**Advances in Marine Sciences** 海洋科学前沿, 2024, 11(4), 236-245
Published Online December 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ams
https://doi.org/10.12677/ams.2024.114026

Hans汉斯

# 海洋碳汇价值实现的标准、方法学与环境监管框架思考

**郭雪飞[1*]，温　阳[1]，燕清林[2]，郑力文[2]**

[1]中海油研究总院有限责任公司新能源研究院，北京
[2]山东大学海洋研究院，山东　青岛

收稿日期：2024年11月15日；录用日期：2024年12月18日；发布日期：2024年12月30日

## 摘　要

**海洋被认为将在应对气候变化中发挥重要作用，通过生态修复、大型藻类养殖、海水碱化等人为手段提高海洋系统的固碳、储碳能力，可以有效减缓全球变暖。然而，海洋碳汇的价值实现仍面临效益评估不明确、环境影响如何纳入监管等诸多挑战。核算增汇潜力和控制成本，构建标准和方法学体系，并完善环境影响的监管框架，是解决问题的关键。我国在海洋负排放地球生态工程的碳汇方面具有坚实的理论支撑和国际合作基础，示范应用条件逐渐成熟，但缺乏相应的效益量化方法，环境监管框架亟需建立。据此，本文提出海洋碳汇发展的如下思路：促进多部门协同，打通海洋碳汇价值实现链条；完善效益量化体系，实现国际标准互认；培养海洋碳汇专业人才，应对环境监管要求。**

## 关键词

**海洋碳汇，碳汇标准，碳汇方法学，国际环境协议，海洋负排放**

# Thoughts on the Standards, Methodology, and Environmental Regulatory Framework for the Value Realization of Ocean Carbon Sink

**Xuefei Guo[1*], Yang Wen[1], Qinglin Yan[2], Liwen Zheng[2]**

[1]New Energy Research Department, CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing
[2]Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao Shandong

Received: Nov. 15th, 2024; accepted: Dec. 18th, 2024; published: Dec. 30th, 2024

[*]通讯作者。

文章引用: 郭雪飞, 温阳, 燕清林, 郑力文. 海洋碳汇价值实现的标准、方法学与环境监管框架思考[J]. 海洋科学前沿, 2024, 11(4): 236-245. DOI: 10.12677/ams.2024.114026

## Abstract

**The ocean is considered to play a vital role in tackling climate change. Through human interventions such as ecological restoration, large-scale algae cultivation, and seawater alkalization, the carbon sequestration and storage capacity of marine systems can be effectively enhanced, thereby mitigating global warming. However, the realization of the value of ocean carbon sinks still faces numerous challenges, including unclear benefit assessments and how to incorporate environmental impacts into regulation. Key solutions to these issues include accounting for the potential increase in carbon sinks, controlling costs, developing a standardized methodological framework, and improving the regulatory framework for environmental impacts. China has a solid theoretical foundation and an international cooperation basis for carbon sinks in marine negative emission ecological engineering. The conditions for demonstration applications are gradually maturing, but there is a lack of corresponding benefit quantification methods, and an environmental regulatory framework urgently needs to be established. Accordingly, this paper proposes the following ideas for the development of ocean carbon sinks: Promote multi-departmental collaboration to streamline the value realization chain of ocean carbon sinks; Improve the benefit quantification system to achieve mutual recognition of international standards; Cultivate specialized talent in marine carbon sinks to meet environmental regulatory requirements.**

## Keywords

**Marine Carbon Sink, Carbon Sink Standard, Methodology, International Environmental Agreements, Ocean Carbon Negative Emissions**

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

## 1. 引言

人类活动产生的二氧化碳($CO_2$)排放被认为是气候变暖的主因，减排已成为全球共识。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)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。然而，即使充分利用替代能源，中国每年仍有 20~30 亿吨的 $CO_2$ 净排放，需要人为增汇来填补缺口[1]。海洋碳库巨大，约是大气碳库的 50 倍，陆地碳库的 20 倍，储碳周期长达千年，对气候调节起到了关键作用[2]。2009 年，联合国环境规划署、粮农组织和教科文组织政府间海洋学委员会联合发布的《蓝色碳汇：健康海洋固碳作用的评估报告》首次引入了“蓝碳”概念。

随着科学研究的深入以及应对气候变化措施的系统化，“蓝碳”的含义已得到拓展和深化。相比自然发生的海洋碳循环，通过人为干预措施主动吸收和封存大气中的 $CO_2$，在碳中和的语境下被称为“海洋碳汇”或“海洋负排放”[3]。2019 年，联合国气候变化专门委员会(IPCC)在其《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》中正式将海洋碳汇纳入考量。该报告采纳了中国科学家提出的“微型生物碳泵”理论、陆海统筹理念以及通过养殖区人工上升流实现的增汇路径等科学概念，见图 1。同年，美国国家科学院、工程院和医学科学院联合发布了《负排放技术与可靠的碳封存：研究议程》，报告全面评估了从大气中移除并封存 $CO_2$ 的负排放技术的效益、风险及其潜在的可持续规模，并为负排放技术的研究和发展制定了详尽的计划[4]。

