

引用格式: 向爱, 揣小伟, 李家胜. 中国沿海省份蓝碳现状与能力评估[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1138–1154. [Xiang A, Chuai X W, Li J S. Assessment of the status and capacity of blue carbon in China's coastal provinces[J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1138–1154.] DOI: 10.18402/resci.2022.06.04

中国沿海省份蓝碳现状与能力评估

向爱¹, 揣小伟^{1,2}, 李家胜³

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210046; 2. 南京大学关键地球物质循环前沿科学中心, 南京 210046; 3. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

摘要: 中国海岸线总长度超过3.26万km, 同时拥有红树林、盐沼、海草床3类蓝碳生态系统, 且海水养殖产量常年位居世界首位, 蓝碳发展条件得天独厚。本文在系统梳理国内外蓝碳研究成果的基础上, 基于广义蓝碳定义, 尝试从自然生态系统和海水养殖系统两方面构建中国沿海省份蓝碳核算体系, 基于相关统计数据、遥感数据、核算参数数据, 对中国沿海省份蓝碳进行核算, 分析其时空演化格局, 并利用Super-SBM模型进一步对中国海水养殖碳汇渔业效率进行评估。研究表明: ①中国蓝碳生态系统面积呈波动增长, 1997—2019年红树林固碳量为0.033~0.078 Tg C/a, 盐沼固碳量为0.234~0.646 Tg C/a, 海草床固碳量为0.012~0.018 Tg C/a; ②沿海九省2003—2020年的海水养殖年固碳总量为0.87~1.36 Tg C/a, 省际空间差异显著, 并在各时段表现出不同的增长特征; ③沿海九省年蓝碳总量及结构的分布格局差异明显, 就蓝碳能力而言, 山东和福建蓝碳能力最高; 就蓝碳结构而言, 江苏的蓝碳构成比例较为均衡; ④土地利用变化、蓝碳生态系统与海水养殖的不协调发展、气候变化等是影响蓝碳能力的重要因素, 沿海九省2003—2020年的碳汇渔业效率值反映出海水养殖经济指标投入与生态环境产出存在一定失调, 这也会遏制蓝碳的挖掘和利用。最后本文就蓝碳助力国家碳中和战略提出相应的优化建议。

关键词: 蓝碳生态系统; 海水养殖; 渔业碳汇; 蓝碳能力评估; Super-SBM模型; 中国沿海省份

DOI: 10.18402/resci.2022.06.04

1 引言

为应对愈发严峻的全球气候变化形势, 国内外政府、学界一致号召关注环境碳排放, 支持发展低碳经济, 因此, 碳汇固存、温室气体减排等学术议题备受关注。在地球生态系统各种调节机制的作用下, 人类活动排放的“碳”被陆地植被光合作用捕获形成“绿碳”, 蓝碳则是由海洋生态系统生物通过一系列海洋活动固定、储存而形成的碳汇^[1]。全球蓝碳生态系统的碳埋藏量占海洋沉积物碳埋藏总量的50%^[2], 在应对全球气候变化、促进碳循环过程中起到关键作用。海岸带是重要的陆海相互作用区域, 海岸带湿地植被有着极高的固碳能力和储碳潜力, 全年有机碳埋藏量可达0.08~0.22 Pg C/a^[3]。对

中国来说, 碳达峰和碳中和是未来一段时间的重要任务, 碳汇核查离不开对海岸带蓝碳的研究。中国海岸线总长度超过3.26万km, 内海和边海的水域面积约470万km², 海岸带不仅是经济社会活动密集分布区域, 更是生态空间保护与修复的关键地带。有研究表明, 中国海岸带总碳储量约13877万~34895万t CO₂, 未来增汇量可达602万t CO₂^[4]。对中国沿海省份蓝碳现状进行系统梳理, 有助于促进生态系统保护和修复, 挖掘蓝碳资源潜力, 助力国家碳中和战略。

学术界多项报告和研究将蓝碳界定为由红树林、海草床和盐沼3类湿地生态系统固存的碳^[5,6]。国内外关于海岸带蓝碳生态系统的研究集中在研究不同类型或区域蓝碳的资源本底现状及分布^[7]、

收稿日期: 2021-09-27, 修订日期: 2022-01-05

基金项目: 关键地球物质循环前沿科学中心科研基金项目(DLTDPY2101)。

作者简介: 向爱, 女, 重庆江津人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与环境影响评价。E-mail: xiangai98@126.com

通讯作者: 揣小伟, 男, 河北迁西人, 副教授, 主要研究方向为土地利用与环境影响评价。E-mail: chuaixiaowei@163.com

2022年6月

植被固碳能力^[8,9]、固碳过程及机制^[10,11]、碳储量影响因素^[12,13]等方面,提供了相应的参数及方法论基础。就中国海岸带蓝碳的实证研究而言,也积累了一定的成果:①从固碳量看,中国海岸带蓝碳生态系统总面积为1623~3850 km²,周晨昊等^[14]参照全球平均值,估算出中国蓝碳生态系统年均固碳量为0.349~0.835 Tg C/a; Meng 等^[15]基于已有观测数据及参数,利用 ArcGIS 软件进行全国尺度的滨海湿地蓝碳制图及总量核算,得出总量结果为0.84 Tg C/a; Wang 等^[16]在评估全球土壤碳固存的空间模式和驱动因素的基础上,利用耦合模型预测出到21世纪末,中国的蓝碳生态系统年均碳固存能力可由当前的1.24 Tg C/a增至3.64 Tg C/a。②从研究方法看,唐剑武等^[17]将蓝碳定量研究方法总结为碳通量测量、碳库测量、模拟实验、模型研究4个方面;李捷等^[4]基于 IPCC 提供的碳汇计量方法,根据红树林、盐沼和海草床的生态系统特征及结构,归纳总结出蓝碳计量方法。以上方法^[4,17]在广东^[18]、海南^[19]、广西^[20]等地开展的红树林固碳能力及碳汇收支研究中得以体现。

近年来,随着中国海水养殖规模不断扩张,“双碳”目标导向下的产业发展路径更加清晰,海水养殖贝类、藻类的固碳能力及其对蓝碳的贡献得到学界重视。养殖贝类通过自身钙化过程、大型养殖藻类通过光合作用,吸收水体中的碳元素,释放出大量的溶解有机碳和颗粒有机碳,促进生成沉积碳库^[21],有研究估算出全球大型海藻对深海长期有机碳固存的贡献潜力可达173 Tg C/a^[22]。有学者进行了关于拓展蓝碳定义的讨论和研究:张继红等^[23]提出海洋养殖生物也是重要蓝碳;唐剑武等^[17]将藻类、贝类转化并埋藏在海底的碳纳入到广义蓝碳定义中;沈金生等^[24]进行海洋牧场蓝碳市场定价研究,以期体现海水养殖碳汇的生态服务价值。因而,深入研究海水养殖贝藻的固碳能力有利于挖掘新兴海岸带蓝碳潜力,提升经济效益^[25]。同时,中国学者进行了一系列沿海省份海水养殖固碳能力估算和时空演化研究^[26,27],以及海水养殖渔业发展的空间相关性分析^[28]。海水养殖渔业的效率测评能够反映低碳语境下经济社会与生态环境之间的协调发展态势或问

题,部分学者运用 DEA 模型、SBM 指数、Malmquist 指数等方法对中国海水养殖渔业的经济效率^[29]、绿色效率^[30]、全要素生产率^[31]等进行测算。

在海水养殖贝藻固碳能力研究基础上,唐启升^[32]将充分发挥水生生物碳汇功能、移除溶解在海水中的 CO₂ 气体、具有直接或间接降低温室气体浓度效果的渔业生产活动泛称为“碳汇渔业”。碳汇渔业强调海水养殖的低碳转型和绿色发展,海水养殖贝藻也因其高固碳能力成为碳汇渔业的主体部分^[33]。碳汇渔业效率及其经济溢出效应是当前相关研究的热点^[34],为本文系统考量中国海水养殖固碳能力提供了思路。总体而言,相关研究由过去聚焦其经济价值,向着更综合的全域生态空间视角转变,并强调通过高质量发展海水养殖业来推动蓝碳生态系统的保护与修复。

中国蓝碳研究与应用体系的构建应体现经济社会发展情况和科学研究的成果^[35],“双碳”时代背景下,这一呼吁更显著意义和价值。建立全域生态空间碳核算清单至关重要,沿海省份蓝碳核查则是重要组成部分。当前中国的相关研究仍旧缺乏一个统筹的视角,将蓝碳生态系统和海水养殖碳汇纳入到蓝碳能力评估的全局考察中。本文在已有研究基础上,基于广义的蓝碳定义,尝试从自然生态系统(红树林、盐沼、海草床)和海水养殖系统(贝类、藻类)两方面构建中国沿海省份蓝碳核算体系,收集相关统计数据、遥感数据、参数数据,梳理沿海省份1997—2019年的红树林动态发展趋势以及盐沼、海草床的近年资源状况^①;分省核算2003—2020年的海水养殖固碳量,并分析其时空演化格局;同时,利用 Super-SBM 模型对中国碳汇渔业2003—2020年的效率进行分省评估,以期诊断现存问题;并对蓝碳开发利用模式与发展路径提出优化建议,以积极服务于国家发展战略需求。

2 研究方法 with 数据

2.1 中国沿海省份蓝碳核算体系

本文构建的中国沿海省份蓝碳核算体系如图1。对于蓝碳生态系统,利用 ArcGIS 软件对相关蓝碳生态系统空间数据集进行分区统计,并根据已有

① 当前蓝碳生态系统面积统计以遥感监测和实地调查为主,来自统一数据源的连续监测结果较少,本文数据主要来源于已有研究成果和数据集。海水养殖固碳量计算基于统计年鉴,且年产出稳定。故受数据获取限制,本文蓝碳生态系统研究期与海水养殖固碳量及碳汇渔业效率值测算的研究期不同。

