

DOI: 10.20103/j.stxb.202307241580

程飞飞, 李洪庆, 宋红艳, 陈明慧. 沿海城市陆海生态环境质量综合评价与耦合协调度. 生态学报, 2024, 44(9): 3855-3867.

Cheng F F, Li H Q, Song H Y, Chen M H. Comprehensive evaluation and coupling coordination analysis of land and sea ecological environment quality in coastal cities. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3855-3867.

沿海城市陆海生态环境质量综合评价与耦合协调度

程飞飞, 李洪庆*, 宋红艳, 陈明慧

河海大学公共管理学院, 南京 211100

摘要:沿海城市的经济快速发展和土地利用与海洋生态环境之间关系密切。陆海统筹的背景下, 科学了解陆海生态环境质量演变和空间分布特征, 探究两者的耦合协调关系对提升陆海生态安全统筹具有重要的实践意义。以中国沿海 53 个城市为例, 采用“活力-组织-恢复力(VOR, Vitality-Organization-Resilience)”模型评价陆地生态系统健康状况, 采用 TOPSIS 法通过构建指标体系评价海洋生态环境质量, 采用耦合协调度模型分析陆海生态环境质量耦合协调水平, 并提出相关建议。结果表明: 1) 2010—2020 年沿海城市陆地生态系统健康呈现“北低南高”的分布格局, 以杭州湾为主要分界线; 2) 2010—2020 年沿海城市海洋生态环境质量呈现趋好的态势, 海洋生态环境质量: 沿东海经济区<环渤海经济区<沿黄海经济区<沿南海经济区; 3) 2010—2020 年沿海城市陆海生态环境质量耦合程度进一步加强, 且南部城市协调度高于北部。研究为中国沿海地区陆海生态环境管理、因地制宜地开展生态修复工作提供科学依据, 对陆海生态系统的健康协同发展具有重要意义。

关键词:沿海城市; 生态环境质量评价; 生态系统健康; 耦合协调度; 陆海统筹

Comprehensive evaluation and coupling coordination analysis of land and sea ecological environment quality in coastal cities

CHENG Feifei, LI Hongqing*, SONG Hongyan, CHEN Minghui

School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211100, China

Abstract: The rapid economic development and land utilization in coastal cities are closely intertwined with the marine ecological environment. Against the backdrop of integrated land-sea coordination planning, comprehensively understanding the evolution and spatial distribution characteristics of land-sea ecological environmental quality and exploring the coupling and coordination relationship between them holds significant practical implications for enhancing the coordinated management of land-sea ecological security. The comprehensive evaluation of ecological environment quality in both land and sea has always been a hot topic of academic research. Having a comprehensive understanding of the ecological environment quality in both land and sea is a fundamental issue in studying the overall ecological security of land and sea, and is also a prerequisite for effective planning. Taking 53 coastal cities in China as a case study, this research employs the "Vitality-Organization-Resilience (VOR)" model to assess the health of terrestrial ecosystems. The vitality of terrestrial ecosystems is reflected by Net Primary Productivity (NPP), while landscape heterogeneity, landscape shape, and landscape connectivity represent the organization of terrestrial ecosystems. Habitat quality represents the resilience of terrestrial ecosystems. The TOPSIS method is utilized to evaluate the quality of the marine ecological environment by constructing an index system. Construct an index system from the three aspects of marine water environmental quality, marine sediment environmental quality, and marine biological environmental quality to reflect the level of marine ecological environment quality.

基金项目:中央高校基本科研业务费项目(B210202164)

收稿日期:2023-07-24; **网络出版日期:**2023-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lihongqing163@126.com

#本研究尚缺中国港澳台统计数据。

Furthermore, a coupling coordination degree model is employed to analyze the level of coupling and coordination of land-sea ecological environment quality. Relevant suggestions are proposed for cities with imbalanced development of land and sea ecological environment quality, as well as those transitioning from coordination to imbalance. The findings indicate that: 1) From 2010 to 2020, the health of terrestrial ecosystems in coastal cities exhibited a distribution pattern of "lower in the north and higher in the south," with the Hangzhou Bay serving as the primary dividing line; 2) From 2010 to 2020, the quality of the marine ecological environment in coastal cities demonstrated an improving trend, with the ranking of marine ecological environment quality as follows: East China Sea Economic Zone < Bohai Sea Economic Zone < Yellow Sea Economic Zone < South China Sea Economic Zone; 3) From 2010 to 2020, the coupling degree of land-sea ecological environment quality in coastal cities further strengthened, with higher coordination observed in southern cities compared to northern cities. This study provides a scientific basis for the management of land-sea ecological environment and the implementation of tailored ecological restoration work in China's coastal regions, which is of paramount significance for the healthy and synergistic development of land-sea ecosystems.

Key Words: coastal cities; ecological environment quality evaluation; ecosystem health; coupling coordination degree; land-sea coordination

海岸带是陆海交互作用最强烈的地区,是人口、资源、环境和经济的复合生态系统,不仅提供了大量的生态系统服务,例如气候调节、资源供给、文化休闲、物种栖息地等^[1],而且伴随着剧烈的人类活动,表现出资源过度开发、生态环境变化等问题。研究表明沿海陆地和近海区域通过子系统之间的相互作用和相互影响,成为一个具有显著复合生态系统特征的复杂脆弱有机体^[2-3],促进内部子系统协调发展对提升复合生态系统的整体功能性至关重要。因此,从整体主义生态环境观和系统论角度出发,将陆地与海洋作为一个整体,综合考虑其内部子系统或者要素的相互关联、相互作用、相互冲突及相互补充等复杂关系,为陆海协调管理提供有效的依据。

沿海城市是我国改革和经济发展的重心,陆海生态统筹发展的核心区域,聚集着大量的劳动人口,随着城市无序扩张和对外经济发展,沿海城市面临着水质污染、水体富营养化、赤潮频发、生物多样性锐减和栖息地质量恶化等日益复杂化的生态环境问题^[4-5],沿海城市的陆地与海洋生态环境保护与经济矛盾的矛盾日益突出。2004年“陆海统筹”概念提出,“十二五”之后的国民经济和社会发展规划均强调坚持陆海统筹,在陆海统筹和人海和谐的重大战略背景下,科学评价陆海生态环境质量及耦合协调关系,有利于明晰陆海生态子系统在生态环境质量方面的耦合程度及协调性,对识别沿海生态脆弱区、促进陆海复合生态系统的健康协同发展、构建沿海地区高质量发展的新格局具有重要意义。

陆地和海洋生态环境质量综合评价一直是学术界关注的热点,全面了解陆海生态环境质量是研究陆海生态安全统筹的基础性问题,也是做好统筹规划的前提。陆地生态环境质量与地形地貌、河流水文、气候降水、人类活动等密切相关,相比海洋生态环境较为复杂,评价体系需考虑更加全面,如物种多样性、生物量、生境质量、水环境质量、植被覆盖率等,这些指标综合反映了陆地生态系统的组分、空间结构和功能变化,能够全面反馈陆地生态环境质量^[6-7]。生态系统健康指数模型(EHI)是常用的评价模型,学者认为健康的生态系统具有完整的结构和功能特性,能够提供足够的营养和能量,确保人类发展的可持续性^[8-9]。近几十年来,已经制定了若干生态系统健康评估框架,例如压力-状态-响应(PSR)^[10-11]、驱动-压力-状态-影响-响应(DPSIR)^[12]、驱动-压力-状态-影响-响应-管理(DPSIRM)^[13],以上指标权重依赖于专家的经验,主观决策易导致结果的不确定性。本研究将采用活力-组织-恢复力(VOR)模型,从生态系统的活力、组织、恢复力三个维度评价陆地生态环境质量^[14-15]。

