JOURNAL OF FISHERIES OF CHINA
DOI: 10.11964/jfc.20231114237
Science Press

刘明. 基于 PS-DR-DP 理论模型的山东省海洋资源环境承载力评价 [J]. 水产学报, 2026, 50(3): 039307.
Liu M. Evaluation of the carrying capacity of marine resources and environment in Shandong Province based on PS-DR-DP theoretical model [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(3): 039307 (in Chinese).

基于 PS-DR-DP 理论模型的山东省海洋资源环境承载力评价

刘　明*
(自然资源部，海洋发展战略研究所，北京　100860)

摘要：【目的】大规模、高强度的海洋资源开发活动对海洋资源环境和生态系统带来了不可逆转的影响。海洋资源环境承载力是评价海洋开发状况的重要工具。本研究通过构建压力-支撑力-恢复力 (PS-DR-DP) 模型，系统量化山东省海洋资源环境承载力的动态变化，为海洋资源可持续开放与管理提供决策依据。**【方法】**本研究基于海洋资源环境承载力定义以及承载力三要素理论，构建了海洋资源环境承载力评价框架体系，通过建立 PS-DR-DP 理论模型，将海洋资源环境承载力分解为“压力-支撑力”、“破坏力-恢复力”、“退化力-提升力”三对相互作用力，分别对应海洋资源支撑能力、海洋环境容量和抗海洋灾害能力，根据不同作用力大小变化测度海洋资源环境承载力状态的变化。基于上述理论模型研究了山东省 2012—2020 年海洋资源环境承载力的变化。**【结果】**2012—2020 年，山东省海洋资源环境承载力处于满载状态，海洋资源环境承载力状态值总体呈上升趋势。各作用力均处于满载状态。正作用力的贡献总体呈上升趋势。各负作用力基本稳定或略有增加。6 种作用力之间的耦合度总体呈上升趋势，耦合协调度总体呈上升趋势。**【结论】**通过海洋环境治理，能够增加海域恢复力和支撑力，从而促进海洋资源环境承载力增加。海洋科技水平提升能够提高海洋资源利用率，加强海洋污染治理与修复，从而促进支撑力和恢复力，因此对海洋资源环境承载力产生正向影响。本研究所做工作对于丰富承载力的理论和方法具有一定的理论意义，能够为山东省制定海洋强省发展战略和政策提供现实的支撑。

关键词：海洋资源环境承载力；压力-支撑力-恢复力理论模型；耦合协调度模型；山东省
中图分类号：S 931.2；X 24　　**文献标志码：**A

海洋资源环境承载力是衡量人类社会经济活动与区域海洋资源环境系统协调程度的重要标尺，为科学制定海洋政策发挥着重要作用。党的二十大报告提出：“深入推进环境污染防治”；“提升生态系统多样性、稳定性、持续性”。开展海洋资源环境承载力 (MRECC) 研究对于丰富区域海洋经济发展的理论具有重要意义和实践意义。MRECC 是指在一定时期内，特定海域内海洋资源和海洋环境容量承担人类经济活动和社会发展的能力或限度[1-2]。承载力来源于力学，在经济领域的应用

收稿日期：2023-11-19　　**修回日期：**2024-01-09
资助项目：国家海洋局海域管理技术重点实验室开放基金 2017 年度重点项目“典型海岸带资源环境承载力评估理论、技术方法及应用示范研究”(201702)
通信作者：刘明，从事海洋经济与科技、海岸带管理研究，E-mail：liuming@cimamnr.org.cn

则首次出现在马尔萨斯的“人口理论”[3]。1921 年，Park 等[4] 首次将承载力概念应用于生态学领域。20 世纪 80 年代末，承载力的研究范围从单一要素承载力[5-7] 扩大到综合承载力[8-9]。Arrow等[10] 拓展了资源环境承载力的理论，而且促进了定量方法从单一指标向多指标发展。

海洋资源环境承载力最初是单一要素的研究，如滩涂资源的承载力[9]、海洋旅游资源承载力[11]、海洋渔业资源承载力[12]。随着海洋资源、生态、环境等问题不断涌现，海洋资源环境承载力逐渐转向综合承载力研究。目前，有关海洋资源环境承载力的研究主要集中在概念阐述、运行机制、单要素承载力评价等方面[13-14]。然而，单要素承载力评价往往不能准确反映海洋资源环境对经济发展的承载能力，不能满足海洋管理的需求。虽然在“资源-环境-社会-经济”的复杂系统中，海洋资源环境系统与外部环境的相互作用关系已得到证实[15-16]，但对于承载体和承载对象的定量标准仍需要进一步研究。

目前，状态空间法[17]、供需分析法[18]、系统动力学方法[19] 和综合评价法[20-21] 是评估海洋资源环境承载力的主要方法，但这几种方法都有缺点，评价结果易受人为主观判断影响，所得结果难以反映实际情况。压力-支撑力-恢复力 (PS-DR-DP) 正六边形相互作用力理论模型能够减少评价过程中人为主观意志的影响，提高评价的准确性。

1　PS-DR-DP 理论模型方法

1.1　PS-DR-DP 理论模型

本研究在借鉴前人研究成果的基础上[22]，构建 PS-DR-DP 正六边形相互作用力理论模型，构建能够更好地反映指标之间相互动态关系的指标体系，遴选评价方法，划分海洋资源环境承载力等级标准与对应状态。PS-DR-DP 理论模型从环境容量与抗灾性、资源利用情况、资源环境退化与发展三个角度，将海洋资源环境承载力分解为三对相互关联、相互制约的合力，即压力和支撑力、破坏力和恢复力、退化力和提升力 (图 1)。压力和支撑力的合力反映了资源利用状况，破坏力和恢复力的合力反映了环境承载力和抗灾能力，退化力和提升力的合力反映了社会技术发展对资源开发的积极促进作用。通过采用 PS-DR-DP 模型的实证，能够模拟海洋资源环境承载力水平的动态演变过程。在此基础上，构建了海洋资源环境承载力状态监测预警模型，实现面向预警的海洋资源环境承载力评价。

