我国海水养殖大型海藻碳汇估算、挑战与增汇策略

刘锋[1]，刘鑫[1]，叶升波[1]，赵艳飞[2]，杨显辉[3]，张翠萍[3]

（1. 中山大学海洋工程与技术学院 广州 510275；2. 广东省农业技术推广中心 广州 510500；
3. 自然资源部南海发展研究院 广州 510300）

摘要：大型海藻具有高效的固碳能力，其碳汇功能是海洋碳汇渔业的重要组成部分。近年来，尤其是随着现代化海洋牧场的快速发展，我国海水养殖大型海藻碳汇备受关注。文章基于《中国渔业统计年鉴》相关数据，分析了 2013—2024 年我国大型海藻养殖现状，估算了沿海重点养殖省份大型海藻的固碳量及其结构时空变化，探讨了全球变化背景下大型海藻碳汇面临的挑战，并提出了增汇策略。结果表明，统计期内我国大型海藻总产量持续上升，由 2013 年的 1.86×10^6 t/a 增加到 2024 年的 3.03×10^6 t/a，增幅达到 62.9%；我国养殖大型海藻的固碳量在 2024 年达到 1.93×10^5 t/a，较 2013 年的 1.17×10^5 t/a 增长 65.0%；从 2013—2024 年主要养殖大型海藻固碳结构来看，海带固碳总量为 1.15×10^6 t，其次为江蓠和紫菜，分别达到 2.94×10^5 t、1.78×10^5 t，全国沿海重点养殖省份大型海藻固碳量存在明显差异。全球变化引发的海洋升温、海洋酸化和近岸富营养化等现象会对海藻碳汇功能产生影响，通过大型海藻栽培、多层级混养、深远海养殖、人工增汇技术等路径，有望提升大型海藻碳汇功能，推动现代化海洋牧场碳汇渔业发展，进而助力我国“双碳”目标的实现。

关键词：大型海藻；固碳量估算；增汇策略；全球变化；海洋牧场

中图分类号：P74 **文献标识码：**A **文章编号：**1005-9857（2026）07-0064-12

Estimation, Challenges and Enhancement Strategies for Carbon Sink of Maricultured Macroalgae in China

LIU Feng[1]，LIU Xin[1]，YE Shengbo[1]，ZHAO Yanfei[2]，YANG Xianhui[3]，ZHANG Cuiping[3]

（1. School of Ocean Engineering and Technology，Sun Yat-sen University，Guangzhou 510275，China；
2. Guangdong Agricultural Technology Extension Center，Guangzhou 510500，China；
3. South China Sea Institute of Development Research，MNR，Guangzhou 510300，China）

Abstract：Macroalgae have efficient carbon sequestration capacity，and their carbon sink function is an important component of marine carbon sink fisheries．In recent years，the carbon sink of maricultured macroalgae in China has attracted considerable attention，particularly with the rapid development of modern marine ranching．Based

收稿日期：2026-05-27；**修订日期：**2026-07-01

基金项目：广东省现代化海洋牧场产业创新技术项目“大型海藻碳汇效价评估与人工增汇技术示范项目”（2024-MR1-001-09）.

作者简介：刘锋，副教授、博士生导师，博士，研究方向为海洋环境监测与预警及海洋牧场等

通信作者：张翠萍，正高级工程师，博士，研究方向为海洋资源修复

on data from the China Fishery Statistical Yearbook, this study analyzes the current status of macroalgal cultivation in China during the period from 2013 to 2024, estimates spatiotemporal variations in amounts and composition of macroalgal carbon sink in key coastal provinces, discusses the challenges faced by macroalgal carbon sink in the context of global change, and proposes macroalgal carbon sink enhancement strategies. The results indicate that total amount of macroalgal production in China has steadily increased from 1.86×10^6 t/a in 2013 to 3.03×10^6 t/a in 2024, with an increase of 62.9%. Correspondingly, the carbon sequestration amount of cultivated macroalgae in China reached 1.93×10^5 t/a in 2024, with an increase of 65.0% compared with 1.17×10^5 t/a in 2013. In terms of carbon sequestration composition of major cultivated macroalgae from 2013 to 2024, the amount of *Saccharina japonica* accounted for the largest proportion with a value of 1.15×10^6 t, followed by *Gracilaria* (2.94×10^5 t) and *Porphyra* (1.78×10^5 t). Some differences in macroalgal carbon sequestration were observed among key coastal provinces nationwide. Global change-induced ocean warming, ocean acidification, and coastal eutrophication affect the carbon sequestration capacity of macroalgae. The following pathways, including macroalgal cultivation, integrated multi-trophic aquaculture, offshore and deep-sea aquaculture, and artificial carbon sink enhancement technology, are expected to enhance macroalgal carbon sequestration capacity, promote the development of carbon sink fisheries in modern marine ranching, and contribute to the achievement of China's "dual carbon" goals.

Keywords: Macroalgae; Estimation of carbon sequestration; Carbon sink enhancement strategies; Global change; Marine ranching

0　引言

海洋是地球上最大的碳库，其碳储量分别是陆地和大气碳库的 10 倍和 50 倍[1-3]。大力推动海洋碳汇发展，是我国实现“双碳”国家重大战略的有效路径。在海洋蓝碳体系中，海洋渔业碳汇是其重要组成部分，尤其是近年来海水贝藻养殖的碳汇作用备受关注[4-7]。大型海藻是一类广泛分布于海洋中的大型藻类，具备较高的初级生产力，在全球光合作用中发挥重要作用，具有高效的固碳能力。据报道，全球大型海藻净初级生产力是红树林、海草床和盐沼总和的 2.36 倍，全球陆架区大型海藻每年固碳可达 7 亿 t[8-11]。

我国大型海藻栽培产量和面积一直稳居世界首位。一方面，栽培大型海藻可以有效缓解富营养化、缺氧或酸化等近海环境问题；另一方面，大型海藻还有食用价值和经济价值，可以作为人类食物、动物饲料、植物肥料及生物医药产品等的加工原料[10,12-13]。因此，国内对大型海藻育种、养殖、生态修复、资源分布与利用和基础机理等方面开展了大量的研究工作[14-16]。在大型海藻碳汇研究方面，一些学者揭示了大型海藻固碳过程、影响因子及固碳机理等[17-21]，有助于阐明大型海藻碳汇功能。此外，评估大型海藻碳汇量对我国大型海藻养殖规划和管理至关重要。海水养殖大型海藻碳汇有多种存在形式，包括存储于海水养殖植物中可以人工从海水中收获和去除的碳（“可移出碳汇”）、以颗粒有机碳和溶解有机碳形式残留在海水中的碳、埋藏在沉积物中的碳等，这些为大型海藻碳汇量计算带来很大的挑战，目前主要是针对海水养殖“可移出碳汇”进行估算[22-24]。在全球变化背景下，海洋环境正发生一系列变化，如海温升高和海洋酸化，势必会影响大型海藻生长[25-29]，进而改变其碳汇作用。因此，评估大型海藻碳汇能力，分析全球海洋环境变化对大型海藻碳汇的潜在影响，探究其碳汇扩增策略，对发展碳汇渔业和助力海洋蓝碳目标实现具有重要的意义。

