doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2025.06.006

基于 PSR 模型的广州市海岸带生态安全评价研究

魏虎进[1,2,3]，徐光平[1,2,3]，张庆华[1,2,3]，陈 洁[4]

（1. 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司，广东 广州 510060；2. 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心，广东 广州 510060；3. 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室，广东 广州 510060；4. 自然资源部第四海洋研究所，广西 北海 536015）

摘 要：由于社会经济快速发展和海岸带资源的过度开发，海岸带生态系统受到的生态安全威胁不断增加。本文旨在探讨广州市海岸带生态安全的时空演变特征及主要影响因素，为海岸带生态环境保护与资源管理提供科学依据。基于压力–状态–响应（Pressure-State-Response，PSR）模型框架，利用熵权法确定指标权重，构建海岸带生态安全综合评价体系，定量分析近 10 年广州海岸带生态安全状况。结果表明：近十年来广州市政府采取了积极的环境保护措施，广州市海岸带生态安全状况逐渐向好的趋势发展。然而，高人口密度和高度城市化导致海岸带高强度资源开发利用，以及上游排污导致的海水水质超标仍持续威胁着海岸带的生态安全。2022—2023 年，以人口密度、海洋捕捞等为主的压力层综合指标权重被以节能环保支出占比、污水处理量等为主的响应层所超越，标志着广州海岸带治理从“压力驱动型”转向“响应主导型”。据此，建议通过实施海岸带开发强度分级管控、推进陆海统筹水环境整治及生态修复，以提高广州市海岸带生态安全水平。

关键词：海岸带；生态安全；PSR 模型；熵权法；广州

中图分类号：P76；X82 **文献标识码：**A **文章编号：**1003-2029（2025）06-0056-09

海岸带作为海陆交互作用的敏感区域，既是生物多样性富集区，也是人类经济活动密集带，为人类的发展提供了丰富的资源[1]。全球约 40%的人口居住在距离海岸线 200 km 以内的地区[2]。然而，随着沿海城市人口密度持续增加，城镇化程度不断提高及高强度的海洋资源开发利用，海岸带区域正面临沿海栖息地破坏、生物多样性下降、自然岸线占比降低及水质恶化等严重的生态问题[3]。因此，对海岸带开展系统的生态安全评估，不仅有助于科学识别生态风险，还能为沿海地区的可持续利用与生态文明建设提供决策支持。

海岸带生态安全被定义为海岸带生态系统在自然或人为干扰下，能够维持自身结构完整性、功能稳定性，并持续为人类提供生态服务和资源供给的能力[4]。近年来，国内外学者围绕海岸带生态安全开展了多角度研究，涉及海岸带生物群落评估、海洋生态足迹评估、海洋生态健康、海洋资源承载力评估、海洋污染评估及社会经济干扰评估等[5]。SHEN C 等[6]分别确定了渤海湾和莱州湾近岸海域的生态健康指数为 0.75 和 0.68，并指出围垦活动对底栖环境的影响最大。吴舒雁等[7]通过构建 PSR 模型，评估发现 2009—2019 年大连湾生态安全水平整体上呈稳步上升趋势。TU J B 等[8]收集并分析了天津近岸海域有关水质、生物、海洋灾害和人为因素的

收稿日期：2025-06-10

基金项目：广州市资源规划和海洋科技协同创新中心项目（2023B04J0301，2023B04J0191）；中国东盟国家蓝色经济海洋产业创新平台资助项目（桂科 AA2420644）

作者简介：魏虎进（1986—），男，硕士，工程师，主要从事海洋生态保护与修复研究。E-mail：511521493@qq.com

通信作者：陈洁（1984—），女，博士，正高级工程师，主要从事海洋生态保护与修复研究。E-mail：67263273@qq.com

参数，并基于PSR 模型发现天津近岸海域生物物种的生物量相对较低，物种分布不均。在众多研究方法中，PSR 模型因其能够从“压力–状态–响应”的因果链条出发，系统反映自然环境与人类活动之间的互动关系，成为海岸带生态安全评价的常用框架之一[7,9]。同时，尽管已有研究在海岸带生态安全评价方面取得了丰富成果，但仍存在三方面不足：一是多数研究集中于北方海湾或典型生态区，对南方高城市化地区海岸带生态安全的演变规律研究相对缺乏；二是现有指标体系多为宏观尺度构建，缺少对人口密度高、岸线类型复杂、资源开发强度大的城市海岸带的针对性设计；三是对“压力–状态–响应”系统内部相互关系的时序变化缺乏定量分析。

广州市作为典型的高强度开发型海岸带城市，是粤港澳大湾区发展的核心“引擎”。随着港口航运、工业布局和滨海城镇化的加速推进，广州海岸带面临着栖息地退化、岸线硬质化和水质污染等生态压力[5]。基于上述背景，本文以广州市海岸带为研究对象，构建适应亚热带高度城市化区域特征的生态安全评价指标体系，覆盖经济、社会、生态环境及管理措施相关指标，并利用 PSR 模型结合熵权法对 2014—2023 年连续年度数据进行综合评价，旨在量化广州海岸带生态安全水平、揭示时空演变规律并识别主要驱动因子，为广州海岸带的生态管理提供科学依据，同时为其他经济发达、开发强度高的沿海城市生态安全评价提供可复制的参考。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

