

碳中和背景下我国发展滨海蓝色碳汇的优势、挑战及对策

程浩,邢庆会,陈虹,毛竹,韩建波

(国家海洋环境监测中心 大连 116021)

摘要:滨海蓝色碳汇在全球气候变化和碳循环中具有重要作用,通过生态修复和市场交易等方式巩固和提升滨海蓝碳,是实现碳中和目标最为经济有效的方式之一。为进一步挖掘滨海蓝碳的潜力,推动实现碳中和目标,文章概述发展滨海蓝碳的诸多优势,分析其在制度建设和技术开发方面面临的问题和挑战,并提出对策建议:完善滨海蓝碳保护修复和碳汇交易的政策措施,推进陆海统筹和生态补偿的机制建设;推动滨海蓝碳纳入温室气体清单编制,积极参与国际合作;设立监测评估试点,提升监测能力,完善碳汇计量核算方法;加强科学研究,突破关键技术瓶颈。

关键词:滨海湿地;蓝碳;温室气体清单;制度建设;碳汇计量

中图分类号:X196;X171.4;P748

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2023)08-0003-08

Advantages, Challenges and Countermeasures of Developing Coastal Blue Carbon Sink in China in the Background of Carbon Neutrality

CHENG Hao, XING Qinghui, CHEN Hong, MAO Zhu, HAN Jianbo

(Nation Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116021, China)

Abstract: Coastal blue carbon plays an important role in the global climate change and carbon cycle. Ecological restoration and market trading can effectively improve coastal blue carbon sink, which is a cost-effective way to achieve carbon neutrality. In order to explore the potential of coastal blue carbon to promote the realization of carbon neutrality, this paper elaborated advantages of developing coastal blue carbon. At the same time, this paper analyzed the problems faced by coastal blue carbon development in system construction and technology development, then put forward the countermeasures and suggestions: improve the policy measures of coastal blue carbon conservation and carbon sink trading, and promote the mechanism construction of land-sea coordination and ecological compensation. Promote the development of blue carbon

收稿日期:2022-08-26;修订日期:2023-07-07

基金项目:辽宁省博士科研启动基金计划项目“典型滨海湿地净生态系统 CO₂ 交换特征及其退养还滩修复效果评估”(2020-BS-291);山东省海洋生态修复重点实验室开放基金项目“‘退养还滩’对辽河口滨海湿地 CO₂ 源/汇功能的影响”(201914);国家自然科学基金项目“海洋环境中全氟化合物新型替代品:全氟/多氟醚类物质的赋存、来源和生物富集/放大效应研究”(41876128)。

作者简介:程浩,工程师,硕士,研究方向为海岸带生态系统碳循环

通信作者:邢庆会,助理研究员,博士,研究方向为海岸带生态系统碳循环与碳收支

greenhouse gas inventories and participation in international cooperation. Set up monitoring and assessment pilots to improve carbon sink measurement and accounting methods. Strengthen the scientific research and radical technical bottlenecks.

Keywords: Coastal wetlands, Blue carbon, Greenhouse gas inventory, Institutional construction, Carbon sink measurement

0 引言

随着全球气候变化的加剧,蓝色碳汇作为基于自然的气候变化解决方案,是实现碳中和目标最为经济有效的方式之一。2009 年《蓝碳:健康海洋固碳作用的评估报告》确定滨海蓝碳在全球气候变化和碳循环中的重要作用^[1]。狭义上,滨海蓝碳指红树林、盐沼湿地和海草床生态系统土壤、地上活生物量、地下活生物量和非活体生物量中的碳^[2]。继该报告之后,滨海蓝碳研究引起国内外广泛关注。2011 年《京都议定书》将红树林的修复和恢复纳入清洁发展机制(CDM)^[3];《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南的 2013 年补充版:湿地》确定将红树林、滨海盐沼、海草床纳入指南范畴^[4],滨海蓝碳正式进入全球气候体系,并成为履约的重要手段^[5];《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》将典型的滨海蓝碳在定义、核算方法等方面予以补充^[6],进一步区分自然状态和人为干扰下产生的碳汇^[7];2019 年联合国政府间气候变化委员会(IPCC)发布《气候变化中的海洋与冰冻圈特别报告》(SROCC)^[8],增补大型海藻为典型滨海蓝碳,并进一步强调滨海蓝碳的碳汇能力在减缓气候变化中的重要作用^[9]。我国拥有丰富的海岸线资源,滨海蓝碳发展空间广阔。本研究从多个角度对滨海蓝碳服务碳中和的优势及挑战进行科学分析,并提出政策措施和科学研究展望,以期为实现碳中和目标和达成国际履约提供参考。