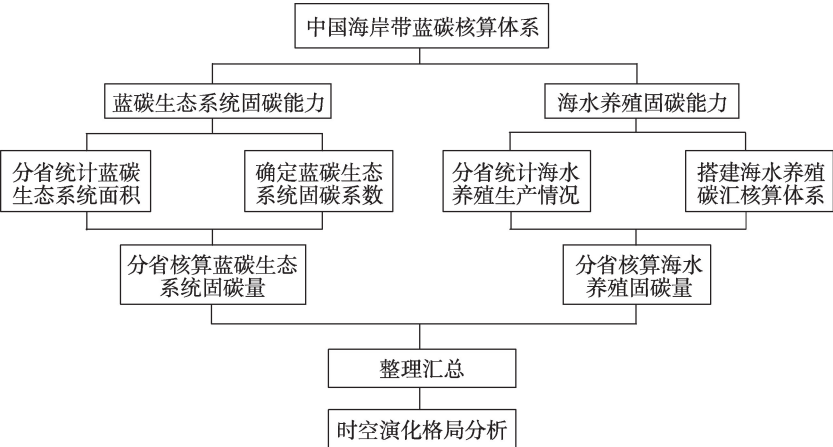


图1 中国沿海省份蓝碳核算体系

Figure 1 Blue carbon accounting system for China's coastal provinces

研究确定不同蓝碳生态系统的固碳系数,分省核算沿海省份蓝碳生态系统固碳能力,并分析其时空格局。对于海水养殖固碳能力,本文以贝类、藻类的碳汇能力作为海水养殖碳汇的主要研究对象,使用物质质量评估法^[36]对中国沿海省份2003—2020年海水养殖固碳能力进行测度,计算公式如表1。结合相关文件和研究成果,对中国海水养殖常见贝类、藻类品种的干湿系数、质量比重、含碳量等数据进行整理,得到表2。

表1 中国海水养殖固碳能力测算方法

Table 1 Methodology for measuring the carbon sequestration capacity of mariculture carbon sinks in China

类别	碳汇量计算公式
贝类	贝类碳汇量=贝壳碳汇量+软体组织碳汇量
	贝壳碳汇量=贝类总产量×干重比×贝壳质量比重×贝壳含碳率
	软体组织碳汇量=贝类总产量×干重比×软体组织质量比重×软体组织含碳率
藻类	藻类碳汇量=藻类产量×干重比×藻类含碳率
总计	碳汇总量=贝类碳汇量+藻类碳汇量

表2 中国海水养殖主要贝类藻类品种碳汇测算系数

Table 2 Calculation coefficients for carbon sinks of major shellfish and algae species in Chinese mariculture

类别	种类	干重比/%	数据来源	含碳率/%		数据来源	质量比重/%		数据来源
				软组织	贝壳		软组织	贝壳	
贝类	贻贝	75.28	纪建悦等 ^[37]	45.98	12.68	自然资源部 ^[38]	8.47	91.53	刘锴等 ^[39]
	扇贝	63.89		43.87	11.44	刘锴等 ^[39]	14.35	85.65	
	蛭	70.48	邵桂兰等 ^[40]	44.99	13.24	邵桂兰等 ^[40]	3.26	96.74	邵桂兰等 ^[40]
	蛤	52.55	纪建悦等 ^[37]	42.84	13.24	自然资源部 ^[38]	1.98	98.02	刘锴等 ^[39]
	牡蛎	65.10		44.90	11.52		6.14	93.86	
	蚶	64.21		45.86	11.51	马欢等 ^[41]	11.41	88.59	纪建悦等 ^[37]
	鲍	64.21		40.04	12.02		11.41	88.59	
	螺	64.21		36.83	11.29		11.41	88.59	
	江珧	64.21		40.73	13.16	自然资源部 ^[38]	11.41	88.59	
	海菜	20.00	自然资源部 ^[38]	31.20		自然资源部 ^[38]			
藻类	裙带菜			28.81					
	紫菜			41.96					
	江蓠			24.50					
	石花菜			26.37					
	麒麟菜			30.36					
	羊栖菜			30.36					
	苔菜			30.36					

2022年6月

2.2 海水养殖碳汇渔业效率评估方法

2.2.1 效率测算模型

数据包络分析法自 Charnes 于 1978 年提出以来在国内外得到认同,该模型能够对一系列具备多组投入和产出的决策单位的相对绩效作出综合评价^[42]。Tone^[43]建立了非径向不平衡的、基于松弛性的 DEA 模型 (Slacks-Based Measure Model, 简称 SBM 模型)。随后 Tone^[44]进一步提出了 Super-SBM 以解决以往普遍反映的非零松弛问题,并包含了非期望产出,此模型允许有效决策单元的效率值大于 1,能够更直观地对不同单元效率值进行评价。考虑到中国海水养殖碳汇渔业投入产出的实际情况,本文采用考虑非期望产出的 Super-SBM 模型对其效率值进行评估,使用 DEA-Slover Pro 5.0 软件进行计算。Super-SBM 模型的数学形式如下:

$$\rho^* = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}_i}{\frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{\bar{y}_r^g}{y_{ro}^g} + \sum_{u=1}^{s_2} \frac{\bar{y}_u^b}{y_{uo}^b} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_{io} \geq \sum_{j=1, \neq o}^n x_{ij} \lambda_j; y_{ro}^g \leq \sum_{j=1, \neq o}^n y_{rj}^g \lambda_j; y_{uo}^b \geq \sum_{j=1, \neq o}^n y_{uj}^b \lambda_j, \\ \bar{x} \geq x_o; \bar{y}^g \leq y_o^g; \bar{y}^b \geq y_o^b; \lambda_j \geq 0; i=1, \dots, m \\ j=1, \dots, n; r=1, \dots, s_1; u=1, \dots, s_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ^* 表示有效决策单位的效率计算值; m 、 s_1 、 s_2 表示投入要素、期望产出和非期望产出的个数; \bar{x} 、 \bar{y}^g 、 \bar{y}^b 分别表示第 i 个投入要素、第 r 个期望产出、第 u 个非期望产出的松弛变量; x_{io} 、 y_{ro}^g 、

y_{uo}^b 分别表示通过松弛变量改进的第 o 个决策单元中最优的 i 要素投入量、 r 要素期望产出量、 u 要素非期望产出量; x_{ij} 、 y_{rj}^g 、 y_{uj}^b 分别表示第 j 个决策单元的 i 要素投入量、 r 要素期望产出量、 u 要素非期望产出量; λ_j 为权重向量。 ρ^* 越大代表效率值越高,如果 $\rho^* < 1$,则存在一定的效率损失。

2.2.2 投入产出指标选择

从农业生产活动土地投入、人力投入、资本投入以及生产中间消耗来看,本文海水养殖碳汇渔业效率评估的投入指标主要包括海水养殖面积、海水养殖投入人力资源^[45]、海水养殖投入生产渔船^[46]以及海水养殖中间消耗^[47]。产出指标包含期望产出和非期望产出,期望产出不仅包括海水养殖的经济产出,即海水养殖渔业产值,更需要考虑海水养殖的生态产出,即贝类、藻类的固碳量,这也是海水养殖碳汇渔业效率测算区别于以往渔业效率最显著的标志。非期望产出用海水养殖污染经济损失^[31]来表示,其中受污染造成的渔业经济损失是一项重要计算指标,一般从经济和生态两个维度来综合说明海水养殖带来的负效应。投入和产出的各项指标及其变量说明及计算方法整理至表 3。

2.3 数据来源

沿海省份蓝碳生态系统面积数据主要来源于已有研究成果和 21 世纪全球红树林连续覆盖高时空分辨率全球数据库 (CGMFC-21)^[48]、联合国环境规划署世界保护监测中心 (UNEP-WCMC) 发布的全球海草床分布图^[49]、国家地球系统科学数据中心发布的 30 m 分辨率中国湿地空间分布图^[50]等数

表 3 中国海水养殖碳汇渔业效率测算投入产出指标及其说明

Table 3 Input and output indicators for measuring the efficiency of mariculture carbon sink fisheries in China and their descriptions

指标	指标类型	变量	变量说明
投入	资源投入	海水养殖投入人力资源	海水养殖专业从业人员数量,单位为人
		海水养殖面积	海水养殖贝类、藻类面积,单位为 hm^2
		海水养殖投入生产渔船	海洋机动生产(养殖)渔船年末拥有量,单位为 kW
		海水养殖中间消耗	渔业中间消耗 $\times \frac{\text{海水养殖总产值}}{\text{渔业总产值}}$,单位为万元
产出	期望产出	海水养殖固碳量	海水养殖贝类、藻类固碳量,单位为 t
		海水养殖产值	海水养殖渔业经济总产值,单位为万元
	非期望产出	海水养殖污染经济损失	受污染造成的渔业经济损失 $\times \frac{\text{渔业经济增加值}}{\text{GDP}} \times \frac{\text{海水养殖面积}}{\text{省份面积}}$,单位为万元

据集。海水养殖碳汇核算体系搭建过程中涉及到的碳汇测算系数来自自然资源部发布的《养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法碳储量变化法》等文件及相关研究数据(表2)。贝类、藻类的产量数据和品种数据,以及海水养殖碳汇渔业的投入产出数据来源于2003—2020年的《中国渔业统计年鉴》^[51]和《中国农村统计年鉴》^[52],缺失数据通过查找沿海各省份统计年鉴进行补充。最后整理得出辽宁、河北、山东、江苏、浙江、福建、广东、广西、海南等沿海九省份(由于数据缺失此部分核算未包括天津、上海、香港、澳门、台湾)2003—2020年的海水养殖系统碳汇核算结果和海水养殖碳汇渔业效率值两份数据。