关于海洋生态环境评价的研究不仅关注海洋生态环境的影响因素,也关注响应结果^[16],但是海洋生态环境质量更多的是通过海洋水环境与海洋生物环境来表达,如何准确评价一个地区的海洋生态环境质量,现尚

未形成统一的评价体系。为了更好地评价地区海洋生态环境质量,国内外学者进行了一些研究,早期认为海洋生物是影响海洋生态环境最主要的因素^[17],随着对海洋认识的加深,更多地关注多要素累积效应下海洋生态环境质量的影响^[18-19],例如水环境、生物环境和沉积物环境^[20]。因此为了更全面地表征海洋生态环境质量,本论文构建的指标体系既包括了传统的水环境质量指标,也包括了海洋生物多样性和累积沉积物等指标。

独立视角的陆海生态环境质量评价研究较多,但是无法全面揭示陆海复合生态系统的整体特征^[21],也较难解释陆海生态环境之间的交互关系,因此本研究将以中国沿海 53 个城市为研究对象,通过 VOR 模型和熵权 TOPSIS 模型分别定量评价陆海生态环境质量,并利用耦合协调度模型识别失调区域且提出未来发展策略,研究结果以期为沿海地区陆海生态环境保护、生态安全统筹管理、区域生态修复工作等提供科学依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

本研究对象是中国沿海 53 个城市,研究范围北起鸭绿江口,南至北仑河口,包括了辽宁省 6 个、河北省 3 个、天津市、山东省 7 个、江苏省 3 个、上海市、浙江省 7 个、福建省 6 个、广东省 14 个、广西壮族自治区 3 个、海南省 2 个,由于数据获取原因,研究区域不涉及港澳台地区。研究案例城市分别为:环渤海经济区城市:天津市、唐山市、秦皇岛市、沧州市、大连市、锦州市、营口市、盘锦市、葫芦岛市、东营市、烟台市、潍坊市、滨州市;沿黄海经济区城市:丹东市、连云港市、盐城市、南通市、青岛市、威海市、日照市;沿东海经济区城市:上海市、杭州市、宁波市、温州市、嘉兴市、绍兴市、舟山市、台州市、福州市、厦门市、莆田市、泉州市、漳州市、宁德市;沿南海经济区城市:广州市、深圳市、珠海市、汕头市、江门市、湛江市、茂名市、惠州市、汕尾市、阳江市、东莞市、中山市、潮州市、揭阳市、北海市、防城港市、钦州市、海口市、三亚市。

1.2 数据来源与处理

空间数据:行政区划数据(地市和县级)来源于国家基础地理信息中心 2019 版矢量地图数据(www.webmap.cn),由于 2010—2020 年期间部分县区级行政区划有所调整,为保持数据的一致性和可比性,各时期均统一采用 2019 年行政边界作为行政分区。2010 年、2015 年和 2020 年的土地利用数据从中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)获取^[22]。2010 年的遥感解译为 Landsat-TM/ETM 遥感影像数据,2015 年、2020 年土地利用/覆盖数据更新为 Landsat 8 遥感影像数据。NPP 数据来源于 MODIS 17A3 产品数据集,该产品数据集提供的数据包括 NDVI、NPP、GPP 等,被广泛应用于植被 NDVI 演变及响应^[23]、草地净初级生产力演变特征^[24]等相关研究,其分辨率为 500m,通过 MRT(MODIS Reprojection Tool)对数据进行投影转换、格式转换、影像裁剪与拼接等预处理得到研究区 NPP 数据集。景观格局指数利用 Fragstats 软件计算得出。

遥感解译识别土地利用类型包括了水田、旱地、河渠、湖泊、滩涂、海洋等 26 种地类,根据实际研究需要,本研究将其归类分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,共计 6 大类(表 1)。

统计数据:海洋生态环境质量评价数据来自历年《中国海洋生态环境公报》《中国海洋灾害公报》《中国海洋统计年鉴》《中国城市统计年鉴》及各省、市统计年鉴和公报,部分海洋数据来自中国海洋信息网(<http://www.nmdis.org.cn/>)、中国科学院海洋研究所海洋大数据中心(<http://msdc.qdio.ac.cn/>)、国家海洋局北海预报中心网站(<http://www.nmfc.org.cn/>)等有关海洋数据网站。

2 研究方法

2.1 陆地生态系统健康指数法

陆地生态环境质量包括环境质量、生态健康等指标,参考相关研究^[15,25],本文运用 VOR 模型评估沿海地区陆地生态系统健康状况,包括活力、组织、恢复力。陆地生态系统健康指数(EHI)表示为:

$$EHI = \sqrt[3]{EV \times EO \times ER} \quad (1)$$

式中: EHI 代表生态系统健康指数, EV 表示生态系统活力, EO 表示生态系统组织, ER 表示生态系统恢复力。采用自然不连续法将生态系统健康结果分为五个等级: 低 ($0 \leq EHI \leq 0.2$), 中低 ($0.2 < EHI \leq 0.4$), 中 ($0.4 < EHI \leq 0.6$), 中高 ($0.6 < EHI \leq 0.8$), 高 ($0.8 < EHI \leq 1$)。

表 1 土地利用数据分类
Table 1 Classification of land use data

一级类型 First category	二级类型 Secondary category	含义 Meaning
耕地 Cropland	水田、旱地	指种植农作物的土地, 包括熟耕地、新开荒地、休闲地、轮歇地、草田轮作物地; 以种植农作物为主的农果、农桑、农林用地; 耕种三年以上的滩地和海涂。
林地 Woodland	有林地、灌木林、疏林地、其它林地	指生长乔木、灌木、竹类、以及沿海红树林地等林业用地。
草地 Grassland	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地	指以生长草本植物为主, 覆盖度在 5% 以上的各类草地, 包括以牧为主的灌丛草地和郁闭度在 10% 以下的疏林草地。
水域 Water	河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地、海洋	指天然陆地水域和水利设施用地及海洋。
建设用地 Urban land	城镇用地、农村居民点、其它建设用地、机场、码头	指城乡居民点及其以下的工矿、交通等用地。
未利用地 Unused	沙地、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地、其它未利用土地	目前还未利用的土地, 包括难利用土地。

2.1.1 生态系统活力

生态系统活力 (EV) 反映生态系统生产代谢能力, 与净初级生产力 (NPP) 具有强相关性^[26]。净初级生产力对于研究和评估生态系统的健康状况、碳循环、气候变化和生态系统管理等具有重要意义。较高的净初级生产力意味着更多的能量和有机物质可供其他生物利用, 支持更丰富的生态系统结构和功能。净初级生产力的变化受环境因素、气候变化、土壤质量、植被类型和人类活动等多种因素的影响, 但可以通过遥感技术、生态观测和数学模型等手段进行估算和监测。本文将净初级生产力值归一化后取栅格均值代表各个地级市的生态系统活力值。

