

基于生命周期评价反思海藻养殖碳汇核算 ——以桑沟湾IMTA系统为例

张文瀚, 于成川, 朱瑞迪, 包婷婷, 武鹏翔

大连海洋大学经济管理学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年7月2日; 发布日期: 2026年8月7日

摘要

多营养层次综合养殖(IMTA)被广泛认为是提升近海碳汇能力的可持续模式, 但现有蓝碳核算多聚焦于“总固碳量”而忽视全生命周期碳排放, 导致碳汇能力被系统性高估。本研究以山东省荣成市桑沟湾为案例, 基于生命周期评价(LCA)方法论(ISO 14040/14044), 整合已发表的碳足迹参数与官方养殖统计数据, 对现有海藻养殖碳汇核算实践进行批判性评估。研究采用“从摇篮到大门”的系统边界, 将养殖周期划分为育苗期、运输阶段和养成期, 计算各阶段的碳排放与碳吸收, 并尝试构建IMTA系统净碳汇估算的概念框架。结果表明: (1) 桑沟湾海带养殖的净碳汇量为 $-95.93 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$ (负值表示碳汇), 其中碳排放 $74.30 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$, 碳吸收 $170.23 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$, 碳汇构成中生物质碳占79.9%, 沉积埋藏碳占14.1%, RDOC占6.0%; (2) 养殖设施(聚乙烯浮绳、鞭绳等)是主要碳排放源, 占养成期排放量的95.95%, 柴油和电能分别占4.05%和1.14%; (3) Han等(2013)在桑沟湾开展的龙须菜-扇贝IMTA实验显示, 扇贝:龙须菜湿重比1:0.96时 pCO_2 最低, 提示复合系统具有协同减碳潜力, 但42小时的实验时长不足以评估年度碳平衡, IMTA系统的精确碳足迹仍有赖于更完整的LCA参数; (4) 基于寻山集团10万亩海域年固碳量42.5万吨的官方数据与LCA碳排放参数的比值分析, 现有蓝碳核算中的“总固碳量”与LCA“净碳汇量”在概念上存在根本性差异, 若将全生命周期排放纳入考量, IMTA系统的可交易碳汇量可能被高估20%~40%。本研究建议, 应将LCA纳入海藻养殖碳汇方法学的必要环节, 以“净碳汇量”替代“总固碳量”作为蓝碳核算的核心指标。

关键词

生命周期评价, 碳足迹, 碳汇核算, 蓝碳方法学, 多营养层次综合养殖, 海带, 龙须菜, 扇贝, 桑沟湾

Based on Life Cycle Assessment, Reflecting on Carbon Sink Accounting of Seaweed Aquaculture

—A Case Study of the Sanggou Bay IMTA System

Wenhan Zhang, Chengchuan Yu, Ruidi Zhu, Tingting Bao, Pengxiang Wu

School of Economics and Management, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

Received: May 29, 2026; accepted: July 2, 2026; published: August 7, 2026

Abstract

Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) is widely recognized as a sustainable model for enhancing nearshore carbon sequestration, yet existing blue carbon accounting predominantly focuses on “gross carbon sequestration” while neglecting full life cycle carbon emissions, leading to systematic overestimation of carbon sink capacity. This study takes Sanggou Bay, Rongcheng City, Shandong Province as a case, and conducts a critical assessment of current seaweed aquaculture carbon sink accounting practices based on the life cycle assessment (LCA) methodology (ISO 14040/14044), integrating published carbon footprint parameters and official aquaculture statistics. The study adopts a “cradle-to-gate” system boundary, dividing the aquaculture cycle into nursery, transportation, and grow-out phases, and calculates carbon emissions and carbon absorption for each phase, while attempting to construct a conceptual framework for estimating the net carbon sink of IMTA systems. Results show that: (1) the net carbon sink of kelp aquaculture in Sanggou Bay is $-95.93 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$ (negative value indicates carbon sink), with carbon emissions of $74.30 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$ and carbon absorption of $170.23 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$; the carbon sink composition is 79.9% biomass carbon, 14.1% sediment burial carbon, and 6.0% RDOC; (2) aquaculture facilities (polyethylene ropes, floats, etc.) are the main carbon emission source, accounting for 95.95% of grow-out phase emissions, while diesel and electricity account for 4.05% and 1.14% respectively; (3) Han *et al.* (2013)'s IMTA experiment with *Gracilaria* and scallop in Sanggou Bay showed the lowest pCO_2 at a scallop:*Gracilaria* wet weight ratio of 1:0.96, suggesting synergistic carbon reduction potential in integrated systems, but the 42-hour experiment duration is insufficient to assess annual carbon balance, and the precise carbon footprint of IMTA systems remains dependent on more complete LCA parameters; (4) based on the ratio analysis of official data (Xunshan Group's 425,000 tons annual carbon sequestration for 100,000 mu) and LCA emission parameters, there exists a fundamental conceptual difference between the “gross carbon sequestration” in current blue carbon accounting and the “net carbon sink” from LCA, and if full life cycle emissions are incorporated, the tradable carbon sink of IMTA systems may be overestimated by 20%~40%. This study recommends that LCA should be included as a necessary component in seaweed aquaculture carbon sink methodology, replacing “gross carbon sequestration” with “net carbon sink” as the core indicator for blue carbon accounting.