随着我国对现代化海洋牧场建设的高度重视，2017 年至今，中央一号文件多次提出建设海洋牧场或发展深远海养殖的有关要求，全国沿海地区积

极响应，把现代化海洋牧场作为“海上粮仓”的重要建设内容[30-31]，大型海藻养殖是其中重要的发展方向。因此，在此背景下，开展我国海水养殖大型海藻固碳能力评估，分析沿海主要养殖地区大型海藻的固碳结构，对现代化海洋牧场大型海藻产业发展具有重要的指导意义。此外，本研究针对全球海洋环境变化，分析我国海水养殖大型海藻碳汇面临的挑战，提出我国大型海藻增汇策略，不仅有助于形成应对全球变化的技术路径，而且有助于推动海洋碳汇渔业的发展。

1 研究数据和研究方法

1.1 研究数据

研究采用的数据来源于 2014—2025 年《中国渔业统计年鉴》（以下简称《统计年鉴》），《统计年鉴》采用全国全域属地统计口径，统计范围覆盖全国各类渔业生产经营主体，不含科研试验性渔业生产，数据以自然年度为统计周期，指标核算规则连续统一。本研究从中统计了 2013—2024 年全国及部分沿海省份的海藻海水养殖产量和养殖面积，包括海藻总量和主要养殖海藻品种。其中，在沿海省份方面，选择了《统计年鉴》中大型海藻养殖集中的辽宁、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南 7 个省份；在养殖品种方面，主要选取《统计年鉴》中的海带、裙带菜、紫菜、江蓠、麒麟菜和羊栖菜，一些养殖产量和养殖面积较小的品种（如石花菜和苔菜等）归为其他藻类。

1.2 研究方法

本研究主要针对大型海藻的“可移出碳汇”，采用国家海洋行业标准《海洋碳汇核算方法》（HY/T 0349—2022）进行碳汇能力估算（本研究称为“固碳量”）。通过海藻湿重（海水养殖产量，单位为 t）与海藻碳汇能力的转换公式计算出全国海藻的固碳量和各种类海藻的固碳量，公式如下[32]：

$$C_{\mathrm{map}}=\sum_{i=1}^{n}(P_i^{\mathrm{ma}}\times K_i^{\mathrm{ma}}\times CF_i^{\mathrm{ma}}) \quad (1)$$

式中：C_{map} 为 n 个种类的海藻固碳量之和（t/a）；P_i^{ma} 为第 i 种海藻的湿重（t/a）；K_i^{ma} 为第 i 种海藻湿重与干重之间的转换系数（无量纲）；CF_i^{ma} 为第 i 种海藻干质量下的含碳比率（无量纲）。主要海藻的参数取值依据表 1。

表 1 藻类固碳量核算相关参数参考值[32]

Table 1 Reference parameter values for calculating the amount of algal carbon sequestration

海藻种类	湿重与干重转换系数 /%	质量分数 /%		含碳比率 /%		备注
		软组织	贝壳	软组织	贝壳	
海带	20	100	0	31.20	0	
条斑紫菜	20	100	0	41.96	0	紫菜的相关参数参考条斑紫菜
龙须菜	20	100	0	31.93	0	江蓠的相关参数参考龙须菜
裙带菜	20	100	0	28.81	0	
其他藻类	20	100	0	30.36	0	麒麟菜和羊栖菜的相关参数参考其他藻类

2 研究结果

2.1 我国大型海藻养殖现状

图 1 和图 2 统计了我国海水养殖大型海藻 2013—2024 年产量和面积的变化，图 3 表示主要省份的大型海藻产量的变化。从图中可以看出，全国大型海藻总产量整体呈上升态势，仅在 2022 年出现小幅度下降，由 2013 年的 1.86×10^6 t/a 增加到 2024 年的 3.03×10^6 t/a，增幅达到 62.9%。从海藻养殖品种结构来看，海带是主要养殖品种，自 2013 年以来其产量呈现出增加趋势，2013 年到 2024 年增加幅度达到 82.8%；其他主要养殖品种，包括江蓠、裙带菜、紫菜和羊栖菜等，产量总体上自 2013 年以来呈现出上升趋势，而麒麟菜产量自 2013 年呈现出下降趋势（图 1）。2013—2017 年，全国大型海藻养殖面积呈现出增加趋势（图 2），2017—2022 年

