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

吴侃侃[1,2,3]，姜尚[1]，高宇[1]，吴海燕[1,2]，黄海萍[1]，陈克亮[1,2,4]

（1.自然资源部第三海洋研究所 厦门 361005；2.自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室 厦门 361005；
3.福建省海洋生态保护与修复重点实验室 厦门 361005；4.厦门海洋职业技术学院 厦门 361100）

摘要：作为协调海岸带区域开发利用活动与生态环境保护之间关系，衡量海岸带区域可持续发展能力的重要手段之一，海洋生态环境承载力综合评价的量化研究至关重要。文章总结了当前海洋生态环境承载力综合评价研究中所存在的问题，比较分析了当前承载力评价中常用的技术方法，并结合海岸带区域的特点，遴选出一套适用于海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价的方法体系；在此基础上，通过案例应用的结果分析，进一步探讨该方法体系的可行性与局限性，并提出了改进建议。研究结果表明：鉴于海岸带区域生态系统的复杂性和不确定性，目前一些传统、常用的承载力评价方法，并不能很好地适用于海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价；文章所提出的方法体系通过充分考虑人类活动与海洋生态环境之间的相互作用，能较好地支持海岸带区域海洋生态环境承载力评价指标体系的建立，客观地对各项评价指标进行赋权，并能定量化地对海洋生态环境承载力开展综合分析与评估，从而为海岸带区域生态环境承载力综合评价提供一个可行的途径，并为确保海岸带区域的可持续发展提供经验参考；此外，该方法体系存在着两方面的局限性，包括缺乏权威和统一的指标体系构建方法，以及缺乏具体的评价结果分级标准。鉴此，建议未来需要对指标体系构建和评价结果分类标准的相关方法，进一步开展深入研究，从而不断地完善海洋生态环境承载力综合评价的方法体系，使海洋生态环境承载力综合评价的结果更加科学精确。

关键词：海洋生态环境承载力；评价方法；比较分析；局限性与建议

中图分类号：X55 **文献标志码**：A **文章编号**：1005－9857(2023)11－0046－13

The Discussions and Analysis on Methods for the Integrated Assessment of Marine Eco-environmental Carrying Capacity in Coastal Areas

WU Kankan[1,2,3], JIANG Shang[1], GAO Yu[1], WU Haiyan[1,2],
HUANG Haiping[1], CHEN Keliang[1,2,4]

(1.Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China; 2.Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, MNR, Xiamen 361005, China; 3.Fujian Province Key Laboratory of Marine Ecological Conservation

收稿日期：2023-03-24；**修订日期**：2023-10-26

基金项目：国家自然科学基金项目“热带流域－河口典型生态系统演化及其对自然变异和人类活动的响应”(41961144022)；自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目“孟加拉卡纳普里河流域－河口污染物输移特征及综合管理研究”(海三科202008)；三亚市重点海域污染物排海总量控制制度试点项目(S200929).

作者简介：吴侃侃，工程师，博士，研究方向为海洋规划与管理

通信作者：陈克亮，正高级工程师，博士，研究方向为海洋规划与管理

and Restoration, Xiamen 361005, China; 4.Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361100, China)

Abstract: As one of the important means to coordinate the relationship between the development and utilization activities of the coastal zone and the protection of the ecological environment, and to measure the sustainable development capacity of the coastal zone, the quantitative research of the comprehensive evaluation of marine eco-environment carrying capacity (MECC) of the is very important. This study reviews the existing problems in the current integrated assessment of MECC, compares and analyzes the commonly used methods for carrying capacity assessment, and selects a set of potential methods that is suitable for the integrated assessment of MECC in coastal areas according to the characteristics of coastal areas. On this basis, through the analysis of the results of the case application, the practicability and limitations of this set of methods is further discussed, and several improvement suggestions are proposed. The results show that: (1) in view of the complexity and uncertainty of the coastal ecosystem, some traditional and commonly used assessment methods of carrying capacity cannot be well applied to the integrated assessment of MECC in coastal areas; (2) by fully considering the interaction between human activities and the marine eco-environment, this set of potential methods proposed in this study can better support the establishment of the assessment index system, objectively give weight to each assessment index, and quantitatively analyze and evaluate the comprehensive MECC. And thus, it can provide a feasible approach for the integrated assessment of MECC as well as empirical references for ensuring a sustainable coastal development; (3) additionally, it still has several limitations, such as, mainly, the lack of authoritative and unified indicator systems, as well as specific rating standards. Therefore, future studies should focus on related methods for the establishment of assessment indicator system and the classification criteria for evaluation results, so as to improve the assessment system for MECC and thus apply it to a more scientific analysis of the MECC in coastal areas.

Keywords: Marine eco-environmental carrying capacity, Assessment methods, Comparison and analysis, Limitations and suggestions

0　引言

海岸带是海洋生态系统、陆地生态系统和社会人文生态系统相互作用、相互影响的脆弱敏感区域，具有重要的生态功能和资源价值[1]。随着海岸带社会经济的高速发展，人类不合理的开发利用活动致使海岸带区域承受着巨大压力，生态环境破坏问题日益凸显[2]。因此，海岸带区域的可持续发展，已经成为世界范围内最受关注的焦点之一[3]。Navarro 等[4]认为，当海岸带区域生态系统处于正常的承载能力时，其社会经济的发展可以被认为是具有可持续性的。由于海洋生态环境承载力评价是评估海岸带区域可持续发展能力、状态或成效的一种切实可行的手段[5]，因此，寻求其科学合理的评价方法显得至关重要。

“承载力”的概念始于 18 世纪初，最初被定义为某区域内所能支持的最大个体数量[6]。自从 1870 年被引入生态学研究领域之后，承载力的概念已经从单一类型承载力层面（如，人口承载力、资源承载力、生态承载力、环境承载力等）拓展到了综合承载力层面（如，资源－环境承载力，社会－生态承载力，生态环境承载力等）[7]。海洋生态环境承载力评价可以看成承载力评价在海洋和海岸带区域的一种具体实践，是衡量海洋和海岸带区域可持续发展能力的重要手段之一[8-9]。与其他综合承载力评

价不同,它侧重于从生态系统自我修复能力和环境自净能力的角度出发,通过评估生态环境因子与人类活动因子的协同效应,为协调人类开发利用活动和海洋生态环境保护之间的关系提供科学的依据[8,10-11]。过去的 20 余年间,国内外关于承载力评价的研究取得了长足发展,但主要集中在资源、生态、社会、人口等陆地领域[12-17]。相比而言,海洋生态环境承载力综合评价的研究目前仍处于不断探索与完善的阶段,相关或相似的研究主要集中在相关概念和技术路线的阐述,以及单一承载力要素评价等方面[4,18-25](如,渔业养殖承载力、滨海旅游承载力、海洋生态承载力、海洋资源承载力等),整体上缺乏对生态环境以及人类活动的综合考虑与分析,对海洋生态环境承载力评价指标体系构建的理论依据研究仍不够深入,不能满足海岸带区域生态环境保护与管理的需求[26];同时,由于海岸带具有较强的区域特征性和生态系统复杂性[27],一些传统、常用的(或应用于陆域的)承载力评价方法(如,层次分析法、承载指数法、模糊综合评价法等)对于海洋生态环境承载力综合评价过程的适用性和合理性,还有待进一步探索[28-30]。因此,进一步开展海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价方法体系构建的相关研究显得十分必要。