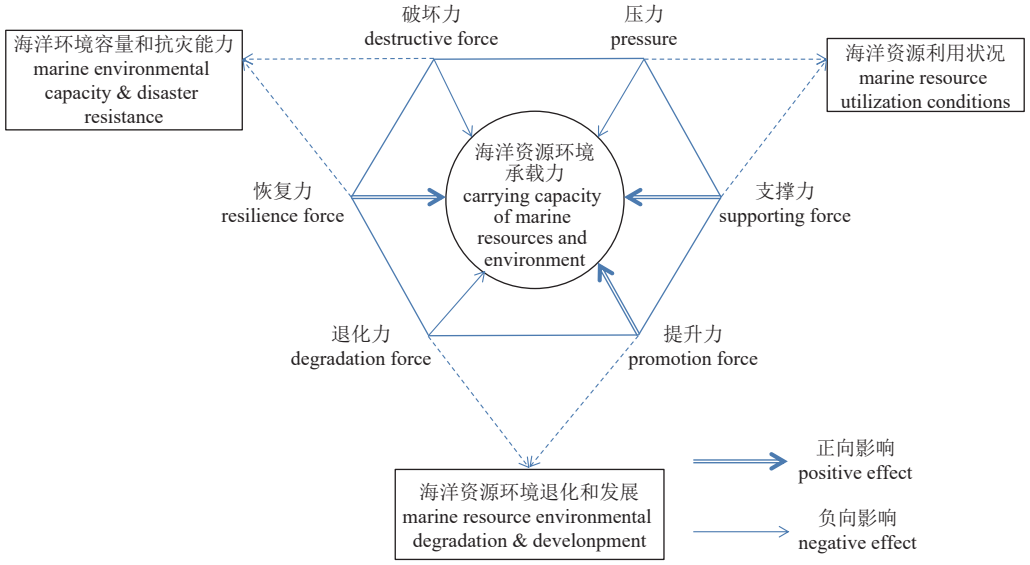

图 1　海洋 PS-DR-DP 理论模型

Fig. 1　Marine PS-DR-DP theoretical model

本研究所提出的资源环境承载正六边形相互作用力模型，将承载力分解为多个作用力之和，对通过不同的评价方法得到的结果信息进行归纳综合，以六边形模型的填充程度模拟资源环境承载力动态变化，形成“预警导向式”的资源环境承载评价机制。

在所构建的海洋 PS-DR-DP 模型中，压力 (P) 表示人们在社会经济活动中消耗的海洋资源总量。支撑力 (S) 表示在当前海洋科技条件下能够获得的潜在海洋资源。破坏力 (D) 表示人类社会经济活动对海洋环境造成的污染和破坏，以及大型海洋灾害对沿海地区造成的损害。恢复力 (R) 是指在环境治理、生态修复、灾害风险控制等方面对海洋环境的维护能力。退化力 (D) 表示海洋资源和海洋环境退化后的状态。提升力 (P) 是指人类利用海洋科技水平和以提高海洋资源利用率的方式延缓或修复海洋资源环境退化的能力。压力、破坏力与退化力三者表示海洋资源环境的负向影响，支撑力、恢复力与提升力三者表示海洋资源环境的正向影响。6 个作用力之间相互联系、相互制约、相互渗透。

1.2　研究方法

指标信度分析　为降低主观判断对指标选择的影响，对选取的指标体系进行信度分析。信度即可靠性，是运用指标体系为度量工具时所得结果的一致性程度。信度系数越高，指标体系的可靠性越高。本研究采用常用信度系数 Cronbach α 来评价指标体系的一致性，其计算公式[23]：

$$\alpha = \left(\frac{n}{n-1}\right)\left(1-\frac{\sum s^2}{s^2}\right) \tag{1}$$

$$\sum s^2 = \sum\left(k_i^m - k_m\right)^2 \tag{2}$$

式中，α 为信度系数，n 为指标体系中变量个数，$\sum s^2$ 为各变量组内方差和，s^2 为指标变量的总方差，k_i^m 为第 m 个指标体系中指标 i 的变量值，k_m 为第 m 个指标体系中变量的均值。根据 Cronbach α 系数对照表显示，$\alpha \geqslant 0.9$ 表明指标体系十分可信；$0.7 \leqslant \alpha < 0.9$ 表明指标体系的信度可以接受；$0.5 \leqslant \alpha < 0.7$ 表明指标体系中的有些变量需要修改；低于 0.5 表示指标体系中有些变量需要删除。

原始数据采用功效系数法[24] 进行无量纲化处理，采用 SPSS 软件进行信度分析。根据 Cronbach α 系数对照表，各指标的信度系数 Cronbach α 都大于 0.9，说明该指标体系能较好地评价海洋资源环境承载状态。

海洋资源环境承载力贡献值的计算　根据全排列多边形图示指标评价法[25]，设共有 N 个标准化指标，以原点 O 为中心，以标准化的上限值为半径形成多边形，各指标在原点与中心 N 边形顶点之间取值，各指标值连线可以组成不规则的 N 边形。根据分类排列乘法原理，N 个指标可形成 $(N–1)!/2$ 个不同的不规则 N 边形。定义各不规则 N 边形面积的均值与中心 N 边形面积之比为各分项承载力的贡献值，计算公式[22]：

$$C = \frac{\sum_{i<j}^{i,j}(k_i^m+1)(k_j^m+1)}{N(N-1)} \tag{3}$$

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{i} C_i^p}{\sum_{j=1}^{j} C_j^n} \tag{4}$$

式中，C 表示分项承载力贡献值；N 表示各分项指标数量；k_i^m, k_j^m 为第 m 个指标体系中第 i、j 项指标值；S 表示承载状态；C_i^p 表示第 i 个正向贡献值；C_j^n 表示第 j 个负向贡献值。定义 C 的正向承载力贡献值之和与负向贡献值之和的比值为承载状态。比值大于 1，表明区域海洋资源环境承载状态良好，且比值越大，区域海洋资源环境承载状态越好。反之，则表明区域海洋资源环境承载力状态出现超载，应该予以预警。

海洋资源环境承载力等级标准划分　为了更好地分析海洋资源环境承载力随时间变化的规律，以及在不同承载状态下各指标的变化及相关性，参考《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南 (试行)》[26]、《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》[27] 等相关技术规范，将海洋资源环境承载力划分为 4 个等级：①当 0<C≤0.30 时，海洋资源环境承载力处于低位平衡，近似稳定。②当 0.30<C≤0.70 时，海洋资源环境承载力表现为高速增长，不稳定。③ 0.70<C≤0.85 时，海洋资源环境承载力处于理想状态，近似稳定。④当 C>0.85 时，海洋资源环境承载力处于满载状态，趋于不稳定。

海洋资源环境承载力系统耦合关系模型

①耦合度模型。耦合度是描述系统间相互作用和相互影响的指标。海洋资源环境承载力是人-海系统中“海域”与“人类活动”之间耦合关系的表现。在 PS-DR-DP 理论模型中，海洋资源环境承载力分为压力、支撑力、破坏力、恢复力、退化力、提升力，6 个作用力相互作用、相互影响，可视

为海洋资源环境承载力系统的 6 个子系统，其之间耦合度模型的计算公式：

$$Y=\left\{\left[1-\frac{\sum_{i>j,j=1}^{n}\sqrt{(v_i-v_j)^2}}{\sum_{m=1}^{n-1}m}\right]\times\left(\prod_{i=1}^{n}\frac{v_i}{\max v_i}\right)^{\frac{1}{n-1}}\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

式中，Y 表示耦合度，Y[0,1]；U_i和U_j分别为第 i 个子系统和第 j 个子系统的值，U_i和$U_j\in[0,1]$；n 表示子系统的个数；m 表示成对耦合系统的个数；各子系统越离散，Y 值越低。反之，C 值越高。

②耦合协调度模型。单纯计算耦合协调度并不能描述两个系统的和谐发展水平。因此，引入耦合和谐度模型来反映系统间的整体发展情况，其公式为[28]：

$$T=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\times U_i,\quad \sum_{i=1}^{n}\alpha=1 \tag{6}$$

$$D=\sqrt{C\times T} \tag{7}$$

式中，T 为综合协调指数，α_i表示第 i 个子系统的待定系数，n 为子系统的数量，D 为耦合协调度。本研究中参考已有文献[29]，设定压力、支撑力、退化力、提升力、破坏力和恢复力同等重要，因此α_i=1/6。