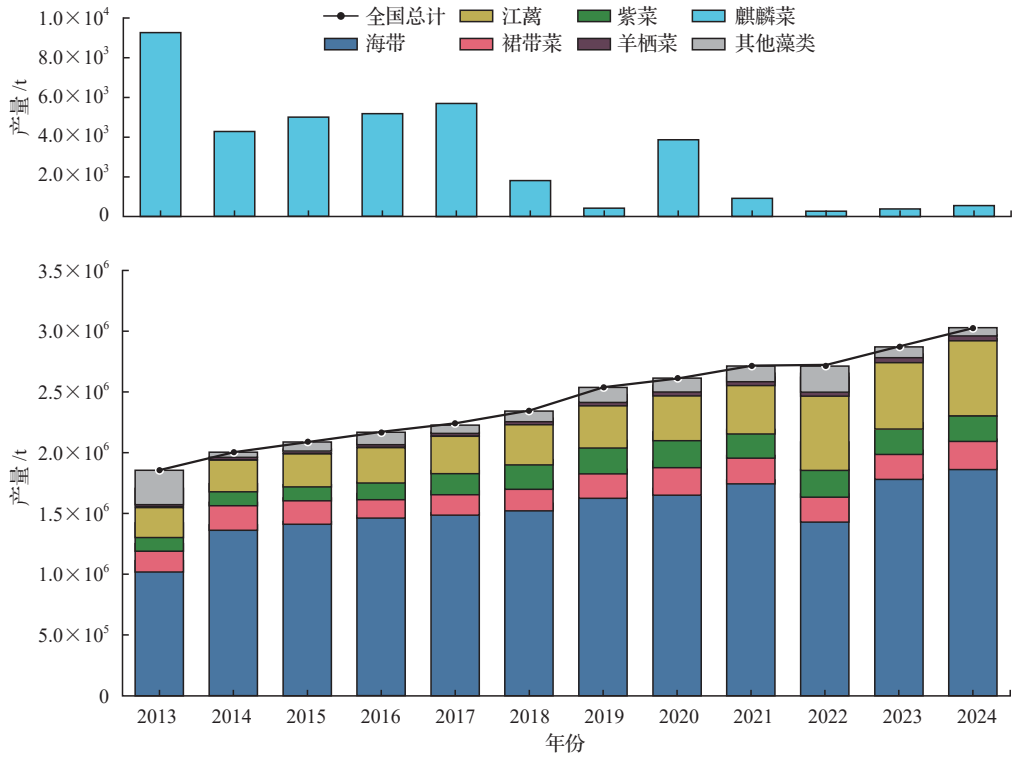

图 1　2013—2024 年全国各种类大型海藻海水养殖产量

Fig.1　Production of macroalgae mariculture by species in China from 2013 to 2024

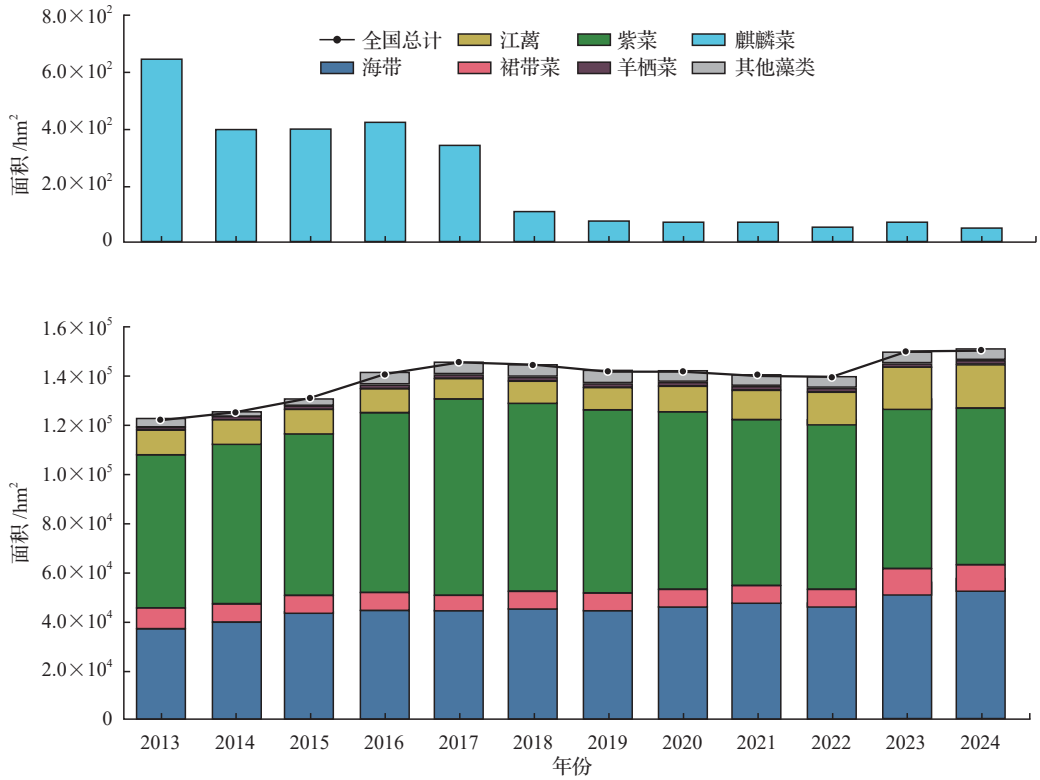

图 2　2013—2024 年全国各种类大型海藻海水养殖面积

Fig.2　Cultivation area of macroalgae mariculture by species in China from 2013 to 2024

不断下降，2023 年又开始增加。这与大型海藻产量持续升高形成对比，可能与近岸环境治理和其他产业发展挤占养殖空间、养殖密度不断增大等有关[24]。从各主要养殖品种的养殖面积来看，紫菜的养殖面积最大，2013—2017 年呈现出增加趋势，但之后减少；其他主要养殖品种养殖面积总体上呈现出上升趋势，麒麟菜的养殖面积呈下降趋势（图 2）。由此可见，我国大型海藻养殖总体上呈现出增加趋势，养殖结构也相对稳定。

从全国各省海藻养殖产量来看，福建是全国海藻养殖的主要区域，统计期内年均产量达到 1.13×10^6 t/a，占比 47.3%；其次为山东、辽宁，分别为 28.5%、17.4%；广东占比为 2.9%。自 2013 年以来，福建、山东、辽宁和浙江等省份的海藻养殖产量呈现出上升趋势，而广东、江苏和海南等省份的海藻养殖产量则呈现出下降趋势（图 3）。

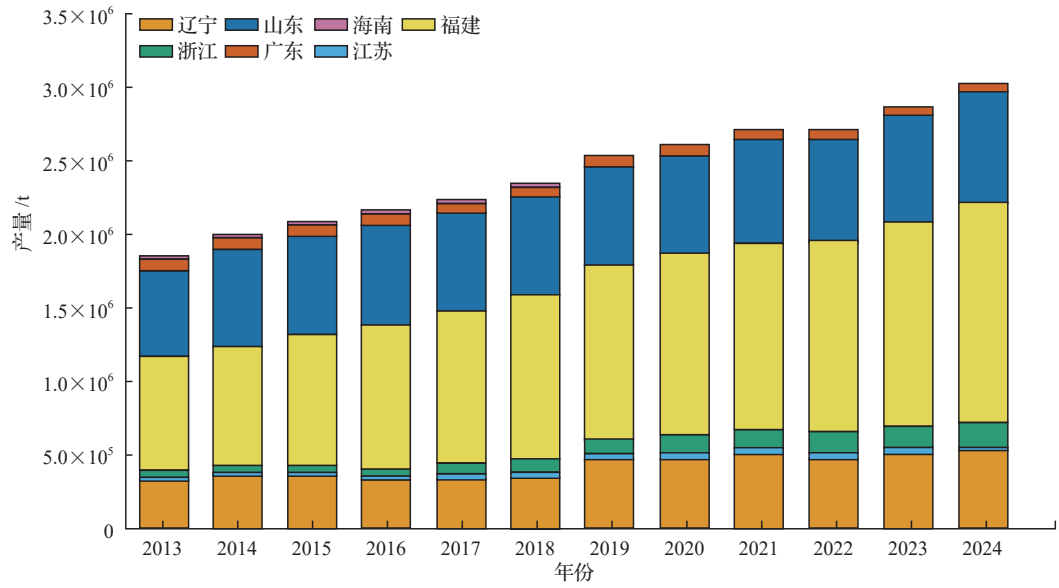

图 3 2013—2024 年全国沿海省份大型海藻海水养殖产量

Fig.3 Macroalgae mariculture production in coastal provinces of China from 2013 to 2024

2.2 我国海水养殖大型海藻固碳量估算

2.2.1 大型海藻碳汇作用

作为海洋中重要的初级生产者，大型海藻的碳汇作用主要体现在固碳和储碳[33-35]两个方面。固碳作用是指通过光合作用将二氧化碳、碳酸盐等无机碳转化为有机碳。所固定的有机碳主要以生物量以及输出的溶解有机碳和颗粒有机碳等形式存在。其中，在输出的有机碳中，溶解有机碳和颗粒有机碳占比分别为 52%、48%[20,33]。储碳作用则是指将参与全球循环的有机碳或无机碳长期封存在海洋中，使其不再参与碳循环的过程。大型海藻具有非常强的碳封存能力。据报道，大型海藻的碳封存量高达 1.73×10^8 t/a，其封存位置不仅包括栖息地，大部分还被封存在深海区域，占比可达 90%[36-37]。由此可见，大型海藻碳汇是蓝碳体系的重要组成部分，发展和准确估算大型海藻养殖碳汇对实现海洋负排放具有重要的意义。如前所述，本研究主要针对储于海水养殖大型海藻中可从海水中收获和去除的碳进行估算。