广州市海岸带地处珠江三角洲水网平原区和台地丘陵区的交界地带，属于珠江口海域的一部分(图 1)，包括虎门、蕉门、洪奇门、横门等东四口门入海口，是珠江和海洋在各种波浪、潮流和径流等动力条件下复合形成的狭长河口海岸，也是内陆、内河和海运的交汇地带。广州市海岸线绵长，现有海岛 14 个，分布于黄埔区、番禺区和南沙区。

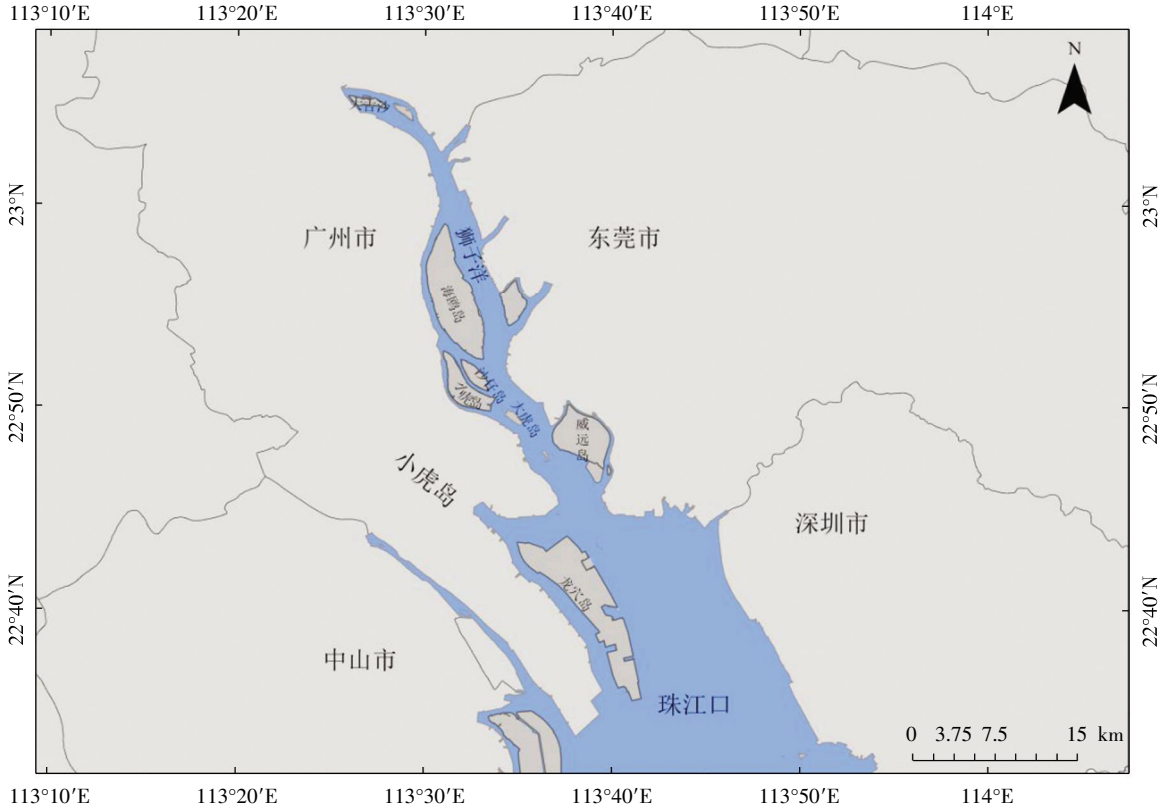


图 1　广州海岸带区域位置

1.2　数据来源

本文的原始数据主要来源于 2014—2023 年《广州市统计年鉴》《广州市环境质量状况公报》《广州市生态环境状况公报》《广州市国民经济和社

会发展统计公报》《广东省海洋环境状况公报》等报告和中国知网论文，具体指标数据来源如表 1 所示。

表 1 指标数据来源

年份	数据来源	数据名称
2014—2023 年	《广州市统计年鉴》	海洋捕捞、工业废水年排放量、人口密度、化肥施用量、海水养殖、污水处理量、建成区绿化覆盖、节能环保支出占比
2014—2023 年	《广州市国民经济和社会发展统计公报》	第一产业比重、港口货物吞吐量增长率、垃圾无害化处理率、第三产业占比、年新增绿道
2014—2021 年	《广州市环境质量状况公报》	降水 pH 年平均值、海漂垃圾密度、主要河流水质优良率、近岸海域无机氮年平均浓度
2020—2023 年	《广州市生态环境状况公报》	
2014—2023 年	《广东省海洋环境状况公报》	大型底栖动物多样性指数
2014—2024 年	中国知网	海洋生态文献

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标的确定

PSR 指标模型的构建以影响因素之间存在明确因果关系为前提条件[10]，本文筛选了 19 个与海岸带经济发展与资源利用、陆源污染和生态风险、生态与环境特征、经济干预和保护策略相关的指标，具体指标详情如表 2 所示。

