

中国栽培海藻碳汇经济价值时空分异及影响因素

余悦儒^{1,2}, 杨锐^{1,2*}, 陈海敏^{1,2}, 陈娟娟^{1,2}, 骆其君^{1,2}

(1. 宁波大学, 浙江省海洋生物工程重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波大学海洋学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 工业革命以来, 人类活动导致大气中的温室气体浓度迅速攀升, 严重影响了全球气候。开发蓝碳产业成为人们应对气候变化的重要举措。栽培海藻碳汇是蓝碳的重要组成部分。本研究以中国 8 个沿海省份栽培海藻数据为基础, 测算其碳汇总经济价值, 并分析其时空分异特征; 采用对数平均迪氏指数法 (LMDI) 解析中国栽培海藻碳汇总经济价值的影响因素。结果显示, 2009—2021 年, 中国栽培海藻碳汇量及其总经济价值整体呈上升趋势, 2021 年分别达到 87 万 t 和 488 亿元。不同栽培海藻的碳汇量, 从高到低依次为海带、江蓠、紫菜、裙带菜和其他 (羊栖菜、麒麟菜、石花菜和浒苔); 单位面积碳去除能力, 从高到低依次为海带、江蓠、裙带菜、其他和紫菜。福建、山东和辽宁三个省份的栽培海藻碳汇总经济价值较高, 其余省份则较低。养殖效率效应 (EFE) 和养殖面积效应 (AE) 是栽培海藻碳汇总经济价值的主要驱动因素。研究表明, 中国栽培海藻的碳汇潜力不容忽视, 能够创造巨大的经济效益。栽培海藻的碳汇能力及其总经济价值存在一定的种间差异, 可通过合理调整栽培物种和结构来提高海藻碳汇及其总经济价值。应从政府部门、科研单位及从业人员和社会公众三个层面出发, 重视栽培海藻碳汇等渔业碳汇的功能和价值, 促进渔业高质量发展, 为减缓全球气候变暖, 实现“双碳”目标做出更大贡献。

关键词: 栽培海藻; 碳汇; 经济价值; 时空分异; 影响因素

中图分类号: S 968.4

文献标志码: A

海洋碳汇, 又称蓝碳。在 2009 年联合国环境规划署等组织联合发布的《蓝碳: 健康海洋对碳的固定作用——快速反应评估报告》中指出, “在世界上捕获的所有生物碳 (或绿色碳) 中, 超过一半 (55%) 是由海洋生物捕获的, 因此被称为蓝碳”^[1]。长期以来, 蓝碳的定义局限在红树林、盐沼和海草床等所储存和埋藏的碳, 而大型海藻通常被排除在外。近年来, 越来越多研究认可大型海藻对海洋碳封存具有重要贡献^[2-5]。2019 年联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 发布的《气候变化中的海洋与冰冻圈特别报告》中强调, “海

洋系统中所有易于管理的生物驱动的碳通量和碳储存都可以被视为蓝碳”, 认为蓝碳是海洋自然生态系统缓解气候变化的主要途径, 并将大型海藻与红树林、海草床和盐沼一并列为海岸带蓝碳^[6]。中国作为全球拥有红树林、盐沼和海草床等蓝碳生态系统的国家之一, 同时也是规模最大的海藻栽培国, 具有开发蓝碳产业的巨大优势。研究表明, 全球大型海藻的产量绝大部分来自人工栽培, 贡献比例高达 97%^[7], 其巨大的生产力可以在地球碳循环及缓解气候变化等方面发挥重要作用^[8]。并且, 由于具有成本低、产量高、技术可行等优

收稿日期: 2023-02-21 修回日期: 2023-04-29

资助项目: 现代农业产业技术体系 (CARS-50)

第一作者: 余悦儒 (照片), 从事农村经济发展研究, E-mail: yuyueru2720@163.com

通信作者: 杨锐, 从事藻类遗传育种与健康栽培研究, E-mail: yangrui@nbu.edu.cn



势, 栽培海藻能够形成产业化的可持续海洋经济。

渔业碳汇是蓝碳的重要组成部分, 由中国于2010年首次提出^[9]。近年来, 为服务国家“碳达峰和碳中和”(简称“双碳”)战略, 发展渔业碳汇成为人们关注的热点。渔业碳汇也被称作“可移出的碳汇”和“可产业化的蓝碳”, 是指通过渔业生产活动促进水生生物吸收或使用水体中CO₂等温室气体, 并通过收获把这些已经转化为生物产品的碳移出水体或通过生物沉积作用将其沉降于水底的过程和机制^[10]。藻类栽培、滤食性贝类养殖等无需投饵的渔业生产活动都具有碳汇功能, 可能形成生物碳汇, 唐启升等^[10]提出渔业碳汇对实现“碳中和”的贡献是现实、高效和有价值的。

大型海藻碳汇 (seaweed carbon sink) 即利用大型藻类从空气或海水中吸收并固定海水中二氧化碳的过程、活动、机制和能力 (HY/T 0305—2021)^[11]。传统意义上的栽培海藻碳汇是指收获的藻类生物量碳, 即“可移出的碳”的部分^[12]。事实上, 除栽培海藻可移出碳外, 栽培海藻生长过程中释放的大部分有机碳会在微生物碳泵 (microbial carbon pump, MCP) 的作用下形成可在海洋中储存上千年的惰性溶解有机碳 (recalcitrant dissolved organic carbon, RDOC), 其总量与可移出碳量相当^[12-13]。同时, 还有一部分碳通过沉降埋藏于沉积物中, 被输送至深远海, 在海洋中长期储存^[14]。这两部分也是蓝碳的重要贡献者。2023年1月, 中华人民共和国自然资源部实施《海洋碳汇核算方法》行业标准 (HY/T 0349—2022), 为明确包括栽培海藻在内的海洋碳汇概念及其计算提供了参考^[15]。

海洋碳汇经济价值分狭义和广义两种。狭义的海洋碳汇经济价值即常规意义上的储碳价值, 可理解为“通过海洋生物、非生物和其他海洋活动, 产生的二氧化碳存储增量的市场价值”^[16]。广义的海洋碳汇经济价值即海洋碳汇总经济价值, 可理解为“吸收、固定、存储二氧化碳的海洋生物、非生物和其他海洋活动的总价值”^[16], 包括产品价值、储碳价值、释氧价值和净化价值。2022年2月21日中华人民共和国自然资源部发布的行业标准《海洋碳汇经济价值核算方法》(报批稿)也确认了该概念, 以及海洋碳汇经济价值的核算范围。

中国于2011年启动了7个省市碳排放交易试点工作, 2013年起7个试点碳市场先后开始上线交易, 2021年7月全国碳排放权交易市场启动, 对实现“双碳”目标具有重要意义^[17]。生态碳汇市场交易是碳交易市场的重要组成部分, 同时也是实现

碳中和的现实需要^[18]。正确测算海洋碳汇及其经济价值是推动海洋碳汇市场交易的基础和前提, 是健全碳汇经济体系的必然举措与当务之急。近年来, 我国陆续完成了广东湛江红树林造林项目、福建连江县渔业碳汇项目、厦门产权交易中心海水养殖渔业海洋碳汇交易项目等蓝碳项目的交易, 为实现蓝碳价值市场化提供了示范路径^[19-21], 然而, 对栽培海藻的碳汇经济价值的测算机制尚未成熟。因此, 本实验基于中国栽培海藻数据, 探讨栽培海藻碳汇的经济价值, 以期为合理测算与评估渔业碳汇的经济价值提供参考。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

实验数据均来自《中国渔业统计年鉴》, 以辽宁、河北、山东、江苏、浙江、福建、广东和海南共8个沿海省份的栽培海藻相关数据作为研究对象, 时间维度为2009—2021年。根据数据的可获得性, 此次研究不包括中国香港、中国澳门和中国台湾地区; 由于上海、天津和广西省海藻栽培规模小, 在中国渔业统计年鉴中暂无统计数据, 亦未纳入本研究范围。