为了更好地判断子系统的耦合度类型和耦合协调状态，参考以往的研究成果对海洋资源环境承载状况进行分级 (表 1)[17]。

表 1　耦合度和耦合协调度的划分标准

Tab. 1　Classification of the coupling degree and coupling coordination degree

耦合度 the coupling	耦合阶段 the development of type	耦合协调度 coupling coordination	耦合协调等级 state the type
Y=0	最小耦合度	0≤D<0.10	极度失调
0<Y≤ 0.30	低水平耦合	0.10≤D<0.20	严重失调
0.30<Y≤ 0.50	拮抗阶段	0.20≤D<0.30	中度失调
0.50<Y≤ 0.80	磨合阶段	0.30≤D<0.40	轻度失调
0.80<Y<1	高水平耦合	0.40≤D<0.50	濒临失调
Y=1	最大耦合度	0.50≤D<0.60	勉强协调
		0.60≤D<0.70	基本协调
		0.70≤D<0.80	中度协调
		0.80≤D<0.90	良好协调
		0.90≤D≤ 1	高度协调

2　山东省海洋资源环境承载力综合评价指标体系构建

评价指标体系的构建是海洋资源环境承载力评价的核心，其对评价结果的可靠性有着至关重要的影响。因此，本研究以 2020 年 1 月自然资源部发布的《资源环境承载力和国土空间开发适宜性评级技术指南 (试行)》以及 2017 年 9 月中共中央办公厅国务院办公厅印发的《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》为基础，结合山东省的社会、经济和海洋资源环境状况，遵循科学性、全面性、代表性、动态性、开放性和可操作性的基本原则，以 PS-DR-DP 理论模型为基础，构建了由 3 个准则层指标、6 个一级指标、14 个二级指标和 36 个具体指标组成的山东省海洋资源环境承载力评价指标体系 (表 2)。

表 2　海洋资源环境承载力评价指标体系

Tab. 2　Evaluation index system of the marine resources and environmental carrying capacity

准则层 criteria layer	一级指标 level-1index	二级指标 level-2 index	具体指标 specific index	单位 unit	指标序号[1)] indicator number
资源利用状况 resource utilization status	压力	人口	总人口数	万人	K^1_1
			人口自然增长率	‰	K^1_2
			人口密度	人/km^2	K^1_3

·续表 2·

准则层 criteria layer	一级指标 level-1index	二级指标 level-2 index	具体指标 specific index	单位 unit	指标序号[1)] indicator number
		海洋渔业资源	海洋捕捞产量	万t	K^1_4
			总海产品产量	万t	K^1_5
		海洋矿产资源	海洋原油产量	万t	K^1_6
			海洋天然气产量	万m^3	K^1_7
			海洋矿业产量	万t	K^1_8
		海洋养殖区	海洋养殖面积	km^2	K^1_9
	支撑力	海洋资源支撑	人均海域面积	km^2/人	K^1_{10}
			人均海岸线长度	m/人	K^1_{11}
			年末海盐生产能力	万t	K^1_{12}
		社会经济支撑	城镇居民恩格尔系数	%	K^1_{13}
			海洋生产总值	亿元	K^1_{14}
			海洋生产总值占地区生产总值的比例	%	K^1_{15}
			海洋生产总值增长率	%	K^1_{16}
			海洋第三产业占海洋生产总值的比例	%	K^1_{17}
环境容量和抗灾能力 environmental capacity and disaster resistance	破坏力	海洋环境损害	海洋工业废水排放	万t	K^2_1
			海洋工业固体废物量	t	K^2_2
		重大海洋灾害	风暴潮或海浪造成直接损失	亿元	K^2_3
			赤潮数量	频次	K^2_4
	恢复力	海洋污染控制能力	海洋工业废水处理量	万t	K^2_5
			海洋工业固体废物处理量	万t	K^2_6
		海洋防灾减灾能力	气象台站数量	个	K^2_7
			海洋站数量	个	K^2_8
资源环境退化与发展 resource and environmental degradation and development	退化力	水质退化	第一、二类海水面积占比	%	K^3_1
			赤潮发生面积	km^2	K^3_2
		生物丰度降低	浮游植物多样性指数[3)]	-[2)]	K^3_3
			大型浮游动物多样性指数[3)]	-[2)]	K^3_4
			底栖生物多样性指数[3)]	-[2)]	K^3_5
	提升力	海洋环境管理项目	海洋保护区数量	个	K^3_6
			海洋保护区面积	km^2	K^3_7
		海洋科技创新能力	海洋科研机构科技课题数	个	K^3_8
			专利授权数	件	K^3_9
			海洋科研机构数	个	K^3_{10}
			海洋科技活动人员	人	K^3_{11}

注：1)第6栏“指标序号”表示海洋资源环境承载力评价指标体系中原始数据的标准化数值。K^1_1~K^1_{17}表示“资源利用状况”的17个指标原始数据的标准化数值；K^2_1~K^2_8表示“环境容量和抗灾能力”的8个指标原始数据的标准化数值；K^3_1~K^3_{11}表示“资源环境退化与发展”的11个指标原始数据的标准化数值。2) “-”表示无量纲。3)浮游植物多样性指数主要研究浮游植物的种类、数量分布等各种生物指标，大型浮游动物多样性指数主要研究大型浮游动物的种类、数量分布等各种生物指标，底栖生物多样性指数主要研究底栖生物的种类、数量分布等各种生物指标。这3个指数计算的主要方法是生物统计中的多样性指数方法。联合国教科文组织的浮游植物群落结构分析《浮游植物手册》[30]明确推荐使用Shannon指数(以 e 或以 2 为底)、Margalef指数、Pielou均匀度指数表示。

Notes:1) the first column “Indicators” represents the standardized values of the original data in the evaluation index system for marine resource and environmental carrying capacity. K^1_1-K^1_{17} represent the standardized values of the original data for 17 indicators of "resource utilization status"; K^2_1-K^2_8 represent the standardized values of the original data for the 8 indicators of "environmental capacity and disaster resistance"; K^3_1-K^3_{11} represent the standardized values of the original data for 11 indicators of "resource and environmental degradation and development". 2) “-” indicates dimensionless. 3) the diversity index of phytoplankton mainly studies various biological indicators such as the species and quantity distribution of phytoplankton. The diversity index of large planktonic animals mainly studies various biological indicators such as the species and quantity distribution of large planktonic organisms. The diversity index of benthic organisms mainly studies various biological indicators such as the species and quantity distribution of benthic organisms. The main method for calculating these three indices is the diversity index method in biostatistics. The "Handbook of Phytoplankton"[30] by UNESCO recommends the use of Shannon index (based on e or 2), Margalef index, and Pielou evenness index to represent the structure of phytoplankton communities.