2.1.2 生态系统组织

生态系统组织力 (EO) 反映了生态系统结构的复杂性和稳定性, 可通过景观异质性、景观形状和景观连通性来体现^[27], 本文选择 Shannon 多样性指数 ($SHDI$) 和 Shannon 均匀度指数 ($SHEI$) 作为表示空间异质性的指标。选择穿插和并置指数 (IJI)、分区指数 ($DIVISION$) 和传染指数 ($CONTAG$) 表达了景观的连通性。选择周长面积分形维数 ($PAFRAC$) 表达景观的形状。其 EO 值越大, 景观结构越复杂、越稳定。公式如下:

$$EO = 0.4 \times LH + 0.4 \times LC + 0.2 \times LS$$
$$= (0.2 \times SHDI + 0.2 \times SHEI) + (0.1 \times IJI + 0.15 \times DIVISION + 0.15 \times CONTAG) + 0.2 \times PAFRAC \quad (2)$$

式中: EO 代表生态系统组织力, LH 表示景观异质性, LC 表示景观连通性, LS 表示景观形状。

2.1.3 生态系统恢复力

生态系统恢复力 (ER) 代表了人类活动干扰下维持自身结构稳定性的能力, 可使用生境质量指数代替生态弹性指数^[28]。生境质量评价是对某个特定生态系统 (如湿地、森林等) 或特定地理区域内生态系统的健康状况进行评估的过程。InVEST 模型中的生境质量模块, 利用土地利用覆盖图、威胁因子图、威胁因子的影响距离、栖息地对威胁因子的敏感性以及栖息地与威胁因子源之间的距离, 建立了生境质量与威胁之间的联系, 得到生境退化的程度, 利用生境适宜性和退化程度计算生境质量, 得到的生境质量指数越高反映区域生态系统结构稳定, 抗干扰能力越强, 生态环境越不易被破坏。文章将生境质量指数 (Q_{xy}) 进行归一化取栅格均值代表各个地级市的生态系统恢复力值。公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^Z}{D_{xj}^Z + k^2} \right) \right] \quad (3)$$

式中: Q_{xj} 是 j 类网格 x 的生境质量指数; j 代表土地利用类型(生境类型); H_j 是土地利用和土地覆被(LULC) j 型的生境适宜性; D_{xj} 是网格单元 x 中具有 LULC 或栖息地类型 j 的总威胁级别; k 用作半饱和常数, 是最大值的一半; Z 是归一化常数, 通常等于 0.5。 D_{xj} 可以按如下方式计算:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R R \sum_{y=1}^{Y_r} Y_r \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R R w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (4)$$

式中: R 是威胁因子; y 是威胁因子 r 中的网格数; Y_r 是威胁因子 R 中的网格数; w_r 是威胁因素的权重, 它代表威胁因素对所有栖息地的相对破坏力, 通常在 0—1 之间; r_y 是网格 y 中的威胁因子值(0 或 1); i_{rxy} 是威胁因子的威胁级别 r_y 到网格 x ; β_x 是格网 x 的可访问性级别, 值范围是 0—1; S_{jr} 是栖息地类型 j 对威胁因子 R 的敏感性, 值范围为 0—1, 其敏感性随着值的增加而增加。 i_{rxy} 可以按如下方式计算:

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (5)$$

或

$$i_{rxy} = \exp \left(- \left(\frac{2.99}{d_{rmax}} \right) d_{xy} \right) \quad (6)$$

式中: d_{xy} 是网格像元 x 和 y 之间的线性距离; d_{rmax} 是威胁 R 在空间中的最大有效距离。

参考相关研究^[24, 29], 威胁因子最大影响距离和威胁因子敏感度如下表所示(表 2)。

表 2 生境类型对威胁因子的敏感度、威胁因子最大影响距离及权重

Table 2 The sensitivity of habitat type to the threat agent, the maximum influence distance of the threat factor, and its weight

生境类型 Type of habitat	生境适宜度 Habitat suitability	威胁因子 Threat factors		
		耕地 Cropland	建设用地 Urban land	未利用地 Unused
林地 Woodland	1	0.8	1	0.3
草地 Grassland	0.75	0.45	0.6	0.25
水域 Water	0.9	0.6	0.9	0.3
耕地 Cropland	0.5	0	0.5	0.1
最大影响距离 Maximum impact distance/km		6	9	4
权重 Weight		0.6	1	0.3

2.2 海洋生态环境质量评估方法

海洋生态环境质量对于维护海洋生态系统的健康和可持续发展具有重要意义。本研究根据《中国海洋生态环境公报》, 海洋生态环境质量水平表征在水环境质量、沉积物质量和生物环境质量三个方面^[20], 基于此构建沿海城市海洋生态环境质量评价指标体系(表 3)。

评价方法: 熵权 TOPSIS 法是一种选择最接近正理想解且离负理想解最远的解的方法。该方法包括 6 个步骤: 数据归一化处理、确定海洋生态环境各指标的权重、构建加权归一化矩阵、确定正负理想解、计算目标值与正负理想解之间的距离、计算评价向量与理想值的相对贴近程度, 从而得出海洋生态环境质量指数(EOI)。本研究将海洋生态环境质量分成五类: 低($EOI \leq 0.5$), 中低($0.5 < EOI \leq 0.6$), 中($0.6 < EOI \leq 0.7$), 中高($0.7 < EOI \leq 0.8$), 高($0.8 < EOI \leq 1$)。

2.3 耦合协调度模型

本研究采用耦合协调度测度模型来反映陆海生态环境质量之间的综合协调发展程度, 从而识别出沿海城市陆海生态环境质量存在失调的区域。将协调度划分为 6 个等级: (0, 0.2]、(0.2, 0.4]、(0.4, 0.5]、(0.5, 0.6]、(0.6, 0.8]、(0.8, 1], 分别为严重失调、中度失调、轻度失调、初级协调、中级协调、优良协调。

表 3 中国沿海地区海洋生态环境质量评价指标体系
Table 3 Evaluation index system of marine ecological environment quality in coastal areas of China

因素层 Factor layer	指标名称 Metric name	单位 Unit	属性 Attribute	权重 Weight	指标解释 Indicator interpretation
水环境质量水平 Water environment quality level	近岸海域优良水质 占比	%	+	0.221	近岸海域Ⅰ、Ⅱ类海水水质面积/管辖 海域海水总面积
	无机氮浓度	mg/L	-	0.105	近岸海域海水中无机氮平均浓度,反映 海水富营养化程度
	活性磷酸盐浓度	mg/L	-	0.105	近岸海域海水中活性磷酸盐平均浓度, 反映海水富营养化程度
	化学需氧量浓度	mg/L	-	0.105	近岸海域海水中化学需氧量平均浓度, 反映海水溶解氧程度
沉积物环境质量水平 Sediment environmental quality level	沉积物质量	%	+	0.107	符合第一类沉积物标准的站位数/总监 测站位数,反映海域内沉积物水平
生物环境质量水平 Biological environmental quality level	浮游植物多样性 指数	—	+	0.088	$-\sum(P_1 \log_2 P_1)$, P_1 为浮游植物个 体数占样品总个体数之比
	浮游动物多样性 指数	—	+	0.089	$-\sum(P_2 \log_2 P_2)$, P_2 为浮游动物个 体数占样品总个体数之比
	底栖生物多样性 指数	—	+	0.088	$-\sum(P_3 \log_2 P_3)$, P_3 为底栖生物个 体数占样品总个体数之比
	年均赤潮次数	天/年	-	0.092	一年中面积超过 100km ² 的赤潮发生天 数,反映海域内赤潮灾害频率

