DOI: 10.20103/j.stxb.202503060492
刘镇杭,池源,张智玮,张新阳,张国民.基于承载力-适宜性的海洋碳汇功能分区理论、技术与应用导向.生态学报,2026,46(2):677-690.
Liu Z H, Chi Y, Zhang Z W, Zhang X Y, Zhang G M.Theory, technology, and application direction of marine carbon sink functional zoning based on carrying capacity and development suitability.Acta Ecologica Sinica,2026,46(2):677-690.

基于承载力-适宜性的海洋碳汇功能分区理论、技术与应用导向

刘镇杭[1,2],池　源[1,*],张智玮[1],张新阳[1],张国民[1]
1 自然资源部第一海洋研究所海岸带科学与综合管理重点实验室,青岛　266061
2 中国海洋大学海洋发展研究院,青岛　266100

摘要:海洋碳汇功能分区对于揭示海洋碳汇格局、推动精细化碳汇核算和支撑国家自主贡献具有重要意义,但当前鲜有专门研究。从承载力和适宜性的溯本求源与发展应用入手,搭建基于承载力-适宜性的海洋碳汇功能分区理论与技术框架。全面梳理了承载力和适宜性理论与方法的发展历程,深入剖析了二者在国土空间规划和海洋管理领域的实践应用;以海洋碳汇的自然属性和社会属性为核心,阐明海洋碳汇功能的重要性、脆弱性和人工增汇适宜性等特征,搭建了一套科学系统且面向管理应用的海洋碳汇功能分区理论框架;进而,基于海洋碳汇的长期性、变动性和可调控性,构建海洋碳汇分区技术方法,可明确划分源汇边界、生态边界和适宜边界;厘清了面向碳中和目标的海洋碳汇功能分区应用导向,为海洋碳汇核算和增汇、海洋空间规划与海洋综合管理提供了一定的科学依据和技术支撑。

关键词:承载力;适宜性;海洋碳汇;功能分区;碳汇核算;国家自主贡献

Theory, technology, and application direction of marine carbon sink functional zoning based on carrying capacity and development suitability

LIU Zhenhang[1,2], CHI Yuan[1,*], ZHANG Zhiwei[1], ZHANG Xinyang[1], ZHANG Guomin[1]
1 *Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao* 266061, *China*
2 *Institute of Marine Development, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *China*

Abstract: Functional zoning constitutes a critical bridge connecting scientific understanding with actionable policy implementation. Within the critical domain of climate change mitigation, marine carbon sink functional zoning demonstrates significant potential for elucidating spatial and temporal patterns of marine carbon sequestration, enhancing the accuracy of carbon sink accounting, and providing robust scientific support for the fulfillment of Nationally Determined Contributions. However, dedicated study specifically addressing the theoretical foundations and methodological frameworks for marine carbon sink functional zoning remains notably scarce, representing a significant gap in both scientific literature and practical ocean management. This study directly addressed this study void by establishing a comprehensive theoretical and technical framework for marine carbon sink functional zoning. First, we conducted a thorough review of the historical evolution of theories and methods pertaining to carrying capacity and development suitability. This review integrated theoretical paradigms from multiple disciplines—including marine science, geography, and urban and rural planning—and analyzes their practical applications within territorial spatial planning and broader marine spatial management contexts. Subsequently, in accordance with the principle of marine sustainable development, we clarified the natural and social attributes essential to

基金项目:国家重点研发计划课题(2023YFC3108103);泰山学者工程(tsqn202408293);国家自然科学基金(42071116)
收稿日期:2025-03-06;　　**网络出版日期**:2025-10-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: chiyuan@fio.org.cn

marine carbon sink. Assessing the functional importance and vulnerability of marine carbon sink based on their natural attributes, alongside evaluating the development suitability for human interventions aimed at augmenting carbon sequestration based on their social attributes. This integrated analysis enables the proposal of a scientifically rigorous, systematically structured, and inherently management-oriented theoretical framework specifically designed for marine carbon sink functional zoning. Further refining the practical application, we proposed a targeted zoning methodology explicitly grounded in the key functional characteristics of marine carbon sink. Utilizing the threshold method and leveraging assessments of carbon sink carrying capacity and development suitability, this methodology classifies marine spatial units by delineating three critical boundaries: source-sink boundaries (demarcating areas of net carbon uptake versus release), ecological boundaries (identifying limits to prevent ecosystem degradation), and suitability boundaries (defining areas viable for managed enhancement activities). Finally, the study articulated crucial application directions for marine carbon sink functional zoning within the overarching goal of achieving carbon neutrality. These applications encompass enhancing the precision of marine carbon sink accounting, guiding the development of effective carbon sink enhancement strategies, informing marine spatial planning decisions, and supporting integrated ocean management approaches. Collectively, the developed framework provides an indispensable scientific basis and practical technical support. It empowers policymakers and resource managers to strategically harness the full potential of marine ecosystems within global climate mitigation efforts.

Key Words: carrying capacity; development suitability; marine carbon sink; functional zoning; carbon sink accounting; nationally determined contributions

海洋是地球上最大的活跃碳库[1],每年约有 90 Gt 的 CO_2 在海洋中循环,对全球碳平衡至关重要。然而,海洋碳汇具有显著的时空分异特征[2]。由于水温、营养盐含量、光照条件以及生物群落结构等因素差异,不同海洋区域的碳汇能力区别明显[3—4]。同时,气候波动和季节性变化也令同一地区的碳汇效率在不同时间存在较大波动[5—6]。此外,随着人类活动强度和范围日益加剧,海洋还面临围填海、海水养殖、工程建设、航运等[7—8]一系列资源开发与利用的威胁。其中,陆源污染物通过河流流入海洋,导致河口地区水体富营养化,影响了海洋碳汇空间格局[9]。这些情形使海洋碳汇存在格局复杂、核算难度大且管理困难等现实问题。功能分区是连接科学认知与政策行动的重要桥梁,海洋碳汇功能分区的开展势在必行,能够明确近海区域碳汇格局和潜力,从而助力气候变化应对和海洋可持续发展实现双赢。

当前,针对海洋碳汇功能分区研究鲜见报道。已有相关研究主要集中三方面。一是揭示不同海洋区域在不同时间内碳汇格局的变化趋势[10],重点关注海洋碳汇规模、通量等关键参数与外界因子的时空响应[11—12],但大尺度、长时序的碳汇格局仍需进一步探索;二是核算海洋生态系统的碳汇储量与通量[13—14],不仅要考虑各类海洋生态系统的功能差异[15],还要评估生态系统碳汇功能的稳定性;三是尝试分析碳汇与国土空间规划的关联逻辑[16—17],涉及生态保护与经济发展相协调以及海洋碳增汇模式筛选[18],尚处于理论构建与实践应用的起步阶段。对于如何划定不同碳汇功能区并与国土空间规划相结合,相关理论体系和实施框架仍缺失。在此背景下,亟需构建一套科学合理的海洋碳汇分区理论与技术体系,以提升海洋碳汇核算精度,并为人工增汇工程技术选择和海洋空间分区管控开展提供有力支持。

承载力和适宜性为海洋碳汇功能分区提供了理论依据。近年来,我国推行“多规合一”的国土空间规划,要求规划必须基于资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(以下简称“双评价”)。承载力和适宜性的理论与方法为开展国土空间功能分区奠定了坚实基础[19]。其中,承载力着眼于区域自然资源的供给与需求平衡,明确某一区域在不同社会发展背景下的资源消耗限度[20];适宜性是综合考虑自然、社会、经济等多重因素,评估某一区域从事特定开发活动的适宜程度[21]。于海洋碳汇而言,承载力评估可识别出具备较高碳吸收和储存能力的海洋区域;适宜性分析可筛选出兼具生态保护、经济效益及技术可行性的人工增汇区域。因此,将二者相结合,为海洋碳汇功能分区提供了可行的理论依据和方法指导。

本文通过归纳和分析国内外研究进展,融合海洋科学、地理学、城乡规划学等多学科理论范式,论述了承载力和适宜性理论的发展历程及其在国土空间规划和海洋管理领域中的实践应用;遵循海洋可持续发展原则,提出一套基于承载力-适宜性的海洋碳汇功能区划分方法;进而展望海洋碳汇功能分区的应用导向,为应对全球气候变化提供了新思路。