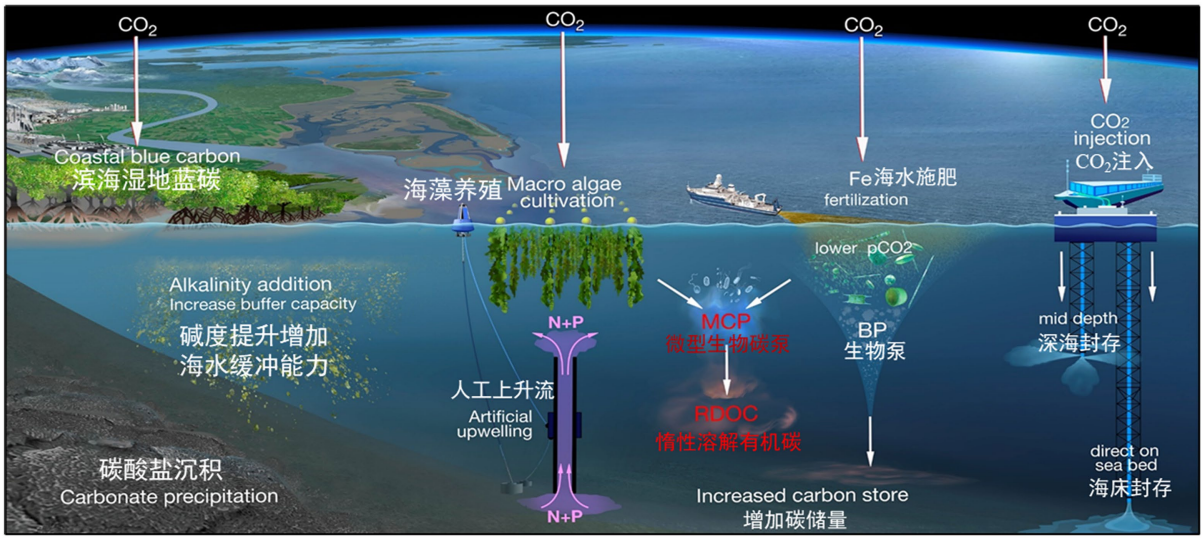


**Figure 1.** Pathways of oceanic carbon removal and storage [7]
**图 1.** 海洋去除和封存二氧化碳的方法[7]

中国拥有丰富的海洋资源，得益于漫长的海岸线、多样的气候带、海洋生态系统多样性高、海水养殖产业大，这些因素共同构成了中国在海洋碳汇领域的显著禀赋优势。一方面，我国海洋碳汇资源丰富，依据海洋增汇属性、机制及技术成熟度可总体划分为海岸带蓝碳[5]、渔业碳汇[6]和海洋负排放地球生态工程碳汇(以下简称“负排放工程碳汇”) [3]三种，总储碳量约 80 亿吨，年碳汇量为 2.9~3.6 亿吨，与我国森林总储碳量(约 90 亿吨)和年碳汇量(约 4 亿吨)相当；另一方面，我国海洋碳汇的增汇技术发展较为迅速，具有一定的产业化前景。我国的海洋碳汇的开发依然存在诸多难点，第一，技术支撑体系不够成熟，计量标准和方法学基础薄弱，尚未建立起健全的评估和核算体系，较难全面做到“可衡量、可报告、可核查”；第二，政策保障体系不够完善，我国近年来虽在政策导向上明确支持和鼓励海洋碳汇产业发展，但缺乏具体的指导意见和保障措施；第三，部分增汇措施的环境影响和生态后效有待全面评估，亟需搭建全面系统的监管框架。因此，需要针对海洋碳汇标准、方法学和监管框架的进行整体分析，研究对应的发展策略，推动海洋碳汇技术和产业发展，全面实现海洋碳汇的经济、生态和社会价值，对减缓全球气候变化做出积极贡献。

本文通过剖析现有海洋碳汇标准、方法学和监管框架的结构性差距，提出如下建议：海岸带蓝碳的国际标准、方法学和监管体系较为完善，能够作为良好参考；渔业碳汇已有成果基础，但仍需加强标准和方法学的国际互认；国内负排放工程碳汇的示范走在国际前列，但缺乏相应的标准、方法学和环境影响监管框架。未来应打通海洋碳汇的变现链条，提升标准和方法学国际认可度，并全面建立环境影响监管。本研究旨在为国内海洋碳汇开发和国际推广提供参考，并基于多维分析提出建议，助力海洋碳汇的价值实现。