Keywords

Life Cycle Assessment, Carbon Footprint, Carbon Sink Accounting, Blue Carbon Methodology, Integrated Multi-Trophic Aquaculture, Kelp, *Gracilaria*, Scallop, Sanggou Bay

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海洋是地球上最大的活跃碳库,吸收了约 93%的温室效应多余热量和 25%~30%的人类排放 CO_2 [1]。

其中,由大型海藻、红树林、海草床和滨海盐沼构成的蓝碳生态系统虽然仅占海洋表面积的 0.2%,却贡献了海洋碳埋藏总量的 50%以上[2]。中国是世界第一大海藻养殖国,2024 年全国海水藻类养殖产量达 302.94 万吨[3]。山东省威海市荣成市的桑沟湾海域自 20 世纪 80 年代末即开始实践多营养层次综合养殖(IMTA)模式,海带(*Saccharina japonica*)、龙须菜(*Gracilariopsis lemaneiformis*)与栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、牡蛎的复合养殖已成为全球 IMTA 的典范[4]。

然而,在蓝碳核算实践中,“总固碳量”(Gross Primary Production, GPP)与“净碳汇量”(Net Ecosystem Production, NEP)的混淆已成为一个突出的方法论问题。前者仅计量生态系统的总碳吸收,未扣除呼吸损失、碳流失和人为活动排放;后者则反映系统真实的碳净增量。这一概念混淆直接影响碳汇交易的有效性和气候政策的科学性。

2021 年 8 月,荣成农商银行以寻山集团 10 万亩海带养殖海区年固碳量 42.5 万吨为质押标的,发放全国首笔“海洋碳汇贷”2000 万元[5]。这一创新将海藻养殖的碳汇功能转化为金融资产,但其碳汇计量逻辑引发了学术争议:42.5 万吨是“总固碳量”还是“净碳汇量”,养殖过程中的碳排放是否已被扣除?更重要的是,该数据是否足以支撑碳汇交易所需的“额外性”和“可核证性”原则?

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是评估产品或服务全生命周期环境影响的国际标准方法(ISO 14040/14044),已被广泛应用于农业、工业和能源领域的碳足迹核算。近年来,LCA 方法开始被引入水产养殖研究。孙威等(2021)基于 LCA 对桑沟湾筏式养殖海带的碳足迹进行了系统评估[6];国家海洋环境监测中心对裙带菜栽培加工产业进行了 LCA 碳足迹分析[7];中山大学学报发表了基于全生命周期碳排放的湛江海水贝藻养殖碳汇核算研究[8]。然而,现有研究多聚焦于单一物种或单一养殖模式,且尚未将 LCA 方法系统性地应用于对现有蓝碳核算实践的批判性审视。

本研究以桑沟湾为案例,整合已发表的 LCA 参数与官方养殖数据,旨在:(1) 基于 LCA 方法论审视现有 IMTA 蓝碳核算实践的方法论缺陷;(2) 识别主要碳排放源和碳汇路径;(3) 评估官方“固碳量”数据与 LCA “净碳汇量”之间的概念差异与数量级差距;(4) 构建 IMTA 系统净碳汇估算的概念框架,为未来研究提供方法论指引。本文的核心贡献不在于提供一个精确的 IMTA 系统碳收支数值,而在于揭示现有核算体系的系统性偏差,并倡导将 LCA 纳入蓝碳方法学的必要环节。