鉴此,本研究从海洋生态环境承载力综合评价过程中的评价指标体系构建、评价指标标准化和赋权,以及承载力综合评估和分析 3 个主要步骤出发,比较分析了当前承载力评价过程中常用的方法;同时,结合海岸带区域的特点,遴选出一套适用于海岸带区域的海洋生态环境承载力综合评价方法,分析探讨其可行性与局限性,并提出了改进建议,以期能为海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价提供一个可行的思路,也为未来其他相关研究提供参考和启示。

1 相关评价方法的比较

海洋生态环境承载力综合评价的一般流程分为 5 个步骤[8,28](图 1):①数据资料收集和整理;②评价指标体系的构建;③评价指标标准化和赋权;④承载力综合评估和分析;⑤海洋生态环境保护和管理。根据上述流程,本节将对上述第②、③、④3 个主要步骤中常用的方法进行介绍,并开展比较分析。

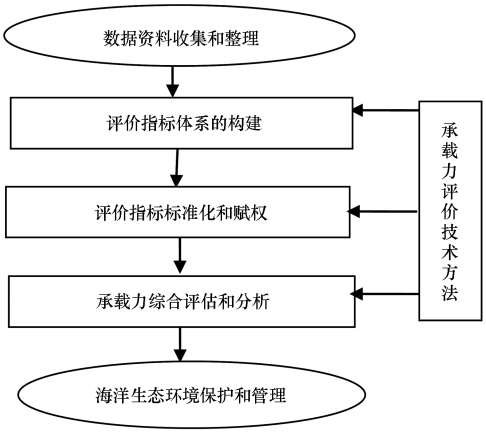

图 1 海洋生态环境承载力综合评价技术流程

Fig. 1 The technical procedure of integrated assessment of marine eco-environmental carrying capacity

1.1 评价指标体系构建的方法

在承载力评价研究发展的早期,专家评判法、生态足迹法、承载指数法等一些传统的方法,常用于支持承载力评价指标体系的构建中,但这些方法仍然存在着一些不足[28]。如,应用专家评判法开展评价指标的选择过程中,存在着选择性较为主观的问题;当专家组成不合理时,还存在着选取的评价指标内涵重复性较高的问题[27];而应用生态足迹法与承载指数法选取评价指标的过程中,则存在着可选取的评价指标较少且类型较为单一,不能很好地反映人类-生态环境复合系统之间的相互作用和协同效应的问题[7,14]。

“压力-状态-响应”(PSR)模型,是由世界经合组织(OECD)于 1994 年提出的。它以因果关系为基础,是目前最经典的可持续性承载力评价指标选取概念框架模型[30]。其中,“压力”是指人类活动对生态环境造成的不良影响,是“状态”发生的原因;“状态”是指在人类活动影响下的生态环境状况,是“响应”的原因;“响应”是指人类为促进改善生态环境状况和实现生态环境可持续发展采取的对策和措施[31]。值得一提的是,在 PSR 框架的基础上,欧洲环境署通过增加“驱动力”和“影响”两个要素,构建了驱动力-压力-状态-影响-反应

(DPSIR)模型，这一模型进一步丰富了 PSR 模型的内容[32]。尽管如此，PSR 模型和 DPSIR 模型在核心内涵(即压力、状态和响应)上是一致的；此外，应用 DPSIR 模型无法很好地找出各项评价指标之间的因果关系，从而导致很难明确各项指标的属性和类型[33]。

基于上述两个模型，李延峰[28]通过分析海洋生态环境承载力影响因素(包含生态、环境、人类活动 3 个方面)之间的相互作用(图 2)，构建了近岸海域生态环境承载力概念模型，用于支持海洋生态环境承载力评价指标体系的构建。该模型将海洋生态环境承载力分为“环境承载力”“生态弹性力”和“人类活动力”3 个核心部分。其中，“环境承载力”是指一定环境质量标准下，海洋生态系统对污染物的容纳能力，主要反映海洋环境状态，对应 PSR 模型或 DPSIR 模型中的“状态”部分；“生态弹性力”指海洋生态系统自我维持与自我调节的能力，主要反映海洋生物多样性状态，体现海洋生态系统承载力的支持条件，也是对应 PSR 模型或 DPSIR 模型中的“状态”部分；“人类活动力”一方面体现了人类活动对海洋生态环境承载力造成的影响；另一方面人类可以作为产生“响应”的主体，通过调整自身的行为，来影响海洋生态环境承载力的承载状况。前者对应 PSR 模型或 DPSIR 模型的“驱动力”“压力”部分，后者对应 PSR 模型或 DPSIR 模型的“响应”部分。

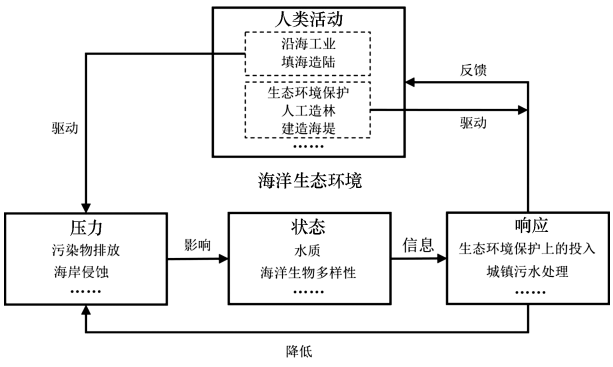

图 2　海洋生态环境与人类活动之间的相互作用

注：模型中人类活动、压力、状态和反应所包含的内容为代表性例子。

Fig. 2　Interactions between marine eco-environmental conditions and human activities

PSR 模型或 DPSIR 模型虽然为承载力评价指标体系的构建提供了概念支撑，但仍不能很好地反映人类活动与生态环境之间相互影响的对应关系[28]。作为 DPSIR 的演化模型，近岸海域生态环境承载力概念模型不但分别从人类、环境和生态 3 个维度来综合考虑海洋生态环境承载力综合评价指标的构成因素，而且能更清晰地阐明了上述 3 个维度与“压力”“状态”“响应”之间的内在联系和对应关系。

