

# 我国海岸带蓝碳生态系统结构现状与 保护优化策略研究

潘德炉<sup>1,2</sup>, 张偲<sup>1</sup>, 秦大河<sup>1,3</sup>, 杨志峰<sup>1,4</sup>, 吴丰昌<sup>1,5,6</sup>, 周成虎<sup>1,7</sup>, 白雁<sup>2</sup>, 郝增周<sup>2\*</sup>,  
欧阳晓光<sup>1</sup>, 阳平坚<sup>6</sup>, 李登峰<sup>2</sup>

(1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458; 2. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012; 3. 中国气象局, 北京 100081; 4. 广东工业大学生态环境与资源学院, 广州 510006; 5. 广东省科学院生态环境与土壤研究所, 广州 510650; 6. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 7. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 海岸带蓝碳生态系统是增加碳汇、实现碳中和最有潜力的生态学途径之一。虽然我国生态环境治理和生态系统保护修复近年来取得明显成效, 但海岸带蓝碳生态系统保护修复模式和蓝碳资源价值转化实现等仍有待优化。本研究梳理并分析了我国红树林、盐沼湿地和海草床等三大海岸带蓝碳生态系统的分布结构及变化; 从海岸带蓝碳资源、生态系统保护修复、蓝碳资源价值和碳汇交易市场等方面, 阐述了我国海岸带蓝碳生态系统的碳汇认知、保护修复的科学性和系统性、蓝碳资源管控体系和价值实现等方面存在的问题。研究提出了完善海岸带蓝碳生态系统认知、强化绿色可持续的保护修复模式、发展蓝碳资源精细化管控体系和交易体系等建议, 可为我国“双碳”目标下的海岸带蓝碳生态系统保护修复与发展研究提供理论指导和决策参考。  
**关键词:** 海岸带; 蓝碳生态系统; 生态保护; 生态修复; 粤港澳大湾区  
**中图分类号:** X321 **文献标识码:** A

## Current Structural Status and Optimized Protection Strategies for Coastal Blue-Carbon Ecosystems in China

Pan Delu<sup>1,2</sup>, Zhang Si<sup>1</sup>, Qin Dahe<sup>1,3</sup>, Yang Zhifeng<sup>1,4</sup>, Wu Fengchang<sup>1,5,6</sup>, Zhou Chenghu<sup>1,7</sup>,  
Bai Yan<sup>2</sup>, Hao Zengzhou<sup>2\*</sup>, Ouyang Xiaoguang<sup>1</sup>, Yang Pingjian<sup>6</sup>, Li Dengfeng<sup>2</sup>

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China; 2. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 3. China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 4. School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 5. Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 6. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 7. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The coastal blue-carbon ecosystems have become the most promising ecological pathways to increasing carbon sinks and

收稿日期: 2024-08-18; 修回日期: 2024-11-08

通讯作者: \*郝增周, 自然资源部第二海洋研究所研究员, 研究方向为海洋遥感与资源保护; E-mail: hzyx80@sio.org.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“粤港澳大湾区蓝碳生态资源保护利用与经济发展战略研究”(2023-DFZD-08)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

achieving carbon neutrality. In recent years, significant achievements have been obtained in ecological environment management and ecosystem protection and restoration in China. However, the protection and restoration model of coastal blue-carbon ecosystems and the value transformation and realization of blue-carbon resources still need to be optimized. This study summarizes and analyzes the current distribution and changes of mangroves, salt marshes, and seagrass beds in China. Subsequently, it elaborates on the problems regarding the understanding of coastal blue-carbon ecosystems, scientific and systematic nature of blue-carbon ecosystem protection and restoration, and management system and value realization of blue-carbon resources, from the aspects of coastal blue-carbon resources, ecosystem protection and restoration, blue-carbon resource values, and blue-carbon trading market. Furthermore, we propose to improve the understanding of coastal blue-carbon ecosystems, strengthen green and sustainable protection and restoration models, and develop refined management and trading systems for blue-carbon resources. This study is expected to provide theoretical guidance and decision-making support for the conservation and restoration of coastal blue-carbon ecosystems in China.

**Keywords:** coastal zone; blue-carbon ecosystem; ecological protection; ecological restoration; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

### 一、前言

2009年,联合国环境规划署等国际组织联合发布的《蓝碳:健康海洋固碳作用的评估报告》首次提出蓝色碳汇概念,指出全球自然生态系统每年通过光合作用捕获的碳中约有55%由海洋生物捕获并固定储存于海洋生态系统,该部分“碳”被称为“蓝碳”,即海洋碳汇<sup>[1]</sup>。我国科学家将“蓝碳”定义为利用海洋活动及海洋生物吸收大气中的二氧化碳(CO<sub>2</sub>),并将其固定在海洋中的过程、活动和机制<sup>[2]</sup>。目前,已将红树林、盐沼湿地、海草床三类海岸带生态系统纳入“蓝碳生态系统”范畴<sup>[3]</sup>。研究发现,红树林的叶片通过吸收大气中的CO<sub>2</sub>,转化为有机碳储存在植物体内,植物残体和根系在沉积物中分解,将有机碳长期储存在土壤中,具有碳汇能力强、碳储存周期长等特点,盐沼植物能够通过其根系和叶子将大量的碳储存于土壤中,海草也能够吸收海水中的CO<sub>2</sub>并将其储存于海底沉积物中<sup>[4]</sup>,红树林、盐沼湿地和海草床等海岸带植物生物量虽然只是陆地植物的0.05%,但其单位面积的碳埋藏速率分别高达(242.2±25.9) g C·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、(226±39) g C·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、(138±38) g C·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,以致其每年的固碳量与陆地植物大体相当<sup>[5,6]</sup>。因此,保护修复海岸带蓝碳生态系统在增加碳汇、缓解气候变化影响等方面起着极为重要的作用<sup>[7]</sup>。

我国拥有近1.8×10<sup>4</sup> km的漫长大陆海岸线,自然生境条件优越,海岸带蓝碳生态系统分布广泛,其中红树林主要分布于浙江以南海域,红树林生态系统总碳储量约为6.9 Tg,盐沼湿地和海草床遍布全国沿海或浅海海域,盐沼湿地生态系统总碳储量约为25 Tg,远高于总碳储量约1.4 Tg的海草床<sup>[8]</sup>。然而,早期对海岸带蓝碳生态系统作用认知不足,

为了满足城市化和工业化发展需求,大量滨海湿地被填埋用于建设港口、工业区和住宅区,红树林被砍伐用于围塘养殖、围海造田,并且在后期恢复中引入大量外来速生生物种如无瓣海桑、互花米草等,原有生态系统被破坏的同时也造成了生物多样性的丧失,中断或影响了其碳汇能力<sup>[9,10]</sup>,给海岸带蓝碳生态系统带来了严重影响<sup>[11]</sup>。

