黄海燕,路文海,康林冲,等.基于多维关联分析的近海生态系统质量评价指标体系研究——以渤海湾、长江口和珠江口为例 [J]. 中国环境科学, 2026,46(2):934-944.
Huang H Y, Lu W H, Kang L C, et al. Study on the evaluation index system of coastal ecosystem quality based on multidimensional correlation analysis—a case study of Bohai Bay, Changjiang River Estuary and Zhujiang River Estuary [J]. China Environmental Science, 2026,46(2):934-944.

基于多维关联分析的近海生态系统质量评价指标体系研究
——以渤海湾、长江口和珠江口为例

黄海燕,路文海,康林冲,刘 倡,许 艳*,胡晓霞 (国家海洋信息中心,天津 300171)

摘要：基于生态系统质量内涵,构建了涵盖生态格局、生态功能、生物多样性和生态胁迫 4 个维度的理论指标体系.以渤海湾、长江口和珠江口为研究区域,整合处理 2003~2023 年间海水水质、沉积物质量、浮游植物、浮游动物、大型底栖生物及鱼卵仔鱼等多源数据,综合运用跨维度指标相关性分析与维度内多重共线性分析方法,实现指标体系科学简化.结果表明,在跨维度分析中,沉积物总有机碳、水体氨氮和鱼卵仔鱼密度与其它指标多无显著相关性(P<0.05),因此予以剔除;各维度内指标间存在显著相关性,通过保留代表性指标实现简化——生态格局维度保留盐度,生物多样性维度统一采用密度指标,生态胁迫维度则保留无机氮、活性磷酸盐以及信息独立的石油类.最终,将原有的 36 个 3 级指标简化为 9 个核心指标,涵盖生态格局指标(海底透光率 Fr、盐度)、生态功能指标(叶绿素 a)、生物多样性指标(浮游植物密度、浮游动物密度、大型底栖生物密度)以及生态胁迫指标(无机氮、活性磷酸盐、石油类).该简化指标体系在保证科学性和代表性的基础上,提升了数据获取效率与操作可行性.

关键词：近海生态系统质量；评价指标；指标简化；多维关联分析；共线性分析
中图分类号：X822 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-0934-11

Study on the evaluation index system of coastal ecosystem quality based on multidimensional correlation analysis—a case study of Bohai Bay, Changjiang River Estuary and Zhujiang River Estuary. HUANG Hai-yan, LU Wen-hai, KANG Lin-chong, LIU Chang, XU Yan*, HU Xiao-xia (National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：934~944

Abstract：Building on the concept of ecosystem quality, this study developed a theoretical indicator system constructed around four dimensions: ecological pattern, biodiversity, ecological function, and ecological stress. Taking the Bohai Bay, the Changjiang River Estuary, and the Zhujiang River Estuary as study areas, multi-source data from 2003 to 2023 covering seawater and sediment quality, phytoplankton, zooplankton, macrobenthos, and fish eggs and larvae, were integrated and analyzed. Cross-dimensional correlation analysis and within-dimension multicollinearity diagnostics were applied to streamline the indicator set. Results indicated that sediment total organic carbon, seawater ammonia nitrogen, and fish egg/larval density showed no significant correlation (P<0.05) with most other indicators in cross-dimensional tests and were therefore removed. Within each dimension, indicators were significantly correlated, enabling further simplification through the retention of representative measures: salinity for ecological pattern, density metrics for biodiversity, and inorganic nitrogen, reactive phosphate, and petroleum (which carried independent information) for environmental stress. Consequently, the original set of 36tertiary indicators was refined to 9 core indicators: ecological pattern (seabed light transmittance Fr, salinity), ecological function (chlorophyll-a), biodiversity (phytoplankton, zooplankton, and macrobenthos density), and ecological stress (inorganic nitrogen, reactive phosphate, petroleum). This simplified indicator system maintains scientific rigor and representativeness while enhancing data acquisition efficiency and practical feasibility.
Key words：coastal ecosystem quality；evaluation indicators；indicator simplification；multi-dimensional correlation analysis；collinearity analysis

随着全球气候变化的加剧和人类活动强度的上升,近海生态系统的结构与功能正面临日益严峻的挑战.生态系统质量是衡量区域生态安全与可持续发展能力的重要指标之一[1],开展近海生态系统质量评价,对于科学制定生态保护修复策略、优化资源开发利用、提升生态系统管理水平具有重要意义.

国际社会高度重视对海洋生态系统的评估,定期或不定期发布了涵盖全球尺度[2]、国家尺度(如中国[3-4]、美国[5]、澳大利亚[6]、英国[7]、瑞典[8])、区

收稿日期：2025-07-07
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3108003,2023YFC3108004)
* 责任作者, 高级工程师, 154240535@163.com

域尺度(如德国北海保护区[9]、芬兰湾[10]),以及针对典型海洋生态系统(如珊瑚礁[11]、海草床[12])等的评估报告,这些实践为不同类型和尺度的生态系统质量评估提供了有益经验.

目前,我国近海生态系统质量评价仍主要依赖于海水水质或沉积物污染指标等单一要素的分析[13-15],难以全面揭示生态系统的整体质量.近年来,尽管有关近海生态系统状况、健康与退化等方面的综合评价性方法[16-21]日益增多,但在实际应用中存在评价指标体系复杂、数据获取困难、评估频率低、区域间可比性差等问题,限制了其广泛推广与业务化应用.因此,亟需构建既能代表近海生态系统核心特征,又具备简便性和可操作性的指标体系,以实现近海生态系统质量常态化与高效评估.

本研究以常态化应用为导向,围绕近海生态系统质量的内涵,构建适用于近海生态系统质量评价的指标体系,选取渤海湾、长江口和珠江口为研究区域,采用相关性分析与多重共线性检验等方法开展指标简化研究,筛选出核心评价指标,形成兼具科学性与可操作性的近海生态系统质量评价简化指标体系,旨在为近海生态系统业务化监测、评估与管理提供参考.

1　材料与方法

1.1　技术路线

梳理国内现有海洋生态环境评价技术标准和规范中的指标,构建初始评价指标库;基于生态系统质量内涵和指标生态学意义,筛选关键指标,形成近海生态系统质量理论评价指标体系.依托渤海湾、长江口、珠江口 20 余年海水水质、沉积物质量、浮游植物、浮游动物、底栖生物和鱼卵仔鱼监测数据,通过跨维度指标相关性分析和维度内指标多重共线性分析,对理论指标体系进行简化,最终构建包含生态格局、生态功能、生物多样性、生态胁迫四个维度的近海生态系统质量评价简化指标体系.技术路线见图 1.

