海洋碳汇分类方法框架探索与构建

刘大海[1,2], 董 通[1,2], 刘 超[1,2], 李晓璇[3], 刘镇杭[3], 池 源[1,2]

（1. 自然资源部 第一海洋研究所，山东 青岛 266061；
2. 自然资源部 海岸带科学与综合管理重点实验室，山东 青岛 266061；
3. 中国海洋大学 海洋发展研究院，山东 青岛 266100）

摘 要：海洋是地球上最大的碳汇，对于缓解全球气候变化发挥着关键作用。加快海洋碳汇分类研究，是切实提升对海洋碳汇分类科学认知、推动海洋生态保护修复、促进碳汇市场交易和实现“双碳”目标的重要举措。本研究从“发展-保护-碳汇”综合视角出发，系统梳理了目前海洋碳汇分类的现实困境，致力于构建一个适用于我国的多层次、多维度海洋碳汇分类框架。旨在针对中国特有的海洋生态系统，通过细化碳汇的形成属性、作用机制、空间分布、生态系统类型、碳库种类及物种差异等方面，深入解析海洋碳汇的组成与特点，以揭示海洋碳汇的形成机制、变化趋势和潜在潜力，为海洋碳汇的监测、评估和管理提供科学管理框架，为开展海洋碳汇分区分类提供实践指导。

关键词：海洋碳汇；蓝碳；分类；标准

中图分类号：X145; P741 **文献标志码：**A **文章编号：**1671-6647（2024）02-0358-12

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20240130001

引用格式： 刘大海, 董通, 刘超, 等, 2024. 海洋碳汇分类方法框架探索与构建[J]. 海洋科学进展, 42(2): 358-369. LIU D H, DONG T, LIU C, et al, 2024. Exploration and construction of methodological system for ocean carbon sink classification[J]. Advances in Marine Science, 42(2): 358-369.

政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）发布的第六次评估报告综合报告《气候变化 2023》明确指出，2011—2020 年全球地表温度比 1850—1900 年升高了 1.1 ℃。全球温室气体排放量继续增加，不可持续的能源使用、土地利用、生活方式以及跨区域、国家之间及国家内部、个人之间的消费和生产模式造成了不平等的历史和未来贡献。2023 年《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）第二十八次缔约方大会（COP28）提出，要将“逐步摆脱化石燃料”写入具有强制约束力的最终协议文本。气候变化已然成为 21 世纪人类面临的最严峻挑战之一，关乎人类兴衰存亡和国家战略利益（李晓璇等, 2022）。为应对这一挑战，各国纷纷颁布与碳相关的政策。党的二十大报告强调应积极稳妥推进碳达峰碳中和，并明确指出“提升生态系统碳汇能力”“双碳”“减排增汇”成为了当今世界的“热词”。然而，减排势必会对社会经济发展产生限制，因此，增汇被认为是当前更为有效的应对气候变化的途径。

海洋作为地表最巨大碳库，其碳储量大约是陆地碳库的 20 倍、大气碳库的 50 倍（焦念志, 2021）。全球大约 93% 的 CO_2（40 Tt）储存在海洋中，每年约有 90 Gt 的 CO_2 在海洋中循环（Gruber et al, 2023）。相比森林等生态系统，海洋具有碳储量大且可长期封存的优势。因此，海洋碳汇对于减缓和适应气

收稿日期：2024-01-30
资助项目：江苏省海洋科技创新项目（JSZRHYKJ202203）；国家重点研发计划项目（2023YFC3108103 和 2022YFC3800801）
作者简介：刘大海（1983—），男，正高级工程师，博士，博士生导师，主要从事海洋碳汇、海岸带规划方面研究. E-mail: liudahai@fio.org.cn

（陈 靖 编辑）

候变化至关重要。发展海洋碳汇、提升海洋碳汇能力是助力我国实现“双碳”目标的重要支撑（焦念志等, 2021）。目前，滨海湿地被广泛认可为最重要的海洋碳汇类型之一，各研究领域的学者还指出微型生物碳汇、渔业碳汇等在海洋碳汇中也扮演着重要角色（刘慧等, 2011; 焦念志, 2012; 唐启升等, 2016; 唐剑武等, 2018; 焦念志等, 2021）。然而，一些生态系统（例如珊瑚礁）的海洋碳汇功能属性尚存争议（石拓等, 2021）。且近年来关于海洋碳汇的相关研究更加侧重于核算碳储量与碳通量、揭示碳汇时空变化与影响机制、提供碳收支清单及不确定性、评估碳汇可持续性及增汇模式等方面（池源等, 2018; 刘芳明等, 2019; 常佳楠等, 2022; 段璇瑜等, 2022; 过梦倩等, 2023; 彭修强等, 2023），对于海洋碳汇的分类尚未形成完整、系统和统一的认识（Wu et al, 2022）。我国海岸带区域广泛分布着红树林、盐沼和海草床等蓝碳生态系统，藻类、贝类海水养殖产量居世界首位，海洋碳汇资源丰富且发展潜力巨大（陈小龙等, 2023; Le et al, 2023; Luo et al, 2023）。在气候变化背景和陆海统筹目标下，立足于我国海洋碳汇资源禀赋特性并构建统一的海洋碳汇分类框架有着重要的理论和现实意义，不仅对海洋碳汇调查、监测、模拟和评价具有重要的指导作用，也有助于系统地了解海洋碳汇，更好地推动国家“碳达峰碳中和”重大决策部署的行动落实。

分类（Classification）在海洋碳汇研究中是不可或缺的核心工作。海洋碳汇作为一个复杂的综合体，需要通过分类来深入研究其类型和特征（Howard et al, 2023）。海洋碳汇分类是海洋碳循环、气候变化调控等研究的基础和前提。从分类的一般含义来看，海洋碳汇的分类涉及按照其特定属性来区分不同海域的碳汇类型，即海洋碳汇分类系统是根据海洋环境的综合特征以及碳汇利用的地域差异性规律而建立的（陈小龙等, 2023）。通过按照一定的规律（海洋碳汇与海洋利用特点和从属关系）建立有规则的排列顺序（类别和层次），使众多的海洋碳汇个体能够分门别类、各有归属（刘大海等, 2022）。海洋碳汇的分类涉及多行业和多领域，是比较模糊和复杂的，其分类原则也不够明确，严重影响了人们对于海洋碳汇的整体认识和对其内部联系的认知（杨卫东等, 2023）。因此，需重点关注应对气候变化的海洋碳汇研究工作，尤其是针对国际履约的碳汇框架构建，切实提升对海洋碳汇分类工作的科学认知。本研究基于海洋碳汇分类的现实困境，探索构建适用于我国的多层次、多维度的海洋碳汇分类框架，分类框架依据不同属性、机制、位置、生态系统、碳库类型、物种类型、增汇类型和交易用途，为“碳达峰碳中和”战略下开展海洋碳汇分区分类提供理论参考与实践指导。