“压力层”表征人类活动和社会经济发展对广州市海岸带生态环境造成的影响和压力，该层包含 8 个关键指标；“状态层”展示广州市海岸带生态环境的当前状况和发展模式，该层包含 5 个关键指标；“响应层”反映了为减轻对海岸带生态环境不利影响而采取的措施，突显了广州市在海岸带生态安全治理方面的政策行动与管理成效，该层包含 6 个关键指标。筛选的指标常被用于海岸带或海洋生态安全评价研究，具备一定的通用性。如吴舒雁等[7]选取了人口增长率、第一产业比重、节能环保支出、海洋生态安全文献等 17 个指标对大连湾海岸带生态安全进行评价研究，狄乾斌等[11]选取了海洋货物周转量、工业废水排放量、第三产业占比、节能环保支出等指标对中国海洋生态安全评价进行了相关研究。

表 2 广州市海岸带生态安全评价指标体系

准则层	指标层	指标范围	指标属性	指标含义
压力层	P1 第一产业比重/%	0.48~1.24	负	第一产业占比的扩大直接反映了对自然资源的消耗和生态系统的压力，可以表征研究海域所承受的经济压力。
	P2 海洋捕捞/t	17 543~31 263	负	反映渔业资源过度利用程度。
	P3 工业废水年排放量/万吨	11 731~20 604	负	反映陆源污染对海域的影响。
	P4 人口密度/(人·平方公里$^{-1}$)	1 804~2 600	负	单位面积土地上人口的数量，反映了自然资源的利用程度及区域环境的负担。
	P5 港口货物吞吐量增长率/%	0.70~12.60	负	反映港口开发对海岸带生态的负荷。
	P6 化肥施用量/t	95 946~114 196	负	化肥施用量增加会导致土壤和水体的污染，反映了农业生产活动强度及其对环境的潜在压力。
	P7 海水养殖/t	57 951~120 658	负	反映了人类活动对海岸带水域的水质污染和海岸带开发强度的影响。
	P8 海漂垃圾密度/(kg·km^{-2})	5.97~163.90	负	反映了人类的过度活动或污染源增多，进而影响海洋环境的健康和稳定。
状态层	S1 大型底栖动物多样性指数	0.61~2.49	正	是海洋生态系统中的重要组成部分，反映了海洋生态环境的整体健康状况。
	S2 降水 pH 年平均值	5.21~6.02	正	是衡量大气酸化程度的重要指标，反映了环境中酸化污染的状态。
	S3 主要河流水质优良率/%	57.20~85.00	正	反映了河流水质的健康状况，可以间接表征海洋生态系统的压力水平及健康状况。
	S4 建成区绿化覆盖率/%	39.22~44.20	正	反映社会在面对城市化及其带来的环境压力时，采取的改善措施。
	S5 近岸海域无机氮年平均浓度/(mg·L^{-1})	1.43~1.87	负	直接反映了海洋生态系统中氮源的状况。
响应层	R1 污水处理量/(万吨·日$^{-1}$)	424~814	正	反映了社会对水质污染的控制和治理意图。
	R2 垃圾无害化处理率/%	91.50~100.00	正	反映了社会对垃圾污染的有效应对，海洋垃圾的清理和处理直接响应了减少海洋污染的需要。
	R3 节能环保支出占比/%	1.03~5.10	正	环境保护类产业的投资占当年 GDP 的比重，表征人们对环境状况改变的响应能力及重视程度。
	R4 海洋生态文献/篇	16~44	正	直接体现了社会在应对海洋生态压力和维持生态安全方面的知识响应。
	R5 年新增绿道/km	0~300	正	绿道建设是生态修复和城市绿化的重要举措，体现政府或社会对生态保护的主动干预和管理措施。
	R6 第三产业占比/%	63.76~73.34	正	第三产业占比上升一定程度上反映了地方经济在应对环境压力方面的调整，这种经济结构的变化可能是对生态保护需求的响应。

1.3.2　指标标准化

由于评估指标的类型、性质和维度多样，导致缺乏可比性，本文通过极值法对数据进行标准化处理，将数据转换为 0 到 1 之间的无量纲值。评估指标被区分为正面和负面两类，每一类都有其独特的标准化表示形式。

$$C_{ij}' = \frac{C_{ij} - C_j^{\min}}{C_j^{\max} - C_j^{\min}} \quad \text{（正向指标）} \tag{1}$$

$$C_{ij}' = \frac{C_j^{\max} - C_{ij}}{C_j^{\max} - C_j^{\min}} \quad \text{（负向指标）} \tag{2}$$

式中，C_{ij}'为经过标准化处理的数据；C_{ij} 为原始数据；$C_j^{\max}$、$C_j^{\min}$ 分别为第 j 项指标中最大、最小的值；i 为年份；j 为第 j 项指标。

1.3.3　指标权重的确定

本文采用熵权法对数据进行赋权，熵权法依据各指标的变异程度，利用信息熵来计算每个指标的权重，该方法仅受原始数据的影响，所得结果具备较高的客观性和准确性[12]。

首先，计算其中第 i 个样本在第 j 项指标中所占的比重。

$$P_{ij} = \frac{C_{ij}'}{\sum_{i=1}^{n} C_{ij}'} \quad (i = 1, \cdots\cdots, n; j = 1, \cdots\cdots, m) \tag{3}$$

式中，P_{ij} 为第 i 个样本在第 j 个指标上的比例；n 为样本数量，此处为 2014—2023 年数据，即 $n = 10$；m 为指标的数量，本文共 19 个指标。

