应韧性。自然灾害因子中, 风暴潮发生频次与韧性水平存在一定比例关系, 年均3次以下的风暴潮可通过生态修复实现自然恢复, 超过阈值则需人工干预重建系统结构[21]。

2.1.3. “人地冲突”子系统的耦合协调机制

人类活动与自然系统的交互界面构成韧性演化的关键调节层。人类活动与自然系统的交互界面构成韧性演化的关键调节层。基于耦合协调理论，该子系统通过物质代谢、能量转换与信息反馈实现动态平衡，其协调程度取决于人类开发强度与自然承载力的匹配关系。当人类活动强度超过自然系统的弹性阈值时，系统进入冲突主导阶段，表现为“开发 - 退化 - 更开发”的恶性循环；而当开发强度处于生态阈值内且辅以适应性调控时，可形成“保护 - 发展 - 再保护”的良性循环。

2.2. 山东省沿海区县概况

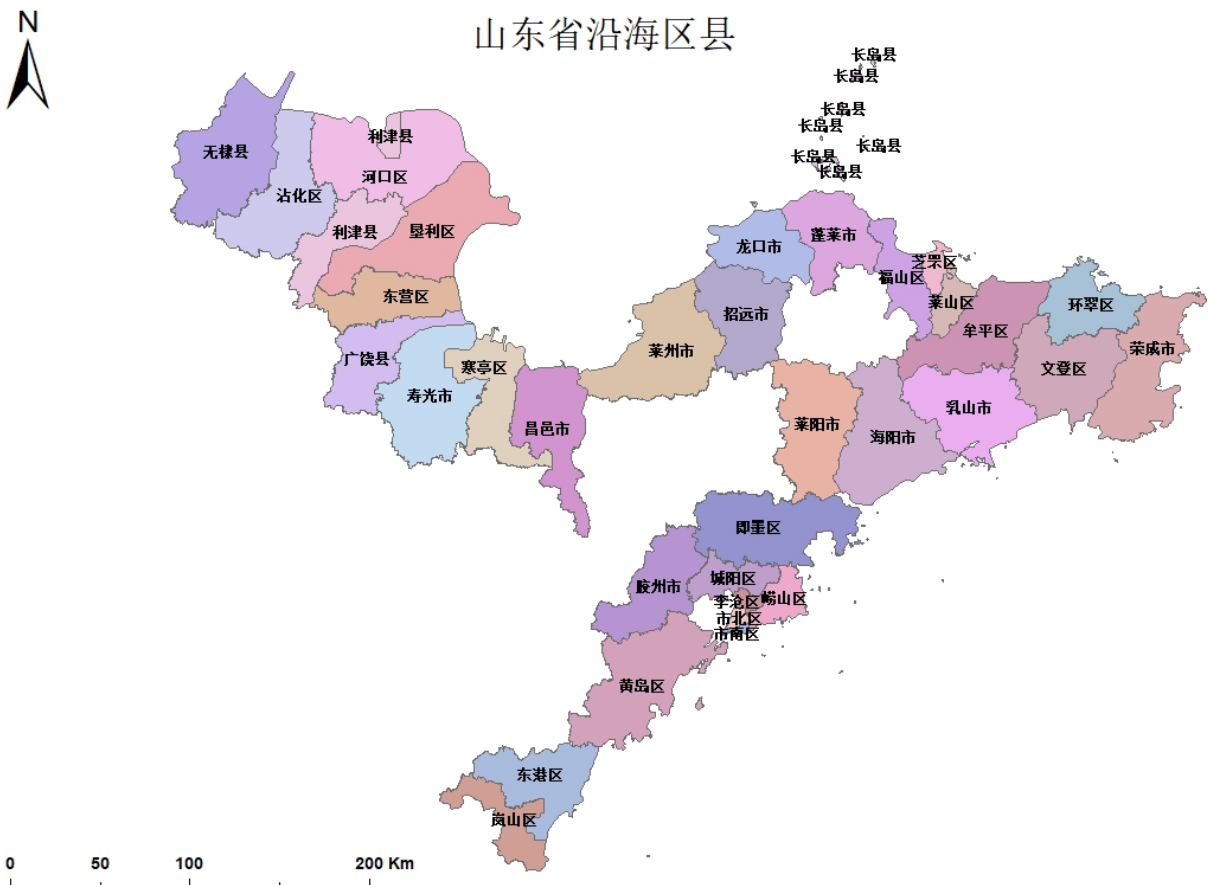


Figure 1. Distribution map of coastal counties and districts in Shandong province
图 1. 山东省沿海区县分布图

山东省沿海区县涵盖青岛、烟台、威海、日照、东营等市下属的共 34 个沿海区县(见图 1，因长岛县数据缺失，故不提及)，作为环渤海经济带南翼核心与黄河流域陆海统筹枢纽，区位优势突出。2024 年，该区域以全省 7.8%的土地面积，贡献全省 36%的 GDP，第二产业增加值达 1.8 万亿元，其中传统重工业(石化、钢铁、船舶制造)占比超过 65%，但轻工业(海洋食品加工、新能源装备)占比仅 32%，产业结构“重化依赖”特征显著，轻重工业失衡问题制约抗经济风险能力。资源禀赋上，山东沿海坐拥海岸线 3024 公里(占全国 1/10)，海域面积 15.95 万平方千米，青岛港、烟台港 2024 年货物吞吐量合计突破 12 亿吨；海水养殖面积达 28 万公顷，海上风能可开发量超 2200 万千瓦。然而，生态与经济的冲突日益尖锐。2024 年，风暴潮灾害造成直接经济损失 4.8 亿元，赤潮发生 6 次，累计影响面积 180 平方千米；石化、钢铁集

群年排海废水超 4500 万吨,致近岸海域富营养化指数较 2015 年上升 12%,海岸带湿地以年均 0.8%的速率萎缩,渔业资源捕捞量较 2010 年下降 37%。重化产业主导的增长模式抗风险能力弱,在“双碳”约束下,高耗能产业绿色转型需投入超千亿元,却面临技术迭代滞后与生态修复资金挤占的困境;同时,轻工业附加值偏低(海洋食品加工利润率不足 8%)、高新技术产业占比仅 13%,产业升级动能不足。这种“重污染-高消耗-低效能”的发展路径,使经济增长、产业迭代与生态保护陷入协同博弈局面,严重影响了山东省海岸带地区可持续发展。