表中“+”表示正属性,对海洋生态环境质量有促进作用;“-”表示负属性,对海洋生态环境质量有抑制作用

耦合度(C)模型:

$$C = \left[\frac{\prod_{i=1}^n U_i}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \right)^n} \right]^{\frac{1}{n}} \tag{7}$$

式中: n 为子系统个数(个); U_i 为各子系统值,其分布区间为 $[0,1]$,故耦合度 C 值区间为 $[0,1]$ 。 C 值越大,子系统间离散程度越小,耦合度越高;反之,子系统间耦合度越低。

协调度(D)模型:

$$D = \sqrt{C \times T} = \sqrt{\left[\frac{\prod_{i=1}^n U_i}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \right)^n} \right]^{\frac{1}{n}} \times \sum_{i=1}^n \alpha_i U_i} \tag{8}$$

式中: T 为系统综合评价值, U_i 为第 i 个子系统的标准化值; α_i 为第 i 个子系统的权重。 D 值代表陆地生态系统健康与海洋生态环境质量之间的耦合协调水平, D 值越大,耦合协调程度越高。

3 结果分析

3.1 陆地生态环境质量综合评价

3.1.1 陆地生态系统健康指数时空特征分析

活力水平评价:沿海城市净初级生产力呈现“北低南高”的分布格局,如图 1,高值区位于林地占比多的浙江省南部沿海城市、福建省沿海城市、广东省东部沿海城市、广西壮族自治区沿海三市、海口市和三亚市,意味着土地生态系统中的植被覆盖较好、生物多样性较丰富,并且具备更强的生态功能和稳定性。低值区位于北部沿海地区,主要有辽宁省盘锦市、天津市、河北省沧州市、山东省东营市、上海市,而广东省珠江口周边深圳市、东莞市、中山市、珠海市也呈现低初级生产力,低净初级生产力可能意味着土地生态系统受到一些压力或

干扰,如土地退化、水资源限制、环境污染、生物入侵等,导致了植被减少、生物多样性降低,甚至生态系统功能受损。

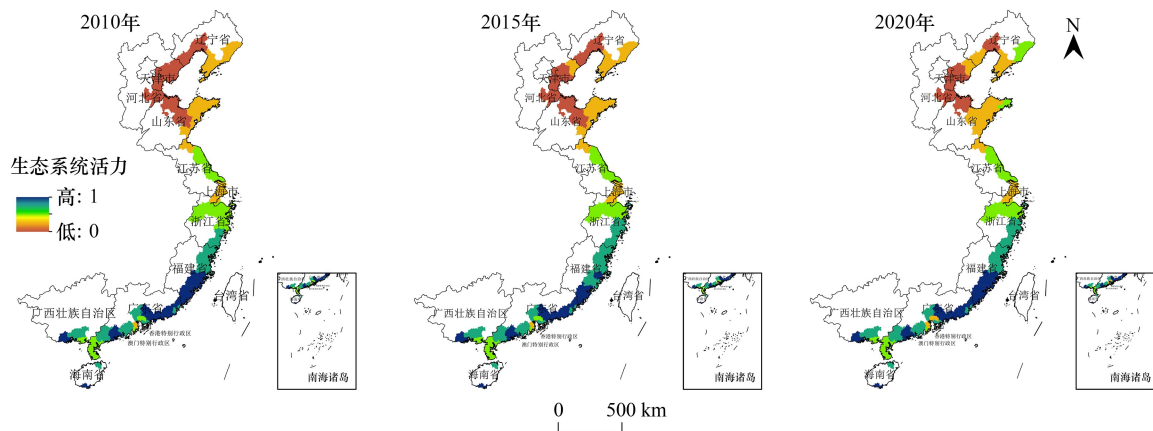


图1 2010年、2015年和2020年沿海城市生态系统活力水平

Fig.1 Ecosystem vitality levels of coastal cities, 2010, 2015 and 2020

组织力水平分析:沿海城市生态系统组织力呈现出分散分布局面,如图2,变化较大城市主要位于渤海湾地区。高值区主要位于山东半岛以东地区、珠江口以东地区、防城港市,反映出景观结构复杂且稳定,被破坏的可能性较小,抵御外界风险的能力较强;低值区主要位于渤海湾、长三角地区和北部湾地区,包括天津市、江苏省沿海城市、上海市、浙江省沿海城市、茂名市、湛江市、北海市、海口市,这些城市景观结构不太稳定,被破坏的可能性较大,抵御外界风险的能力较弱。

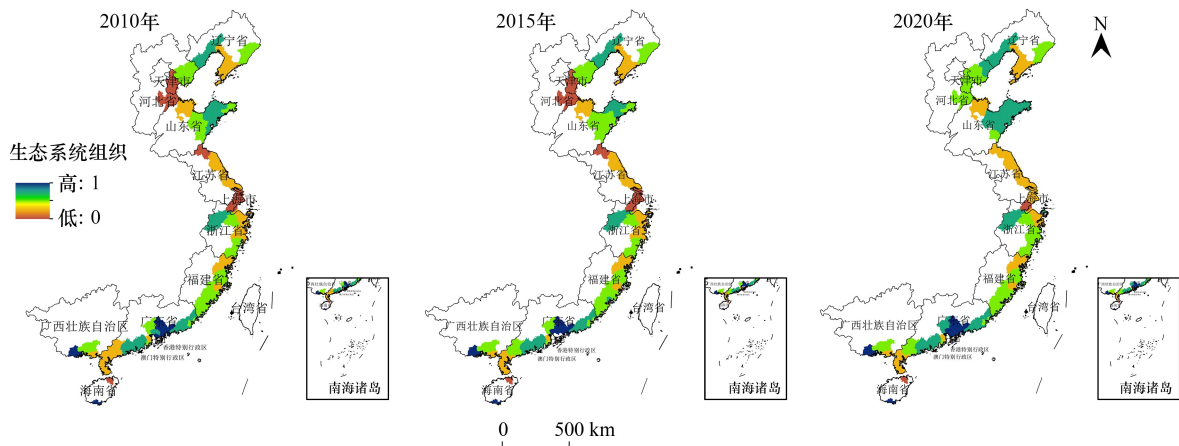


图2 2010年、2015年和2020年沿海城市生态系统组织力量水平

Fig.2 Levels of ecosystem organization in coastal cities, 2010, 2015 and 2020

恢复力水平分析:沿海城市生境质量等级呈现“北低南高”的分布格局,如图3,生境质量较高的城市主要位于长江口以南城市,分布在浙江省南部沿海地区、福建省北部沿海地区、珠江口东部沿海地区、三亚市,这些城市林地、草地集中,生态环境整体良好;生境质量较低的城市主要位于山东半岛、苏北浅滩、北部湾周边,这些城市耕地广阔、城镇集中,人类开发活动较多,农耕活动频繁;生境质量低的城市主要位于辽河口、渤海湾、黄河口、莱州湾、长江口-杭州湾、厦门市、珠江口,指标值显示此类城市建设用地占比较大,经济发展水平高,开发强度大。