气候变化引起海平面上升、海洋升温等自然环境变化,加速了海岸带侵蚀,从而威胁和损坏红树林、盐沼湿地和海草床生境<sup>[12-15]</sup>,生态系统受到海洋和陆地环境多种驱动因素的影响<sup>[16]</sup>,如海洋的连通性影响红树林种内结构的多样性<sup>[17]</sup>,土壤水盐等改变滨海湿地的蓝碳功能<sup>[18-20]</sup>、光照和温度等影响海草床的光合活性,进而影响其碳汇能力<sup>[21]</sup>。近几十年来,气候变化、围垦和恢复导致我国红树林、湿地和海草床资源及碳功能发生了大规模变化<sup>[22-24]</sup>。植被种植作为生态系统保护修复的自然解决方案,可提升关键生态过程和生态功能<sup>[25-27]</sup>,种植策略和定植速度影响着红树林及盐沼生态系统的保护修复<sup>[28]</sup>,海草种植具有周期短、生物量高等特点,可实现长期的碳储存<sup>[29,30]</sup>。针对我国国家政策和海域生态特点,学者提出了不同的海岸带生态系统保护恢复方法<sup>[31-33]</sup>,基于自然的植被种植方案是当前采取的主要途径,但外来物种灭除难、生态养护难度大以及病虫害影响等给保护修复方案带来了困难<sup>[34-36]</sup>。许多国家针对区域特点已尝试采用多种种植修复方法和技术来保护当地海岸带生态环境与系统功能,如美国的催化轮栽技术<sup>[37]</sup>,日本的人工种植技术<sup>[38]</sup>,马来西亚的防波堤阻浪育苗移栽技术<sup>[39]</sup>,墨西哥的疏通水道技术<sup>[40]</sup>等。此外,部分国家的相关法律、监管政策的制定以及公众参与的推动,也在生态系统保护修复中取得了显著成效<sup>[41,42]</sup>。从长远来看,

通过种植修复技术控制海岸带植被群落物种组成和结构来改善生态系统健康,可增加海洋碳汇<sup>[43,44]</sup>。综上,保护修复海岸带蓝碳生态系统,提高其碳汇能力,离不开因地制宜的修复方法、先进的修复技术以及完整的管控保障体系。

当前,我国在明确提出“双碳”目标的背景下,提高海洋生态系统碳汇能力被认为是最有潜力的增汇、实现碳中和的生态学途径之一<sup>[45]</sup>,海岸带蓝碳生态系统保护修复已备受关注。为此,本文深入调研分析我国海岸带蓝碳生态系统结构及变化;剖析当前海岸带生态系统保护修复与研究发展中面临的问题;从蓝碳生态系统认知、系统保护修复模式和蓝碳资源管控与价值实现交易体系建设等3个方面,提出未来加强我国海岸带蓝碳生态系统保护修复的总体策略,以期为国家推进生态文明建设和实现碳达峰、碳中和目标提供决策参考。

## 二、我国海岸带蓝碳生态系统结构及变化

### (一) 红树林生态系统结构及变化

红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带湿地以木本植物为主的群落,由红树植物为主体的常绿乔木、灌木或蕨类组成<sup>[46]</sup>。红树林生态系统作为热带、亚热带海岸带海陆交错区生产能力最高的海洋生态系统之一,在净化海水、防风消浪、维护生物多样性、固碳储碳等方面发挥着极为重要的作用<sup>[47]</sup>。我国红树林主要分布在广东、广西、福建和海南等南部沿海省份<sup>[48]</sup>,其中,广东、广西、福建和海南都设有国家级红树林自然保护区,是我国红树林分

布集中、保护较为完整的区域。

根据1990—2021年卫星遥感观测统计数据(见表1),1990—2000年,海南、广东、福建等沿海省份都出现了红树林面积减小的趋势,这与我国改革开放及当时的经济政策相关,随着沿海地区城市扩张、基础设施建设以及水产养殖业的发展,红树林生存环境遭到破坏,大量红树林被砍伐和填埋,导致对应时期的红树林面积急剧减少;2000—2015年,随着生态文明建设的推进和生态环境保护意识的增强,我国南部沿海省份加大了对红树林的保护与恢复力度,包括设立自然保护区、开展生态修复工程、推广社区共管机制等措施,有效地遏制了红树林面积的下降趋势,并逐步实现了面积的正增长;2015—2018年,广东、广西、海南和福建的红树林面积分别增加了26%、28.3%、15.3%和81.9%;随着2020年《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)》的制定与印发,沿海各省都积极部署该行动计划的实施工作,截至2021年年底,广东、广西、海南、福建四省份的红树林面积分别达12 098 hm<sup>2</sup>、7642 hm<sup>2</sup>、4747 hm<sup>2</sup>、1086 hm<sup>2</sup>,与1990年相比,共增加15 178 hm<sup>2</sup>,其中,广西和广东面积增加最为显著,分别增长约238.4%和187%,其次是福建、海南,浙江南部地区亦有少量增长。自然资源部2024年发布的《国家生态保护修复公报2024》显示,2023年我国红树林面积已达30 270 hm<sup>2</sup>,与2021年卫星遥感观测统计的红树林面积(26 486 hm<sup>2</sup>)相比,面积增加了3784 hm<sup>2</sup>。足见,自2020年红树林保护修复专项行动计划以来,我国红树林保护修复已取得显著成效。图1系统梳理了我国1990—2021年红树林被破坏、保护和修复的发展历程。

表1 1990—2021年我国主要地区红树林面积及其变化情况

时间/年	广东		广西		海南		福建		浙江		香港、澳门	
	面积/hm <sup>2</sup>	变化率%	面积/hm <sup>2</sup>	变化率%	面积/hm <sup>2</sup>	变化率%	面积/hm <sup>2</sup>	变化率%	面积/hm <sup>2</sup>	变化率%	面积/hm <sup>2</sup>	变化率%
1990	4216	—	2258	—	3701	—	220	—	—	—	292	—
1995	5321	26.2	3108	37.6	3141	-15.1	201	-8.6	0.63	—	285	-2.3
2000	3439	-35.3	3964	27.5	3235	2.9	162	-19.4	—	—	306	7.3
2005	4462	29.7	4984	25.7	3305	2.2	260	60.5	2.07	—	398	30.0
2010	6011	34.7	5978	19.9	3623	9.6	498	91.5	2.79	34.8	468	17.6
2015	7311	21.6	7089	18.7	3702	2.2	499	0	6.12	119.0	442	-5.5
2018	9217	26.0	9095	28.3	4269	15.3	908	81.9	—	—	544	23.1
2021	12 098	31.2	7642	-15.9	4747	11.2	1086	19.6	239.0	—	674	23.9