1　海洋碳汇分类的现实困境

1.1　海洋碳汇的定义

为充分发挥海洋碳汇在应对气候变化中的重要作用，首先需要明确海洋碳汇的定义。《联合国气候变化框架公约》将碳汇定义为：从大气中清除 CO_2 的过程、活动或机制；《蓝碳：健康海洋对碳的固定作用——快速反应评估报告》指出，蓝碳是指利用海洋活动及海洋生物吸收大气中的 CO_2，并将其固定在海洋中的过程、活动和机制（Nellemann et al, 2009）；HY/T 0305—2021《养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法　碳储量变化法》行业标准将大型藻类碳汇定义为“利用大型藻类从空气或海水中吸收并固定二氧化碳的过程、活动、机制和能力”（全国海洋标准化技术委员会（SAC/TC 283）, 2021）；海洋行业标准 HY/T 0349—2022《海洋碳汇核算方法》将海洋碳汇定义为“红树林、盐沼、海草床、浮游植物、大型藻类、贝类等从空气或海水中吸收并储存大气中的 CO_2 的过程、活动和机制”（全国海洋标准化技术委员会（SAC/TC 283）, 2022）。

实际上在面对不同的对象与问题时，研究者会对海洋碳汇的时空内涵进行更加具体的设定与解释。从海洋固碳原理角度，固碳方式包括溶解度泵、生物碳泵、微型生物碳泵和碳酸盐泵等（李三

忠等, 2023)；从空间位置考虑，海洋碳汇包括深海、浅海、海岛海岸带等生态系统中固定的碳(李加林等, 2022)；从生物载体看，海洋碳汇包括红树林、海草与海藻等捕获的 CO_2 及其形成沉积物的过程，以及通过养殖贝藻、部分鱼类等吸收水体中 CO_2 的过程(章海波等, 2015)；在时间维度上，短期的碳汇仅为“表观”的碳汇，即 CO_2 被吸收、固定后又很快重新分解、释放，进入新的物质循环过程中；长期的碳汇才是“实际”的碳汇，即在相当长时间内被吸收的 CO_2 将不再回到地表圈层参与活跃的碳循环，能够对气候变化产生积极作用(王法明等, 2021)。因此，“海洋碳汇”定义不应趋于片面化，需确保科学术语的严谨性和准确性(陈小龙等, 2023; 宋金明等, 2023)。

1.2 现实需求

海洋碳汇分类与现实需求之间存在密切关系。海洋碳汇的分类可以为国家制定国家自主贡献提供科学依据，同时也为碳交易市场提供碳增汇项目。然而，不同的现实需求也往往促使海洋碳汇的分类方法存在一定差异。不同国家或地区的经济、环境和政治情况各不相同，因此，在海洋碳汇分类时，应全面考虑各方面因素，实现碳增汇目标的同时，满足利益相关方的现实需求。这都是分类方法框架构建的必要性和现实意义。

1.2.1 国家自主贡献

国家自主贡献(Nationally Determined Contributions, NDCs)是《巴黎协定》确定的“自下而上”的核心减排机制，各国将以自主决定的方式确定其减排目标和行动。这一机制的重要性在于它鼓励并促使各国积极参与全球气候变化应对，并根据各自国情、发展需求和能力，制定符合本国实际的减排计划。海洋碳汇作为碳循环的重要组成部分，对全球碳平衡具有不可忽视的影响。因此，明确海洋碳汇分类对于国家评估和确定其 NDCs 中关于碳汇的目标至关重要。不同类型的海洋碳汇包括海洋生物固碳、海底沉积物和海洋植物等，它们在吸收和储存大量 CO_2 方面具有不同的潜力。通过对海洋碳汇进行分类和评估，国家可以更好地了解各类碳汇的特点和潜力，制定出针对性更强的减排和固碳策略。此外，海洋碳汇分类还有助于国家建立监测、报告和验证(Monitoring, Reporting, and Verification, MRV)机制，即利用卫星遥感和传感器等现代技术手段，实时监测和追踪不同类型的海洋碳汇动态变化，国家评估其时空格局并采取必要的行动来实现目标。例如，国家发现某一类型的海洋碳汇潜力巨大，但受到威胁或未得到充分利用，就可积极采取措施保护和恢复这一生态系统，通过提高碳吸收能力，实现对 NDCs 的掌控。

1.2.2 碳交易

碳市场作为一种全新的环境经济政策工具，采用市场化方式解决环境问题，并发挥市场在资源配置中的决定性作用。在碳交易市场的发展过程中，海洋碳汇分类有助于推动其进一步发展。不同类型的海洋碳汇具有不同的经济价值和可持续发展潜力，因此，对海洋碳汇进行分类可为碳交易市场提供更多的选择和灵活性。具体来说，在海洋碳汇量化方面，不同类型的海洋碳汇有差异化的存储能力和稳定性，海洋碳汇分类有利于更精细地量化海洋中的碳储存量；在确定碳交易对象方面，确定哪些碳汇属于可交易对象，对于制定碳交易政策非常重要。例如，藻类和海草床等生物碳汇吸收大量 CO_2 并将其储存在生物体内，因此可以作为碳交易对象。溶解态碳则因为其稳定性较差且难以追踪，较难作为碳交易对象；在确定交易规则与价值方面，不同类型海洋碳汇对减排能力的贡献和稳定性有所不同，因此其价值也会有所差异。而海洋碳汇分类有助于理解生态功能、贡献和潜在风险，制定相对合理的交易规则和碳汇交易价格。

1.2.3 科学困境

海洋碳汇分类的科学困境具有复杂性和挑战性，它涉及到对海洋碳汇组成和特点的准确理解。

首先，海洋碳汇类型的分类受海洋生物圈和地球系统动力学的影响。海洋中存在多种不同生态系统，如浅海和深海、珊瑚礁和海草床等。这些生态系统的特征和功能对于海洋碳汇的形成和储存具有重要影响。然而，目前对于这些不同生态系统的具体分类仍存在许多争议。其次，海洋碳汇涉及多个过程和机制，如生物泵、物理泵、碳酸盐泵等，导致其分类困难。此外，不同海区的海洋碳汇特性也存在差异，这加大了分类复杂性。因而，充分认识与理解海洋碳汇的组成和特点是进行海洋碳汇分类工作的前提。