1　承载力和适宜性理论及其发展历程

1.1　承载力理论发展历程

“承载能力”最初是指结构能承受的最大外部应力。时至今日,“承载力”这一概念已被引申到经济学、生态学、地理学等多个学科。在这段漫长历程中,承载力理论的发展可划分为四个阶段。首先是萌芽期,这一阶段特点是以生物种群数量增长规律探讨为主[22],使人类意识到资源环境对种群发展的限制作用。同时,承载力的科学定义被正式确立,即承载力是指某一特定环境条件下某种个体存在数目上的最高极限。其次是发展期,受益于 20 世纪 60 年代爆发的全球性资源环境危机,联合国粮农组织、教科文组织和经济合作与发展组织等机构先后开展粮食、土地、水等资源承载力研究。承载力研究内容由生物种群增长规律转向人类社会经济可持续发展,承载理念由静态平衡深化到生态系统可持续发展[23—24]。但这些大多只考虑了单一自然资源对社会经济承载力的制约。进入成熟期后,学术界将承载力视为一个多维度、多层次的复杂系统,涉及资源、环境、社会、经济等多个因素的互动[25]。在这一过程中,环境承载力概念逐渐成为研究焦点。环境承载力不仅关注区域最大人口数量,还要着重关注与之相应的环境空间耐受能力[26]。21 世纪以来,承载力理论进入稳定期。承载力在强调综合性与系统性的同时,成为一个兼具极限内涵,与资源禀赋、技术手段和社会文化等密切相关的概念[27]。其被广泛应用于区域规划与评价的基础[28],以理解资源限度、环境可持续性和社会协调发展需求,进而在区域发展中实现合理资源配置与生态保护。

1.2　适宜性理论发展历程

适宜性理论作为优化资源配置的核心方法论,在许多领域展现出了巨大的应用价值,成为提升效率、节约成本、提高可持续性的重要手段之一[29—30]。其中,土地适宜性是人文地理和城市规划等领域的重要问题。20 世纪 60 年代,McHarg 等[31]提出“土地适宜性是土地资源在维持自身生态结构和功能安全基础上,针对某种特定用途的适宜性程度”。早期土地适宜性评价多聚焦于土地空间的自然属性。近年来,可持续发展和景观生态学理论逐渐被引入到土地适宜性评价。这一转变促使土地适宜性更加注重土地利用过程中生态环境的可持续性。特别是如何平衡自然、经济与社会三方面需求,已成为土地适宜性的重要议题[32]。

技术层面,土地适宜性评价方法是通过叠加多个土地自然属性的图层来量化土地综合适宜程度[33]。随着科技不断进步,数学模型、地理信息技术和遥感技术的融合极大地提升了评价过程中的数据处理能力,促使土地适宜性评价从二维平面分析向三维空间分析发展,令评价结果更符合实际情况[34]。此外,人工智能有效提高了地理空间信息的提取能力,在空间要素特征的识别上展现出更高的效率和准确性。土地适宜性评价开始向智能化方向迈 进,开启了更加精准、灵活和高效的评价模式,为土地资源可持续管理提供了有力支持[35]。

1.3　二者在国土空间规划中的实践

空间规划是社会经济发展一定阶段后,为协调日益复杂的空间利用需求、缓解人地矛盾、优化国土空间格局而采取的政策措施[36]。如荷兰实行“垂直”空间规划体系引导社会经济活动合理利用土地[37]。为从根本上解决我国长期存在的规划类型重叠、内容冲突、管理分割等问题,推动“多规合一”改革落地生根,2019 年中共中央 国务院《关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》中提出:“双评价”是编制国土空间规划、完善空间治理的基础性工作。其中,资源环境承载能力核心在于揭示特定区域在既定发展阶段、经济技术水平、生产生活方式及生态保护目标约束下,其自然本底条件所能支撑的人类社会经济活动的最大规模与强度。其理论框架是以资源环境子系统为承载主体,社会经济子系统为承载客体,系统评估资源环境子系统的

供给上限和调节阈值,识别区域发展的关键限制性因素,为产业结构优化调整、资源利用效率提升、生态系统恢复力增强提供科学依据[38]。国土空间开发适宜性则聚焦于在维系生态系统健康、保障国土安全的前提下,科学评判特定空间单元进行不同类型开发建设活动的适宜程度。其评价理念摒弃了传统规划偏重城镇开发的单一思维,转向统筹生态保护、农业生产、城镇建设三大核心功能的综合评价;同时强调空间保护与空间开发的统筹协调,寻求在保护优先前提下实现有限开发的优化布局,从而支撑人类多样化需求,实现国土空间功能综合效用最大化[39]。因此,承载力和适宜性共同构成了国土空间规划中科学划定“三区三线”最核心的底层支撑,确保国土资源的节约集约、合理高效利用,有效推动区域社会经济发展与生态环境保护在空间上的高水平协调与可持续演进。

2 承载力和适宜性在海洋功能分区中的研究与实践

2.1 海洋承载力和适宜性

2.1.1 海洋承载力

海洋承载力是一定时期和范围内,在维持区域海洋资源结构符合可持续发展需要,海洋生态环境功能仍具有维持其稳态效应能力的条件下,区域海洋资源环境系统所能承载的人类各种社会经济活动的能力。不同于陆地资源属性,海洋资源具有公有性、流动性、脆弱性特点[40]。因此,海洋承载力可根据评价对象和资源属性细分,确保生态系统健康可持续发展。海洋承载力量化方法主要有以下三类:(1)理论分析法通过构建以“承载体-承载状态”为核心关系的理论模型,利用模型中相关指标来判断区域内资源环境和社会经济系统承载力状况[41]。目前“P-S-R”(Pressure-State-Response)和“D-P-S-I-R”(Drive-Pressure-State- Impact-Response)模型得到广泛使用[42—43]。(2)供需平衡法的核心理念是将能量作为衡量系统承载功能的媒介,包括生态足迹和能值分析等。生态足迹法是比较人类生产生活所需面积和一定区域内所能提供面积的关系,得到生态赤字或盈余结果[44]。能值分析法是以能值为基准,把海洋生态系统中不同种类、不可比较的能量转换为统一标准的能值进行测算,定量分析系统的功能特征和生态经济效益[45]。(3)系统模型法是在不同因子因果反馈分析基础上,重点关注决定性影响机制,再用计算机模拟现实系统,从而反映海洋承载力[46]。

2.1.2 海洋适宜性

海洋适宜性是拟设定的海域主导功能相对海域自然与经济社会条件的适宜程度[47]。这就要求遵循海洋生态系统整体性,协调处理人口、环境、资源和发展之间的关系,使海洋生态系统的生态经济效益整体最优。在海洋开发利用方面,已有海洋适宜性研究多关注评估海域单元承载单一开发活动的适宜程度,包括渔业用海[48—49]、旅游用海[50]和工程建设选址[51]等。除此之外,还有针对整个海域不同使用用途的适宜性评价。例如,Bello-Pineda 等[52]对墨西哥最大的珊瑚礁海岸之一进行了龙虾养殖地适宜性评价、锚地适宜性评价、海龟栖息地适宜性评价、垂钓适宜性评价等多达十几项不同用途的适宜性评价;在海洋生态保护方面,大部分研究主要围绕海洋保护区设立[53]和生物群落栖息地[54]等内容开展相应实证研究。

2.2 海洋空间功能分区方法

空间分区是在保证连续性基础上,将基本空间单元遵照自然或社会经济现象在地域上的差异性与相似性组合成若干个较大空间区域的过程。具体方法有叠置分析法[55]、主导因素法[56]、四象限模型[57]等。这些方法能提供基于客观数据和理论分析的空间分区结果。但面对复杂的国土空间分区问题时,其灵活性和适应性不足。随着人工智能快速发展,基于配置和组合思路设计的分区算法得到广泛关注,包括人工神经网络[58]、元胞自动机[59]和聚类方法[60—61]等。海洋空间分区主要借助指标体系评价来实现。国外分区方法侧重于海域属性分区,如澳大利亚基于生态系统定义海域的使用方式和保护级别[62]。我国则主要集中在功能用途分区方面,同时在海洋生态环境[63]、自然气候[64]、地质稳定性[65]等方面进行探索。

海洋空间分区是海洋空间规划的基础。我国分区始于 20 世纪 80 年代的海洋功能区划。伴随社会经济快速发展,海洋资源开发利用需求日益增加,原有海洋功能区划体系面临着新的挑战。2021 年自然资源部办

公厅出台《省级海岸带综合保护与利用规划编制指南(试行)》,明确基于“双评价”结果,继承和优化原海洋功能分区体系,以适应新时代海洋空间管控需求。海洋功能区的科学划定是一项复杂多元的系统工程,必须建立在多维度评估与动态协调机制之上。首先是系统开展海洋生态系统承载力评估,综合反映海洋生态系统在不同压力下格局分布[66];其次是解析海洋经济活动的空间需求与发展潜力,发挥以生态系统为基础的海洋空间规划统筹引领作用,有效引导空间布局优化[67],构建产业用海兼容性矩阵;同时,引入人类活动分级管控机制,对渔业养殖、港口建设、能源开发等八大类用海行为进行分级管控[68],明确禁止类、限制类及兼容类活动清单,推动经济发展与生态保护有机融合。