2.3. 方法及数据来源

2.3.1. 熵权法

熵权法是一种用于多指标决策中的权重分配方法,其基本原理是利用信息熵的概念来评估各个指标的重要性。通过熵权法,我们可以量化“人”“地”“人地关系”三个系统层以及指标之间的关系,并解释它们在海岸带人地系统韧性变化中的相互作用。

熵权反映了指标的重要性,熵值越小,指标信息越集中,权重越大。权重 w_j 的计算方式为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} (j = 1, 2, \dots, n)$$

2.3.2. 可变模糊识别模型

可变模糊识别模型是模糊逻辑和模糊系统的一种扩展,旨在处理在不确定性和模糊性环境下的识别问题。该模型可以用于模式识别、分类、预测等多种应用,特别是在处理模糊、不完整或不确定的信息时,具有较好的性能,其模型为:

$$V_A(u) = 1 / \left[1 + (d_g / d_b)^a \right]$$

式中: $V_A(u)$ 为识别对象 u 对对立基本模糊属性 A 的相对隶属度; a 为优化准则参数, $a=1$ 为最小一乘方准则, $a=2$ 为最小二乘方准则,具体公式参考[22]。

在此基础上,采用级别特征值公式,利用级别变量(h)隶属于各等级的相对隶属度信息,作为可变模糊集理论判断、识别和决策的准则。级别特征值 $H(u)$ 公式如下:

$$H(u) = \sum_{h=1}^c [V_A(u) \times h]$$

$H(u)$ 值即为海岸带人地系统韧性指数,并结合相关研究中可变模糊识别模型级别特征判断准则,建立海岸带人地系统韧性评价分级标准,将其分为 5 个等级(见表 1)。

Table 1. Evaluation grade table of resilience level of coastal zone human-land system

表 1. 海岸带人地系统韧性水平评价等级表

等级	海岸带人地系统韧性水平评价等级	取值范围
1 级	低韧性	[2.5, 2.75)
2 级	较低韧性	[2.75, 3.0)
3 级	中韧性	[3.0, 3.25)
4 级	较高韧性	[3.25, 3.5)
5 级	高韧性	[3.5, 3.75]

2.3.3. 障碍度模型

障碍度模型是一种用来评估和分析潜在障碍对目标实现影响的方法, 采用因子贡献度、指标偏离度和障碍度指标建立山东省海岸带人地系统韧性的障碍度模型[23]。其中, 因子贡献度表示单项指标对各个区座城市人地系统韧性的影响程度; 指标偏离度代表单项指标与指标理想值的差距; 通过障碍度大小可以确定不同评价指标(即障碍因子)对抑制各区座城市人地系统韧性的主次关系, 指标的障碍度越大, 表示该指标对抑制区座城市人地系统韧性水平增长的影响越大[24]。障碍度计算公式如下:

$$A_j = \frac{W_j(1 - X'_{ij})}{\sum_{i=1}^{30} W_j(1 - X'_{ij})}$$
$$O_j = \sum A_j$$

式中: 障碍度 A_j 为第 j 项指标对人地系统韧性的影响程度; W_j 表示第 j 项指标的人地系统韧性权重, 即因子贡献度; X'_{ij} 为第 i 个区座城市第 j 项指标的标准化数值; $1 - X'_{ij}$ 即指标偏离度, 表示单项指标与 100% 的距离[25]。 O_j 为系统层障碍度。

2.4. 指标体系

指标体系的建立与选取

从科学性原则来看, 基于人地系统韧性理论及海岸带动态交互特征, 内涵明确、逻辑严谨, 能客观反映“人-地-人地冲突”维度及“压力-适应调整力-转换力”准则层的核心机制, 如“人口素质”指标对应“适应调整力”中人类应对环境变化的能力。而其中“人”指个体、群体、社区以及更广泛的社会系统, 涵盖人口总量、人口素质、就业结构等方面, 同时涉及人类在自然环境中的生活、利用和改造自然资源的能力, 以及自然环境对人类生活的影响。“地”则指自然环境, 包括生态系统、地貌特征、土壤、水源、气候、植物、动物等自然因素, 其变化(如污染、物种多样性波动等)会直接影响人类活动, 进而引发气候变化、资源枯竭、生态失衡等问题。“人地冲突”体现了人类与自然环境之间的动态互动, 包括人类如何利用自然资源、适应环境变化, 以及人类活动对自然环境的影响, 揭示了二者复杂而紧密的联系。从系统性原则来看, 指标需覆盖“人”“地”“人地冲突”三个维度, 且每个准则层均有对应指标, 避免维度缺失。从可操作性原则来看, 指标数据需易于获取且可量化, 优先选择统计年鉴(如人口总量)、遥感监测(如 NDVI)、政府公报(如环保投入)等公开或易采集数据, 避免抽象概念指标。所以本文从“人”“地”“人地冲突”三个维度展开, 以“压力”“适应调整力”“转换力”三个准则层构建海岸带人地系统韧性评价指标体系(见表 2)。

Table 2. Evaluation index system of coastal zone human-land system resilience

表 2. 海岸带人地系统韧性评价指标体系

目标层	系统层	准则层	指标层	指标含义
海岸带人地系统韧性	人	压力	A1 常住人口总量	表征海岸带人口规模基数
			A2 人口流入量	表征海岸带人口流动能力
			A3 失业登记人员数	表征海岸带劳动力的抵抗能力
			A4 文盲人口占比	表征海岸带人口文化素质抵御水平
		适应调整力	A5 海岸带人口密度	表征海岸带人口集聚程度
			A6 人口自然增长率	表征海岸带人口自然变动情况
			A7 海岸带城市化率	表征海岸带人口经济活动水平