1.3　海洋碳汇的组成

通常来说，海洋碳汇一般涵盖滨海生态系统碳汇和海洋生态系统碳汇。滨海生态系统碳汇包括红树林、盐沼和海草床等，海洋生态系统碳汇包含藻类、贝类和浮游植物等（白雁等, 2023）。

红树林是由生长在热带和亚热带地区潮间带、河口以及近岸海域的特定树种组成的木本植物群落，在固定碳储、净化海水、防风消浪、截留养分等方面发挥着重要的生态功能（Gu et al, 2022），被认为是潜在的碳库（Jennerjahn, 2021）。海草床的高效碳汇能力来自其高生产力、悬浮物捕获能力以及有机碳在底部沉积物中的低分解率，海草植物生产的 15%～28% 被长期埋存于海底，对海洋生物圈中的碳循环和 CO_2 吸收发挥重要作用（Stankovic et al, 2023b）。海草床是自养型生态系统，据 2010 年数据统计，全球平均群落净生产量可达（27.2±5.8）mmol $O_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$（邱广龙等, 2014）。同时，海草床广泛分布，为海洋生物提供栖息地和觅食地，是生态系统功能的重要组成部分（Dahl et al, 2023; Stankovic et al, 2023a）。盐沼存在于潮间带生态系统中，从北极到亚热带海岸线都有分布，并集中在中高纬度地区，对渔业、海岸线和当地生物群落的健康发展至关重要（Huang et al, 2023）。盐沼的特点在于潮汐作用下经历周期性的干湿交替，导致盐沼湿地环境在厌氧与好氧状态间歇性转换，因此其固碳能力显著，碳埋藏速率为 168 g $C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$，比陆地森林高 40 倍（王法明等, 2021）。我国滨海盐沼湿地每年可埋藏 96.52～274.88 万 t CO_2，是我国三大蓝碳生态系统（红树林、盐沼和海草床生态系统）中最大的固碳储碳系统（Ma et al, 2024; Zhao et al, 2024）。

海水养殖的大型藻类通过光合作用将海水中的溶解无机碳转化为有机碳，在生长过程中，大型藻类吸收海水中的营养盐，导致海水的碱度和 pH 值上升，从而促进大气 CO_2 向海水扩散（张永雨等, 2017; Weerakkody et al, 2023）。贝类在海水中扮演着重要的碳汇角色，它们通过两个主要机制实现固碳：首先，通过吸收海水中的碳酸氢根形成碳酸钙躯壳，同时，通过滤食和同化海水中的浮游植物以及颗粒有机碎屑等方式形成软组织；其次，贝类生长过程中产生的粪便和假粪等生物沉积物有助于加速有机碳的沉降，进而形成大陆架沉积碳库。这些机制共同赋予了贝类在海洋生态系统中的碳汇功能（He et al, 2023）。浮游植物是海洋中最主要的初级生产者，通过光合作用将海水中 CO_2 固定成为有机碳（Guo et al, 2023），虽然只占生物圈初级生产者生物量的 0.2%，却贡献了全球近 50% 的初级生产量（Wang et al, 2023）。浮游植物的死亡和被各营养级消费者摄食后的沉降，形成有机碳的生物泵，是海洋生物碳汇的主要途径（Wang et al, 2013）。

1.4　海洋碳汇的特点

1.4.1　滨海湿地通过多种途径封存碳

滨海湿地通过多种途径封存碳，包括短期内被封存在生物质中，以及较长时间封存在沉积物中（Duarte et al, 2005; Lo Iacono et al, 2008; Fourqurean et al, 2012）。这一复杂的碳封存机制在垂直方向和陆-海水平方向上都发挥作用。在垂直方向上，海岸带固碳过程包括生物-大气系统碳交换和土壤-大气界面碳交换。生物-大气系统碳交换是指海岸带蓝碳植被通过光合作用吸收空气中的 CO_2 进行生

物固碳，其中大部分通过植物和微生物的呼吸作用几乎立即返回大气，或暂时储存在植物叶片中，其余部分则较长时间地封存在木质生物量和土壤中（Hopkinson et al, 2012）。土壤-大气界面则是指生活在海岸带区域的土壤自养微生物同化大气 CO_2 的过程，潮汐会使土壤保持潮湿或被海水淹没，抑制微生物的活动，减缓分解速度，导致碳在土壤中逐渐积累并保持相对稳定（Mcleod et al, 2011）。在陆-海水平方向上，受到海浪、潮汐等动力影响，同时得益于海岸带植被生态系统的结构复杂性（根系、茂密植被、海草系统中的叶冠），使其能够高效地捕获来自内部和外部河流和海洋来源的沉积物和相关有机碳（“横向输入的碳”）（Pendleton et al, 2012; 张广帅等, 2021）。

1.4.2 蓝碳沉积物碳库难饱和且潜力巨大

植物生物量中的碳可存储数年至数十年（Mcleod et al, 2011），而沉积物中的碳可存储千年（Duarte et al, 2005）。与陆地土壤不同，健康的红树林、盐沼和海草生长过程中的沉积物不会达到碳饱和（Mcleod et al, 2011）。假设生态系统保持健康，不断固碳的沉积物会随着海平面上升而垂直堆积（McKee et al, 2007）。因此，随着时间推移，沉积物碳固存率和碳固存量的大小可能会持续增加（Chmura et al, 2003; Mcleod et al, 2011）。与热带雨林相比，蓝碳的持续性更强。研究表明，热带雨林最多可封存碳几十年或几个世纪，而蓝碳可以储存数千年（Chambers et al, 2001）。例如，在西班牙 Portlligat 湾的海草床和伯利兹的红树林系统，积累了厚度超过 10 m 且超过 6 000 年的富碳沉积物（Lo Iacono et al, 2008）。