1 发展滨海蓝碳的优势

1.1 滨海蓝碳生态系统碳汇能力突出

滨海蓝碳生态系统具有碳储量大、固碳速率高、固碳持久稳定的特点。滨海湿地位于陆海交界处,生物量占陆地生物量的 0.05%,但其储存和转移的碳量为全球吸收固定碳总量的近 55%^[10-11]。

单位面积红树林和盐沼湿地的碳储量是热带森林的 3~5 倍^[12],海草床储存的有机碳量达到海洋埋藏总量的 11%^[13],全球海草沉积物中储存的有机碳量约为全球红树林和盐沼湿地沉积物碳储量之和^[14]。单位面积红树林和盐沼湿地从大气中固碳的速度是热带森林的 10 倍^[15],随着气候变暖和海平面上升,盐沼湿地的固碳能力可能会进一步提升^[16]。沉积物是滨海湿地碳库的重要组成部分,滨海湿地海水潮汐往复的特殊水文状况使其沉积物长期处于厌氧环境,极大地减缓有机碳的分解速率^[17],部分区域的沉积物可储存数千年^[18],如加勒比海伯利兹的红树林^[19]、新英格兰北部的潮汐盐沼^[20]和西班牙利加特港海湾的大洋波喜荡海草床^[21]产生的沉积物都已储存至千年尺度。同时,滨海湿地存在大量的 SO_4^{2-} ,可以有效抑制 CH_4 的产生^[22-23],进一步减缓有机碳的分解。

我国典型滨海湿地生境总面积约为 3 461.34 km^2 (图 1,其中缺少香港、澳门的数据),总碳储量为 1.39 亿~3.49 亿 t CO_2 ^[24]。

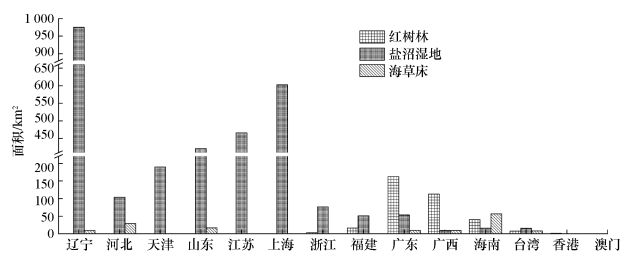


图 1 我国典型滨海蓝碳生态系统分布概况

Fig.1 Distribution of typical coastal blue carbon ecosystems in China

我国红树林总面积约为 343.41 km^2 ^[24-25],主要分布在广东、广西和海南,总碳储量为 0.23 亿~0.27 亿 t CO_2 ^[26],约有 82% 的碳储存于表层 1 m 的土壤中^[27]。据初步估算,我国红树林的年均碳埋藏

速率为 $686 \sim 973 \text{ g/m}^2$, 年均碳汇量为 $27.16 \text{ 万 t}^{[15]}$, 年均净固碳量大于 200 g/m^2 , 高于 174 g/m^2 的全球平均水平^[28]。

我国盐沼湿地总面积约为 $2\,979.37 \text{ km}^2^{[25]}$, 集中分布于北方地区, 杭州湾以北面积约占全国总面积的 95% , 盐沼湿地植被根冠比为 $1.4 \sim 5.0^{[26]}$, 地下碳库储量, 总碳储量为 $1.12 \sim 3.18 \text{ 亿 t CO}_2^{[29]}$ 。盐沼湿地的碳埋藏速率比陆地森林生态系统高 40 余倍^[15], 我国盐沼湿地的年均碳埋藏速率为 $865 \text{ g/m}^2^{[30]}$, 年均碳汇量为 $96.52 \text{ 万} \sim 274.88 \text{ 万 t}^{[31]}$ 。