1.2 研究方法

栽培海藻碳汇核算模型 海带 (*Saccharina japonica*)、裙带菜 (*Undaria pinnatifida*)、紫菜 (*Porphyra sensu lato*) 和江蓠 (*Gracilaria* spp.) 是我国四大主要经济海藻, 其产量占海水养殖海藻总产量的98%以上。本实验在核算碳汇时, 按照海带、裙带菜、紫菜、江蓠和其他共5个类群进行统计, 其他海藻包括麒麟菜 (*Eucheuma muricatum*)、羊栖菜 (*Sargassum fusiforme*)、石花菜 (*Gelidium amansii*) 和浒苔 (*Ulva prolifera*) 等养殖面积和产量较小的种类。栽培海藻碳汇包括可移出碳汇、栽培过程中释放的溶解有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 和颗粒有机碳 (particulate organic carbon, POC) 所形成的碳汇^[22-23]。然而, 由于目前缺乏各类海藻养殖过程中释放的有机物及其形成碳汇的相关数据, 本实验根据 Krause-Jensen 等^[3] 研究结果进行计算, 即约33%海藻释放的溶解有机碳和11%颗粒有机碳被沉积或输送到深海埋藏, 形成碳。因此, 计算栽培海藻碳汇的具体公式:

$$C = C_{\text{bio}} + 33\% \times \text{DOC}_{\text{rel}} + 11\% \times \text{POC}_{\text{rel}} \quad (1)$$

式 (1) 中, C 为栽培海藻碳汇, C_{bio} 为可移出碳汇, DOC_{rel} 为海藻释放的溶解有机碳量, POC_{rel} 为海藻释放的颗粒有机碳量。其中, 栽培海藻可移出碳汇的估算方法参照叶旺旺等^[24], 公式:

$$C_{bio} = Q_i \times W_{CW} \quad (2)$$

式 (2) 中, C_{bio} 为栽培海藻可移出碳汇, Q 为不同栽培海藻的干重产量, W_{CW} 为栽培海藻干重状态下海藻的含碳率。测算依据见表 1。

表 1 栽培海藻的市场价格及其含碳率、含氮率和含磷率 (干重)

Tab. 1 Market price of cultivated seaweeds and their carbon content, nitrogen content and phosphorus content (dry weight)

海藻种类 seaweeds species	市场价格/(万元/t) ^[25] market price	含碳率/% ^[15] carbon content	含氮率/% ^[26] nitrogen content	含磷率/% ^[26] phosphorus content
海带 <i>S. japonica</i>	1.23	31.20	3.07	0.43
裙带菜 <i>U. pinnatifida</i>	2.30	28.81	3.80	0.26
紫菜 <i>Porphyra sensu lato</i>	7.38	41.96	4.87	0.62
江蓠 <i>Gracilaria spp.</i>	1.44	28.40	4.04	0.29
其他海藻 others	2.72	30.36	1.84	0.37

注: 1) 其他海藻包括羊栖菜、麒麟菜、石花菜和浒苔; 2) 紫菜、江蓠和其他海藻的含碳率分别参考条斑紫菜、提克江蓠和其他藻类的数据; 3) 其他海藻的含氮率、含磷率为麒麟菜、羊栖菜和浒苔的均值。

Notes: 1) Other seaweeds include *S. fusiforme*, *E. muricatum*, *G. amansii* and *U. prolifera*; 2) the carbon content of *Porphyra sensu lato*, *Gracilaria spp.* and other seaweeds refer to the datas of *P. yezoensis*, *G. tikvahiae* and other seaweeds, respectively; 3) the nitrogen and phosphorus content of other seaweeds is the average of *S. fusiforme*, *E. muricatum*, and *U. prolifera*.

DOC_{rel} 和 POC_{rel} 可分别根据它们占总碳的比例推算得出^[27]。因此, 栽培海藻释放的有机物碳量可推算:

$$DOC_{rel} = \frac{C_{bio}}{1 - \alpha - \beta} \times \alpha \quad (3)$$

$$POC_{rel} = \frac{C_{bio}}{1 - \alpha - \beta} \times \beta \quad (4)$$

式 (3)、(4) 中, DOC_{rel} 为海藻释放的溶解有机碳量, POC_{rel} 为海藻释放的颗粒有机碳量, C_{bio} 为栽培海藻可移出碳汇, α 和 β 为栽培海藻生长过程中释放的 DOC 和 POC 占总碳的比例, 分别为 14.39% 和 9.02%^[27]。

栽培海藻单位面积的碳去除能力由栽培海藻碳汇和栽培面积的比值计算得到^[26], 用于分析不同栽培海藻物种单位面积的碳汇贡献。

$$RC = \frac{C_i}{S_i} \quad (5)$$

式 (5) 中, RC 为栽培海藻单位面积碳去除能力, C_i 为不同栽培海藻碳汇, S_i 为不同栽培海藻的栽培面积。

栽培海藻碳汇总经济价值核算模型 栽培海藻碳汇总经济价值即广义碳汇经济价值, 由产品价值、储碳价值、释氧价值和净化价值四个部分组成。

产品价值即具有食用或药用价值的海藻的市场价值。

$$V_P = Q_i \times P_{mp} \quad (6)$$

式中, V_P 为栽培海藻的产品价值, Q_i 为不同栽培海藻的产量, P_{mp} 为栽培海藻的市场价格。各栽培海藻市场价格见表 1^[25]。

储碳价值即狭义碳汇经济价值, 指栽培海藻吸收 CO_2 所产生的价值。

$$V_C = C \times k_1 \times P_C \quad (7)$$

式 (7) 中, C 为栽培海藻碳汇, k_1 为碳的质量转化为 CO_2 的质量系数 44/12, P_C 为碳交易价格。因为碳交易价格受交易时间、市场供需及交易地点等影响差异较大, 所以本研究采用 2022 年全国碳市场年度成交均价 55.3 元/t 来计算储碳价值^[28]。

释氧价值是栽培海藻释放 O_2 所产生的价值。使用替代成本法即以单位工业制氧成本作为栽培海藻释放的 O_2 的价格进行核算^[16]。

$$V_O = C \times k_2 \times P_O \quad (8)$$

式 (8) 中, k_2 为碳的质量转化为 O_2 的质量系数 32/12, P_O 为工业制氧的成本, 取 400 元/t^[29]。

净化价值包括对大气污染物和水污染物的净化价值, 一般主要估算栽培海藻生长过程中去除

海水中氮和磷的价值^[25]。

$$V_Q = \left(\sum Q_i \times N_i \right) \times P_N + \left(\sum Q_i \times P_i \right) \times P_P \quad (9)$$

式(9)中, V_Q 为去除海水中氮和磷的价值, N_i 和 P_i 为不同海藻的含氮率和含磷率(表 1), P_N 、 P_P 为去除氮、磷养分的成本, 分别为 1 500 和 2 500 元/t^[30]。

栽培海藻碳汇总经济价值:

$$V = V_P + V_C + V_O + V_Q \quad (10)$$

LMDI 模型构建 为更直观地展示我国不同区域栽培海藻碳汇总经济价值的影响因素, 本实验根据自然资源部对海洋经济圈的划分标准, 将沿海 8 个省份分别纳入海洋经济圈范围, 其中河北、辽宁和山东为北部海洋经济圈, 江苏和浙江为东部海洋经济圈, 福建、广东和海南为南部海洋经济圈^[31]。运用对数平均迪氏指数法^[32](Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)对栽培海藻碳汇总经济价值影响因素进行分析, 基本公式:

$$V = \frac{V}{C} \times \frac{C}{Q} \times \frac{Q}{S} \times S \quad (11)$$

式(11)中, S 为栽培海藻的养殖面积。其中, $\frac{V}{C}$ 是栽培海藻碳汇总经济价值和栽培海藻碳汇的比值, 即为碳汇价值效应 (value effect, VLE); $\frac{C}{Q}$ 是栽培海藻碳汇和产量的比值, 为碳汇系数效应 (coefficient effect, CE); $\frac{Q}{S}$ 是栽培海藻的产量和面积的比值, 为养殖效率效应 (efficiency effect, EFE); S 作为栽培海藻的养殖面积效应 (area effect, AE)。将四项影响因素代入公式(11), 得到公式(12):

$$V = VLE \times CE \times EFE \times AE \quad (12)$$

本实验选取 1 年的时间间隔 (t), 在 $[0, t]$ 时期 V 由 V_0 变化到 V_t , 记为 ΔV , 对式(12)进行 LMDI 加法分解可得:

$$\begin{aligned} \Delta V = V_t - V_0 &= VLE_t \times CE_t \times EFE_t \times AE_t - \\ &VLE_0 \times CE_0 \times EFE_0 \times AE_0 = \Delta V_{VLE} + \Delta V_{CE} + \\ &\Delta V_{EFE} + \Delta V_{AE} \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中, ΔV_{VLE} 、 ΔV_{CE} 、 ΔV_{EFE} 、 ΔV_{AE} 分别表示在外部条件不变的情况下, 碳汇价值效应、碳汇系数效应、养殖效率效应和养殖面积效应四项影响因素对栽培海藻碳汇总经济价值变动的绝对贡献值, 使用 LMDI 进行分解:

$$\begin{cases} \Delta V_{VLE} = \frac{V_t - V_0}{\ln(V_t/V_0)} \ln\left(\frac{VLE_t}{VLE_0}\right) \\ \Delta V_{CE} = \frac{V_t - V_0}{\ln(V_t/V_0)} \ln\left(\frac{CE_t}{CE_0}\right) \\ \Delta V_{EFE} = \frac{V_t - V_0}{\ln(V_t/V_0)} \ln\left(\frac{EFE_t}{EFE_0}\right) \\ \Delta V_{AE} = \frac{V_t - V_0}{\ln(V_t/V_0)} \ln\left(\frac{AE_t}{AE_0}\right) \end{cases} \quad (14)$$