3　基于承载力-适宜性的海洋碳汇功能分区

3.1　海洋碳汇资源属性

海洋碳汇是一个高度复杂且动态变化的生态系统服务功能,涉及到海洋生态系统中生物泵、溶解度泵、碳酸盐泵和微型生物碳泵四大机制[69]。这些机制彼此交互影响,协同调节海洋碳的转化与储存。同时,受自然环境和人类活动双重影响,海洋碳汇的形成速率和稳定程度会随时间、空间和环境条件变化而波动[70—71]。因此,海洋碳汇资源具有以下属性:

3.1.1　长期性与变动性

从海洋碳汇的源汇特征出发(即自然属性),考虑到我国碳中和目标为 2060 年,有效的海洋碳汇不仅要具备吸收 CO_2 的能力,还应在长时间尺度内展现出平稳的碳汇功能。然而,受到多种因素交织影响,海洋碳汇呈现出不同时空尺度的差异化。在时间尺度上,海洋碳汇受到季节性变化、年际变化和长期趋势的共同影响。其中,季节性变化包括温度、水动力条件等会影响海洋生物活动[72];年际变化与厄尔尼诺、降水模式、大气环流等气候现象紧密相关[73]。在空间尺度上,海洋碳汇变化既受到局部因素影响,也受到宏观因素制约。局部海域的碳汇能力主要受生态系统因素的影响较大。以海草床、红树林和盐沼为例,由于其较高的生物多样性和生物生产力,被认为是高效的碳汇区域[74]。洋流模式和气候变化等则会改变海洋生态系统结构和功能,对区域甚至全球性海洋碳源/汇平衡的影响更显著[75—76]。

3.1.2　可调控性

从人类世下人为活动出发(即社会属性),在面对稳定性较低的海洋碳汇区域时,充分利用可调控性以提升碳汇功能,是促进碳中和目标实现的重要途径。可调控性是指辨明不同时空尺度下海洋碳汇的主导因子,并通过有效的人为干预措施,调节特定海域固碳能力。其中,人为干预措施根据管控理念和强度的差异划分成两大类:一是以“保护”为核心的弱干预,强调通过“科学管理+污染防治”的统筹协调,避免人为活动对海洋生态系统及其碳汇功能的破坏,确保海洋生物群落的生态平衡。具体手段包括保护生物多样性[77—78]、实施可持续的渔业资源管理政策[79]以及促进陆海统筹减排增汇[80]等。二是以“改造”为核心的强干预,强调因地制宜地调整海洋生态系统参数,改善海域生态环境,提升海洋固碳效率,并将溶解碳转化为固态碳,实现长期碳封存。地球工程可为海洋碳增汇提供必要的结构性支持,包括人工上升流[81]、海洋地质碳封存[82]、海洋施肥[83]和生态系统修复[84—85]等技术手段。

3.2　海洋碳汇功能特征

海洋碳汇功能受气候变暖、自然环境和人类活动多种因素影响,脆弱性日益突显。因此,理解海洋碳汇功能重要性、脆弱性和增汇适宜性,对制定应对气候变化的策略至关重要。

海洋碳汇功能重要性是指在长时期内不同环境条件下某一海洋区域对碳汇的相对贡献能力。受控于海域的生物生产力、生态系统结构、水文物理条件及沉积环境等因素,海洋生态系统碳汇功能具有明显的时空差异。例如,位于高生产力上升流区、近岸蓝碳生态系统富集区等海域,生物生产力和固碳能力较高,具有远超其他区域的碳汇能力,是全球碳储存的关键区域。精准识别、评估并优先保护这些重要区域,是维持海洋碳汇功能的基础。

海洋碳汇功能脆弱性是指海洋碳汇系统在长时期内对外界环境压力响应的灵敏度。随着气候变化加剧以及人类活动对海洋生态系统影响的增大,海洋碳汇面临着越来越大的压力。海温升高、海水酸化、低氧/脱氧、富营养化与污染等问题,都会导致海洋碳汇功能的下降,甚至破坏整个海洋生态系统的稳定性[86]。亟需分析不同海域的生态特征、生物组成以及物理化学环境,厘清不同压力源的作用机制,识别对环境干扰最为敏感的碳汇功能区域。

海洋人工增汇适宜性是指特定海域在人为干预下,通过调控关键生物地球化学或生态过程,实现净碳吸收稳定增长的潜力和可行性。由于海洋生态系统的多样性与复杂性,海洋中的水温、光照、盐度、水动力条件、营养盐浓度等自然本底条件都会对海洋碳汇的形成与储存有影响[87]。因此,科学的人工增汇实践须建立在精细化区域适宜性评估基础之上,权衡生态风险阈值、固碳潜力与社会经济可行性,确保干预措施的可持续性和环境友好性。

3.3 海洋碳汇功能分区理论

在海洋空间规划领域,海洋功能分区是根据海域自然和社会属性的区域分异规律,划分不同类型海洋功能空间单元的过程。将“海洋功能分区”概念延伸到海洋碳汇中,可得:海洋碳汇功能分区是根据海洋碳汇时空属性的区域分异规律,划分不同类型海洋碳汇功能空间单元的过程。结合国土空间规划中“双评价”技术理念,本文提出基于承载力-适宜性的海洋碳汇功能区划分方法(图 1)。其由两部分组成:一是碳汇承载力;二是碳汇适宜性。这一方法不仅提供了海洋碳汇空间布局优化的科学依据,还能有效提升碳汇功能稳定性。

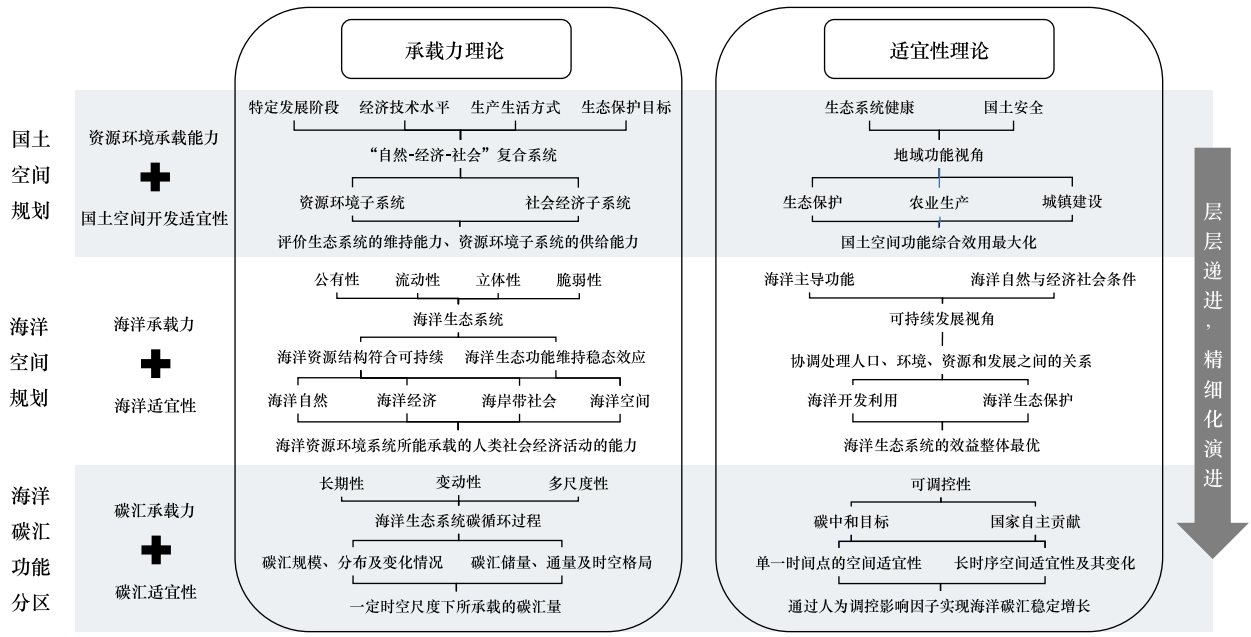

图 1 海洋碳汇功能分区的演化脉络

Fig.1 The evolution of marine carbon sink functional zoning

碳汇承载力是指碳汇载体在一定时空尺度下所承载的碳汇量,具体是以中国海(滨海湿地、河口、陆架)为承载体,以海洋碳汇为压力体,根据数量和质量两个维度来测度碳汇承载力。其中,数量维度涉及碳汇的规模、分布及变化情况,旨在把握不同区域下海洋碳汇的整体存量与动态变化;质量维度关注碳汇的储量、通量及其时空格局,旨在强调碳储量的稳定性与固碳速率的变化等方面。根据这一体系,进而划分海洋碳汇功能重要区和海洋碳汇功能脆弱区。前者是指具有较高碳汇承载能力,能够持续发挥碳吸存作用,是重点保护和利用的区域;后者是指碳汇功能对外界环境响应灵敏且在不同时间点发生明显变动的区域。