2.2.2 大型海藻固碳量估算

依据我国大型海藻养殖统计数据，估算了我国海水养殖大型海藻固碳量，结果如图 4 和图 5 所示。2013 年，我国海水养殖大型海藻固碳量为 1.17×10^5 t/a，其中，海带、裙带菜、紫菜、江蓠、麒麟菜和羊栖菜 6 种主要养殖大型海藻固碳量为 1.00×10^5 t/a。此后，随着大型海藻养殖产量和面积的变化，大型海藻固碳量除 2022 年略有波动下降外，其他年份呈现出上

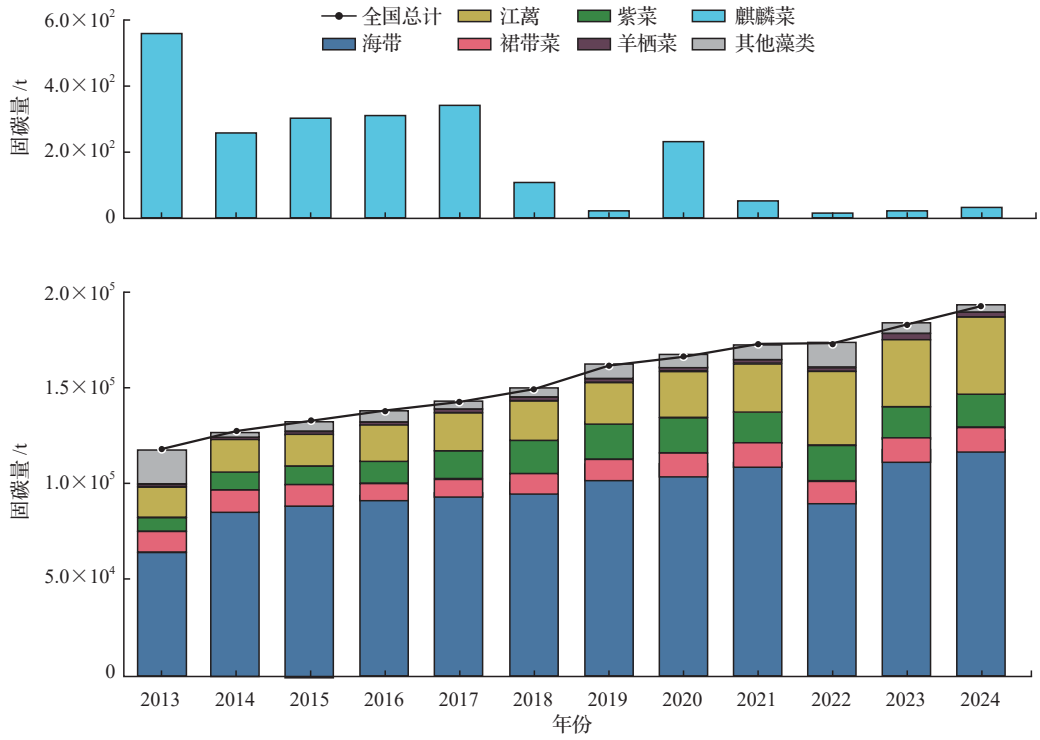

图 4　2013—2024 年全国各种类大型海藻固碳量估算

Fig.4　Estimated macroalgae carbon sequestration by species in China from 2013 to 2024

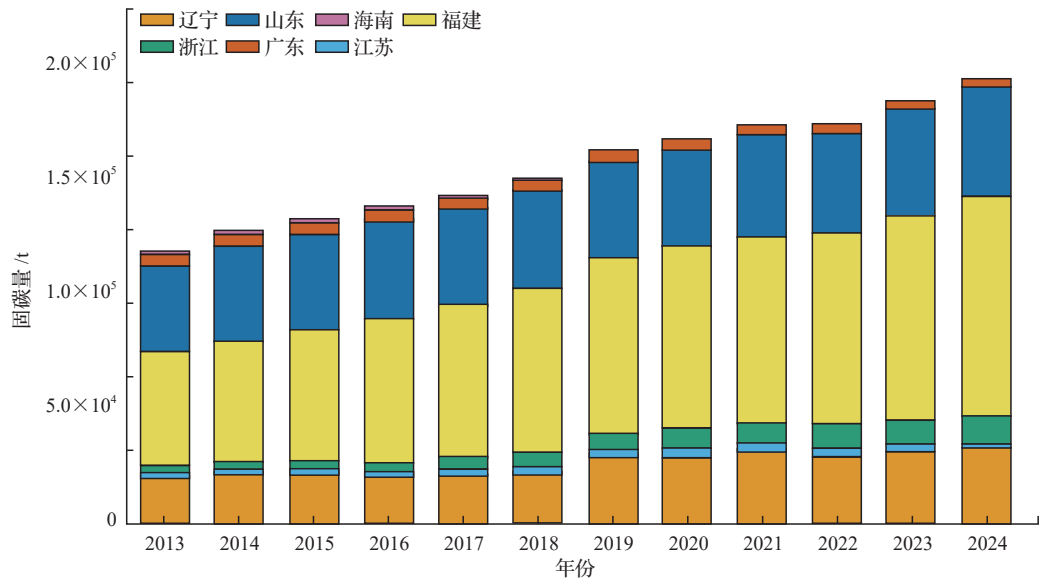

图 5　2013—2024 年全国沿海省份大型海藻固碳量估算

Fig.5　Estimated macroalgae carbon sequestration in coastal provinces of China from 2013 to 2024

升趋势，到 2024 年我国养殖大型海藻固碳量达到 1.93×10^5 t/a，较 2013 年增长 65.0 %。从 2013—2024 年主要养殖大型海藻固碳量组成来看，海带固碳总量为 1.15×10^6 t，其次为江蓠和紫菜，分别达到 2.94×10^5 t 和 1.78×10^5 t。从 2013—2024 年主要 6 种养殖大型海藻固碳量变化来看，海带固碳量除了 2022 年有所下降外，其他年份均呈现出增加趋势，增幅达到 82.8 %；裙带菜、紫菜、江蓠、羊栖菜等

海藻固碳量呈现上升趋势；麒麟菜固碳量随其产量下降而呈现出减少趋势。

对于各省份来说，养殖大型海藻的固碳量与大型海藻产量密切相关，其中，辽宁、福建和山东等省海带固碳量占优，江苏、浙江和广东等省紫菜固碳量占优。从各省份海藻固碳量来看，福建由于大型海藻产量最高，其固碳量也最大，并且 2013—2024 年固碳量逐年增加。对于广东来说，2013 年大型海藻固碳量为 5 027 t，到 2019 年维持在 5 007 t，随后持续降低，到 2024 年为 3 468 t。由此可见，我国大型海藻固碳能力相当可观，虽总体产量呈现出升高趋势，但各省份由于海藻产量差异而有所不同。