3　山东省海洋资源环境承载力综合评价结果

3.1　研究区域

山东省位于中国东部沿海。全省陆域面积15.58 万 km^2，海洋面积 15.96 万 km^2。山东省海域面积广阔，海岸线 3 345 km，约占全国海岸线总数的 1/6 以上，拥有天然港湾 200 余处，岛屿近 600 个，毗邻海域面积约 15.96 万 km^2。山东省作为贯彻落实“海洋强国”战略的重要省份之一，承担着推动海洋经济高质量发展的重要职责。当前，山东省正大力推动海洋经济实现绿色发展，重点加强海洋生态文明建设，努力推动海洋资源由粗放型生产方式向集约型生产方式转变。2022 年，山东省海洋总产值达到 1.57 万亿元，占全国海洋生产总值的 16.59%，占全省地区生产总值的 17.96%。同时应看到，随着海洋经济的发展，如何进一步提升山东省海洋资源利用率，进一步改善海洋生态环境，挖掘山东省潜在的海洋资源环境承载力迫在眉睫。因此，对于当前山东省海洋资源环境承载力的现状评价具有重要意义。

3.2　数据来源

根据表 2 的评价指标体系收集数据。其中，经济社会数据来源于 2013—2021 年《中国海洋经济统计年鉴》[31]、《山东省统计年鉴》[32] 和《山东省国民经济和社会发展统计公报》[33]。能源消费数据来源于 2013—2021 年的《中国能源统计年鉴》[34]。海洋环境数据来源于 2013—2021 年《中国海洋年鉴》[35]、《中国海洋经济统计年鉴》[31]、《中国环境统计年鉴》[36]、《山东省生态环境状况公报》[37] 和《山东省海洋生态状况报告》[38]。

3.3　指标可信度分析

利用功效系数法对山东省 2012—2020 年海洋资源环境承载力各分作用力指标体系的原始数据进行标准化处理，结果如表 3 所示。应用式 (1) 和 (2)，利用 SPSS 软件对标准化后的数据做可信度分析，结果表明各项指标可信度系数均高于 0.9(表 4)，表明所选指标体系的可信度较高，能够较为客观地评价山东省海洋资源环境承载力状况。

3.4　承载力状况分析

对根据表 2 指标体系收集的 2012—2020 年山东省海洋资源环境承载力指标数据进行归一化处理后，根据式 (3) 和式 (4)，可得 2012—2020 年山东省海洋资源环境承载力的评价值和状态值(表 5)。根据承载力计算结果绘制折线图，相关结果见图 2~图 5。

承载力整体变动情况　承载力的各作用力均值大于 0.85(图 2)，说明山东省海洋资源环境承载力处于满载状态，趋于不稳定状态。山东省海洋资源环境承载力状态值总体呈上升趋势。

山东省承载力状态值的变化呈现出一定的阶段性 (图 2)。2012—2017 年，海洋资源环境承载力持续增长，呈现出良好的发展态势。这与退化力下降、承载能力增大密切相关。与此同时，山东省风暴潮或海浪灾害直接损失从 2012 年的 31.59 亿元降至 2017 年的 0.06 亿元，沿海气象观测站、海洋站、海洋保护区数量、海洋保护区面积分别从 2012 年的 6 个、18 个、18 个、5 537 km^{2}增加到 2017 年的 52 个、26 个、60 个、6 423 km^2。海洋科技课题和专利授权数分别由 2012 年的 1 550 个和 280 个增加到 2017 年的 1 925 个和 372 个。政府治理的完善和海洋科技的发展促进了山东省海洋资源环境承载力水平的不断增强和提高。

2017—2019 年，山东省海洋资源环境承载力呈持续下降趋势。海洋生产总值有所下降，从 2017 年的 14 776 亿元下降为 2019 年的 13 444.9 亿元。海洋经济的增长率下降，海洋生产总值增长率由 2017 年的 11.26% 下降到 2019 年的−13.27%。风暴潮或海浪灾害直接损失大幅增加，损失由 2017 年的 0.06 亿元增加到 2019 年的 21.63 亿元。海洋保护区数量和海洋保护区面积都大幅下降，分别由 2017 年的 60 个和 6 423 km^2 下降为 2019 年的 40 个和 4 604 km^2。总体来看，海洋环境治理水平下降。因此，恢复力和提升力都有不同程度的下降。

2019—2020 年，山东省海洋经济下降，海洋生产总值增长率为−3.97%。同时，山东省的海洋经济发展对海洋资源的依赖程度在增加。海洋原油产量从 2019 年的 350 万 t 增加到 2020 年的 460.6 万 t，海洋天然气产量从 2019 年的 11 660.84 万 m^3 增加到 2020 年的 11 905.72 万 m^3，压力不断增大。与此同时，国家和地方政府更加重视海洋的战略地位，出台了一系列与海洋资源环境相关的政策。如组建山东省委海洋发展委员会、印发

表 3　2012—2020 年山东省海洋资源环境承载力评价指标体系原始数据标准化数值

Tab. 3　Evaluation index standardization values of resources and environmental carrying capacity of Shandong Province from 2012 to 2020

指标 index	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
K^1_1	1.000	0.917	0.823	0.696	0.477	0.348	0.193	0.129	0.000
K^1_2	0.611	0.611	0.358	0.516	0.000	0.074	0.495	0.684	1.000
K^1_3	1.000	0.897	0.778	0.654	0.440	0.441	0.226	0.227	0.000
K^1_4	1.000	0.932	0.907	0.886	0.900	0.133	0.067	0.031	0.000
K^1_5	0.000	0.123	0.552	0.814	1.000	0.469	0.459	0.185	0.294
K^1_6	0.000	0.088	0.136	0.184	0.202	0.249	0.287	0.404	1.000
K^1_7	0.834	1.000	0.995	0.475	0.000	0.241	0.366	0.468	0.572
K^1_8	0.000	0.614	1.000	0.633	0.391	0.076	0.076	0.076	0.076
K^1_9	0.000	0.267	0.286	0.456	0.936	1.000	0.544	0.436	0.654
K^1_{10}	1.000	0.893	0.770	0.643	0.429	0.429	0.218	0.218	0.000
K^1_{11}	1.000	0.893	0.770	0.643	0.429	0.429	0.218	0.218	0.000
K^1_{12}	0.549	0.399	0.759	0.786	1.000	0.034	0.000	0.039	0.045
K^1_{13}	0.000	0.184	0.263	0.553	0.605	0.816	0.947	1.000	0.816
K^1_{14}	0.000	0.039	0.156	0.452	0.632	0.880	1.000	0.660	0.571
K^1_{15}	0.074	0.000	0.482	0.741	0.667	1.000	0.963	0.444	0.000
K^1_{16}	1.000	0.507	0.660	0.981	0.714	0.789	0.585	0.000	0.299
K^1_{17}	0.000	0.069	0.257	0.347	0.472	0.563	0.597	0.972	1.000
K^2_1	0.437	0.820	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K^2_2	1.000	0.000	1.154	1.154	1.154	1.154	1.154	1.154	1.154
K^2_3	1.000	0.045	0.044	0.012	0.055	0.001	0.019	0.685	0.000
K^2_4	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.250
K^2_5	0.242	0.242	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K^2_6	1.000	0.429	0.000	0.324	0.324	0.324	0.324	0.324	0.324
K^2_7	0.000	0.825	0.825	0.807	0.807	0.807	0.807	0.877	1.000
K^2_8	0.167	0.000	0.000	0.333	0.333	0.833	0.833	0.833	1.000
K^3_1	0.659	0.457	0.864	0.868	0.822	0.000	0.209	1.000	0.775
K^3_2	1.000	1.000	0.000	1.000	0.292	1.000	1.000	1.000	0.916
K^3_3	0.846	0.352	0.842	0.782	0.782	0.479	0.442	0.000	1.000
K^3_4	0.283	0.460	0.211	0.148	0.253	0.000	0.321	1.000	0.937
K^3_5	0.304	0.058	0.417	0.000	0.417	0.083	0.608	1.000	0.975
K^3_6	0.000	0.000	0.310	0.310	1.000	1.000	0.333	0.524	0.524
K^3_7	0.724	0.726	0.792	0.792	1.000	1.000	0.000	0.434	0.434
K^3_8	0.021	0.114	0.080	0.083	0.000	0.286	0.828	0.828	1.000
K^3_9	0.000	0.232	0.405	0.580	0.232	0.237	0.843	1.000	0.843
K^3_{10}	0.167	0.167	0.167	0.250	0.083	0.000	0.667	0.667	1.000
K^3_{11}	0.075	0.066	0.126	0.104	0.000	0.004	0.697	0.696	1.000