现有文献表明, 我国海草床总面积约为 $138.56 \text{ km}^2^{[24,32-37]}$ (该数据小于自然资源部最新调查获取数据即海草床总面积为 $230.6 \text{ km}^2^{[38]}$, 其原因可能是调查基线不一致和部分区域的海草床科学研究不足), 总碳储量约为 $0.04 \text{ 亿 t CO}_2^{[29]}$ 。海草床的固碳能力主要体现在其自身和附生群落较强的初级生产力^[39-40], 我国海草床的年均碳埋藏速率为 $367 \sim 646 \text{ g/m}^2^{[41]}$, 年均碳汇量为 $3.2 \text{ 万} \sim 5.7 \text{ 万 t}^{[24]}$ 。

1.2 国际上清单编制和碳汇交易已有实践

碳中和是我国为应对全球气候变化做出的重大战略决策, 也是《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 和《巴黎协定》提出的重要履约机制, 而编制国家温室气体清单是实现碳中和国际履约的必然途径。在海洋生态系统中, IPCC 仅认可红树林、盐沼湿地和海草床为适合参与清单编制、达成国际履约的蓝色碳汇生态系统^[42]。澳大利亚和美国分别在 2015 年和 2016 年开展滨海湿地温室气体清单的编制工作。基于国际实践进展, 我国也已开展蓝碳生态系统温室气体清单编制的方法研究^[24,43]。

在碳汇交易层面, CDM 开发的《退化红树林生境的造林和再造林》(AR-AM0014) 和《在湿地上开展的小规模造林和再造林项目活动》(AR-AMS0003) 等方法为红树林生态系统修复提供碳汇计量的依据。据不完全统计, 应用 AR-AM0014 方法经 CDM、核证减排标准(VCS) 和维沃计划(PVS) 认证通过的国际碳汇项目达 7 项^[44], 其中包括我国广东湛江红树林造林项目。在自愿市场机制中, VCS 开发的《潮汐湿地和海草恢复方法学》(VM0033) 和《构建滨海湿地方法学》(VM0024) 等

为盐沼湿地和海草床提供碳汇交易的核算基础, 但在国际认证的碳汇交易项目中应用较少; 肯尼亚 Vanga 项目应用 VM0033 方法阻止红树林退化, 修复红树林 4.6 km^2 , 预计年均减排量达 $5.027 \text{ Gg}^{[45]}$ 。我国积极探索研究的首个蓝碳交易方法学即《红树林碳汇造林项目方法学》推动地方红树林碳汇交易项目首次达成。

1.3 各国积极将发展滨海蓝碳纳入国家战略

滨海蓝碳作为碳汇领域的重要组成部分, 近年来其潜力和价值已在国际社会上得到重视。自 2009 年确立滨海湿地在减缓气候变化中的重要作用后, 2010 年保护国际基金会(CI) 等国际组织共同发起“蓝碳倡议”(BCI), 从科研、政策和项目实施等方面给予支持和保障。在众多沿海国家中, 澳大利亚发展滨海蓝碳表现活跃, 牵头发起“国际蓝碳伙伴”和“太平洋蓝碳”等倡议, 并提出《海洋保护计划》, 宣布提供约 1.6 亿澳元用于保护蓝碳资源及开发碳补偿计划; 2015 年美国国家海洋与大气管理局(NOAA) 的蓝碳工作组从国家行动、市场建设和科学发展等方面提出国家海洋碳汇工作建议; 日本在 2021 年公布 125 个港口的调研计划, 包含滨海湿地生态系统 CO_2 固定量的测量和交易; 印度尼西亚提出的“蓝色森林项目”计划修复 2 万 km^2 退化的泥炭地 and 红树林生态系统。

我国充分认识到滨海蓝碳服务碳中和的潜在优势, 已开始从国家战略、政策层面部署蓝碳工作, 呈现中央总体规划、地方示范先行的格局。2015 年中共中央、国务院《关于加快推进生态文明建设的意见》提出海洋碳汇是有效控制温室气体排放的手段; 2017 年生态环境部《中国气候变化第一次两年更新报告》首次从应对气候变化的角度对蓝碳工作进行介绍; 2017 年国家发改委联合国家海洋局发起“21 世纪海上丝绸之路”的“蓝碳计划”倡议, 推动蓝碳国际合作; 2019 年《国家生态文明实验区(海南) 实施方案》提出建设海洋生态系统碳汇试点, 并开展蓝碳标准体系和交易机制研究; 2021 年国务院《2030 前碳达峰行动方案》要求提升红树林、海草床、盐沼等的固碳能力, 同年生态环境部和自然资源部分别印发《碳监测评估试点工作方案》和《蓝碳