续表

地	转换力	A8 沿海城市就业人数	表征海岸带人口劳动力生产水平
		A9 第三产业从业人员占比	表征海岸带就业结构转型优化能力
		A10 海洋科研机构 R & D 人数	表征海岸带人才储备支持力
	压力	B1 风暴潮发生频次	表征海洋灾害对海岸带冲击强度
		B2 单位面积可利用耕地面积	表征海岸带耕地资源供给
	适应调整力	B3 海岸线长度	表征海岸带空间基本属性
		B4 海岸带海域面积	表征海岸带空间基本属性
		B5 海岸带湿地面积	表征近岸生态系统适应灾害的冗余空间
		B6 人均绿地面积	表征海岸带绿化环境程度
		B7 海水养殖面积	表征海岸带渔业资源水平
	转换力	B8 近岸海域水质达标率	表征海岸带海域水质健康程度
		B9 地表水断面水质优良率	表征海岸带水环境生态转换能力
		B10 海岸带景观干扰度指数	表征海岸带地物受外部干扰程度
		B11 归一化植被指数(NDVI)	表征海岸带植被覆盖状况
	压力	C1 海岸带生产总值	表征海岸带经济发展水平
		C2 港口货物吞吐量	表征海岸带港口贸易流通能力
		C3 海岸带生物丰富度指数	表征海岸带生态系统的活跃程度
		C4 工业废水直排入海量	表征海水质量状况
人地冲突	调整适应力	C5 沿海环境污染治理投资额占比	表征海岸带环境改善程度
		C6 城镇居民人均可支配收入	表征海岸带居民风险抵抗力
	转换力	C7 海岸带社会经济密度	表征海岸带资源经济效益和利用效率
		C8 生活垃圾无害化处理率	表征海岸带生活垃圾处理效率程度
		C9 科学技术支出总	表征海岸带科技投入水平

2.5. 数据来源

数据以山东省各沿海区县为研究对象, 对研究区域 2005 年到 2022 年的海岸带韧性进行对比分析。指标所取数据来源于历年的《中国统计年鉴》《中国海洋经济统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国渔业统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国海洋生态环境状况公报》《中国海洋灾害公报》《中国县域统计年鉴》以及相关各省市统计年鉴、公报; 部分空间数据需要通过遥感影像解译; 此外, 部分数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)、中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)、中国科学院海洋研究所海洋大数据中心(<http://msdc.qdio.ac.cn/>)等有关数据网站。

3. 沿海区县城市人地系统韧性时空演变分析

3.1. 时序分析

核密度估计曲线(图 2(左))探究时空演变: 2005~2022 年曲线整体右移, 印证韧性水平持续进阶。2005 年曲线呈正态分布、峰形紧凑, 反映区县韧性发展趋同、层次偏低; 2010~2022 年演变为非严格单峰分布, 波峰高度低于 2005 年, 揭示区域差距扩大但总体能级跃升; 2010 年后曲线渐趋正态, 波峰宽度拓展, 表征韧性分布离散化、发展路径多元化。波峰高度持续下降, 映射韧性从“同质低水平”向“多元高质量”进阶, 系统均衡性与抗扰能力同步增强。

通过可变模糊识别模型测算 2005~2022 年山东省沿海区县人地系统海岸带韧性指数, 结合箱线图(图 2(右))剖析时序特征: 整体呈波动上升态势, 分阶段差异显著。2005~2015 年, 韧性稳步增长但增幅缓和, 源于沿海开放政策驱动经济初步发展, 但生态保护与系统协同机制尚未完善, 韧性基数仍处低位。2015~2022 年增幅显著放大, 处于向高质量发展转向过程, 因此推动经济-生态-社会要素耦合优化, 韧性进入加速提升期[26]。

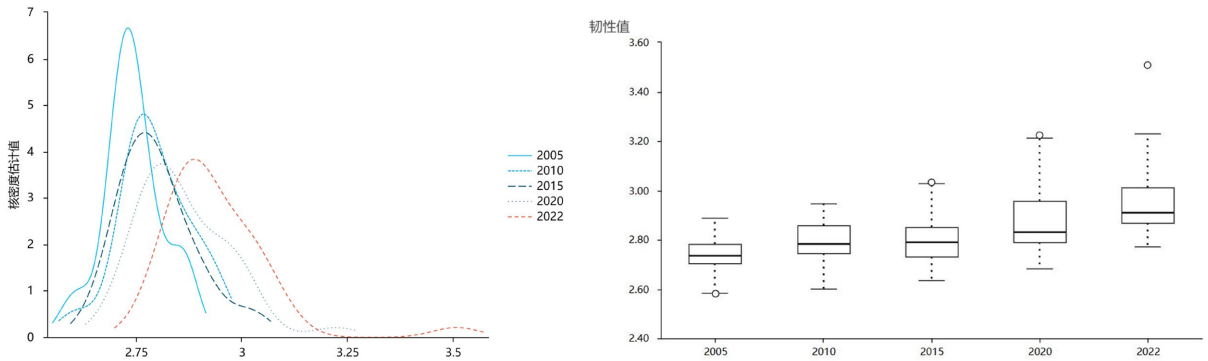


Figure 2. Kernel density estimation (Left) and box plot (Right) of coastal zone human-land system resilience in coastal areas of Shandong province from 2005 to 2022

图 2. 2005~2022 年山东省沿海地区海岸带人地系统韧性的核密度估计(左)和箱线图(右)

3.2. 空间分析

(1) 空间整体演化特征

基于 2005~2022 年山东省沿海区县人地系统韧性数据, 结合可视化分析(图 3)探讨其时空差异特征。时间维度上, 柱状图显示各区县韧性值整体增长, 低韧性区县从 2005 年 23 个降至 2022 年 0 个, 反映系统结构与功能持续优化。空间分布上, 黄岛区、市南区、市北区、即墨区、城阳区、崂山区、东营区、荣

成市和东港区常年位居韧性值前列，主要因其隶属于青岛、威海等东部沿海城市，凭借区位优势、产业基础与经济实力维持高韧性水平。2005~2022 年韧性值增幅最大的黄岛区达 0.6，无棣县、胶州市、寒亭区、城阳区 4 区县增幅超 0.3，市南区、即墨区、崂山区、沾化区、河口区、市北区、龙口区 7 区县超 0.2，蓬莱区(0.04)最低。空间差异显著：高韧性及高增长区县集中于青岛，得益于政策支持、经济发展与资源优势的协同驱动；烟台、威海部分区县因环境承载力有限、经济空间受限及政策调整力度不足，韧性提升相对滞后，整体表现不及青岛[27]。