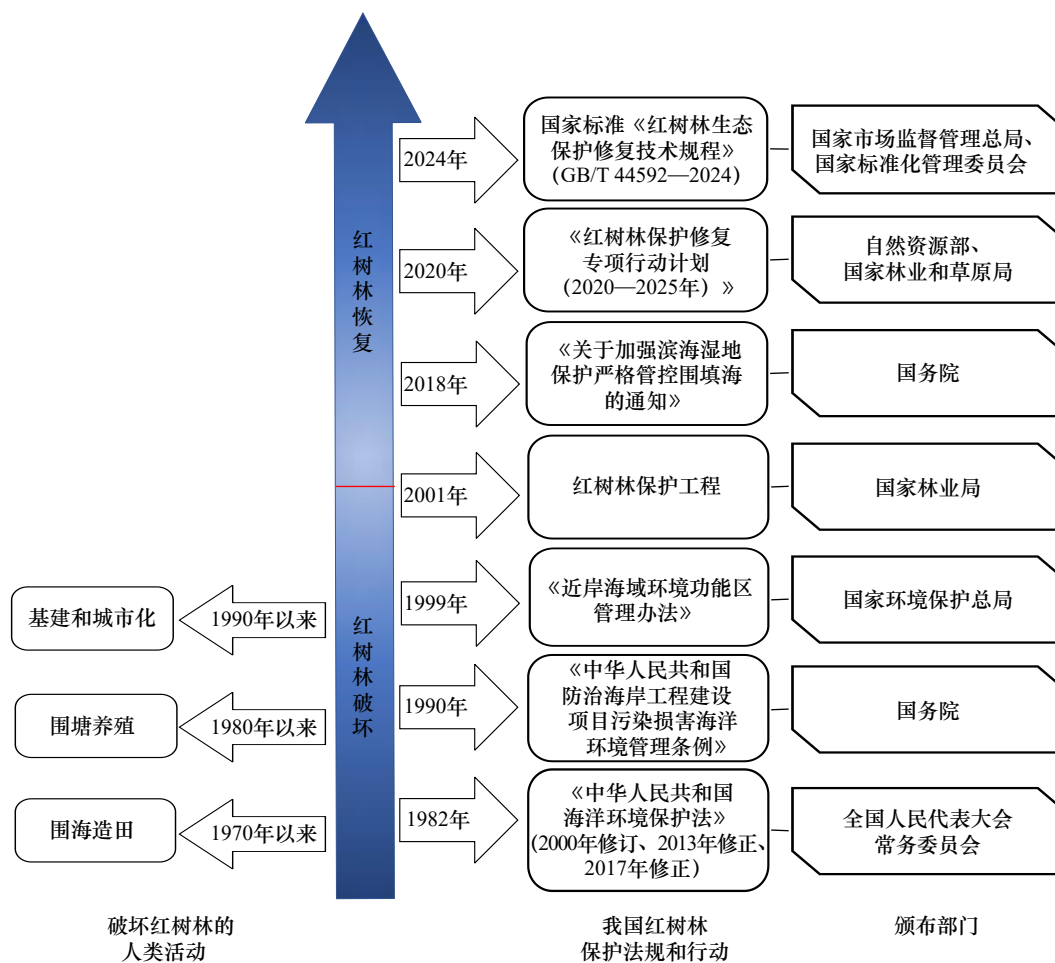


图1 我国红树林的破坏、保护和修复发展变化历程

## (二) 盐沼湿地生态系统结构及变化

滨海盐沼湿地由陆地河流和海洋潮汐交替作用形成，分布于河口或海滨浅滩，蕴含着芦苇、盐地碱蓬、柽柳、蔗草、互花米草等丰富的草本或低灌木盐生植物资源<sup>[49]</sup>。作为海岸带最重要的典型生态系统之一，盐沼湿地在净化水体、固沙促淤、抗击台风风暴潮灾害、维护生物多样性、固碳、调节气候等方面发挥着重要的生态服务功能<sup>[50]</sup>。相较于主要分布在热带、亚热带海岸的红树林，我国盐沼湿地分布则纵贯南北海岸线，主要分布在辽河口、黄河口、长江口、闽江口、珠江口等入海河口区域，总面积范围为1207~3434 km<sup>2</sup>。入海河口盐沼湿地面积变化的驱动因素包括土地开垦、水沙通量变化、盐沼植被种间竞争和演替等。根据长时序卫星遥感监测数据，表2给出了我国五大主要入海口盐沼湿地面积的年际变化。辽河口的盐沼湿地在1995年和2015年出现面积下降，下降幅度大于10%，珠江口

的盐沼湿地在2010—2015年出现大面积下降，5年下降幅度达75.78%，这些都与城市围垦加剧有关；2015年前黄河口、珠江口的盐沼湿地面积下降幅度较大，但自2018年以来，随着海洋生态文明建设、蓝色海湾整治和海岸带保护修复行动等工作的展开，滨海盐沼湿地的保护与修复日益成为各级政府的重点工作，截至2023年，黄河口盐沼湿地面积虽然得到了一定程度的恢复，但仍未达到1985年的水平；珠江口的盐沼湿地恢复缓慢，面积的快速增加和减少与互花米草的扩张和清除有关；长江口盐沼湿地面积虽然在2000—2010年有所下降，但在政府政策的支持下，盐沼湿地面积增长明显，已经得到了很好的恢复。

本文分析了南方各省盐沼湿地总面积的年变化情况（见图2），结果表明：1985—2023年，浙江省和福建省的盐沼湿地面积呈现波动增长，两个省份的面积增长率分别为281.2%和230.6%，面积的快速增加与两省各级政府清除互花米草、减少围填

表2 我国主要入海口盐沼湿地面积年际变化

时间/年	辽河口		黄河口		长江口		闽江口		珠江口	
	面积/hm <sup>2</sup>	变化率/%	面积/hm <sup>2</sup>	变化率/%	面积/hm <sup>2</sup>	变化率/%	面积/hm <sup>2</sup>	变化率/%	面积/hm <sup>2</sup>	变化率/%
1985	14 201.5	—	69 782.5	—	18 049.3	—	—	—	—	—
1990	21 738.8	53.00	71 548.2	2.53	16 993.8	-5.84	5261.3	—	1490	—
1995	18 881.7	-13.14	60 762.6	-15.07	20 152.8	18.59	10 366.7	97.03	—	—
2000	23 893.3	26.50	33 532.9	-44.81	17 732.7	-12.00	12 542.0	20.98	2150	44.30
2005	24 364.4	1.97	20 215.9	-39.70	14 996.0	-15.43	8577.3	-31.61	—	—
2010	27 481.5	12.80	20 598.8	1.89	14 362.7	-4.22	11 647.7	35.79	3220	49.77
2015	24 574.8	-10.57	12 557.5	-39.03	24 842.1	69.70	17 032.5	46.23	780	-75.78
2023	32 432.9	31.97	44 800.0	256.75	>24 100.0	—	—	—	828	6.15

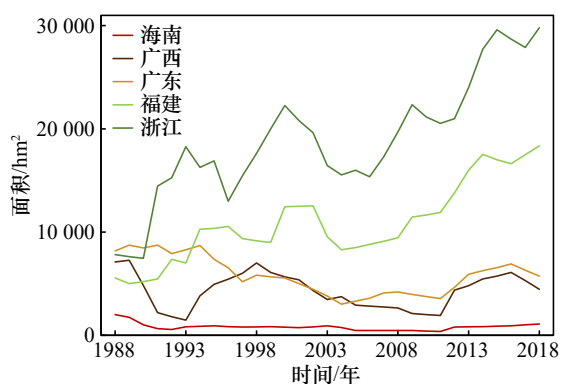


图2 南方各省份盐沼湿地总面积年变化

表3 2019年广东省各沿海城市盐沼湿地面积及其占有率情况

城市	面积/hm <sup>2</sup>	面积占有率/%
珠海市	438.89	34.89
江门市	331.83	26.38
湛江市	162.36	12.91
阳江市	121.59	9.67
汕头市	88.23	7.01
广州市	42.17	3.35
揭阳市	29.75	2.36
其他市(6个)	43.18	3.43

海、加强蓝色海湾和滨海生态文明建设有关；海南、广东和广西的盐沼湿地面积整体都出现了小幅度下降，面积减少率依次为45.1%、1.5%和1.5%。

广东省作为我国沿海海岸线最长的省份，拥有广泛的盐沼湿地生态系统，广东省的14个沿海城市除茂名市外均有滨海盐沼湿地分布。结合多源国产高分卫星和野外现场调查，截至2019年12月，广东省的滨海盐沼湿地分布面积为1258 hm<sup>2</sup>，其中珠海市、江门市、湛江市的分布面积占比最大（见表3）。

### （三）海草床生态系统结构及变化

海草是地球上唯一一类可以完全在海水中完成萌发、开花与结种的被子植物，生长在淤泥质或沙质沉积物上，是从陆地逐渐向海洋迁移而形成<sup>[51]</sup>。海草连接成片构成独特的海草床生态系统，不仅是多种海洋生物的重要栖息地和繁衍场所，还是浅海水域食物链网的重要组成部分<sup>[52]</sup>。作为国际公认的最有效的碳封存生态系统之一，海草床具有稳固近海底质和海岸线、改善海水透明度、减少富营养质

等极其重要的生态功能。由于依赖光合作用，海草常出现在沿岸的潮间带或潮下带的浅水区。我国有黄渤海和南海两大海草分布区：黄渤海海草场主要分布于山东、河北和辽宁等沿海省份，南海海草场包含海南、广东、广西、福建和台湾沿海等区域。