其次，计算各指标的熵值如下。

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{n} P_{ij} \ln(P_{ij}) \tag{4}$$

式中，$k = 1/\ln(n)$；E_j 为第 j 个指标的熵值。

计算冗余度如下。

$$d_j = 1 - E_j \tag{5}$$

计算各项指标的权重如下。

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m} d_j} \tag{6}$$

从而得到各指标的权重，如图 2 所示。

最后，通过线性加权法计算综合值如下。

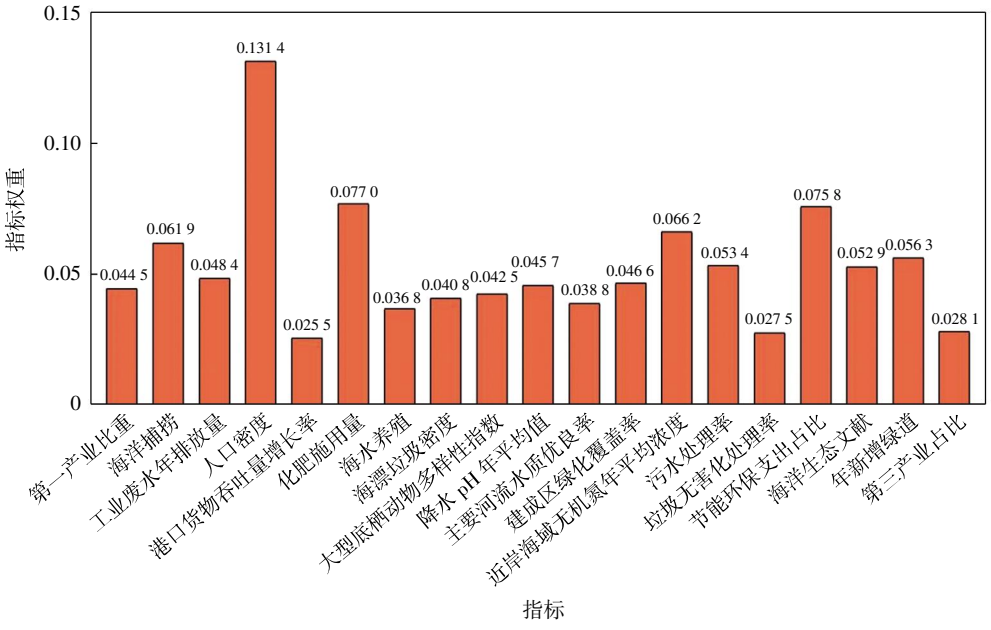


图 2　广州市海岸带生态安全评价指标权重

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} W_j C_{ij}' \tag{7}$$

式中，S_i 为第 i 个样本的综合得分。

如表 3 所示，综合评价的变化体现了广州市海岸带总体的生态变化。

1.3.4　生态安全评价等级的划分

生态安全指的是生态系统的整体健康和完整性，意味着其维持结构和功能稳定的能力[13]。基于广州市海岸带生态本底特征与资源开发强度，结合国内外相关研究模型[11,14]，构建了涵盖安全、较安

表 3 广州市海岸带生态安全综合评价值

年份	综合指数	压力指数	状态指数	响应指数
2014 年	0.352 7	0.216 2	0.059 5	0.076 9
2015 年	0.333 6	0.191 0	0.055 2	0.087 3
2016 年	0.383 9	0.213 0	0.070 9	0.099 9
2017 年	0.410 8	0.176 6	0.121 0	0.113 2
2018 年	0.429 4	0.253 3	0.054 8	0.121 3
2019 年	0.458 5	0.191 9	0.124 7	0.141 9
2020 年	0.578 2	0.236 3	0.149 3	0.192 6
2021 年	0.573 0	0.215 4	0.175 4	0.182 3
2022 年	0.610 4	0.205 8	0.197 7	0.207 0
2023 年	0.607 0	0.204 8	0.158 5	0.243 7

全、预警、较危险及危险的五个层次的生态安全评估等级，生态安全评价等级划分如表 4 所示。

表 4 海岸带生态安全状况等级

生态等级	生态状况	综合指数区间	生态系统特征
一级	安全	[0.8，1.0)	生态系统结构与功能完整，恢复能力强，管理目标已经达成甚至超越。
二级	较安全	[0.6，0.8)	生态系统结构与功能相对完整，生态系统可以保持平衡状态，接近管理目标。
三级	预警	[0.4，0.6)	生态系统结构与功能受到外界因素影响，但可以保持最基本的平衡状态，开始偏离管理目标。
四级	较危险	[0.2，0.4)	生态系统结构与功能受到破坏，难以保持平衡状态，偏离了管理目标。
五级	危险	[0.0，0.2)	生态系统结构与功能受到严重破坏，生态平衡遭到严重破坏，严重偏离管理目标。

1.3.5 生态安全趋势分析

采用皮尔森相关性分析和线性回归模型，分析了年份与准则层指数、年份与综合评价指数之间的相关性及其变化趋势，$P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 广州市海岸带生态安全评价结果