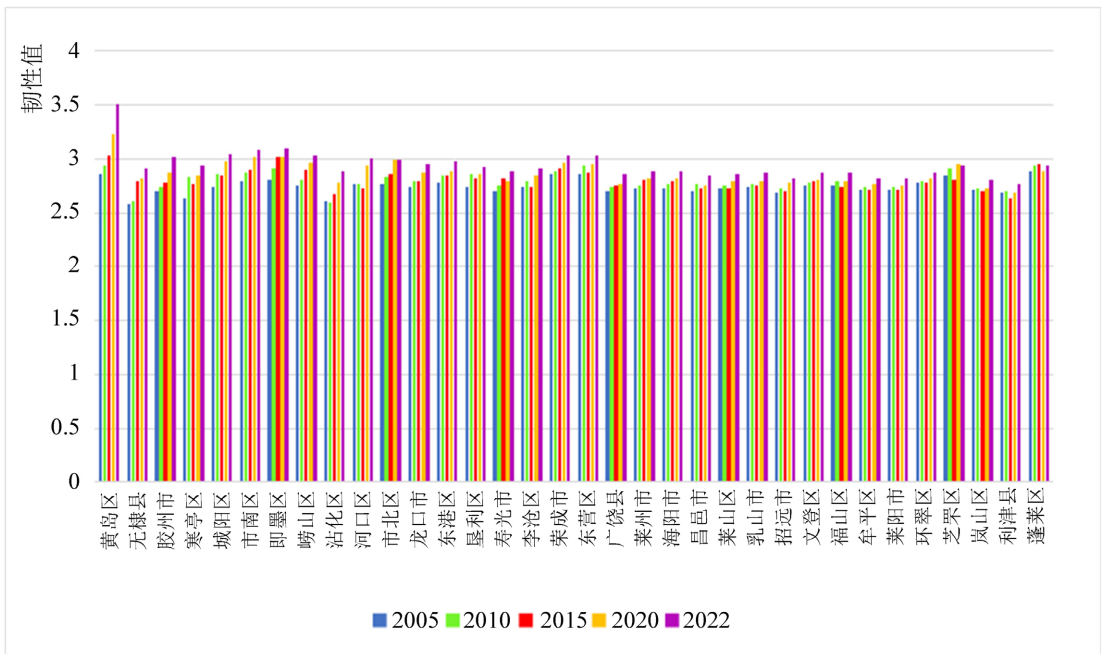


Figure 3. Clustered bar chart of coastal zone human-land system resilience in coastal areas of Shandong province from 2005 to 2022

图 3. 2005~2022 年山东省沿海地区海岸带人地系统韧性簇状柱形图

(2) 人地系统韧性等级时空演化特征

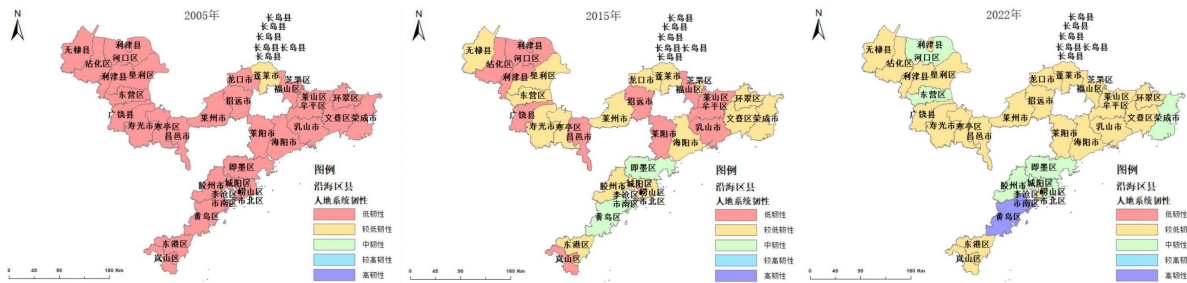


Figure 4. Temporal and spatial evolution of human-land system resilience grades in coastal counties and districts of Shandong province

图 4. 山东省沿海区县人地系统韧性等级时空演变

山东省沿海区县人地系统韧性总体呈现“梯度演进与局部突破交织”的时空特征(见图 4)。2005 年，低韧性主导全域，仅胶东半岛零散分布较低韧性区县(如利津县、即墨区等)，这反映早期开发中资源利用

与生态保护矛盾尖锐, 人地协同基础薄弱。2015 年, 政策驱动与生态治理初显成效, 北部沿海的利津县、河口区等低韧性范围收缩, 向较低韧性过渡; 胶东半岛的即墨区、黄岛区突破至中韧性, 形成“点式提升”格局, 不过全域仍以低、较低韧性为主, 人地冲突缓解呈局部性。2022 年, 韧性升级加速, 青岛核心范围的市南区、市北区、黄岛区跃升至高韧性等级, 依托海洋经济、生态修复与智慧城市建设实现人地系统深度协同; 而胶东半岛即墨区、环翠区等中韧性范围扩大, 北部沿海的利津县、东营区向中韧性进阶, 低韧性仅存无棣县等零星分布[28]。

山东省沿海区县整体上的空间演变受“开发 - 保护”政策动态调控, 早期粗放开发致低韧性锁定, 中期海岸带整治、生态补偿政策推动局部突破, 后期“陆海统筹”与“蓝色经济”战略加速韧性升级。同时, 地域本底差异深刻影响演进路径, 胶东半岛凭借优质岸线、科创资源率先突破高韧性; 而北部沿海因盐碱地、传统产业路径依赖, 韧性提升滞后但呈追赶态势。

3.3. 系统韧性主导因素分析

在全面掌握山东省沿海区县人地系统韧性水平的时空发展特征基础上, 通过障碍度模型准确衡量各系统层对整体韧性发展的阻碍程度, 厘清对评价结果产生主导因素, 明晰关键制约因素的影响程度, 为山东省沿海区县人地系统韧性水平的提升提供方案[29] [30]。