历史研究和实测资料统计表明（见表4），2013年我国海草场的总面积约为8765.1 hm<sup>2</sup>，海南是我国海草场分布面积最大的省份，面积为5634.2 hm<sup>2</sup>，其次是广西、广东和台湾，面积分别为975 hm<sup>2</sup>、942.2 hm<sup>2</sup>和820 hm<sup>2</sup>，而山东省和辽宁省的海草面积约为289.7 hm<sup>2</sup>和100 hm<sup>2</sup>。《国家生态保护修复公报2024》显示，2020年我国近岸海域海草床分布面积约为10 700 hm<sup>2</sup>，相比而言，基于卫星遥感和声呐探测技术的调查统计表明（见表4），我国现有海草场总面积约为11 118.3 hm<sup>2</sup>，海草场典型省份按照面积从高到低划分依次为：海南、河北、广东、山东、辽宁、台湾和广西，与2013年的海草床统计信息相比，2020年我国海草床面积共增加2353.2 hm<sup>2</sup>，其中，广东、台湾、山东和辽宁等省份的海草床面积

表4 2003年、2013年和2020年我国海草床分布面积及其变化情况

省份	2003年		2013年		2020年	
	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%
海南	870	—	5634.2	64.28	4457.0	40.09
广西	690	—	975.0	11.12	573.8	5.16
广东	910	—	942.2	10.75	1604.1	14.43
台湾	—	—	820.0	9.35	573.9	5.16
香港	4.64	—	4.0	0.05	—	—
山东	—	—	289.7	3.31	807.8	7.26
河北	—	—	—	—	2486.1	22.36
辽宁	—	—	100.0	1.14	615.6	5.54
合计	—	—	8765.1	100.00	11 118.3	100.00

实现了正增长，海草床面积增加与我国生态环保政策法规的制定与实施、海草床生态恢复项目的启动都紧密相关。

广东作为典型的海草床分布省份，2020年的遥感和现场调研表明，广东省各地新发现14个海草床分布，海草床总面积增至1604.1 hm<sup>2</sup>，按行政区划分海草床面积从高到低依次为湛江市（928.9 hm<sup>2</sup>）、汕头市（454.8 hm<sup>2</sup>）、阳江市（132 hm<sup>2</sup>）和潮州市（29.97 hm<sup>2</sup>），如图3所示。

### 三、我国海岸带蓝碳生态系统保护修复存在的主要问题

近年来，我国的退塘还林、保护区的设立、“南红北柳”和蓝色海湾等一系列蓝碳生态系统保护修复措施取得积极进展，初步扭转了红树林、盐沼湿地和海草床面积急剧减少的趋势，但海岸带蓝碳生态系统的认知、生境退化、生物多样性降低等问题依然突出，保护和监管能力还比较薄弱，管控体系和区域保护整体协调度不够。

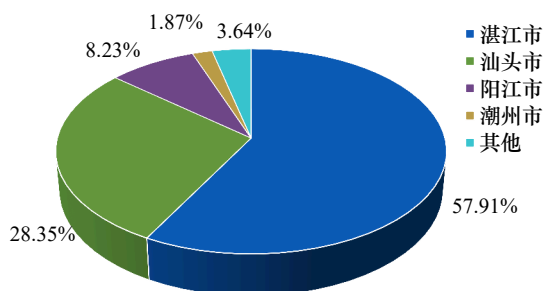


图3 2020年广东省主要城市的海草床面积 (>30 hm<sup>2</sup>) 分布情况

#### （一）对海岸带蓝碳生态系统认知不全、碳汇功能评估缺乏，生态系统依然脆弱且存在功能退化

1. 除红树林、盐沼湿地、海草床等之外的海岸带蓝碳生态系统及其碳汇功能分析尚不充分

除红树林、盐沼湿地、海草床等海岸带生态系统外，我国沿海防护林面积已达2.21×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>，沿海防护林生态系统的碳储量和埋藏速率虽低于传统海岸带蓝碳生态系统，但其碳总储量和埋藏速率与典型海岸带蓝碳生态系统碳汇功能接近<sup>[53,54]</sup>。

在海岸带蓝碳生态系统保护修复中，近岸滩涂养殖、近海水域养殖与之存在矛盾，两者未形成协调发展与协同增汇机制。滩涂或海水养殖会侵占并限制红树林、海草床等湿地生境的发展空间，降低蓝碳生态系统的碳汇功能，如海水养殖成为辽东半岛海草床退化的最直接因素<sup>[55]</sup>；黄河三角洲由于发展海域养殖，2000—2009年土壤有机碳储量由3.43 Tg下降到3.17 Tg<sup>[56]</sup>。截至2022年，全国共建立了169个国家海洋牧场示范区，面积达2.582×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>（见图4）。快速建设的海洋牧场，如大型海藻养殖，其碳汇功能评估等还未得到完整认知。

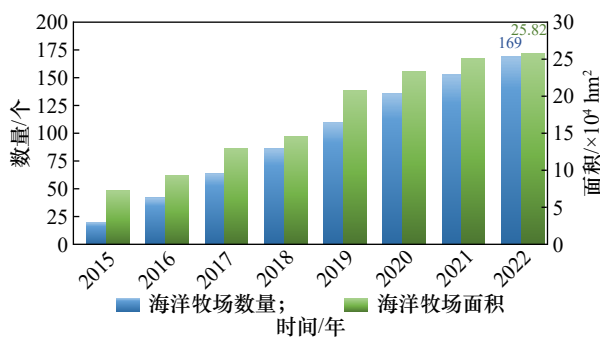


图4 2015—2022年国家级海洋牧场数量及面积变化

2. 在人为活动和自然灾害双重压力下, 海岸带蓝碳生态系统依然脆弱

受沿海城市化和人类活动的影响, 一方面, 围塘养殖、滩涂围垦、围填海、围网、码头建设等人为活动不仅直接导致红树林面积减小、滨海盐沼湿地丧失, 而且侵占了海草生长的浅水海域, 使得许多海草丧失最佳生长地, 几十年的人为用地类型严重侵占蓝碳生态系统: 红树林被码头、发电厂和养殖塘分割, 多数呈点状和片状分布, 生境被破碎化, 同时受到互花米草和微甘菊等入侵物种的影响。另一方面, 陆源养殖、工业排污、生活排污等引起的滨海湿地生态环境恶化、近海水体环境恶化和水体富营养化, 超过红树林、盐沼湿地植被、海草对污染物的耐受力导致其死亡, 同时影响水体和底质引起海草床退化。如珠江三角洲区域, 1980—2015年盐沼湿地面积减少约70%, 1980—2000年红树林湿地面积减少近80%。尽管2000年后, 红树林、盐沼湿地和海草床恶化得到控制, 面积有所回升, 但各类土地利用变化造成蓝碳生态系统减少约54%的土壤碳储量<sup>[57]</sup>, 原有的生物群落结构、生态系统功能需要几十年甚至更长时间才会恢复。

蓝碳生态系统对于气候变化尤为敏感。全球降水状况的变化会影响地下水、河流流量、沉积物含水量和大气湿度, 进而影响植被固碳能力<sup>[58]</sup>和碳输出能力<sup>[59]</sup>; 与全球气候变化关联密切的海平面上升、海水酸度增加、局部极端天气等影响着蓝碳的可持续发展<sup>[60]</sup>。由气候变化引起的海平面上升、海洋升温等因素会加速海岸带的侵蚀, 从而威胁红树林的生存环境、影响盐沼湿地生境、损害海草床生境, 如全球变暖从1.5℃增长到2℃, 估计将有2/3的潮汐沼泽失去调整能力而大幅度退缩<sup>[13]</sup>, 海平面上升与海堤对红树林和盐沼构成双重胁迫, 造成海岸带挤压, 在不能向陆地迁移的情况下, 未来海平面上升将造成这些蓝碳生态系统被海水淹没<sup>[61]</sup>。降雨、高温、低温等极端天气会影响红树林的生长速度, 造成红树林面积减小。如2008年3月的极端低温造成广西沿岸的白骨壤全部死亡; 极端气候事件(厄尔尼诺等)会加剧海草床退化趋势; 自然灾害如台风、风暴、洪水泛滥等导致湿地系统固定的碳向河口或大陆架转移, 损害海草床生境。