3 讨论

3.1 我国沿海大型海藻固碳量空间分布差异

不同藻类的固碳能力存在差异。如表 1 所示，海带、紫菜、江蓠及裙带菜等的含碳率各不相同，其中海带为 31.20%、裙带菜为 28.81%，表明不同大型海藻物种的固碳潜力存在显著差异。然而，我国沿海主要养殖省份大型海藻固碳量时空变化的主要驱动因素是大型海藻养殖产量及养殖结构的差异。我国海水养殖大型海藻产量持续增加，主要与育种和养殖技术提升、市场需求增长以及优惠政策扶持等有关[38]；一些省份出现波动，可能与海域环境退化导致养殖受影响有关[24]。此外，通过以上分析可知，我国大型海藻产量在南方、北方存在显著的空间差异，这与南方、北方养殖品种、海域环境和养殖模式等差异有关。一方面，从我国大型海藻养殖产量结构来看，海带占比最大，其次为江蓠、裙带菜等；海带和裙带菜属于温带冷水褐藻，适宜在北方海域生长；南方则主要养殖紫菜、江蓠和麒麟菜等暖水藻类，其单产、生物量均低于海带。另一方面，北方大型海藻养殖尤其是海带养殖产业具有明显优势，产业链较完整，养殖成规模，而广东和海南优先发展海水鱼类、虾贝类养殖，尚未形成规模化效应。

3.2 全球变化背景下海藻碳汇面临的挑战

我国海水养殖大型海藻的碳汇作用不仅与海藻种群和生态群落的组成有关（图 4），还受光照、温度、营养盐等环境因素和生态系统反馈的影响[20,24,39]。因此，在全球变化背景下，全球海洋环境正经历着一系列显著变化，包括海洋升温、海洋酸化和海洋富营养化等，这些变化会对海藻的碳汇作用产生影响，其碳汇功能正面临着一系列挑战。下文将围绕不同环境因子对大型海藻碳汇的影响展开分析，以期为未来碳汇渔业的科学研究和政策管理提供参考。

全球海洋水温升高，尤其是海洋热浪事件频发且强度加剧，给海洋生态系统的健康安全带来严峻挑战。据相关报道，海洋热浪正在重塑全球海洋浮游植物的体型格局[40]。温度是影响海藻光合作用和有机碳降解的重要因素，在适宜范围内海洋温度升高，会增强代谢酶活性，提升固碳效率；一旦超过耐受阈值，海藻的光合器官将受到损伤，导致固碳能力下降[20,41]。由此可见，海洋热浪势必对海藻碳汇功能产生影响，这是我国海洋碳汇渔业面临的一项挑战，海洋热浪对全球海藻碳汇的影响已然成为海洋渔业研究的热点。

大气中二氧化碳浓度的增加不仅造成全球变暖，而且驱动了全球海洋酸化。在过去的 100 年间，全球海洋表层海水的 pH 下降了 0.1，氢离子浓度增加了 30%，对海洋生态系统和生物群落产生了深远影响[8,42]。虽然海藻养殖具有缓解海洋酸化的功能，但不同大型海藻对 pH 变化的响应存在差异，表现在不同大型海藻对 pH 的耐受能力不同。同时，不同大型海藻对二氧化碳的亲和力不同，不同种类大型海藻的光合固碳能力也有较大的差别[8,43-44]，如江蓠属 *Gracilaria gaditana* 的光合能力升高，而紫菜属 *Porphyra leucosticta* 的光合能力未发生明显变化[45-46]。因此，海洋酸化对大型海藻的影响呈现种间异质性，未来亟待开展海洋酸化对我国不同种类大型海藻碳汇功能影响的研究。

我国近海富营养化特征显著，对大型海藻的光合作用、生态系统和群落结构产生影响[47]。其对碳汇的影响主要体现在以下方面：①富营养化可以降低水体光照强度，进而降低大型海藻的光合固碳量；②富营养化会改变水体中营养盐结构，如氮磷比，据研究该比例对海藻吸收营养盐的能力具有显著的影响，进而影响海藻的生产力和固碳量[48]，又如在高氮高磷条件下，龙须菜（*Gracilaria lemaneiformis*）的生

长和光合无机碳利用能力比在低氮低磷、低氮高磷、高氮低磷等条件下更高[49]；氮、磷加富培养使坛紫菜营养成分中粗蛋白和灰分含量显著增加[50]。因此，尽管海水养殖大型海藻有利于缓解近海富营养化[4]，但不同类型的富营养化也会对其碳汇功能产生影响。因此，有必要依据海水养殖环境筛选适宜的大型海藻养殖种类。

3.3　大型海藻增汇策略

从我国大型海藻固碳量估算来看，其碳汇功能显著，但全球海洋环境变化又对其固碳能力产生影响，如何开展大型海藻增汇是目前海洋碳汇渔业研究的热点问题。对海洋渔业碳汇及其增汇途径，唐启升等[5]于2016年提出了大力发展以海水养殖为主体的碳汇渔业，实施相应的渔业碳汇扩增工程建设，为海水渔业增汇提出了有效的对策及建议。作为海洋碳汇渔业的重要组成部分，大型海藻增汇可以采取以下策略。

（1）优化大型海藻栽培技术。从本研究统计期内的我国大型海藻产量变化来看，海藻产业快速发展，主要依赖于规模扩张，但同时面临着良种覆盖率低和品种退化的问题[51]。因此，应开展大型海藻育种技术研究，筛选性状优良、固碳效率高的品种进行培育；另外，在栽培过程中，应对海域空间进行合理规划，控制养殖密度，探索高产养殖方式，形成大型海藻集约化养殖模式，并推动大型海藻栽培由劳动密集型产业向自动化、智能化方向发展，提升大型海藻养殖产量和固碳效率。

（2）推广多营养层级养殖技术。多营养层级养殖技术是一种可持续的养殖实践，通过在相近的养殖区域中，按照适当比例组合投饵养殖物种（如鱼类、虾类）、有机提取养殖物种（如贝类）和无机提取养殖物种（如大型海藻）等不同营养级生物，构建适度均衡、循环自净的人工生态系统。该模式已在世界多个地区成功应用。例如，在加拿大新不伦瑞克省的芬迪湾，大西洋鲑鱼与蓝贻贝和海带联合养殖，多年试验表明，贻贝可有效地过滤和消耗鲑鱼网箱产生的颗粒废物，海藻则能吸收鱼类排放的溶解营养物质[52]；在我国辽宁大连，主要以“筏式贝 - 藻”和“底播贝 - 参 - 藻”立体复合模式为主，有效地提高了单位水体的承载力和综合经济效益[53]。该模式不仅可以改善生态环境，还可以提升固碳效率，据报道，贝藻混养模式可比各自单养更高效地吸收和利用二氧化碳[37]。因此，开展大型海藻多层级养殖模式研究，探索不同品种混养比例，可以提升海藻固碳效率，推动碳汇渔业发展。