利用 LMDI 乘法分解:

$$\begin{cases} rate_{VLE} = \exp\left(\frac{\ln V_t - \ln V_0}{V_t - V_0} \times \Delta V_{VLE}\right) \\ rate_{CE} = \exp\left(\frac{\ln V_t - \ln V_0}{V_t - V_0} \times \Delta V_{CE}\right) \\ rate_{EFE} = \exp\left(\frac{\ln V_t - \ln V_0}{V_t - V_0} \times \Delta V_{EFE}\right) \\ rate_{AE} = \exp\left(\frac{\ln V_t - \ln V_0}{V_t - V_0} \times \Delta V_{AE}\right) \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中, $rate_{VLE}$ 、 $rate_{CE}$ 、 $rate_{EFE}$ 和 $rate_{AE}$ 分别表示四项影响因素每变动 1 单位, 对应栽培海藻碳汇总经济价值变动的比率。

2 结果

2.1 栽培海藻碳汇及碳汇经济价值分析

近年来, 由于海水养殖技术不断创新以及养殖过程不断优化, 我国海藻栽培规模和产量空前扩大, 产生了巨大的碳汇^[33-34]。汇总 2009—2021 年全国沿海省份栽培海藻产量, 发现海藻产量整体呈现上升趋势, 2021 年到达 258 万 t(图 1)。

根据公式(1)~(4)核算栽培海藻碳汇, 并绘制图表(图 2、表 2)。中国栽培海藻碳汇量在 2009—2021 年始终保持稳定上升的趋势, 2021 年总量达 87 万 t, 是 2009 年的 2 倍多。其中, 海带的碳汇量远远高于其他四类海藻, 超过栽培海藻碳去除总量的 65%。裙带菜、紫菜、江蓠三者的碳汇量相近, 2013 年起江蓠的碳汇量略高于裙带菜和紫菜。其他海藻(麒麟菜、羊栖菜、石花菜和浒苔)碳汇量最低, 2020 年以前均低于 1 万 t。

综合全国各类海藻产量, 根据公式(5)计算各种栽培海藻的单位面积碳去除能力(图 3)。结果显示, 栽培海藻的单位面积碳去除能力从高到低依次为海带、江蓠、裙带菜、紫菜及其他(羊栖菜、麒麟菜、石花菜和浒苔)。2014 年以来, 我国海带的单位面积碳去除能力突破 10 t/hm², 2021 年达

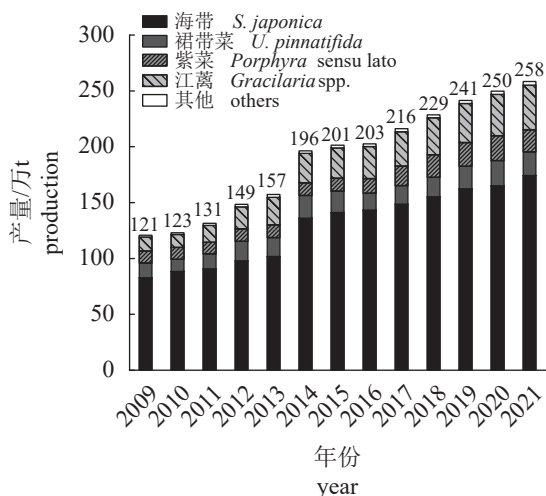


图 1 2009—2021 年中国栽培海藻产量

其他海藻包括羊栖菜、麒麟菜、石花菜和浒苔; 下同。

Fig. 1 Outputs of cultivated seaweeds in China from 2009 to 2021

Other seaweeds include *S. fusiforme*, *E. muricatum*, *G. amansii*, *U. prolifera*; the same below.

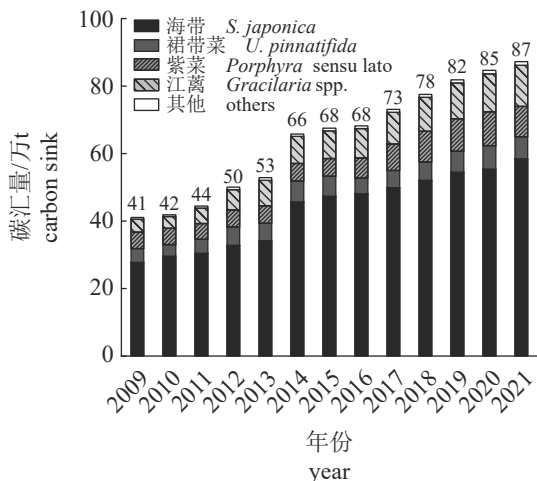


图 2 2009—2021 年中国栽培海藻碳汇量

Fig. 2 Carbon sink of cultivated seaweeds in China from 2009 to 2021

到约 12 t/hm²。江篱的单位面积碳去除能力稳定上升, 于 2019 年达到峰值 11.3 t/hm², 近两年有所下降。裙带菜的单位面积碳去除能力低于江篱, 呈波动上升趋势, 近两年达到 9 t/hm²。紫菜的单位面积碳去除能力最低, 历年均低于 1.4 t/hm²。

根据公式 (6)~(10) 计算各海藻的经济价值 (图 4)。历年来, 海带的碳汇总经济价值和储碳价值均居首位, 2021 年分别达到 222 亿元和 6 472 万元。虽然紫菜的储碳价值较低, 但因其产品价值高, 紫菜的碳汇总经济价值仅次于海带, 位居

第二; 2016 年之前稳定在 80 亿元左右, 近几年则突破 150 亿元。裙带菜和江篱的碳汇总经济价值及储碳价值呈上升趋势。近年来二者碳汇总经济价值维持在约 50 亿元, 储碳价值分别约在 1 300 万元和 2 000 万元。

2.2 沿海各地区栽培海藻碳汇总经济价值分析

汇总沿海各地区栽培海藻碳汇总经济价值, 结果显示, 在 2009—2021 年, 福建省栽培海藻碳汇总经济价值保持稳定增长, 该数值于 2020 年达到峰值, 为 203.2 亿元, 之后略有下降 (表 3)。据统计, 福建省栽培海藻碳汇总经济价值约占全国的 40% 以上。同期, 山东省与辽宁省的栽培海藻碳汇总经济价值增幅虽有波动, 但总体呈上升趋势; 2021 年分别达到 98.4 亿元和 79.7 亿元, 分别占全国的 20.1% 和 16.3%。就栽培海藻单位面积的碳汇总经济价值而言, 自 2011 年起辽宁省远超福建、山东等其他省份。广东、浙江和江苏三省的栽培海藻碳汇总经济价值相对较低, 其中江苏省和广东省海藻碳汇总经济价值年均增长率分别为 4.5% 和 2.0%。浙江省自 2017 年起栽培海藻碳汇总经济价值有所提升, 截至 2021 年, 该数值达到 58.6 亿元。广东省栽培海藻单位面积的碳汇总经济价值增长幅度显著高于其他省份, 2021 年该数值达到 98.5 万元, 是 2009 年的 2.6 倍多。海南省和河北省由于栽培海藻碳汇较低, 其总经济价值也较低。值得注意的是, 2019 年海南省海藻碳汇总经济价值突降, 可能是因为当年平均气温较常年偏高 0.79 °C, 是 1951 年以来的第 5 个暖年^[35], 海南省气温达到历史最高, 严重影响江篱和其他栽培海藻的产量所致。

为进一步解析我国栽培海藻碳汇总经济价值的时空演化规律, 本实验选取 2009 年、2012 年、2015 年、2017 年、2019 年和 2021 年的数据, 绘制时空分异图 (图 5)。从整体上看, 福建省、山东省和辽宁省的栽培海藻碳汇总经济价值较高, 浙江省、广东省、江苏省、海南省和河北省的栽培海藻碳汇总经济价值较低。