《山东海洋强省建设行动方案》以及实施渤海治理攻坚战等。基于上述政策背景，山东省对海洋经济的扶持力度不断增大，海洋环境治理水平不断提高，海洋科技发展水平快速提高。这些因素最终使得山东省海洋资源环境承载力的支撑力、恢复力和承载能力提升。这些部分地抵消了压力

表 4　指标可信度分析结果

Tab. 4　Reliability index analysis results

项目 items		克伦巴赫α系数 Cronbach's α	样本数量/项 sample quantity	排除项 exclusion items
压力与支撑力评价指标体系	evaluation index system for pressure and support force	0.945	17	0
破坏力与恢复力评价指标体系	evaluation index system for destructive force and resilience	0.917	8	0
退化力与提升力评价指标体系	evaluation index system for degradation and enhancement capabilities	0.908	11	0

表 5　山东省海洋资源环境承载力状况

Tab. 5　The carrying status of the marine resources and environment in Shandong Province

年份 year	压力 pressure	支撑力 supporting force	破坏力 destructive power	恢复力 resilience	退化力 degenerative force	提升力 lift	承载力状态值 bearing capacity state value	各作用力均值 mean values of various forces
2012	1.103	1.041	1.719	0.890	1.299	0.671	0.631	1.120
2013	1.281	0.934	1.041	0.929	1.062	0.735	0.768	0.997
2014	1.352	1.143	1.153	1.025	1.061	0.856	0.848	1.098
2015	1.262	1.348	1.140	0.919	1.196	0.909	0.883	1.129
2016	1.091	1.307	1.158	0.919	1.137	0.941	0.935	1.092
2017	0.889	1.302	1.135	1.092	0.843	0.992	1.181	1.042
2018	0.845	1.217	1.143	1.092	1.140	1.210	1.125	1.108
2019	0.834	1.033	1.429	1.116	1.600	1.427	0.926	1.240
2020	0.970	0.889	0.875	1.218	1.843	1.615	1.009	1.235

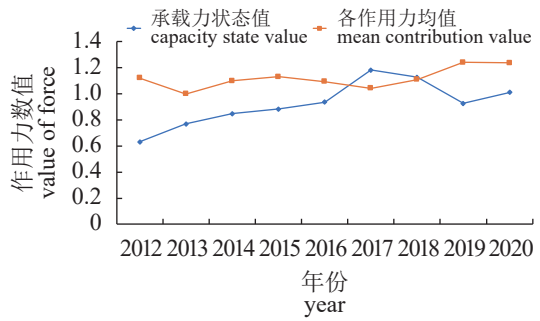

图 2　山东省海洋资源环境承载力各作用力均值和承载力状态变化

Fig. 2　Mean value of each force and the state of carrying capacity of marine resources and environmental in Shandong Province

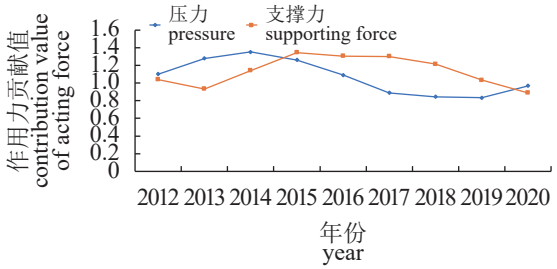

图 3　山东省海洋资源环境承载力中压力和支撑力变化

Fig. 3　Changes of pressure and support capacity in marine resources and environmental carrying capacity of Shandong Province

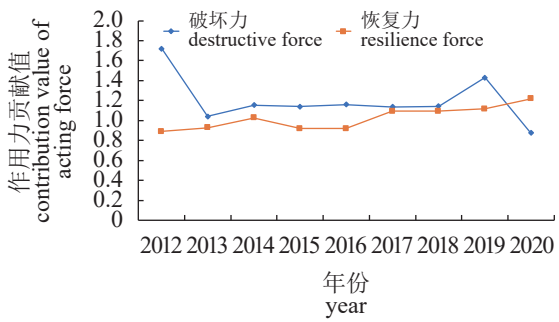

图 4　山东省海洋资源环境承载力中破坏力和恢复力变化

Fig. 4　Changes of destructive force and resilience force in marine resources and environmental carrying capacity in Shandong Province

和破坏力对山东省海洋资源环境承载力的负面影响。因此，这一时期山东省海洋资源环境承载力基本稳定。

承载力各个分项的变动情况　正向作用力对山东省经济的贡献在研究期间内总体呈上升趋势。在研究期间，负向作用力波动较大，但总体稳定或略有增加，具体表现为压力先上升后持续下降，表明人类活动对海洋资源的消耗由上升趋势变为下降趋势 (图 3)。支撑力先上升后下降，其中的人均海域面积、人均海岸线长度、年末海盐生产能力的减少等因素削弱了支撑力的带动作用

(图 3)。这为山东省海洋资源开发效率敲响警钟。压力和支撑力的变化趋势反映出山东省海洋资源利用总体向好。

破坏力在研究期间波动较大，这与海洋工业废水排放量、风暴潮或海浪灾害造成直接损失的变化密切相关。海洋工业废水排放的减少、风暴潮或海浪灾害直接损失的减少间接证明了人们对海洋环境污染和灾害的控制力度和适应性有所加强，但仍有很大的改进空间 (图 4)。恢复力逐年增加，与海洋工业废水处理量、海洋工业固体废物处理量密切相关。与此同时，人们通过不断增加监测和预警，加强了对海洋灾害的抵抗力，从而加剧了恢复力的上升趋势 (图 4)。破坏力的波动和恢复力的大幅增长说明人们对治理海洋环境污染和防灾减灾的能力普遍增强。

退化力总体上减小，表明海洋资源和海洋生态环境退化在不断减小。这是由于海水水质的改善和生物多样性的增加 (图 5)。在研究期间，山东省一类和二类海水面积比例总体小幅增加。随着海水水质的不断改善，海洋生态系统中浮游植物、浮游动物和底栖动物的丰度不断增加，从而逐渐减缓了海域退化的速率。提升力呈上升趋势 (图 5)。在研究期间，随着我国政府加大对海洋的重视程度以及对海洋研究投入的不断增加，山东省海洋科研机构科技课题数从 2012 年的 1 550 个增加到 2020 年的 2 937 个，专利授权数从 2012 年的 280 个增加到 2020 年的 607 个，海洋科研机构数从