（3）发展深远海养殖技术。随着全球人口的持续增长和对优质蛋白需求的不断攀升，传统的近岸和浅海养殖空间已日趋饱和，向深远海空间拓展成为有效的解决方案[54]。深远海养殖的核心在于其装备技术，我国持续开展深远海养殖装备技术攻坚和研发，有力地支撑了深远海养殖[55]。然而，深远海养殖面临着复杂海况、高成本和养殖安全等方面的挑战，需要探索大型海藻深远海养殖技术，包括育种技术（选育抗风浪强的品种）、装备技术，以及鱼贝类的多层级混养模式等，研发大型海藻养殖的新工艺，并推动养殖向机械化、自动化和智能化方向发展。

（4）探索人工增汇技术。目前报道比较多的是人工上升流技术，通过在海洋中放置人工系统，形成上升流，将海洋底部富营养盐海水输送到海面，为浮游植物和海藻生长提供“饵料”，有效增加初级生产力，达到海藻增产增汇的效果。在实施过程中，可以选择合适海域进行试点，开展长期动态监测，综合评估该技术的增汇效果和对海洋环境的影响，以完善该技术方案。

3.4　对现代化海洋牧场发展的指导意义

国家高度重视现代化海洋牧场发展，全国沿海省份积极响应国家号召，大力推进现代化海洋牧场建设，不断推动传统渔业转型升级。如 2019—2021 年，山东省加强海洋牧场创新发展，在全国率先开展现代化海洋牧场建设综合试点[31]；广东省则出台了《广东省现代化海洋牧场发展总体规划（2024—2035 年）》，科学指导全省现代化海洋牧场建设。大型海藻养殖不仅能净化海洋环境、改善近海海洋富营养化状况，还是碳汇渔业的重要组成部分。因此，发展大型海藻养殖是现代化海洋牧场建设的重要内容。《广东省现代化海洋牧场发展总体规划（2024—2035 年）》明确提出，“发展以贝藻养殖为主的碳汇渔业”“优选固碳速率高的海水贝藻养殖品种”等。

在此背景下，近年来我国大型海藻产量持续增加，其固碳量不断升高，但同时面临着全球海洋环境变化带来的挑战。因此，从本研究结果出发，发展以大型海藻养殖碳汇渔业为重要内容的现代化海洋牧场建设，可以从以下方面深化研究：①开展全球海洋环境变化对大型海藻生长和固碳能力等方面影响过程和机理的研究工作，评估海洋环境变化对大型海藻碳汇带来的差异效应，为制定不同海域适应未来海洋环境的养殖模式、研发育种技术提供科学依据；②进行大型海藻增汇技术试点建设，对大型海藻养殖环境、生长速率及碳汇等方面进行立体化监测，研究固碳速率、碳汇过程和机理等，以评估不同技术的增汇效果及生态风险，探寻不同增汇策略的适用情况，以更好地优化大型海藻增汇策略；③本研究主要参考相关规范和既有文献，采用含碳比和干湿重转换方法评估大型海藻碳汇能力，由于上述参数存在属种个体差异，各藻类干重碳含量存在变化范围，如海带为 23.36%～31.20%、裙带菜为 27.39%～30.00%[56]，估算方法存在一定的误差，并且水体中还存在颗粒物和溶解碳以及埋藏碳等。因此，亟须构建完善的大型海藻碳汇评估体系，科学核算大型海藻固碳量，为后续建立碳汇交易机制、推动海洋牧场碳汇交易提供技术支撑。

4 结论

本研究分析了 2013—2024 年我国大型海藻海水养殖现状，评估了全国养殖大型海藻固碳量及碳汇结构的时空演化。从研究结果来看，自 2013 年以来我国养殖大型海藻固碳量随其产量增加呈升高趋势，大型海藻固碳量从 2013 年的 1.17×10^5 t/a 增加到 2024 年的 1.93×10^5 t/a，增长 65%；从碳汇结构来看，统计期内海带固碳总量最高，为 1.15×10^6 t；其次为江蓠和紫菜，分别达到 2.94×10^5 t 和 1.78×10^5 t。对我国沿海主要养殖省份来讲，福建、辽宁和山东等省的海带固碳能力占优，江苏、浙江和广东等省的紫菜固碳能力占优，这与不同大型海藻生活习性和养殖模式等相关。在全球变化背景下，海洋环境正面临着温度升高、酸化和富营养化等威胁，大型海藻养殖有助于缓解海洋酸化、富营养化等海洋问题，但其碳汇功能也会受到影响，并且不同大型海藻种属的碳汇作用对海洋环境变化的响应存在差异。因此，开展全球变化背景下大型海藻固碳能力及增汇技术研究是我国碳汇渔业发展的重要方向。在现代化海洋牧场建设中，可开展大型海藻增汇技术试点建设，筛选大型海藻与贝类混养，形成多营养层级模式，进行大型海藻深远海养殖试验，采用人工增汇技术，为大型海藻扩增碳汇，以评估不同技术的适用情况、增汇效果和生态风险等。此外，未来亟须构建大型海藻碳汇评估体系和标准，探索大型海藻碳汇市场交易，建立交易机制，推动海洋碳汇渔业与可持续海水养殖协同发展，助力我国“双碳”目标的实施。

参考文献（References）：

[1] Friedlingstein P，O’Sullivan M，Jones M W，et al. Global carbon budget 2020[J]. Earth System Science Data，2020，12(4)：3269-3340.

[2] 沈宏琛，刘纪化. 海水养殖环境碳汇机制分析[J]. 海洋开发与管理，2022，39(7)：41-46.
Shen Hongchen，Liu Jihua. Systematic development of mariculture environmental carbon sinks to support the national strategy of carbon neutrality[J]. Ocean Development and Management，2022，39(7)：41-46.

[3] Lee C H，Subhas A V，Kim J H，et al. Ocean carbon dioxide removal and storage[J]. Chemical Reviews，2026，126(2)：1110-1144.

[4] 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 Yufeng，Luo Hongtian，Wang Qing，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.

[5] 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 Qisheng，Liu Hui. Strategy for carbon sink and its amplification in marine fisheries[J]. Engineering Sciences，2016，18(3)：

68-73.

[6] Zhong Chongming, Li Tangcheng, Bi Ran, et al. A systematic overview, trends and global perspectives on blue carbon: a bibliometric study(2003–2021)[J]. Ecological Indicators, 2023, 148: 110063.

[7] Gao Guang, Beardall J, Jin Peng, et al. A review of existing and potential blue carbon contributions to climate change mitigation in the Anthropocene[J]. Journal of Applied Ecology, 2022, 59(7): 1686-1699.

[8] 何培民，刘媛媛，张建伟，等. 大型海藻碳汇效应研究进展[J]. 中国水产科学，2015，22(3)：588-595.
He Peimin, Liu Yuanyuan, Zhang Jianwei, et al. Research progress on the effects of macroalgae on carbon sink[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(3): 588-595.

[9] Alpert S B, Spencer D F, Hidy G. Biospheric options for mitigating atmospheric carbon dioxide levels[J]. Energy Conversion and Management, 1992, 33(5/6/7/8): 729-736.

[10] 白泽文，刘正一，赵燕，等. 大型海藻在蓝碳中的作用及研究进展[J]. 海洋湖沼通报（中英文），2025，47(2)：193-201.
Bai Zewen, Liu Zhengyi, Zhao Yan, et al. Roles and research progresses of macroalgae in blue carbon[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2025, 47(2): 193-201.