总之, 人类活动已经破坏了原本自然条件下建立的生态系统组成与结构, 全球气候变化引起的自

然灾害威胁着生态系统的生产力。生态系统组成和结构的改变、生态系统生产力的下降, 最终导致蓝碳生态系统固碳潜力的削弱。在人为活动和自然灾害的双重影响下, 我国蓝碳生态系统仍然脆弱。

3. 外来速生物种的引入造成生物多样性降低, 生态系统存在系统性退化

自20世纪80年代以来, 我国引入外来物种无瓣海桑进行红树林的恢复, 该物种具有适应性强和生长快速的特点<sup>[62]</sup>, 因而受到青睐, 已在广州市番禺区、深圳市福田区红树林保护区和珠海市淇澳岛等大湾区红树林分布区用于生态恢复, 预计用无瓣海桑恢复的红树林占红树林恢复面积的50%以上。单一无瓣海桑的种植虽在表观上提高了红树林恢复树种的存活率和快速成林, 本土红树植物却很难在无瓣海桑群落内自然更新, 减少了生物多样性。同样, 自1979年盐沼植物互花米草被引入我国滨海地区以来, 互花米草在我国沿海地区广泛扩张, 导致红树林生境退化、底栖动物群落结构改变、海草床衰退、沉积物碳和养分含量降低等, 严重威胁了滨海湿地生态系统的结构与功能完整性, 现已被列入我国16个入侵物种之一<sup>[63]</sup>。

综上, 在我国蓝碳生态系统修复保护过程中, 采用引入外来速生物种来加快红树林、盐沼湿地的面积和生态恢复具有优势。然而, 这些外来速生物种影响着本土红树、盐沼植物的生存, 降低了蓝碳生态系统的生物多样性, 造成原生生态系统的退化。

## (二) 现有海岸带蓝碳生态系统保护修复工作仍存在瓶颈

1. 以面积为导向的海岸带蓝碳生态系统保护修复缺乏科学性和系统性考虑

2020年, 自然资源部、国家林业和草原局印发的《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)》中规划, 到2025年在全国营造和修复红树林面积18 800 hm<sup>2</sup>, 其中新营造红树林面积9050 hm<sup>2</sup>, 修复现有红树林面积约9750 hm<sup>2</sup>。目前红树林、海草床和盐沼湿地等蓝碳生态系统的保护修复以面积作为指标和导向, 可能导致各级部门为达到政策规定的恢复面积, 不以科学为依据, 以牺牲其他生态系统的功能为代价。

早期红树林被围垦转换成养殖塘, 当前滨海养

殖塘清退阻力大，恢复红树林非常艰难。清退的养殖塘通过在异地增补相应面积的红树林，虽然能做到占补平衡，但不是原地恢复，能否成为最佳保护修复方案仍需验证。

在海岸带蓝碳生态系统修复过程中，速生红树物种、互花米草等外来物种的引入，快速且有效地增大了蓝碳生态系统的面积，但对本土红树植物生长构成多重胁迫，带来的生态系统碳汇功能变化、其他生态风险等仍缺少系统分析和科学研究。

2. 海岸带蓝碳生态系统监测和碳汇功能研究存在管理误导风险

微塑料能增加蓝碳生态系统的沉积物碳储量，但忽视了微塑料作为新型污染物，大量累积会影响蓝碳生态系统健康，造成红树林死亡。微塑料本身能吸附其他有毒有害物质，被底栖动物、游泳生物和鸟类摄食后，能通过食物链传递到高等动物。蓝碳生态系统作为一些经济性鱼、虾和蟹类的育幼和庇护场所，这些动物摄食微塑料后被人类进食，是否会给人类健康带来危害还未可知。还有研究认为，滨海养殖的水产品是有效的蓝色碳汇，但是在估算碳汇的时候没有考虑部分养殖塘是红树林围垦转换而成，不考虑围垦造成树木砍伐和土壤扰动造成的温室气体排放，不考虑养殖的水产品自身呼吸排放的温室气体，且海产品生命周期短，作为食物被人体代谢，不具有长期固碳的潜力，海洋养殖不考虑投放饵料对养殖区域带来营养盐增加而导致温室气体排放增加。上述不确定性还未纳入政策制定和管理决策的考量之中。

### （三）海岸带蓝碳生态系统的空间管控体系不健全，蓝碳资源管控体系缺乏，蓝碳资源价值难以体现

1. 海岸带蓝碳生态系统分区范围和单元难以划定，空间管控体系不健全，陆海功能缺乏统筹，综合管理机制还未完善

与城镇空间集中、密集的分区单元划定相比，生态系统空间具有广域性、地域性、多样性、旷野性特征，尤其蓝碳资源较为集中的海岸带地区同时兼具海洋空间的流动性及不确定性特征。当前生态系统空间管控的重点在于控制总量和边界，管理严格但缺少针对性、精细化引导，未能根据生态空间的功能性、生态性、景观性、游憩性差异进行对应

的管控安排，对于以保护为主的各类控制线、廊道、单元，缺乏实施层面的具体管控要求，对于合理发展诉求的建设行为缺乏功能、用途、项目准入条件等的深入研究，对于部分需要细化到地类的空间缺乏管控要素指标的研究和探索。

海域的海洋功能区划和陆域的土地利用规划、城市总体规划，都拥有各自相对独立的技术标准体系，“陆域规划不下海，海域规划不上岸”是普遍存在的问题，陆海规划在功能上缺乏统筹，岸线两侧的功能经常出现相互矛盾的现象。

2018年政府机构改革后，自然资源管理事权统一到自然资源部门，为实现海岸带蓝碳生态系统综合管理构建了机构保障。但是，海岸带管理协同问题依旧存在，如资源空间管理与生态环境部门的协同、与文化旅游部门的协同以及与执法部门的协同等都存在机制体制不健全问题，这对海岸带的开发利用与生态系统保护带来了困难。

2. 海洋蓝碳资源管控体系缺乏，蓝碳资源价值难以体现，碳汇市场发展缓慢

2023年，自然资源部办公厅印发并实施6项技术规程，对红树林、滨海盐沼和海草床3类蓝碳生态系统的碳储量调查评估、碳汇计量监测的方法和技术要求做出规范，填补了蓝碳生态系统业务化调查监测技术规程的空白。但针对蓝碳资源保护、修复和评估等精细化管控体系仍然缺乏。

当前，我国海洋蓝碳资源的管理聚焦于以生态系统固碳量为主的管控思路，主要由政府管理部门负责。蓝碳资源价值实现依赖人为额外固碳量的市场交易，现有碳汇市场的蓝碳价格难以真正反映蓝碳生态价值，如流域入海减污的近海生态环境改善增汇效应、大型藻类养殖固碳能力、海洋牧场碳汇过程的生态服务功能均未得到有效体现。现有碳汇市场存在区域性差别，其市场连通性在体制机制上存在障碍，碳汇交易、碳普惠产品和资金难以自由流动。