1.2　指标体系评价的方法

1.2.1　评价指标标准化处理

海洋生态环境承载力评价指标按性质可以分为“效益型”指标(即正向指标)和“成本型”指标(即负向指标)两种[8]。其中，属性值越大越好的为“效益型”指标，如“生物多样性指数”“环境容量利用率”“污水综合利用率”等；反之，属性值越小越好的则为“成本型”指标，如“水体富营养化指数”“海水入侵面积比例”“河流污染物排海总量”等指标等。

根据评价指标线性和非线性的特征区别，以及指标性质(正向和负向)的差别，不同类型的评价指标有不同的标准化计算公式[34]。目前，最常用的评价指标标准化处理的方法主要是极差变换法，比例变换法，偏差法(标准样本变换法)，以及正则化法[8,29,35]。其中，极差变换法和比例变换法适用于线性指标的标准化处理；偏差法(标准样本变换法)和正则化法适用于非线性指标的标准化处理。海洋生态环境承载力评价指标标准化处理常用方法比较如下。

(1)极差变换法

极差变换法可按下式(1)或式(2)计算：

$$Z_{ij}=(y_{ij}-y_{j\min})/(y_{j\max}-y_{j\min}) \quad (1)$$

$$Z_{ij}=(y_{j\max}-y_{ij})/(y_{j\max}-y_{j\min}) \quad (2)$$

式中：y_{ij} 为指标实测值；$y_{j\max}$ 和 $y_{j\min}$ 分别为该评价指标序列的最大值与最小值。其中，式(1)适用于正向指标标准化处理，式(2)适用于负向指标标准化处理。

极差变换法的特点在于：对于正向、负向指标都能适用。但处理后的指标无法反映原始指标间的关系；当 $Z_{ij}=0$ 时，该方法则不适用。

(2)比例变换法

比例变换法中的正向指标标准化处理和负向指标标准化处理可分别按式(3)和式(4)计算:

$$Z_{ij}=y_{ij}/y_{j\max} \tag{3}$$

$$Z_{ij}=1-y_{ij}/y_{j\max} \tag{4}$$

式中:y_{ij}为指标实测值;$y_{j\max}$为该评价指标序列的最大值。

比例变换法的特点在于:经过比例变换,将评价指标都转换成正向指标。该方法考虑到各评价指标之间的差异性,但无法客观反映负向指标间的关系。

(3)偏差法

偏差法可按下式计算:

$$Z_{ij}=y_{ij}-\mu_{ij}/\delta_{ij} \tag{5}$$

式中:μ_{ij}为指标y_{ij}的平均值;δ_{ij}为指标y_{ij}的标准差。

偏差法的特点在于:不区分正负向的评价指标,但当$Z_{ij}<0$时,该方法则不适用。

(4)正则化法

正则化法可按下式计算:

$$Z_{ij}=y_{ij}/\sqrt{\sum_{i=1}^{n}y_{ij}^{2}} \tag{6}$$

式中:y_{ij}为指标的实际值。

正则化法的特点在于:反映了原始评价指标间的关系,不仅体现各评价指标之间的差异性,而且不用区分正负向指标,只要$y_{ij}>0$则均适用。

1.2.2 评价指标赋权

评价指标权重是指某一评价指标在一个多层次体系中对上级指标的贡献,实质是反映不同评价因子之间作用强弱的差异[8,29]。在承载力评价指标体系中,权重应该表现出不同承载力影响因素之间的作用关系及其对上级指标的贡献大小[25]。因此,在评价过程中,指标权重的确定决定了评估结果的科学性和准确性。目前,指标权重的确定方法主要可分为主观赋权法和客观赋权法两类[29]。其中,主观赋权法常用的方法主要包括专家评判法、层次分析法以及等权法[8,27-29];客观赋权法常用的方法主要包括主成分分析法和熵值法[29-30]。海洋生态环境承载力评价指标赋权常用方法的比较如下。

(1)层次分析法。主要优点为:定量和定性相结合,可以系统性地解决多目标的复杂问题,简洁实用,所需定量数据较少。主要缺点为:主观性强,对专家组成的要求较高,否则结果不易令人信服;准则和指标层较多的情况下,权重较难计算。

(2)主成分分析法。主要优点为:消除了评价指标之间的影响,减少指标选择工作量;确定权重客观,在计算机上便于实现。主要缺点为:主成分的累积贡献率需要达到较高水平;当主成分的因子符号有正有负时,综合评价函数意义就不明确;主成分本身含义解释就比较模糊。

(3)熵值法。主要优点为:根据各项评价指标值的变异程度来确定指标权重,避免了人为因素带来的偏差,方便操作,结果较为客观。主要缺点为:指标样本数的变化可能会导致评价指标权重的变化。

(4)等权重分析法。主要优点为:按指标数量来平均分配权重,计算简单。主要缺点为:评价结果主观,无法体现各指标重要性所存在的差异。

1.3 海洋生态环境承载力综合评估与分析的方法

海洋生态环境承载力综合评估与分析是根据承载力相关指标的数值与权重分布,通过结合相关的数据分析方法,最终以综合承载力指数的形式予以体现,主要反映当前某一海域在一定时期内的生态环境承载状态(如,可载、满载或超载)。然而,有关海洋生态环境承载力综合评价的相关研究报道并不多见,尤其是定量的评估与分析方法仍鲜有研究,常用的方法主要是参考和沿用陆域承载力的评价方法,包括专家评判-层次分析法、生态足迹法、模糊综合评价法、承载指数法、系统模型法、状态空间法以及物元拓展法[7,14,16,23,28,36-37]。上述这些海洋生态环境承载力综合评估与分析方法的比较如下。

(1)专家评判-层次分析法。优点:在缺乏足够统计数据和原始资料的情况下,对评价对象做出半定量的估计。可以系统性地解决多目标的复杂问题,简洁实用,在缺乏足够数据和资料的情况下,也可适用。缺点:专家的组成合理性影响评价结果的客观性和准确性;权重的确定较为主观,结果不一定准确。

(2)生态足迹法。优点:通过生态赤字或盈余来反映人类活动对生态造成的影响,从而来评价生态承载力状况。缺点:涉及的评价因子少,主要集中在生态层面,因子间关系过于简单,忽略了人类-生态环境复合系统之间的相互作用和协同效应。

(3)模糊综合评价法。优点:利用模糊隶属度理论把定性指标进行合理的定量化,弱化主观因素的影响,一定程度消除不确定性。缺点:数据需求较大,计算过程较为复杂;隶属度函数的确定依照经验判断,主观性较大;权重的分配带有一定的主观性。

(4)承载指数法。优点:引进"压力指数"和"承压指数"等评价指标,通过数据标准化处理和权重分配把评价指标进行定量化,计算简单、易行。缺点:缺乏指标体系构建的理论框架,易造成指标较为单一,无法充分体现生态环境承载力的内涵;对数据的需求量较大,且指标标准值的确定需要有大量数据支撑或依据。