3 结果与分析

3.1 中国海岸带蓝碳生态系统及其固碳能力概况

近20年,国内外开展了一系列全球、国家以及区域尺度的海岸带蓝碳生态系统监测,时间序列参差、斑块描述不精确、监测精度不均等问题广泛存在,导致监测结果存在较大差距。中国海岸带分布有大量的红树林、盐沼、海草床,这3类蓝碳生态系统同海藻养殖农场一起共超过3000 km²,其中野生湿地生境占据60%的面积^[53]。Wang等^[54]研究揭示了中国1984—2018年红树林和盐沼的长时序面积动态(图2),1984—2000年间红树林面积有所减

少,而盐沼则面积锐减,这可能与改革开放以来建设用地大量侵占沿海蓝碳生态系统有关;2000年以后红树林面积迅速增加且超过了盐沼,盐沼也呈现出波动增长的态势。Jia等^[55]开展的中国红树林历史分布动态监测调查表明,1973—2000年中国有60%以上的红树林消失,面积由48801 hm²减少至18702 hm²。近年来中国海岸带湿地保护走向法治化、规范化、常态化,生态系统步入恢复性增长的轨道,2020年中国红树林面积恢复至28010 hm²^[56],主要分布在浙江、福建、广东、广西、海南以及港澳台地区。盐沼是中国海岸带最主要的生态系统之一,相较于主要分布在热带海岸的红树林,中国盐沼分布则纵贯南北海岸线,2019年中国盐沼面积共127477 hm²^[57],碱蓬、芦苇、互花米草、海三棱藨草、怪柳是中国盐沼的五大典型种类,其中互花米草已成为中国海岸带分布面积最广的盐沼植被,达到61571 hm²,如何控制其繁衍规模并发掘碳汇能力至关重要。中国对于全国海草床的面积、空间分布以及固碳能力的系统研究较少,21世纪以来中国海草群落快速消失,早经郑凤英等^[58]调查,2013年中国海草床总面积为8765 hm²。近两年,中国大规模海草床修复工作陆续开展,海草床生态保护取得重要进展,现有海草床总面积约为23062 hm²^[59]。全球海草床分布数据集^[49]显示中国海草床集中分布在南海海域,但近年来黄渤海海域相继新发现大面积海草床^[60,61],为中国海草生态资源的科学管理和利用提供进一步支撑。分省统计中国沿海省份蓝碳生态系统面积并掌握其历史动态过程,对于核算不同省份的蓝碳能力、制定蓝碳保护和利用方案十分重要。由于调查方法和设备的不同,并且缺少来自同一数据源的多年数据,不同研究的各类生态系统面积统计值差距较大,难以得到精准一致的结果,本文综合已有文献、空间数据集、政府报告等资料,筛选整理出历年红树林、盐沼及海草床的分省统计结果(表4)。

作为陆海碳循环的重要联结,红树林、盐沼和海草床具有强大的光合作用能力和微小的分解作用,具备很高的单位面积生产力和固碳能力,成为自然气候问题的重要解决方案。中国三大蓝碳生

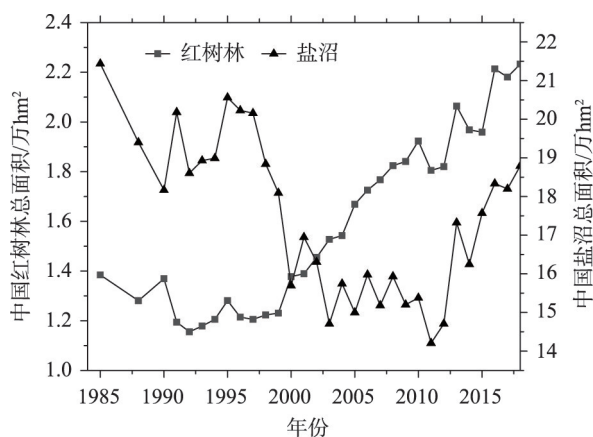


图2 1984—2018年中国红树林和盐沼总面积的
时序演化格局

Figure 2 Temporal evolutionary pattern of total mangrove and salt marsh area in China, 1984-2018

注:根据文献[54]数据绘制。

2022年6月

表4 不同时期中国沿海省份蓝碳生态系统面积统计情况 (hm²)Table 4 Statistics of the area of blue carbon ecosystems in coastal provinces of China in different periods (hm²)

年份	红树林								
	1997	2000	2003	2006	2009	2012	2015	2018	2019
广东	3813.00	9289.00	5050.56	3813.00	9084.00	12130.90	9196.20	10330.74	10745.00
广西	5654.00	5937.00	3213.12	5654.00	8375.00	6594.50	6674.13	8449.00	7835.00
福建	360.00	698.00	406.96	260.00	615.00	941.90	904.68	1019.40	992.00
浙江	8.00	25.00	93.06	8.00	21.00	19.90	54.81	48.68	39.00
海南	4836.00	3978.00	3191.06	4836.00	3930.00	4891.20	4017.42	4676.71	4527.00
香港		404.00	724.75	263.00	380.00		490.50	539.03	705.00
澳门		20.00		1.00	60.00		15.93	20.01	18.00
台湾		320.00	139.00	120.00	287.00		404.10	600.32	724.00
数据来源	张乔民等 ^[62]	Jia等 ^[55]	CGMFC-21 ^[48]	张忠华等 ^[63]	Chen等 ^[64]	吴培强等 ^[65]	国家地球系统科学数据中心 ^[50]	Zhang等 ^[66]	Zhao等 ^[67]
年份	盐沼			海草床					
	2015	2018	2019	2013	2016	2017	2018	2019	
广东	5361.00	363.20	371.54	975.00			1537.71		
广西	898.00	2381.40	2248.66	942.20		118.90			
福建	5121.00	7994.20	11024.81						
浙江	7660.00	17746.60	25015.93						
上海	60266.00	27029.80	32956.48						
江苏	46598.00	25932.50	30817.59						
海南	1567.00			5634.20					4864.67
山东	42134.00	21047	20205.51	300.00	1186.75				51.90
河北	10347.00	56.5	152.46						4527.54
天津	18969.00	177.5	203.63						
辽宁	97473.00	4619.4	4480.76	100.00			1253.47		
香港	2.00			4.00					
台湾				820.00					
数据来源	Mao等 ^[68]	赵欣怡等 ^[69]	Hu等 ^[57]	郑凤英等 ^[58]	李洪辰等 ^[70] , 李政等 ^[71,72]	广西壮自 治区海洋和 渔业厅 ^[73]	Jiang等 ^[74] , Xu等 ^[75]	吴钟解等 ^[76] , 岳世栋等 ^[60] , Xu等 ^[77]	

态系统的年均固碳量约为0.35~0.84 Tg C/a^[14],其中红树林、盐沼、海草床的年均固碳量分别为0.07、0.75和0.01 Tg C/a^[4]。从固碳速率来看,红树林约为226 g C/(m²·a),高于盐沼的218 g C/(m²·a)和海草床的138 g C/(m²·a)^[78]。本文根据三大蓝碳生态系统面积(表4)及其固碳速率,估算得出1997—2019年中国红树林固碳量为0.033~0.078 Tg C/a,盐沼固碳量为0.234~0.646 Tg C/a,海草床固碳量为0.012~0.018 Tg C/a。沿海省份三大蓝碳生态系统年固碳量如图3所示。江苏、上海和浙江的蓝碳生态系统年固碳量较大,超过5万t,除河北、广东、广西和海

南外,其余省份以盐沼固碳为主。

本文以3年为一个周期,选择1997、2000、2003、2006、2009、2012、2015、2018年,并加上末年2019年,作为典型时间节点,绘制浙江、福建、广东、广西、海南五省份(其他四省份无红树林)的红树林年固碳量折线图(图4)。总的来说,不同数据源的各省份红树林面积观测结果显示波动增长的共同趋势,同21世纪以来中国红树林总面积变动态势(图2)相符。由折线图可知,广东省红树林面积长期居于中国第一,2012年红树林固碳量估算值达到2.74万t C。其次是广西壮族自治区,2018年达到

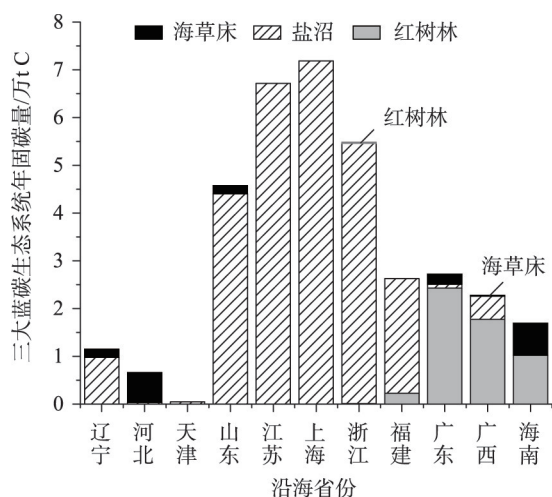


图3 2019年沿海省份三大蓝碳生态系统年固碳量

Figure 3 Annual carbon sequestration in three major blue carbon ecosystems in coastal provinces, 2019