## 2. 海洋碳汇的价值实现和环境影响

目前，海洋碳汇的价值包括增汇活动而带来的环境改善、生物多样性提高等生态价值和移除大气中$CO_2$的碳汇价值[8] [9]。就生态价值而言，通过对沿海蓝碳生态系统(特别是红树林、海草床和滨海盐沼)的恢复和持续管理，可以减少波浪高度和海岸侵蚀，如图 2 所示[10] [11]。此外，某些沿海蓝碳生态系统具有减缓海水脱氧、富营养化和过滤沿海水域中微量金属的能力[12]-[14]。通过恢复和可持续管理沿海蓝碳生态系统可以产生溢出效应，增加渔业和贻贝养殖场等提供的生态系统服务和碳汇[15]。海岸带蓝碳和渔业碳汇还为社会提供广泛的文化服务，并有望成为具有传承价值的文化遗产。

**Figure 2.** Impacts of coastal blue carbon and fishery carbon sinks on the marine environment and ecosystem service
**图 2.** 海洋负排放对海洋环境和生态系统服务的影响

### 2.1. 海洋碳汇的价值实现

海洋碳汇作为一种重要的碳抵消机制，能够减缓全球气候变暖带来的生态影响，因此其碳汇价值本质上是生态价值的一部分。基于其可交易的属性而从生态价值中分离出来，通过碳交易进行碳汇价值的变现。碳市场按照二氧化碳减排量的来源分为配额市场和碳汇市场，配额市场碳配额的来源为政府无偿或有偿发放，碳汇市场碳减排量则来源于人为增汇的项目开发，海洋碳汇属于碳汇市场[16]。碳汇交易相较于配额交易的最大不同是：可交易碳汇的产生，需要项目设计和减排量签发；而相应的标准、方法学是碳汇项目可开发的起点。海洋碳汇计量和监测标准作为开发方法学的重要前提，可以明晰海洋碳汇的属性、组成、量级和核证方法。

### 2.2. 海洋碳汇的环境影响

开发海洋碳汇带来极大生态和经济价值的同时，也有可能对环境带来潜在影响。海洋施肥是指向海水添加磷或氮等营养物质或铁元素，通过提高初级生产力进而增强海洋对 $CO_2$ 的吸收。有研究提出，海洋施肥可能会增强深海再矿化过程，从而加剧深海酸化[17]。另外，营养施肥也可能引起有害藻类的大量繁殖[18]。人工上升流利用管道或波浪泵从深海抽出富含营养盐的水增加上层初级生产力；人工下降流将水体上层富含“碳”的水送入深海进行长期碳储存[19]。海水碱化是指通过添加碱性物质增加海水的碱度，从而增强海水对大气 $CO_2$ 的吸收[20]。提高海水的总碱度，虽然能够缓解海水酸化[21] [22]，但其对海洋生态系统的影响尚未见系统研究[23] [24]。

海洋碳汇价值的实现需要通过标准和方法学进行量化，以评估其有效性和经济潜力[25]。由于海洋系统的复杂性，未经监管的增汇活动可能导致生态失衡，甚至对海洋生物造成负面影响。因此，需要建立有效切系统全面的监管框架评估海洋碳汇活动的环境影响。只有通过系统的量化和有效监管，才能推进海洋碳汇的可持续发展，为应对全球气候变化做出积极贡献。