3.3.1. 系统层障碍度测度

对山东省沿海区县人地系统韧性水平三大系统层的障碍度变化过程进行统计分析, 具体如图 5 所示。由图 5 可知, 2005~2022 年系统层障碍度变化趋势表明, “人”“地”及“人地冲突”系统障碍度均呈上升态势。“人”系统障碍度从 2005 年 12.3% 平稳升至 2022 年 21.68%, 主要驱动因素包括城市化推进、人口规模扩张、流动失衡及消费升级的多重压力[24]。2005~2020 年我国城镇化率从 43% 提升至 64%, 城市扩张挤占生态用地, 居民生活资源需求呈指数级增长; 社会治理机制滞后(如环保法规执行不足、公众生态意识薄弱)导致人类行为模式与可持续发展需求脱节。2020 年后“双碳”目标推动政策调整, 但社会惯性仍引致障碍度持续上升。

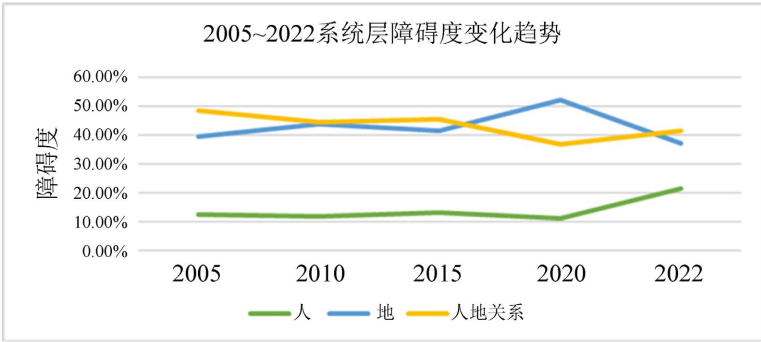


Figure 5. Change process of obstacle degree at the system level from 2005 to 2022
图 5. 2005~2022 系统层障碍度变化过程

“地”系统障碍度呈波动上升趋势: 2005 年 39.45%, 2010 年增至 43.79%, 而 2015 年降至 41.44%, 2020 年又增至 52.15%, 2022 年回落, 工业化与城镇化的协同推进是核心驱动因素。2005~2015 年粗放型增长模式导致资源消耗激增, 工业污染与能源结构失衡(如煤炭依赖)加重环境负荷; 2015 年后产业转型政策虽逐步推行, 但传统产业退出滞后、新兴产业规模效应不足, 致使经济 - 生态系统矛盾持续累积; 土地财政依赖下的无序开发进一步加剧“人地冲突”紧张态势[31]。

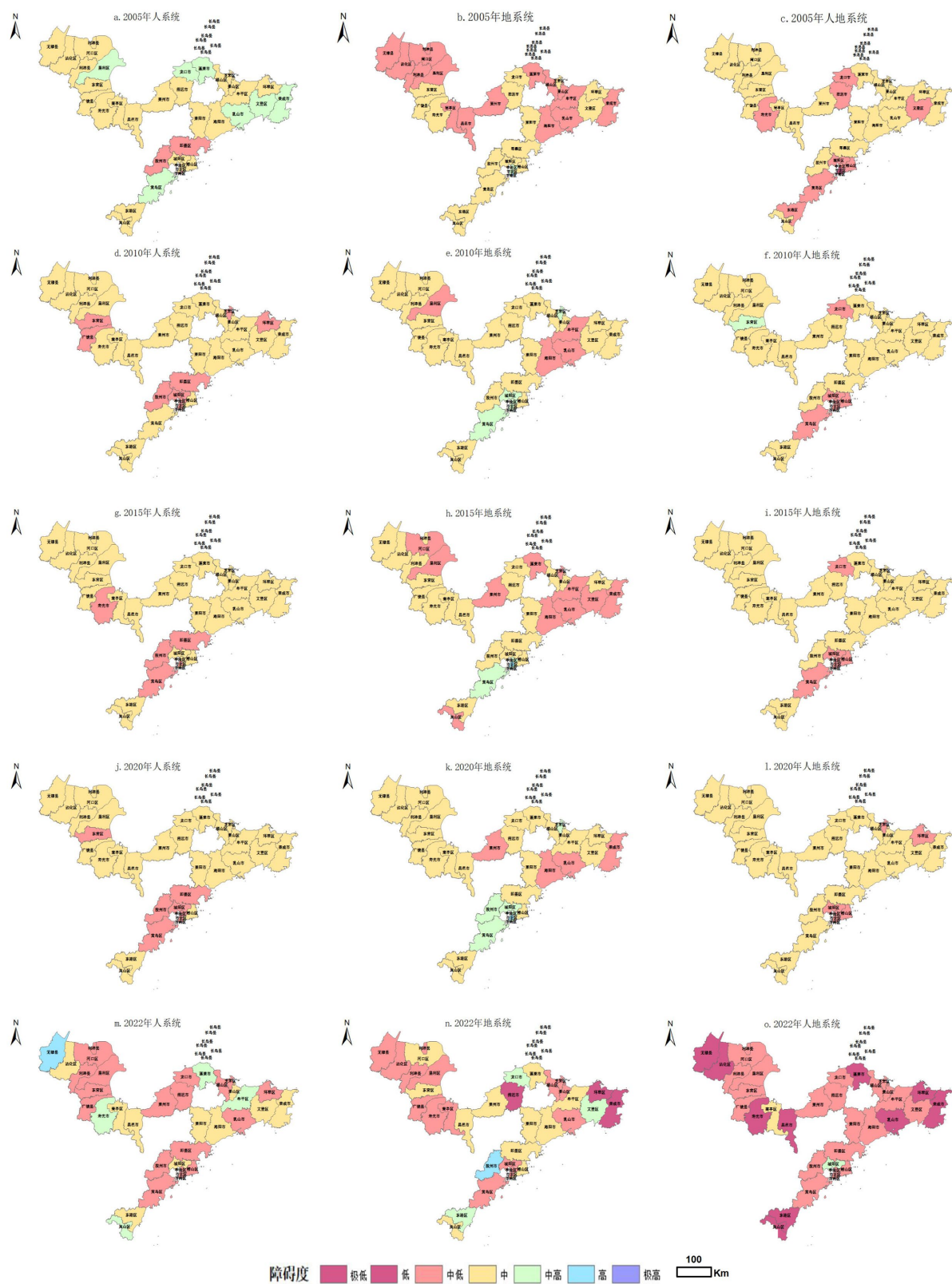


Figure 6. Spatial pattern of obstacle degree at the criterion level in coastal counties and districts of Shandong province from 2005 to 2022
图 6. 2005~2022 年山东省沿海区县准则层障碍度空间格局