其次,碳汇适宜性是指一定时空尺度下通过人为调控碳汇影响因子能够实现海洋碳汇的稳定增长,主要

由静态和动态两个维度来测度。其中,海洋环境参数、陆源入海物质、海域使用状况以及海洋生态保护等环境因子共同决定了某一区域是否具有碳增汇潜力。静态维度主要关注单一时间点的空间适宜性;动态适宜性倾向于长时序空间适宜性及其变化。基于海洋碳汇的系统性评估,进而划分海洋人工增汇适宜区和优先区。前者是指那些在当前环境条件下,具有较高碳储存潜力并能通过人为调控增强碳汇功能的区域。后者是指在考虑长时序变化后,具有较强碳汇增强潜力、并且海洋生态系统对人为干预有较高响应性的区域。

3.4　海洋碳汇功能分区方法

海洋碳汇功能区的划分方法不同,划分结果也会各不相同。基于承载力-适宜性的海洋碳汇功能区划分方法,在考虑海洋碳汇的长期性、变动性和可调控性等属性基础上,重点关注海洋碳汇功能特征,采用阈值法并利用碳汇承载力和适宜性将海洋划分为三类区域。

3.4.1　源汇边界

基于海洋长时序 CO_2 通量网格产品,设定相应阈值来确定源汇分区。公式如下:

$$NF_{CO_2}=\begin{pmatrix} 100 & F_{CO_2}\leqslant F_{CO_2\min} \\ \dfrac{F_{CO_2}}{F_{CO_2\min}}\times 100 & F_{CO_2}\min<F_{CO_2}\leqslant 0 \\ -\dfrac{F_{CO_2}}{F_{CO_2\max}}\times 100 & 0<F_{CO_2}\leqslant F_{CO_2\max} \\ -100 & F_{CO_2}>F_{CO_2\max} \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$Z_{T1}=\begin{pmatrix} \text{强汇区} & NF_{CO_2}>50 \\ \text{弱汇区} & 0<NF_{CO_2}\leqslant 50 \\ \text{弱源区} & -50<NF_{CO_2}\leqslant 0 \\ \text{强源区} & NF_{CO_2}\leqslant -50 \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中,F_{CO2} 是海-气界面 CO_2 通量数据,NF_{CO_2}是标准化的 CO_2 通量,$F_{CO_2\min}$和 $F_{CO_2\max}$分别是开展标准化处理的下限和上限,为避免极值影响,并确保不同时间结果的可比性,采取研究所有时段的 1%和 99%分位数分别作为下限和上限;Z_{T1}是分区结果。

3.4.2　生态边界

通过数量和质量两个方面测度碳汇承载力时空特征,进而划定碳汇功能重要区和脆弱区。公式如下:

$$\mathrm{CSCI}_i=QT_i\times QL_i \tag{3}$$

式中,CSCI_i是指碳汇载体 i 的碳汇承载力,i 主要指滨海湿地和海水;QT_i和 QL_i分别是碳汇载体的数量和质量,前者往往以具有碳汇功能的载体面积占网格总面积的比例表示,后者用滨海湿地沉积物固碳速率和海水 CO_2 通量来表征。采用式(1)对 CSCI_i进行标准化处理,CSCI_i取值范围[-100, 100],其中(0, 100]表示为碳汇区。

碳汇功能重要区基于长时序碳汇承载力结果划定。公式如下:

$$Z_{T2-1}=\begin{pmatrix} \text{碳汇功能极重要区} & \mathrm{CSCI}>TH_1(FT>TH_2)\text{且}\ \mathrm{CSCI}>TH_3(FT>TH_4) \\ \text{碳汇功能重要区} & \mathrm{CSCI}>TH_5(FT>TH_6)\text{且}\ \mathrm{CSCI}>TH_7(FT>TH_8) \\ \text{碳汇功能非重要区} & \text{其他} \end{pmatrix} \tag{4}$$

式中,Z_{T2-1}是碳汇功能重要值分区;CSCI 为碳汇承载力,FT 为在各时间点出现的频率,如 $\mathrm{CSCI}>TH_1(FT>TH_2)$是指某网格在各时间点 $\mathrm{CSCI}>TH_1$ 的频率大于 TH_2;式中 TH_1—TH_8为阈值,在研究过程中根据实际情况进行确定,下同。

碳汇功能脆弱区也基于长时序碳汇承载力结果划定。公式如下:

$$Z_{T2-2}=\begin{pmatrix}碳汇功能极脆弱区 & SD(\mathrm{CSCI})>TH_9\\ 碳汇功能脆弱区 & SD(\mathrm{CSCI})>TH_{10}\\ 碳汇功能非脆弱区 & 其他\end{pmatrix} \tag{5}$$

式中,Z_{T2-2}是碳汇功能脆弱性分区;$SD(\mathrm{CSCI})$各时间点为碳汇承载力的标准差,如 $SD(\mathrm{CSCI})>TH_9$是指某网格在各时间点 CSCI 的标准差大于 TH_9。

3.4.3 适宜边界

基于生态边界划分结果,结合各类外界影响因子时空图层,通过分析碳汇承载力与影响因子的空间耦合关系,判断海洋碳汇主要影响因子且该因子在一定情形下可调控性,通过定量辨识海洋碳汇与影响因子在不同时空尺度下的内在关系,测度碳汇适宜性。公式如下:

$$\mathrm{CSSI}=\sum IC_i\times \mathrm{SFC}_i \tag{6}$$

$$\mathrm{SFC}=\begin{pmatrix}-1 & FC\leqslant FC_{\mathrm{lower}}\\ \dfrac{FC-FC_{\mathrm{middle}}}{FC_{\mathrm{middle}}-FC_{\mathrm{lower}}} & FC_{\mathrm{lower}}<FC\leqslant FC_{\mathrm{middle}}\\ \dfrac{FC-FC_{\mathrm{middle}}}{FC_{\mathrm{upper}}-FC_{\mathrm{middle}}} & FC_{\mathrm{middle}}<FC\leqslant FC_{\mathrm{upper}}\\ 1 & FC>FC_{\mathrm{upper}}\end{pmatrix} \tag{7}$$

式中,CSSI 是碳汇适宜性;IC_i是影响因子 i 对碳汇承载力的影响系数,基于该影响因子与碳汇承载力在各尺度的空间耦合关系获取;SFC_i是影响因子 i 的标准化值,FC 为该影响因子原始值,FC_{lower}、FC_{middle}和 FC_{upper}分别为该因子的下限、中限和上限,拟分别取各时间点该因子的 1%、50%和 99%分位数。进而,将 CSSI 进行标准化处理为[-100, 100]区间。

人工增汇适宜区和优先区划分公式如下:

$$Z_{T3}=\begin{pmatrix}人工增汇优先区 & \mathrm{CSSI}>TH_{11}且\ \mathrm{CSCI}<TH_{12}(FT>TH_{13})\\ 人工增汇适宜区 & \mathrm{CSSI}>TH_{14}且\ \mathrm{CSCI}<TH_{15}(FT>TH_{16})\\ 人工增汇不适宜区 & 其他\end{pmatrix} \tag{8}$$

式中,Z_{T3}是人工增汇适宜性分区;$\mathrm{CSSI}>TH_{11}$且 $\mathrm{CSCI}<TH_{12}(FT>TH_{13})$是指某网格在各时间点 $\mathrm{CSSI}>TH_{11}$且 $\mathrm{CSCI}<TH_{12}$的频率为 TH_{13}以上。

4 面向碳中和的海洋碳汇功能分区应用导向

为了有效应对日益严峻的气候变化问题,全球各国纷纷设立碳中和目标,力求在本世纪内实现温室气体零排放。然而,实现碳中和不仅依赖于碳减排,还必须在碳增汇方面取得显著进展。因此,开展海洋碳汇功能分区有助于深入了解不同海域在碳吸收和储存方面的差异性,为开展海洋碳汇核算、编制海洋空间规划和促进海洋综合管理提供一定科学依据。