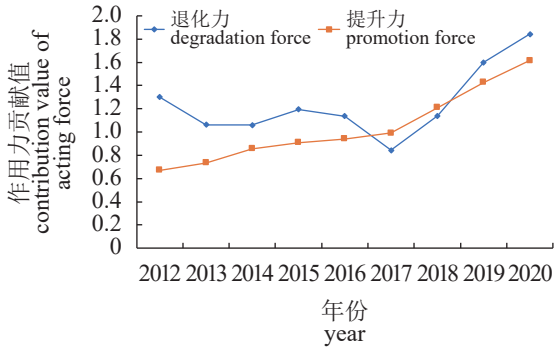

图 5　山东省海洋资源环境承载力中破坏力和恢复力变化

Fig. 5　Changes of destructive force and resilience force in marine resources and environmental carrying capacity of Shandong Province

2012 年的 21 个增加到 2020 年的 31 个，海洋科技活动人员从 2012 年的 3 203 人增加到 2020 年的 5 619 人。海洋科技的不断发展，促进了海洋资源保护和海洋生态修复能力的提高，从而增强了提升力。退化力的减小和提升力的增大，反映出山东省在海洋资源环境治理和海洋生态保护方面控制得当。

3.5　耦合协调度分析

根据 2012—2020 年山东省海洋资源环境承载力中 6 种作用力的贡献值 (C)，按照公式 (5)~(7) 可计算出 6 种作用力的耦合度和耦合协调度 (表 6)。2012—2020 年，山东省海洋资源环境承载力的耦合度总体呈上升趋势，耦合程度为 0.7~0.8。这充分说明了山东省在海洋资源环境保护与开发方面取得了重要成果。

表 6　2012—2020 年山东省海洋资源环境承载力系统耦合度与耦合协调度分类

Tab. 6　Classification of the coupling degree and coordination degree of the marine resources and environmental carrying capacity systems in Shandong Province from 2012 to 2020

年份 year	耦合度 the coupling	耦合阶段 the development of type	耦合协调度 coupling coordination	耦合协调等级 state the type
2012	0.703 728	磨合阶段	0.887 936 835	良好协调
2013	0.750 514	磨合阶段	0.865 108 614	良好协调
2014	0.802 459	高水平耦合	0.938 869 654	高度协调
2015	0.810 145	高水平耦合	0.956 318 432	高度协调
2016	0.805 735	高水平耦合	0.938 165 976	高度协调
2017	0.775 161	磨合阶段	0.898 724 222	良好协调
2018	0.814 516	高水平耦合	0.949 811 046	高度协调
2019	0.801 221	高水平耦合	0.996 612 366	高度协调
2020	0.707 971	磨合阶段	0.935 092 502	高度协调

山东省海洋资源环境承载力的耦合协调度数

值在 2012—2020 年总体呈上升趋势 (表 6)。耦合协调度的变化趋势与耦合度的变化趋势基本一致，但耦合协调度的变化幅度大于耦合度的变化幅度。这表明海洋资源环境承载力系统中的 6 种作用力之间的相互作用逐渐增强，系统的内部协调性也在不断提高。

4　讨论

4.1　PS-DR-DP 模型评价海洋资源环境承载力具有理论优越性

不同的海域具有自身独特的自然环境。因此，科学评估海洋资源环境承载力是一个挑战。以往研究用综合评价法评估海洋资源环境承载力时，大多采用熵值法[39]、层次分析法[40] 和主成分分析法[41] 确定指标体系的权重。但是，由于人的主观性，最终往往导致计算结果会出现误差。

对于海洋资源环境承载力的评估，尽管以往研究提供了不同的方法，但其科学性、合理性以及对不同海域可移植性仍有待探索和提高。压力-状态-响应 (PSR) 模型和驱动力-压力-状态-影响-响应 (DPSIR) 模型为评价指标体系的构建提供了方法，但是这两个模型都属于线性模型。PSR 模型能明确反映系统中的因果关系，但其指数选取依赖研究人员的主观判断和经验水平，难以把握系统的结构和决策过程，对于研究复杂系统效果不佳。DPSIR 模型从人地系统综合性角度出发，能够对问题进行全面分析，是 PSR 模型的延续与完善。但专注于“增长极限”问题研究，仅表达了传统的“响应式”环境保护观念。

因此，本研究采用了 PS-DR-DP(压力-支撑力；破坏力-恢复力；退化力-提升力) 理论模型，并形成了一套完整的评价方法，为进一步完善海洋资源环境承载力评价方法提供了新的见解。在实证方面，本研究利用构建的 PS-DR-DP 理论模型对山东省海洋资源环境承载状况进行了评价。此外，对于 PS-DR-DP 理论模型的应用扩展到不同的尺度，如地级市和县级市，从而更好地揭示不同空间尺度下区域生态承载力的时空异质性。

4.2　山东省海洋资源环境承载力处于满载状态并呈逐年上升趋势

本研究借助 PS-DR-DP 理论模型，对山东省海洋资源环境承载状况进行了评估研究，在 2012—2020 年，山东省海洋资源环境承载力处于满载状态，海洋资源环境承载力状态值总体呈上升趋势。各作用力的平均贡献值为 0.99~1.24，处于满载状态。正作用力的贡献总体呈上升趋势。各负作用力的贡献波动较大，但基本稳定或略有增加，这说明山东省对海洋资源利用、海洋环境治理和海洋生态保护的控制较为适度。2012—2020 年，山东省海洋资源环境承载力的 6 种作用力之间的耦合度总体呈上升趋势，研究期内耦合度均在 0.7~0.8。这充分说明了山东省在海洋资源环境保护与开发方面取得了重要成果。耦合协调度总体呈上升趋势，说明海洋资源环境承载力系统中的 6 种作用力之间相互作用逐渐增强，系统的内部协调性也在不断提高。

4.3　山东省海洋资源环境承载力的耦合度总体呈上升趋势

研究期间，山东省海洋资源环境承载力的耦合度总体呈上升趋势，表明海洋资源环境承载力系统中的 6 种作用力之间的相互作用逐渐增强，系统的内部协调性也在不断提高。这充分说明了研究期内山东省在海洋资源环境保护与开发方面取得了重要成果。

4.4　政策启示

海洋资源环境承载力评价不仅是定量评价指标，也可以判断人-海关系是否处于良好状态。人类社会经济活动对海洋资源环境造成的压力，从而导致海洋资源供给状态的变化。

一方面压力抑制了海洋资源环境承载力的增加。因此，在保证资源开发的基础上，还需要进一步加强海洋环境保护和修复，如制定不同行业、不同区域的污染物排放标准，严格控制陆源污染物的排放，减少沿海工业废水和生活污水对海洋环境的污染。同时，通过海洋保护区的建设和海洋功能区的合理划分，加快海洋生态建设，提高海洋环境的恢复能力。

另一方面，海洋资源减少会加剧海洋生态系统破坏和环境的退化，从而增加破坏力和退化力。人类社会经济活动可能会对海洋生态环境造成较强的破坏力，从而对海洋资源环境承载力产生负面影响。在压力和破坏力的共同作用下，海洋资源环境发生了一定程度的退化，从而产生退化力。退化力增大往往会降低海洋资源环境承载力。海