“人地冲突”系统障碍度 2005 年接近 50%，2020 年降至 40%以下，2022 年回升至 41%左右，其变化与“人”“地”系统存在显著关联性，通过“自然承载力下降-经济开发需求扩张-社会治理能力不足”链条相互强化。人口向城市集中导致居住与基建用地激增，挤占生态空间，迫使政府扩大用地规模以保障经济增长；突发公共事件(如 COVID-19 疫情)引发的社会经济压力进一步加剧矛盾，工业化与城市化进程中的生态破坏、政策执行效率不足及资源分配失衡共同阻碍人地系统韧性提升[32]。

基于障碍度模型测算山东省沿海区县 3 个子系统障碍度(单位：%)，采用等间距法将其划分为 7 个等级：极低[0, 10]、低(10, 20]、中低(20, 30]、中(30, 40]、中高(40, 50]、高(50, 60]、极高(60, 100]。因 2005~2022 年所有区县未出现极低与极高等级，故主要分析其余 5 个等级的时空格局演变(图 6)。

1) 人系统层障碍度以中低级和中级为主，呈现“中高→中级→中低级”的优化趋势，2022 年出现局部波动。2005 年垦利区、龙口市、蓬莱市等为中高级障碍度；2010~2020 年普遍降至中级，反映经济与人口资源分配显著优化；2022 年部分区县进一步降至中低级，但无棣县回升至高级，其余部分区县波动至中低级或中级，表明人口流动与产业结构调整对区域人系统稳定性构成冲击。

2) 地系统层障碍度呈“中低级→中级→中低级”的波动特征，区域差异显著。2005 年西北及中部区县以中低级为主；2010 年升至中级；2022 年回归中低级，显示地理环境改善与生态治理成效。空间上，青岛市南区、市北区、李沧区、黄岛区始终维持中级障碍度，而荣成市、环翠区、招远市 2022 年降至低级。青岛及周边因人口密集、“三废”排放与资源高强度开发，地系统韧性持续承压；西北与中部地区通过生态修复实现障碍度等级回落。

3) 人地冲突系统 2005~2020 年保持稳定，以中级障碍度为主，个别区县为中低级；2022 年整体降至中低级和低级，但城阳区逆势升至中高等级。前期受限于人-地系统交互作用，障碍度变化幅度较小；2022 年随子系统问题缓解，人地冲突韧性显著提升，区域发展向可持续平衡状态转型，城阳区的异常波动提示局部人地矛盾仍需重点调控。

3.3.2. 指标层障碍度测度

本文针对山东省沿海 34 个区县城市人地系统韧性引入障碍度模型，识别阻碍区县城市人地系统韧性增长的主导因素。对该研究区人地系统韧性各指标的障碍度进行从大到小排序，选取障碍度比重于前 5 位的指标作为主导障碍因子，表 3 表示各个指标的障碍度在研究区内障碍度排名情况的总体统计结果，旨在揭示影响山东省沿海区县人地系统韧性发展水平最为显著的障碍因素，从而为韧性值的提升和沿海区县发展过程中出现的问题提出政策的制定和建议[33]。

Table 3. Summary of ranking of obstacle factors for human-land system resilience
表 3. 人地系统韧性障碍因子排名汇总

年份/排序	1 位	2 位	3 位	4 位	5 位
2005	B1	C8	C2	C3	B3
障碍度	23.15%	23.13%	11.44%	3.69%	3.47%
2010	B1	C8	C2	A9	B6
障碍度	22.07%	21.80%	10.06%	4.01%	3.87%
2015	B1	C8	C2	B6	B4
障碍度	21.77%	21.77%	10.46%	3.81%	3.69%
2020	C8	B1	C2	B6	C9
障碍度	22.98%	22.38%	10.98%	3.59%	3.56%

续表

2022	C8	B1	C2	B6	A9
障碍度	22.60%	20.64%	10.43%	3.99%	3.62%

由表 3 可知，限制山东省沿海区县人地系统韧性发展水平的主要障碍因子在不同时期变化大致可以分为 2 个阶段：

2005~2015 年为第一阶段，山东省沿海区县人地系统韧性的主导障碍因子为风暴潮发生频次(B1)、生活垃圾无害化处理率(C8)、港口货物吞吐量(C2)，绿地面积(B6)出现频次次之。其中，B1 为首要障碍因子，2005~2015 年障碍度维持在 21.77%~23.15%，反映该地区长期面临严峻海洋灾害威胁，加剧海岸侵蚀、海水倒灌风险，且对堤坝、道路等沿海基础设施、农田及居民生命财产安全造成破坏，同时削弱了港口货物运输稳定性；C8、C2 常年分列第二、三位，表明人类生产生活对系统韧性影响显著，且防灾体系如预警机制、工程防护未能适配灾害频次，加上填海造陆过度开发的行为破坏自然缓冲带，进一步降低系统抗灾潜力。不过，B1 障碍度从 2005 年 23.15%降至 2015 年 21.77%，C2 障碍度亦有下降，体现山东通过修复生态屏障、升级防灾设施、提升公众应急响应能力等增强灾害适应性，为韧性提升提供空间 [34]。