## 四、我国海岸带蓝碳生态系统保护优化对策建议

（一）加强海岸带蓝碳资源调查，健全海岸带蓝碳生态系统认知，强化生态系统固碳增汇，保护生物多样性，提升蓝碳生态系统的韧性

综合遥感探测技术和现场调查手段，加强海草

床、海藻场等遥感探测调查技术研究, 全面开展全国沿海红树林、盐沼湿地、海草床和大型海藻场的调查, 摸清我国海岸带蓝碳资源分布。依据蓝碳基本定义, 综合分析研究受潮汐影响的淡水森林等沿海生态系统, 近海海水养殖、海藻场等重要的典型近海海洋生态系统, 充分科学论证其碳汇功能, 逐步健全对我国海岸带蓝碳生态系统的认知。

参考联合国政府间气候变化专门委员会的碳汇能力评估分类, 分析梳理红树林、盐沼湿地、海草床等自然生态系统的碳汇参数, 研究其主要碳汇过程及其表征参数, 形成精准的蓝碳数据参数清单; 围绕国家“双碳”目标和地方专项行动计划等政策文件要求, 定期跟踪我国海岸带蓝碳资源变化, 分析评估我国海岸带蓝碳生态系统海洋碳汇现状和潜力。

从生态系统固碳增汇和生物多样性保护的角度, 审慎引入外来物种开展红树林、海草床、盐沼湿地的生态恢复, 积极采用多样且适合作为先锋物种的乡土物种, 合理搭配进行功能修复, 提高乡土红树种苗、海草种苗、盐沼湿地植被种苗育种的技术水平; 加强外来有害生物防控, 进一步对威胁本地优势物种生长的鱼藤、互花米草等进行清除, 防控藤壶、浒苔和团水虱等污损生物对修复植物的危害, 加强工业、养殖废水的排放管控, 提升海岸带蓝碳生态系统的韧性。

## (二) 以多指标综合考核指导蓝碳生态系统保护修复, 强化退化区的恢复, 发挥试点示范效应, 加快形成绿色可持续的修复保护模式

以面积、功能、生态系统完整性和连通性综合指导<sup>[64]</sup>蓝碳生态系统保护修复, 强化海岸带蓝碳生态系统退化区的恢复, 因地制宜扩大修复面积。建议营造方式包括: 在高潮位与岸基防护林间采用半红树物种造林, 替代滩涂造林, 给候鸟留下足够栖息地和觅食地; 对海岸带已退塘的区域, 科学设计还林方案, 通过恢复水系连通和潮汐开展生态系统修复; 对已退化区域进行充分论证, 合理有序地通过补植再造实现修复, 避免二次污染造成生态系统从碳汇向碳源的转变。推广我国蓝碳生态系统恢复的成功案例, 如南大港湿地生态修复项目通过采取退养还湿、微地形改造、滩面营造和坡面生态化改造等措施, 恢复后的水鸟和候鸟数量增加, 水质改善, 生态系统连通性增强。深圳湾红树林湿地生态

修复项目通过清除无瓣海桑、疏伐和在鱼塘进行红树林生态修复, 实现了围垦区红树林恢复和候鸟增加的良好生态效益。借鉴国际蓝碳生态系统的先进经验, 移除早期围垦建设的堤坝、围堰、挡潮闸门等, 恢复自然的潮汐条件<sup>[65]</sup>。

选择粤港澳大湾区蓝碳生态系统退化的热点区域作为试点示范, 加快形成绿色可持续的修复保护模式。组织高校和科研院所综合开展粤港澳大湾区蓝碳生态系统碳汇的精细化预测与制图, 揭示气候变化与人类活动对大湾区蓝碳生态系统碳汇的耦合影响机制与关键因子; 以红树林修复保护为例, 探索粤港澳大湾区蓝碳生态系统的人工增碳汇技术; 开展微生物碳增汇关键技术研发, 采用合适的微生物功能菌剂, 开展微生物固碳增汇技术在大湾区蓝碳生态系统修复的试点工作, 包括促生菌剂在接种壮苗和功能菌剂在沉积物碳汇提质增汇方面的应用。

## (三) 建立蓝碳资源精细化管控体系, 发展多元化蓝碳资源转化途径和碳汇交易体系, 提高社会和个人的参与度

探索“分区施策、分类管理、清单准入”的蓝碳资源分区分类管控措施, 即在严格保护区实行强制性保护, 在生态控制区允许对蓝碳生态功能不造成破坏的有限人为活动; 在协调发展区根据蓝碳资源承载能力合理控制开发规模和强度, 依据陆海利用功能划分二级分类精细管控措施, 筑牢产业生态门槛和准入门槛。参考海岸带综合管理的方法和管理战略, 建议将多项规划整合到统一的规划体系中, 由国家出台实施建议, 协调地方解决部门职能范围交叉问题, 达到协调各部门工作的目的, 确保蓝碳资源的开发和管理更加高效, 促进地方经济发展, 保护全国生态环境, 实现经济开发与蓝碳保护之间的平衡。

发挥政府与市场补偿的协同作用, 构建多维度、多层次、多样化的生态补偿结构, 以完善生态补偿资金风险分担机制, 进而提高生态补偿效率; 培育、发展和壮大以“减排增汇”为核心的海洋生态旅游、休闲渔业、碳汇技术服务等蓝碳产业; 整合绿色金融政策与蓝碳经济产业发展, 探索以生态修复基金为“杠杆”“蓝碳生态产品+绿色基金”等多种路径融资方式, 鼓励银行、基金公司和保险机构等加大碳汇项目开发, 发展蓝碳金融产品及其衍

生品, 激活生态资产, 提高生态资源供给率; 统一碳普惠市场, 将蓝碳生态系统固碳之外的生态服务价值纳入碳普惠蓝碳定价<sup>[66]</sup>, 将蓝碳碳普惠收益重点用于对蓝碳保护修复做出贡献的中低收入群体。

鼓励并引导企业、社会组织和自然人在生态控制区和协调发展区开展蓝碳资源保护修复行动, 因地制宜地探索并建立促进蓝碳生态系统保护修复的激励机制和补贴政策。开发专门的蓝碳资源精细化管控平台, 引入区块链、物联网、大数据等先进技术, 加强数字化基础设施建设, 为蓝碳价值实现奠定数据基础。扩展“公益型”碳普惠机制转化渠道, 包括以个人旅游与机关事业单位会议会展活动碳中和作为切入点, 鼓励游客购买蓝碳碳普惠制核证减排量进行个人抵消, 倡导机关事业单位通过碳普惠机制实现会议活动碳中和; 允许企业基于社会责任或自我价值宣扬需要, 购买核证减排量用于捐赠或抵消; 引导酒店、餐馆、景区等购买核证减排量抵消客户排放, 并在相关平台给予优先推送等。

## 五、结语

本文通过系统分析红树林、盐沼湿地、海草床等三大海岸带蓝碳生态系统结构和变化, 研究得出我国海岸带蓝碳生态系统在2000年前经历了消退, 在国家制定相关政策、加强生态文明建设后, 红树林、盐沼湿地和海草床等得到了保护修复, 在当前“双碳”目标下海岸带蓝碳生态系统得到进一步的重视。但经历消退-保护恢复后我国海岸带蓝碳生态系统依然脆弱且存在功能退化, 针对当前蓝碳生态系统监测、碳汇功能研究与评估、生态系统保护修复、空间管控、资源价值转化和碳汇交易体系等不足, 建议: ①充分科学论证淡水森林等沿海生态系统、大型海藻场等近海海洋生态系统的固碳增汇功能, 进一步完善海岸带蓝碳生态系统的认知, 进一步保护系统中生物的多样性, 提升我国蓝碳生态系统的韧性; ②以面积、功能、生态系统完整性和连通性等多指数综合考核指导我国海岸带蓝碳生态系统保护修复, 强化生态系统退化区的修复和绿色可持续的保护修复模式的示范与推广; ③探索蓝碳资源分区分类精细化管控、多元化价值转化途径和碳汇交易等体系, 增强社会、企业和个人在生态系统保护修复中的行为贡献。研究可为我国“双碳”