(5)状态空间法。优点:模型构造相对简单,以三维空间的模式(一般是环境、生态和人类活动),综合、定量地描述测定区域承载力与承载状况,其不仅描述了系统的外部特征,而且揭示了系统的内部状态和性能。缺点:计算过程简单,结果直观,但指标理想值的确定较为复杂。

(6)系统模型法。优点:基于系统动力学原理,将因子参数、指标体系、运算法则、权重相互结合,抽象模拟区域巨系统的状态,形成一套整合的模型系统,利用模型系统的运行和输出,实现对现实区域生态系统承载力与承载状况的反映。缺点:计算过程十分复杂,数据要求量很高,相关方法和模型耦合方面还需要继续完善。

(7)物元拓展法。优点:模型构造相对简单,评估的结果更为具体,用与复合系统中各层次、各阶段产生的不相容的矛盾问题,可适用于大范围区域内承载力评价。缺点:数据需求较大,计算过程较为复杂,且指标标准值的确定和评价结果分级需要有大量数据支撑或依据。

2　海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价方法体系

2.1　海岸带区域生态环境承载力评价特点

海岸带区域集中了全球近 1/3 的人口,拥有全球最丰富的自然资源和生态系统,是地球上物质循环、能量流动和信息交换最频繁、最集中的区域,也是人类开发活动最频繁的区域,这就使得海岸带区域的海陆交互作用频繁而强烈,海陆之间的动力作用相当复杂[2,38]。正是由于海岸带区域的复杂性,从而导致了在开展海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价过程中,存在着区域特征多样化,数据资料难以获取,评价标准难以统一,评价过程复杂且存在着较大不确定性的特点[27]。

2.2　综合评价方法遴选

结合海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价的特点及其各常用承载力评价方法的比较,本节对这些评价方法进行遴选,以期选择出一套适用于海岸带区域的海洋生态环境承载力综合评价方法,具体分析如下。

(1)虽然 PSR 模型或 DPSIR 模型为支持海洋生态环境承载力评价指标体系的构建提供了概念框架,但相关实践证明,鉴于海岸带区域的复杂性(生态系统的复杂性和人类活动的复杂性),这两个模型在寻找海岸带区域海洋生态环境承载力评价指标之间因果关系方面存在着一定的困难,从而影响了所构建指标体系的准确性[32,39]。与 PSR 模型或 DPSIR 模型相比,近岸海域生态环境承载力概念模型不但更好地阐明了海岸带区域"环境承载力""生态弹性力"和"人类活动力"与 PSR 模型或 DPSIR 模型中"压力""状态""响应"之间的对应关系,而且能更清晰地反映海岸带区域人类活动与生态环境之间的相互作用,从而为海洋生态环境承载力综合评价指标的构建提供了更为完整、明确的思路。此外,近岸海域生态环境承载力概念模型通过区分 PSR 模型中"压力"(如,围垦、养殖、污水排放等对生态环境造成不利影响的人类活动)和"响应"(如,人类针对生态环境问题所采取的管理措施)的含意,能较为深刻地诠释了人类活动在影响海洋生态环境承载力中所扮演的"双重"角色,从而更好地为海洋生态环境承载力评价指标体系的构建提供较为科学合理的理论框架,所选取的指标更具针对性。

(2)根据海洋生态环境承载力评价指标标准化

处理常用方法的比较可知，与其他的评价指标标准化方法（如，常用的极差变换法等）相比[16,37]，正则化方法更加适用于具有非线性特征的正、负向指标相互混合的数据标准化过程。它不仅不必要区分正向和负向的指标，而且能够避免当评价指标呈现出非线性特征时，归一化值低于零的情况[40]。此外，该方法可以反映出指标之间的差异和所有初始指标之间的关系，从而可以用于支持所有多目标决策数据标准化的过程[41]。

（3）根据海洋生态环境承载力评价指标赋权常用方法的比较可知，熵权法作为一种具有代表性的加权方法，是根据各评价指标的变异程度来确定指标权重，从而可以有效避免分析者偏好的影响。该方法不但计算过程较为方便，而且也可以获得比其他相关方法（如，层次分析法、专家判断）更客观的权重分配结果[14,28-30,36]。此外，主成分分析法是另一种基于多变量分析指标加权的，相对客观的方法。但是，由于主成分的定义比较模糊，只有当反映主成分的各种变量的累积贡献率达到较高水平时，才能得到的指标加权的有效和合理的结果[29,36-37]。这意味着在复杂的主成分选择过程中，识别出的变量越少，就越难以揭示海洋生态环境承载力的实际情况，尤其是在海岸带区域。

（4）通过上述海洋生态环境承载力综合评估与分析常用方法比较可知，专家评判－层次分析法、生态足迹法、承载指数法、系统动力学方法、模糊综合评价模型等综合评价方法存在着相关评价指标考虑不全面及可选取的指标较少或指标类型单一（如，生态足迹法和承载指数法），评价结果不完整或较为主观（如，专家评判－层次分析法），难以获取复杂计算过程所需的大量初始数据，各评价指标分类标准难以确定等问题（如，承载指数法、系统动力学方法和模糊综合评价模型）[7,14,16-17,28-29]。这对于在区域特征和人类活动形式多样化，数据资料难以获取的海岸带区域而言，应用上述这些方法开展海洋生态环境承载力综合评价时，将很有可能导致评价结果缺乏合理性[28-29]。然而，状态空间法对于海洋生态环境承载力与人类活动之间的相互影响考虑较为综合全面，不仅在一定程度上克服或避免了使用上述分析方法开展海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价时所存在的不足，而且可以在数据资料相对缺乏的情况下，使海洋生态环境承载力综合评价的过程与结果显得更为简洁和直观[28-29]。此外，尽管物元拓展法进一步完善和细化了评价指标分级标准，但各评价指标等级边界值的确定依据，仍要取决于当地沿海地区的发展规划，沿海生态系统标准，相关参考数据的判断，以及专家和地方政府的建议。因此，这对于区域性和生态系统复杂性较强的海岸带区域而言，使用物元拓展方法创建海洋生态环境承载力分级标准所涉及的不确定性仍未得到有效解决[37]。

2.3 一组适用的综合评价方法体系

2.3.1 方法体系

根据上述各评价方法的分析和遴选，本节提出了一组适用于海岸带区域的海洋生态环境承载力定量化的综合评价方法。

（1）在评价指标体系构建阶段，基于近岸海域生态环境承载力概念模型，并通过结合研究区域实际情况以及主管部门、专家及社会公众咨询的结果，来构建研究区域的海洋生态环境承载力评价指标体系。