2020~2022 年为第二阶段，障碍因子排序发生变化：C8 跃升为首要障碍因子，因城市化加速致垃圾量剧增，而处理设施建设与管理效率滞后，暴露垃圾分类政策执行不力、末端处理技术不足等问题；B1 退居第二，虽前期海堤加固等防灾工程短期降低其障碍度，但气候长期变化下威胁仍存；C2 持续位列第三，反映港口经济扩张与生态承载力的矛盾未缓解，物流加剧海岸带污染与资源超载；B6 排序稳定，暗示城市扩张挤占生态空间，绿地建设未匹配人口增长，削弱生态缓冲功能；第三产业从业人员占比(A9)成为第五障碍因子，受 2020 年新冠疫情冲击服务业致其占比下降，2022 年随疫情缓解而回升。总体而言，前三障碍因子 2020 年障碍度上升、2022 年下降，B6 障碍度则在 2022 年呈上升趋势。

4. 结论与建议

4.1. 结论

本文以山东省沿海区县为研究范围，从“人”“地”“人地冲突”三个维度构建指标体系，收集相关数据，并运用可变模糊识别模型、障碍度模型等探究人地系统韧性指标内外部因素对海岸带人地系统韧性的影响。研究得出以下结论：

(1) 韧性变化的时空特征：① 从时间维度来看，2005 年至 2022 年，山东省沿海区县的人地冲突韧性虽呈现波动，但整体呈上升趋势。具体而言，2005 年至 2015 年，韧性水平稳步提升；而 2015 年至 2022 年，韧性水平上升趋势更为显著。这表明，随着时间推移，山东省沿海区县在面对人地冲突压力时，表现出更强的适应与恢复能力。② 从空间分布来看，2005 年至 2022 年，山东省沿海区县的韧性水平整体呈上升趋势，低韧性区县数量从 23 个减少至 0 个。其中，黄岛区的韧性值增长最为显著，无棣县、胶州市、寒亭区、城阳区等 4 个区县的韧性增长也较为突出。相比之下，即墨区、崂山区、沾化区、河口区、市北区、龙口区的韧性增长较小，而蓬莱区的增长最为缓慢。这一空间分布特征表明，山东省沿海区县的韧性水平存在显著的区域差异，韧性值高且增长显著的区县多集中于青岛市，而增长较缓的区县则主要分布在烟台市和威海市，其他地区的韧性变化相对较小。

(2) 通过障碍度模型分析，揭示了山东省海岸带人地系统韧性的制约因素的变化特征。具体来看，障碍度模型对 30 个指标的分析显示，2005~2015 年风暴潮发生频次为首要障碍因子，东部沿海因毗邻黄渤海直面海洋灾害威胁，自然灾害对韧性影响最显著；2020~2022 年生活垃圾无害化处理率跃升为首要障

碍因子, 东部经济发达区因人口密集、垃圾处理效率低, 环境承载压力加剧, 严重影响山东省海岸带人地系统可持续发展。

4.2. 建议

通过对 2005 至 2022 年山东省沿海区县韧性变化的时间趋势与空间分布进行深入分析发现, 尽管山东省海岸带人地系统韧性整体上呈现上升趋势, 但仍存在一些影响韧性提升的关键问题。针对这些问题, 结合不同地区的韧性水平和主导障碍因子, 提出以下更具差异化和可操作性的具体措施:

对于青岛、烟台、威海等东部经济发达城市, 建议构建“中心-过渡-边缘”的空间三级协调机制。青岛港作为国家级战略港口, 应发挥其引领作用, 与烟台港、日照港等形成区域港口协作网络, 实现优势互补, 共同提升区域韧性。

针对技术创新与产业转移的需求, 建议依托技术创新和制度供给的双重动力, 共建产业园区和人才飞地。推动装备制造、海洋生物等产业向蓬莱、龙口、环翠、荣成等第二、三梯队区县有序转移, 以促进区域经济的均衡发展, 缩小地区间的发展差距。

对于无棣、沾化等南北部欠发达区县, 建议设立沿海韧性发展专项基金, 重点支持这些地区的经济发展。同时, 统筹推进海堤修复等生态防护设施与智慧监测系统的建设, 兼顾生态脆弱性特征, 通过经济-生态要素的双向流动, 缩小区域韧性差距[35]。

在实施分区差异化策略方面, 建议在北部地区建立产业转移环境准入机制, 严格控制高污染项目的引入, 并加大生态补偿力度。东部地区应强化绿色低碳产业的引领作用, 完善碳排放交易机制, 推动产业绿色转型[36]。南部地区则应突出港口经济的绿色导向, 制定严格的临港工业环保标准, 并建立生态修复长效机制。三地需协同构建“产业-生态-政策”的联动机制, 通过技术输出、经验共享和生态示范, 建立统一的环境监测网络和碳排放核算体系, 实施区域联动生态补偿政策, 全面提升海岸带人地系统的韧性[37][38]。

本文通过障碍度因子研究分析, 为山东省海岸带人地系统韧性影响提供了一定的理论支持。然而, 由于海岸带环境的复杂性和多变性, 各个影响因子与海岸带人地系统韧性之间的关系错综复杂。未来研究将充分考虑更多影响因素, 并探索在大数据背景下人工智能模型的应用, 以减小传统计算工具带来的数据误差, 为海岸带人地系统韧性的提升提供更加可靠的理论支持。

基金项目

辽宁省社会科学规划基金项目(L22BRK002)。

参考文献

- [1] Tian, Z. and Gai, M. (2022) New PM_{2.5} Forecasting System Based on Combined Neural Network and an Improved Multi-Objective Optimization Algorithm: Taking the Economic Belt Surrounding the Bohai Sea as an Example. *Journal of Cleaner Production*, **375**, Article ID: 134048. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134048>
- [2] 盖美, 岳鹏, 杨尚菲. 环渤海地区海洋生态环境评价及影响因素识别[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1645-1662.
- [3] 蔡建明, 郭华, 汪德根. 国外弹性城市研究述评[J]. 地理科学进展, 2012, 31(10): 1245-125.
- [4] Safa, M., Jorge, R., Eugenia, K., et al. (2016) Modeling Sustainability: Population, Inequality, Consumption, and Bidirectional Coupling of the Earth and Human Systems. *National Science Review*, **3**, 470-494.
- [5] 赵领娣, 孙兆旭. 海岸带城市经济发展质量与生态韧性协同发展演化及空间收敛特征[J]. 经济地理, 2023, 43(7): 119-129+240.
- [6] 潘新春, 杨亮. 实行海岸线分类保护 维护海岸带生态功能——《海岸线保护与利用管理办法》解读[J]. 海洋开发与治理, 2017, 34(6): 4.