作为海藻栽培大省, 福建省于 2011 年就在国民经济和发展规划中明确提出要增加海洋碳汇。近年来, 福建省致力于海藻养殖业的发展, 通过恢复和重建大型海藻场、发展以贝藻养殖业为主的碳汇渔业、建立栽培海藻固碳增汇评价技术体系、探索海洋碳汇交易机制研究等多项措施增强

表 2 2009—2021 年栽培海藻碳汇量汇总

Tab. 2 Summary of carbon sink of cultivated seaweeds from 2009 to 2021

项目 item	年份 year	海带 <i>S. japonica</i>	裙带菜 <i>U. pinnatifida</i>	紫菜 <i>Porphyra</i> sensu lato	江蓠 <i>Gracilaria</i> spp.	其他 others	项目 item	年份 year	海带 <i>S. japonica</i>	裙带菜 <i>U. pinnatifida</i>	紫菜 <i>Porphyra</i> sensu lato	江蓠 <i>Gracilaria</i> spp.	其他 others
C_{bio}	2009	258 325	38 149	45 097	35 600	4 772	C_{bio}	2016	447 123	43 778	55 087	81 390	7 236
DOC_{rel}		48 535	7 168	8 473	6 689	897	DOC_{rel}		84 007	8 225	10 350	15 292	1 359
POC_{rel}		30 423	4 493	5 311	4 193	562	POC_{rel}		52 658	5 156	6 488	9 585	852
C		277 688	41 009	48 477	38 269	5 130	C		480 638	47 059	59 216	87 491	7 778
C_{bio}	2010	275 684	31 441	44 996	32 581	4 700	C_{bio}	2017	463 833	48 054	72 719	87 663	7 883
DOC_{rel}		51 796	5 907	8 454	6 121	883	DOC_{rel}		87 147	9 028	13 663	16 471	1 481
POC_{rel}		32 467	3 703	5 299	3 837	554	POC_{rel}		54 626	5 659	8 564	10 324	928
C		296 348	33 798	48 369	35 023	5 052	C		498 600	51 656	78 170	94 234	8 474
C_{bio}	2011	283 365	38 656	43 112	42 986	5 532	C_{bio}	2018	484 392	50 562	84 666	93 818	7 610
DOC_{rel}		53 240	7 263	8 100	8 076	1 039	DOC_{rel}		91 009	9 500	15 907	17 627	1 430
POC_{rel}		33 372	4 552	5 077	5 062	651	POC_{rel}		57 047	5 955	9 971	11 049	896
C		304 605	41 554	46 343	46 208	5 946	C		520 700	54 352	91 012	100 850	8 180
C_{bio}	2012	305 450	50 452	47 133	55 885	6 714	C_{bio}	2019	506 694	58 309	89 083	98 856	8 334
DOC_{rel}		57 389	9 479	8 856	10 500	1 262	DOC_{rel}		95 199	10 955	16 737	18 573	1 566
POC_{rel}		35 973	5 942	5 551	6 582	791	POC_{rel}		59 673	6 867	10 491	11 642	982
C		32 8345	54 234	50 666	60 074	7 217	C		544 674	62 680	95 760	106 266	8 959
C_{bio}	2013	317 534	49 009	47 792	69 896	7 544	C_{bio}	2020	515 291	64 997	93 159	104 787	9 232
DOC_{rel}		59 659	9 208	8 979	13 132	1 417	DOC_{rel}		96 815	12 212	17 503	19 688	1 735
POC_{rel}		37 396	5 772	5 629	8 232	888	POC_{rel}		60 686	7 655	10 971	12 341	1 087
C		341 335	52 683	51 374	75 135	8 109	C		553 915	69 869	100 142	112 642	9 924
C_{bio}	2014	424 643	58 513	47 906	74 474	6 658	C_{bio}	2021	543 622	61 149	83 568	113 293	9 743
DOC_{rel}		79 783	10 994	9 001	13 992	1 251	DOC_{rel}		102 138	11 489	15 701	21 286	1 830
POC_{rel}		50 010	6 891	5 642	8 771	784	POC_{rel}		64 022	7 201	9 842	13 343	1 147
C		456 472	62 899	51 497	80 056	7 157	C		584 370	65 732	89 832	121 785	10 473
C_{bio}	2015	440 322	55 460	48 621	76 722	7 289							
DOC_{rel}		82 729	10 420	9 135	14 415	1 370							
POC_{rel}		51 857	6 532	5 726	9 036	858							
C		473 327	59 617	52 265	82 473	7 835							

注: 1) 其他海藻包括羊栖菜、麒麟菜、石花菜和浒苔; 2) $C = C_{bio} + 33\% \times DOC_{rel} + 11\% \times POC_{rel}$ 。

Notes: 1) other seaweeds include *S. fusiforme*, *E. muricatum*, *G. amansii*, *U. prolifera*; 2) $C = C_{bio} + 33\% \times DOC_{rel} + 11\% \times POC_{rel}$.

海藻储碳能力, 促进海洋低碳经济的发展。这与图 4 中福建省栽培海藻碳汇经济价值的时空演化格局保持高度一致性。山东省积极响应国家低碳发展战略, 扩大海带等经济价值高且储碳能力较强品种的栽培规模, 放大了渔业碳汇的功能, 推动蓝碳由资源向资产转变, 在海藻碳汇总经济价值中有出色表现。

辽宁省海藻栽培区集中在大连金州、长海和旅顺口等地, 由于海区条件限制了栽培规模^[36], 因此该省海藻栽培产量较为稳定, 多年来其碳汇总经济价值也基本处于相同水平。研究期间, 浙江省、江苏省和辽宁省等沿海受风暴潮、海浪及

赤潮等海洋灾害等影响^[37], 在一定程度上造成各省栽培海藻碳汇经济价值波动。2012 年广东海洋经济综合试验区的部署与建设, 为其渔业经济发展创造了条件, 碳汇总经济价值有所增长。海南省地处热带, 气候条件并不适合目前市场主流的温带海藻生长; 且由于海藻生产限制因素较多、成本较高, 因此, 海南省的海藻栽培面积相对较小, 其海藻碳汇总经济价值也较低。

2.3 栽培海藻碳汇总经济价值影响因素分析

利用 LMDI 模型解构 2010—2021 年栽培海藻碳汇总经济价值的影响因素, 分解结果显示, 2012 年是国家渔业基础设施投资力度最大的一年,

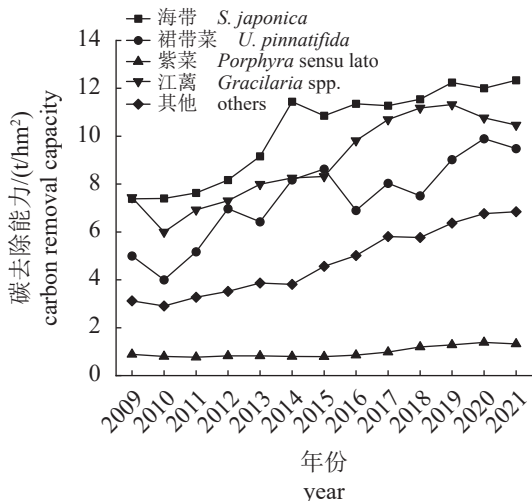


图3 2009—2021年中国栽培海藻的单位面积碳去除能力

Fig. 3 Carbon removal capacity per unit area of cultivated seaweeds in China from 2009 to 2021

投资额比上一年增长了9倍, 为海藻栽培产业的快速发展奠定了坚实基础(表4)。历年来, VLE的数值基本保持在1左右, 说明VLE对栽培海藻碳汇总经济价值的驱动作用相对稳定。由于本实验使用的栽培海藻的含碳率未因时间、海域的变化而调整, 因此, CE仅反映各海洋经济圈海藻栽培结构的变化^[38]。研究发现, 在三大海洋经济圈中, 海藻的栽培结构存在一定调整, 其中, 紫菜和江篱的栽培比例有所上升, 海带和裙带菜有所下降, 导致CE数值在1上下浮动, 可见CE对碳

汇总经济价值的影响并不大。

“十二五”时期(2011—2015年), 我国大力倡导绿色低碳的渔业发展, 推行强渔惠渔政策, 如实施渔业柴油补贴和渔业资源保护补助等政策; 中央渔业基础设施投资和财政资金的支持分别达到“十一五”时期(2006—2010年)的4.15倍和1.54倍, 渔业规模不断扩大, 栽培海藻产量和面积也有较大提升。这也验证了这一时期EFE作用显著增强且达到峰值, AE达到相对较高的水平。