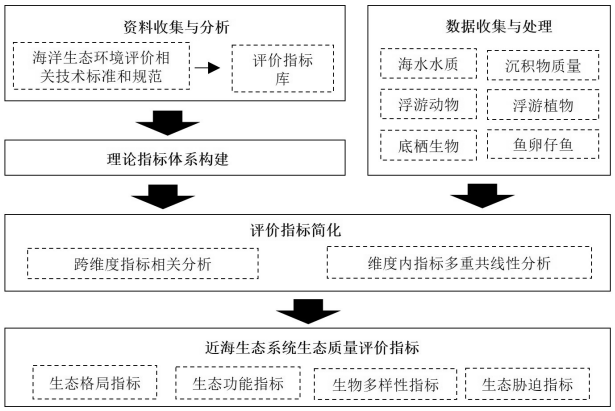
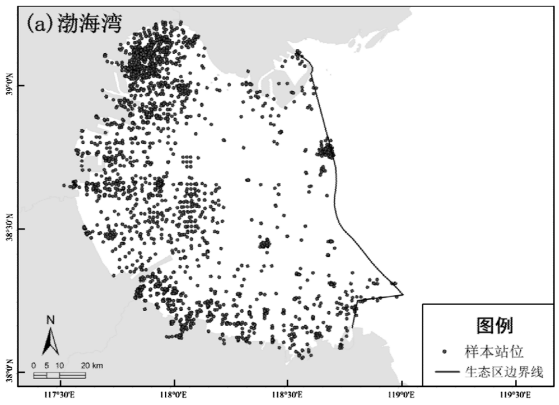


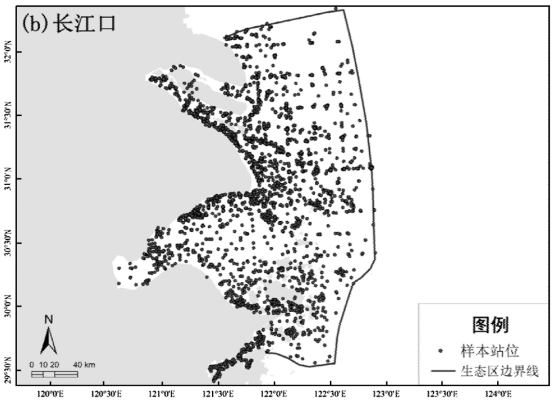
图 1　技术路线

Fig.1　Technology roadmap

1.2　资料收集与处理

收集的适用于研究区域评价的相关技术标准和规范包括:《海水水质标准》[13](GB 3097−1997)、《海洋沉积物质量》[14](GB 18668−2002)、《海水、海洋沉积物和海洋生物质量评价技术规范》[15](HJ 1300−2023)、《近岸海洋生态健康评价指南》[16](GBT 42631−2023)、《近岸海域海洋生物多样性评价技术指南》[17](HY/T 215−2017)以及海岸带生态系统现状调查与评估技术导则系列标准(红树林、盐沼、珊瑚礁、海草床、牡蛎礁、砂质海岸、泥质海岸、海湾、河口)[22-30]和生态海岸带评价指标体系[18]等.梳理各文件中评价指标,构建初始指标库.





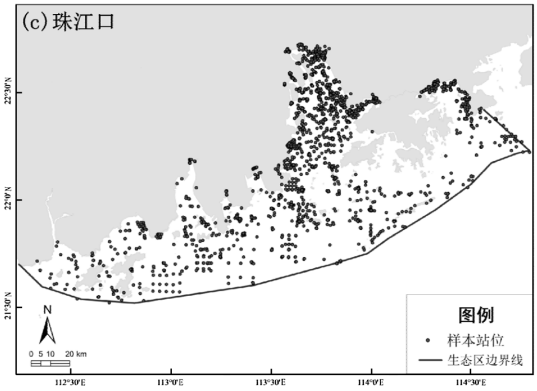


图 2 数据空间分布

Fig.2 Data space distribution

用于指标简化研究分析的数据位于渤海湾、长江口和珠江口三个生态区[31-32],来源于 2003~2023 年间持续开展的业务化海洋监测项目,以及“中国近海海洋综合调查与评价”专项历史数据(数据空间分布情况见图 2),采样频率 1~4 次/a,主要分布在 7~9 月,包括海水水质、沉积物质量、浮游植物、浮游动物、大型底栖生物和鱼卵仔鱼等,共计约 7.58 万站次.其中,海水水质各参数以混合层均值计算,沉积物质量采用表层数据,浮游植物、浮游动物和底栖生物数据则进一步计算各站位不同监测日期的物种数、密度、Shannon−Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、种类优势度指数等,用于后续分析.

1.3 理论评价指标体系构建方法

评价指标框架体系:基于陆海统筹思想,借鉴《区域生态质量评价办法(试行)》[33]整体框架,从生态格局、生态功能、生物多样性、生态胁迫 4 个维度构建近海生态系统质量评价体系框架结构.

理论评价指标构建:首先,依据近海生态系统结构与功能特征,结合指标库中各指标的生态表征意义,筛选适用于大型河口、大型海湾及近海区域的主要共性指标;其次,依据以下原则对指标进行筛选和调整,形成理论指标体系:(1)数据可获得性原则,优先选用已有业务化监测基础或已形成标准化产品的指标;(2)评价基准公认性原则,优先选择具有明确评价标准或阈值、便于判断质量优劣的指标;(3)评价结果可比性原则,确保所选指标在不同区域和时间尺度下具有良好的横向与纵向可比性.

1.4 指标简化方法

在构建理论评价指标体系的基础上,利用渤海湾、长江口和珠江口 3 个生态区范围内的多源数据,开展指标简化研究,主要过程包括:(1)跨维度相关性分析:通过统计分析手段,识别生态格局、生态功能、生物多样性和生态胁迫四个维度指标之间的相关关系,删除无显著关联,且不起决定作用的指标;(2)维度内多重共线性分析:对每一维度内的指标进行共线性检验,剔除高度相关或在生态系统中起相同作用的指标.

表 1 Person 相关分析的样本数

Table 1 The number of samples of Person correlation analysis

样本类型	样本数(条)		
	渤海湾	长江口	珠江口
海水水质	11086	22661	11995
沉积物质量	2508	4841	1815
浮游植物	1071	2806	838
浮游动物	1060	2876	821
底栖生物	2765	5027	1499
鱼卵仔鱼	755	998	407
海水水质和沉积物质量整合	2047	3608	1486
海水水质和浮游植物整合	868	2363	716
海水水质和浮游动物整合	857	2486	697
海水水质和底栖生物整合	2304	4164	1197
海水水质和鱼卵仔鱼整合	149	840	309
沉积物质量和浮游植物整合	481	1423	507
沉积物质量和浮游动物整合	475	1484	482
沉积物质量和底栖生物整合	1665	2612	833
沉积物质量和鱼卵仔鱼整合	3	470	227

具体操作方法包括:首先,采用 ArcGIS 空间分析工具,将海水水质和沉积物质量数据站位分别与相距 100m 以内的浮游植物、浮游动物和底栖生物监测站位相关联,过滤出同一监测时间(若无则选择同月中相近时间)的数据作为整合数据,连同各要素数据一起用于后续分析,共计 11 万余条样本记录(样本

量见表 1).随后,采用 SPSS 统计软件中的 Pearson 相关性分析模块,开展指标间的相关性与多重共线性分析,其中缺失数据的记录进行剔除处理.由于渤海湾沉积物质量与鱼卵仔鱼采用时空不匹配(仅 3 条匹配记录),可能影响统计显著性,需结合长江口和珠江口数据综合分析.最后,对分析结果进行整理,基于 Python 编程平台(PyCharm 开发环境),绘制相关性热力图,辅助可视化分析结果,支撑指标筛选决策.