## 3. 海洋碳汇标准和方法学现状分析

目前，海岸带蓝碳的标准和方法学开发主要集中在红树林、海草床和盐沼湿地[26]。

### 3.1. 海洋碳汇标准

海岸带蓝碳标准体系已被纳入我国《海洋标准体系》的第 19 部分，并立项了 20 余项相关标准，详见表 1。

**Table 1.** Relevant domestic and foreign standards for coastal blue carbon by 2024
**表 1.** 截至 2024 年海岸带蓝碳国内外相关标准

| 序号 | 来源 | 名称 | 属性 | 状态 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 政府间气候变化专门委员会 | 对 2006IPCC 国家温室气体清单指南的 2013 增补：湿地 | 国际指南 | 已发布 |
| 2 | 蓝碳倡议科学工作组 | 滨海蓝碳：红树林、滨海盐沼、海草床碳储量和排放因子的评估方法 | 国际方法 | 已发布 |
| 3 | 世界林业研究中心 | 红树林结构、生物量和碳储量调查、监测和报告技术规程 | 国际规程 | 已发布 |
| 4 | 自然资源部第三海洋研究所等 | 红树林生态修复监测和效果评估技术指南 | 国家标准 | 审查 |
| 5 | 广西红树林研究中心 | 蓝碳生态系统碳库规模调查与评估技术规程 红树林 | 行业标准 | 审查 |
| 6 | 中国科学院海洋研究所等 | 海洋生态修复技术指南第 4 部分：海草床生态修复 | 国家标准 | 已发布 |
| 7 | 自然资源部海洋预警监测司 | 蓝碳生态系统碳储量调查与评估技术规程 海草床/红树林/滨海盐沼 | 行业标准 | 已发布 |
| 8 | 自然资源部海洋预警监测司 | 海草床/红树林/滨海盐沼生态系统碳汇计量监测技术规程(试行) | 行业标准 | 试行 |
| 9 | 中国科学院海洋研究所 | 海草床生态修复监测与效果评估技术指南 | 国家标准 | 正在批准 |
| 10 | 中国科学院南海海洋研究所 | 海草床生态系统碳库动态监测与评估技术规程 | 行业标准 | 标准起草 |
| 11 | 华东师范大学等 | 蓝碳生态系统碳库规模调查与评估技术规程 盐沼 | 行业标准 | 审查 |
| 12 | 国家海洋局东海环境监测中心 | 蓝碳生态系统碳库动态监测与评估技术规程 盐沼 | 行业标准 | 标准起草 |
| 13 | 南京大学 | 滨海盐沼湿地生态修复监测与效果评估技术指南 | 国家标准 | 征求意见 |
| 14 | 江苏省自然资源厅 | 潮滩与盐沼生态系统碳储量调查技术规范 | 地方标准 | 已发布 |
| 15 | 自然资源部第三海洋研究所等 | 珊瑚礁生态修复监测和效果评估技术指南 | 国家标准 | 正在批准 |
| 16 | 中国科学院海洋研究所 | 蓝碳生态系统碳库规模调查与评估技术规程 牡蛎礁 | 行业标准 | 标准起草 |
| 17 | 中国科学院南海海洋研究所 | 海洋生态修复技术指南 第 2 部分：珊瑚礁生态修复 | 国家标准 | 已发布 |
| 18 | 国家海洋局第一海洋研究所 | 蓝碳生态系统碳库动态监测与评估技术规程 柽柳林 | 行业标准 | 标准起草 |
| 19 | 国家海洋局第一海洋研究所 | 蓝碳生态系统碳库规模调查与评估技术规程 柽柳林 | 行业标准 | 标准起草 |
| 20 | 清华大学深圳研究生院 | 蓝碳生态系统蓝碳计量技术规程 互花米草 | 行业标准 | 标准起草 |
| 21 | 自然资源部海洋减灾中心等 | 蓝碳生态系统碳汇计量监测技术规程 | 国家标准 | 标准起草 |
| 22 | 国家海洋标准计量中心 | 蓝碳生态系统碳储量调查与评估技术规范 | 国家标准 | 标准起草 |
| 23 | 自然资源部第一海洋研究所 | 海洋碳汇核算方法 | 行业标准 | 已发布 |
| 24 | 国家海洋信息中心等 | 蓝碳生态系统增汇适宜区识别技术导则 | 行业标准 | 标准起草 |
| 25 | 自然资源部海洋减灾中心等 | 蓝碳生态系统碳汇计量监测技术规程 | 行业标准 | 审查 |
| 26 | 自然资源部第一海洋研究所等 | 海洋碳汇分类与代码 | 行业标准 | 标准起草 |

截至 2024 年 8 月，中国已发布或试行的海岸带蓝碳标准包括《海洋碳汇核算方法》《蓝碳生态系统碳储量调查与评估技术规程 海草床/红树林/滨海盐沼》《海洋生态修复技术指南》的第 1、2、4 部分，以及《海草床/红树林/滨海盐沼生态系统碳汇计量监测技术规程(试行)》。从已发布的和正在制定中的标准来看，聚焦海洋碳库(碳储量)和碳汇监测的标准有《海洋碳汇核算方法》《蓝碳生态系统碳库动态监测与评估技术规程》等 15 项，占所有标准的 58%。其次是生态修复与效果评估，如《红树林生态修复监测和效果评估技术指南》等 6 项，占比 22%。国际标准或规程占比 11%，识别与分类标准占比 8%，包括《蓝碳生态系统增汇适宜区识别技术导则》和《海洋碳汇分类与代码》。