“十三五”时期(2016—2020年)以来, 资源和环境压力不断增强, 我国大力推进渔业供给侧结构性改革, 加快转变渔业养殖方式, 实现渔业转型升级。这一时期, 海藻栽培产业从追求高产量转向追求高质量发展, EFE的驱动作用保持在较高的水平, AE的驱动作用有所减弱。不同时期各影响因素对栽培海藻碳汇总经济价值的驱动作用存在明显差异。综合而言, EFE和AE是碳汇总经济价值的主要影响因素, 保持较强的驱动作用。相对而言, VLE和CE对碳汇总经济价值的驱动作用则较小。

3 讨论

3.1 栽培海藻碳汇及其经济价值与其他蓝碳生态系统的比较

红树林、盐沼和海草床三大蓝碳生态系统被认为是地球上最有效的碳吸收和长期储存者^[39]。

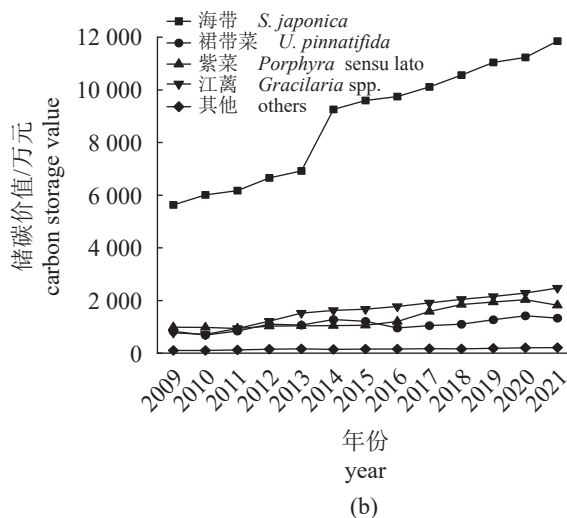
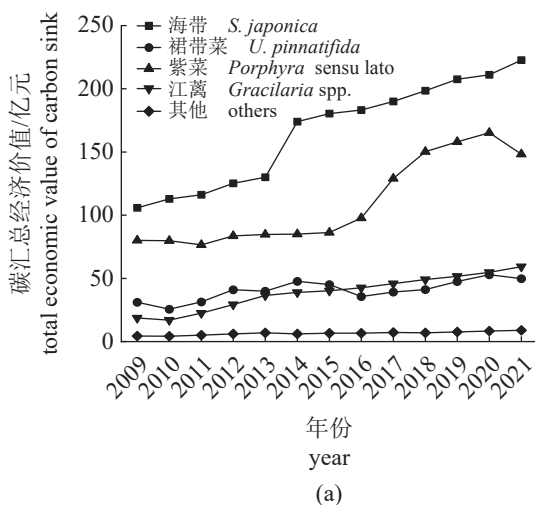


图4 2009—2021年中国栽培海藻的碳汇经济价值

(a) 碳汇总经济价值, (b) 储碳价值。

Fig. 4 Economic value of carbon sink of cultivated seaweeds in China from 2009 to 2021

(a) total economic value of carbon sink, (b) carbon storage value.

表 3 2009—2021 年中国沿海各地区栽培海藻碳汇总经济价值

Tab. 3 Total economic value of carbon sink of cultivated seaweeds in coastal areas of China from 2009 to 2021

年份 year	北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Cycle				东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Cycle				南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Cycle							
	辽宁 Liaoning		河北 Hebei		山东 Shandong		江苏 Jiangsu		浙江 Zhejiang		福建 Fujian		广东 Guangdong		海南 Hainan	
	V	V/S	V	V/S	V	V/S	V	V/S	V	V/S	V	V/S	V	V/S	V	V/S
2009	419 186	30.6	0	0.0	390 506	23.3	205 416	5.9	190 010	20.5	1 026 275	32.9	134 689	36.9	32 825	28.0
2010	413 684	28.3	320	6.4	392 085	20.9	169 258	4.4	201 499	19.3	1 048 681	31.2	137 942	46.2	33 708	28.1
2011	515 059	38.7	0	0.0	333 735	18.4	171 453	4.5	207 402	19.3	1 105 477	31.4	149 665	54.2	33 162	27.5
2012	554 779	41.4	0	0.0	443 387	24.7	159 149	4.1	225 617	21.7	1 264 220	35.4	169 913	51.1	35 018	28.0
2013	537 560	43.7	0	0.0	485 412	28.2	209 030	5.3	188 750	18.9	1 349 750	35.2	172 752	54.7	39 123	29.8
2014	621 853	53.2	0	0.0	919 380	46.4	193 664	4.9	208 840	20.7	1 383 354	34.7	165 431	54.8	23 951	30.2
2015	607 600	49.7	0	0.0	891 288	42.6	205 762	5.1	238 302	20.2	1 461 711	35.1	156 442	53.0	24 952	30.7
2016	527 266	46.4	0	0.0	880 529	36.7	211 900	5.1	267 787	19.6	1 592 749	40.3	151 084	62.3	26 161	32.9
2017	546 241	50.0	0	0.0	978 388	36.1	312 087	6.5	377 613	24.6	1 700 771	41.4	170 346	72.0	26 906	37.3
2018	598 554	52.6	1 278	182.6	976 102	38.5	314 436	7.2	468 999	26.7	1 884 112	43.6	198 620	73.0	16 628	27.9
2019	760 826	57.6	1 267	181.0	939 731	42.1	306 254	7.3	503 620	29.1	2 010 021	45.8	199 479	74.1	3 299	7.7
2020	789 769	54.1	767	109.6	918 673	42.0	349 401	8.5	640 003	36.7	2 031 803	45.8	183 474	85.4	11 802	31.5
2021	797 020	55.8	0	0.0	984 143	49.5	350 027	9.2	585 511	34.8	1 998 831	44.8	171 266	98.5	2 595	24.0

注: V为栽培海藻碳汇总经济价值(万元), V/S为单位面积栽培海藻碳汇总经济价值(万元/hm²)。

Notes: V is the total economic value of carbon (ten thousand CNY), and V/S is the total economic value of carbon sink per unit area (ten thousand CNY/hm²).

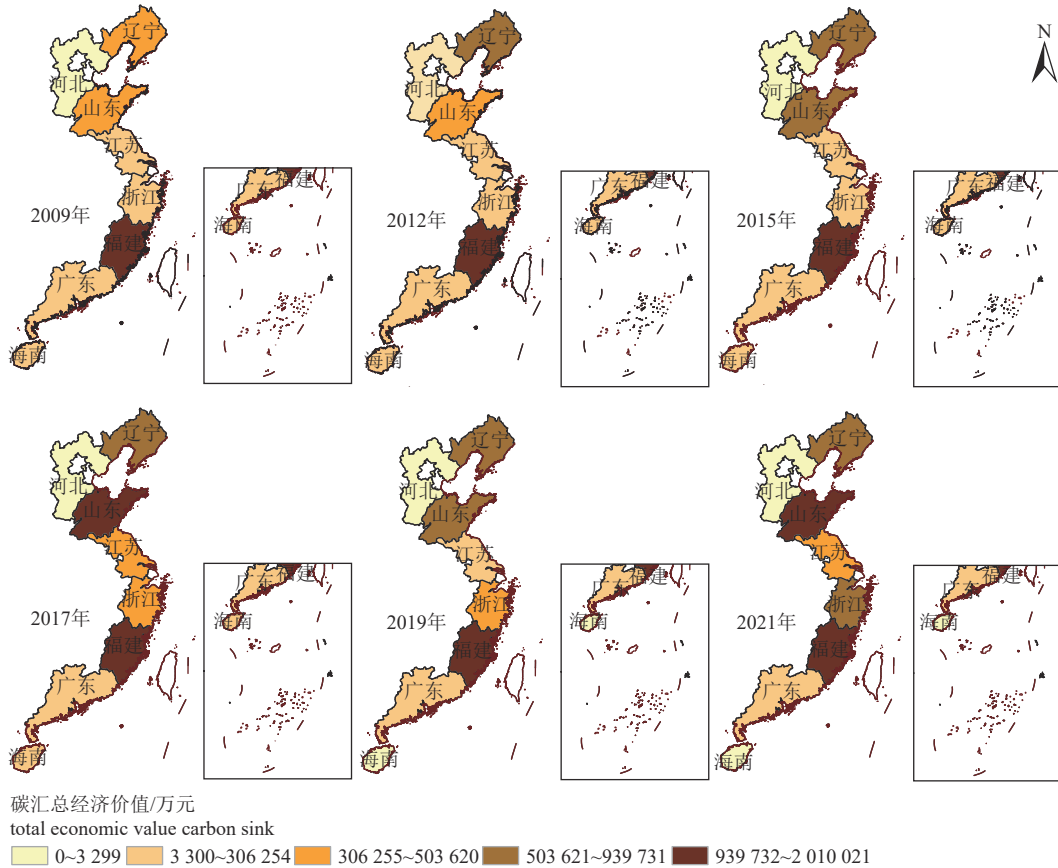


图 5 中国沿海部分地区栽培海藻碳汇总经济价值的时空分异

Fig. 5 Spatiotemporal differentiation of total economic value of carbon sink of cultivated seaweeds in some coastal areas of China