2　结果与讨论

2.1　理论指标体系

《区域生态质量评价办法(试行)》[33]中的生态质量指数(EQI)已被纳入《美丽中国建设评估技术指南》(GB/T 44056—2024)[1]国家标准,用于“十四五”污染防治攻坚战成效考核及国家生态文明建设示范市县创建等工作.然而,该指标体系主要适用于县级及以上行政单元,不适用于近海生态系统.因此,本文在 EQI 框架的基础上,结合近海生态系统的特征,构建了包括生态格局、生物多样性、生态功能与生态胁迫 4 个维度 36 个指标的近海生态系统质量评价理论指标体系(表 2),各指标可通过常规监测、统计分析或产品数据收集获取有效数据.

表 2　近海生态质量评价理论指标体系

Table 2　Theoretical index system of coastal ecological quality evaluation

一级指标	二级指标		三级指标
生态格局	光照条件		Fr(海底透光率)或 KdPAR(光合作用有效辐射)或透明度或悬浮物浓度
	盐度条件		盐度
生态功能	生态功能		叶绿素 a 或初级生产力 鱼卵仔鱼密度
生物多样性	浮游生物	浮游植物	浮游植物种类数、密度、多样性指数、丰富度指数、均匀度指数、优势种优势度
		浮游动物	浮游动物种类数、密度、多样性指数、丰富度指数、均匀度指数、优势种优势度
	底栖生物		浅海大型底栖生物种类数、密度、生物量、多样性指数、丰富度指数、均匀度指数、种类优势度
生态胁迫	水体环境胁迫	富营养化、赤潮	无机氮、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮 活性磷酸盐、N/P
		溢油	石油类
	沉积环境胁迫	养殖污染	沉积物硫化物
		富营养化	沉积物总有机碳

生态格局维度聚焦近海生态系统中对生物分布格局具有重要影响的关键环境因子.其中,光照条件是海洋初级生产者(浮游植物和底栖植物)进行光合作用的必要条件,并显著影响动物的发育、生长、行为及分布.海水透明度是表示海水对可见光穿透能力的重要参数,直接影响海洋动植物的光照环境[34].海水中悬浮物质浓度决定透明度和水色的主要因素,不仅是光衰减的关键因子,也会显著影响海水的声学传播特性及其他光学属性(如反射率和折射率)[35].因此,可选用海底透光率(Fr)、光合有效辐射衰减系数(KdPAR)、透明度或悬浮物浓度等指标表征光照条件.此外,中国近海有大量的淡水输入,盐度条件是影响海洋生物的渗透压调节机制及物种分布格局(如狭盐性或广盐性物种)的关键因子[36].海水温度梯度则直接影响海洋生物的地理分布(如热带种、亚热带种、温带种、寒带种)[37],而海流对生物扩散和群落维持具有重要作用[38].鉴于温度和海流(流速、流向)指标难以确立普适性的质量优劣标准及阈值,本研究未将其纳入评价体系.

生态功能维度关注生态系统提供调节服务的能力,是对生态环境起稳定调节作用的功能,如物质循环、能量流动、信息传递、自我调节功能等,这些过程往往较难定量化.生产功能是生态系统基本功能,是维持生态系统自身稳定和生态系统服务的基础[39],因此,初级生产力是衡量该功能的理想指标.鉴于当前业务化监测中初级生产力数据较为缺乏,本研究最终选用叶绿素 a 浓度作为替代指标,以反映水域初级生产者的生物现存量[40-42].鱼卵和仔鱼丰度是评估海域作为产卵场或育幼场等繁殖补充功能的关键指标,直接影响高营养级生物的资源补充量[43],故将其作为生态功能指标.

生物多样性维度主要从浮游和底栖生物两个层面,采用种类数、密度、生物量、多样性指数、优势度、丰富度指数、均匀度等指标,综合表征群落物

种多样性水平及结构特征[44].鉴于游泳动物和微生物群落数据在常规监测中的可获得性低,本研究未将其纳入评价范围.

生态胁迫维度重点关注海水及沉积物中表征污染状况与诱发生态灾害的关键指标.包括氮、磷、石油类、沉积物硫化物及总有机碳等[45].此外,海水溶解氧(DO)和 pH 值可用于表征海洋缺氧和酸化状况(DO<2mg/L 视为严重缺氧,pH 值持续下降表征酸化),前者由温度、盐度、水体混合和富营养化等多因素共同驱动;后者主要受海水碳酸盐体系中 CO 溶解—解离控制,二者属于“状态/结果”而非可直接调控的“胁迫”指标,因缺氧和酸化都需高频次、高精度的观测手段,归因复杂、管理可操作性有限,再加上 pH 值缺乏阈值标准,DO 与富营养化等现有评价指标存在过程耦合,故未将其纳入生态胁迫指标体系[13,46-49].水体及沉积物中的重金属污染虽具潜在生态风险,但考虑其胁迫效应需长期富集累积方能显现,且相关数据的系统性、可获取性存在挑战,故未纳入本评价指标体系.

2.2 跨维度指标相关性

图 3 显示,3 个区域中盐度与水体的 COD、氮、磷、硅指标呈极显著负相关关系(P<0.01,−0.061⩾r⩾−0.773),与石油类呈正相关关系(渤海湾 r=0.028*;长江口 r=0.008;珠江口 r=0.068**);透明度在长江口和珠江口区域与水体的 COD、氮、磷、硅、石油类指标呈极显著相关关系(−0.185⩾r⩾−0.239),但在渤海湾区域仅与无机氮、氨氮、亚硝酸盐、活性磷酸盐呈显著或极显著负相关关系(P<0.05,r⩽−0.049),与石油类呈极显著正相关关系(r=0.263**);悬浮物指标与水体的 COD、氮、磷、硅和石油类指标多呈显著或极显著的正相关关系,但在渤海湾与 COD(r=0.025),长江口与氮磷比(r=0.001)和石油类(r=0.003),珠江口与无机氮(r=0.021)、氨氮(r=0.024)和石油类(r=−0.02)的相关性不显著(P⩾0.05).然而格局指标与沉积物中指标的相关性则普遍不显著,其中硫化物与透明度呈正相关,且在渤海湾极显著(r=0.235**)、长江口显著(r=0.113*)、珠江口不显著(r=0.075),与悬浮物仅在渤海湾呈极显著负相关关系(r=−0.179**);沉积物总有机碳在渤海湾和长江口生态区与生态格局类指标之间无显著相关性(P⩾0.05).