生态系统调查评估试点工作方案》，开展滨海湿地碳汇试点工作。各沿海地区从蓝碳资源保护修复、标准规范和市场交易等层面持续示范推进，如广东、广西、浙江、山东等地在滨海湿地修复、围填海管控等方面发布系列方案和措施，深圳编制全国首个《海洋碳汇核算指南》，威海发布全国首个蓝碳经济发展行动方案即《威海市蓝碳经济发展行动方案（2021—2025）》，湛江开发全国首个蓝碳交易项目即广东湛江红树林造林项目，海南于 2022 年获批成立“海南国际碳排放权交易中心”。可以说，国内外针对滨海蓝碳的诸多战略部署，充分体现其潜在能力和价值。

2 滨海蓝碳建设面临的挑战

2.1 制度保障措施有待强化健全

制度的建立健全是保障滨海蓝碳有效服务碳中和的核心和关键。与近年来我国不断完善的林业碳汇制度相比，我国滨海蓝碳服务碳中和的制度保障措施有待强化健全。例如：2021 年发布实施的《碳排放权交易管理办法（试行）》和《林业碳汇项目审定和核证指南》明确将林业碳汇纳入国家碳排放权交易机制，为林业碳汇市场交易提供制度性保障和依据指南，然而目前滨海蓝碳交易暂无系统保障措施；《中华人民共和国海洋环境保护法》等法律对破坏滨海蓝碳资源的行为做出补救和罚款的规定，但受破坏生境的碳汇能力却难以恢复到原有状态。由于滨海湿地碳汇交易及资源保护的制度措施仍不完善，投资潜力挖掘困难，保护修复和碳汇能力提升主要依靠公共财政，不利于资本推动滨海蓝碳服务碳中和。

2.2 统筹发展机制有待补充完善

陆海协同治理和生态保护与经济发展之间的矛盾，是滨海蓝碳服务碳中和面临的挑战之一。滨海湿地生态系统位于陆海交界地带，区域空间复杂、人口密集且经济发展快速，其保护修复应依赖陆海统筹协调开展，否则难以获得较好的效果。例如：近年来山东开展大量沿海污染治理工作，但陆地养殖、工业、生活等造成的陆源污染仍比较普遍，导致蓝碳资源保护效果未完全达到预期^[46]。此外，沿海地区滨海湿地保护修复与民生、生态与经济协

调发展等问题仍未形成有效的解决方案^[47]，为保护修复滨海蓝碳资源而开展的退养还湿、植被重建等工程因生态补偿机制不完善，对当地经济发展产生一定的制约，因此部分区域仍然存在滨海湿地退化损失的现象。滨海湿地退化或消失导致固存在土壤中的 CO₂ 被释放，由“碳汇”转变为“碳源”^[5]。据估算，我国黄海及渤海地区过去 50 余年湿地面积的减少已导致 CO₂ 排放增加 29 Tg^[48]。有学者提出如大规模保护修复蓝碳资源，至 2030 年可额外减少 CO₂ 排放达 841 Tg，约占全球年均温室气体排放量的 3%^[49]。

2.3 碳汇计量方法亟须探究制定

IPCC 编制的一系列温室气体指南是世界各国核算温室气体排放和减排履约的重要技术方法。指南规定的碳汇计量方法分为 3 级，其中一级方法是应用默认系数计算，不包含属地性质；二级和三级方法可依靠本地监测数据进行核算和系数调整，使不同区域的碳汇计量结果更加精确。运用一级方法计算碳汇量时，地上碳库和土壤碳库的误差分别达到±50%和±90%，计算结果存在很大的不确定性，不利于清单编制工作。我国对于 IPCC 指南核算方法的本地化工作仍处于研究探索阶段，李捷等^[24]结合 IPCC 指南和 CDM 的方法测算我国可预期的滨海蓝碳增汇量，王涛等^[43]构建我国滨海蓝碳生态系统排放/吸收温室气体的核算方法并设计温室气体清单表格。与林业碳汇方法学相比，我国亟须加强滨海蓝碳的碳汇计量方法研究。截至 2021 年，国际上基于 CDM、VCS 开发的林业碳汇方法达到 26 项，我国编制《碳汇造林项目方法学》等 4 项方法用于支撑林业碳汇交易；然而 CDM、VCS 机制中与滨海蓝碳相关的方法仅有 9 项^[43]，我国支撑蓝碳交易的仅有《红树林碳汇造林项目方法学》，且其国际层面尚未成功应用。此外，我国开展滨海湿地保护修复等的部分分类方式（如微地形改造、潮沟修复）暂未包含在国际碳汇方法学的人为活动参与下的分类（如管理、排干）中，在开展保护修复工程的碳汇计量应用的过程中存在一定局限性。