渔业碳汇是指根据 IPCC 对碳汇和碳源的定义，以及水生植物的固碳特点，通过渔业生产活动促进水生生物吸收或利用水体中的二氧化碳($CO_2$)等温室气体，并通过收获将这些转化为生物产品的碳移出水体，或通过生物沉积作用将其沉降于水底的过程和机制[5] [27]。中国养殖水产品占全球养殖总量的 60%以上，显示出其在渔业碳汇领域的巨大开发潜力[28] [29]。目前，已发布基于碳储量变化法的《养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法》行业标准。同时，还有《大型藻类(筏式养殖)的生物碳库贡献调查与评估技术规程》等 5 项行业标准正在批准发布中。此外，海洋牧场相关的《海洋资源生物碳库贡献动态监测与评估技术规程 海洋牧场》、《蓝碳生态系统碳库规模调查与评估技术规程 海洋牧场》以及养殖海带相关的《养殖海带碳足迹核算技术规范 生命周期评价法》3 项标准正在征求意见阶段。

2021 年，美国国家科学院发布了《海洋二氧化碳移除和封存研究策略》报告，其中营养施肥、人工上升流与下降流、提高海水碱度和电化学方法，均被视为海洋负排放的组成部分。这些方法共同构成了一个多层面的策略，旨在通过地球生态工程减少大气中的 $CO_2$，以应对全球气候变化的挑战。截至目前，与负排放工程碳汇相关的标准仅有厦门大学立项的《微型生物碳库贡献调查与评估技术规程 海洋细菌》和中国科学院青岛生物能源与过程研究所立项的《微型生物碳库贡献调查与评估技术规程 超微型浮游植物》。

### 3.2. 海洋碳汇方法学

碳汇方法学是指导碳汇项目开发和计算项目碳汇量的基石，在碳汇价值实现链条不可或缺[30]。清洁发展机制(CDM)和自愿核证碳标准(VCS)均开发了海岸带蓝碳方法学，在 CDM 机制下有红树林及湿地生态修复相关的《退化红树林生境的造林和再造林》和《在湿地上开展的小规模造林和再造林项目活动》方法学；在 VCS 机制下有红树林、海草床、滨海湿地的《REDD + 方法框架》《潮汐湿地和海草恢复的方法学》和《滨海湿地构建的方法学》。国内机制中，生态环境部发布的《温室气体自愿减排项目方法学 红树林营造(CCER-14-002-V01)》被纳入中国核证自愿减排量(CCER)市场重启过程中第一批方法学。《广东省红树林碳普惠方法学(2023 年版)》是国内首个在碳普惠机制下发布的海岸带蓝碳方法学。目前，国内外渔业碳汇和负排放工程碳汇用于开发可交易碳汇的方法学仍处于空白[31]。

## 4. 海洋碳汇监管框架

目前共有八项国际环境协议(IEAs)从多个维度形成了对海洋碳汇的监管，要确保海洋增汇活动符合条约/协议约定的内容[32]。《防止废物和其他物质倾倒污染海洋公约》(伦敦公约及伦敦议定书)要求，在没有合理评估海上倾倒可能造成的影响前，应保护和保全海洋环境，使其不受一切污染源的影响；《海洋法公约》也从防治海洋污染方面做出了相应的要求。《生物多样性保护公约》指出与气候有关的地球工程活动要适当考虑对环境和生物多样性的相关风险以及相关的社会、经济和文化影响，要有充分的科学依据证明活动合理性。《联合国迁徙物种保护公约》《保护世界文化和自然遗产公约》和《联合国海洋法公约关于跨界渔业资源和高度迁移鱼类资源保护与管理的实施协定》则在自身所监管的领域对地球工程活动所可能造成的对迁徙物种、珊瑚礁等自然遗产的影响作了约束。

1975 年生效的《联合国湿地公约》鼓励有能力的缔约方增加对养护和保护沿海蓝碳生态系统的项目和研究的支持。《伦敦公约》及《伦敦议定书》在 2013 修正案中说明：“缔约方不应允许将船舶、飞机、平台或其他海上人造结构的物质排入海洋，用于附件 4 所列的海洋地球工程活动”。其中，营养施肥是目前附件 4 所列唯一的活动。上述两个环境协议都明确地提到了对海洋碳汇及其增汇活动的直接监管，详见图 3。