[11] 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.

[12] 权伟，应苗苗，康华靖，等. 中国近海海藻养殖及碳汇强度估算[J]. 水产学报，2014，38(4)：510-515.
Quan Wei, Ying Miaomiao, Kang Huajing, et al. Marine algae culture and the estimation of carbon sink capacity in the coastal areas of China[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(4): 510-515.

[13] Duarte C M, Wu Jiaping, Xiao Xi, et al. Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation?[J]. Frontiers in Marine Science, 2017, 4: 100.

[14] 刘福利，牛建峰，隋正红，等. 中国经济海藻养殖技术概况与展望[J]. 中国农业科技导报，2020，22(12)：1-9.
Liu Fuli, Niu Jianfeng, Sui Zhenghong, et al. Overview and prospects of China economic seaweed cultivation technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(12): 1-9.

[15] 章守宇，刘书荣，周曦杰，等. 大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨[J]. 水产学报，2019，43(9)：2004-2014.
Zhang Shouyu, Liu Shurong, Zhou Xijie, et al. Ecological function of seaweed-formed habitat and discussion of its application to sea ranching[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 2004-2014.

[16] 张剑，徐步欣，郎尚昆，等. 海南文昌沿岸大型海藻资源变化及影响因素分析[J]. 海洋湖沼通报，2022，44(3)：129-138.
Zhang Jian, Xu Buxin, Lang Shangkun, et al. Resource changes of macroalgae and analysis of their influencing factors in Wenchang coast of Hainan province[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(3): 129-138.

[17] Zheng Peng, Chu Tianrang, Zhao Wei, et al. Research on carbon sink effect of marine shellfish and algae in China[J]. Fishes, 2025, 10(6): 270.

[18] 徐一凡，刘焕平，杨宇峰，等. 大型海藻江蓠 (Gracilaria) 栽培碳汇潜力评估及甲烷减排情景分析[J]. 中国科学：地球科学，2023，53(5)：1039-1056.
Xu Yifan, Liu Huanping, Yang Yufeng, et al. Assessment of carbon sink potential and methane reduction scenarios of marine macroalgae (Gracilaria) cultivation[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023, 53(5): 1039-1056.

[19] Li Hongmei, Zhang Zenghu, Xiong Tianqi, et al. Carbon sequestration in the form of recalcitrant dissolved organic carbon in a seaweed (kelp) farming environment[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(12): 9112-9122.

[20] 李瑞帆，钟晨辉，郑盛华，等. 大型海藻碳汇：固碳机理、评估方法与环境因子影响[J]. 渔业研究，2026，48(1)：119-133.
Li Ruifan, Zhong Chenhui, Zheng Shenghua, et al. Mechanism, assessment methods and environmental factors influence in carbon sink of macroalgae: a review[J]. Journal of Fisheries Research, 2026, 48(1): 119-133.

[21] Lian Yushun, Wang Rui, Zheng Jinhai, et al. Carbon sequestration assessment and analysis in the whole life cycle of seaweed[J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(7): 074013.

[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 Liwen, Huang Haijun, Chen Jitao, 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.

[23] 辛荣玉，张明亮，刘继晨，等. 山东省海水养殖贝藻类碳汇能力评估[J]. 海洋渔业，2026，48(1)：86-94.

Xin Rongyu，Zhang Mingliang，Liu Jichen，et al. Assessment of carbon sequestration capacity of marine aquaculture shellfish and algae in Shandong province[J]. Marine Fisheries，2026，48(1)：86-94.

[24] 刘志强，梁桂珠，王皓，等. 中国海藻养殖的碳汇及环境效益分析[J]. 中国生态农业学报（中英文），2024，32(9)：1578-1591.
Liu Zhiqiang，Liang Guizhu，Wang Hao，et al. Carbon sink and environmental benefit analysis of seaweed cultivation in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese and English)，2024，32(9)：1578-1591.

[25] 高光，冯媛. 海藻对海洋热浪的生理生态学响应：进展与展望[J]. 厦门大学学报（自然科学版），2023，62(3)：338-355.
Gao Guang，Feng Yuan. Physiological and ecological responses of algae to marine heatwaves：progresses and prospects[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science)，2023，62(3)：338-355.

[26] Kroeker K J，Kordas R L，Crim R，et al. Impacts of ocean acidification on marine organisms：quantifying sensitivities and interaction with warming[J]. Global Change Biology，2013，19(6)：1884-1896.

[27] Ji Yan，Xu Zhiguang，Zou Dinghui，et al. Ecophysiological responses of marine macroalgae to climate change factors[J]. Journal of Applied Phycology，2016，28(5)：2953-2967.

[28] Eswar I，Majumder A，Raja mohamed S H，et al. Seaweed responses to ocean acidification：global impacts on growth，biochemical composition，and CO_2 mitigation potential[J]. Discover Oceans，2025，2(1)：19.

[29] Werner F J，Graiff A，Matthiessen B. Even moderate nutrient enrichment negatively adds up to global climate change effects on a habitat-forming seaweed system：additive effects of local and global stressors[J]. Limnology and Oceanography，2016，61(5)：1891-1899.

[30] 杨红生，章守宇，张秀梅，等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. 水产学报，2019，43(4)：1255-1262.
Yang Hongsheng，Zhang Shouyu，Zhang Xiumei，et al. Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China[J]. Journal of Fisheries of China，2019，43(4)：1255-1262.

[31] 孙利元，管剑峰，杨剑，等. 现代化海洋牧场建设的“山东经验”[J]. 中国水产，2024(6)：71-73.
Sun Liyuan，Guan Jianfeng，Yang Jian，et al. “Shandong experience” of modern marine pasture construction[J]. China Fisheries，2024(6)：71-73.

[32] HY/T 0349—2022 海洋碳汇核算方法[S].
HY/T 0349—2022 Accounting methods for ocean carbon sink[S].

[33] 杨宇峰，邹立功，贺志理，等. 大型海藻负排放理论技术研究与应用展望[J]. 热带海洋学报，2024，43(6)：27-36.
Yang Yufeng，Zou Ligong，He Zhili，et al. A prospectus for the theory，technology and application of seaweed negative emissions[J]. Journal of Tropical Oceanography，2024，43(6)：27-36.

[34] Kim K Y. Harnessing seaweed farming for climate mitigation in South Korea：evaluating carbon dioxide removal potential and future research directions[J]. Algae，2024，39(4)：329-347.

[35] Li Hongmei，Feng Xiuting，Xiong Tianqi，et al. Particulate organic carbon released during macroalgal growth has significant carbon sequestration potential in the ocean[J]. Environmental Science & Technology，2023，57(48)：19723-19731.

[36] Krause-Jensen D，Duarte C M. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration[J]. Nature Geoscience，2016，9(10)：737-742.

[37] 胡田，苏洁，邵魁双，等. 贝藻养殖碳汇过程、机制与增汇模式研究进展[J]. 水产科技情报，2024，51(3)：194-200.
Hu Tian，Su Jie，Shao Kuishuang，et al. Research progress on carbon sequestration process，mechanism and sequestration mode of shellfish and algae culture[J]. Fisheries Science & Technology Information，2024，51(3)：194-200.