（2）在评价指标标准化和赋权阶段，通过应用正则化法，对评价指标进行标准化处理；同时，应用熵权法对各评价指标进行赋权。

（3）在海洋生态环境承载力综合评估阶段，应用状态空间模型，对研究区域的海洋生态环境承载力开展综合分析，并评估其承载力状态。

2.3.2 综合评价各阶段方法

基于近岸海域生态环境承载力概念模型，海岸带区域海洋生态环境承载力的评价指标体系（示例）由目标层、准则层和指标层构成。其中，准则层则包括环境承载力、生态弹性力与人类活动力[28]；指标层则是根据各准则层定义（第 1.1 节）所对应的相关指标，并结合研究区域的实际情况进行确定[28-29]。海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价指标体系的具体构成内容（示例）见表 1。

表 1　海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价指标体系构成内容（示例）

Table 1　The constitutions of integrated assessment indicator system of marine eco-environmental carrying capacity in coastal areas (example)

目标层	准则层		评价指标（示例）（指标数：1－n）	指标类型
海洋生态环境承载力	环境承载力	状态	水质综合评价指数	负向
			……评价指标 n	……
	生态弹性力	状态	生物多样性指数	正向
			……评价指标 n	……
	人类活动力	压力	围填海或海水养殖面积	负向
			……评价指标 n	……
		响应	入海排污口达标排放率	正向
			……评价指标 n	……

注：表中所列的评价指标只是示例性指标，但并不是详尽和固定不变的，它需要结合评价区域所在的实际情况而定。

通过采用正则化法对呈现非线性特征的评价指标进行标准化处理；通过熵权法，对标准化后的评价指标进行赋权。鉴于熵权法在环境管理与决策研究中应用较广，此处不再赘述，具体计算公式详见相关文献[14,30,36]。

基于上述评价指标体系构建，以及指标标准化与赋权的结果，通过采用状态空间模型对海洋生态环境承载力开展综合的评估与分析。在状态空间模型中，将环境承载力（X 轴）、生态弹性力（Y 轴）和人类活动力（Z 轴）看成一个三维立体曲面空间；从原点到曲面上任意点的向量模代表海洋生态环境承载力指数（$|M|$）；位于曲面内的点表现为可载状态，位于曲面上的点表现为满载状态，位于曲面外的点表现为超载状态。$|M|$ 的计算见式（7）[28]。其中，$|M|$ 代表原点到状态空间系统任意一点的矢量模，即海洋生态环境承载力指数；v_{ir} 为海洋系统中各评价指标（环境承载力、生态弹性力和人类活动力）的状态空间坐标值（$i=1,2,3,\cdots n$）；w_i 为指标权重；n 为指标数量。

$$|M|=\sqrt[2]{\sum_{i=1}^{n} w_i v_{ir}^2} \quad (i=1,2,3,\cdots n) \quad (7)$$

尽管如此，由于海岸带区域存在较大的地域性特征，状态空间模型在确定 $|M|$ 理想值（$|M|_s$）方面有时也存在着一定的难度。为进一步克服该难点，部分学者提出了进一步简化的状态空间模型（图 3）[29,42]。即假设从原点到 OBD 曲面上任意点的向量模值为 1（归一化后各评估指标的理想值为 1,1,1, …,n，即海洋生态环境承载力综合评价指数的理想值 $|M|_s$ 为 1）。当系统的向量模分别位于 OBD 曲面内、曲面上或曲面外时，海洋生态环境承载力对应的状态则分别为可载（即 $|M|<1$）、满载（即 $|M|=1$）或超载（即 $|M|>1$）。

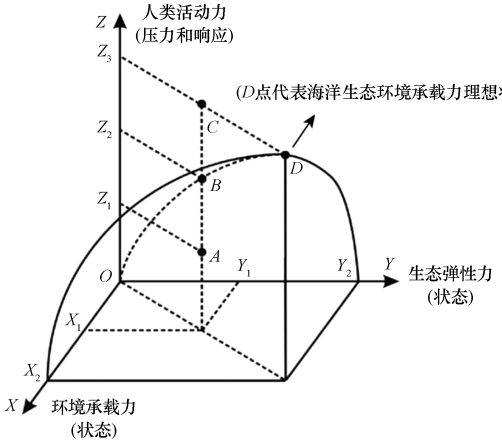

图 3　简化的状态空间模型

Fig. 3　The simplified state space model

3　方法体系的可行性、局限性及改进建议

3.1　案例应用及可行性

该海洋生态环境承载力综合评价方法体系在《三亚市重点海域污染物排海总量控制制度试点项目》（包含三亚湾海洋生态环境承载力综合评价专题研究）得以应用，并对三亚湾海域 2015—2020 年的海洋生态环境承载力情况进行了综合评估与分析[43]。

3.1.1　研究区域概况

三亚湾位于海南省三亚市南部，西起马岭-天涯海角基岩岬角，东至三亚港，再向南至鹿回头半岛南端。三亚湾岸线呈东西走向，海岸线总长约 27 km，基本属沙质海岸[43]。三亚湾海域总面积约为 6.9 km^2（即本次研究范围，介于“18°18′02″N，109°20′21″E”“18°11′18″N，109°20′21″E”“18°11′18″N”，109°28′55″E 三点连线与北侧海岸线所包含的范围内），湾内有三亚港、东瑁洲、西瑁洲两岛以及凤凰岛（人工岛，距离三亚市西岸 2 km），主要入海

河流包括烧旗沟、冲会河和三亚河[43]。

3.1.2 案例应用结果

(1)基于近岸海域生态环境承载力概念模型，并结合当前三亚湾海域所面临的主要生态环境问题(包括陆源污染排放严重，海水水质恶化，部分珊瑚礁生态系统出现轻微退化，以及不断增加的赤潮风险)[43]，开展三亚湾海域海洋生态环境承载力评价指标的选取以及指标体系的构建。根据海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价指标体系构成(表 1)以及第 1.1 节对环境承载力、生态弹性力以及人类活动力的具体定义，本次三亚湾海域海洋生态环境承载力评价指标体系中具体评价指标的选取依据如下：①环境承载力方面，富营养化指数是反映水污染程度的重要评价指标[44]。环境容量利用率是指某一地区污染物排放量与环境容量的比值，反映了研究区域环境接受污染物的能力[45]。②生态弹性力方面，珊瑚礁栖息地的覆盖率是珊瑚礁面积占总面积的百分比，其中珊瑚礁面积越大，表明海洋生物多样性和生态系统保护越好[46]。赤潮评估指数是直接反映生态系统结构和功能变化的重要参数[47]。③人类活动力方面，入海污染物(主要来自陆地生产、人类生活和海洋水产养殖)排放量不断增加是三亚湾最大的环境问题之一[44]。因此，河流污染物和海水养殖业污染物的排海总量直接反映了三亚湾面临的生态环境压力。污染控制投资占 GDP 的比例，城市污水处理率则代表了人类社会在面临生态环境问题时应对和控制污染以及改善生态环境条件的能力[28]。综上所述，三亚湾海域海洋生态环境承载力评价指标体系分别由反映环境承载力的富营养化指数与环境容量利用率(均为负向指标)，反映生态弹性力的珊瑚礁生境覆盖率与赤潮评价指数(均为正向指标)，反映人类活动对环境造成负面影响的海水养殖面积与河流污染物排海总量(均为负向指标)，以及反映人类针对生态环境不利影响所采取措施的污染控制设施投入占三亚市国民经济生产总值的比例和城市污水处理率(均为正向指标)8 项具有代表性的评价指标构成。