目标下的海岸带蓝碳生态系统保护修复提供理论指导和决策参考。

未来如何进行海岸带蓝碳生态系统保护修复项目增汇成效评估、发展蓝碳数据增值技术、开发蓝碳信息产品、实现蓝碳生态价值、拓展蓝碳产业链条等将是进一步需要研究的重点问题。

### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** August 18, 2024; **Revised date:** November 8, 2024

**Corresponding author:** Hao Zengzhou is a research fellow from the Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources. His major research fields include ocean remote sensing and resource conservation. E-mail: hzyx80@sio.org.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on Protection and Economic Development Strategy of Blue Carbon Ecological Resources in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area” (2023-DFZD-08)

### 参考文献

- [1] 胡学东. 国家蓝色碳汇研究报告: 国家蓝碳行动可行性研究 [M]. 北京: 中国书籍出版社, 2020.  
Hu X D. National blue carbon sequestration research report: Feasibility study of national blue carbon action [M]. Beijing: China Book Press, 2020.
- [2] 张瑶, 赵美训, 崔球, 等. 近海生态系统碳汇过程、调控机制及增汇模式 [J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(4): 438-449.  
Zhang Y, Zhao M X, Cui Q, et al. Processes of coastal ecosystem carbon sequestration and approaches for increasing carbon sink [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2017, 47(4): 438-449.
- [3] 唐剑武, 叶属峰, 陈雪初, 等. 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, 2018, 48(6): 661-670.  
Tang J W, Ye S F, Chen X C, et al. Coastal blue carbon: Concept, study method, and the application to ecological restoration [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2018, 48(6): 661-670.
- [4] 刘镇杭, 刘大海, 池源, 等. 基于自然的海岸带蓝碳增汇措施及其技术体系研究 [J]. 海岸工程, 2023, 42(1): 13-24.  
Liu Z H, Liu D H, Chi Y, et al. Research on measures and technology system for enhancing coastal blue carbon sink based on natural endowment [J]. *Coastal Engineering*, 2023, 42(1): 13-24.
- [5] Ouyang X, Lee S Y. Updated estimates of carbon accumulation rates in coastal marsh sediments [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(18): 5057-5071.
- [6] 章海波, 骆永明, 刘兴华, 等. 海岸带蓝碳研究及其展望 [J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(11): 1641-1648.  
Zhang H B, Luo Y M, Liu X H, et al. Research on blue carbon in coastal zones and its prospects [J]. *Scientia Sinica (Terrae)* 2015, 45(11): 1641-1648.
- [7] Blue future: Coastal wetlands can have a crucial role in the fight against climate change [J]. *Nature*, 2016, 529: 255-256.

- [8] Wang F M, Liu J H, Qin G M, et al. Coastal blue carbon in China as a nature-based solution toward carbon neutrality [J]. *The Innovation*, 2023, 4(5): 100481.
- [9] Zhang J F, Mao D H, Liu J H, et al. *Spartina alterniflora* invasion benefits blue carbon sequestration in China [J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(12): 1991–2000.
- [10] Zhou J G, Zhang J F, Chen Y P, et al. Blue carbon gain by plant invasion in saltmarsh overcompensated carbon loss by land reclamation [J]. *Carbon Research*, 2023, 2(1): 39.
- [11] 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 J, Liu Y M, Sun H, et al. Analysis of blue carbon in China's coastal zone [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(10): 207–216.
- [12] He Q. A drowned future for coastal ecosystems [J]. *Nature*, 2023, 621(7977): 44–45.
- [13] Saintilan N, Horton B, Törnqvist T E, et al. Widespread retreat of coastal habitat is likely at warming levels above 1.5 °C [J]. *Nature*, 2023, 621(7977): 112–119.
- [14] Wang F M, Sanders C J, Santos I R, et al. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change [J]. *National Science Review*, 2020, 8(9): nwa296.
- [15] 陈思明, 邓钟, 张红月, 等. 气候变化对中国沿海红树林潜在分布格局的影响 [J]. *湿地科学与管理*, 2024, 20(3): 32–37, 44.  
Chen S M, Deng Z, Zhang H Y, et al. Impact of climate change on potential distribution of mangrove along the Chinese coast [J]. *Wetland Science & Management*, 2024, 20(3): 32–37, 44.
- [16] Reis A, Rovai A S, da Cunha Lana P, et al. Mangrove interaction with saltmarsh varies at different life stages [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: 167410.
- [17] Gouvêa L P, Fragkopoulou E, Cavanaugh K, et al. Oceanographic connectivity explains the intra-specific diversity of mangrove forests at global scales [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(14): e2209637120.
- [18] Huang W X, Han G X, Wei S Y, et al. Seasonal precipitation distribution determines ecosystem CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange by regulating spring soil water-salt dynamics in a brackish wetland [J]. *Functional Ecology*, 2024, 38(9): 1959–1970.
- [19] Li X, Chen K L, Zhang Q Q, et al. The response of soil carbon mineralization losses to changes in rainfall frequency is seasonally dependent in an estuarine saltmarsh [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 197: 109538.
- [20] Song J, Liang Z H, Li X G, et al. Precipitation changes alter plant dominant species and functional groups by changing soil salinity in a coastal salt marsh [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 368: 122235.
- [21] Smith S V. Marine macrophytes as a global carbon sink [J]. *Science*, 1981, 211(4484): 838–840.
- [22] Fan B X, Li Y F. China's conservation and restoration of coastal wetlands offset much of the reclamation-induced blue carbon losses [J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(1): e17039.
- [23] Lu W Z, Xiao J F, Gao H Q, et al. Carbon fluxes of China's coastal wetlands and impacts of reclamation and restoration [J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(4): e17280.
- [24] Wang X X, Xiao X M, Zhang X, et al. Rapid and large changes in coastal wetland structure in China's four major river deltas [J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(8): 2286–2300.
- [25] Curnick D J, Pettoirelli N, Amir A A, et al. The value of small mangrove patches [J]. *Science*, 2019, 363(6424): 239.
- [26] Liu Z Z, Fagherazzi S, He Q, et al. A global meta-analysis on the drivers of salt marsh planting success and implications for ecosystem services [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 3643.
- [27] Hatje V, Copertino M, Patire V F, et al. Vegetated coastal ecosystems in the southwestern Atlantic Ocean are an unexploited opportunity for climate change mitigation [J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4: 160.
- [28] Schwarz C, van Rees F, Xie D H, et al. Salt marshes create more extensive channel networks than mangroves [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2017.
- [29] 李森, 范航清, 邱广龙, 等. 海草床恢复研究进展 [J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2443–2453.  
Li S, Fan H Q, Qiu G L, et al. Review on research of seagrass beds restoration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2443–2453.
- [30] Fourqurean J W, Duarte C M, Kennedy H, et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 505–509.
- [31] 陈克亮, 吴侃侃, 黄海萍, 等. 我国海洋生态修复政策现状、问题及建议 [J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(1): 170–178.  
Chen K L, Wu K K, Huang H P, et al. Marine ecological restoration policies in China: Status, problems and suggestions [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(1): 170–178.
- [32] 徐淑升, 龚海洋, 陈绵润. 红树林、陆地草原、海草床生态修复的对比研究 [J]. *环境科学与管理*, 2023, 48(8): 111–115.  
Xu S S, Gong H Y, Chen M R. Comparative analysis on ecological restoration of mangrove, land grassland and seagrass beds [J]. *Environmental Science and Management*, 2023, 48(8): 111–115.
- [33] 于凌云, 林绅辉, 焦学尧, 等. 粤港澳大湾区红树林湿地面临的生态问题与保护对策 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(4): 782–790.  
Yu L Y, Lin S H, Jiao X Y, et al. Ecological problems and protection countermeasures of mangrove wetland in Guangdong–Hong Kong–Macao greater bay area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(4): 782–790.
- [34] 陈志德. 下潭尾湿地公园红树林生态修复实施效果分析 [J]. *南方农业*, 2024, 18(16): 162–164, 177.  
Chen Z D. Implementation effect of mangrove ecological restoration in Xiatanwei Wetland Park [J]. *South China Agriculture*, 2024, 18(16): 162–164, 177.
- [35] 任光瑞. 临港滩盐沼植被的生态修复效果分析 [J]. *中国资源综合利用*, 2024, 42(1): 135–137.  
Ren G R. Analysis on ecological restoration effect of salt marsh vegetation in Lingang tidal flats [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2024, 42(1): 135–137.
- [36] 吴一凡, 艾瑶, 郑忠禄, 等. 厦门四个红树林湿地修复工程成效评估 [J]. *生态学杂志*, 2023, 42(10): 2419–2424.  
Wu Y F, Ai Y, Zheng Z L, et al. Evaluation for the effectiveness of four mangrove wetland restoration projects in Xiamen [J]. *Chinese*