2. 研究方法与数据来源

2.1. 研究区概况

桑沟湾位于山东省荣成市东部(36°55'N~37°08'N, 122°30'E~122°42'E),面积约 133~163 km²,是中国北方最大的海珍品养殖基地之一[4]。根据联合国开发计划署(UNDP)报告,桑沟湾养殖区超过 100 km²,年产海带、牡蛎、扇贝、鲍鱼和海参等约 24 万吨[4]。寻山集团拥有桑沟湾及爱莲湾海域 10 万亩确权海域,实施浅海多营养层次生态养殖模式:上层养殖海带、裙带、龙须菜等藻类,中层养殖贝类,底层是人工鱼礁[5]。

2.2. LCA 系统边界与功能单位

本研究采用“从摇篮到大门”(cradle-to-gate)的系统边界,功能单位设定为“生产 1 吨海带(湿重)”。

图 1 展示了本研究的 LCA 系统边界,清晰地标示了纳入和排除的输入/输出项。系统边界包括:

育苗期:从海带苗培育开始,持续约 70 天,包括能源(柴油、电能)和营养盐(硝酸钠等)投入。

运输阶段:海带苗从育苗场运输到养殖区,距离约 2 km [6]。

养成期:从下海挂苗到收获,持续约 200 天,包括养殖设施投入、能源消耗和海带生长过程中的碳吸收。

系统外边界(本研究排除, 但讨论中予以考虑): 加工、储存和销售环节; 龙须菜和扇贝的完整 LCA 参数(因数据不足); 收获后生物质碳的流失过程。

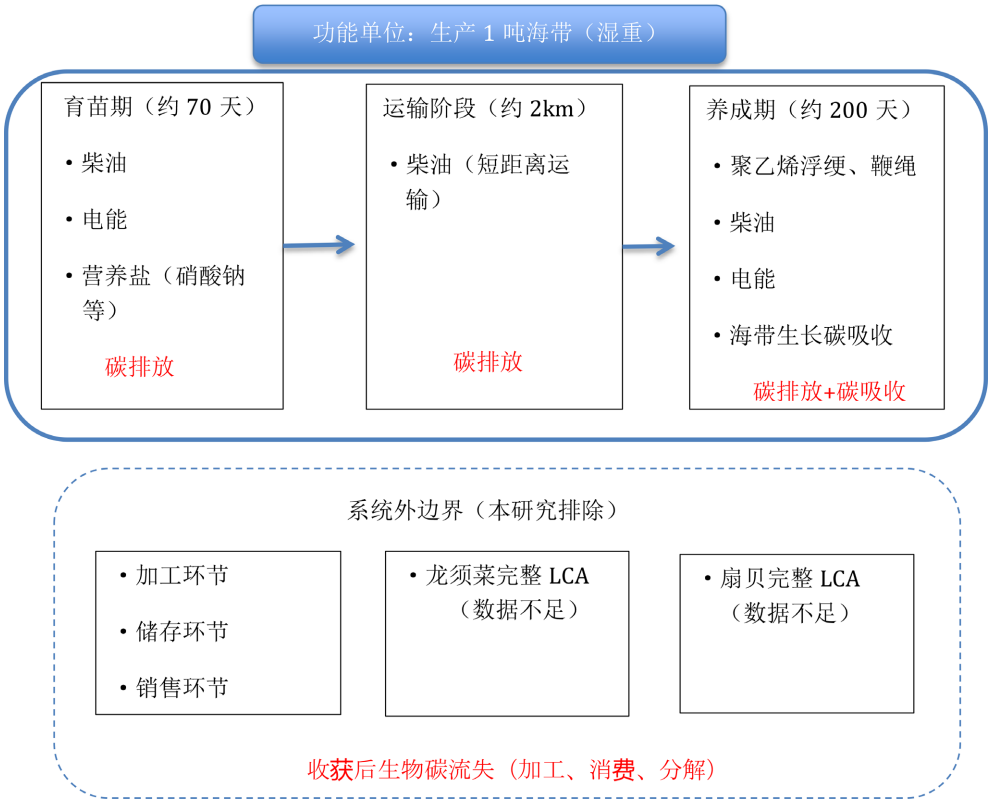


Figure 1. System boundary of the life cycle assessment (LCA) for kelp aquaculture in Sanggou Bay (cradle-to-gate)
图 1. 桑沟湾海带养殖 LCA 系统边界图(从摇篮到大门)