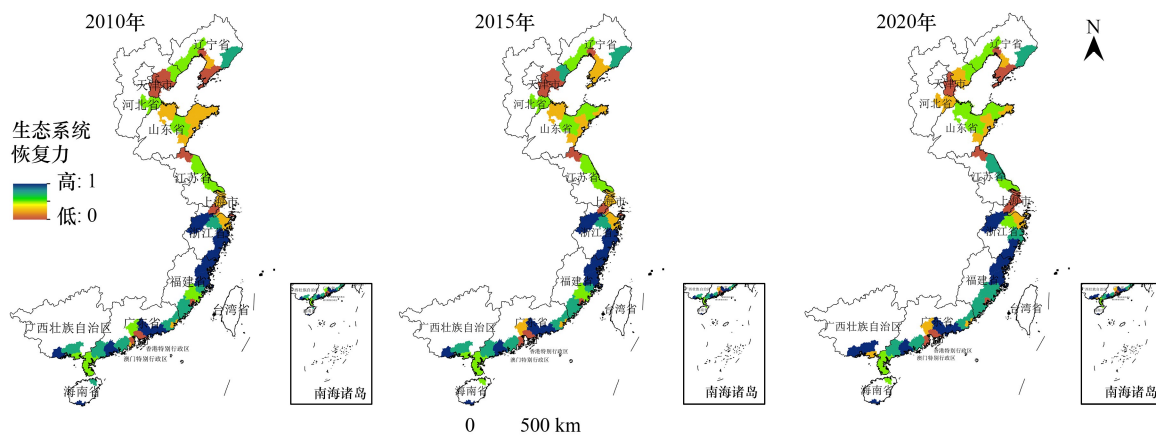


图3 2010年、2015年和2020年沿海城市生态系统恢复力水平

Fig.3 Levels of ecosystem resilience in coastal cities, 2010, 2015 and 2020

3.1.2 陆地生态环境质量评价结果分析

根据生态系统健康栅格均值计算得到地级市尺度上生态系统健康指数结果(图4)。从整体上看,杭州湾是南北区域差异的分界线,质量呈现“北低南高”的分布结果,位于杭州湾以北的城市生态系统健康水平低于杭州湾以南的城市。该评估结果和中国沿海地区“北耕南林”的土地利用/覆盖格局相吻合^[30-31],北方沿海耕地较多,建设用地分散,栖息地质量低,得出的健康水平也较低,而南方沿海林草地占比高,栖息地质量较高。

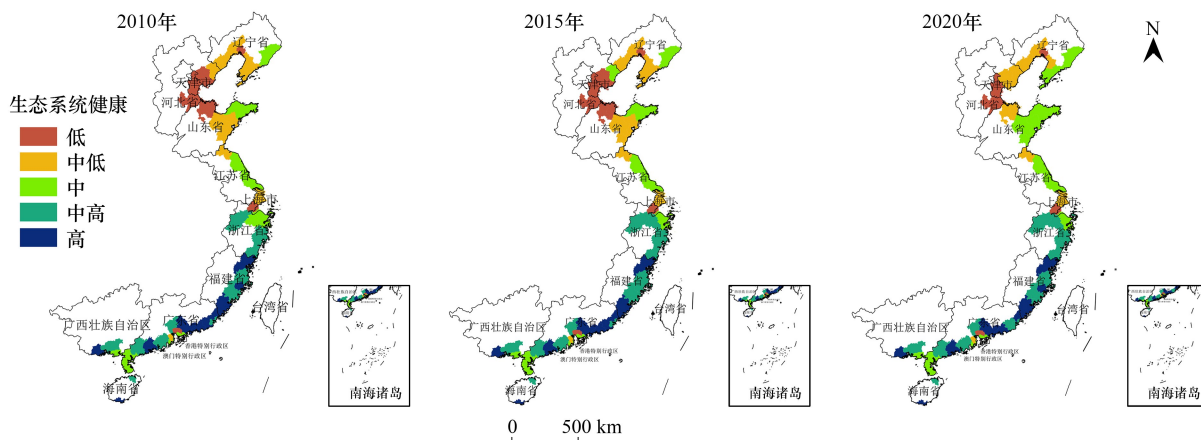


图4 2010年、2015年和2020年沿海城市陆地生态系统健康水平

Fig.4 Terrestrial ecosystem health levels in coastal cities, 2010, 2015 and 2020

从生态系统健康指数等级分布结果分析,高等级的城市均位于杭州湾以南,主要位于福建省、广东省、广西壮族自治区、海南省,位于广东省的高等级城市数量最多,海岸带区位优势明显,境内多林草地,生态环境质量较为良好。中低等级的城市主要位于辽东湾、莱州湾、连云港市、长江口,数量上维持在10个。低等级的城市主要位于双台子河口、渤海湾、杭州湾、珠江口,数量上呈现减少趋势。评估结果表明陆地生态系统健康状况不佳的城市主要靠近大型河口和海湾地区,与申丹等对黄渤海^[32]、刘一鸣等对东海^[33]等海岸带生态环境质量评估结果类似。

从时间序列分析,健康状况为低的城市数量在减少,占比从2010年的15.09%下降为2020年的9.43%。健康状况上升的城市有唐山市、东营市、滨州市、大连市、青岛市、潍坊市、日照市、绍兴市、舟山市,主要分布于

环渤海地区和杭州湾地区,唐山市、东营市、滨州市的生态系统健康等级由低变为中低,大连市、青岛市、潍坊市、日照市的生态系统健康等级由中低变为中,绍兴市、舟山市的生态系统健康等级由中变为中高。健康状况恶化的城市有揭阳市,生态系统健康等级由高降为中高。

3.2 海洋生态环境质量评价结果分析

依据上文评价方法与指标体系,海洋生态环境质量的结果如图 5 所示:

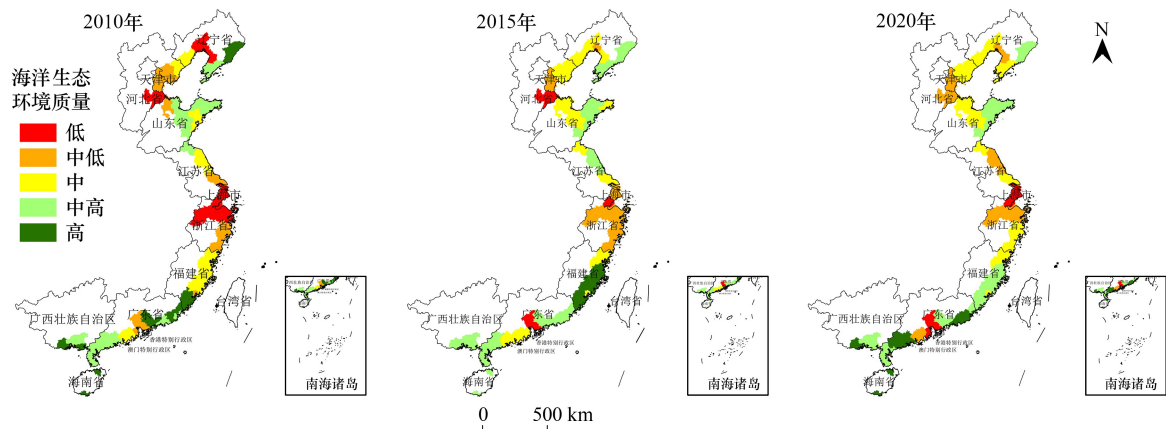


图 5 2010 年、2015 年和 2020 年沿海城市海洋生态环境质量空间分布

Fig.5 Spatial distribution of marine ecological environment quality in coastal cities in 2010, 2015 and 2020