1.4.3 海洋碳汇碳封存速率高且碳封存量大

近海生态系统中，海岸带植被生态系统虽然地上生物量和覆盖率较小，但由于沉积物中有机碳固存率高，为长期固碳贡献显著（Mcleod et al, 2011）。近海沉积碳汇的特点凸显在以下 3 方面：①近海生态系统受到陆地碳和人为营养物质的影响，拥有高初级生产力和复杂的生物群落结构，这使得大量有机碳被输送到近海沉积物中。②由于近海水域较浅，颗粒有机碳（Particulate Organic Carbon, POC）能够快速沉积到海底，而缺氧环境减缓了其分解过程，从而有助于长期固碳。③近海高速的沉积速率有助于快速埋藏有机质，提高保护效率，因此沉积物中的有机质固存量同样较高。

1.4.4 海-气 CO_2 通量对全球碳循环的贡献显著

海-气 CO_2 通量是指海洋与大气之间的 CO_2 交换过程，对维持全球碳循环平衡发挥关键作用。海洋通过物理、化学和生物过程吸收和释放大气中的 CO_2。在物理过程中，海水温度和盐度的差异影响 CO_2 的溶解度，从而调节海-气 CO_2 交换；化学过程涉及溶解的 CO_2 与水中盐类反应，形成碳酸盐平衡，进而影响 CO_2 的吸收与释放；生物过程则涉及海洋生物通过光合作用吸收 CO_2，将其转化为有机碳，部分通过食物链转移，部分则通过死亡、分解沉积到海底。这些复杂的交换机制确保海洋能有效吸收大气中的 CO_2，缓解温室效应（Takahashi et al, 2002; Yang et al, 2021）。同时，海-气 CO_2 通量亦受到多种因素影响，包括海洋酸化、温度变化和人为排放，这些因素可能改变通量的方向和强度，对碳循环和气候变化产生深远影响（Gu et al, 2023）。

1.4.5 微型生物碳泵长期固碳

微型生物碳泵指的是海洋微型生物通过吸收 CO_2 生产有机物，并将其转化为难以分解的碳质物质，从而促进碳的长期封存的过程。这一过程主要由浮游植物、细菌、真菌和原生动物等微型生物群体通过光合作用和其他生化反应完成。浮游植物吸收 CO_2 并通过光合作用产生有机物，这些有机物可以被其他微生物消耗或转化，形成胶体和颗粒态有机碳，部分随后沉积至深海，实现长期固碳（Jiao et al, 2010, 2011; Chen, 2011）。微型生物碳泵的效率受到营养盐供给、光照条件和海洋环境变化等因素影响。

2　分类体系

2.1　制订原则

2.1.1　科学性与系统性相结合的原则

海洋碳汇分类体系应全面、准确地反映海洋碳汇的类型、特征和规律。分类体系应考虑碳汇的内部相似性与外部差异性，形成清晰逻辑、完整规范的结构。此外，应以海洋碳汇的科学定义为基础，综合考虑碳汇的固碳机制、空间位置、生物载体、碳库类型、物种类型、增汇类型和交易用途等因素，确保分类体系准确专一，避免交叉和空缺问题。同时，为满足不同层次、需求的管理和利用，分类体系应具有层次性和系统性，能够从多个角度对海洋碳汇进行分类，并形成一定的层次结构。

2.1.2　实用性与可操作性相结合的原则

分类体系必须具备较强的逻辑性，便于理解和应用，可为海洋碳汇的研究、监测、评估和管理提供清晰明了的分类依据。在追求实用性和可操作性的同时，分类体系应根据不同碳汇的特点和差异性设计相应的分类标准和方法，考虑数据的可获取性，选择能够得到广泛数据支持的分类标准，以确保在实际应用中能够充分利用现代技术手段，如卫星和航空遥感监测。同时，无论是实地调查、监测还是管理，分类体系都应当方便易遵循，能够在实地调查和样地研究中具备可操作性。

2.1.3　动态性与稳定性相结合的原则

海洋碳汇是一个动态的过程，受到多种因素的影响，为有效应对海洋碳汇的复杂性和动态变化，海洋碳汇分类体系的设计应兼具一定的灵活性、前瞻性和适应性，能够随着环境和条件的变化而做出相应的调整，以便适应不同时期和不同情况下的业务需求。同时，为保证分类体系的科学性和可信度，稳定性原则同样重要，频繁的调整会导致分类体系的可靠性受到质疑，影响其在实际工作中的应用。因此，在追求灵活性的同时，需确保分类体系基本框架的相对固定，以期为长期的碳汇研究提供一致可靠的依据。

2.1.4　国际性与可持续性相结合的原则

海洋碳汇分类体系应与国际接轨，确保与国际相关标准一致，方便国际交流与合作，充分考虑不同国家和地区的差异，确保全球范围内的可比性和可操作性。同时，分类体系应兼顾可持续发展需求，将海洋生态、海洋经济和社会因素纳入其中，防止对海洋生态系统造成不可逆转的伤害。此外，分类体系应具有扩展性，以适应未来的发展，确保科学性和实用性不滞后于科技进步。

2.2　海洋碳汇分类框架

为了构建一个清晰、科学的海洋碳汇分类体系，本研究采用面分类法，从形成属性、作用机制、空间位置、生态系统、碳库类型、物种类型、增汇类型和交易用途八个角度对海洋碳汇类型进行分类，每个分类下都有若干类目，有助于全面理解和评估海洋碳汇的各种类型（图 1），以下是对海洋碳汇的详细分类。

1）按照形成属性分为海洋自然碳汇和海洋人工碳汇两类。

2）按照作用机制分为溶解度泵碳汇、海洋生物泵碳汇、碳酸盐泵碳汇、微型生物碳泵和潮间带植物碳泵碳汇五类。

3）按照空间位置分为滨海型海洋碳汇（水深 20 m 以浅的潮间带区域）、浅海型海洋碳汇（水深在 20～200 m 范围内的海域）、半深海型海洋碳汇（水深 200 m 以深至 2 000 m 范围内的海域）和深海型海洋碳汇（水深大于 2 000 m 的海域）四类。