注:其中海草床固碳数据基于2016—2019年调查数据和研究成果。

1.91 万 t C。不同研究的海南省和福建省的历年红树林面积监测值较为稳定,年固碳量波动幅度较小,数值区间分别为0.72 万~1.11 万 t C 和0.06 万~0.23 万 t C。浙江省是这5个省份中红树林面积最小的省份,2000年以来红树林年均面积为35.27 hm²,2019年为39 hm²。根据折线图趋势,1997—2019年可大致分为4个阶段(图4):第一、二阶段观测到的沿海各省红树林面积波动较大,尤其是广东省。由于沿海资源过度利用,珠三角地区城市化和工业化进程加快造成海洋污染,且造林技术水平不高但成本高等原因,红树林面积在世纪之交起伏剧烈。在第三阶段,各省份的红树林面积逐渐增长。第四阶段,各省份红树林面积变动态势较为平稳。21世纪以来,国家和地方政府各项红树林保护管理条例不断完善和落实,2020年自然资源部、国家林业和草原局印发《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)》更加强调了推进中国红树林生境的保存与修复,积极发挥其生态服务功能价值。

盐沼的固碳能力次于红树林,根据中国2019年盐沼的空间分布^[57],上海的盐沼面积达到32956.48 hm²,位居第一,主要盐沼种类为互花米草、芦苇和海三棱藨草;其次是江苏,盐沼面积为30817.59 hm²。互花米草在中国的广泛引种导致了互花米草在20世纪80、90年代入侵本土生态环境,主要在江

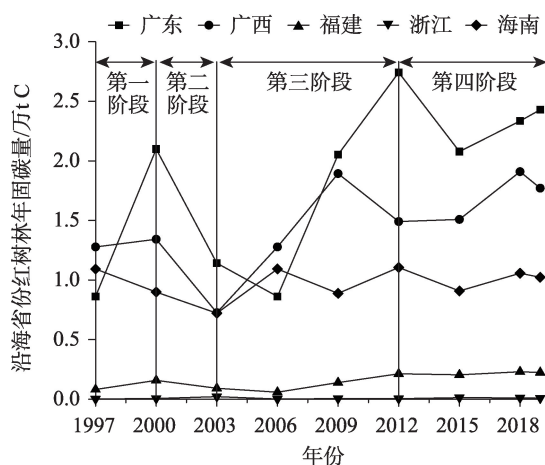


图4 1997—2019年沿海省份红树林年固碳量

Figure 4 Annual carbon sequestration in mangrove forests in coastal provinces, 1997-2019

苏、浙江、上海、福建、广西等地的沿岸淤泥质滩涂加速扩张,但也在一定程度上提升了蓝碳潜力。中国盐沼的广泛分布加上盐沼的高固碳能力,使中国海岸带盐沼固碳量达到蓝碳生态系统固碳量的79%。海草床同红树林和盐沼相比分布规模小,且空间分布差异较大,近年来黄渤海海域陆续新发现的海草床极大地丰富了中国海草床的研究前景。当前海南省海草床分布最广,面积为4864.67 hm²;其次是河北省,面积为4527.54 hm²;广东、山东和辽宁的海草床分布面积均超过1000 hm²。

3.2 海水养殖碳汇及其时空分布格局

因自然地理环境及海水资源禀赋不同,不同省份海水养殖贝藻的规模及品种存在差异,海水养殖贝藻固碳量的省际空间差距显著。为更清晰直观地比较省际差距和变化趋势,按照固碳量数值大小,将九省份分为两组(图5)。其中,辽宁、山东、福建、广东四省2003—2020年年均固碳量为15.48 万~31.66 万 t C,位于第一梯队,2020年的海水养殖固碳量分别为20.08 万、36.56 万、34.69 万、16.24 万 t C;河北、江苏、浙江、广西、海南五省份2003—2020年年均固碳量为0.29 万~7.34 万 t C,位于第二梯队,2020年的海水养殖固碳量分别为3.56 万、5.46 万、10.48 万、8.38 万、0.20 万 t C。总的来说,沿海九省份2003—2020年的海水养殖年固碳总量为0.87~1.36 Tg C/a,随着海水养殖渔业规模的逐步扩大,固碳量呈现稳定的增长趋势。但2003—2004年和2008—

2022年6月

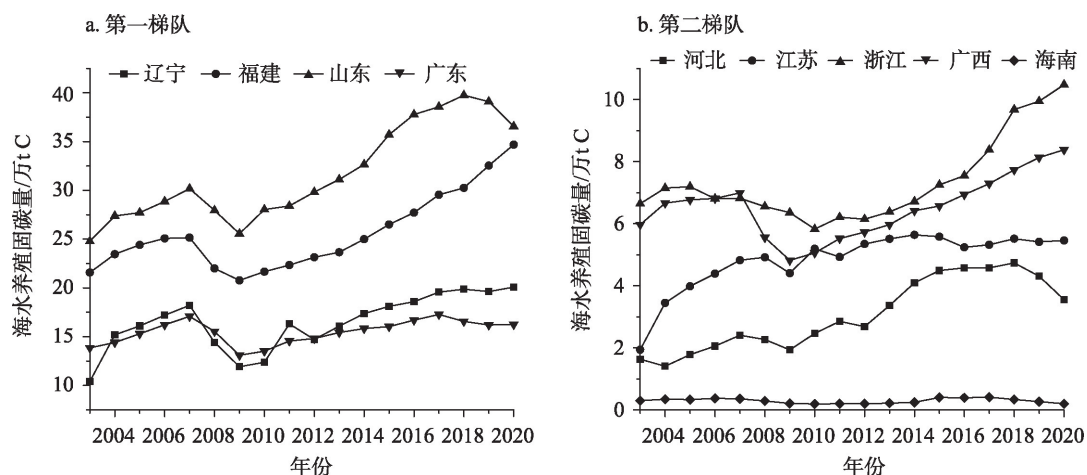


图5 2003—2020年沿海省份海水养殖固碳量时序演化格局

Figure 5 Temporal change of carbon sequestration in mariculture in coastal provinces, 2003-2020

2009年是两个较为明显的衰减期,这是由于:中国在21世纪初开始实施海洋渔船“双控”制度,使2002—2006年海洋渔船数量大幅缩减;加之2003年中国因“非典”疫情突发,局部地区灾害严重,海水养殖产品生产、出口等受阻。而2003年以后,全国渔业系统加快经济结构战略性调整,推动建设现代化渔业,并加强渔业资源和生态环境保护,迎来了一段持续增长时期。2009年农业部调整海洋伏季休渔制度,进一步强化实施新时期的休渔、禁渔制度,此后,该制度一直随渔业实际情况加以修订。

分省份来看,辽宁省近年来积极推进养殖水域滩涂规划编制工作,加强了海水养殖渔业生产和管理的科学性,海水养殖固碳量于2020年突破20万t。山东省海水养殖面积大、海产品种多,碳汇渔业具有基础优势,并根据资源和市场的转变情况及时优化渔业结构,大力实施科技兴渔战略,不断提升渔业效益和竞争力,2012年投入海洋渔业资源增值资金1.57亿元,此后山东省海水养殖固碳量一直保持了高速增长。江苏省在2000—2012年间海水养殖固碳量增速较快,由2003年的1.94万t增长至2012年的5.35万t,这可能是由于江苏省在此期间确定了海水养殖示范品种,走出了特色路径和模式。浙江省海水养殖渔业在2001—2009年经历了优化与升级,以实施渔民转产转业战略为重要标志,在此阶段海水养殖固碳量主要呈现下降趋势;2012年发布

的浙江省海洋功能区划对未来养殖海域面积下限提出了“到2020年不少于10万 hm^2 ”的新要求,此后海水养殖固碳量迅速增长,至2020年海水养殖固碳量为10.48万t。福建省在“十三五”期间积极培育超千亿水产产业集群,加强生态型碳汇渔业基地建设,因此,福建省海水养殖固碳量在2016年后迅速增长,海水养殖固碳量由2016年的27.72万t增长至2020年的34.69万t。河北省、广东省、广西壮族自治区、海南省海水养殖产量及其固碳量增长则相对平缓。

3.3 沿海省份蓝碳能力及其结构的分布格局

根据前文的核算结果和时空演化格局分析,结合中国2019年红树林、盐沼省际固碳量和海草床^②的省际年固碳量,以及沿海九省份2020年海水养殖碳汇量数据,绘制沿海省份蓝碳能力现状空间分布格局(图6),并通过柱状图反映沿海各省蓝碳生态系统固碳量和海水养殖碳汇的组成结构。由结果可知,山东省和福建省蓝碳能力最高,年碳汇量分别为41.14万和37.31万 t C/a ,黄渤海海域成为海岸带蓝碳能力最高的区域;辽宁省和广东省蓝碳能力较高,年碳汇量分别为21.23万和18.97万 t C/a ;浙江省蓝碳能力处于中等水平,年碳汇量为15.94万 t C/a ;江苏省和广西壮族自治区蓝碳能力较低,分别为12.18万和10.66万 t C/a ;河北省和海南省蓝碳能力最低,仅4.21万和1.89万 t C/a 。从蓝碳组成结构