(1) 2010—2020 年,中国沿海城市海洋生态环境质量整体呈现趋好的态势,偶有城市波动情况的发生。2010 年低、中低等级海洋生态环境质量的城市到 2020 年占比减少至 32%,中国沿海地区整体海洋生态环境质量有较大提升。该评估结果与 2010 年、2015 年、2020 年《中国海洋生态环境公报》结果基本吻合,中国海洋生态环境整体呈现趋好的态势。

(2) 由图 5 可以看出,海洋生态环境质量差的城市主要分布在河口和海湾周边,主要有辽河口、渤海湾、莱州湾、苏北浅滩、长江口、杭州湾和珠江口,评价结果与 Wu Zhen 对上海市沿海区域长江口^[34]、宋德彬对渤海湾^[35]、Wei Yang 对全国海岸带^[36]等研究结果类似。海洋生态环境质量最差的城市为嘉兴市,三年海洋生态环境质量指数平均值为 0.360,其次为上海市,为 0.487。嘉兴市位于杭州湾,上海市位于长江口,多年来,长江口、杭州湾海域优良水质占比为 0。揭阳市三年平均值 0.840,为沿海城市中最优,其沿海地区拥有长海岸线和丰富的海洋生物资源,且出台了一系列相关政策保护和管理海洋生态环境,设立了揭阳澄海湾国家级自然保护区,旨在保护海洋生物多样性、维护海洋生态平衡。

(3) 环渤海经济区海洋生态环境质量指数从 2010 年的 0.589 上升到 2020 年的 0.626,海洋生态环境质量指数三年平均值为 0.615,环渤海经济区海域渤海海洋生态系统整体上具有明显的地区性和封闭性特征,对沿岸原始生境条件的高度依赖性使得生态系统脆弱,极易受陆域排污及开发建设行为影响,但政府采取了一系列措施来保护海洋环境,控制海洋污染、限制捕捞活动以及推动海洋生态修复,例如:《渤海综合治理攻坚战行动计划》。

(4) 沿黄海经济区海洋生态环境质量指数从 2010 年的 0.708 下降到 2020 年的 0.689,海洋生态环境质量指数三年平均值为 0.707,沿黄海经济区海域环境分异较大,江苏省沿海连云港市、盐城市、南通市的近岸海域海底主要由沙质和泥质组成,沉积物质量较低,近岸海域水质较差,苏北浅滩生物多样性丰富,有各种鱼类、贝类、藻类以及其他海洋生物,盐城市是丹顶鹤候鸟的栖息地和迁徙通道。北部的丹东市位于鸭绿江口,境内有五龙山自然保护区、鸭绿江口自然保护区和辽东湾滨海湿地自然保护区,海洋生态环境质量相对较好。山东省威海市三面环海,海域面积广阔,海水流动性好,而大规模绿潮的出现使得黄海沿岸的青岛市、日照市深受影响,海洋生态环境质量有所变差。

(5)沿东海经济区海洋生态环境质量指数从 2010 年的 0.539 上升到 2020 年的 0.628,虽增长显著,但海洋生态环境质量指数三年平均值为 0.603,为四大海域经济区中最差。沿东海经济区海域水质差,长江流域是中国最重要的农业和工业区之一,农田化肥、农药和工业废水等污染物通过河流输入长江口。杭州湾地区有多条河流流经,如钱塘江、新河等,杭州湾地形狭长,潮汐和水体交换受到限制。浙江省沿海城市温州市、舟山市、台州市水体富营养化严重,易发生赤潮灾害,据统计,2020 年浙江省沿海城市发生 63 次大规模赤潮灾害^[37]。

(6)沿南海经济区海洋生态环境质量指数从 2010 年的 0.749 下降到 2020 年的 0.713,海洋生态环境质量指数三年平均值为 0.717,为四大海域经济区中最优。但是珠江口水质较差,周边深圳市、东莞市、中山市这些城市的庞大人口和工商业活动带来大量污水的排放。尽管城市污水处理设施有所改善,但仍然存在一定比例的污水未经处理直接排入珠江口,对水质产生不利影响。

3.3 陆海生态环境质量耦合协调关系分析

根据模型评价结果,沿海城市陆海生态环境质量耦合协调度值在 0.17~0.977 之间。2010—2020 年陆海生态环境质量耦合协调度均值由 0.668 上升至 0.675,耦合程度进一步增强。由表 4 可知,2010 年、2015 年和 2020 年以中级协调城市为主,分别占 43.40%、43.40%和 39.62%,其次为优良协调,分别占 28.30%、20.75%和 30.19%。近 10 年期间,沿海城市陆海生态环境质量耦合协调水平处于较高水准,陆海生态安全统筹水平呈现提升趋势。

表 4 陆地生态系统健康与海洋生态环境质量耦合协调等级

Table 4 Coupling and coordination level of terrestrial ecosystem health and marine ecological environment quality

年份 Year	严重失调 Severe dysregulation		中度失调 Moderate outrange		轻度失调 Mild disorders		初级协调 Junior coordination		中级协调 Intermediate coordination		优良协调 Excellent coordination	
	城市数		城市数		城市数		城市数		城市数		城市数	
	占比/%	占比/%	占比/%	占比/%	占比/%	占比/%	占比/%	占比/%	占比/%	占比/%	占比/%	占比/%
2010	1	1.89	3	5.66	6	11.32	5	9.43	23	43.40	15	28.30
2015	1	1.89	4	7.55	6	11.32	8	15.09	23	43.40	11	20.75
2020	1	1.89	3	5.66	5	9.43	7	13.21	21	39.62	16	30.19

从空间上分析,陆海生态环境质量耦合协调度在空间上依然表现为“北低南高”的格局,且存在明显的区域差异性(图 6)。失调的城市除东莞市外其余全部位于杭州湾以北,协调的城市多分布于杭州湾以南。协调度下降的城市主要有中山市、东莞市、深圳市、上海市,城市特点为人口活动密集、经济活动频繁、重要河流入海口、城市化发展迅速,呈现失调趋势。

严重失调的城市是嘉兴市,突出的海域生态环境问题导致陆地生态系统健康与海洋生态环境质量间不协调。中度失调城市主要有天津市、沧州市、盘锦市,主要位于渤海湾、双台子河口周边,这些区域存在围填海扩建活动,滨海新城建设,导致陆地生态环境质量下降,同时海洋生态环境质量也下降。轻度失调的城市包括唐山市、锦州市、营口市、东营市、滨州市,主要位于辽河口、黄河口周边,分布在辽宁省、河北省、山东省,特点是陆地生态本底较脆弱,海洋生态环境质量变化相对滞后,二者呈现轻微失调趋势。中级协调和优良协调的城市占比最多,分布省份最广,反映出中国沿海城市的陆海生态协调状况较优,其中优良协调的城市均位于杭州湾以南,位于福建省和广东省的最多,这些城市生态环境本底好、植被覆盖度高、生物多样性较丰富,并且具备更强的生态功能和稳定性,海洋生态环境同样也未受到大的破坏,陆地与海洋生态环境均保持良好的质量。