(2)通过采用正则化法，对上述三亚湾海洋生态环境承载力 8 项评价指标的非线性原始数据进行了标准化处理。同时，采用熵权法，对各评价指标以及其所属的准则层赋权。赋权结果表明：①在具体评价指标方面，富营养化指数、环境容量利用率以及河流污染物排海总量所占的权重均较大(分别为 0.331、0.206 和 0.237)，这意味着上述 3 项指标对三亚湾海洋生态环境承载力状态的影响较大。②在准则层方面，环境承载力权重(0.537)和人类活动力权重(0.427)要远高于生态弹性力权重(0.036)。这意味着三亚湾海洋环境的状态(环境承载力)和人类活动对三亚湾海洋生态环境造成的影响(含不利和有利影响)，对于三亚湾海洋生态环境承载力状态的整体变化发挥着主导作用。

(3)通过采用简化的状态空间模型，对三亚湾海洋生态环境承载力状态进行了综合的评估与分析(图 4)，结果表明：①2015—2020 年，三亚湾海洋生态环境承载力虽然整体上每年均处于“可载”的状态(每年承载力综合评价指数均小于 1)，但承载力在波动中却呈现减小的趋势；②环境承载力和人类活动力状态每年的变化趋势与整体承载力的变化趋势基本相同，同样呈现波动中减弱的趋势。通过结合现场调查和相关数据资料分析发现，不断增加的入海污染物总量(特别是三亚河)和仍未提高的污染物处理水平是造成此现象的主要原因；③尽管如此，三亚湾海域生态弹性力状态则较为平稳，历年变化不大，这说明三亚湾海域生态系统较为稳定和完善，具有较好的自我恢复功能，这也在一定程度上减缓了三亚湾海洋生态环境承载力整体恶化的趋势；④根据评价结果，当前三亚湾海洋生态环境状态亟须进一步改善，从而保证未来三亚湾海岸带区域可持续发展的能力。

(4)此外，基于上述评估分析的结果，案例应用还提出了加强三亚湾入海河流污染物排放控制与管理，增加三亚湾生态环境保护投资、提高污染物处理水平，以及建立应对海岸带风险应急机制并加强基于风险的海岸带区域规划与管理制度等具有针对性的管理措施。

通过三亚湾案例应用，并结合上述海洋生态环境承载力综合评价方法的比较和遴选(第 2.2 节)的

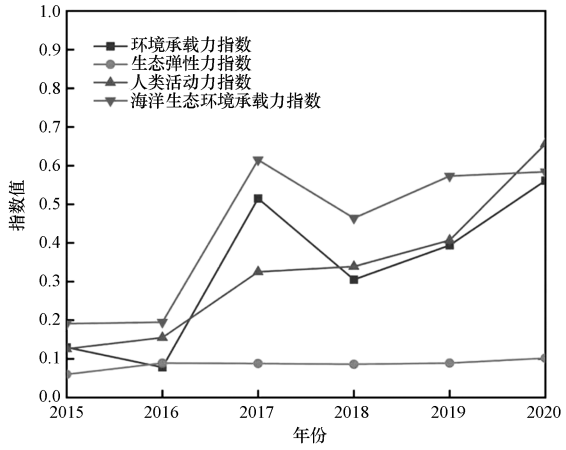

图 4　2015—2020 年三亚湾海域环境承载力、生态弹性力、人类活动力及海洋生态环境承载力指数变化趋势

Fig. 4　Changing trends in the annual index values of environmental carrying capacity, ecological resilience, human activities, and marine eco-environmental carrying capacity in Sanya Bay from 2015 to 2020

结果表明，本研究所提出的由近岸海域生态环境承载力概念框架模型、正则化法、熵权法以及简化的状态空间模型所构成的方法体系，为进一步改进海岸带区域海洋生态环境承载力综合评价提供了一个全新的思路和一个可行的途径，并为确保三亚湾海岸带区域的可持续发展和海洋生态环境承载力相关研究提供了经验参考。

3.2　局限性及改进的建议

尽管如此，笔者也在案例应用的过程中发现，该方法体系仍存在着一些局限性。

(1)在评价指标体系的构建方面，虽然近岸海域生态环境承载力概念模型提供了综合考虑海洋生态环境承载力潜在影响因素的有效途径和框架，但目前仍然缺乏如何应用相关方法与统计分析软件，如敏感性分析、统计产品与服务解决方案(SPSS)分析软件对评价指标进行选择和确定的系统研究[29,46,48]。应用此概念模型开展评价指标的选取，大多仍是基于研究区域的实际情况下人为经验的判断。因此，未来有必要探索一些准确、统一的分析方法，并结合社会统计学原理和相关软件(如，上述的 SPSS 分析软件等)，在构建海洋生态环境承载力综合评价指标体系的同时，进一步完善评价指标选择与确定过程的相关研究，以避免与其他承载力评价指标体系(如，资源环境承载力、社会经济承载力等)中的部分指标出现重合，确保未来的海洋生态环境承载力综合评价指标体系更加科学、具体、合理，选择的评价指标更具有代表性和针对性(更侧重于反映生态环境与人类活动的相互作用)。

(2)对于海洋生态环境承载力综合评估和分析而言，简化的状态空间模型可以有效避免或解决评价指标标准值确定的困难。尽管如此，目前对该模型中海洋生态环境承载力指数理想值(即“1”)的置信区间还没有开展系统的研究，也没有统一的标准[28-29,42]。这将会导致对于海洋生态环境承载力状态的描述显得不够具体(目前只划分为可载、满载和超载)，从而无法像使用物元拓展法一样准确地对其评价结果进行精确的等级划分(例如，极好、好、一般、差、非常差)[16,37]。这一点对于在一个研究范围更大的海岸带区域(如，跨行政区域的多个海湾)或地理条件更复杂的海岸带区域(如，具有多个亚单元的半封闭海湾)而言，使用简化的状态空间模型进行评价的结果将变得不够具体和精确。因此，未来需要考虑将简化的状态空间模型与其他承载力分析方法相结合，探索出一套海洋生态环境承载力综合评估与分析的耦合模型(如，简化状态空间法－物元拓展法耦合模型)，从而使得海洋生态环境承载力综合评价的结果更加科学和精确。