3 对策建议

3.1 完善政策措施，推进统筹机制

逐步完善滨海蓝碳保护修复、碳汇交易的法律

法规和管理条例建设,推进陆海统筹、生态补偿的机制建设。例如:将滨海蓝碳纳入《中华人民共和国应对气候变化法》的编制,明确保护修复和碳汇交易的相关规定;参考林业碳汇的模式体系,制定保护修复和碳汇交易相关的规章制度和管理条例。在坚持陆海统筹的原则下,系统考量滨海蓝碳生态系统受陆海交互影响的特点,开展陆域径流、滨海湿地和近海海域联动协同的生态环境保护、修复与治理;依托滨海蓝碳服务碳中和的碳汇能力与保护生物多样性的环境能力,研究制定滨海蓝碳保护修复生态补偿机制,逐步达成环境效益和经济效益的最优配置,进而实现湿地生态环境和区域经济的协同发展。

3.2 纳入国家清单,推动国际合作

鉴于我国较大的碳排放压力,结合 UNFCCC 对各履约国编制温室气体清单的机制要求,汲取美国、澳大利亚等编制滨海蓝碳清单的经验,推进我国滨海蓝碳温室气体清单的编制工作。充分发挥我国“蓝碳计划”、海南国际碳排放权交易中心、全国海洋碳汇联盟(COCA)等的作用,提升我国蓝碳工作的引导力。积极申请加入蓝碳伙伴、蓝碳倡议工作组等现有国际蓝碳组织机构,提高我国滨海蓝碳应对气候变化工作的影响力。与澳大利亚等发达国家及萨摩亚等小岛屿国家开展滨海蓝碳保护修复和碳汇计量等方面的技术交流合作,组建利益共同体,推动蓝碳应对气候变化的合作共赢。

3.3 设立评估试点,完善计量方法

设立滨海蓝碳监测计量评估试点,推进滨海蓝碳监测能力建设,开展碳源汇核算计量方法应用示范,逐步完善我国滨海蓝碳计量方法体系。依托我国现有的滨海湿地保护修复专项工程(如重点海域综合治理攻坚战),设立不同空间纬度、植被种类等分区类型的滨海湿地碳汇监测评估试点。系统培养政策、理论、实践复合型蓝碳人才,加大对滨海湿地碳通量与碳储量监测方法以及碳汇评估计量等方面研究的资金投入,提高滨海蓝碳监测能力。以清单编制为目标,细化空间、植被等生态系统分区,补充完善 IPCC 指南框架下的二级和三级碳核算方法系数;以支撑我国碳汇交易为目标,参考国际方

法学的人为活动分类类别,将我国实施的滨海湿地保护修复活动(如微地形改造、潮沟修复)纳入国际核算方法。基于碳汇试点的先进经验及成果,开展碳汇交易探索,为构建我国滨海蓝碳碳汇交易体系提供示范。

3.4 加强科学研究,突破技术瓶颈

滨海蓝碳服务碳中和仍须进一步加强相关技术研究,具体可考虑 3 个方面。①横向碳运移监测计量。加强对滨海湿地横向碳交换机制和计量评估等方面的研究,如陆地河流带来的可溶性碳或不可溶性碳、潮汐反复运动等造成的横向碳交换,进而提高滨海湿地碳汇计量的准确度。②修复过程中的 CH_4 和 N_2O 释放。在开展滨海湿地植被重建、退养还湿等保护修复工程项目期间,为避免 CH_4 和 N_2O 释放量过大而造成温室气体不减反增,应加强对修复过程中 CH_4 和 N_2O 释放机制和通量计量的研究。③信息智能化融合。开展现场调查、遥感监测、物联网传输、模型模拟、人工智能处理的多学科交叉研究,实现信息化、智能化高度融合,构建全国在线监测平台,提高监测能力与监测效率,为科学管理提供支撑依据。