- Journal of Ecology, 2023, 42(10): 2419–2424.
- [37] 赵茜瑶. 美国纽约弗莱士河公园的景观生态修复 [J]. 现代园艺, 2016 (10): 133–134.
- Zhao X Y. Landscape ecological restoration of Flesh River Park in New York, USA [J]. *Xiandai Horticulture*, 2016 (10): 133–134.
- [38] 余辉. 日本琵琶湖流域生态系统的修复与重建 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(1): 36–43.
- Yu H. Ecosystem restoration and regeneration of Lake Biwa Basin, Japan [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(1): 36–43.
- [39] Kamali B, Hashim R. Mangrove restoration without planting [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(2): 387–391.
- [40] Zaldívar-Jiménez A, Ladrón-de-Guevara-Porras P, Pérez-Ceballos R, et al. US–Mexico joint gulf of Mexico large marine ecosystem based assessment and management: Experience in community involvement and mangrove wetland restoration in términos lagoon, Mexico [J]. *Environmental Development*, 2017, 22: 206–213.
- [41] 唐圣因, 李京梅. 美国湿地补偿银行制度运转的关键点及对中国的启示 [J]. 湿地科学, 2018, 16(6): 764–770.
- Tang S N, Li J M. Key points of the operation of the US wetland mitigation banking system and its inspiration to China [J]. *Wetland Science*, 2018, 16(6): 764–770.
- [42] 李显锋. 水污染防治的立法实践、经验与启示——以日本琵琶湖保护为例 [J]. 农林经济管理学报, 2015, 14(2): 184–191.
- Li X F. Legislative practices, experiences and enlightenments of prevention and control of water pollution: A case study of Lake Biwa protection [J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2015, 14(2): 184–191.
- [43] 高扬, 何念鹏, 汪亚峰. 生态系统固碳特征及其研究进展 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1264–1274.
- Gao Y, He N P, Wang Y F. Characteristics of carbon sequestration by ecosystem and progress in its research [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(7): 1264–1274.
- [44] 叶嘉晖, 邱崇玉, 曾文轩, 等. 海草床沉积物有机碳研究综述 [J]. 海洋科学, 2022, 46(9): 130–145.
- Ye J H, Qiu C Y, Zeng W X, et al. Review of organic carbon in seagrass bed sediment [J]. *Marine Sciences*, 2022, 46(9): 130–145.
- [45] Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, et al. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 961–968.
- [46] 张莉, 郭志华, 李志勇. 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1153–1159.
- Zhang L, Guo Z H, Li Z Y. Carbon storage and carbon sink of mangrove wetland: Research progress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 1153–1159.
- [47] Komiyama A, Ong J E, Pongparn S. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review [J]. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 128–137.
- [48] Thorhaug A, Gallagher J B, Kiswara W, et al. Coastal and estuarine blue carbon stocks in the greater Southeast Asia Region: Seagrasses and mangroves per nation and sum of total [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 160: 111168.
- [49] 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 F M, Tang J W, Ye S Y, et al. Blue carbon sink function of Chinese coastal wetlands and carbon neutrality strategy [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 241–251.
- [50] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 等. 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展 [J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5141–5152.
- Cao L, Song J M, Li X G, et al. Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(17): 5141–5152.
- [51] 郑凤英, 邱广龙, 范航清, 等. 中国海草的多样性、分布及保护 [J]. 生物多样性, 2013, 21(5): 517–526.
- Zheng F Y, Qiu G L, Fan H Q, et al. Diversity, distribution and conservation of Chinese seagrass species [J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(5): 517–526.
- [52] Phillips R C, Menez E G. *Seagrass* [M]. Washinton DC: Smithsonian Institution Press, 1988.
- [53] Li Y, Fu C C, Hu J, et al. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and fractions in blue carbon ecosystems: Implications for carbon accumulation in allochthonous-dominated habitats [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(14): 5913–5923.
- [54] Li Y, Fu C C, Wang W Q, et al. An overlooked soil carbon pool in vegetated coastal ecosystems: National-scale assessment of soil organic carbon stocks in coastal shelter forests of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 876: 162823.
- [55] Xu S C, Xu S, Zhou Y, et al. Long-term changes in the unique and largest seagrass meadows in the Bohai Sea (China) using satellite (1974–2019) and sonar data: Implication for conservation and restoration [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 856.
- [56] Ma T T, Li X W, Bai J H, et al. Four decades' dynamics of coastal blue carbon storage driven by land use/land cover transformation under natural and anthropogenic processes in the Yellow River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 741–750.
- [57] Sasmito S D, Taillardat P, Clendenning J N, et al. Effect of land-use and land-cover change on mangrove blue carbon: A systematic review [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(12): 4291–4302.
- [58] 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 CO<sub>2</sub> [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(10): 552–560.
- [59] Ouyang X G, Maher D T, Santos I R. Climate change decreases groundwater carbon discharges in global tidal wetlands [J]. *One Earth*, 2024, 7(8): 1442–1455.
- [60] Lovelock C E, Reef R. Variable impacts of climate change on blue carbon [J]. *One Earth*, 2020, 3(2): 195–211.
- [61] Lovelock C E, Cahoon D R, Friess D A, et al. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise [J]. *Nature*, 2015, 526(7574): 559–563.
- [62] 田广红, 陈蕾伊, 彭少麟, 等. 外来红树植物无瓣海桑的入侵生态特征 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(12): 3014–3020.
- Tian G H, Chen L Y, Peng S L, et al. Ecological traits of invasiveness of alien mangrove species *Sonneratia apetala* [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(12): 3014–3020.
- [63] Zhang X, Xiao X M, Wang X X, et al. Continual expansion of *Spartina alterniflora* in the temperate and subtropical coastal zones of

- China during 1985—2020 [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 117: 103192.
- [64] Ouyang X G, Guo F, Lee S Y, et al. Mangrove restoration in China's tidal ecosystems [J]. *Science*, 2024, 385(6711): 836.
- [65] Twomey A J, Nunez K, Carr J A, et al. Planning hydrological restoration of coastal wetlands: Key model considerations and solutions [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 915: 169881.
- [66] 冯翠翠, 龚语嫣, 叶观琼, 等. 全球海岸带国家蓝碳资源价值与类型研究 [J]. *应用海洋学学报*, 2024, 43(1): 1–11.
- Feng C C, Gong Y Y, Ye G Q, et al. Value accounting and type analysis of coastal blue carbon resources in the world coastal countries [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2024, 43(1): 1–11.