图 4 显示,浮游植物与浮游动物均匀度指标、底栖生物生物量指标与生态格局和生态胁迫指标间多无显著相关性(共 117 个分析结果中仅有 12 个呈显著和极显著相关关系),其中浮游植物均匀度相关分析结果有 4 个呈极显著负相关(P<0.01)2 个呈显著负相关(P<0.05),浮游动物均匀度仅在长江口与透明度呈显著负相关(r=−0.365*),底栖生物生物量仅在渤海湾与无机氮(r=0.063**)、硝酸盐(r=0.073**)、总有机碳(r=0.056*)呈极显著或显著正相关,在长江口与悬浮物呈显著正相关(r=0.088*).此外,沉积物总有机碳与氨氮在多数情况下与生物多样性和生态功能指标未表现出显著相关性,其中沉积物总有机碳 63 个分析结果中仅有 6 个呈显著正相关关系(r⩾0.047*)3 个呈显著或极显著负相关关系(渤海湾 r=−0.142**;长江口 r=−0.121*;珠江口 r=−0.130**);氨氮分析结果仅有 6 个呈显著负相关(−0.028*⩾r⩾−0.085*)、4 个呈极显著负相关(−0.086**⩾r⩾−0.228**)、3 个呈显著正相关(0.048*⩾r⩾0.044*)、3 个呈极显著正相关(0.232**⩾r⩾0.083**).

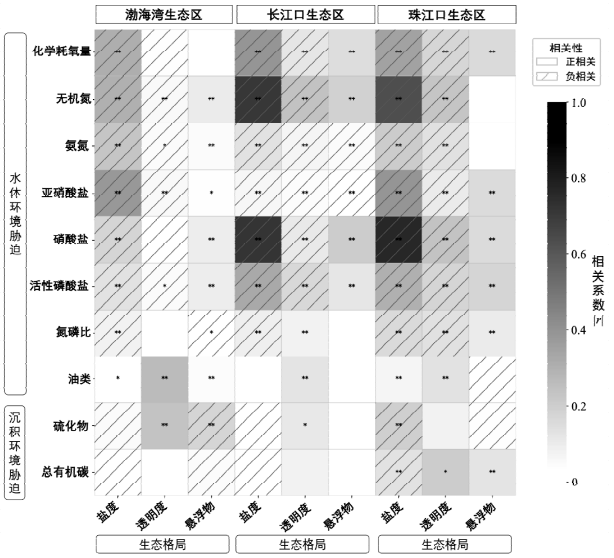


图 3 渤海湾、长江口和珠江口生态区生态格局指标和生态胁迫指标间相关分析热力图

Fig.3 Correlation analysis heat map of ecological pattern and ecological stress index in Bohai Bay, Changjiang River Estuary and Zhujiang River Estuary ecological zone

“**”表示极显著相关,P<0.01;“*”表示显著相关,P<0.05;右侧的纵轴为 Pearson 相关系数,r−1⩽r⩽1

生态功能维度中鱼卵仔鱼密度指标亦与生态格局及生态胁迫维度中的大多数指标无显著性相关关系,仅在长江口与悬浮(r=−0.095**)和硝酸盐

(r=−0.096**)呈极显著负相关,与沉积物总有机碳呈显著负相关(r=−0.121*),与氨氮(r=0.232**)和亚硝酸盐(r=0.136**)呈极显著正相关;叶绿素 a 指标与生态格局和生态胁迫维度指标多数显著相关(占 64%),与生物多样性指标多数不显著(显著相关的占 42%).相关研究结果也显示,海水叶绿素 a 与盐度、pH 值、氮、磷分布显著相关[50-51],盐度、氮、磷等显著影响浮游植物分布[52-54],与本研究结果一致.