表 4 2010—2021 年中国栽培海藻碳汇总经济价值的分解效应

Tab. 4 Decomposition effect of total carbon sink economic value of cultivated seaweed in China from 2010 to 2021

地区 region	年份 year	VLE	CE	EFE	AE	地区 region	年份 year	VLE	CE	EFE	AE
全国 China	2010	0.980	1.002	0.935	1.088	全国 China	2016	1.010	1.003	0.999	1.007
北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		0.902	1.004	0.942	1.095	北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		0.944	1.002	0.950	1.011
东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		1.119	1.005	0.817	1.119	东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		1.040	1.011	0.980	1.063
南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		0.989	1.002	0.977	1.043	南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		0.935	1.002	1.120	0.939
全国 China	2011	0.988	0.994	1.068	1.001	全国 China	2017	1.049	1.005	0.978	1.091
北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		1.128	0.996	1.106	0.947	北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		1.137	1.005	0.938	1.084
东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		1.029	0.995	1.034	0.992	东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		0.767	0.996	1.280	1.142
南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		0.846	0.993	1.027	1.062	南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		1.028	0.998	1.054	1.027
全国 China	2012	1.007	0.996	1.104	1.024	全国 China	2018	1.023	1.003	1.069	0.989
北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		0.921	0.995	1.105	1.028	北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		1.034	1.000	1.063	0.970
东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		1.117	0.999	1.006	1.011	东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		1.009	1.003	1.166	0.959
南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		1.105	1.000	1.096	1.037	南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		0.939	1.003	1.025	1.049
全国 China	2013	0.990	0.997	1.079	0.981	全国 China	2019	1.004	0.999	1.072	0.985
北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		1.016	0.997	1.138	0.907	北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		1.098	0.999	1.098	0.969
东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		1.007	1.000	1.023	1.002	东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		1.012	0.990	1.090	0.978
南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		0.996	0.998	1.068	1.014	南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		0.914	1.001	1.040	1.008
全国 China	2014	0.947	0.998	1.187	1.051	全国 China	2020	1.008	0.999	1.031	1.004
北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		0.693	1.007	1.436	1.091	北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		1.057	0.997	0.976	1.037
东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		1.043	1.010	0.969	1.013	东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		0.890	1.011	1.196	0.987
南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		1.548	0.998	0.962	1.070	南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		0.944	0.995	1.037	1.001
全国 China	2015	0.993	1.000	0.989	1.037	全国 China	2021	0.963	0.996	1.050	0.985
北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		1.013	1.001	0.959	1.025	北部海洋经济圈 Northern Marine Economic Circle		0.948	1.002	1.055	1.004
东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		0.974	1.005	1.044	1.045	东部海洋经济圈 Eastern Marine Economic Circle		1.008	0.991	1.030	0.940
南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		0.907	0.997	1.032	1.038	南部海洋经济圈 Southern Marine Economic Circle		1.023	0.994	0.991	1.031

注：北部海洋经济圈为河北、辽宁、山东等地，东部海洋经济圈为江苏和浙江等地，南部海洋经济圈为福建、广东和海南等地。

Notes: The Northern Marine Economic Circle covers Hebei, Liaoning, Shandong and other places, the Eastern Marine Economic Circle covers Jiangsu and Zhejiang, and the Southern Marine Economic Circle covers Fujian, Guangdong and Hainan.

我国栽培海藻的碳汇及其经济价值低于红树林和盐沼，但高于海草床。其中，海藻的碳埋藏能力

(4.5 万 t/年) 约为盐沼 (57.7 万 t/年) 的 8%，是海草床 (1.7 万 t/年) 的 2.6 倍多，接近红树林 (9.8 万

t/年)的一半; 而栽培海藻碳埋藏产生的狭义碳汇经济价值, 即储碳价值 (0.09 亿元/年), 略逊于红树林 (0.1 亿元/年), 高于海草床 (0.02 亿元/年)^[40]。

与红树林等蓝碳生态系统不同, 作为海洋农业的重要组成, 栽培海藻产业的主要目标是获得产品, 应用于食品、化工和医药等多个领域, 在确保粮食安全及现有应用领域健康发展的基础上, 最大限度地发挥其碳汇经济价值是我们所期待的。本研究显示, 2021 年我国栽培海藻碳汇总经济价值中, 储碳价值 1.8 亿元、释氧价值 9.3 亿元、净化价值 1.6 亿元, 合计 12.7 亿元, 带来了可观的生态效益, 也彰显了未来栽培海藻业健康可持续发展的重要意义。

目前由于环境恶化和人工开发, 中国约有一半的红树林遭到破坏, 超过 50% 的盐沼面积退化, 海草生态系统的损失率也由 0.9% 飙升到 7%^[40-41], 蓝碳生态系统及其碳汇功能面临着严重威胁, 其保护和修复工作迫在眉睫。在这个关键时刻, 正确认识栽培海藻的碳汇功能, 科学测算碳汇及其经济价值, 将海藻栽培产业纳入碳交易市场, 将有助于提升中国在国际蓝碳行业中的话语权。

3.2 合理调整栽培物种和结构有助于提高栽培海藻碳汇及其总经济价值

不同栽培海藻的总体碳去除能力依次为海带>江蓠>裙带菜>其他(羊栖菜、麒麟菜、石花菜和浒苔的平均值)>紫菜。目前海藻栽培物种和结构主要是靠海藻市场价格和海域环境来调节的。以紫菜行业为例, 因为产品价格高, 所以近年来全国紫菜的栽培面积达到 7 万 hm^2 。紫菜产业是江苏省海洋经济的支柱产业之一, 几乎贡献了海藻产量的全部^[42]。浙江省栽培海藻种类包括紫菜、海带、羊栖菜和浒苔, 以 2021 年为例, 紫菜产量 (66 132 t) 占全部海藻产量 (114 777 t) 的 57.6%^[43]。由于紫菜单位面积产量低, 紫菜碳去除能力是栽培海藻中最低的, 仅为海带的 10%。因此, 虽然产品价值很高, 但是以紫菜主导的栽培海藻碳汇总经济价值总体仍然较低。而对照这两个省份的南北两省, 2021 年, 福建省海藻总产量 1 272 542 t, 其中海带 66.6%, 紫菜 4.6%, 江蓠 24.3%, 羊栖菜 0.5%; 山东省海藻总产量 708 960 t, 其中海带 76.5%, 裙带菜 7.2%, 紫菜 1.8%, 江蓠 7.1%^[43], 分别贡献了 40.7 万 t、21.9 万 t 的海藻碳汇和 199.9 亿元、98.4 亿元的碳汇总经济价值。

可见, 合理配置栽培海藻种类和结构, 有利于提高海藻碳汇及其总经济价值。因此, 可以大力开发接力养殖、间作与轮作等技术, 合理配置不同藻种, 探索更好的海藻栽培模式, 既保证经济收益又创造更多碳汇经济价值。

3.3 养殖效率效应 (EFE) 和养殖面积效应 (AE) 是我国栽培海藻碳汇总经济价值的主要驱动因素

本研究表明, EFE 和 AE 是我国栽培海藻碳汇总经济价值的主要驱动因素。EFE 是各地区海藻栽培技术水平和集约化程度的综合体现。AE 是中国栽培海藻碳汇总经济价值提升的重要保障, 可以从侧面反映各地区栽培海藻相关政策的变化。“十三五”时期, EFE 的驱动作用仍保持较高水平, 而 AE 的驱动作用有所下降。可见, 在资源和环境压力不断增强的背景下, 一味扩增栽培海藻规模以增强碳汇能力并不现实, 仍需进一步提高海藻栽培的技术水平和集约化程度。例如, 通过引进立体化养殖技术、推广贝藻复合生态增养殖技术、实现多营养及养殖种类并存等, 充分利用资源空间, 以提升栽培海藻的养殖效率。