4　结语

海洋生态环境承载力已经成为协调海岸带区域社会经济发展与生态环境保护之间关系，衡量海岸带区域可持续发展能力的一种必不可少的技术工具。然而，当前对于海洋生态环境承载力相关的定量化方法缺乏系统的研究。本研究在综合比较各承载力综合评价常用方法基础上，探讨并分析了这些方法的优缺点；同时，结合海岸带区域的特点，构建了一组适用于海岸带区域的海洋生态环境承载力综合评价方法，以期为未来其他更多海岸带区域的相关研究提供参考与启示。尽管如此，这组评价方法仍存在一些局限性，主要是缺乏权威和统一的指标体系构建方法，以及具体的评价结果分级标准两个方面。因此，未来应针对海洋生态环境承载力指标体系构建和评价结果分类标准的方法，开展

更加深入的研究与应用，从而不断地完善海洋生态环境承载力综合评价的方法体系，为海岸带区域的可持续发展提供更为科学、合理的技术支撑。

参考文献(References)：

[1] BARBIER E B, HACKER S D, KENNEDY C, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services[J]. Ecological Monographs, 2011, 81 (2): 169－193.

[2] LI Yangfan, XIANG Zhiyuan, CHEN Keliang, et al. An improved spatial subsidy approach for ecological compensation in coastal seascapes for resilient land-sea management [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 276 (2): 2－9.

[3] BROMAN G I, ROBERT K H. A framework for strategic sustainable development [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 140 (1): 17－31.

[4] NAVARRO J E, TEJADA M, ALMEIDA G F, et al. Carrying capacity assessment for tourist destinations. methodology for the creation of synthetic indicators applied in a coastal area [J]. Tourism Management, 2012, 33:1337－1346.

[5] United Nations. The second world ocean assessment (world ocean assessment II) [EB/OL]. [2023－01－05]. https://www.un.org/regularprocess/. (accessed 21 April 2021).

[6] MALTHUS T. An essay on the principle of population[M]. London: Pickering, 1798: 154－196.

[7] PENG Benhong, LI Yue, Elahi E, et al. Dynamic evolution of ecological carrying capacity based on the ecological footprint theory: a case study of Jiangsu province[J]. Ecological Indicator, 2019, 99: 19－26.

[8] 苗丽娟，王玉广，张永华，等. 海洋生态环境承载力评价指标体系研究[J]. 海洋环境科学，2006，25 (3):75－77.
MIAO Lijuan, WANG Yuguang, ZHANG Yonghua, et al. Assessing index system for bearing capacity of marine ecological environment [J]. Marine Environmental Science, 2006, 25 (3): 75－77.

[9] 韩立民，罗青霞. 海域环境承载力的评价指标体系及评价方法初探[J]. 海洋环境科学，2010，29 (3)：446－450.
HAN Limin, LUO Qingxia. Discussion on evolution index system and method for marine environmental capacity [J]. Marine Environmental Science, 2010, 29 (3): 446－450.

[10] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment[R]. Island Press: Washington, DC, USA, 2005: 25－36.

[11] ISLAM R, KHAN F, ABBASSI R, et al. Human error assessment during maintenance operations of marine systems: what are the effective environmental factors? [J] Safety Science, 2018, 107: 85－98.

[12] LANE M. The carrying capacity imperative: assessing regional carrying capacity methodologies for sustainable land-use planning [J]. Land Use Policy, 2010, 27 (4): 1038－1045.

[13] WANG Shuo, LING Xu, YANG Fenglin, et al. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling city on the basis of the integrated system dynamics model[J]. Science of the Total Environment, 2014, 47 (2): 1070－1081.

[14] ZHANG Mo, LIU Yiming, WU Jing, et al. Index system of urban resource and environment carrying capacity based on ecological civilization [J]. Environment Impact Assessment Review, 2018, 68: 90－97.

[15] SHI Yishao, SHI Shouzheng, WANG Hefeng. Reconsideration of the methodology for estimation of land population carrying capacity in Shanghai metropolis [J]. Science of Total Environment, 2019, 652: 367－381.

[16] MOU Siyu, YAN Jingjing, SHA Jinghua, et al. A comprehensive evaluation model of regional water resource carrying capacity: model development and a case study in Baoding, China[J]. Water (Switzerland), 2020, 12 (9): 2637－2643.

[17] ZHANG Fei, JU Shuaibo, Chan N W, et al. Coupled analysis of new urbanization quality (NUQ) and eco-environmental carrying capacity (EECC) of prefecture-level and above cities in China during 2003－2016[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23 (9): 1－31.

[18] 韩增林，狄乾斌，刘锴. 辽宁省海洋水产资源承载力与可持续发展探讨[J]. 海洋开发与管理，2003，20 (2)：52－57.
HAN Zenglin, DI Qianbin, LIU Kai. Discussing the bearing capacity of ocean aquaculture resource and sustainable development[J]. Ocean Development and Management, 2003, 20 (2): 52－57.

[19] 陈乐天，王开运，邹春静，等. 上海市崇明岛区生态承载力的空间分异[J]. 生态学杂志，2009，28 (4)：734－739.
CHEN Letian , WANG Kaiyun, ZOU Chunjing, et al. Spatial differentiation of ecological carrying capacity of Chongming Islands, Shanghai[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28 (4): 734－739.

[20] BYRON C, LINK J, BENGTSON D. Calculating ecological carrying capacity of shellfish aquaculture using mass-balance modeling: Narragansett Bay, Rhode Island [J]. Ecological Modeling, 2011, 222 (10): 1743－1755.

[21] RIOS-JARA E, GALVAN-VILLA C M, RODRIGU-ZARAGOZA F A, et al. The tourism carrying capacity of underwater trails in Isabel island national park[J]. Mexico Environmental Management, 2013, 52(2): 335－347.

[22] SMAAL A C, SCHELLEKENS T, STRALEN M R, et al. Decrease of the carrying capacity of the Oosterschelde estuary (SW Delta, NL) for bivalve filter feeders due to overgrazing? [J] Aquaculture, 2013, 40 (5): 28－34.

[23] ZHANG Zheng, LU Wenxi, ZHAO Ying, et al. Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process[J]. Ecological Modelling,2014, 275: 9－21.

[24] 靳超，周劲风，李耀初，等. 基于系统动力学的海洋生态承载力研究：以惠州市为例[J]. 海洋环境科学，2017，36 (4)：537－543.
JIN Chao, ZHOU Jinfeng, LI Yaochu, et al. Research on marine ecological carrying capacity based on system dynamics: a case study of Huizhou city[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36 (4): 537－543.