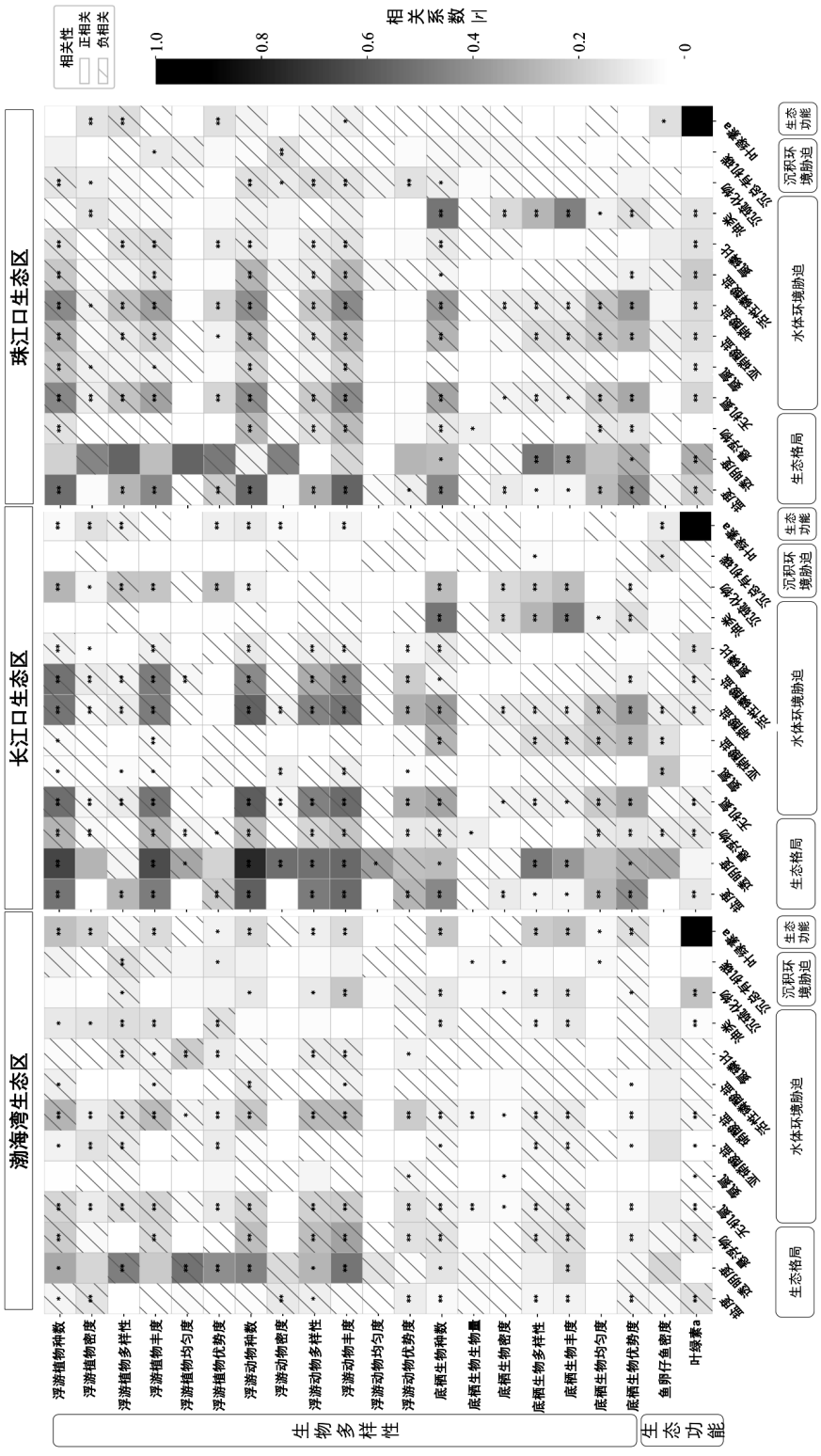


图 4　生物多样性、生态功能与生态格局和生态胁迫指标间相关分析热力图

Fig.4　Correlation analysis heat map of biodiversity, ecological function, ecological pattern and ecological stress index

“**”表示极显著相关,P<0.01;“*”表示显著相关,P<0.05;右侧的纵轴为 Pearson 相关系数 r,−1≤r≤1

综上,为提升指标体系简洁性与独立性,在指标简化过程中剔除与其他维度指标相关性较低的沉积物总有机碳与水体氨氮指标.此外,水体石油类与底栖生物种类数、密度和丰度指数存在极显著的正相关关系(P<0.01,0.503**≥r≥0.073**),但与浮游动物指标无显著相关性(P≥0.05),也与浮游植物在长江口和珠江口也基本无显著相关性(除珠江口浮游植物密度 r=0.126**),因此暂予保留以供进一步分析.

2.3 维度内指标共线性关系

图 5 结果显示,在生态格局维度中,盐度与悬浮物在渤海湾(r=−0.041**)和长江口(r=−0.112**)呈极显著负相关(P<0.01);盐度和透明度在长江口(r=0.110**)和珠江口(r=0.261**)亦呈极显著正相关关系(P<0.01);透明度和悬浮物在长江口呈显著负相关关系(P<0.05,r=−0.079*).为避免同一维度内指标间的多重共线性问题,并提升模型稳定性与解释力,生态格局维度中保留盐度作为代表性指标.生态功能维度中,叶绿素 a 和鱼卵仔鱼密度在三个区域中表现出不同的相关性水平(渤海湾不显著正相关 r=0.028;长江口极显著正相关 r=0.098**;珠江口显著正相关 r=0.144*),考虑到鱼卵仔鱼密度在与其他维度指标相关性分析中多不显著(图 5,36 个分析结果中 5 个显著),其中渤海湾由于匹配分析的样本数极少其结果存在局限性,考虑到鱼卵仔鱼密度主要由生物繁殖期控制,故建议删除该指标,仅保留叶绿素 a 作为生态功能维度的核心指标.

多样性指数、丰度指数、均匀度指数和优势度指数 4 个生物多样性指数均基于各采样站位中不同物种的密度计算,分别反映群落的物种多样性水平、物种丰富度、个体分布均匀程度及是否存在单一优势种.图 6 显示:(1)浮游植物和浮游动物多样性指数间基本都呈极显著的相关关系(图 6 中**,P<0.01),底栖生物除长江口和珠江口的均匀度和丰度指数外,其它也都呈极显著相关关系,因此各多样性指标间存在较强冗余性;(2)站位物种数与各生物多样性指数间(除珠江口浮游植物和浮游动物指数外)都显著相关,其中浮游植物呈极显著正或负相关(0.958**≥r≥−0.259**)、浮游动物呈极显著正或负相关(0.935**≥r≥−0.391**)、底栖生物呈显著(r=0.064*;0.057*)正相关或极显著正或负相关(0.956**≥r≥−0.549**)关系,存在较强的冗余性;(3)密度与多样性指标多数情况下相关性不显著(P≥0.05),36 个分析结果中 2 个显著相关(r=0.059*;−0.069*)12 个极显著相关(0.210**≥r≥−0.225**);(4)除渤海湾和珠江口浮游植物密度与种类数相关性不显著外(r=0.016 或 0.033;P≥0.05),其它浮游植物、浮游动物、底栖生物密度与种类数呈显著或极显著正相关,因此物种数和密度间也存在冗余.为避免维度内多重共线性问题,需剔除功能冗余或高度相关的指标,考虑野外调查和实验室分析过程中,密度数据受物种鉴定人员主观判断的影响较小,具备较高的可操作性和稳定性,因此在生物多样性维度最终保留密度作为代表性指标.

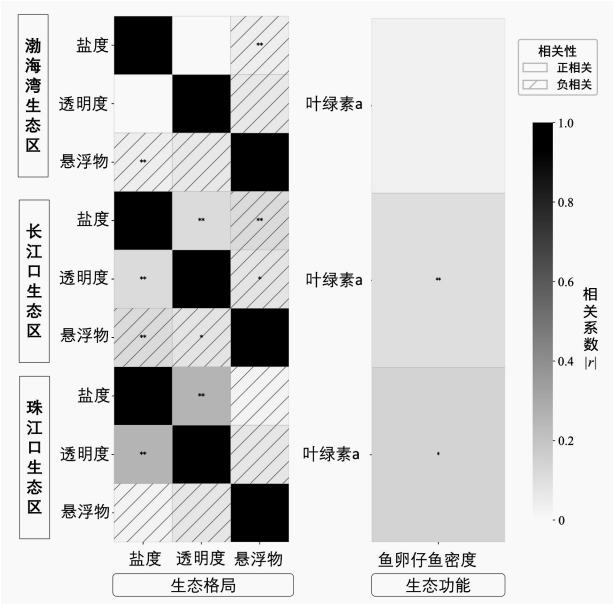


图 5 生态功能、生态格局各指标相关分析热力图

Fig.5 Correlation analysis heat map of ecological function and ecological pattern index

图中“**”表示极显著相关,P<0.01;“*”表示显著相关,P<0.05;右侧的纵轴为 Pearson 相关系数 r,−1≤r≤1

图 6 显示,水体无机氮与氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐、氮磷比之间呈极显著正相关关系(0.968**≥r≥0.066**),呈现高度共线性.此外,活性磷酸盐与各类氮素指标亦表现出极显著正相关关系(0.575**≥r≥0.066**),说明二者间存在信息重合.中国海洋生态环境状况公报指出,渤海湾、长江口和珠江口区域无机氮和活性磷酸盐为主要超标因子[4,55],故在生态胁迫维度中保留无机氮与活性磷酸盐两个核心指标.相关分析结果显示石油类与氮磷指标之间基本无

显著相关性(P≥0.05),石油类是珠江口和入海河流易超标的因子[4,55],具有独立信息价值,因此予以保留.沉积物中硫化物和总有机碳指标在三个区域中与水体无机氮存在极显著负或正相关(0.360**≥r≥−0.076**),在珠江口与活性磷酸盐呈极显著正相关(硫化物 r=0.132**;总有机碳 r=0.217**),表明其与其他胁迫指标间存在信息冗余,且该类指标与生态功能和生物多样性维度间相关性大多不显著(P≥0.05,其中硫化物占比 54%,总有机碳显著的占 86%),故在胁迫维度指标简化过程中建议予以剔除.