3.4 有关增强栽培海藻碳汇总经济价值的政策性思考

综合而言, 栽培海藻的碳汇总经济价值十分可观, 但是要真正实现这些碳汇总经济价值, 还存在一定的限制。例如, 目前市场上并未形成成熟的海藻碳汇项目交易体系, 这些收益并未体现在海藻养殖单位的账户上。从影响因素分析中也不难看出, 政策面的鼓励和扶持对栽培海藻碳汇总经济价值的实现具有重要作用。因此, 政府应从全局和战略的高度, 深刻理解栽培海藻产业, 尤其是栽培海藻碳汇的发展对促进海洋低碳经济发展、实现“双碳”目标的重大意义。重视栽培海藻碳汇交易的顶层设计, 在已有蓝碳交易试点的基础上, 探索栽培海藻碳汇交易市场的运行机制和模式, 稳步地将栽培海藻碳汇纳入碳交易市场, 实现蓝碳从资源到资产、从资产到资本的转变。建立并完善相关生态补偿机制, 利用税收或者补贴的方式促进蓝碳产业的发展^[44]。

各大海洋科研院校以及生产单位的科研与从业人员应开展广泛合作, 聚焦蓝碳领域关键技术的升级与突破, 加大对栽培海藻碳汇的研究力度,

从学术与实际操作层面扎实推进对海洋生物固碳机制、碳汇核算、碳汇方法学、碳汇项目的开发与交易等领域的深入研讨, 为制定和健全统一的海藻碳汇交易标准提供科学的理论支撑和技术保障。

开发栽培海藻碳汇产业离不开社会公众的支持和参与。相关部门应对栽培海藻碳汇开展全方位、多角度的宣传, 加强社会公众对海藻碳汇的经济价值、社会价值和生态价值的认知。借助广播、电视、报纸、网络以及融媒体等各种平台, 开展栽培海藻碳汇知识及其典型案例的宣传与推广, 让广大人民群众认识到发展海藻碳汇的重要性, 鼓励公众积极投身到海藻栽培产业中去。

4 结论

发展栽培海藻产业是促进生态文明建设和助推实现“双碳”目标的重要途径之一。研究表明, 我国栽培海藻的碳汇潜力不容忽视, 能够创造巨大的经济效益。栽培海藻的碳汇能力及其总经济价值存在一定的种间差异, 可通过合理调整栽培物种和结构来提高海藻碳汇总经济价值。EFE 和 AE 是影响栽培海藻碳汇总经济价值的主要驱动因素。政府部门、科研单位及从业人员和社会公众应重视栽培海藻碳汇等渔业碳汇的功能和价值, 为助力我国沿海地区经济高质量发展、实现“双碳”目标做出更大贡献。

当然, 关于栽培海藻碳汇的争议依然存在, 而且不同栽培海藻的碳汇能力, 尤其是 DOC 和 POC 埋藏碳的测算方法有待进一步修订。基于此, 本研究的测算数据也存在一定局限性。另外, 海藻产品价值在目前标准体系界定的碳汇总经济价值中的占比过高, 随着产品高值化的进展, 该值还会继续增加, 这可能会影响与其他生态碳汇系统的比较。此外, 碳汇价格因时间、交易地点不同而出现较大差异, 也会影响碳汇经济价值的核算。因此, 亟须建立完备、科学、系统的体系以准确地测算栽培海藻碳汇并正确地评估其经济价值, 为促进海藻碳汇成为成熟的蓝碳产品进入碳市场交易奠定基础。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

[1] Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, *et al.* Blue carbon
中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

bon: the role of healthy oceans in binding carbon: a rapid response assessment[M]. Nairobi: United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, www.grida.no, 2009.

- [2] Krause-Jensen D, Lavery P, Serrano O, *et al.* Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the Blue Carbon room[J]. *Biology Letters*, 2018, 14(6): 20180236.
- [3] Krause-Jensen D, Duarte C M. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 737-742.
- [4] Ortega A, Geraldi N R, Alam I, *et al.* Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(9): 748-754.
- [5] Trevathan-Tackett S M, Kelleway J, Macreadie P I, *et al.* Comparison of marine macrophytes for their contributions to blue carbon sequestration[J]. *Ecology*, 2015, 96(11): 3043-3057.
- [6] 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 P, Jiang S, Shi J B. 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 (in Chinese).
- [7] Chopin T, Tacon A G J. Importance of seaweeds and extractive species in global aquaculture production[J]. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2021, 29(2): 139-148.
- [8] Duarte C M, Bruhn A, Krause-Jensen D. A seaweed aquaculture imperative to meet global sustainability targets[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(3): 185-193.
- [9] 唐启升. 碳汇渔业与海水养殖业——一个战略性新兴产业[EB/OL]. (2010-06-28)[2023-02-15]. <http://www.ysfri.ac.cn/info/1108/33806.htm>.
- Tang Q S. Carbon sink fisheries and mariculture—a strategic emerging industry[EB/OL]. (2010-06-28)[2023-02-15]. <http://ysfri.cafs.ac.cn/info/1108/33806.html> (in Chinese).
- [10] 唐启升, 蒋增杰, 毛玉泽. 渔业碳汇与碳汇渔业定义及其相关问题的辨析[J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 1-7.
- Tang Q S, Jiang Z J, Mao Y Z. Clarification on the definitions and its relevant issues of fisheries carbon sink and carbon sink fisheries[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 1-7 (in Chinese).
- [11] 中华人民共和国自然资源部. 养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法 碳储量变化法: HY/T 0305—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic
<https://www.china-fishery.cn>

- of China. Estimation method of maricultural seaweed and bivalve carbon sink—carbon stock variation method: HY/T 0305-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [12] Zhang Y Y, Zhang J H, Liang Y T, *et al.* Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(12): 2097-2107.
- [13] Jiao N, Robinson C, Azam F, *et al.* Mechanisms of microbial carbon sequestration in the ocean—future research directions[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(19): 5285-5306.
- [14] Duarte C M, Wu J, Xiao X, *et al.* Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4: 100.
- [15] 中华人民共和国自然资源部. 海洋碳汇核算方法: HY/T 0349—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Accounting methods for ocean carbon sink: HY/T 0349-2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023 (in Chinese).
- [16] 刘芳明, 刘大海, 郭贞利. 海洋碳汇经济价值核算研究 [J]. *海洋通报*, 2019, 38(1): 8-13,19. Liu F M, Liu D H, Guo Z L. Study on economic value accounting of ocean carbon sink[J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(1): 8-13,19 (in Chinese).
- [17] 温梦瑶. 我国碳交易市场现状与发展趋势 [J]. *中国货币市场*, 2023(4): 71-75. Wen M Y. Status quo and development trend of national carbon emissions trading market [J]. *China Money* 2023(4): 71-75, (in Chinese).
- [18] 范振林, 宋猛, 刘智超. 发展生态碳汇市场助推实现“碳中和”[J]. *中国国土资源经济*, 2021, 34(12): 12-21,69. Fan Z L, Song M, Liu Z C. Development of ecological carbon sink market to achieve "carbon neutrality"[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2021, 34(12): 12-21,69(in Chinese).
- [19] 李明昕, 徐丛春, 王涛, 等. “双碳”目标下我国海洋碳汇交易机制进展、面临的挑战及发展策略 [J]. *科技管理研究*, 2023, 43(4): 193-200. Li M X, Xu C C, Wang T, *et al.* Progress, Challenges and development strategies of China's marine carbon sink trading under the goal of carbon neutrality and emission peak[J]. *Science and Technology Management Research*, 2023, 43(4): 193-200 (in Chinese).
- [20] 余钦明. 福州市渔业碳汇发展潜力分析 [J]. *渔业研究*, 2022, 44(6): 620-628. Yu Q M. Development potential analysis of fishery carbon sink in Fuzhou, Fujian Province[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2022, 44(6): 620-628(in Chinese).
- [21] 张继红, 刘毅, 吴文广, 等. 海洋渔业碳汇项目方法学探究 [J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 151-159. Zhang J H, Liu Y, Wu W G, *et al.* Overview of the marine fishery carbon sink project methodology[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 151-159 (in Chinese).
- [22] 严立文, 黄海军, 陈纪涛, 等. 我国近海藻类养殖的碳汇强度估算 [J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(4): 537-545. Yan L W, Huang H J, Chen J T, *et al.* Estimation of carbon sink capacity of algal mariculture in the coastal areas of China[J]. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(4): 537-545 (in Chinese).
- [23] 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 (in Chinese).
- [24] 叶旺旺, 张麋鸣, 孙恒, 等. 贝藻类养殖碳汇核算与综合温室潜力评估研究进展 [J]. *应用海洋学学报*, 2022, 41(4): 715-723. Ye W W, Zhang M M, Sun H, *et al.* Progress in carbon sequestration estimation and comprehensive warming potential assessment in marine aquaculture of shellfish and seaweed[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2022, 41(4): 715-723 (in Chinese).
- [25] Hu S S, Zou D H, He Q, *et al.* Evaluation for values of ecosystem service functions of cultivated seaweeds in Guangdong province, China[J]. *Algal Research*, 2022, 63: 102657.
- [26] Gao G, Gao L, Jiang M J, *et al.* The potential of seaweed cultivation to achieve carbon neutrality and mitigate deoxygenation and eutrophication[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(1): 014018.
- [27] Chen S W, Xu K, Ji D H, *et al.* Release of dissolved and particulate organic matter by marine macroalgae and its biogeochemical implications[J]. *Algal Research*, 2020, 52: 102096.
- [28] IIGF. 2022 中国碳市场年报 [EB/OL]. (2023-02-14) [2023-02-15]. <http://iigf.cufe.edu.cn/info/1012/6391.html>. IIGF. 2022 China carbon market annual report[EB/OL]. (2023-02-14) [2023-02-15]. <http://m.tanpaifang.com/article/94542.html> (in Chinese).
- [29] 潘文斌, 唐涛, 邓红兵, 等. 湖泊生态系统服务功能评估初探——以湖北保安湖为例 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1315-1318. Pan W B, Tang T, Deng H B, *et al.* Lake ecosystem ser-