4.1 海洋碳汇核算的坚实基础

海洋碳汇核算是对一片海域、一定时期内固碳量进行全面的确认、计量、记录和报告的过程。首先,“确认”涉及核算边界确定、碳库和温室气体排放源选择以及核算期界定等约束性内容[88];其次,“计量”是以实物量为计量单位对生态系统固碳量测算应记录的数目[89]。在核算数据方面,通过现场调查、遥感反演等多种手段,收集与生态系统固碳过程相关参数。在核算方法方面,通过应用特定模型方法,考虑空间异质性,将获取的点状数据进行分类计算和模拟评估,形成区域碳汇量面状数据[90];再者,“记录”是根据一定编制原则,按照计量的固碳量将海洋碳汇在政策要求的特有载体上进行登记的活动,即温室气体清单编制工作[91];最后,“报告”是指通过编制评估报告的形式向有关管理人员提供决策参考,且要由第三方检查数据来源、采集

方法和评估过程,确保报告信息的科学性、合理性与可靠性。

海洋碳汇功能分区为海洋碳汇精细化核算奠定了坚实基础(图 2)。具体而言,海洋碳汇功能分区通过对海洋生态系统功能的深入分析,为碳汇核算的空间边界设定提供可靠依据,确保核算时不遗漏具有关键碳汇作用的地带,提高了核算结果的准确性。同时,功能分区有助于根据不同海区生态特点进行碳汇功能的量化评估,使碳汇核算报告内容更具针对性和科学性,避免对不同类型碳库的碳汇能力进行泛化与误差,为推动碳中和目标实现提供更为精确的数据支持。此外,在实际应用中,随着全球碳市场的逐步发展,碳汇交易成为实现碳减排的重要手段之一。精准的功能分区可为海洋碳汇核算与交易提供清晰的产权划分,使碳汇资产的评估与交易愈发透明、公正,从而保证碳交易市场中的碳汇凭证真实与有效。

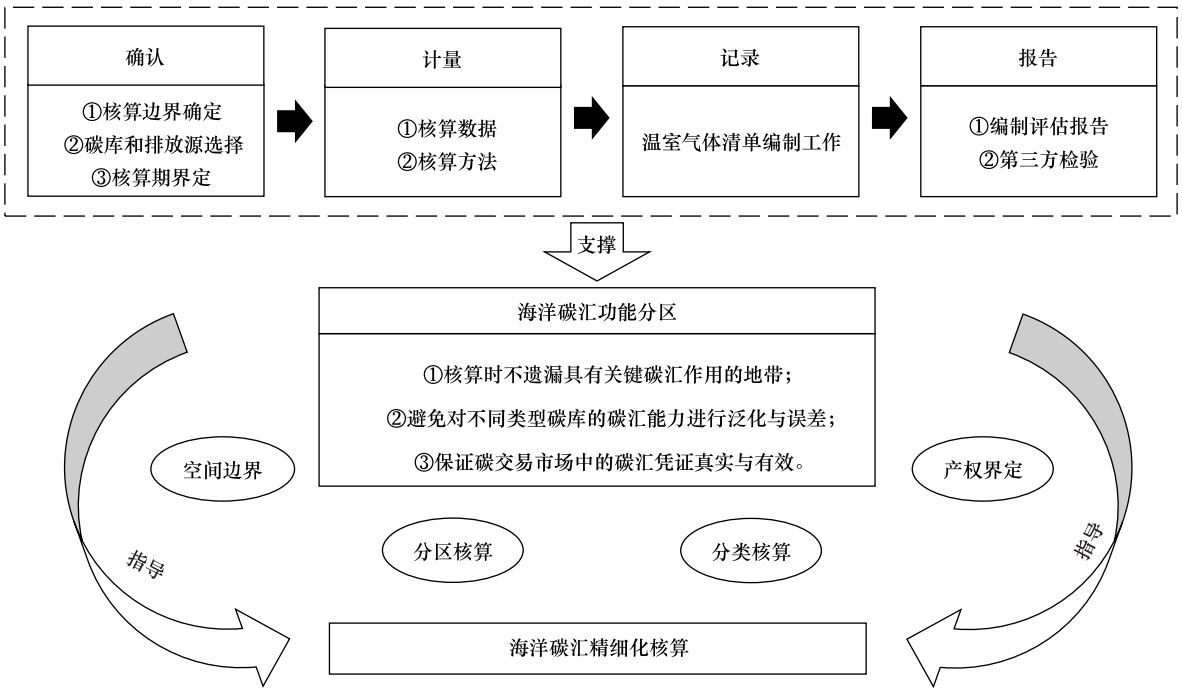

图 2　海洋碳汇精细化核算与海洋碳汇功能分区关系

Fig.2　Relationship between refined accounting and functional zoning of marine carbon sink

4.2　海洋空间规划的技术依据

海洋空间规划是国家海洋战略的重要组成部分,核心目标是实现海洋资源的可持续利用与保护,确保海洋生态环境与开发利用活动间的协调与平衡。在这一规划中,实行“两空间内部一红线”的划分,即海洋生态空间和海洋开发利用空间,海洋生态空间内划定海洋生态保护红线。而双评价是开展其划分基础,通过识别生态保护“极重要区”和“重要区”及不同开发利用适宜区,为划分“两空间内部一红线”提供依据。因此,基于承载力-适宜性的海洋碳汇功能分区结果与海洋国土空间规划充分契合,体现多层级分区管控(图 3)。

开展海洋碳汇功能区划分,将碳汇功能嵌入海洋国土空间规划体系,能够更好地协调海洋开发与生态保护的关系,推动海洋可持续发展战略的实施[92]。要实现这一目的,在开展海洋碳汇功能区划分时,首先通过碳汇承载力评价,识别海洋碳汇功能重要区和脆弱区,前者嵌入生态服务功能重要性评价,后者嵌入生态敏感性评价,进而支撑划分海洋生态空间和保护红线;其次通过碳汇适宜性评价,划分人工增汇适宜区和优先区,与当前开展的海水养殖、港口建设、海上风电开发等开发利用适宜性相融合,推动绿色低碳经济发展,进一步丰富和细化海洋“两空间内部一红线”划定技术,有效支撑海洋国土空间规划。同时,海洋碳汇功能分区亦可与海洋生态分区互为支持。一方面,海洋生态分区结果为开展碳汇适宜区划分提供环境因子;另一方面,碳汇功能分区结果也为生态分区提供参考依据(图 4)。

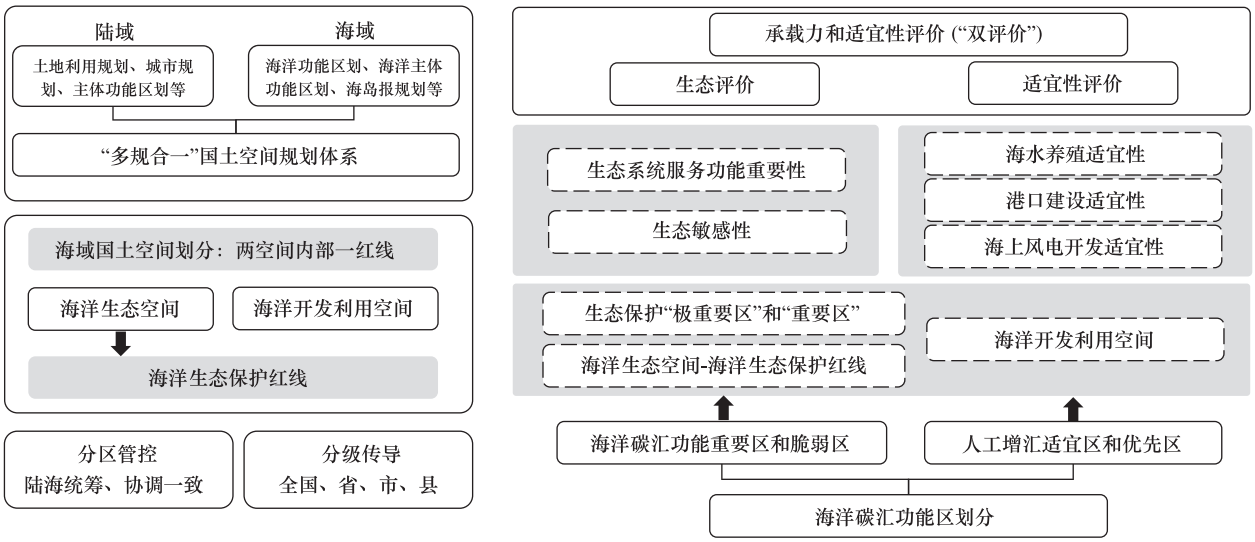

图 3 海洋空间规划与海洋碳汇功能分区关系

Fig.3 Relationship between marine spatial planning and marine carbon sink functional zoning