根据耦合协调度的演变结果,重点关注失调型城市:天津市、唐山市、沧州市、盘锦市、嘉兴市、东莞市共 6 个城市,和协调转失调型城市:上海市、深圳市、中山市共 3 个城市,以上城市陆海生态环境质量均存在一定的问题,对陆海生态安全统筹产生一定的压力,空间分布在渤海湾、长江口、杭州湾、珠江口附近。已有研究表明渤海湾^[38]、长三角^[39]、珠三角^[40]陆海生态环境受影响最严重,本文得出的失调型、协调转失调型城市均位于这些地区,且陆海生态状况均不容乐观。根据陆海生态环境评价指标体系,提出了以下措施:陆地生态环境质

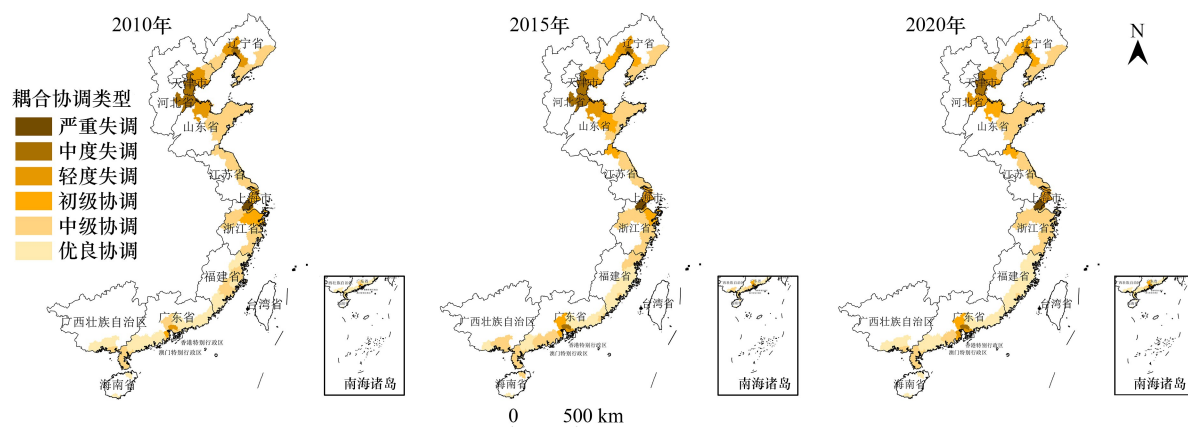


图6 2010年、2015年和2020年沿海城市 EHI 和 EOI 耦合协调类型

Fig.6 Coastal cities EHI and EOI coupling coordination types in 2010, 2015 and 2020

量提升建议:(1)提高生态系统活力:通过森林复绿、湿地保护和草地恢复等活动,增加植物的生长面积和生物量,提高地区 NPP 水平;(2)生态系统保护和恢复:通过合理规划土地利用、控制建设用地无序扩张,平衡好经济发展和生态保护的关系;通过建立自然保护区、国家公园以及实施生态修复项目恢复自然生境。海域生态环境提升建议:(1)保护海洋生物多样性:建立海洋保护区、禁渔区和保护重点物种的区域,以保护和恢复海洋生物多样性。加强监测和管理措施,以减少非法捕捞、过度捕捞和破坏性捕捞行为;(2)改善海洋水质:加强海洋污染物监测和评估,采取措施减少有害物质和富营养化物质的输入,改善海洋水体的质量。加强对海岸线和沿海地区污染源的管控和治理;(3)加强海洋生态系统保护:保护珊瑚礁、海草床、湿地和海洋特殊生态环境,维护海洋生态系统的完整性和功能。加强海岸带管理,保护沿海生态系统,防止滨海开发对海洋环境的破坏。

4 结论与讨论

4.1 讨论

全面了解陆地和海洋生态环境质量及其耦合协调关系是陆海生态安全统筹管理最基础的工作,也是后续规划、可持续发展的有效依据。本文通过评估陆地和海洋生态环境质量,全面展示了两个子系统的生态环境质量时空演变特征,空间上呈现出“北低南高”的分布特点,通过分析陆海生态环境质量协调度识别出了在生态环境质量方面不协调的9个城市,并提出了相关管理建议。

在研究方法上,本文采用了生态系统健康评价模型从三个维度(活力、组织力、恢复力)反馈陆地生态环境质量,指标构建中可增加生态环境污染数据提升评价准确性,由于数据获取原因,环境污染数据暂未考虑,而是通过生境质量作为表达。海域部分的生态环境质量评价主要依据水质、沉积物、生物多样性等指标来表征,若增加人类活动对海洋环境的影响因素,例如海水养殖面积、海洋货物运输量、保护区面积等,会使评价更加完善。从研究结果上分析,本文识别了沿海地区陆海生态环境质量不协调的城市,并依据改变指标值提出质量提升策略,而陆海生态安全统筹是一个非常复杂的问题,由于是针对53个城市的研究,策略提出具有广泛性,后续研究可对识别出问题的城市再次重点研究,提出更具有针对性的意见。

4.2 结论

陆海生态环境质量之间的交互关系是非常复杂的问题,通过分析陆海生态环境质量耦合协调关系在一定程度上可以解释其相互关系。本研究从全国尺度出发,通过中国沿海53个城市陆地生态系统健康和海洋生态环境质量耦合协调关系的探讨,得到以下结论:

(1)构建“活力—组织—恢复力(VOR)”模型得到陆地生态系统健康指数,表征陆地生态环境质量。沿海

城市陆地生态系统健康呈现“北低南高”的空间格局,杭州湾以北的城市陆地生态健康指数低于杭州湾以南。

(2) 从水环境质量、沉积物环境质量和生物环境质量三方面构建指标体系,沿海城市海洋生态环境质量在 2010—2020 年间整体呈现趋好的态势,但渤海湾、长江口、杭州湾、珠江口海域生态环境质量表现不佳,整体来看沿海城市海洋生态环境质量分布情况为:沿东海经济区<环渤海经济区<沿黄海经济区<沿南海经济区。

(3) 沿海城市陆地生态系统健康与海洋生态环境质量耦合协调度的平均值由 2010 年的 0.6676 上升到 2020 年的 0.6753,耦合协调类型以中级协调为主,南部城市协调度高于北部城市。失调的 9 个城市位于渤海湾、长三角、珠三角这些陆海生态环境受影响严重的地区,未来应注重提高陆地生态系统活力、保护和恢复陆海复合生态系统、保护海洋生物多样性、改善海洋水质。

参考文献(References):