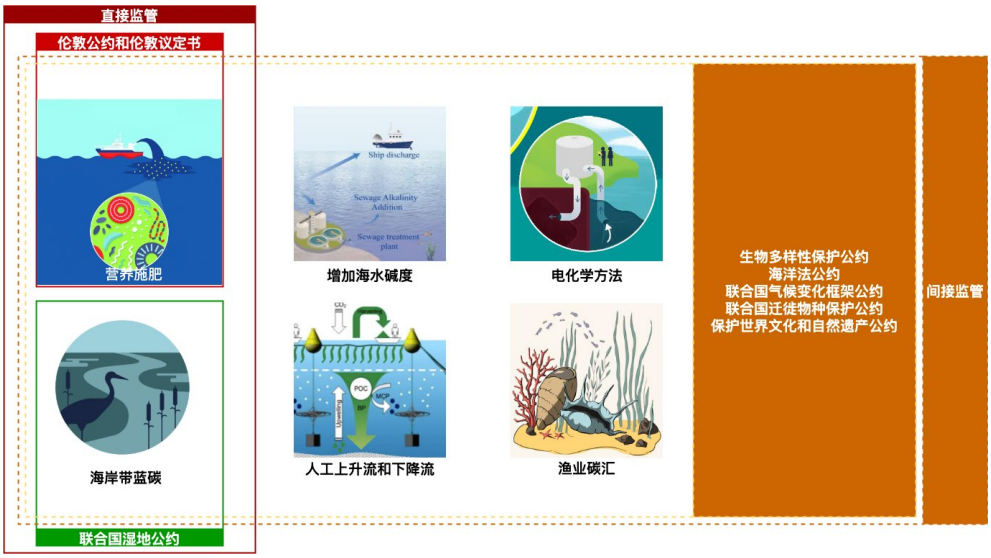


**Figure 3.** The direct and indirect regulatory framework of international environmental agreements on coastal blue carbon, fishery carbon sinks and marine negative emission carbon sinks
**图 3.** 国际环境协议对海岸带蓝碳、渔业碳汇和海洋负排放碳汇的直接和间接监管框架

《联合国迁徙物种保护公约》要求尽量减少严重妨碍物种迁徙的活动。《生物多样性保护公约》中指出“不开展可能影响生物多样性的与气候有关的地球工程活动，直到有充分的科学依据证明这些活动是合理的”。《联合国海洋法公约》确立了各国在保护海洋环境方面的责任，明确指出各国必须采取必要的措施来预防、减少和控制海洋环境污染。上述几项国际环境协议没有明确提及、认可或禁止海岸带蓝碳、渔业碳汇、营养施肥、人工上升流和下降流、海洋碱化、电化学方法，只是从侧面给出了上述增汇活动应符合对于海洋污染、生物多样性、气候目标、文化和自然遗产、迁徙种群等方面的要求，属于间接监管。

## 5. 结论和建议

### 5.1. 结论

(1) 海岸带蓝碳作为最早被国际社会承认的海洋碳汇，联合国《蓝碳报告》和 IPCC《湿地指南》对其重要性和评估方法均有阐述，因此在海洋碳汇属性和碳汇机制上争论较小，标准和方法学也较为丰富，但增汇规模和成本限制了其主导作用。

(2) 渔业碳汇理论近年来发展迅速，但从相关标准制定进度来看，仅有少量标准现行。从开发中的标准内容来看，大型藻类的碳汇属性较清晰，因此其相关的碳汇标准占据大多数，其他渔业碳汇物种相关标准较少。目前，建立渔业碳汇相关的国际标准和方法学，是急需解决的关键问题。

(3) 负排放工程碳汇潜力巨大，正处在理论研究向实践应用转化的关键阶段。现有陆地碳汇的方法学主体框架是否适用于负排放工程技术创新、多样的增汇方法，仍需科学验证。负排放工程碳汇面临着应用需求提升和标准和方法学缺失的不匹配，系统性的跟进标准、方法学体系建设迫在眉睫。

(4) 随着海洋增汇技术的不断成熟，相关环境监管必定会逐渐完善。我国海洋碳汇研究处于世界前沿，开展环境影响监管框架适应性研究具有必要性和紧迫性。这不仅涉及到技术层面的可行性和成本效益分析，还包括把握赛道主动权的考量，确保最小化负面影响，最大化正向环境效益，符合全球可持续发展的愿景。

### 5.2. 建议

(1) 促进多部门协同，打通海洋碳汇变现链条。

海洋碳汇的市场化交易面临着权属不明确和管理体系脱节的双重挑战。海域作为国家资源，其碳汇权属通常不归个人所有，导致社会资本和企业参与度不高[10]。建议在法律层面明确界定海洋碳汇权益的归属，以激励社会资本和企业积极参与海洋碳汇项目的开发与交易。此外，海洋碳汇相关的标准和方法学由不同部委负责，导致海洋碳汇的开发和确权在价值实现链条中相互脱节，这在一定程度上造成了海洋碳汇价值实现的效率不高。加强各部委之间的协同合作，从开发到交易全链条打通海洋碳汇项目的生态价值实现。

此外，需要强化顶层设计，制定海洋碳汇生态产品市场的总体规划，明确交易规则，并提供相应的法律和政策支持，将碳汇损害纳入侵权责任范畴，确立侵权责任的判定标准，确保碳汇权利人的合法权利得到充分保护。鉴于海洋碳汇项目的生态特性，建议构建一个多元共治的监管机制，增强监管力度，特别是加强对海洋生态环境保护的监督，并将海洋环境质量目标及减碳降污措施纳入行业绩效考核体系，维护海洋碳汇生态产品市场的健康和秩序。