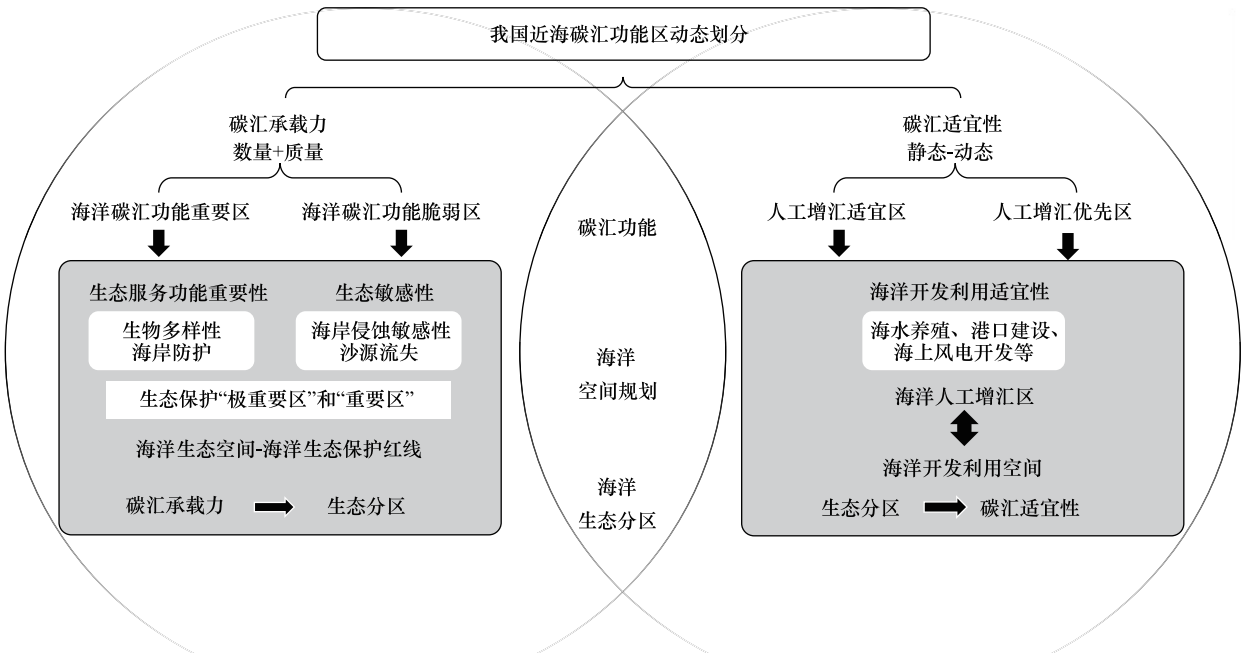

图 4 海洋碳汇功能分区与海洋空间分区耦合关系

Fig.4 Coupling of marine carbon sink functional zoning with marine spatial zoning

4.3 海洋综合管理的有力抓手

海洋碳汇是海洋综合管理的应有之义，通过管理海洋碳汇功能区，不仅可增加碳储存能力，还有助于维护海洋生态系统健康。海洋碳汇复杂适应系统涉及自然生态系统物质和能量的动态迭代交换，亦涉及经济系统和社会系统的诸多要素[93]。因而海洋碳汇管理要综合考虑不同系统之间的互动和协同效应，采用系统化和整体性的方法进行科学管理。具体来说，在复杂适应系统理论的指导下，将海洋碳汇管理的认识论、方法论与实践论整体纳入到复杂系统知识架构，再基于边界清晰、功能明确的海洋碳汇功能区划分，识别海洋碳汇管控主要影响因素，全面把握各影响因子的重要程度与因果关系，进而制定出高效的管理策略。

海洋碳汇功能分区管控的最终目标是实现海洋碳汇功能的最大化,并维护海洋生态系统健康。为了达到这一目标,应以提升海洋生态系统稳定性、增强海洋生态系统碳汇能力为发展目标,利用“管控策略+管控措施”的组合式手段,在已施行国土空间规划基础上,根据不同海域的环境条件、生态需求和社会经济发展情况,制定差异化管控方案,并因地制宜地筛选人工增汇工程技术(表 1)。其中,管控策略是战略性规划方法,明确特定情况下采取的整体方向和目标;管控措施是具体操作性手段,用于实施和支持管控策略。通过这种方法,确保海洋生态系统在面对气候变化和人类活动的双重压力时能够保持在良好状态。

表 1　我国海洋碳汇功能区分区管控方案

Table 1　Zoning control program for China's marine carbon sink functional zoning

分区 Zoning	发展目标 Development goals	管控策略 Control strategy	管控措施 Control measures		增汇方案 Carbon sequestration program
			共性 Commonality	特性 Characteristics	
海洋碳汇功能重要区 Important areas for marine carbon sink	保护海洋生态系统,维持或提高海洋碳汇能力	以保护为导向	①设保护区;②加强碳通量监测;③限制污染排放;④促进可持续利用;⑤国际合作与治理;⑥增加公众意识。	实施保护措施可能对渔业、航运和海洋开发等活动造成一定限制,需综合考虑不同利益相关者的需求;	—
海洋碳汇功能脆弱区 Vulnerable areas for marine carbon sink	保护和恢复受损的海洋生态系统	以修复为导向		探究脆弱区的生态系统功能和脆弱性程度,制定相应的保护与修复策略;	—
人工增汇适宜区 Suitable areas for artificial carbon sequestration	通过人工干预手段,增加海洋生态系统对碳吸收和储存能力	以开发为导向		通过科学评估确保人工增汇措施对生态系统的影响是积极的;明确人工增汇的优先级。	人工上升流;污水加碱;表层与缺氧区加碱;陆源减污等。
人工增汇优先区 Priority areas for artificial carbon sequestration					

5　结论

海洋碳汇在全球气候调节中扮演着至关重要的角色。然而,在多重因子影响下,海洋碳汇功能存在显著的时空异质性,并表现出长期性、变动性和可调控性等特性。海洋碳汇功能分区是推动碳汇精细化核算、实现海洋高质量发展的重要途径。本文基于承载力-适宜性理论和方法,构建了一套海洋碳汇功能分区理论与技术体系,并对其实践应用进行了展望分析,可为海洋碳汇的可持续利用提供重要支持。下一步的研究重点:(1)建立海洋碳汇功能分区的综合评估体系,结合物理、化学和生物学指标,系统评估不同海区的碳汇功能重要性和脆弱性以及人工增汇适宜性;(2)探索海洋碳汇功能保护与修复的技术路线,针对碳汇脆弱区域开展重点保护与修复示范,推动海洋碳汇功能的长期稳定发展;(3)注重碳汇功能分区与国土空间规划相结合和契合,制定出综合的保护政策与分区管控措施。

参考文献(References):

[1] Riebesell U, Schulz K G, Bellerby R G J, Botros M, Fritsche P, Meyerhöfer M, Neill C, Nondal G, Oschlies A, Wohlers J, Zöllner E. Enhanced biological carbon consumption in a high CO_2 ocean. Nature, 2007, 450(7169): 545-548.

[2] Rogers A D, Frinault B V, Barnes D A, Bindoff N L, Downie R, Ducklow H W, Friedlaender A S, Hart T, Hill S L, Hofmann E E, Linse K, McMahon C R, Murphy E J, Pakhomov E A, Reygondeau G, Staniland I J, Wolf-Gladrow D A, Wright R M. Antarctic futures: an assessment of climate-driven changes in ecosystem structure, function, and service provisioning in the southern ocean. Annual Review of Marine Science, 2020, 12: 87-120.

[3] Piacenza S E, Barner A K, Benkwitt C E, Boersma K S, Cerny-Chipman E B, Ingeman K E, Kindinger T L, Lee J D, Lindsley A J, Reimer J N, Rowe J C, Shen C C, Thompson K A, Thurman L L, Heppell S S. Patterns and variation in benthic biodiversity in a large marine ecosystem. PLoS One, 2015, 10(8): e0135135.

[4] Macreadie P I, Costa M D P, Atwood T B, Friess D A, Kelleway J J, Kennedy H, Lovelock C E, Serrano O, Duarte C M. Blue carbon as a natural climate solution. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(12): 826-839.

[5] Zika J D, Laliberté F, Mudryk L R, Sijp W P, Nurser A J G. Changes in ocean vertical heat transport with global warming. Geophysical Research Letters, 2015, 42(12): 4940-4948.

[6] Bates N R. Seasonal variability of the effect of coral reefs on seawater CO_2 and air—sea CO_2 exchange. Limnology and Oceanography, 2002, 47(1): 43-52.

[7] Pendleton L, Donato D C, Murray B C, Crooks S, Jenkins W A, Sifleet S, Craft C, Fourqurean J W, Kauffman J B, Marbà N, Megonigal P, Pidgeon E, Herr D, Gordon D, Baldera A. Estimating global "blue carbon" emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. PLoS One, 2012, 7(9): e43542.