- [7] Almutairi, A., Mourshed, M. and Ameen, R.F.M. (2020) Coastal Community Resilience Frameworks for Disaster Risk Management. *Natural Hazards*, **101**, 595-630. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03875-3>
- [8] Klein, R.J.T., Smit, M.J., Goosen, H. and Hulsbergen, C.H. (1998) Resilience and Vulnerability: Coastal Dynamics or Dutch Dikes? *The Geographical Journal*, **164**, 259-268. <https://doi.org/10.2307/3060615>
- [9] 石龙宇, 郑巧雅, 杨萌, 等. 城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 6016-6029.
- [10] Piégay, H., Chabot, A. and Le Lay, Y. (2020) Some Comments about Resilience: From Cyclicity to Trajectory, a Shift in Living and Nonliving System Theory. *Geomorphology*, **367**, Article ID: 106527. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.018>
- [11] Song, K., You, S. and Chon, J. (2018) Simulation Modeling for a Resilience Improvement Plan for Natural Disasters in a Coastal Area. *Environmental Pollution*, **242**, 1970-1980. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.057>
- [12] Khatibi, H., Wilkinson, S., Eriwata, G., Sweya, L.N., Baghersad, M., Dianat, H., et al. (2022) An Integrated Framework for Assessment of Smart City Resilience. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, **49**, 1556-1577. <https://doi.org/10.1177/23998083221092422>
- [13] 杨晓冬. 可持续发展视角下的城市韧性时空评价研究[Z]. 黑龙江省, 哈尔滨工业大学, 2022-11-25.
- [14] 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(1): 127-139.
- [15] 王文慧, 钟业喜, 马宏智, 欧明辉, 冯兴华, 吴尚光. 鄱阳湖水陆交错带生态韧性时空变化及影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9514-9526.
- [16] 盖美, 岳鹏, 徐晶晶, 徐玉梅. 基于人地系统视角的海岸带韧性解构与测度[J]. 地理研究, 2023(10): 2605-2621.
- [17] 李加林, 张旖芯, 张海涛, 龚虹波, 刘永超. 基于“潜力-弹性-稳定性”模型的温州市生态韧性时空变化及影响因素研究[J]. 生态学报, 2024, 44(8): 3253-3267.
- [18] 孙才志, 曹强, 邹玮. 基于熵效率模型的环渤海地区海洋经济系统韧性研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2020(1): 10-18.
- [19] GLFC (2010) Testing New Methods for Assessing Forest Resilience and Sustainability in the Boreal Forest. *GLFC e-Bulletin*, No. 10, 15-20.
- [20] 卢丹梅, 袁楚枫, 赵建华. 基于社会-生态系统耦合理论的乡村生态空间多功能发展策略——以鹤山市宅梧镇为例[J]. 城市发展研究, 2025, 32(7): 48-59.
- [21] 吉学宽, 林振良, 闫有喜, 等. 海岸侵蚀、防护与修复研究综述[J]. 广西科学, 2019, 26(6): 604-613.
- [22] 王娜娜. 基于可变模糊模型的非毗邻地区经济协调发展研究——以中俄豫伊两地为例[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(1): 40-46.
- [23] 王善高, 张岳. 数据要素发展水平的地区差异、分布动态及障碍因子诊断[J]. 统计与决策, 2024, 40(21): 93-98.
- [24] 杨振, 丁启燕, 王念, 等. 中国人口健康脆弱性地区差异与影响因素分析[J]. 地理科学, 2018, 38(1): 135-142.
- [25] 赵宏波, 岳丽, 刘雅馨, 董冠鹏, 苗长虹. 高质量发展目标下黄河流域城市居民生活质量的时空格局及障碍因子[J]. 地理科学, 2021(8): 1303-1313.
- [26] 邢灿. 我国城镇化率提高到 67% [N]. 中国城市报, 2025-01-27(003).
- [27] 曾宪奎. 我国与资本主义国家高质量发展的比较研究[J]. 贵州社会科学, 2019(4): 111-116.
- [28] 蒋蓉, 严祥, 李帆萍, 等. 大城市生态保护与经济发展的矛盾及规划应对——成都市中心城区非城市建设用地规划探讨[J]. 城市规划, 2020, 44(12): 70-76.
- [29] 李许红, 王永生, 刘释疑. 豫陕鄂交界区县域综合发展水平测度及障碍因子分析[J]. 地理科学, 2022, 42(10): 1757-1766.
- [30] 陈慢, 刘晔, 谭伟伟. 广州市高温脆弱性空间分异格局及主导因素研究[J]. 地理科学进展, 2024(9): 1798-1810.
- [31] 王婷, 邹紫涵, 周国华, 等. 高质量发展下城市生态韧性的测度框架[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022, 45(5): 33-40.
- [32] 盖美, 朱静敏, 孙才志, 等. 中国沿海地区海洋经济效率时空演化及影响因素分析[J]. 资源科学, 2018, 40(10): 1966-1979.
- [33] 邹晓雨, 邹晓雪. 城市化背景下中国城市发展方向探究——基于《美国大城市的死与生》视角[J]. 大众文艺, 2021(24): 220-221.
- [34] 季睿, 施益军, 李胜. 韧性理念下风暴潮灾害应对的国际经验及启示[J]. 国际城市规划, 2023, 38(2): 48-59.

- [35] 金雪, 殷克东. 风暴潮灾害对生态环境的影响及对策研究[J]. 环境保护, 2024, 52(12): 27-30.
- [36] 符建华, 周方召. 中国省域空气质量测度及影响因素分析[J]. 城市问题, 2020(5): 20-27.
- [37] 苗毅. 山东省区域经济发展时空演变及驱动因素分析[D]: [硕士学位论文]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2020.
- [38] 李睿倩, 徐成磊, 李永富, 等. 国外海岸带韧性研究进展及其对中国的启示[J]. 资源科学, 2022, 44(2): 232-246.