参考文献(References):

- [1] 赵鹏,胡学东.国际蓝碳合作发展与中国的选择[J].海洋通报,2019(6):613—619.
ZHAO Peng, HU Xuedong. International blue carbon cooperation and China's choice[J]. Marine Science Bulletin, 2019(6): 613—619.
- [2] 陈鹭真,潘良浩,邱广龙.中国滨海蓝碳及其人为活动影响[J].广西科学院学报,2021,37(3):186—194.
CHEN Luzhen, PAN Lianghao, QIU Guanglong. Coastal blue carbon sink in China under the influence of human activity[J]. Journal of Guangxi Academy of Science, 2021, 37(3): 186—194.
- [3] UNFCCC-CDMs, AR-AM0014: afforestation and reforestation of degraded mangrove habitats[EB/OL]. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/KMH608T6RL3P5XKNBQE2N359QG7KOE>, 2022—05—16.
- [4] IPCC. 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: wetlands[Z]. 2014.
- [5] 范振林.开发蓝色碳汇助力实现碳中和[J].中国国土资源经济,2021,34(4):12—18.

- FAN Zhenlin. Developing blue carbon sink to implement carbon neutralization[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2021, 34(4): 12–18.
- [6] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[Z]. 2019.
- [7] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 1–11.
- CAI Bofeng, ZHU Songli, YU Shengmin, et al. The interpretation of 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(8): 1–11.
- [8] IPCC. Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities [EB/OL]. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-5/>, 2022–05–18.
- [9] 赵鹏, 姜书, 石建斌. 《气候变化中的海洋与冰冻圈特别报告》的蓝碳内容及其影响[J]. *海洋科学*, 2021, 45(2): 137–143.
- ZHAO Peng, JIANG Shu, SHI Jianbin. Blue carbon in the special report on the ocean and cryosphere in a changing climate and its impacts[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(2): 137–143.
- [10] NELLEMAN C, CORCORAN E, DUARTE C, et al. Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon: a rapid response assessment[M]. GRID-Arendal, 2009.
- [11] KIRWAN M L, MUDD S M. Response of salt-marsh carbon accumulation to climate change[J]. *Nature*, 2012, 489(7417): 550–553.
- [12] Protecting coastal blue carbon through habitat conservation [EB/OL]. <https://www.fisheries.noaa.gov/national/habitat-conservation/protecting-coastal-blue-carbon-through-habitat-conservation>, 2022–05–20.
- [13] NOAA reserve hosts first-ever carbon-offset initiative by U.S. pro football [EB/OL]. <https://coast.noaa.gov/states/stories/noaa-reserve-hosts-carbon-offset-initiative.html>, 2022–06–15.
- [14] FOURQUREAN J W, DUARTE C M, KENNEDY H, et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 505–509.
- [15] MCLEOD E, CHMURA G L, BOUILLON S, et al. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(10): 552–560.
- [16] 韩广轩, 王法明, 马俊, 等. 滨海盐沼湿地蓝色碳汇功能、形成机制及其增汇潜力 [J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3397.Q.20220525.1633.004.html>, 2022–06–10.
- HAN Guangxuan, WANG Faming, MA Jun, et al. Blue carbon sink function, formation mechanism and sequestration potential of coastal salt marshes[J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3397.Q.20220525.1633.004.html>, 2022–06–10.
- [17] 邢庆会, 于彩芬, 廖国祥, 等. 浅析我国海岸带蓝碳应对气候变化的发展研究[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(1): 1–7.
- XING Qinghui, YU Caifen, LIAO Guoxiang, et al. A brief analysis on the development of coastal blue carbon in response to climate change in China [J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(1): 1–7.
- [18] 陈鹭真. 地表高程监测在滨海蓝碳收支评估中的应用[J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(2): 261–268.
- CHEN Luzhen. Application of surface elevation table for carbon budget assessments in coastal blue carbon ecosystems [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2022, 53(2): 261–268.
- [19] MCKEE K L, CAHOON D R, FELLER I. Caribbean mangroves adjust to rising sea level through biotic controls on change in soil elevation [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(5): 545–556.
- [20] HOWES B L, GOEHRINGER D D. Porewater drainage and dissolved organic carbon and nutrient loss through the intertidal creek banks of a New England salt marsh[J]. *Marine Ecology Progress*, 1994, 114(3): 289–301.
- [21] IACONO C L, MATEO M A. Very high-resolution seismo-acoustic imaging of seagrass meadows (Mediterranean Sea): implications for carbon sink estimates[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(18): 102.
- [22] VERNBERG F J. Salt-marsh process: a review[J]. *Environmental Technology and Chemistry*, 1993, 12: 2167–2195.
- [23] FUNK D W, NOEL L E, FREEDMAN A H. Environmental gradients, plant distribution, and species richness in Arctic salt marsh near Prudhoe Bay, Alaska[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2004, 12(3): 215–233.
- [24] 李捷, 刘译蔓, 孙辉, 等. 中国海岸带蓝碳现状分析[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(10): 207–216.
- LI Jie, LIU Yiman, SUN Hui, et al. Analysis of blue carbon in China's coastal zone [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(10): 207–216.
- [25] 王法明, 唐剑武, 叶思源, 等. 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*, 2021, 36(3): 241–251.
- WANG Faming, TANG Jianwu, YE Siyuan, et al. Blue carbon sink function of Chinese coastal wetlands and carbon neutrality strategy[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 241–251.
- [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.
- WANG Xiujun, ZHANG Haibo, HAN Guangxuan. Carbon cycle and “Blue Carbon” potential in China's coastal zone[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(10): 1218–1225.