基于 2014—2023 年的数据，对广州市的海岸带生态安全进行了全面评估。其沿海区域生态安全的基本演变情况通过 PSR 模型框架展示如图 3 所示。根据海岸带区域生态安全状况，广州市海岸带生态安全综合指数在 2014—2023 年呈波动上升趋势，由此可知，广州市海岸带这十年来生态安全状况逐渐向好的趋势发展。2014—2023 年，生态安全指数最低值为 2015 年的 0.333 6，最高值为 2022 年的 0.610 4。广州市海岸带的安全状况自 2014—2016 年的较危险状态转变为 2022—2023 年的较安全状态，2017—2021 年期间处于预警状态。

基于准则层权重分析可知，压力指数、状态指数和响应指数在生态安全评价体系中占比分别为 46.38%、23.62%和 30.00%，不同年份各准则层对广州市海岸带生态安全的贡献程度也在不断变化(图 4)。

2.2 评价结果及分析

在 2014—2023 年这 10 年中，压力指数对生态安全的影响权重有 8 年始终位列三大准则层之首，表明该时间段城市开发建设对海岸带生态系统的干扰是当前生态安全的核心矛盾。在压力层中，权重占比最高的前三项指标分别是人口密度、化肥施用量和海洋捕捞。

人口密度指标的高权重凸显了广州海岸带区

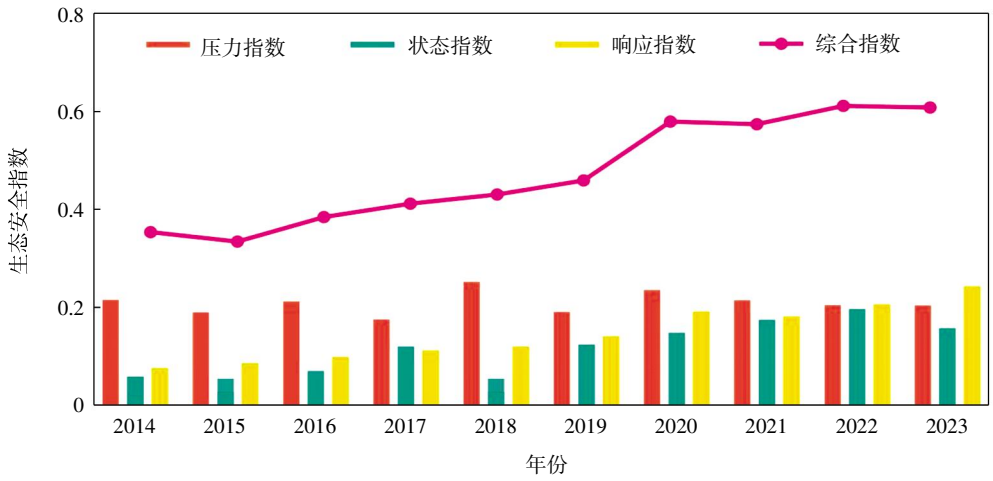


图 3 2014—2023 年广州市海岸带生态安全评价结果

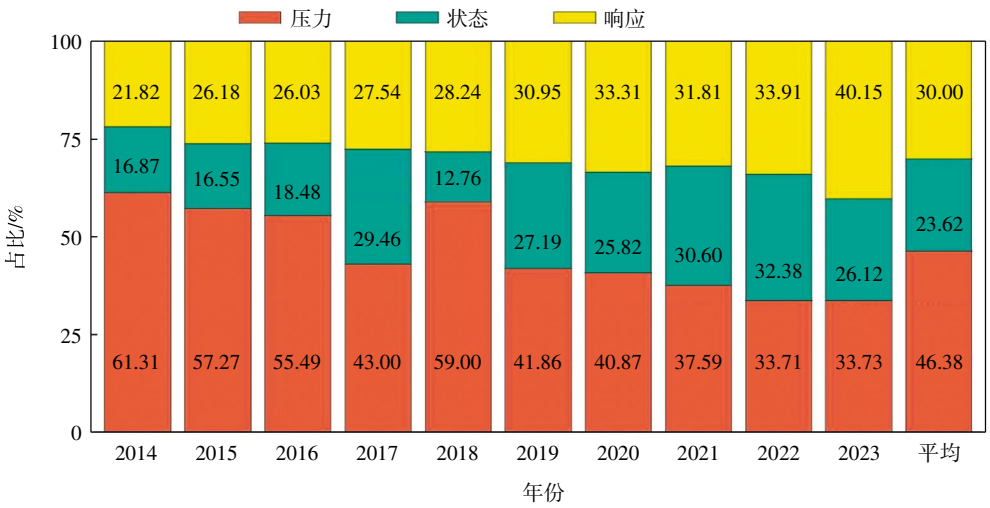
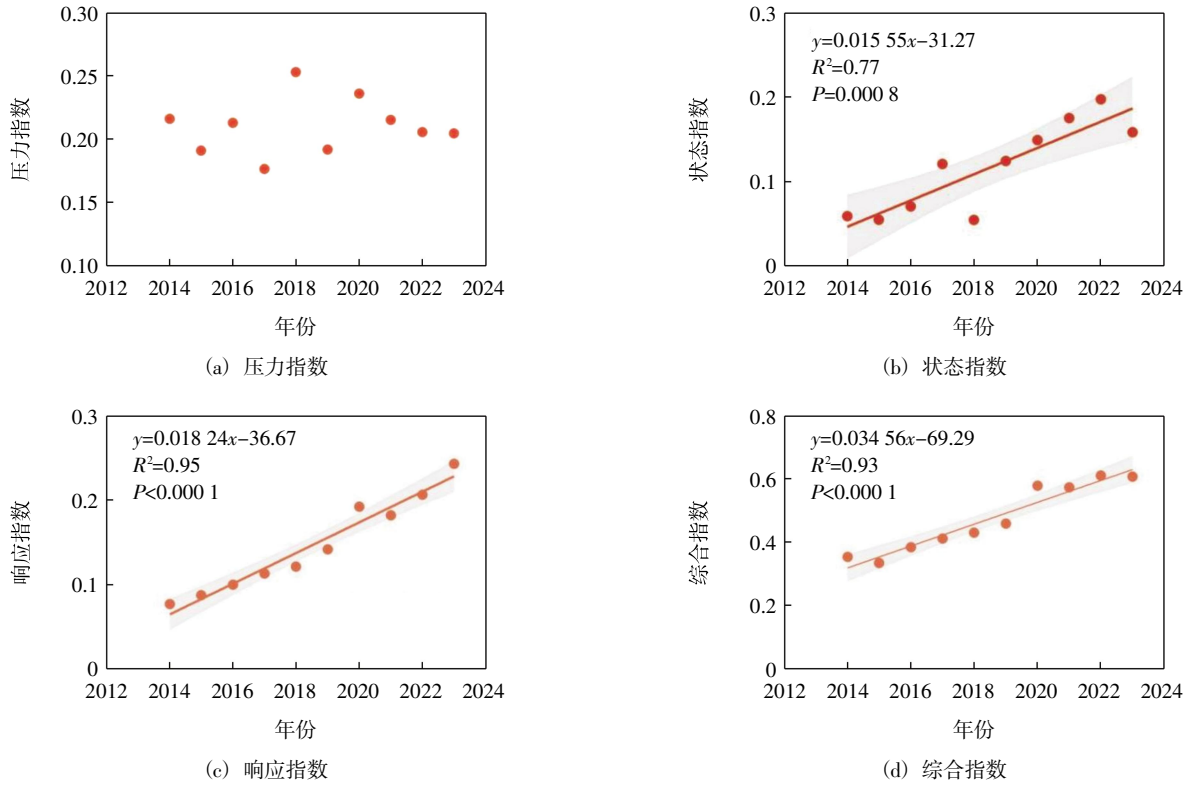