- [1] 索安宁,关道明,孙永光,林勇,张明慧. 景观生态学在海岸带地区的研究进展. 生态学报, 2016, 36(11): 3167-3175.
- [2] 应超,高扬,汪海峰,田鹏,龚虹波,李加林. 陆海统筹背景下海岸带复合系统协调发展水平及影响机制研究——以温州市为例. 地理科学进展, 2022, 41(10): 1899-1912.
- [3] 李彦平,刘大海,罗添. 国土空间规划中陆海统筹的内在逻辑和深化方向——基于复合系统论视角. 地理研究, 2021, 40(7): 1902-1916.
- [4] 关道明,战秀文. 我国沿海水域赤潮灾害及其防治对策. 海洋环境科学, 2003, 22(2): 60-63.
- [5] 段后浪,于秀波,石建斌,雷进宇,夏少霞. 中国大陆沿海水鸟栖息地保护优先区及空缺分析. 生态学报, 2021, 41(24): 9574-9580.
- [6] 徐燕,周华荣. 初论我国生态环境质量评价研究进展. 干旱区地理, 2003, 26(2): 166-172.
- [7] Chi Y, Zheng W, Shi H H, Sun J K, Fu Z Y. Spatial heterogeneity of estuarine wetland ecosystem health influenced by complex natural and anthropogenic factors. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1445-1462.
- [8] 曾德慧,姜凤岐,范志平,杜晓军. 生态系统健康与人类可持续发展. 应用生态学报, 1999, 10(6): 751-756.
- [9] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health. Trends in Ecology & Evolution, 1998, 13(10): 397-402.
- [10] 王同达,曹锦雪,赵永华,韩磊,刘钊. 基于 PSR 模型的陕西省土地生态系统健康评价. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1563-1572.
- [11] 赵艳民,秦延文,马迎群,张蕾,曹伟,迟明慧,时瑶. 基于 PSR 的长江口生态系统的健康评价. 环境工程, 2021, 39(10): 207-212.
- [12] 王广州,凡姚申,窦身堂,于守兵,张少华. 基于 DPSIR 的黄河口及毗邻海域生态系统健康评价. 人民黄河, 2023, 45(6): 92-97, 162.
- [13] 张峰,杨俊,席建超,李雪铭,陈鹏. 基于 DPSIRM 健康距离法的南四湖湖泊生态系统健康评价. 资源科学, 2014, 36(4): 831-839.
- [14] Peng J, Liu Y X, Li T Y, Wu J S. Regional ecosystem health response to rural land use change: a case study in Lijiang City, China. Ecological Indicators, 2017, 72: 399-410.
- [15] 沙宏杰,张东,施顺杰,刘兴兴. 基于耦合模型和遥感技术的江苏中部海岸带生态系统健康评价. 生态学报, 2018, 38(19): 7102-7112.
- [16] 韩婕妤. 中国近岸海域环境质量演变及驱动因素研究. 资源开发与市场, 2019, 35(9): 1133-1137, 1144.
- [17] 雷磊,高秋香,杨晨. 中国海域使用演变特征及发展趋势分析. 资源科学, 2017, 39(11): 2030-2039.
- [18] Gissi E, Manea E, Mazaris A D, Fraschetti S, Almpnidou V, Bevilacqua S, Coll M, Guarnieri G, Lloret-Lloret E, Pascual M, Petza D, Rilov G, Schonwald M, Stelzenmüller V, Katsanevakis S. A review of the combined effects of climate change and other local human stressors on the marine environment. Science of the Total Environment, 2021, 755: 142564.
- [19] 杨湘艳,余静. 基于贝叶斯网络的海洋生态环境状况评价——以山东省为例. 海洋通报, 2021, 40(4): 473-480.
- [20] 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. 资源科学, 2022, 44(8): 1645-1662.
- [21] 李彦平,王煜萍,曹诚为,池源,刘大海. 基于区际负外部性理论的海岸带空间用途管制研究. 地理研究, 2022, 41(10): 2600-2614.
- [22] 刘纪远,宁佳,匡文慧,徐新良,张树文,颜长珍,李仁东,吴世新,胡云锋,杜国明,迟文峰,潘涛,宁静. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [23] 王雨晴,王莱林,布仁吉日嘎拉,张叶,吕嘉琪. 内蒙古典型植被区 NDVI 演化对干旱事件的响应研究. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2023, 44(3): 44-52.
- [24] Xu W B, He M X, Meng W Q, Zhang Y, Yun H F, Lu Y L, Huang Z M, Mo X Q, Hu B B, Liu B Q, Li H Y. Temporal-spatial change of China's coastal ecosystems health and driving factors analysis. Science of the Total Environment, 2022, 845: 157319.
- [25] 周启刚,彭春花,刘翔位,向宇峰,周浪. 基于 VOR 模型的三峡库区消落带 2010—2020 年生态系统健康评价. 水土保持研究, 2022, 29(5): 310-318.
- [26] Xiao R, Liu Y, Fei X F, Yu W X, Zhang Z H, Meng Q X. Ecosystem health assessment: a comprehensive and detailed analysis of the case study

- in coastal metropolitan region, Eastern China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 363-376.
- [27] Turner M G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1989, 20: 171-197.
- [28] 欧维新, 张伦嘉, 陶宇, 郭杰. 基于土地利用变化的长三角生态系统健康时空动态研究. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(5): 84-92.
- [29] Zhai T L, Wang J, Fang Y, Qin Y, Huang L Y, Chen Y. Assessing ecological risks caused by human activities in rapid urbanization coastal areas: towards an integrated approach to determining key areas of terrestrial-oceanic ecosystems preservation and restoration. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 135153.
- [30] 刘玉斌. 中国海岸带典型生态系统服务价值评估研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [31] 史姝姝, 窦银银, 陈永强, 匡文慧. 中国海岸带区域城市扩展遥感监测与内部地表覆盖时空分异特征分析. *自然资源遥感*, 2022, 34(4): 76-86.
- [32] 申丹, 焦琳琳, 常禹, 胡远满, 李泽鸣, 史雅娟, 王铁宇. 黄海和渤海沿海地区生态系统健康评价. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2362-2372.
- [33] 刘一鸣, 徐媛银, 曾辉. 中国东海岸带地区生态系统健康评估及其尺度依赖性. *生态学报*, 2022, 42(24): 9913-9926.
- [34] Wu Z, Chen R S, Meadows M E, Liu X E. Application of the Ocean Health Index to assess ecosystem health for the coastal areas of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107650.
- [35] 宋德彬, 高志强, 徐福祥, 郑翔宇, 张华, 胡晓珂, 黄国培, 章海波. 渤海生态系统健康评价及对策研究. *海洋科学*, 2017, 41(5): 17-26.
- [36] Yang W, Zhang Z Y, Sun T, Liu H F, Shao D D. Marine ecological and environmental health assessment using the pressure-state-response framework at different spatial scales, China. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 106965.
- [37] 李志文, 左秀玲, 滕君灿. 基于 GIS 的中国近岸海域 1950—2020 年赤潮时空变异格局. *环境科学学报*, 2023, 43(6): 203-214.
- [38] Liu K X, Wang H, Fu S J, Gao Z G, Dong J X, Feng J L, Gao T. Evaluation of sea level rise in Bohai Bay and associated responses. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 8(1): 48-56.
- [39] Song M L, Guo X, Wu K Y, Wang G X. Driving effect analysis of energy-consumption carbon emissions in the Yangtze River Delta region. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 620-628.
- [40] 刘亚晶. 基于人地关系的广东省区域协调发展研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2020.