- 1218—1225.
- [27] LIU Hongxiao, REN Hai, HUI Dafeng, et al. Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 133: 86—93.
- [28] ALONGI D M. Carbon cycling and storage in mangrove forests [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2014, 6(1): 195—219.
- [29] HOWARD J, HOYT S, ISENSEE K, et al. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses [J]. *Journal of American History*, 2014, 14(4): 4—7.
- [30] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力 [J]. *生态学报*, 2008(2): 463—469.
- DUAN Xiaonan, WANG Xiaoke, LU fei, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008(2): 463—469.
- [31] ZHOU Chenhao, MAO Qinyu, XU Xiao, et al. Preliminary analysis of C sequestration potential of blue carbon ecosystems on Chinese coastal zone [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2016, 46(4): 475—486.
- [32] 周毅, 徐少春, 许帅, 等. 中国温带海域新发现较大面积(大于 50 ha)海草床: 渤海兴城—觉华岛海域大面积海草床鳗草种群动力学及补充机制 [J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 943—951.
- ZHOU Yi, XU Shaochun, XU Shuai, et al. New discovery of larger seagrass beds with areas > 50 ha in temperate waters of China: population dynamics and recruitment mechanism of *Zostera marina* in the Xingcheng—Juehuadao coastal waters of bohai sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 943—951.
- [33] 周毅, 许帅, 徐少春, 等. 中国温带海域新发现较大面积(大于 0.5 km²)海草床: 声呐探测技术在渤海唐山沿海海域发现中国面积最大的鳗草海草床 [J]. *海洋科学*, 2019, 43(8): 50—55.
- ZHOU Yi, XU Shuai, XU Shaochun, et al. New discovery of larger seagrass beds with areas > 0.50 km² in temperate waters of China: the largest *Zostera marina* bed in China discovered in the coastal waters of Tangshan in the Bohai Sea by sonar detection technology [J]. *Aquatic Science*, 2019, 43(8): 50—55.
- [34] 周毅, 张晓梅, 徐少春, 等. 中国温带海域新发现较大面积(大于 50 ha)的海草床: 黄河河口区罕见大面积日本鳗草海草床 [J]. *海洋科学*, 2016, 40(9): 95—97.
- ZHOU Yi, ZHANG Xiaomei, XU Shaochun, et al. New discovery of larger seagrass beds with areas > 50 ha in temperate waters of China: an unusual large seagrass (*Zostera japonica*) bed in the Yellow River Estuary [J]. *Aquatic Science*, 2016, 40(9): 95—97.
- [35] 李政, 李文涛, 杨晓龙, 等. 威海荣成桑沟湾海域海草床分布现状及其生态特征 [J]. *海洋科学*, 2020, 44(10): 52—59.
- LI Zheng, LI Wentao, YANG Xiaolong, et al. Distribution and ecological characteristics of seagrass beds in Rongcheng Sanggou Bay, Weihai [J]. *Aquatic Science*, 2020, 44(10): 52—59.
- [36] 孙延瑜, 宋增磊, 刘鹏远, 等. 威海天鹅湖大叶藻 (*Zostera marina*) 与日本鳗草 (*Zostera japonica*) 根际微生物群落结构及其驱动机制 [J/OL]. <https://doi.org/10.13343/j.cnki.wsxb.20200618>, 2020—06—18.
- SUN Yanyu, SONG Zenglei, LIU Pengyuan, et al. Rhizosphere microbial community structure and driving mechanism of *Zostera marina* and *Zostera japonica* in Tian'e Lake, Weihai [J/OL]. <https://doi.org/10.13343/j.cnki.wsxb.20200618>, 2020—06—18.
- [37] 岳世栋, 徐少春, 张玉, 等. 中国温带海域新发现较大面积(大于 50 ha)海草床: 烟台沿海海草分布现状及生态特征 [J]. *海洋科学*, 2021, 45(10): 61—70.
- YUE Shidong, XU Shaochun, ZHANG Yu, et al. New discovery of larger seagrass beds with area > 50 ha in the temperate waters of China: distribution status and ecological characteristics of seagrass in the coastal waters of Yantai [J]. *Aquatic Science*, 2021, 45(10): 61—70.
- [38] 海岸带“蓝碳”的重要“成员”: 海草床 [EB/OL]. <http://www.pecsoa.cn/xc/gzdt/202106/t2021060970012.html>, 2022—05—20.
- An important “member” of “blue carbon” in coastal zone: seagrass bed [EB/OL]. <http://www.pecsoa.cn/xc/gzdt/202106/t2021060970012.html>, 2022—05—20.
- [39] GACIA E, DUARTE C. Elucidating sediment retention by seagrasses: sediment deposition and resuspension in a Mediterranean (*Posidonia oceanica*) meadow [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2001, 52(4): 505—514.
- [40] DUARTE C M, MARBA N, GACIA E, et al. Seagrass community metabolism: assessing the carbon sink capacity of seagrass meadows [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(4): doi:10.1029/2010gb003793.
- [41] KENNEDY H, BEGGINS J, DUARTE C M, et al. Seagrass sediments as a global carbon sink: isotopic nstraints [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(4): GB4026.
- [42] 谢素美, 罗伍丽, 贺义雄, 等. 中国海洋碳汇交易市场构建 [J]. *科技导报*, 2021, 39(24): 84—95.
- XIE Sumei, LUO Wuli, HE Yixiong, et al. Construction of China's marine carbon sink trading market [J]. *Science and Technology Review*, 2021, 39(24): 84—95.
- [43] 王涛, 刘倡, 赵锐, 等. 蓝碳生态系统温室气体清单编制方法研