[8] Han T, Shi R, Qi Z, Huang H, Gong X. Impacts of large-scale aquaculture activities on the seawater carbonate system and air-sea CO_2 flux in a subtropical mariculture bay, Southern China. Aquaculture Environment Interactions, 2021, 13: 199-210.

[9] 林玲, 许文锋, 刘丽华, 王飞飞, 杨盛昌, 曹文志. 河流营养物质输入及结构变化对河口富营养化潜力的影响. 湖泊科学, 2023, 35(6): 1990-2000.

[10] Yu S J, Song Z G, Bai Y, Guo X H, He X Q, Zhai W D, Zhao H D, Dai M H. Satellite-estimated air-sea CO_2 fluxes in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea: patterns and variations during 2003-2019. Science of The Total Environment, 2023, 904: 166804.

[11] Bates N R, Mathis J T. The Arctic Ocean marine carbon cycle: evaluation of air-sea CO_2 exchanges, ocean acidification impacts and potential feedbacks. Biogeosciences, 2009, 6(11): 2433-2459.

[12] Parc L, Bellenger H, Bopp L, Perrot X, Ho D T. Global ocean carbon uptake enhanced by rainfall. Nature Geoscience, 2024, 17(9): 851-857.

[13] 李捷, 刘译蔓, 孙辉, 黄建涛, 路景钫. 中国海岸带蓝碳现状分析. 环境科学与技术, 2019, 42(10): 207-216.

[14] Bai Y, Cai W J, He X Q, Zhai W D, Pan D L, Dai M H, Yu P S. A mechanistic semi-analytical method for remotely sensing sea surface pCO_2 river-dominated coastal oceans: a case study from the East China Sea. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(3): 2331-2349.

[15] Elmahdy R, Mandour A, El-Sammak A, Elshazly A. Climate change mitigation strategy through blue carbon in seagrasses ecosystem, Red Sea Coast, Egypt. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2024, 29(6): 59.

[16] 陈美球, 严格. 构建低碳型国土空间格局的思考. 中国土地, 2021,(11): 9-11.

[17] Calado H, Cervera-Núñez C, Gutierrez D, Stojanovic. Forging ahead: Climate-smart maritime spatial planning for the future. Marine Policy, 2025, 171: 106503.

[18] 刘镇杭, 刘大海, 池源, 李彦平. 基于自然的海岸带蓝碳增汇措施及其技术体系研究. 海岸工程, 2023, 42(1): 13-24.

[19] 郝庆, 邓玲, 封志明. 国土空间规划中的承载力反思: 概念、理论与实践. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2073-2086.

[20] 张林波, 李文华, 刘孝富, 王维. 承载力理论的起源、发展与展望. 生态学报, 2009, 29(2): 878-888.

[21] 岳文泽, 韦静娴, 陈阳. 国土空间开发适宜性评价的反思. 中国土地科学, 2021, 35(10): 1-10.

[22] Scheffer V B. The Rise and Fall of a Reindeer Herd. Scientific Monthly, 1951, 73: 356-362.

[23] 王开运, 邹春表, 张桂莲. 生态承载力复合模型系统与应用. 北京: 科学出版社, 2007.

[24] Meadows D H, Meadows D L, Randers J, Behrens W W. The limits to Growth: a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. New York: Universe Books, 1972.

[25] Arrow K, Bolin B, Costanza R, Dasgupta P, Folke C, Holling C S, Jansson B O, Levin S, Mäler K G, Perrings C, Pimentel D. Economic growth, carrying capacity, and the environment. Ecological Economics, 1995, 15(2): 91-95.

[26] 崔凤军. 环境承载力论初探. 中国人口·资源与环境, 1995, (1): 80-84.

[27] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 潘韬, 李鹏. 百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395.

[28] 乌兰, 吴全, 敖登高娃, 贾恪. 凉城县国土空间资源环境承载力评价研究. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 100-107.

[29] 李莹, 桑国臣, 王巧玉, 雷倩雯, 崔晓玲. 直接受益式低能耗建筑集热窗热工参数的气候适宜性研究. 西安理工大学学报,1-11 [2025-03-02].

[30] 李小克, 郑珊珊, 张姝晴, 史怀琪. 偏向性技术进步适宜性的测度与结构分解. 统计研究, 2024, 41(7): 91-105.

[31] McHarg I L, Rui J W. Trans. Design with nature. Tianjin: Press of Tianjin University, 1967.

[32] Huang H P, Li Q Z, Zhang Y. Urban residential land suitability analysis combining remote sensing and social sensing data: a case study in Beijing, China. Sustainability, 2019, 11(8): 2255.

[33] 孙凌蔚, 李月臣, 朱康文, 刘建. 生态视角下的山区城镇建设用地适宜性评价. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2017, 34(3): 121-127, 2, 141.

[34] 赵思成, 胥犇, 李晓军, 张万斌, 刘保林. 山地城市核心区地下空间开发适宜性三维评价. 同济大学学报: 自然科学版, 2022, 50(1): 70-78.

[35] 刘小波, 王玉宽, 李明. 国土空间开发适宜性评价的理论、方法与技术应用. 地球信息科学学报, 2021, 23(12): 2097-2110.

[36] 林坚, 吴宇翔, 吴佳雨, 刘诗毅. 论空间规划体系的构建——兼析空间规划、国土空间用途管制与自然资源监管的关系. 城市规划, 2018, 42(5): 9-17.

[37] 陈宇琛. 荷兰空间规划发展历程对我国的启示. 中国国土资源经济, 2024, 37(2): 66-75.
[38] 王亚飞, 樊杰. 资源环境承载能力百年研究的系统综述. 地理学报, 2023, 78(11): 2676-2693.
[39] 徐雯雯, 宁晓刚, 王浩, 孟静. 基于 GIS 的城镇、农业、生态空间分区与国土开发风险识别——以陕西省南泥湾景区为例. 地域研究与开发, 2021, 40(3): 127-132, 139.
[40] 陈尚,任大川,李京梅,夏涛,王栋,杜国英,王其翔,柯淑云,王丽,王敏,赵志远. 海洋生态资本概念与属性界定. 生态学报, 2010, 30(23): 6323-6330.
[41] 孙才志, 于广华, 王泽宇, 刘锴, 刘桂春. 环渤海地区海域承载力测度与时空分异分析. 地理科学, 2014, 34(5): 513-521.
[42] 张继民, 刘霜, 尹韦翰, 杨建强, 叶属峰. 黄河口区域综合承载力评估指标体系初步构建及应用. 海洋通报, 2012, 31(5): 496-501.
[43] Du Y W, Li B Y, Quan X J. Construction and application of DPPD model for evaluating marine resources and environment carrying capacity in China. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119655.
[44] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Callejas Linares A, Susana López Falfán I, Méndez Garcia J, Isabel Suárez Guerrero A, Guadalupe Suárez Guerrero M. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
[45] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131.
[46] Ying H E, Chen S Y, Mao Y Q. Research on marine ecological carrying capacity of Ningbo city in China based on system dynamics. Sustainability, 2022, 14(8): 4568.
[47] 林绍花. 海洋功能区划适宜性评价模型研究. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
[48] Calleja F, Chacón Guzmán J, Alfaro Chavarría H. Marine aquaculture in the Pacific coast of costa rica: identifying the optimum areas for a sustainable development. Ocean & Coastal Management, 2022, 219: 106033.
[49] 耿文倩, 王庆, 战超, 余建奎, 任宗海, 曹印, 李瑞, 钱张帆. 海洋牧场选址适宜性评估——以烟台北部海域为例. 海洋环境科学, 2023, 42(2): 302-308, 314.
[50] 孙静, 杨俊, 席建超. 中国海洋旅游基地适宜性综合评价研究. 资源科学, 2016, 38(12): 2244-2255.
[51] 刁玉杰, 张森琦, 李甫成, 郜时旺, 王晓龙, 贾小丰. 典型电厂海洋 CO_2 地质储存场地选址适宜性评估. 吉林大学学报: 地球科学版, 2016, 46(3): 844-854.
[52] Bello-Pineda J, Ponce-Hernández R, Liceaga-Correa M A. Incorporating GIS and MCE for suitability assessment modelling of coral reef resources. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 114(1): 225-256.
[53] 庞小平, 季青, 李沁彧, 李冰洁. 南极海洋保护区设立的适宜性评价研究. 极地研究, 2018, 30(3): 338-348.
[54] Vayghan A H, Lee M-A, Weng J S, Mondal S, Lin C T, Wang Y-C. Multisatellite-based feeding habitat suitability modeling of albacore tuna in the southern Atlantic Ocean. Remote Sensing, 2020, 12(16): 2515.
[55] 车小英. 滨海区域生态区划研究——以北戴河新区为例. 中国农业资源与区划, 2016, 37(12): 78-83.
[56] 李敏纳, 程叶青, 蔡舒, 周春山. 国际旅游岛建设以来海南省产业空间分异格局及其驱动机制. 地理科学, 2019, 39(6): 967-977.
[57] Jiang X Y, Wang B Y, Fang Q H, Bai P Y, Guo T, Wu Q. Ecological zoning management strategies in China: a perspective of ecosystem services supply and demand. Land, 2024, 13(7): 1112.
[58] Zhou Y J, Shen Y, Yang X X, Wang Z F, Xu L Y. Where to revitalize, and how a rural typology zoning for China. Land, 2021, 10(12): 1336.
[59] 赵威, 薛领. 区域发展战略对国土空间格局演化的影响——以云南省为例. 资源科学, 2022, 44(6): 1252-1266.
[60] Kotowska D, Skórka P, Walasz K. Delineating the number of animal territories using digital mapping and spatial hierarchical clustering in GIS technology. Ecological Indicators, 2019, 107: 105670.
[61] Chen W X, Gu T C, Xiang J W, Luo T, Zeng J, Yuan Y. Ecological restoration zoning of territorial space in China: an ecosystem health perspective. Journal of Environmental Management, 2024, 364: 121371.
[62] Day V, Paxinos R, Emmett J, Wright A, Goecker M. The marine planning framework for south Australia: a new ecosystem-based zoning policy for marine management. Marine Policy, 2008, 32(4): 535-543.
[63] Li F, Xu M, liu Q, Wang Z F, Xu W J. Ecological restoration zoning for a marine protected area: a case study of Haizhouwan National Marine Park, China. Ocean & Coastal Management, 2014, 98: 158-166.
[64] 张国胜, 伏洋, 杨琼, 刘宝康, 李甫. 青海省天然草地类型空间分布特征及气候分区. 草业科学, 2009, 26(1): 23-29.
[65] 杜军, 李培英, 魏巍, 曹成效, 刘乐军. 中国海岸带灾害地质稳定性区划. 自然灾害学报, 2008, 17(4): 1-6.
[66] Huang H Y, Lu W H, Zuo G C, Liu Z Y, Liu C, Wang X L, Li X, Ma Y, Yu J. Ecological distribution patterns in Chinese seas and adjacent waters: Marine ecological zones. Science of The Total Environment, 2023, 905: 167259.
[67] 路文海, 李潇, 崔猛. 构建海洋生态分类分区体系,推动基于生态系统的海洋管理. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 872-880.
[68] Borja A, Pouso S, Galparsoro I, Manca E, Vasquez M, Lu W H, Yang L, Uriarte A. Applying the China's marine resource-environment carrying capacity and spatial development suitability approach to the Bay of Biscay (North-East Atlantic). Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 972448.
[69] 焦念志, 戴民汉, 翦知湣, 王晓雪, 张锐. 海洋储碳机制及相关生物地球化学过程研究策略. 科学通报, 2022, 67(15): 1600-1606.
[70] Kusumaningtyas M A, Hutahaean A A, Fischer H W, Pérez-Mayo M, Ransby D, Jennerjahn T C. Variability in the organic carbon stocks, sources, and accumulation rates of Indonesian mangrove ecosystems. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 218: 310-323.