② 图6中海草床年固碳量数据基于2016—2019年各省的调查数据和研究结果。

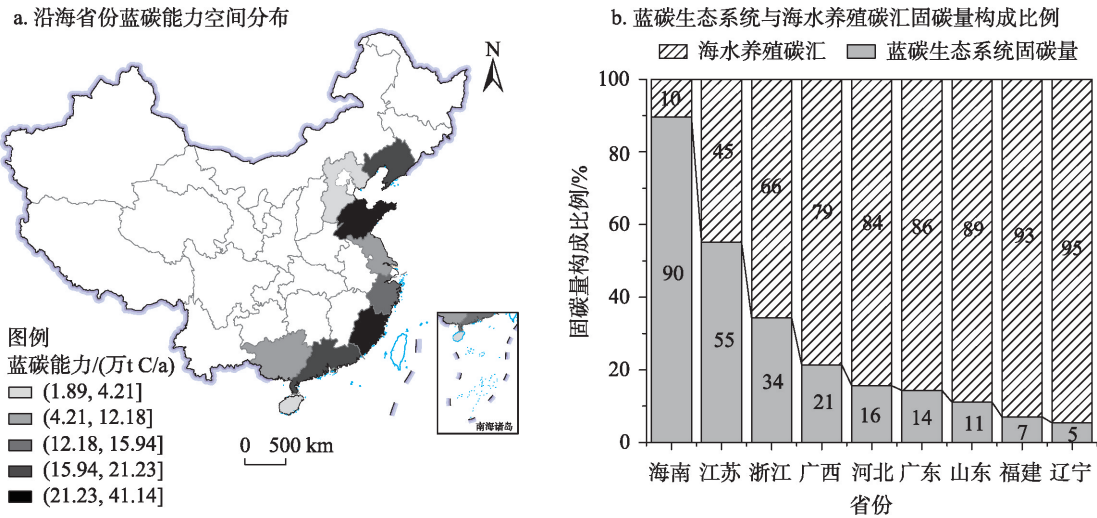


图6 中国海岸带蓝碳能力空间分布格局及构成结构

Figure 6 Spatial distribution pattern of blue carbon capacity and structure in China's coastal zone

注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1833号的标准地图制作,底图无修改。

来看,辽宁省、河北省、山东省、浙江省、福建省、广东省、广西壮族自治区的海水养殖碳汇占比更高,其余省份反之。江苏省的蓝碳构成比例相对较均衡,蓝碳生态系统固碳量占比为55%,其余省份的构成比例差距较大,最大达到9:1。

4 中国海岸带蓝碳发展问题诊断

4.1 蓝碳生态系统现存问题

近年来,中国有关沿海湿地生境的保护及修复工作稳步开展,在一定程度上遏制了红树林、盐沼、海草床面积锐减、被无序侵占的状态,但当前依然存在蓝碳生态系统总面积偏小、资源衰竭、生态系统功能退化、生物多样性降低、外来生物入侵、气候变化扰动等问题,碳汇功能未得到充分重视,碳汇效益较低。综合来看,中国沿海蓝碳生态系统主要面临以下几方面的威胁或问题:①其他用地类型土地严重侵占蓝碳生态系统,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^[12],城市化、农田开垦、围填海、建造码头等人类活动都会通过污染水体、产生固体废弃物等方面带来负面影响。②蓝碳生态系统的保护与海水养殖发展之间的矛盾突出,未形成协调发展机制与协同增汇路径,滩涂养殖会侵占并限制红树林、海草床等湿地生境的发展空间,如黄河三角洲由于发展海域养殖,2000—2009年间土壤有机碳储量由3.43下降到3.17

Tg^[13];海水养殖成为辽东半岛海草床退化的最直接因素^[77]。③蓝碳生态系统对于气候变化尤为敏感,例如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^[79],与全球气候变化关联密切的海平面上升、海水酸度增加、局部极端天气等深刻影响着蓝碳的可持续发展^[80]。生物入侵、河流输入变化、海岸带富营养化等问题也在威胁海岸带蓝碳。

4.2 海水养殖碳汇现存问题

本文搭建海水养殖碳汇渔业投入产出模型,计算沿海九省份2003—2020年的碳汇渔业效率,从产业发展角度考量生产过程中经济效益与包括碳汇在内的生态效益是否协调。根据效率值的大小,将九省份分为两个梯队,如图7所示。山东和福建的历年效率值较高但其起伏较大,而辽宁、广西、海南效率值常年稳定在1.000~1.500;河北、江苏、浙江、广东的效率值大致经历先减后增的趋势,且波谷均出现在2010—2014年间。对九省份历年效率均值进行排序(表5),福建和山东具有较高的效率均值;其次是辽宁、广东、海南、广西,效率均值介于1.085~1.179间;江苏、浙江、河北三省的效率均值较低。效率值整体情况同海水养殖固碳量的省际差异等级相符,其中差别较大的是浙江和海南,浙江省海水养殖固碳量位列中等水平,但效率值却位列第八;

2022年6月

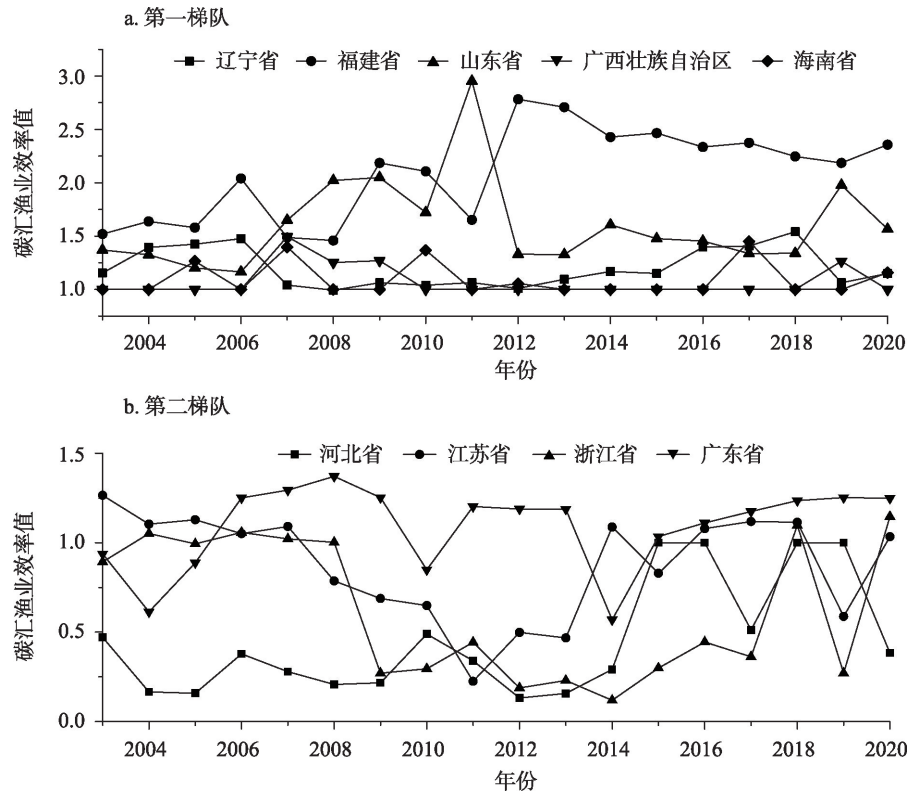


图7 2003—2020年沿海省份碳汇渔业效率值

Figure 7 Efficiency values of carbon sink fisheries in coastal provinces

海南省海水养殖固碳量小,效率值却达到1.095。

从效率值省际差异来看:首先,对于效率均值较低的河北、浙江、江苏三省份而言,河北省属于黄渤海重要腹地,是京津冀地区工业生产与产业转移的重要依托省份,各类生产排污影响海域环境,生物多样性减少,海水养殖单产低于全国平均水平,而海水养殖生产渔船投入量高,导致效率低下;浙江省虽有高产量高产值,但近岸海域长期处于重度富营养化状态,2017年被中央环保督察组指出海洋生态损害和污染突出,受污染造成的海水养殖经济损失高;江苏省整体海水养殖面积和劳动力投入规模不高,但投入的海水养殖生产渔船规模却与之不相适配,且受污染造成的海水养殖经济损失较高,

因而碳汇渔业效率也较低。其次,效率均值较高的省份——福建、山东、辽宁,共同存在的一个问题是受污染造成的海水养殖经济损失较高,通过计算得出历年均值分别为590.23万、555.81万和218.28万元,人类活动造成的陆源污染和养殖污染以及自然灾害引发的连锁反应应予以重视。最后,效率均值位列中间水平的省份以海南为例,海南省海水养殖期望产出规模较小,但渔业资源组合情况优良,品种多、生长快,鱼汛期长,且海水养殖中间消耗和受污染造成的海水养殖经济损失能控制在较低水平,因而碳汇渔业效率相对较高;但海洋捕捞和海水养殖之间的矛盾突出,且围填海等沿海土地开发也挤占了海域养殖空间^[81]。

表5 沿海省份海水养殖碳汇渔业效率值2003—2020年均值

Table 5 Average value of mariculture carbon sink fishery efficiency in coastal provinces, 2003-2020

	福建	山东	辽宁	广东	海南	广西	江苏	浙江	河北
效率值	2.181	1.661	1.179	1.144	1.095	1.085	0.824	0.555	0.490
排名	1	2	3	4	5	6	7	8	9

5 讨论与结论

5.1 讨论

评估并分析中国沿海省份蓝碳能力现状,对于挖掘生态系统碳汇能力及资源价值、提升生态系统服务供给的质量和效益、推动海洋经济转型发展、助力实现碳中和与碳达峰具有重要意义。学界有关海水养殖贝类^[82]、藻类^[83]对蓝碳贡献的讨论方兴未艾,将其纳入蓝碳核算框架有助于进一步挖掘各类海洋生态系统在减缓和适应气候变化方面的潜力^[53],Gao等^[84]此前便在这一框架下整合不同的数据源,对中国不同种类的蓝碳进行了全国尺度的估算。本文作出进一步的有益尝试,搭建包括自然生态系统和海水养殖在内的中国沿海省份蓝碳核算体系,在梳理沿海省份红树林、盐沼和海草床三大蓝碳生态系统分布情况后,结合固碳能力参数,分省核算蓝碳生态系统固碳能力,其中红树林省际分布数据来源于Zhao等^[67]基于2019年Sentinel-1及Sentinel-2影像制作的精度可达96.4%的10 m分辨率红树林分布地图,盐沼分布数据来源于Hu等^[57]基于2019年Sentinel-1影像和基于知识的决策树分类器生成的10 m分辨率海岸带盐沼分布地图,海草床分布数据来源于各省份近几年开展的海草床调查研究,能够反映中国海岸带蓝碳生态系统分布及蓝碳能力现状。同时,基于已有研究搭建的海水养殖固碳能力核算系数表则涵盖中国当前海水养殖贝类、藻类的主要品种,不同品类生物的碳汇能力差异得以体现,估算结果更为精确。将海水养殖固碳能力纳入到投入产出模型,进一步从经济及环境效应角度诊断了中国沿海省份碳汇渔业发展存在问题。但值得注意的是,受物理(气温、降水、海平面变化、养分输入等)和生物(物种组成、植物竞争、营养级联等)变量的驱动,蓝碳的估算仍旧表现出极大的不确定性和误差^[79,85]。就中国而言:一方面,不同于海水养殖碳汇的稳定产出,中国海岸带蓝碳生态系统在人为活动和自然风险的双重压迫下展现出较大的不稳定性,并且随着湿地生境保护和修复工作的开展不断发展变化,给蓝碳估算带来一定挑战;另一方面,明确不同蓝碳生态系统细分种类的固碳系数也是提升核算准确性的关键。