(2) 完善标准和方法学体系，提升国际认可度。

海岸带蓝碳，作为海洋碳汇的一个关键组成部分，其标准和方法学相对成熟，为渔业碳汇和海洋负排放工程碳汇提供了良好借鉴。建议首先引入海岸带蓝碳国际认可的标准和方法学，建立常态化的动态监测体系，确保数据精确性。为了提升渔业碳汇的国际认可度，需要与国际海洋碳汇核算标准相衔接，确保统计数据的精确性。全球渔业养殖分布决定了我国必将成为渔业碳汇标准和方法学开发的重要力量，如能够在渔业碳汇标准、方法学体系建设上夯实理论基础，推出可靠的、实现碳汇功能的养殖规程、标准等，明确各渔业产品的减排量计算方法，实现渔业碳汇标准和方法学体系的自洽。

我国具有坚实的负排放理论优势，同时具有广泛的国际合作基础。由我国科学家牵头的海洋负排放国际大科学计划正在实施。在海洋碳汇理论向实践应用转变的重要时刻，建立海洋负排放的方法、技术、规范，制定海洋碳汇负排放计量和核算标准、方法学体系，将是贡献碳中和国际共识的关键抓手。

(3) 加强人才队伍建设，系统开展环境监管研究。

对于碳项目的高度专业化，应建立专门的碳市场监管人才队伍，以为政府监管提供智力支持。同时，完善第三方监管机制，对海洋碳汇生态产品市场进行细致严谨的监督。海洋碳汇的开发和利用必须在监管框架内进行，以确保环境正效益。我国作为多个国际环境协议的缔约国，有责任确保海洋增汇活动符合相关国际规则。在国际层面，中国的海洋碳汇生态产品市场立法应与《巴黎协定》和 IPCC 的《国家温室气体清单指南》等国际规范保持一致，确保与全球气候行动和环境治理的规则相协调，避免与国际公约产生冲突。在国内层面，建议加强海洋负排放碳汇领域的科学研究，探讨不同方法的可行性、效果和潜在影响，提高技术的成熟度和可靠性。立法工作需与现有的生态保护红线政策、环境影响评价体系以及金融财税等相关法律制度相融合，形成一套相互支持、协同增效的法律框架，以促进海洋碳汇生态产品市场的健康发展。

## 参考文献

[1] Fuhrman, J., Clarens, A.F., McJeon, H., Patel, P., Ou, Y., Doney, S.C., *et al*. (2021) The Role of Negative Emissions in

Meeting China's 2060 Carbon Neutrality Goal. *Oxford Open Climate Change*, **1**, kgab004. https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgab004

[2] 焦念志. 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, 2021, 36(2): 179-187.

[3] 焦念志, 骆庭伟, 刘纪化, 等. 海洋负排放——基于地球系统科学思维的海洋科技变革[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(9): 1294-1305.

[4] Aricò, S., Jesus, A., Bakker, E., *et al*. (2021) Integrated Ocean Carbon Research: A Summary of Ocean Carbon Research, and Vision of Coordinated Ocean Carbon Research and Observations for the Next Decade. The Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO.

[5] 唐启升, 毛玉泽, 蒋增杰. 渔业碳汇与碳汇渔业定义及其相关问题的辨析[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 1-7.

[6] 刘大海, 董通, 刘超, 等. 海洋碳汇分类方法框架探索与构建[J]. 海洋科学进展, 2024, 42(2): 358-369.

[7] IOC-R (2021) Integrated Ocean Carbon Research: A Summary of Ocean Carbon Research, and Vision of Coordinated Ocean Carbon Research and Observations for the Next Decade. https://doi:10.25607/h0gj-pq41

[8] 杨越, 陈玲, 薛澜. 中国蓝碳市场建设的顶层设计与策略选择[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 92-103.

[9] 陈光程, 王静, 许方宏, 等. 滨海蓝碳碳汇项目开发现状及推动我国蓝碳碳汇项目开发的建议[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(2): 177-184.

[10] Hochard, J.P., Hamilton, S. and Barbier, E.B. (2019) Mangroves Shelter Coastal Economic Activity from Cyclones. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**, 12232-12237. https://doi.org/10.1073/pnas.1820067116

[11] Krauss, K.W., Allen, J.A. and Cahoon, D.R. (2003) Differential Rates of Vertical Accretion and Elevation Change among Aerial Root Types in Micronesian Mangrove Forests. *Estuarine*, *Coastal and Shelf Science*, **56**, 251-259. https://doi.org/10.1016/s0272-7714(02)00184-1

[12] Sousa, A.I., Lillebø, A.I., Pardal, M.A. and Caçador, I. (2010) Productivity and Nutrient Cycling in Salt Marshes: Contribution to Ecosystem Health. Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, **87**, 640-646. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.03.007

[13] Marques, B., Lillebø, A.I., Pereira, E. and Duarte, A.C. (2011) Mercury Cycling and Sequestration in Salt Marshes Sediments: An Ecosystem Service Provided by Juncus Maritimus and Scirpus Maritimus. *Environmental Pollution*, **159**, 1869-1876. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.036

[14] Garcon, V., Laffoley, D. and Baxter, J.M. (2019) Ocean Deoxygenation: Everyone's Problem. Causes, Impacts, Consequences and Solutions. IUCN.