[71] Zhong Q Q, Huang D K, Wang Q G, Du J Z, Zhang F L, Lin J, Yu T. Terrestrial and marine POC export fluxes estimated by 234Th-238U disequilibrium and δ13C measurements in the East China Sea shelf. Biogeochemistry, 2024, 167(6): 807-827.

[72] Sardessai S, Maya M V, Shetye S, Kumar S P, Fernandes V, Paul J, Ramaiah N. Environmental controls on the seasonal carbon dioxide fluxes in the northeastern Indian Ocean. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2010, 39(2): 192-200.

[73] Pipko I I, Semiletov I P, Pugach S P, Wåhlström I, Anderson L G. Interannual variability of air-sea CO_2 fluxes and carbon system in the East Siberian Sea. Biogeosciences, 2011, 8(7): 1987-2007.

[74] Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, Mazarrasa I, Marbà N. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. Nature Climate Change, 2013, 3(11): 961-968.

[75] Brown P J, Jullion L, Landschützer P, Bakker D C E, Naveira Garabato A C, Meredith M P, Torres-Valdés S, Watson A J, Hoppema M, Loose B, Jones E M, Telszewski M, Jones S D, Wanninkhof R. Carbon dynamics of the Weddell gyre, southern ocean. Global Biogeochemical Cycles, 2015, 29(3): 288-306.

[76] Sarmiento J L, Hughes T M C, Stouffer R J, Manabe S. Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming. Nature, 1998, 393(6682): 245-249.

[77] Sala E, Mayorga J, Bradley D, Cabral R B, Atwood T B, Auber A, Cheung W, Costello C, Ferretti F, Friedlander A M, Gaines S D, Garilao C, Goodell W, Halpern B S, Hinson A, Kaschner K, Kesner-Reyes K, Leprieur F, McGowan J, Morgan L E, Mouillot D, Palacios-Abrantes J, Possingham H P, Rechberger K D, Worm B, Lubchenco J. Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate. Nature, 2021, 592(7854): 397-402.

[78] Barnes D K A, Bell J B, Bridges A E, Ireland L, Howell K L, Martin S M, Sands C J, Soto A M, Souster T, Flint G, Morley S A. Climate mitigation through biological conservation: extensive and valuable blue carbon natural capital in Tristan da Cunha's giant marine protected zone. Biology, 2021, 10(12): 1339.

[79] Muñoz M, Reul A, Guijarro B, Hidalgo M. Carbon footprint, economic benefits and sustainable fishing: Lessons for the future from the Western Mediterranean. Science of The Total Environment, 2023, 865: 160783.

[80] 焦念志, 刘纪化, 石拓. 实施海洋负排放践行碳中和战略. 中国科学:地球科学, 2021, 51(4): 632-643.

[81] Baumann M, Taucher J, Paul A J, Heinemann M, Vanharanta M, Bach L T, Spilling K, Ortiz J, Arístegui J, Hernández-Hernández N, Baños I, Riebesell U. Effect of intensity and mode of artificial upwelling on particle flux and carbon export. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 742142.

[82] Sun X, Shang A R, Wu P, Liu T, Li Y H. A review of CO_2 marine geological sequestration. Processes, 2023, 11(7): 2206.

[83] 孙涵晟, 孙旭梅, 王鑫威, 姜海波. 铁施肥促进海洋浮游植物和生物碳泵的不确定性. 微生物学报, 2022, 62(12): 4592-4605.

[84] 韩广轩, 宋维民, 李远, 肖雷雷, 赵明亮, 初小静, 谢宝华. 海岸带蓝碳增汇:理念、技术与未来建议. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 492-503.

[85] Jia P H, Huang W D, Zhang Z Y, Cheng J X, Xiao Y L. The carbon sink of mangrove ecological restoration between 1988—2020 in Qinglan Bay, Hainan Island, China. Forests, 2022, 13(10): 1547.

[86] Couto T. Modelling the effects of global temperature increase on the growth of salt marsh plants. Applied Ecology and Environmental Research, 2014, 12(3): 753-764.

[87] Kavanaugh M T, Emerson S R, Hales B, Lockwood D M, Quay P D, Letelier R M. Physicochemical and biological controls on primary and net community production across northeast Pacific seascapes. Limnology and Oceanography, 2014, 59(6): 2013-2027.

[88] 刘梅娟, 朱嘉雯, 裘应萍, 何炯英. 森林碳汇资产价值计量研究. 中国农业会计, 2022, (1): 50-54.

[89] Liu C, Liu G Y, Casazza M, Yan N Y, Xu L Y, Hao Y, Franzese P P, Yang Z F. Current status and potential assessment of China's Ocean carbon sinks. Environmental Science & Technology, 2022, 56(10): 6584-6595.

[90] Chi Y, Liu D H, Xie Z L, Wang J. A progressive simulation method to estimate the stocks of surface soil organic carbon and total nitrogen in an estuarine archipelago. Catena, 2022, 209: 105837.

[91] 蔡博峰,朱松丽,于胜民,董红敏,张称意,王长科,朱建华,高庆先,方双喜,潘学标,郑循华.《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读. 环境工程, 2019, 37(8): 1-11.

[92] Bax N, Barnes D K A, Pineda-Metz S E A, Pearman T, Diesing M, Carter S, Downey R V, Evans C D, Brickle P, Baylis A M M, Adler A M, Guest A, Layton K K S, Brewin P E, Bayley D T I. Towards incorporation of blue carbon in Falkland Islands marine spatial planning: a multi-tiered approach. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 872727.

[93] 李冬. 复杂适应系统视角下碳交易特征及运作机制研究. 南方金融, 2018(3): 61-70.