5.2 结论

本文基于广义蓝碳定义,将蓝碳生态系统和海水养殖碳汇纳入到中国蓝碳潜力评估的全局考察,分析其时空演化格局和发展现存问题,并利用Super-SBM模型进一步对中国海水养殖碳汇渔业效率进行评估。主要研究结论如下:

(1)中国蓝碳生态系统面积呈波动增长,空间分布异质性较大,盐沼为分布范围最广的蓝碳生态系统。1997—2019年红树林固碳量为0.033~0.078 Tg C/a,盐沼固碳量为0.234~0.646 Tg C/a,海草床固碳量为0.012~0.018 Tg C/a。2019年中国海岸带盐沼固碳量达到蓝碳生态系统固碳量的79%。

(2)沿海九省份2003—2020年的海水养殖年固碳总量为0.87~1.36 Tg C/a,省际空间差异显著,辽宁、山东、福建、广东四省2020年的海水养殖固碳量较大,分别为20.08万、36.56万、34.69万、16.24万t C;河北、江苏、浙江、广西、海南五省份2020年的海水养殖固碳量较小,分别为3.56万、5.46万、10.48万、8.38万、0.20万t C。各省在不同时段表现出不同的增长特征,总体来说海水养殖固碳量稳定增长。

(3)沿海各省年蓝碳总量及结构的空间分布格局差异明显,其中,山东和福建的蓝碳能力最高,河北和海南的蓝碳能力最低。江苏的蓝碳构成比例较为均衡,海南的蓝碳构成以蓝碳生态系统固碳量为主,辽宁、山东、浙江、福建、广东、广西、海南以海水养殖碳汇为主。

(4)土地利用变化、蓝碳生态系统与海水养殖的不协调发展、气候变化等是影响蓝碳潜力的重要原因。从2003—2020海水养殖碳汇渔业效率来看,海水养殖生产过程中经济指标投入同生态环境产出失调也会遏制蓝碳的挖掘和利用,福建和山东具有较高的效率均值,河北、浙江、江苏三省的效率均值较低,整体情况同海水养殖固碳量的省际差异情况基本相符。

6 研究展望与政策建议

6.1 研究展望

对于蓝碳的可持续发展,仍有许多亟待探讨和思考的问题:

2022年6月

(1)当前围绕海岸带蓝碳尚未形成系统的研究体系和完善的政策支撑,未来在进一步探讨包含海水养殖碳汇的蓝碳体系时,仍需深化对相关固碳机理的量化与解析,例如加强对其有效碳循环周期的定义和碳汇计算边界的界定^[86]。同时,提供更多有效管理碳固存的科学证据、实现海水养殖负排放和温室气体减排协同发展是拓展蓝碳体系、挖掘蓝碳能力的关键环节。

(2)需深化全国海岸带蓝碳生态系统及养殖贝藻时空分布的演化监测研究,加强其不同尺度、方法、精度上的统筹。并精细化分析与评估蓝碳生态系统同海水养殖系统发展过程中的权衡与协同关系,以期对环境保护、生态修复、环境效应评估等工作精准施策。

(3)对蓝碳发展问题的关注不应只局限于生态系统本身,如何围绕蓝碳高质量发展优化海岸带海域生态碳汇空间格局、重视蓝碳生态空间功能转换过程中的碳要素评估、推动海岸带蓝碳与陆地碳汇的协同发展等相关研究,都是未来值得思考的方向。

6.2 政策建议

中国“蓝碳计划”是一个系统工程,创新蓝碳开发利用模式和路径对于挖掘海岸带蓝碳能力、拓宽碳汇利用空间、制定修复与增汇的方案至关重要。本文就中国海岸带蓝碳发展提出以下几点优化建议:

(1)构建中国海岸带蓝碳统筹管理体系,在全域国土生态空间碳核查体系指导下进行海岸带蓝碳核算及一体化监测研究,加大对于蓝碳生态系统与海水养殖固碳能力间作用机制及影响机理的研究,加强蓝碳与海洋经济的关联性分析。

(2)融合多元数据和技术方法,构建蓝碳应对全球气候变化、生态群落演替、人类活动等不同影响因素的脆弱性—适应力—恢复力的机制及时空动态研究体系。

(3)完善中国蓝碳的功能价值研究体系,在明确蓝碳生态系统服务功能的供给与需求的时空分布特征和时空转移过程基础上,重视蓝碳资源经济价值的评估,推动蓝碳基金、生态补偿等经济体制

机制的建立,加快研发与推广蓝碳产品,以及搭建交易市场、平台。

(4)立足于不同区域自然条件和社会经济环境的共性与差异,创新蓝碳增汇方案与发展路径,积极开展“蓝色海湾”“南红北柳”“生态岛礁”等修复工程,开发海岸带蓝碳与湿地景观综合利用模式。集约发展海水绿色养殖,推广海水立体综合养殖,延伸蓝碳产业链条,塑造蓝碳增汇经济新格局,将沿海地区生态优势转化为经济效益和社会效益,助力国家碳中和政策。

参考文献(References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5 °C[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 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(11): 961–968.
- [3] Zhang M, Cheng Y Y, Bao Y, et al. Seasonal to decadal spatiotemporal variations of the global ocean carbon sink[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(5): 1786–1797.
- [4] 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.]
- [5] Herr D, Pidgeon E, Laffoley D, et al. Blue Carbon Policy Framework 2.0: Based on the Discussion of the International Blue Carbon Policy Working Group[M]. Switzerland: IUCN, 2012.
- [6] Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, et al. Blue Carbon: The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon[M]. Norway: UNEP/FAO/UNESCO/IUCN/CSIC, 2009.
- [7] 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.]
- [8] 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, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111168.
- [9] Herrera-Silveira J A, Pech-Cardenas M A, Morales-Ojeda S M, et al. Blue carbon of Mexico, carbon stocks and fluxes: A systematic review[J]. *Peer J*, 2020, DOI: 10.7717/peerj.8790.
- [10] Zang Z. Analysis of intrinsic value and estimating losses of “blue carbon” in coastal wetlands: A case study of Yancheng, China[J].