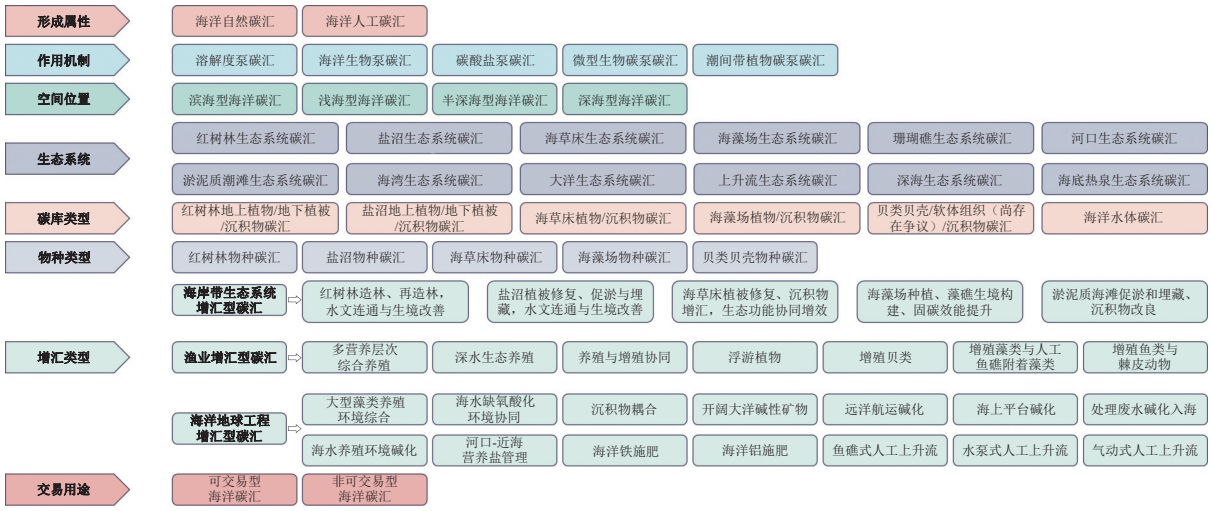

图 1 海洋碳汇分类框架

Fig. 1 Classification framework of marine carbon sink

4)按照生态系统分为红树林生态系统碳汇、盐沼生态系统碳汇、海草床生态系统碳汇、海藻场生态系统碳汇、珊瑚礁生态系统碳汇、河口生态系统碳汇、淤泥质潮滩生态系统碳汇、海湾生态系统碳汇、大洋生态系统碳汇、上升流生态系统碳汇、深海生态系统碳汇和海底热泉生态系统碳汇。

5)按照碳库类型分为红树林地上植物/地下植被/沉积物碳汇、盐沼地上植物/地下植被/沉积物碳汇、海草床植物/沉积物碳汇、海藻场植物/沉积物碳汇、贝类贝壳/软体组织(尚存在争议)/沉积物碳汇以及海洋水体碳汇。

6)按照海洋碳汇的物种类型，大体分为红树林物种碳汇、盐沼物种碳汇、海草床物种碳汇、海藻场物种碳汇和贝类贝壳物种碳汇(其中，贝类贝壳物种碳汇尚未形成共识)。

7)按照海洋碳汇的增汇类型大体可分为海岸带生态系统增汇型碳汇、渔业增汇型碳汇和海洋地球工程增汇型碳汇，具体包括以下 3 种类型：①海岸带生态系统增汇型碳汇，包括红树林造林、再造林、水文连通与生境改善，盐沼植被修复、促淤与埋藏、水文连通与生境改善，海草床植被修复、沉积物增汇、生态功能协同增效，海藻场种植、藻礁生境构建、固碳效能提升，淤泥质潮滩促淤和埋藏、沉积物改良型碳汇等。②渔业增汇型碳汇，包括多营养层次综合养殖、深水生态养殖、养殖与增殖协同、浮游植物、增殖贝类、增殖藻类与人工鱼礁附着藻类、增殖鱼类与棘皮动物型碳汇等。③海洋地球工程增汇型碳汇，包括大型藻类养殖环境综合、海水缺氧酸化环境协同、沉积物耦合、开阔大洋碱性矿物、远洋航运碱化、海上平台碱化、处理废水碱化入海、海水养殖环境碱化、河口-近海营养盐管理、海洋铁施肥、海洋铝施肥、鱼礁式人工上升流、水泵式人工上升流、气动式人工上升型碳汇等。

8)按照海洋碳汇的交易用途划分，分为可交易型和非可交易型海洋碳汇。

3 分类框架的应用与启示

3.1 应 用

基于碳汇的形成属性，海洋碳汇可划分为自然碳汇与人工碳汇两大类，这一分类从本质上区分了自然和人工碳汇。当前国际共识认为，人工碳汇才属于在积极应对气候变化方面的人为贡献，同时也是可交易的碳汇。因此，对自然碳汇和人工碳汇进行根本区分，为深入研究如何有效实施增汇

和开展碳交易提供了必要前提。按照作用机制海洋碳汇可以划分为溶解度泵碳汇、海洋生物泵碳汇、碳酸盐泵碳汇和微型生物碳泵碳汇，这种分类有助于揭示不同机制在碳的吸收和储存过程中的作用，为未来预测海洋对气候变化的响应提供了更为准确的模型。基于地理空间位置的分类有助于深化对不同地域碳汇分布及其对全球气候系统影响的理解，为海洋碳汇的有效管理提供理论指导，为不同地区制定更具针对性和细致化的气候适应策略提供支撑。基于生态系统的分类有助于深入了解不同生态系统对碳的吸收和存储机制，为生态系统保护和恢复提供了科学依据。基于碳库类型的分类可为深入研究碳在不同存储介质中的变化规律提供机会，有助于了解碳在海洋系统中动态平衡和碳库类型的固碳能力。根据物种类型分类有助于理解不同物种对海洋碳汇的贡献，从而更好地保护和管理这些生态系统。基于增汇类型的分类提供规范化的增汇方案，包括植被修复、水文改善、养殖环境综合工程等，对于研制和开发海洋碳汇增汇技术、项目与生态工程提供了科学指导。根据交易用途分为可交易型和非可交易型碳汇，这一分类体现了碳汇在碳市场中的角色，为碳交易提供了分类基准，有助于制定碳市场政策和规范碳金融。

总的来说，对海洋碳汇的形成属性、作用机制、空间位置、生态系统、碳库类型、物种类型、增汇类型、交易用途等进行详尽划分，为后续相关研究奠定了坚实的理论基础。该分类框架有助于提高海洋碳汇监测的效率和准确性，支持海洋碳汇评估中评估方法、指标和数据的确定，为海洋生态系统的保护和恢复提供科学基础，为碳市场政策制定提供有力支持。