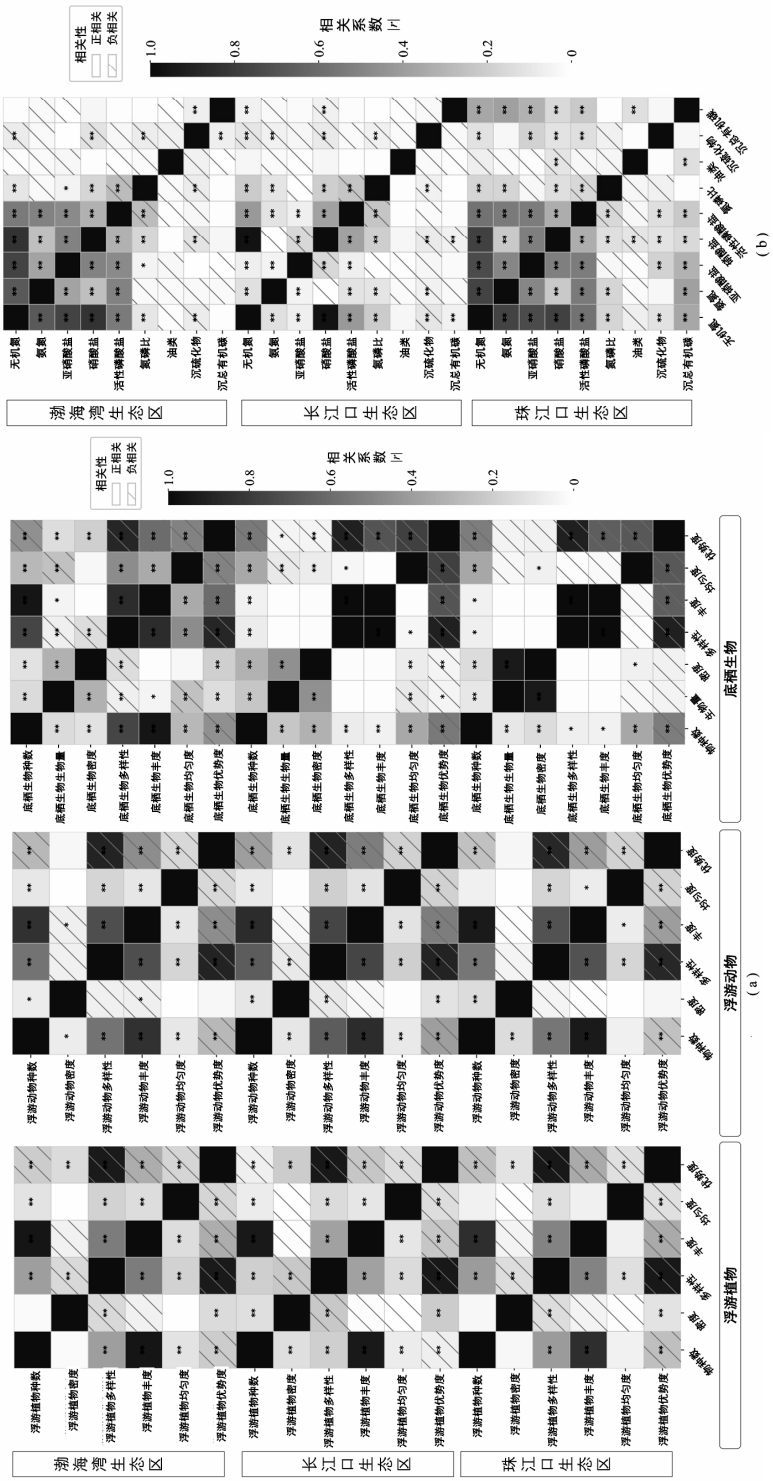


图 6　生物多样性(a)和生态胁迫(b)指标内相关分析热力图

Fig.6　Correlation analysis heat map of biodiversity indicators (a) and ecological stress indicators (b)

“**”表示极显著相关,P<0.01;“*”表示显著相关,P<0.05;右侧的纵轴为 Pearson 相关系数 r,−1≤r≤1

2.4 简化后指标体系

基于生态格局、生态功能、生物多样性和生态胁迫 4 个维度间的相关分析,首先剔除了维度间相关性弱、在生态系统质量评价中作用有限的指标.随后,结合各维度内部指标的多重共线性分析,进一步删除了相关性过高、存在信息冗余的指标,最终形成了精简后的生态质量评价指标体系,如表 3 所示.其中光照条件指标 Fr(海底透光率)由光合作用有效辐射衰减系数(KdPAR)与水深共同计算得出,其中 KdPAR 为遥感监测产品,本研究虽未能获取实地站位数据以开展其相关性分析,但考虑到 Fr 较悬浮物和透明度等传统指标更能直接反映海底光照状况,因而予以保留.经以上筛选与优化,原理论指标体系中 36 个三级指标被精简为 9 个核心三级指标,涵盖生态格局(Fr、盐度)、生态功能(叶绿素 a)、生物多样性(浮游植物密度、浮游动物密度、浅海大型底栖生物密度)和生态胁迫(无机氮、活性磷酸盐、石油类)四个维度.

表 3 近海生态质量评价指标体系

Table 3 Coastal ecological quality evaluation index system

一级指标	二级指标	三级指标
生态格局	光照条件	Fr(海底透光率)
	盐度条件	盐度
生态功能	生态功能	叶绿素 a
生物多样性	浮游生物	浮游植物密度
		浮游动物密度
	底栖生物	浅海大型底栖生物密度
生态胁迫	生态灾害和污染	无机氮
		活性磷酸盐
		石油类

本研究从生态格局、生物多样性、生态功能和生态胁迫 4 个维度构建了适用我国近海生态系统质量评价理论指标体系,通过系统性指标筛选形成业务化适用的简化方案.该过程创新性地融合多源长期观测数据与统计降维方法,实现了从复杂理论框架向可推广、可复制的实用化评价体系的跨越.简化后的指标体系显著提升了评价的可操作性与区域可比性.一方面,核心指标数据均可通过常规监测获取,解决了原体系“指标冗杂、数据难获”的应用障碍;另一方面,通过消除维度内共线性及弱相关指标,增强了评价模型的科学性与稳定性.下一步研究将围绕核心指标的质量评价基准设定、权重分配及综合评价模型构建展开,并验证简化后指标体系与未简化指标体系在评价近海生态系统质量是否同样有效,最终形成区域性示范产品,推动近海生态系统质量评估向精细化、定量化方向发展.