- Ecosystem Health and Sustainability, 2019, 5(1): 216–225.
- [11] Zang Z. Conceptual model of ecosystem service flows from carbon dioxide to blue carbon in coastal wetlands: An empirical study based on Yancheng, China[J]. Sustainability, 2021, DOI: 10.3390/su13094630.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 周晨昊, 毛覃愉, 徐晓, 等. 中国海岸带蓝碳生态系统碳汇潜力的初步分析[J]. 中国科学: 生命科学, 2016, 46(4): 475–486. [Zhou C H, Mao Q Y, Xu X, 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.]
- [15] Meng W Q, Feagin R A, Hu B B, et al. The spatial distribution of blue carbon ecosystems on Chinese coastal zone[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 222(17): 13–20.
- [16] 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, 2021, DOI: 10.1093/nsr/nwaa296.
- [17] 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.]
- [18] 江睿, 吴云超, 陈丕茂. 珠江口淇澳岛红树林湿地沉积物碳、氮分布研究[J]. 南方水产科学, 2021, 17(1): 1–9. [Jiang R, Wu Y C, Chen P M. Study on distribution of sediment carbon and nitrogen in mangrove wetland of Qi'ao Island, Pearl River Estuary[J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(1): 1–9.]
- [19] 褚梦凡, 肖晓彤, 丁杨, 等. 海南儋州湾红树林区沉积有机质来源及碳储量[J]. 海洋科学, 2021, 45(2): 22–31. [Chu M F, Xiao X T, Ding Y, et al. Sediment organic matter sources and carbon stock associated with a mangrove reserve in Danzhou Bay, Hainan, China[J]. Marine Sciences, 2021, 45(2): 22–31.]
- [20] 戴子熠, 廖丽蓉, 梁嘉慧, 等. 1988–2018年广西北海红树林蓝碳储量变化分析[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(1): 8–15. [Dai Z Y, Liao L R, Liang J H, et al. Blue carbon stocks of mangrove from 1988 to 2018 in Beihai, Guangxi[J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(1): 8–15.]
- [21] 徐敬俊, 覃恬恬, 韩立民. 海洋“碳汇渔业”研究述评[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 161–172. [Xu J J, Qin T T, Han L M. A review of research on marine carbon sink fisheries[J]. Resources Science, 2018, 40(1): 161–172.]
- [22] Duarte C M. Reviews and syntheses: Hidden forests, the role of vegetated coastal habitats in the ocean carbon budget[J]. Biogeosciences, 2017, 14(2): 301–310.
- [23] 张继红, 刘纪化, 张永雨, 等. 海水养殖践行“海洋负排放”的途径[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 252–258. [Zhang J H, Liu J H, Zhang Y Y, et al. Strategic approach for mariculture to practice “ocean negative carbon emission”[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 252–258.]
- [24] 沈金生, 梁瑞芳. 海洋牧场蓝色碳汇定价研究[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1812–1821. [Shen J S, Liang R F. Study on the blue carbon sink pricing of marine ranch[J]. Resources Science, 2018, 40(9): 1812–1821.]
- [25] Lovelock C E, Duarte C M. Dimensions of blue carbon and emerging perspectives[J]. Biology Letters, 2019, DOI: 10.1098/rsbl.2018.0781.
- [26] 孙康, 崔茜茜, 苏子晓, 等. 中国海水养殖碳汇经济价值时空演化及影响因素分析[J]. 地理研究, 2020, 39(11): 2508–2520. [Sun K, Cui X X, Su Z X, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of the economic value for mariculture carbon sinks in China[J]. Geographical Research, 2020, 39(11): 2508–2520.]
- [27] 邵桂兰, 孔海峥, 李晨. 中国海水养殖的净碳汇及其与经济耦合关系[J]. 资源科学, 2019, 41(2): 277–288. [Shao G L, Kong H Z, Li C. Net amount of mariculture carbon sink and its coupling relationship with economics growth of China[J]. Resources Science, 2019, 41(2): 277–288.]
- [28] 徐敬俊, 张洁, 余翠花. 海洋碳汇渔业绿色发展空间外溢效应评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(2): 99–110. [Xu J J, Zhang J, She C H. Evaluation of spatial spillover effect of green development of marine carbon-sink fisheries[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(2): 99–110.]
- [29] 孙康, 季建文, 李丽丹, 等. 基于非期望产出的中国海洋渔业经济效率评价与时空分异[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2040–2051. [Sun K, Ji J W, Li L D, et al. Marine fishery economic efficiency and its spatio-temporal differences based on undesirable outputs in China[J]. Resources Science, 2017, 39(11): 2040–2051.]
- [30] 曹洪军, 房甄. 基于物质平衡原则的海洋渔业绿色效率评估[J]. 统计与决策, 2022, 38(4): 106–111. [Cao H J, Fang Z. Green efficiency assessment of marine fisheries based on material balance principles[J]. Statistics & Decision, 2022, 38(4): 106–111.]
- [31] 张懿, 纪建悦. 中国海水养殖产业绿色全要素生产率分解及影响因素分析[J]. 科技管理研究, 2022, 42(3): 206–213. [Zhang Y, Ji J Y. Decomposition and influencing factors of green total factor productivity of mariculture industry in China[J]. Science and Technology Management Research, 2022, 42(3): 206–213.]
- [32] 唐启升. 碳汇渔业与又好又快发展现代渔业[J]. 江西水产科技,

2022年6月

- 2011, (2): 5-7. [Tang Q S. Carbon sink fisheries and the development of modern fisheries at a good and fast pace[J]. Jiangxi Fishery Science and Technology, 2011, (2): 5-7.]
- [33] 唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 68-73. [Tang Q S, Liu H. Strategy for carbon sink and its amplification in marine fisheries[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(3): 68-73.]
- [34] 张樨樨, 郑珊, 余粮红. 中国海洋碳汇渔业绿色效率测度及其空间溢出效应[J]. 中国农村经济, 2020, (10): 91-110. [Zhang X X, Zheng S, Yu L H. Green efficiency measurement and spatial spillover effect of China's marine carbon sequestration fishery[J]. Chinese Rural Economy, 2020, (10): 91-110.]
- [35] 赵鹏, 汤玉婧, 宋文婷, 等. 我国蓝碳标准体系的需求和设计[J]. 中国标准化, 2021, (17): 68-73. [Zhao P, Tang Y J, Song W T, et al. Demands and design for China's blue carbon standards system [J]. China Standardization, 2021, (17): 68-73.]
- [36] 张麋鸣, 颜金培, 叶旺旺, 等. 福建省贝藻类养殖碳汇及其潜力评估[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(1): 53-59. [Zhang M M, Yan J P, Ye W W, et al. Carbon sequestration and its potentiality of marine shellfish and seaweed cultures in Fujian Province, China[J]. Journal of Applied Oceanography, 2022, 41(1): 53-59.]
- [37] 纪建悦, 王萍萍. 我国海水养殖业碳汇能力测度及其影响因素分解研究[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 871-878. [Ji J Y, Wang P P. Research on China's mariculture carbon sink capacity and influencing factors[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(6): 871-878.]
- [38] 中华人民共和国自然资源部. 养殖大型藻类和双壳类碳汇计量方法 碳储量变化法[S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2021. [People's Republic of China Ministry of Natural Resources, Estimation Method of Maricultural Seaweed and Bivalve Carbon Sink-Carbon Stock Variation Method[S]. Beijing: People's Republic of China Ministry of Natural Resources, 2021.]
- [39] 刘锴, 卞扬, 王一尧, 等. 海岛地区海洋碳汇量核算及碳排放影响因素研究: 以辽宁省长海县为例[J]. 资源开发与市场, 2019, 35(5): 632-637. [Liu K, Bian Y, Wang Y Y, et al. Calculation of carbon sink and influencing factors of carbon emission in island area: A case study of Changhai County, Liaoning Province[J]. Resource Development & Market, 2019, 35(5): 632-637.]
- [40] 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. [Shao G L, Liu B, Li C. Evaluation of carbon dioxide capacity and the effects of decomposition and spatio-temporal differentiation of seawater in China's main sea area based on panel data from 9 coastal provinces in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2614-2625.]
- [41] 马欢, 秦传新, 陈丕茂, 等. 南海柘林湾海洋牧场生物碳储量研究[J]. 南方水产科学, 2017, 13(6): 56-64. [Ma H, Qin C X, Chen P M, et al. Study of biomass carbon storage in Zhelin Bay marine ranch of South China Sea[J]. South China Fisheries Science, 2017, 13(6): 56-64.]
- [42] 何沙, 李乔楚. 基于 Super-SBM 模型的区域低碳效率评估与空间分异: 以四川省为例[J]. 生态经济, 2021, 37(10): 40-45. [He S, Li Q C. Regional low-carbon efficiency evaluation and spatial differentiation based on the Super-SBM model: A case study of Sichuan Province[J]. Ecological Economy, 2021, 37(10): 40-45.]
- [43] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [44] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.
- [45] 许瑶, 纪建悦, 许玉洁. 中国养殖海域利用效率空间非均衡格局及成因[J]. 资源科学, 2020, 42(11): 2158-2169. [Xu Y, Ji J Y, Xu Y J. Spatial disequilibrium of mariculture areas utilization efficiency in China and causes[J]. Resources Science, 2020, 42(11): 2158-2169.]
- [46] 盖美, 朱静敏, 孙才志, 等. 中国沿海地区海洋经济效率时空演化及影响因素分析[J]. 资源科学, 2018, 40(10): 1966-1979. [Gai M, Zhu J M, Sun C Z, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of marine economic efficiency in coastal areas of China[J]. Resources Science, 2018, 40(10): 1966-1979.]
- [47] 余粮红, 高塋, 高强. 环境规制对海水养殖绿色水平的影响及机制[J]. 资源科学, 2022, 44(1): 1-14. [Yu L H, Gao K, Gao Q. Influence of environmental regulations on green level of mariculture and its mechanism[J]. Resources Science, 2022, 44(1): 1-14.]
- [48] Hamilton S E, Casey D. Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st Century (CGMFC-21)[J]. Global Ecology and Biogeography, 2016, 25(6): 729-738.
- [49] UN Environment World Conservation Monitoring Centre. Global Distribution of Seagrasses (Version 7.1)[DB/OL]. (2021-03-30) [2022-04-22]. <https://doi.org/10.34892/x6r3-d211>.
- [50] 国家地球系统科学数据中心. 30 m 分辨率中国红树林空间分布数据集(2015年)[DB/OL]. (2020-09-18) [2022-04-22]. <http://www.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=250090024131936&docId=2762>. [National Earth System Science Data Center. Spatial Distribution Dataset of Chinese Mangroves at 30 m Resolution (2015) [DB/OL]. (2020-09-18) [2022-04-22]. <http://www.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=250090024131936&docId=2762>.]
- [51] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 2000-2020. [Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture. China Fisheries Statistical Yearbook[M]. Beijing: Ocean Press, 2000-2020.]
- [52] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北