3.2　启　示

海洋碳汇分类框架揭示了海洋碳汇的多样性和复杂性，为深入理解其生态学意义和经济价值提供了基础。本文提出的分类框架有助于更精准地评估和管理海洋碳汇，以增强其对气候变化的适应能力，并制定科学合理的保护和管理措施。在全球气候治理层面，海洋碳汇分类框架为科学决策提供了基础，能够准确评估碳排放和碳吸收的变化，有助于国家更科学地制定气候变化应对政策，推动全球碳减排目标的实现；细致的分类体系还有助于制定更有针对性的海洋生态系统保护措施，并提供创新的气候适应策略，促进生态系统多样性，提升地球生态系统的稳定性和韧性；通过对海洋碳汇的分类，更好地理解可交易型碳汇的性质，促进建立更健康和可持续的碳交易市场，推动碳金融的发展，实现“碳中和”目标；深入研究增汇机制和生态系统有助于提高碳汇管理效率，最大限度地提高碳汇的存储能力。同时，本研究提出的分类框架也为国际合作搭建了桥梁，海洋碳汇问题涉及到全球范围内的海洋生态系统，需要各国共同努力来解决。通过共享研究成果和经验，不同国家形成合作共识，共同应对气候变化挑战。这种合作有助于促进技术转移、知识共享和人才培养，为海洋碳汇的管理和保护提供更多资源和支持。

参考文献 (References):

白雁, 陈一宁, 2023. 认知区域海洋碳汇, 服务地方蓝碳发展[J]. 海洋学研究, 41(1): 2. BAI Y, CHEN Y N, 2023. Recognizing regional ocean carbon sinks and serving local blue carbon development[J]. Journal of Marine Sciences, 41(1): 2.

常佳楠, 段元亮, 张建琳, 等, 2022. 枸杞岛贻贝养殖海域碳通量及固碳能力研究[J]. 中国水产科学, 29(11): 1589-1600. CHANG J N, DUAN Y L, ZHANG J L, et al, 2022. Carbon flux and carbon sequestration capacity in a shellfish culture area of Gouqi Island[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 29(11): 1589-1600.

陈小龙, 狄乾斌, 侯智文, 等, 2023. 海洋碳汇研究进展及展望[J]. 资源科学, 45(8): 1619-1633. CHEN X L, DI Q B, HOU Z W, et al, 2023. Research progress and prospect of marine carbon sink[J]. Resources Science, 2023, 45(8): 1619-1633.

池源, 石洪华, 孙景宽, 等, 2018. 近30年来黄河三角洲植被净初级生产力时空特征及主要影响因素[J]. 生态学报, 38(8): 2683-2697. CHI Y, SHI H H, SUN J K, et al, 2018. Spatio-temporal characteristics and main influencing factors of vegeta-

tion net primary productivity in the Yellow River Delta in recent 30 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 38(8): 2683-2697.

段璇瑜, 龚文峰, 孙雨欣, 等, 2022. 海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J]. 水土保持通报, 42(5): 301-311. DUAN X Y, GONG W F, SUN Y X, et al, 2022. Land use change and its impact on temporal and spatial evolution of carbon storage in coastal zone of Hainan Island[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 42(5): 301-311.

过梦倩, 吴正杰, 单亦轲, 2023. 浙江省海洋碳汇资源及潜力评估[J/OL]. 海洋开发与管理: 1-17[2023-12-14]. https://doi.org/10.20016/j.cnki.hykfygl.20231214.001. DOI: 10.20016/j.cnki.hykfygl.20231214.001. GUO M Q, WU Z J, SHAN Y K, 2023. Assessment of marine carbon sink resources and potential in Zhejiang Province[J/OL]. Ocean Development and Management: 1-17[2023-12-14]. https://doi.org/10.20016/j.cnki.hykfygl.20231214.001. DOI:10.20016/j.cnki.hykfygl.20231214.001.

焦念志, 2012. 海洋固碳与储碳: 并论微型生物在其中的重要作用[J]. 中国科学: 地球科学, 42(10): 1473-1486. JIAO N Z, 2012. Carbon fixation and sequestration in the ocean, with special reference to the microbial carbon pump[J]. Scientia Sinica Terrae, 2012, 42(10): 1473-1486.

焦念志, 2021. 研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求[J]. 中国科学院院刊, 36(2): 179-187. JIAO N Z, 2021. Developing ocean negative carbon emission technology to support national carbon neutralization[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 36(2): 179-187.

焦念志, 刘纪化, 石拓, 等, 2021. 实施海洋负排放践行碳中和战略[J]. 中国科学: 地球科学, 51(4): 632-643. JIAO N Z, LIU J H, SHI T, et al, 2021. Deploying ocean negative carbon emissions to implement the carbon neutrality strategy[J]. Scientia Sinica Terrae, 51(4): 632-643.

李加林, 沈满洪, 马仁锋, 等, 2022. 海洋生态文明建设背景下的海洋资源经济与海洋战略[J]. 自然资源学报, 37(4): 829-849. LI J L, SHEN M H, MA R F, et al, 2022. Marine resource economy and strategy under the background of marine ecological civilization construction[J]. Journal of Natural Resources, 37(4): 829-849.

李三忠, 刘丽军, 索艳慧, 等, 2023. 碳构造: 一个地球系统科学新范式[J]. 科学通报, 68(4): 309-338. LI S Z, LIU L J, SUO Y H, et al, 2023. Carbon tectonics: a new paradigm for earth system science[J]. Chinese Science Bulletin, 68(4): 309-338.

李晓璇, 刘大海, 2022. 碳边界调节机制下的海洋经济发展影响与对策[J]. 自然资源情报, (6): 1-7. LI X X, LIU D H, 2022. Impact and countermeasures on marine economic development in the context of Carbon Border Adjustment Mechanism[J]. Natural Resources Information, (6): 1-7.

刘大海, 董通, 李彦平, 等, 2022. 关于海洋自然资源调查监测体系构建的思考[J]. 测绘科学, 47(8): 36-44, 78. LIU D H, DONG T, Ll Y P, et al, 2022. Reflections on the construction of marine natural resources survey and monitoring system[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(8): 36-44, 78.

刘芳明, 刘大海, 郭贞利, 2019. 海洋碳汇经济价值核算研究[J]. 海洋通报, 38(1): 8-13, 19. LIU F M, LIU D H, GUO Z L, 2019. Study on economic value accounting of ocean carbon sink[J]. Marine Science Bulletin, 38(1): 8-13, 19.