[38] 刘修锦，潘哲，周凯，等. 1990—2023 年我国海水养殖贝藻类可移出碳汇能力评估[J]. 海洋环境科学，2025，44(6)：869-875.
Liu Xiujin，Pan Zhe，Zhou Kai，et al. Assessment of the removable carbon sequestration capacity of shellfish and macroalgae aquaculture in China from 1990 to 2023[J]. Marine Environmental Science，2025，44(6)：869-875.

[39] 冯秀婷，李鸿妹，张继红，等. 近海大型海藻养殖被严重低估的重要碳汇形式：惰性溶解有机碳[J]. 中国科学：地球科学，2025，55(5)：1474-1483.
Feng Xiuting，Li Hongmei，Zhang Jihong，et al. Neglecting recalcitrant DOC would lead to serious underestimation of seaweed farming’s contribution to ocean carbon sequestration[J]. Scientia Sinica(Terrae)，2025，55(5)：1474-1483.

[40] Zhan Weikang，Zhang Ying，He Qingyou，et al. Global responses of phytoplankton size structure to marine heatwaves[J]. Global Biogeochemical Cycles，2026，40：e2025GB008854.

[41] 彭承祥，孙林，孙晨晨，等. 环境变化对海藻场碳汇能力的影响[J]. 天津科技，2024，51(2)：45-50.

Peng Chengxiang，Sun Lin，Sun Chenchen，et al. Effects of environmental changes on capacity of carbon sequestration in seaweed farms[J]. Tianjin Science & Technology，2024，51(2)：45-50.

[42] 谭红建，蔡榕硕，杜建国，等. 气候变化与海洋生态系统：影响、适应和脆弱性：IPCC AR6 WG Ⅱ报告之解读[J]. 大气科学学报，2022，45(4)：489-501.
Tan Hongjian，Cai Rongshuo，Du Jianguo，et al. Climate change and marine ecosystems：impacts，adaptation，and vulnerability[J]. Transactions of Atmospheric Sciences，2022，45(4)：489-501.

[43] Leal P P，Uribe D，Henríquez-Antipa L A，et al. Evaluating the ability of macroalgae to create a chemical refuge for bivalves under ocean acidification conditions in closed-environment experiments[J]. Journal of Applied Phycology，2024，36(3)：1561-1575.

[44] 刘雅静，席天乐，梁成伟，等. 海洋酸化对藻类生态学效应及作用机制的研究进展[J]. 生态毒理学报，2024，19(1)：1-16.
Liu Yajing，Xi Tianle，Liang Chengwei，et al. Research progress on ecological effects and mechanism of ocean acidification on algae[J]. Asian Journal of Ecotoxicology，2024，19(1)：1-16.

[45] Andria J R，Vergara J J，Perez-Llorens J L. Biochemical responses and photosynthetic performance of *Gracilaria* sp. (Rhodophyta) from Cádiz，Spain，cultured under different inorganic carbon and nitrogen levels[J]. European Journal of Phycology，1999，34(5)：497-504.

[46] Mercado J M，Javier F，Gordillo L，et al. Effects of different levels of CO_2 on photosynthesis and cell components of the red alga *Porphyra leucosticta*[J]. Journal of Applied Phycology，1999，11(5)：455-461.

[47] 周微，郭雪飞，雷仕泽，等. 海洋负排放技术及其生态治理功能前瞻[J]. 海洋开发与管理，2024，41(2)：15-27.
Zhou Wei，Guo Xuefei，Lei Shize，et al. The prospect of ocean negative carbon emission technologies on the ecological improvement[J]. Ocean Development and Management，2024，41(2)：15-27.

[48] 傅荣兵，夏枫峰，张平平，等. 环境因素对 2 种代表性海藻的生长及碳汇效果影响研究[J]. 浙江海洋大学学报（自然科学版），2023，42(3)：255-260.
Fu Rongbing，Xia Fengfeng，Zhang Pingping，et al. Impact of environment parameters to the growth and carbon sink of two types of algal[J]. Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science)，2023，42(3)：255-260.

[49] 李枫，邹定辉，刘兆普，等. 氮磷水平对龙须菜生长和光合特性的影响[J]. 植物生态学报，2009，33(6)：1140-1147.
Li Feng，Zou Dinghui，Liu Zhaopu，et al. Effects of nitrogen and phosphorous levels on growth and photosynthetic traits of gracilaria lemaneiformis (rhodo-phyta)[J]. Chinese Journal of Plant Ecology，2009，33(6)：1140-1147.

[50] 吕芳，詹冬梅，丁刚，等. 氮磷加富对山东长岛养殖坛紫菜的生长及营养成分的影响[J]. 广西科学，2022，29(1)：168-175.
Lyu Fang，Zhan Dongmei，Ding Gang，et al. Effects of nitrogen and phosphorus enrichment on growth and nutritional components of pyropia haitanensis in Changdao，Shandong province[J]. Guangxi Sciences，2022，29(1)：168-175.

[51] 王文磊，徐燕，纪德华，等. 大型海藻育种技术研究进展及其应用[J]. 水产学报，2023，47(11)：44-57.
Wang Wenlei，Xu Yan，Ji Dehua，et al. Advances in seaweed breeding technology and its applications[J]. Journal of Fisheries of China，2023，47(11)：44-57.

[52] Irisarri J，Fernández-Reiriz M J，Robinson S M C，et al. Absorption efficiency of mussels *Mytilus edulis* and *Mytilus galloprovincialis* cultured under integrated multi-trophic aquaculture conditions in the Bay of fundy(Canada) and Ría Ares-betanzos (Spain)[J]. Aquaculture，2013，388/389/390/391：182-192.

[53] 黄福鑫. 多营养层次综合养殖模式在辽宁大连的应用与发展路径[J]. 中外食品工业，2025(21)：136-138.
Huang Fuxin. Application and development path of multi-nutrition and multi-level comprehensive breeding model in Dalian，Liaoning province[J]. Global Food Industry，2025(21)：136-138.

[54] 侯娟，周为峰，王鲁民，等. 中国深远海养殖潜力的空间分析[J]. 资源科学，2020，42(7)：1325-1337.
Hou Juan，Zhou Weifeng，Wang Lumin，et al. Spatial analysis of the potential of deep-sea aquaculture in China[J]. Resources Science，2020，42(7)：1325-1337.

[55] 徐皓，刘晃，黄文超. 深远海设施养殖装备技术进展与展望[J]. 上海海洋大学学报，2023，32(5)：893-902.
Xu Hao，Liu Huang，Huang Wenchao. Advances and outlook of offshore aquaculture equipment technology[J]. Journal of Shanghai Ocean University，2023，32(5)：893-902.

[56] Luo Hongtian，Fu Yuzhong，Shi Jian，et al. Carbon sink potential and environmental benefits of seaweed：a case study of the seaweed cultivation industry on China coast[J]. Aquaculture，2023，572：739494.