- 京: 中国统计出版社, 2003–2020. [Department of Rural Socio-Economic Survey, National Bureau of Statistics. China Rural Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press. 2003–2020.]
- [53] Wu J P, Zhang H B, Pan Y W, et al. Opportunities for blue carbon strategies in China[J]. Ocean & Coastal Management, 2020, DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105241.
- [54] Wang X X, Xiao X M, Xu X, et al. Rebound in China's coastal wetlands following conservation and restoration[J]. Nature Sustainability, 2021, 4(12): 1076–1083.
- [55] Jia M M, Wang Z M, Zhang Y Z, et al. Monitoring loss and recovery of mangrove forests during 42 years: The achievements of mangrove conservation in China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information, 2018, 73: 535–545.
- [56] 贾明明, 王宗明, 毛德华, 等. 面向可持续发展目标的中国红树林近 50 年变化分析[J]. 科学通报, 2021, 66(30): 3886–3901. [Jia M M, Wang Z M, Mao D H, et al. Spatial-temporal changes of China's mangrove forests over the past 50 years: An analysis towards the Sustainable Development Goals (SDGs)[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(30): 3886–3901.]
- [57] Hu Y K, Tian B, Yuan L, et al. Mapping coastal salt marshes in China using time series of Sentinel-1 SAR[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 173: 122–134.
- [58] 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 seagrasses in China[J]. Biodiversity Science, 2013, 21(5): 517–526.]
- [59] 杨熙. 海草床及其维持生物多样性的意义[R/OL]. (2021–10–19) [2022–04–22]. <https://mp.weixin.qq.com/s/1V9ENtHzJWkEpQMju6fC8A>. [Yang X. Seagrass Beds and Their Significance in Maintaining Biodiversity[R/OL]. (2021–10–19) [2022–04–22]. <https://mp.weixin.qq.com/s/1V9ENtHzJWkEpQMju6fC8A>.]
- [60] 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: IV 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 S D, Xu S C, Zhang Y, et al. New discovery of larger seagrass beds with area >50 ha in the temperate waters of China: IV distribution status and ecological characteristics of seagrass in the coastal waters of Yantai[J]. Marine Sciences, 2021, 45(10): 61–70.]
- [61] 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: II 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 Y, Xu S, Xu S C, et al. New discovery of larger seagrass beds with areas >0.5 km² in temperate waters of China: II The largest *Zostera marina* bed in China discovered in the coastal waters of Tangshan in the Bohai Sea by sonar detection technology[J]. Marine Sciences, 2019, 43(8): 50–55.]
- [62] 张乔民, 隋淑珍. 中国红树林湿地资源及其保护[J]. 自然资源学报, 2001, (1): 28–36. [Zhang Q M, Sui S Z. The mangrove wetland resources and their conservation in China[J]. Journal of Natural Resources, 2001, (1): 28–36.]
- [63] 张忠华, 胡刚, 梁士楚. 我国红树林的分布现状、保护及生态价值[J]. 生物学通报, 2006, 41(4): 9–11. [Zhang Z H, Hu G, Liang S C. Distribution status, protection and ecological value of mangroves in China[J]. Bull of Biology, 2006, 41(4): 9–11.]
- [64] Chen L Z, Wang W Q, Zhang Y H, et al. Recent progresses in mangrove conservation, restoration and research in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2009, 2(2): 45–54.
- [65] 吴培强. 近 20 年来我国红树林资源变化遥感监测与分析[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2012. [Wu P Q. Remote Sensing Monitoring and Analysis of the Changes of Mangrove Forests Resources in China in the Past 20 Years[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2012.]
- [66] Zhang T, Hu S S, He Y, et al. A fine-scale mangrove map of China derived from 2-meter resolution satellite observations and field data[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, DOI: 10.3390/ijgi10020092.
- [67] Zhao C P, Qin C Z. A detailed mangrove map of China for 2019 derived from Sentinel-1 and -2 images and Google Earth images[J]. Geoscience Data Journal, 2021, DOI: 10.1002/gdj3.119.
- [68] Mao D H, Wang Z M, Du B J, et al. National wetland mapping in China: A new product resulting from object-based and hierarchical classification of Landsat 8 OLI images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 164: 11–25.
- [69] 赵欣怡. 基于时序光学和雷达影像的中国海岸带盐沼植被分类研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020. [Zhao X Y. Classification of Salt Marsh Vegetation in Coastal Zone of China Based on Temporal Optics and Radar Images[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.]
- [70] 李洪辰, 张沛东, 李文涛, 等. 黄海镬钵岛海域海草床数量分布及其生态特征[J]. 海洋科学, 2019, 43(4): 46–51. [Li H C, Zhang P D, Li W T, et al. Quantitative distribution and ecological characteristics of seagrass beds in the coastal area of Moye Island, Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2019, 43(4): 46–51.]
- [71] 李政, 李文涛, 杨晓龙, 等. 威海双岛湾海域海草分布及其生态特征[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 176–183. [Li Z, Li W T, Yang X L, et al. Distribution and ecological characteristics of seagrass in Shuangdao Bay, Weihai[J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(2): 176–183.]
- [72] 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 Z, Li W T, Yang X L, et al. Distribution and ecological characteristics of seagrass beds in Rongcheng Sanggou Bay, Weihai[J]. Marine Sciences, 2020, 44(10): 52–59.]
- [73] 广西壮族自治区海洋和渔业厅. 广西壮族自治区 2017 年海洋

2022年6月

- 环境状况公报[R/OL]. (2018-06-04) [2022-01-05]. <http://www.gxzf.gov.cn/sytt/20180604-697370.shtml>. [Guangxi Zhuang Autonomous Region Ocean and Fisheries Department. Bulletin on the State of the Marine Environment in Guangxi Zhuang Autonomous Region in 2017[R/OL]. (2018-06-04) [2022-01-05]. <http://www.gxzf.gov.cn/sytt/20180604-697370.shtml>.]
- [74] Jiang Z J, Cui L J, Liu S L, et al. Historical changes in seagrass beds in a rapidly urbanizing area of Guangdong Province: Implications for conservation and management[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e01035.
- [75] Xu S C, Qiao Y L, Xu S, et al. Diversity, distribution and conservation of seagrass in coastal waters of the Liaodong Peninsula, North Yellow Sea, northern China: Implications for seagrass conservation [J]. *Marine Pollution Bulletin* 2021, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112261.
- [76] 吴钟解, 陈石泉, 蔡泽富, 等. 海南岛海草床分布变化及恢复建议[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(4): 542-549. [Wu Z J, Chen S Q, Cai Z F, et al. Analysis of distribution change and restoration suggestion of the seagrass beds in Hainan Island[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(4): 542-549.]
- [77] 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, DOI: 10.3390/rs13050856.
- [78] 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.
- [79] Lovelock C E, Reef R. Variable impacts of climate change on blue carbon[J]. *One Earth*, 2020, 3(2): 195-211.
- [80] 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 Q H, Yu C F, Liao G X, 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.]
- [81] 杨英姿, 李丹丹. 海洋生态文明建设的实践逻辑[J]. *福建师范大学学报(哲学社会科学版)*, 2020, (3): 49-59. [Yang Y Z, Li D D. Practical logic of marine ecological civilization construction in Hainan[J]. *Journal of Fujian Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2020, (3): 49-59.]
- [82] Christianson A B, Cabré A, Bernal B, et al. The promise of blue carbon climate solutions: Where the science supports ocean-climate policy?[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, DOI: 10.3389/fmars.2022.851448.
- [83] Kwan V, Fong J, Ng C S L, et al. Temporal and spatial dynamics of tropical macroalgal contributions to blue carbon[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154369.
- [84] Gao Y, Yu G R, Yang T T, et al. New insight into global blue carbon estimation under human activity in land-sea interaction area: A case study of China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 159: 36-46.
- [85] Akhand A, Chanda A, Jameel Y, et al. The present state-of-the-art of blue carbon repository in India: A meta-analysis[J]. *Sustainability Science*, 2022, DOI: 10.1007/s11625-022-01181-4.
- [86] 叶旺旺, 张麋鸣, 孙恒, 等. 贝藻类养殖碳汇核算与综合温室气体评估研究进展[J/OL]. *应用海洋学学报*, (2021-09-08) [2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1319.p.20210907.1551.002.html>. [Ye W W, Zhang M M, Sun H, et al. Advances in carbon sink accounting and integrated greenhouse potential assessment for shellfish aquaculture[J/OL]. *Journal of Applied Oceanography*, (2021-09-08) [2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1319.p.20210907.1551.002.html>.]

Assessment of the status and capacity of blue carbon in China's coastal provinces

XIANG Ai¹, CHUAI Xiaowei^{1,2}, LI Jiasheng³

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China; 2. Frontiers Science Center for Critical Earth Material Cycling, Nanjing University, Nanjing 210046, China; 3. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: China has a coastline of more than 32600 km and possesses three types of blue carbon ecosystems: mangroves, salt marshes, and seagrass beds, and mariculture production ranks first in the world all year round, so there are excellent conditions for blue carbon development. Based on a systematic review of blue carbon research results in China and abroad, this study constructed a blue carbon accounting framework for China's coastal provinces, which includes the natural ecosystem and mariculture system from the perspective of a broad blue carbon definition. Meanwhile, based on relevant statistical data, remote sensing data, and accounting parameter data, the blue carbon of China's coastal provinces was accounted for and their spatial and temporal change patterns were analyzed. This study also used the Super-SBM (slacks-based measure) model to evaluate the efficiency of China's mariculture carbon sink fisheries. The results show that: (1) Blue carbon ecosystem areas showed fluctuating growth, and the annual average amount of carbon buried in mangroves in China from 1997 to 2019 ranged from 0.033–0.078 Tg C/yr, 0.234–0.646 Tg C/yr in salt marshes, and 0.012–0.018 Tg C/yr in seagrass beds; (2) The annual average amount of carbon buried in nine coastal provinces from 2003 to 2020 was 0.87–1.36 Tg C/yr, with significant inter-provincial spatial disparities and showing different growth characteristics in each time period; (3) The spatial distribution pattern of total blue carbon and structure of coastal provinces differed significantly, among which Liaoning and Shandong were the provinces with the highest blue carbon capacity, and the composition ratio of blue carbon was more balanced in Jiangsu Provinces; (4) Land use change, uncoordinated development between blue carbon habitat and mariculture, and climate change are important reasons affecting the blue carbon capacity of natural resources, and the efficiency values of carbon sink fisheries in nine coastal provinces for 2003–2020 reflected a imbalance between the economic indicators of mariculture inputs and ecological outputs, which could also curb the excavation and utilization of blue carbon capacity. Finally, corresponding optimization recommendations for blue carbon were proposed to contribute to the national carbon neutrality strategy.

Key words: blue carbon ecosystems; mariculture; fishery carbon sink; blue carbon capacity assessment; Super-SBM model; China's coastal provinces