刘慧, 唐启升, 2011. 国际海洋生物碳汇研究进展[J]. 中国水产科学, 18(3): 695-702. LIU H, TANG Q S, 2011. Review on worldwide study of ocean biological carbon sink[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 18(3): 695-702.

彭修强, 闫玉茹, 孙祝友, 等, 2023. 江苏盐城滨海盐沼湿地沉积物有机碳含量及碳储量研究[J]. 海洋通报, 42(4): 407-417. PENG X Q, YAN Y R, SUN Z Y, et al, 2023. Sediment organic carbon content and its storage in Yancheng coastal salt marshes of Jiangsu Province[J]. Marine Science Bulletin, 42(4): 407-417.

全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2021. 养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法 碳储量变化法: HY/T 0305—2021[S]. 北京: 中国标准出版社: 2-5. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China, 2021. Estimation method of maricultural seaweed and bivalve carbon sink-Carbon stock variation method: HY/T 0305—2021[S]. Beijing: Standards Press of China: 2-5.

全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2022. 海洋碳汇核算方法: HY/T 0349—2022[S]. 北京: 中国标准出版社: 2-5. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China, 2022. Accounting methods for ocean carbon sink: HY/T 0349—2022[S]. Beijing: Standards Press of China: 2-5.

邱广龙, 林幸助, 李宗善, 等, 2014. 海草生态系统的固碳机理及贡献[J]. 应用生态学报, 25(6): 1825-1832. QIU G L, LIN X

Z, LI Z S, et al, 2014. Seagrass ecosystems: contributions to and mechanisms of carbon sequestration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(6): 1825-1832.

石拓, 郑新庆, 张涵, 等, 2021. 珊瑚礁: 减缓气候变化的潜在蓝色碳汇[J]. 中国科学院院刊, 36(3): 270-278. SHI T, ZHENG X Q, ZHANG H, et al, 2021. Coral reefs: potential blue carbon sinks for climate change mitigation[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 36(3): 270-278.

宋金明, 曲宝晓, 李学刚, 等, 2023. 海洋碳汇观测与评估的现状与思考[J]. 海洋科学进展, 41(4): 577-592. SONG J M, QU B X, LI X G, et al, 2023. Estimate of ocean carbon sink: current status and reflections[J]. Advances in Marine Science, 41(4): 577-592.

唐剑武, 叶属峰, 陈雪初, 等, 2018. 海岸带蓝碳的科学概念、研究方法以及在生态恢复中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 48(6): 661-670. TANG J W, YE S F, CHEN X C, et al, 2018. Coastal blue carbon: concept, study method, and the application to ecological restoration[J]. Scientia Sinica Terrae, 48(6): 661-670.

唐启升, 刘慧, 2016. 海洋渔业碳汇及其扩增战略[J]. 中国工程科学, 18(3): 68-73. TANG Q S, LIU H, 2016. Strategy for carbon sink and its amplification in marine fisheries[J]. Strategic Study of CAE, 18(3): 68-73.

王法明, 唐剑武, 叶思源, 等, 2021. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J]. 中国科学院院刊, 36(3): 241-251. WANG F M, TANG J W, YE S Y, et al, 2021. Blue carbon sink function of Chinese coastal wetlands and carbon neutrality strategy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 36(3): 241-251.

杨卫东, 曾联波, 李想, 2023. 碳汇效应及其影响因素研究进展[J]. 地球科学进展, 38(2): 151-167. YANG W D, ZENG L B, LI X, 2023. Advances in research of carbon sinks and their influencing factors evaluation[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(2): 151-167.

张广帅, 蔡悦荫, 闫吉顺, 等, 2021. 滨海湿地碳汇潜力研究及碳中和建议——以辽河口盐沼湿地为例[J]. 环境影响评价, 43(5): 18-22. ZHANG G S, CAI Y Y, YAN J S, et al, 2021. Study on carbon sequestration potential of coastal wetland ecosystem and suggestions for carbon neutrality: a case study of salt marsh in Liaohe Delta[J]. Environmental Impact Assessment, 43(5): 18-22.

章海波, 骆永明, 刘兴华, 等, 2015. 海岸带蓝碳研究及其展望[J]. 中国科学: 地球科学, 45(11): 1641-1648. ZHANG H B, LUO Y M, LIU X H, et al, 2015. Current researches and prospects on the coastal blue carbon[J]. Scientia Sinica Terrae, 45(11): 1641-1648.

张永雨, 张继红, 梁彦韬, 等, 2017. 中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 47(12): 1414-1424. ZHANG Y Y, ZHANG J H, LIANG Y T, et al, 2017. Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China[J]. Scientia Sinica Terrae, 47(12): 1414-1424.

CHAMBERS J Q, HIGUCHI N, TRIBUZY E S, et al. 2001. Carbon sink for a century[J]. Nature, 410: 429.

CHEN C-T A, 2011. Microbial carbon pump: additional considerations[J]. Nature Reviews Microbiology, 9: 555.

CHMURA G L, ANISFELD S C, CAHOON D R, et al, 2003. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 17(4): 1111.

DAHL M, MCMAHON K, LAVERY P S, et al, 2023. Ranking the risk of CO_2 emissions from seagrass soil carbon stocks under global change threats[J]. Global Environmental Change, 78: 102632.

DUARTE C M, MIDDELBURG J J, CARACO N, 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle[J]. Biogeosciences, 2: 1-8.

FOURQUREAN J W, DUARTE C M, KENNEDY H, et al, 2012. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock[J]. Nature Geoscience, 5: 505-509.

GU X, ZHAO H, PENG C, et al, 2022. The mangrove blue carbon sink potential: evidence from three net primary production assessment methods[J]. Forest Ecology and Management, 504: 119848.

GU Y Y, KATUL G G, CASSAR N, 2023. Multiscale temporal variability of the global Air-Sea CO_2 flux anomaly[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 128(6): e2022JG006934.

GUO S J, WANG F, LIANG J H, et al, 2023. Phytoplankton carbon biomass: insights from the eastern Indian Ocean[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 202: 104190.

GRUBER N, BAKKER D C E, DEVRIES T, et al, 2023. Trends and variability in the ocean carbon sink[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 4: 119-134.

HE Y X, ZHANG F X, 2023. A game study on the implementation of marine carbon sink fisheries in the context of carbon neutrality: analysis of the tripartite behavior of fishery practitioners, research institutions, and the government[J]. Marine Policy, 147: 105365.