2.5 不确定性分析

本研究在生态质量评价指标的筛选过程中主要依赖于相关性分析与多重共线性检验等数学统计方法,以确保最终指标体系在信息表达上具备较高的独立性与代表性,然而,纯粹基于数学方法的筛选存在一定局限性,可能忽略部分在生态学上具有重要意义但在统计分析中表现不显著的指标.例如,某些关键生态过程或突发性污染事件的敏感指标,虽在当前样本中未表现出强相关性,但在特定生态背景或长期监测中可能具有较高预警价值.因此,建议在后续的使用过程中,引入相应的校准与反馈机制,一方面可通过专家咨询、生态模型模拟等手段验证和补充数学筛选结果,另一方面可结合管理目标(如污染防控、生物多样性保护等)对指标选择进行适度调整,以增强评价体系的科学性、适应性与政策相关性.此外,对于部分目前数据获取受限但具有重要生态意义的指标(如初级生产力、Fr),建议在条件允许时逐步纳入业务化体系,从而提高其在实际生态管理与决策中的应用效果与科学支撑能力.

3 结论

3.1 本研究基于生态系统质量内涵,构建了涵盖生态格局、生态功能、生物多样性和生态胁迫 4 个维度 36 个指标的理论指标体系.

3.2 通过对长江口、渤海湾和珠江口三个生态区范围内 21 年数据的收集处理,采用跨维度相关分析与维度内多重共线性分析,将初始 36 项指标精简为 9 项核心指标.

3.3 生态格局维度保留海底透光率(Fr)和盐度,其中 Fr 通过遥感衍生的光合有效辐射衰减系数(KdPAR)计算,能直接表征对生物分布至关重要的海底光照条件.

3.4 生态功能维度采用叶绿素 a 浓度替代初级生产力,有效解决业务化监测中生产力数据缺失的瓶颈.

3.5 生物多样性维度选取浮游植物、浮游动物及浅海大型底栖生物的密度指标,克服了传统多样性指

数冗余度高且操作复杂的局限.

3.6　生态胁迫维度则聚焦无机氮、活性磷酸盐和石油类三项关键污染物指标,剔除与水体指标高度共线性的沉积物参数,避免了多介质重复表征,形成了以水体污染为核心、简洁高效的胁迫识别体系,显著提升业务化应用的可行性.

参考文献：

[1] GB/T 44056—2024　美丽中国建设评估技术指南 [S].
GB/T 44056—2024　Technical guidelines for evaluation of beautiful China construction [S].

[2] United Nations. The second world ocean assessment [R]. New York: The United Nations, 2021.

[3] 2023 年中国海洋生态预警监测公报 [R]. 中华人民共和国自然资源部, 2024.
2023 China marine ecological early warning and monitoring bulletin [R]. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2024.

[4] 2023 年中国海洋生态环境状况公报 [R]. 中华人民共和国生态环境部, 2024.
2023 China marine ecological environment status bulletin [R]. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2024.

[5] National coastal condition assessment 2015 [R]. U.S. Environmental Protection Agency, 2021.

[6] Australia state of the environment [EB/OL]. Australian Government, 2021.

[7] Charting progress 2: the state of UK seas [EB/OL]. The UK Marine Monitoring and Assessment Strategy community, 2010.

[8] Ekosystemtjänster från svenska hav [R]. Swedish Agency for Marine and Water Management, 2015.

[9] Die meeresschutzgebiete in der deutschen ausschließlichen wirtschaftszone der nordsee: beschreibung und zustandsbewertung [R]. Bundesamt für Naturschutz, 2017.

[10] The gulf of finland assessment [EB/OL]. Finnish Environment Institute, 2020.

[11] Status of coral reefs of the world: 2020 report [R]. Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN) and International Coral Reef Initiative (ICRI), 2021.

[12] Out of the blue: the value of seagrasses to the environment and to people. UNEP, Nairobi [R]. United Nations Environment Programme, 2020.

[13] GB 3097−1997　海水水质标准 [S].
GB 3097−1997　Sea water quality standard [S].

[14] GB 18668−2002　海洋沉积物质量 [S].
GB 18668−2002　Marine sediment quality [S].

[15] HJ 1300—2023　海水、海洋沉积物和海洋生物质量评价技术规范 [S].
HJ 1300—2023　Technical specification for assessment of sea water, marine sediment and marine biological quality [S].

[16] GBT 42631—2023　近岸海洋生态健康评价指南 [S].
GBT 42631—2023　Guidelines for assessment of coastal marine ecological health [S].

[17] HY/T 215−2017　近岸海域海洋生物多样性评价技术指南 [S].
HY/T 215−2017　Guideline for marine biodiversity assessment in nearshore area [S].

[18] 生态海岸带评价指标体系(试行) [Z]. 中华人民共和国自然资源部, 2023.
Ecological coastal zone evaluation index system (Trial) [Z]. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2023.

[19] EU marine strategy framework directive [EB/OL]. European Commission, (2021).

[20] National Coastal Condition Assessment 2015 [R]. U.S. Environmental Protection Agency, 2021.

[21] 王秋璐,黄海燕,陈满春,等.海岸带环境状况评价方法及其应用 [J]. 海洋通报, 2018,37(3):345−352.
Wang Q L, Huang H Y, Chen M C, et al. Coastal zone environmental condition assessment and its application [J]. Marine Science Bulletin, 2018,37(3):345−352.

[22] HY/T 0460.3−2024　海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 3 部分:红树林 [S].
HY/T 0460.3−2024　Technical directives for investigation and assessment of coastal ecosystem status—Part 3:Mangroves [S].

[23] HY/T 0460.4−2024　海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 4 部分:盐沼 [S].
HY/T 0460.4−2024　Technical directives for investigation and assessment of coastal ecosystem status—Part 4:Salt marshes [S].

[24] HY/T 0460.5−2024　海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 5 部分:珊瑚礁 [S].
HY/T 0460.5−2024　Technical directives for investigation and assessment of coastal ecosystem stasus—Part 5:Coral reefs [S].

[25] HY/T 0460.6−2024　海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 6 部分:海草床 [S].
HY/T 0460.6−2024　Technical directives for investigation and assessment of coastal ecosystem status—Part 6:Seagrass beds [S].