[25] 刑聪聪，赵蓓，刘娜娜，等. 我国海洋资源承载力评价指标体系和评价方法[J]. 海洋开发与管理，2019，4 (8)：33－35.
XING Congcong, ZHAO Bei, LIU Nana, et al. The evaluation index system and the evaluation method of marine resource and environment carrying capacity in China[J]. Ocean Development and Management, 2019, 4 (8): 33－35.

[26] LIU Rongjuan, PU Lijie, ZHU Ming,et al. Coastal resource-environmental carrying capacity assessment: a comprehensive and trade-off analysis of the case study in Jiangsu coastal zone, eastern China[J]. Ocean and Coastal Management, 2020, 186, 50－62.

[27] WU Kankan, ZHANG Luoping. Application of environmental risk assessment for strategic decision-making in coastal areas: case studies in China[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2016, 59 (6): 826－842.

[28] 李延峰. 山东半岛典型海域生态环境承载力评价[D].青岛：中国科学院海洋，2014.
LI Yanfeng. An Integrated methodology for assessment of marine eco-environment carrying capacity in Shandong Peninsula[D]. Qingdao: Master's Thesis, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2014.

[29] 刘锦怡，陈斯典，张天久. 海洋生态环境承载力研究：以深圳东部海域为例[J]. 海洋环境科学，2017，36 (4)：560－565.
LIU Jinyi, CHEN Sidian, ZHANG Tianjiu. Research on marine eco-environmental carrying capacity: a case study in eastern coast ocean of Shenzhen[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36 (4): 560－565.

[30] 苏子龙，袁国华，郝庆，等. 基于熵权法的海洋生态环境承载力评价：以广西近岸海域为例[J]. 中国国土资源经济，2018，1(2)：13－18.
SU Zilong, YUAN Guohua, HAO Qing. Carrying capacity assessment of marine ecological environment based on entropy method: a case study of coastal waters of Guangxi ZAR[J]. Natural Resource Economics of China, 2018, 1(2): 13－18.

[31] HAZBAVI Z, SADEGH S H. Watershed health assessment using the pressure-state-response (PSR) framework [J]. Land Degradation and Development, 2020, 31(2): 3－19.

[32] LIN Tao, XUE Xiongzhi, LU Changyi. Analysis of coastal wetland changes using the "DPSIR" model: a case study in Xiamen, China [J]. Coastal Management, 2007, 35: 289－303.

[33] MALMIR, M, JAVADI S, MORIDI A, et al. A new combined framework for sustainable development using the DPSIR approach and numerical modeling [J]. Geoscience Frontier, 2021, 14: 260－273.

[34] 邓波，洪跋曾，龙瑞军. 区域生态承载力量化方法研究评述[J]. 甘肃农业大学学报，2003，38 (3)：281－289.
DENG Bo, HONG Bazeng, LONG Ruijun. Review on the methods of regional ecological carrying capacity[J]. Journal of Gansu Agriculture University, 2003, 38 (3): 281－289.

[35] LUKAS M A. Regularization method[C]// Encyclopedia of Environmetrics, New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2006:281－304.

[36] 郑力燕，毕相东，宋伦，等. 基于熵值－突变级数法的环渤海地区海洋生态环境承载力评价及障碍因诊断[J]. 海洋通报，2018,37 (5)：591－600.
ZHENG Liyan, BI Xiangdong, SONG Lun, et al. Evaluation of marine ecological environment carrying capacity and obstacle diagnosis for Bohai Sea Ring Area of China based on entropy and catastrophe progression method. Marine Science Bulletin[J]. 2018, 37(5): 591－600.

[37] ZHAO Yuning, XUE Xiongzhi, HUANG Yi, et al. Evaluating comprehensive carrying capacity of coastal area using the matter-element extension method: a case study in Fujian Province of China [J]. Ocean and Coastal Management, 2021, 214: 21－31.

[38] 薛雄志，张丽玉，方秦华. 海岸带综合管理效果评价方法的研究进展[J]. 海洋开发与管理，2008，20 (1)：32－50.
XUE Xiongzhi, ZHANG Liyu, FANG Qinhua. Research progress on evaluation methods for comprehensive coastal zone management effectiveness[J]. Ocean Development and Management, 2008, 20 (1): 32－50.

[39] SARMADI H, SALEHI E, KUSARI N. The mega city of tehran water quantity assessment based on DPSIR model. Journal of physics[J]. Conference series, 2021, 18: 34－47.

[40] SOHN H. Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. Philosophical Transactions [J]. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2007, 365(1851): 539－560.

[41] BOTSEN A K, HEAL K R, CARLSON L T, et al. Best-matched internal standard normalization in liquid chromatography-mass spectrometry metabolomics applied to environmental samples[J]. Analytical Chemistry, 2017, 33 (2): 1363－1369.

[42] 许冬兰，李玉强. 基于状态空间法的海洋生态环境承载力评价[J]. 统计与决策，2013，20 (1)：32－50.
XU Donglan, LI Yuqiang. Marine eco-environmental carrying capacity assessment based on state-space method[J]. Statistic and Decision Making, 2013, 20 (1): 56－60.

[43] 自然资源部第三海洋研究所. 重点海域污染物排海总量控制制度试点项目实施方案－三亚湾[R]. 2021.
Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, China. Implementation plan for the pilot project of the total amount control system for pollutant discharges into key sea areas-Sanya Bay[R]. 2021.

[44] OBERHOLSTER P J, MADLALA T, BLETTLER M, et al. An eutrophication index for lowland sandy rivers in Mediterranean coastal climatic regions of Southern Africa[J]. River Research and Applications, 2019, 36: 35－40.

[45] DU Weijian, WANG Faming, LI Mengjie. Effects of environmental regulation on capacity utilization: Evidence from energy enterprises in China[J]. Ecological Indicators, 2020, 11: 106－117.

[46] 马玉燕，张秋丰，陈燕珍，等. 海洋资源环境承载能力监测预警指标体系和技术方法示范性验证及修改建议:以天津市汉沽海域为例[J]. 海洋开发与管理，2018，11 (4)：52－57.
MA Yuyan, ZHANG Qiufeng, CHEN Yanzhen, et al. The exemplary verification and amendment suggestion of the index system and evaluation method of marine resources and environment carrying capacity monitoring and early-warning: a case study of Hangu Sea Area of Tianjin[J]. Ocean Development and Management, 2018, 11(4): 52－57.

[47] BRICKER S B, FERREIRA J G, SIMAS T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status[J]. Ecological Modelling, 2003, 169: 39－60.

[48] WONG Heung, HU Baoqing. Application of improved extension evaluation method to water quality evaluation [J]. Journal of Hydrology, 2014, 50: 539－548.