HOPKINSON C S, CAI W J, HU X P, 2012. Carbon sequestration in wetland dominated coastal systems: a global sink of rapidly diminishing magnitude[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 4(2): 186-194.

HOWARD J, SUTTON-GRIER A E, SMART L S, et al, 2023. Blue carbon pathways for climate mitigation: known, emerging and unlikely[J]. Marine Policy, 156: 105788.

HUANG Y Z, XIAO X, 2023. Role of biochar in raising blue carbon stock capacity of salt marshes[J]. Pedosphere, 34(1): 19-22.

JENNERJAHN T C, 2021. Relevance and magnitude of 'Blue Carbon' storage in mangrove sediments: carbon accumulation rates vs. stocks, sources vs. sinks[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 248: 107156.

JIAO N Z, HERNDL G J, HANSELL D A, et al, 2010. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean[J]. Nature Reviews Microbiology, 8(8): 593-599.

JIAO N Z, TANG K, CAI H G, et al, 2011. Increasing the microbial carbon sink in the sea by reducing chemical fertilization on the land[J]. Nature Reviews Microbiology, 9(1): 75.

LE C Y, FENG J C, SUN L W, et al, 2023. Co-benefits of carbon sink and low carbon food supply via shellfish and algae farming in China from 2003 to 2020[J]. Journal of Cleaner Production, 414: 137436.

LO IACONO C, MATEO M A, GRÁCIA E, et al, 2008. Very high-resolution seismo-acoustic imaging of seagrass meadows (Mediterranean Sea): implications for carbon sink estimates[J]. Geophysical Research Letters, 35(18): L18601.

LUO H T, FU Y Z, SHI J, et al, 2023. Carbon sink potential and environmental benefits of seaweed: a case study of the seaweed cultivation industry on China coast[J]. Aquaculture, 572: 739494.

MA Z W, WU Y N, CUI Y, et al, 2024. Coastal distribution and driving factors for blue carbon fractions in the surface soil of a warm-temperate salt marsh in China[J]. Chemosphere, 350: 141044.

MCKEE K L, CAHOON D R, FELLER I C, 2007. Caribbean mangroves adjust to rising sea level through biotic controls on change in soil elevation[J]. Global Ecology and Biogeography, 16(5): 545-556.

MCLEOD E, CHMURA G L, BOUILLON S, et al, 2011. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2[J]. Frontiers in Ecology & the Environment, 9(10): 552-560.

NELLEMANN C, CORCORAN E, DUARTE C, et al, 2009. Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon[R]. Norway: Birkeland Trykkeri AS, Norway.

PENDLETON L, DONATO D C, MURRAY B C, et al, 2012. Estimating global "blue carbon" emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems[J]. PLoS One, 7(9): e43542.

STANKOVIC M, MISHRA A K, RAHAYU Y P, et al, 2023a. Blue carbon assessments of seagrass and mangrove ecosystems in South and Southeast Asia: current progress and knowledge gaps[J]. Science of the Total Environment, 904: 166618.

STANKOVIC M, PANYAWAI J, KHANTHASIMACHALERM N, et al, 2023b. National assessment and variability of blue carbon in seagrass ecosystems in Thailand[J]. Marine Pollution Bulletin, 197: 115708.

TAKAHASHI T, SUTHERLAND S C, SWEENEY C, et al, 2002. Global sea-air CO_2 flux based on climatological surface ocean pCO_2, and seasonal biological and temperature effects[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 49: 1601-1622.

WANG X J, MURTUGUDDE R, HACKERT E, et al, 2013. Phytoplankton carbon and chlorophyll distributions in the equatorial Pacific and Atlantic: a basin-scale comparative study[J]. Journal of Marine Systems, 109/110: 138-148.

WANG Y Z, CUI Z G, DING D S, et al, 2023. Environmental forcing of phytoplankton carbon-to-diversity ratio and car-

bon-to-chlorophyll ratio: a case study in Jiaozhou Bay, the Yellow Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 197: 115765.

WEERAKKODY W S, LING K H, HSIEH H-H, et al, 2023. Carbon capture by macroalgae *Sarcodia suae* using aquaculture wastewater and solar energy for cooling in subtropical regions[J]. Science of the Total Environment, 855: 158850.

WU J H, LI B, 2022. Spatio-temporal evolutionary characteristics of carbon emissions and carbon sinks of marine industry in China and their time-dependent models[J]. Marine Policy, 135: 104879.

YANG M X, SMYTH T J, KITIDIS V, et al, 2021. Natural variability in air-sea gas transfer efficiency of CO_2[J]. Scientific Reports, 11: 13584.

ZHAO X W, ZHANG X D, SONG Z L, et al, 2024. The accumulation and carbon sequestration potential of biogenic silica in coastal salt marshes: implications for relative sea-level rise[J]. Catena, 235: 107683.

Exploration and Construction of Methodological System for Ocean Carbon Sink Classification

LIU Dahai[1,2], DONG Tong[1,2], LIU Chao[1,2], LI Xiaoxuan[3], LIU Zhenhang[3], CHI Yuan[1,2]

（1. *First Institute of Oceanography*, *MNR*, Qingdao 266061, China；
2. *Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management*, *MNR*, Qingdao 266061, China；
3. *Institute of Marine Development of Ocean University of China*, Qingdao 266100, China）

Abstract: The ocean is the largest carbon sink on Earth and plays a critical role in mitigating global climate change. Accelerating research on the classification of oceanic carbon sinks is a vital measure to enhance scientific understanding of oceanic carbon sink classification, promote the restoration of marine ecosystems, facilitate carbon sink market transactions, and achieve dual carbon goals. This study, starting from an integrated perspective of “development-protection-carbon sink”, systematically reviews the current challenges in the classification of oceanic carbon sinks, and is dedicated to constructing a multi-level, multi-dimensional framework for the classification of oceanic carbon sinks tailored to China’s unique marine ecosystems. It aims to provide an in-depth analysis of the composition and characteristics of oceanic carbon sinks, specific to China’s unique marine ecosystems, by refining aspects such as the formation properties, mechanisms of action, spatial distribution, types of ecosystems, categories of carbon stocks, and species differences. This endeavor seeks to reveal the formation mechanisms, trends, and potential of oceanic carbon sinks, thereby offering a scientific management framework for monitoring, assessing, and managing oceanic carbon sinks and providing practical guidance for the classification and zoning of oceanic carbon sinks.

Keywords: ocean carbon；blue carbon；classification；standards

Received: January 30, 2024