[26] HY/T 0460.7−2024　海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 7 部分:牡蛎礁 [S].
HY/T 0460.7−2024　Technical directives for investigation and assessment of coastal ecosystem status—Part 7:Oyster reef [S].

[27] HY/T 0460.8−2024　海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 8 部分:砂质海岸 [S].
HY/T 0460.8−2024　Technical directives for investigation and assessment of coastal ecosystem status—Part 8:Sandy coast [S].

[28] HY/T 0460.10−2024　海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 10 部分:海湾 [S].
HY/T 0460.10−2024　Technical directives for investigation and assessment of coastal ecosystem status—Part 10:Bay [S].

[29] HY/T 0460.11−2024　海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 11 部分:泥质海岸 [S].
HY/T 0460.11−2024　Technical directives for investigation and assessment of coastal ecosystem status—Part 11:Muddy coast [S].

[30] T/CAOE 20.9−2020　海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 9 部分:河口 [S].
T/CAOE 20.9−2020　Technical guideline for investigation and

assessment of coastal ecosystem—Part 9:Estuary [S].

[31] T/CAOE 54−2023 中国近海生态分区 [S].
T/CAOE 54−2023 Ecological zoning in China seas and adjacent waters [S].

[32] Huang H Y, Lu W H, Zuo G C, et al. Ecological distribution patterns in Chinese seas and adjacent waters: Marine ecological zones [J]. Science of the Total Environment, 2023,905,167259.

[33] 区域生态质量评价办法(试行) [Z]. 生态环境部, 2021.
Regional ecological quality evaluation method (Trial) [Z]. Ministry of Ecology and Environment, 2021.

[34] Kirk J T O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems [R]. 2011.

[35] Mobley C D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters [R]. 1994.

[36] Whitfield A K., Elliott M, Basset A, et al. Paradigms in estuarine ecology—a review of the Remane diagram with a suggested revised model for estuaries [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 97:78−90.

[37] Sunday J M, Bates A E, Dulvy N K. Thermal tolerance and the global redistribution of animals [J]. Proceedings of the Royal Society B, 2012,279(1730):2058−2066.

[38] Cowen R K, Sponaugle S. Larval dispersal and marine population connectivity [J]. Annual Review of Marine Science, 2009,1:443−466.

[39] 冯剑丰,李 宇,朱 琳.生态系统功能与生态系统服务的概念辨析 [J]. 生态环境学报, 2009,18(4):1599−1603.
Feng J F, Li Y, Zhu L. Discrimination of concepts of ecosystem functions and ecosystem services [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009,18(4):1599−1603.

[40] Behrenfeld M J, Falkowski P G. Photosynthetic rates derived from satellite−based chlorophyll concentration [J]. Limnology and Oceanography, 1997,42(1):1−20.

[41] Cloern J E, Grenz C, Vidergar L L. An empirical model of the phytoplankton chlorophyll: carbon ratio — The conversion factor between productivity and growth rate [J]. Limnology and Oceanography, 1995,40(7):1313−1321.

[42] Behrenfeld M J, Falkowski P G. Photosynthetic rates derived from satellite−based chlorophyll concentration [J]. Limnology and Oceanography, 1997,42(1):1−20.

[43] Houde, E D. Emerging from Hjort's shadow [J]. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science. 2008,41:53−70.

[44] Magurran A E. Measuring biological diversity [M]. Blackwell Publishing, 2004.

[45] 王启栋,宋金明,袁华茂,等.基于近海健康评价现有体系的我国普适海洋健康评价“双核”新框架的构建.生态学报, 2021,41(10):3988−3997.
Wang Q D, Song J M, Yuan H M, et al. A universal and new dua−core framework for ocean health assessment in China based on the existing offshore health assessment systems. Acta Ecologica Sinica, 2021,41 (10):3988−3997.

[46] Dia Z, Robert J, Rutger R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems [J]. Science, 2008,321(5891):926–29.

[47] Doney S C, Fabry V J, Feely R A, et al. Ocean acidification: the other CO_2 problem [J]. Ann Rev Mar Sci, 2009,1:169−92.doi: 10.1146/annurev.marine.010908.163834.

[48] Hofmann G E , Smith J E, Johnson K S, et al. High−frequency dynamics of Ocean pH: A multi−ecosystem comparison [J]. PLoS ONE, 2011,6(12):e28983. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028983.

[49] Levin L A. Manifestation, drivers, and emergence of open ocean deoxygenation [J]. Annual Review of Marine Science, 2018,10:229−260.

[50] 周艳蕾,张传松,石晓勇,等.黄渤海海水中叶绿素 a 的分布特征及其环境影响因素 [J]. 中国环境科学, 2017,37(11):4259−4265.
Zhou Y L, Zhang C S, Shi X Y, et al. Distribution characteristics of chlorophyll a and its influencing environmental factors in Bohai Sea and Yellow Sea [J]. China Environmental Science, 2017,37(11):4259−4265.

[51] 张 伟,孙 健,聂红涛,等.珠江口及毗邻海域营养盐对浮游植物生长的影响 [J]. 生态学报, 2015,35(12):4034−4044.
Zhang W, Sun J, Nie H T, et al. Seasonal and spatial variations of nutrient and the response of phytoplankton in PRE and Adjacent Sea Areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(12):4034−4044.

[52] 黄海燕,王秋璐,许 艳,等.2004~2016 年夏季长江口网采浮游植物及其影响因素 [J]. 海洋与湖沼, 2018,49(2):319−330.
Huang H Y, Wang Q L, X Y, et al. Distribution of summer community of net−collected phytoplankton from 2004to 2016and the factors in the Changjiang River Estuary [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2018,49(2):319−330.

[53] 江志兵,曾江宁,李宏亮,等.长江口及其邻近陆架区夏季网采浮游植物及其影响因素 [J]. 海洋学报(中文版), 2014,36(6):112−123.
Jiang Z B, Zeng J N, Li H l, et al. Distribution of net−phytoplankton community in summer and its influence factors in the Changjiang Estuary and adjacent continental shelf [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 2014,36(6):112−123.

[54] 赵晨英,臧家业,刘 军,等.黄渤海氮磷营养盐的分布、收支与生态环境效应 [J]. 中国环境科学, 2016,36(7):2115−2127.
Zhao C Y, Zang J Y, Liu J, et al. Distribution and budget of nitrogen and phosphorus and their influence on the ecosystem in the Bohai Sea and Yellow Sea [J]. China Environmental Science, 2016,36(7):2115−2127.

[55] 2018~2024 年中国海洋生态环境状况公报 [R]. 中华人民共和国生态环境部, 2019.
2018~2024 China marine ecological environment status bulletin [R]. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2019.

作者简介： 黄海燕(1986−),女,浙江苍南人,副研究员,硕士,主要从事海洋生态预警监测与评价、海洋生态分类分区研究.发表论文 20 余篇. huanghaiyan1000@126.com.