- 究[J].海洋经济,2021(8):1—17.
- WANG Tao, LIU Chang, ZHAO Rui, et al. Study on greenhouse gas inventory method of blue carbon ecosystem[J]. Marine Economy, 2021(8):1—17.
- [44] 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.
- CHEN Guangcheng, WANG Jing, XU Fanghong, et al. Progress of coastal wetland blue carbon projects in carbon market and advice on facilitating the development of blue carbon projects in China[J]. Journal of Applied Oceanography, 2022, 41(2):177—184.
- [45] Plan Vivo. Vanga-Kenya [EB/OL]. <https://www.planvivo.org/vanga>, 2022—05—20.
- [46] 白洋,胡锋.我国海洋蓝碳交易机制及其制度创新研究[J].科技管理研究,2021,41(3):187—193.
- BAI Yang, HU Feng. Research on China's marine blue carbon trading mechanism and its institutional innovation[J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(3):187—193.
- [47] 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.
- YANG Yue, CHEN Ling, XUE Lan. Top design and strategy selection of blue carbon market construction in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9):92—103.
- [48] PENDLETON L, DONATO D C, MUEEAY B C, et al. Estimating global “Blue Carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems[J]. Plos One, 2012, 7:e43542.
- [49] MACREADIE P I, COSTA M D P, ATWOOD T B, et al. Blue carbon as a natural climate solution[J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2021, 2(12):826—839.