- vices and their ecological valuation—a case study of Baoan Lake in Hubei Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1315-1318 (in Chinese).
- [30] 李岩, 付秀梅. 中国大型海藻资源生态价值分析与评估 [J]. *中国渔业经济*, 2015, 33(2): 57-62.
Li Y, Fu X M. Analysis and valuation of ecological value of large macroalgae in China[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2015, 33(2): 57-62 (in Chinese).
- [31] 韩沅刚, 董会忠, 张宏杰, 等. 中国海洋经济圈环境效率时空演变及影响因素 [J]. *世界地理研究*, 2023, 32(3): 89-100.
Han Y G, Dong H Z, Zhang H J, *et al.* Spatiotemporal evolution and influencing factors of environmental efficiency in China's marine economic circle[J]. *World Regional Studies*, 2023, 32(3): 89-100 (in Chinese).
- [32] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [33] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020[R]. Rome: FAO, 2020.
- [34] 杨宇峰, 罗洪添, 王庆, 等. 大型海藻规模栽培是增加海洋碳汇和解决近海环境问题的有效途径 [J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 259-269.
Yang Y F, Luo H T, Wang Q, *et al.* Large-scale cultivation of seaweed is effective approach to increase marine carbon sequestration and solve coastal environmental problems[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 259-269 (in Chinese).
- [35] 李莹, 曾红玲, 王国复, 等. 2019 年中国气候主要特征及主要天气气候事件 [J]. *气象*, 2020, 46(4): 547-555.
Li Y, Zeng H L, Wang G F, *et al.* Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2019[J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(4): 547-555(in Chinese).
- [36] 于佐安, 谢玺, 朱守维, 等. 辽宁省海水养殖贝藻类碳汇能力评估 [J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(3): 382-386.
Yu Z A, Xie X, Zhu S W, *et al.* Potential assessment of carbon sink capacity by bivalves and seaweeds in mariculture in Liaoning Province[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(3): 382-386 (in Chinese).
- [37] 中国海洋信息网. 中国海洋灾害公报 (2009—2021) [EB/OL]. (2022-05-07) [2023-02-15]. <https://www.nmdis.org.cn/hygb/zgbyhjzgb/>.
China Ocean Information Network. Bulletin of China Marine Disaster (2009-2021) [EB/OL]. (2022-05-07) [2023-02-15]. <https://www.nmdis.org.cn/hygb/zgbyhjzgb/> (in Chinese).
- [38] 杨林, 郝新亚, 沈春蕾, 等. 碳中和目标下中国海洋渔业碳汇能力与潜力评估 [J]. *资源科学*, 2022, 44(4): 716-729.
Yang L, Hao X Y, Shen C L, *et al.* Assessment of carbon sink capacity and potential of marine fisheries in China under the carbon neutrality target[J]. *Resources Science*, 2022, 44(4): 716-729 (in Chinese).
- [39] Douvère F. Blue carbon can't wait[J]. *Science*, 2021, 373(6555): 601.
- [40] 朱静. 中国海岸带蓝碳生态系统碳汇能力和经济价值的评估 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Zhu J. Evaluation of carbon sequestration capacity and economic value of blue carbon ecosystems in China's coastal zone[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020 (in Chinese).
- [41] 杨盛昌, 陆文勋, 邹祯, 等. 中国红树林湿地: 分布、种类组成及其保护 [J]. *亚热带植物科学*, 2017, 46(4): 301-310.
Yang S C, Lu W X, Zou Z, *et al.* Mangrove wetlands: distribution, species composition and protection in China[J]. *Subtropical Plant Science*, 2017, 46(4): 301-310 (in Chinese).
- [42] 林辉, 卢霞, 王晓新, 等. 江苏近海紫菜养殖区的空间扩张模式研究 [J]. *海洋通报*, 2021, 40(2): 206-216.
Lin H, Lu X, Wang X X, *et al.* Research on spatial expansion mode of laver farming area in Jiangsu Province[J]. *Marine Science Bulletin*, 2021, 40(2): 206-216 (in Chinese).
- [43] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴 2022[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2022[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022 (in Chinese).
- [44] 邵桂兰, 刘新, 李晨. 海水养殖贝藻类碳汇效率的区域比较研究 [J]. *中国渔业经济*, 2019, 37(2): 35-43.
Shao G L, Liu X, Li C. Regional comparative study on carbon sequestration efficiency of seawater cultured bivalves and seaweeds[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2019, 37(2): 35-43 (in Chinese).

Spatiotemporal differentiation and influencing factors of carbon sink economic value of cultivated seaweeds in China

YU Yueru^{1,2}, YANG Rui^{1,2*}, CHEN Haimin^{1,2}, CHEN Juanjuan^{1,2}, LUO Qijun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Biotechnology of Zhejiang Province, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Since the industrial revolution, the concentration of greenhouse gases in the atmosphere has risen rapidly due to human activities, which has seriously affected the global climate. The development of blue carbon industry has become an essential measure for people to cope with climate change. Cultivated seaweeds carbon sinks are an important component of blue carbon. Based on the data of seaweeds cultivation in eight coastal provinces of China, this research calculates the total economic value of the carbon sink of the cultivated seaweeds, and analyzes its spatiotemporal differentiation characteristics. The LMDI index decomposition method was used to analyze the influencing factors of the total economic value of carbon sink of cultivated seaweeds in China, which provided a reference for the reasonable calculation and evaluation of the economic value of carbon sink of cultivated seaweeds. The results showed that the carbon sink and total economic value of cultivated seaweeds in China showed an overall upward trend from 2009 to 2021, which reached 0.87 million tons and 48.8 billion CNY in 2021, respectively. The carbon sink of different seaweeds from high to low were *Saccharina japonica*, *Gracilaria* spp., *Porphyra* sensu lato, *Undaria pinnatifida*, and others (*Sargassum fusiforme*, *Eucheuma muricatum*, *Gelidium amansii*, and *Ulva prolifera*). The carbon removal capacities per unit area from high to low were *S. japonica*, *G. spp.*, *U. pinnatifida*, others (*S. fusiforme*, *E. muricatum*, *G. amansii*, and *U. prolifera*) and *Porphyra* sensu lato. The total economic value of cultivated seaweeds carbon sinks in Fujian, Shandong, and Liaoning provinces were relatively high, while in other provinces those were relatively low. The culture efficiency effect (EFE) and culture area effect (AE) had a strong driving effect on the total economic value of carbon sinks in cultivated seaweeds. Research had found that the carbon sink potential of cultivated seaweeds in China must be addressed and could create huge economic benefits. The total economic value of cultivated seaweeds could be improved by adjusting the cultivation species and structure reasonably. Suggestions were proposed from the government, the scientific research unites, the industry practitioners and the public. Efforts should be made to enhance the function and value of fishery carbon sink, especially the cultivated seaweeds industries, to promote the high quality development of the fishery industry that contribute to mitigating global climate change, and realize the grand goal of "carbon-peaking and carbon neutrality".

Key words: cultivated seaweeds; carbon sink; economic value; spatiotemporal differentiation; influence factor

Corresponding author: YANG Rui. E-mail: yangrui@nbu.edu.cn

Funding projects: China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-50)