图 4　广州市海岸带生态安全评价体系中各指标（压力–状态–响应）所占百分比

域土地开发与居住扩张的强关联性。广州市人口密度从 2014 年的 1 804 人/km^2 上升至 2023 年的 2 601 人/km^2，十年间增长约 44.14%。高密度人口加剧了海岸带资源开发利用，导致自然岸线缩减、海岸带生态功能退化[15-16]。据《广东省海洋生态红线》(2017 年 9 月)，广州市大陆自然岸线保有率仅有 4.71%，这意味着人工岸线占比高达 95.29%。人工岸线如港口码头、临海工业、填海造陆等与人口密集区城镇活动建设的土地需求直接相关，并破坏了海岸带的自然生境和生态系统功能[17]。化肥施用量的高权重可能与广州市集约化农业模式密切相关，根据《广州统计年鉴 2024》可知，广州市化肥施用区域主要分布在从化区、增城区、南沙区和番禺区，此外珠江上游流域的农业面源污染不可忽视，过量施用化肥通过地表径流和地下水渗透向海岸带输送氮磷污染物，引发近岸海域富营养化及赤潮。值得注意的是，化肥施用量正在逐年减少，工业废水处理能力也在提升，这意味着广州市海岸带来自陆源污染的压力正在减小。海洋捕捞在压力层指数中的权重较大，该项指标是影响海岸带生态系统的主要经济活动[14]，这也强调了海洋渔业对海岸带生态系统影响的重要性。根据图 5 压力指数的变化趋势可知，压力指数与时间序列无相关性，这可能是因为压力层指标中不同指标的年变化趋势，如化肥施用量、工业废水年排放量和海漂垃圾密度正在逐年下降，人口密度在逐年上升，而第一产业比重、海洋捕捞和港口货物吞吐量增长率处于不规则的波动状态。

在广州市海岸带生态安全评价体系中，状态层的权重占比最小，这可能与两个因素有关：一是状态层的指标个数最少，导致其对生态安全评价体系的贡献度较小；二是因生态系统状态变化具有滞后性，短期内难以通过现有指标（如水质、生物多样性等）显著体现压力累积效应[11]。从年变化趋势来看，状态层指数与时间呈显著的正相关关系，表明广州市海岸带生态环境状况正在逐年改善，主要体现在建成区绿化覆盖率、降水 pH 年平均值、主要河流水质优良率及大型底栖动物多样性指数总体呈上升趋势。生物群落的物种多样性是诊断海洋生态系统栖息地退化的一个重要指标[18]。大型底栖生物多样性指数由 1.1（2014—2018 年均值）增加为 2.0（2019—2023 年均值），表明局部生态修复或水环境改善取得成效，支撑了生物多样性恢复，但整体开发压力仍对生态安全构成威胁。除 2020 年外，近岸海域无机氮年平均浓度均高于《广州市海洋生态保护“十四五”规划》中规定的近岸海域无机氮浓度不高于 1.52 mg/L 的目标。沿海城镇高密度人口带来大量生活污水、工业废水，以及沿海养殖废水的排放，造成近岸海域水质逐渐恶化[17]。广州市近十年来，来自陆源污染的压力正在减小，而海水养殖产量从 67 062.8 t（2014—2018 年均量）增加至 99 548.4 t（2019—2023 年均量），可见海水养殖污染是广州市近岸海域无机氮偏高的重要因素，因此，需要对养殖容量进行更科学的评估，并制定更