洋资源环境的破坏和退化会对人类经济活动和生命健康造成损害，因此人们通过直接的海洋环境污染治理，增加了海域的恢复力，促进了海洋资源环境承载力的增加。增加恢复力有利于恢复潜在资源，从而促进支撑力的增加。随着社会经济的不断发展，人们还可以通过提高海洋科技水平提高海洋资源利用率，降低潜在的海洋资源消耗，促进支撑力的发展。利用更先进的海洋科技，通过市场机制和政策引导，建立政产学研金企相结合的海洋科技创新战略联盟，破解海洋重大科技难题，及时推动海洋科技成果转化，加快海洋生态修复，加强海洋污染治理与修复，增强抗风险能力，减缓海洋资源环境退化。这不仅增加了海洋资源环境的提升力，也间接增加了海洋资源环境的恢复力。在支撑力和恢复力的共同作用下，海洋资源利用率提高的同时，消耗有所下降，从而会对海洋资源环境承载力产生正向影响，促进海洋资源环境改善。

（作者声明本文无利益冲突）

参考文献 (References)：

[1] Stojanovic T A, Farmer C J Q. The development of world oceans & coasts and concepts of sustainability[J]. Marine Policy, 2013, 42: 157-165.

[2] Han Y, Wei F Y, Ye G Q, *et al*. A study on evaluation the marine carrying capacity in Guangxi , China[J]. Marine Policy, 2018, 91: 66-74.

[3] Malthus R T. An essay on the principle of population: the 1803 edition[M]. New Haven: Yale University Press, 2018.

[4] Park R, Assimilation B E. Introduction to the science of sociology[J]. American Journal of Sociology, 1912.

[5] Hadwen S, Palmer L J. Reindeer in Alaska[R]. Washington: United States Department of Agriculture, 1922: 33-52.

[6] Cohen J E. Population growth and earth's human carrying capacity[J]. Science, 1995, 269(5222): 341-346.

[7] Young C C. Defining the range: the development of carrying capacity in management practice[J]. Journal of the History of Biology, 1998, 31(1): 61-83.

[8] Liu R J, Pu L J, Zhu M, *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 & Coastal Management, 2020, 186: 105092.

[9] Shi S N, Hu B Q, Yan Y, *et al*. Dynamic evolution of the ecological carrying capacity of poverty-stricken karst counties based on ecological footprints: a case study in Northwestern Guangxi, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(3): 991.

[10] Arrow K, Bolin B, Costanza R, *et al*. Economic growth, carrying capacity, and the environment[J]. Ecological Economics, 1995, 15(2): 91-95.

[11] Coccossis H, Mexa A. The challenge of tourism carrying capacity assessment: theory and practice[M]. London: Routledge, 2017.

[12] Agmour N, Bentounsi M, Achtaich N, *et al*. Carrying capacity influence on the incomes of seiners exploiting marine species in the Atlantic coast of Morocco[J]. Mathematical Biosciences, 2018, 305: 10-17.

[13] Ariani F, Rahimah I, Sipahutar R, *et al*. Suitability and carrying capacity analyses for marine ecotourism development of the Medang Deras Subdistrict, Batubara district, province of North Sumatera[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 584: 012010.

[14] Bui L T, Tran D L T. Assessing marine environmental carrying capacity in semi-enclosed coastal areas-models and related databases[J]. Science of the Total Environment, 2022, 838: 156043.

[15] Yang S W, Ren L L, Gou L F. An empirical study on the environmental carrying capacity of marine resources based on the entropy-weight TOPSIS model[J]. Journal of Coastal Research, 2022, 38(5): 1037-1049.

[16] 张静,宁凌,曹阳春. 基于熵权 TOPSIS 模型的海洋资源环境承载力评价研究——以广东省为例 [J]. 生态经济, 2020, 36(3): 162-167.
Zhang J, Ning L, Cao Y C . Evaluation of environmental bearing capacity of marine resources based on Entropy Weight TOPSIS Model: taking Guangdong Province as an example[J]. Ecological Economy , 2020, 36(3): 162-167 (in Chinese).

[17] Wu K K, Chen K L, Gao Y, *et al*. Applying a set of potential methods for the integrated assessment of the marine eco-environmental carrying capacity in coastal areas[J]. Sustainability, 2022, 14(8): 4416.

[18] 狄乾斌, 韩雨汐, 高群. 基于改进的 AD-AS 模型的中国海洋生态综合承载力评估 [J]. 资源与产业, 2015, 17(1): 74-78.
Di Q B, Han Y X, Gao Q. Comprehensive loading capacity of China's oceanic ecology based on improved AD-AS model[J]. Resources & Industries, 2015, 17(1): 74-78 (in Chinese).

[19] Ying H, Chen S Y, Mao Y Q. Research on marine ecological carrying capacity of Ningbo City in China based on system dynamics[J]. Sustainability, 2022, 14(8): 4568.

[20] 宋泽明, 宁凌. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的我国沿海省份海洋资源环境承载力评价及障碍因素研究 [J]. 生态经济, 2020, 36(8): 154-160,212.
Song Z M, Ning L. Evaluation and obstacle factors of marine resources and environment carrying capacity of coastal provinces and cities in China based on DPSIR-TOPSIS model[J]. Ecological Economy, 2020, 36(8): 154-160,212 (in Chinese).

[21] 王志芳, 李婷, 高伟明. 河北省沿海地区海洋资源环境承载力与经济发展水平耦合分析 [J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(6): 58-65.
Wang Z F, Li T, Gao W M. Coupling analysis of marine resources and environment carrying capacity and economic development level in coastal area of Hebei Province[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(6): 58-65 (in Chinese).

[22] 王亮, 刘慧. 基于 PS-DR-DP 理论模型的区域资源环境承载力综合评价 [J]. 地理学报, 2019, 74(2): 340-352.
Wang L, Liu H. The comprehensive evaluation of regional resources and environmental carrying capacity based on PS-DR-DP theoretical model[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(2): 340-352 (in Chinese).

[23] Mangi S C, Roberts C M, Rodwell L D. Reef fisheries management in Kenya: preliminary approach using the driver–pressure–state–impacts–response (DPSIR) scheme of indicators[J]. Ocean & Coastal Management, 2007, 50(5-6): 463-480.

[24] 王印红, 魏兰. 基于功效系数法的海洋生态环境评价研究——以胶州湾海洋生态环境为例 [J]. 中国海洋大学学报: 社会科学版, 2020(6): 16-25.
Wang Y H, Wei L. Research on marine ecological environment assessment based on efficacy coefficient method through analysis of the marine ecological environment of Jiaozhou Bay[J]. Journal of Ocean University of China: Social Sciences, 2020(6): 16-25 (in Chinese).

[25] 吴琼, 王如松, 李宏卿, 等. 生态城市指标体系与评价方法 [J]. 生态学报, 2005(8): 2090-2095.
Wu Q, Wang R S, Li H Q, *et al*. The indices and the evaluation method of eco-city[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005(8): 2090-2095 (in Chinese).