[15] Cullen-Unsworth, L. and Unsworth, R. (2013) Seagrass Meadows, Ecosystem Services, and Sustainability. Environment: *Science and Policy for Sustainable Development*, **55**, 14-28. https://doi.org/10.1080/00139157.2013.785864

[16] 邵莉莉. 碳中和背景下国际碳排放治理的"共同责任"构建——共同但有区别责任的困境及消解[J]. 政治与法律, 2022(2): 30-43.

[17] Cao, L. and Caldeira, K. (2010) Can Ocean Iron Fertilization Mitigate Ocean Acidification? *Climatic Change*, **99**, 303-311. https://doi.org/10.1007/s10584-010-9799-4

[18] Galbraith, E.D., Le Mézo, P., Solanes Hernandez, G., Bianchi, D. and Kroodsma, D. (2019) Growth Limitation of Marine Fish by Low Iron Availability in the Open Ocean. *Frontiers in Marine Science*, **6**, Article 509. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00509

[19] Gesam, P. (2019) High Level Review of a Wide Range of Proposed Marine Geoengineering Techniques. http://www.gesamp.org/publications/high-level-review-of-a-wide-range-of-proposed-marine-geoengineering-techniques

[20] Renforth, P. and Henderson, G. (2017) Assessing Ocean Alkalinity for Carbon Sequestration. *Reviews of Geophysics*, **55**, 636-674. https://doi.org/10.1002/2016rg000533

[21] Ilyina, T., Wolf-Gladrow, D., Munhoven, G. and Heinze, C. (2013) Assessing the Potential of Calcium-Based Artificial Ocean Alkalinization to Mitigate Rising Atmospheric $CO_2$ and Ocean Acidification. *Geophysical Research Letters*, **40**, 5909-5914. https://doi.org/10.1002/2013gl057981

[22] Keller, D.P., Koeve, W. and Oschlies, A. (2016) Could Artificial Ocean Alkalinization Protect Tropical Coral Ecosystems from Ocean Acidification? *Environmental Research Letters*, **11**, Article 074008. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074008

[23] Hartmann, J., West, A.J., Renforth, P., Köhler, P., De La Rocha, C.L., Wolf-Gladrow, D.A., *et al*. (2013) Enhanced Chemical Weathering as a Geoengineering Strategy to Reduce Atmospheric Carbon Dioxide, Supply Nutrients, and Mitigate Ocean Acidification. *Reviews of Geophysics*, **51**, 113-149. https://doi.org/10.1002/rog.20004

[24] Jin, P., Zhang, J., Wan, J., Overmans, S., Gao, G., Ye, M., *et al*. (2021) The Combined Effects of Ocean Acidification

and Heavy Metals on Marine Organisms: A Meta-Analysis. *Frontiers in Marine Science*, **8**, Article 801889. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.801889

[25] 董敬明, 刘子飞, 陈丽梅. 我国海洋碳汇交易政策、实践及展望[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(3): 519-527.

[26] 王秀君, 章海波, 韩广轩. 中国海岸带及近海碳循环与蓝碳潜力[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1218-1225.

[27] 杨宇峰, 王庆, 贺志理, 等. 大型海藻规模栽培是增加海洋碳汇和解决近海环境问题的有效途径[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 259-269.

[28] Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., *et al*. (2014) Coastal Blue Carbon: Methods for Assessing Carbon Stocks and Emissions Factors in Mangroves, Tidal Salt Marshes, and Seagrass Meadows. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature.

[29] 邵桂兰, 刘冰, 李晨. 我国主要海域海水养殖碳汇能力评估及其影响效应——基于我国 9 个沿海省份面板数据[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2614-2625.

[30] 魏震昊, 孙国茂, 姚中杰. 自愿减排机制下海洋碳汇交易的双重效益与影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(4): 48-59.

[31] 张继红, 刘毅, 吴文广, 等. 海洋渔业碳汇项目方法学探究[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 151-159.

[32] Fuso Nerini, F., Sovacool, B., Hughes, N., Cozzi, L., Cosgrave, E., Howells, M., *et al*. (2019) Connecting Climate Action with Other Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, **2**, 674-680. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0334-y