(a) 压力指数 (b) 状态指数 (c) 响应指数 (d) 综合指数

图 5 2014—2023 年广州市海岸带压力、状态、响应和综合指数的变化趋势

合理的养殖布局[14]。

在 2014—2023 年，响应层指数与时间呈显著的正相关关系，这表明政府和社会正在不断地加大力度进行海岸带的保护和修复工作。在响应层中，权重占比最高的前三项指标分别节能环保支出占比、年新增绿道和污水处理量。其中环保支出占比从 2014 年的 2.14%上升至 2020 年的 3.27%，再上升到 2023 年的 5.02%，表明政府正在积极投入资金用来改善生态环境。尽管 2019—2023 年新增绿道长度有所下降，但绿道总长度保持着持续增加。污水处理量逐年增加，从 2014 年的 424.68 万吨/年增长至 2023 年的 814.03 万吨/年，年平均增长率 6.74%。响应指数提升（节能环保支出占比增加、污水处理量提高、第三产业占比提高和垃圾无害化处理率的提高）与状态指数（如河流水质、植被覆盖度）同步改善时，表明人为干预措施对生态系统修复产生即时正向反馈。值得注意的是，2022 年和 2023 年响应指数在生态安全评价体系中占比分别为 33.91%和 40.15%，对广州市海岸带生态安全的贡献度最大，响应层贡献超越压力层标志着广州海岸带治理从“压力驱动型”转向“响应主导型”。

3 结论与建议

3.1 结 论

海岸带生态系统安全的有效维护和管理，以及确保其平衡运行对于人类社会和经济的可持续发展具有重要的意义。本文基于 PSR 模型框架构建了海岸带生态安全评价指标体系，对广州市海岸带生态安全状况和演变趋势进行了定量评估，并根据评估结果提出了具体的建议和对策，得出以下研究结论。

（1）2014—2023 年，生态安全状况逐渐向好的趋势发展，并在 2022—2023 年保持在较安全的状态。这主要与环境状态的改善和政府积极响应的措施有关。同时，陆源污染的进一步控制和环保资金的加大投入等措施有效地缓解了人类活动对海岸带生态系统造成的外部压力，在海水水质和海洋生物等方面取得显著改善。

（2）尽管海岸带生态安全状况正在改善，但一些持续存在的关键因素仍然威胁着海岸带的生态安全，尤其是高度城镇化导致的高强度资源开发和海水养殖业带来的海水水质的污染。

（3）为了减轻这些因素的影响并促进海岸带的生态系统的可持续发展，应采取一系列必要措施。首先，实施典型生态系统的整治修复工程，提升关键物种栖息地、食物网和食物链复杂度，实施海堤生态化建设，提高生物多样性。其次，加强水质治理，推进上下游水环境统筹整治，在进一步控制陆源污染的同时，优化海洋渔业的产业布局，降低水体富营养化的风险。

3.2　建　议

尽管近年来广州市海岸带的生态安全状况不断改善，但持续的干扰和压力仍影响着海岸带的生态安全。因此，本文将根据评估结果和广州市海岸带的现状，提出具体的对策和建议，以增强广州市海岸带生态安全，促进区域经济与生态环境的协调和可持续发展。

在维持现有生境改善的基础上，进一步通过生态修复和管控措施巩固海岸带生态安全。本评估体系中，人口密度指标的高权重凸显了广州市高度城市化对海洋资源的开发利用，导致海岸带自然岸线缩减、生态功能退化。有必要针对海岸带的红树林、盐沼等典型生态系统开展生态保护修复。其次，本文的结果主要反映广州市海岸带的总体态势，但在实际管理中应结合岸段差异化特征（如河口湾区、岛屿岸段、港口工业岸段）实施分区分级管控。分级准入清单管理，优先保护单元禁止新增围填海、房地产项目，仅允许生态修复和科研活动。

加强水质治理，实施流域污染治理，上下游联动，推进陆海统筹水环境整治。本文的评估结果表明，广州市近岸海域水环境无机氮浓度超标，与上游陆源污染物输入及海水养殖污染有关，有必要加强对近岸海域污染物输入的监管，进一步优化海洋渔业的产业布局，引进和推广先进的海水养殖技术，从而降低水体富营养化的风险。

尽管付出了很大的努力，但本文仍不可避免地存在一些局限性，评估体系涵盖了社会经济、海洋环境和生物及社会响应等各类因素指标，但由于数据获取的局限性，本文的评估体系还是遗漏了一些理解海岸带生态保护和受损的重要指标，因此，在未来的研究中，进一步完善评估指标体系至关重要。由于本文采用的权重计算方法存在一定局限性，尚未能系统开展敏感性检验，未来研究中将尝试引入其他方法（如 Monte Carlo 模拟、随机扰动权重法、加权组合模型）进行敏感性检验，以增强评价结果的稳健性。

参考文献：

[1] REGUERO B G，BECK M W，AGOSTINI V N，et al. Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach and engineering case study in Grenada[J]. Journal of Environmental Management，2018，210(2)：146-161.