[26] 自然资源部办公厅. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南 (试行)[EB/OL]. (2020-01-19)[2023-05-28]. https://m.mnr.gov.cn/gk/tzgg/202001/t20200121_2498502.html.
Office of the Ministry of Natural Resources. Guidelines for evaluating the carrying capacity of resources and environment and the suitability of national land space development (Trial). [EB/OL]. (2020-01-19)[2023-05-28]. https://m.mnr.gov.cn/gk/tzgg/202001/t20200121_2498502.html (in Chinese).

[27] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见 [EB/OL]. (2017-09-20)[2023-05-28]. https://www.gov.cn/zhengce/2017-09/20/content_5226466.htm.
General Office of the Communist Party of China Central Committee, General Office of the State Council. Several opinions on establishing a long term monitoring and early warning mechanism for resource and environmental carrying capacity[EB/OL]. (2017-09-20)[2023-05-28]. https://www.gov.cn/zhengce/2017-09/20/content_5226466.htm (in Chinese).

[28] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正 [J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.
Wang S J, Kong W, Ren L, *et al*. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793-810 (in Chinese).

[29] 王雅敬, 王金艳, 任豪, 等. 基于 PS-DR-DP 理论模型的毕节市资源环境承载状况评估 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2020, 38(6): 39-44.
Wang Y J, Wang J Y, Ren H, *et al*. The evaluation of resources and environmental capacity based on PS-DR-DP theoretical model of Bijie[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2020, 38(6): 39-44 (in Chinese).

[30] Margalef R. Diversity[C]//Sournia A. Phytoplankton manual: monographs on oceanographic methodology 6. Pairs: UNESCO, 1978: 251-260.

[31] 自然资源部. 中国海洋经济统计年鉴 2021[M]. 北京: 海洋出版社, 2022.
Ministry of Natural Resources. China marine economic statistical yearbookv2021[M]. Beijing: China Ocean Press. 2022 (in Chinese).

[32] 山东统计局. 山东省统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
Shandong Provincial Bureau of Statistics. Shandong statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021 (in Chinese).

[33] 山东省统计局. 2021 年山东省国民经济和社会发展统计公报 [R]. 济南: 山东省统计局, 2022.
Shandong Provincial Bureau of Statistics. Statistical communique on the national economic and social development of Shandong Province in 2021[R]. Jinan: Shandong Provincial Bureau of Statistics, 2022 (in Chinese).

[34] 国家统计局能源统计司. 2021 年中国能源统计年鉴 [M]. 北

京: 中国统计出版社, 2022.

Energy Statistics Department of the National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022 (in Chinese).

[35] 中国海洋年鉴编撰委员会. 2021 年中国海洋年鉴 [M]. 北京: 海洋出版社, 2022.

China Ocean Yearbook Compilation Committee. 2021 China ocean yearbook[M]. Beijing: Ocean Press, 2022 (in Chinese).

[36] 国家统计局生态环境部. 2021 年中国环境统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

National Bureau of Statistics and the Ministry of Ecology and Environment. 2021 China environmental statistics yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021 (in Chinese).

[37] 山东省生态环境厅. 2021 山东省环境状况公报 [R]. 济南: 山东省生态环境厅, 2022.

Shandong Provincial Department of Ecology and Environment. 2021 Shandong Provincial environmental status bulletin[R]. Jinan: Shandong Provincial Department of Ecology and Environment, 2022 (in Chinese).

[38] 山东海洋局. 2021 年山东省海洋生态状况报告 [R]. 济南: 山东海洋局, 2022.

Shandong Ocean Bureau. Report on the marine ecological status of Shandong Province in 2021[R]. Jinan: Shandong Ocean Bureau, 2022 (in Chinese).

[39] 曹俐, 王梦瑶. 中国海洋生态补偿政策效果评价研究——基于熵值法与准自然实验 [J]. 中国渔业经济, 2022, 40(3): 1-11.

Cao L, Wang M Y. Evaluation of marine ecological compensation policy in China: based on entropy method and quasi-natural experiment[J]. Chinese Fisheries Economics, 2022, 40(3): 1-11(in Chinese).

[40] 张鹏, 张惠荣, 杨红, 等. 海域生态承载力评价指标体系研究——以南通市为例 [J]. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 143-148.

Zhang P, Zhang H R, Yang H, *et al*. Research on marine ecological carrying capacity of indicator: a case in Nantong[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(1): 143-148 (in Chinese).

[41] 赖敏, 蒋金龙, 欧阳玉蓉, 等. 海洋资源环境承载力评价研究进展 [J]. 生态经济, 2021, 37(1): 164-171.

Lai M, Jiang J L, Ouyang Y R, *et al*. Research progress on evaluating marine resources and environment carrying capacity[J]. Ecological Economy, 2021, 37(1): 164-171 (in Chinese).

Evaluation of the carrying capacity of marine resources and environment in Shandong Province based on PS-DR-DP theoretical model

LIU Ming *

(*China Institute for Marine Affairs*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100860, *China*)

Abstract: The large-scale and high-intensity development of marine resources has brought irreversible impacts on the marine resource environment and ecosystem. Assessing the carrying capacity of marine resources and environment is an important tool for evaluating the status of marine development. This study constructs a PS-DR-DP model to systematically quantify the dynamic changes in the carrying capacity of marine resources and environment in Shandong Province, providing a decision-making basis for sustainable opening and management of marine resources. Based on the definition of marine resource and environmental carrying capacity and the theory of the three elements of carrying capacity, this study constructed an evaluation framework system for marine resource and environmental carrying capacity. By establishing the "PS-DR-DP" theoretical model, the marine resource and environmental carrying capacity was decomposed into three pairs of interaction forces: "pressure support force", "destructive force recovery force", and "degradation force enhancement force", corresponding to the marine resource support capacity, marine environmental capacity, and resistance to marine disasters, respectively. The changes in the state of marine resource and environmental carrying capacity were measured according to the changes in the magnitude of different forces. Based on the above theoretical model, the changes in the carrying capacity of marine resources and environment in Shandong Province from 2012 to 2020 were studied. The results show that from 2012 to 2020, the carrying capacity of marine resources and environment in Shandong Province was at full capacity, and the overall value of the carrying capacity of marine resources and environment showed an upward trend. All forces are in a fully loaded state. The contribution of positive force is generally on the rise. The negative forces are basically stable or slightly increased. The coupling degree between the six types of forces is generally on the rise, and the coupling coordination degree is also on the rise. This study indicates that through marine environmental governance, the resilience and support of marine areas can be increased, thereby promoting an increase in the carrying capacity of marine resources and environment. The improvement of marine technology can enhance the utilization rate of marine resources, strengthen the control and restoration of marine pollution, thereby promoting support and resilience, and thus have a positive impact on the carrying capacity of marine resources and environment. This study has certain theoretical significance for enriching the theory and methods of carrying capacity, and can provide practical support for Shandong Province to formulate development strategies and policies for a strong marine province.

Key words: carrying capacity of marine resources and environment; PS-DR-DP theoretical model; coupling coordination degree model; Shandong Province

Corresponding author: LIU Ming. E-mail: liuming@cimamnr.org.cn

Funding projects: Key Projects of the Open Fund of the Key Laboratory of Marine Management Technology "Research on the Theory, Technical Methods, and Application Demonstration of Resource and Environmental Carrying Capacity Assessment in Typical Coastal Zones" (201702)