[2] BLYTHE J，ARMITAGE D，ALONSO G，et al. Frontiers in coastal well-being and ecosystem services research: A systematic review[J]. Ocean & Coastal Management，2020，185(1)：105028.

[3] LU X，YAO S，FU G，et al. Dynamic simulation test of a model of ecological system security for a coastal tourist city[J]. Journal of Destination Marketing & Management，2019，13(2)：73-82.

[4] 吝涛. 海岸带生态安全评价模式研究与案例分析[D]. 厦门：厦门大学，2007.

[5] GAO L H，NING J，BAO W L，et al. A study on the marine ecological security assessment of Guangdong-Hong Kong-Macao great bay area[J]. Marine Pollution Bulletin，2022，176(4)：113416.

[6] SHEN C，SHI H，ZHENG W，et al. Study on the cumulative impact of reclamation activities on ecosystem health in coastal waters[J]. Marine Pollution Bulletin，2016，103(1-2)：144-150.

[7] 吴舒雁，朱庆林，武文. 基于 PSR 模型的大连湾海岸带生态安全评价研究[J]. 海洋湖沼通报，2024，46(3)：1-10.

[8] TU J B，WAN M M，CHEN Y S，et al. Biodiversity assessment in the near-shore waters of Tianjin city，China based on the Pressure-State-Response（PSR）method[J]. Marine Pollution Bulletin，2022，184(12)：114123.

[9] 温世伟. 基于 PSR 和 RS 的浙江台州市海洋生态安全评价研究[D]. 舟山：浙江海洋大学，2020.

[10] SUN B，TANG J，YU D，et al. Ecosystem health assessment: A PSR analysis combining AHP and FCE methods for Jiaozhou

Bay, China[J]. Ocean and Coastal Management，2019，168(1)：41-50.

[11] 狄乾斌，韩雨汐，曹可. 基于PSR模型的中国海洋生态安全评价研究[J]. 海洋开发与管理，2014，31(7)：87-92.

[12] PAN G，XU Y，YU Z，et al. Analysis of river health variation under the background of urbanization based on entropy weight and matter-element model: A case study in Huzhou City in the Yangtze River Delta, China[J]. Environment Research，2015，139(4)：31-35.

[13] WEI Q，HALIKE A，YAO K，et al. Construction and optimization of ecological security pattern in Ebinur Lake Basin based on MSPA-MCR models[J]. Ecological Indicators，2022，138(8)：108857.

[14] LI Y，HUANG Y L，ZHANG X Y，et al. Ecosystem health assessment: A PSR analysis combining AHP and EW methods for Sansha Bay, China[J]. Frontiers in Marine Science，2024，11(1)：1396026.

[15] 徐彩瑶，濮励杰，朱明，等. 沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展[J]. 生态学报，2018，38(3)：1148-1162.

[16] 吴侃侃，姜尚，高宇，等. 海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价方法体系的探讨与分析[J]. 海洋开发与管理，2023，39(11)：46-58.

[17] 王金华，黄华梅，贾后磊，等. 粤港澳大湾区海岸带生态系统保护和修复策略[J]. 生态学报，2020，40(23)：8430-8439.

[18] YU G，SUN P，LIU G，et al. Diagnostic model construction and example analysis of habitat degradation in enclosed bay: I. diagnostic model construction[J]. Journal of Oceanology and Limnology，2014，32(3)：626-635.

Ecological Security Assessment of Guangzhou Coastal Zone Based on PSR Model

WEI Hujin[1,2,3], XU Guangping[1,2,3], ZHANG Qinghua[1,2,3], CHEN Jie[4]

(1. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China; 2. Collaborative Innovation Center for Natural Resources Planning and Marine Technology of Guangzhou, Guangzhou 510060, China; 3. Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou 510060, China; 4. Fourth Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Beihai 536015, China)

Abstract: midst the rapid socio-economic development and the overexploitation of coastal resources, the coastal ecosystem has faced mounting threats to its ecological security. This study aims to reveal the spatiotemporal evolution characteristics and key influencing factors of coastal ecological security in Guangzhou, providing a scientific basis for coastal environmental protection and resource management. Based on the Pressure-State-Response (PSR) framework, the entropy weight method was employed to determine indicator weights, and a comprehensive evaluation system for coastal ecological security was constructed to quantitatively analyze the status of Guangzhou's coastal ecological security over the past decade. The findings reveal that proactive environmental governance measures undertaken by the government have progressively improved the coastal ecological security in recent years. Nevertheless, intense resource exploitation associated with high population density and accelerated urbanization, together with upstream pollutant discharges causing seawater quality exceedances, continue to exert significant ecological pressures. Between 2022 and 2023, the comprehensive indicator weights of the pressure layer-dominated by factors such as population density and marine fishing-were overtaken by those of the response layer, primarily characterized by the proportion of energy conservation, environmental protection expenditures, and the volume of wastewater treatment. To further bolster coastal ecological security, it is recommended to implement graded control over coastal development intensity, promote integrated land-sea approaches to water environment management, and advance ecological restoration efforts.

Keywords: coastal; ecological security; PSR model; entropy weight method; Guangzhou