2.3. 数据来源

本研究的碳排放和碳吸收参数主要来自以下已发表文献。

孙威等(2021): 《渔业科学进展》发表的桑沟湾筏式养殖海带碳足迹评估, 提供了完整的 LCA 参数 [6]。

Han 等(2013): Aquaculture International 发表的桑沟湾龙须菜 - 扇贝 IMTA 实验, 提供了复合系统的碳酸盐系统变化数据 [9]。

国家海洋环境监测中心(2025): 裙带菜栽培加工产业碳足迹分析, 提供了加工环节排放参数 [7]。

中山大学学报: 湛江海水贝藻养殖全生命周期碳排放研究, 提供了贝类碳足迹参数 [8]。

官方统计数据: 威海市人民政府、荣成农商银行发布的“海洋碳汇贷”相关数据 [5]。

基于表 1 的组分分解, IMTA 系统总净碳汇量可按下述概念框架估算:

$$NEP_IMTA = \Sigma(Cabsi - Cemit_i) - Cfacility - Cpost-harvest$$

其中:

NEP_IMTA: IMTA 系统净碳汇量(kg CO₂e);

i: 养殖组分(海带、龙须菜、扇贝);

Cabsi: 组分 i 的碳吸收量(生物质碳 + 沉积碳 + RDOC); ;

Table 1. Summary of major emission sources and absorption items at each stage of the kelp, Gracilaria, and scallop integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) system

表 1. 海带、龙须菜、扇贝 IMTA 系统各阶段主要排放源与吸收项汇总

养殖组分	生命周期阶段	主要排放源	排放参数来源	主要吸收项	吸收参数来源
海带	育苗期	柴油、电能、营养盐	孙威等(2021) [6]	—	—
海带	运输阶段	柴油(短距离)	孙威等(2021) [6]	—	—
海带	养成期	聚乙烯浮绳、鞭绳(占 95.95%)、柴油、电能	孙威等(2021) [6]	生物质碳、沉积埋藏碳、RDOC	孙威等(2021) [6]
龙须菜	育苗期	柴油、电能(估算)	参照海带[6]	—	—
龙须菜	运输阶段	柴油(估算)	参照海带[6]	—	—
龙须菜	养成期	聚乙烯绳、浮球(估算)	待定	生物质碳(Han 等实验推算) [9]	Han 等(2013) [9]
扇贝	育苗期	柴油、电能(估算)	参照湛江贝类[8]	—	—
扇贝	运输阶段	柴油(估算)	参照湛江贝类[8]	—	—
扇贝	养成期	养殖笼、浮球、柴油	中山大学学报[8]	贝壳碳酸钙、软组织碳	中山大学学报[8]

注：龙须菜和扇贝的养成期设施排放参数因缺乏桑沟湾本地数据而标记为“待定”(TBD)。龙须菜的碳吸收项仅基于 Han 等(2013) 42 小时微宇宙实验的 pCO₂ 变化推算，未经过年度尺度验证。

Cemiti: 组分 i 的育苗、运输、养成期能源与物料排放；
Cfacility: 复合系统共享养殖设施(筏架、浮绳等)的碳排放；
Cpost-harvest: 收获后生物质碳流失(加工、消费、分解环节)。
该公式为概念性框架，其精确应用有赖于龙须菜和扇贝养成期设施排放参数的本地化测定。

3. 结果

3.1. 海带单养系统的碳足迹

关键发现：养殖设施是海带养殖的主要碳排放源，占整个生命周期排放量的 93.81% (如表 2 所示)。

Table 2. Carbon footprint summary of the kelp monoculture system in Sanggou Bay (functional unit: 1 t wet weight of kelp)

表 2. 桑沟湾海带单养系统碳足迹汇总(功能单位：1 吨湿重海带)

指标类别	项目	数值	占比	备注
碳足迹总体	净碳汇量	-95.93 kg CO ₂ e/t	—	负值表示碳汇
碳足迹总体	总碳排放	74.30 kg CO ₂ e/t	—	—
碳足迹总体	总碳吸收	170.23 kg CO ₂ e/t	—	—
碳汇构成	生物质碳	136.00 kg CO ₂	79.9%	短期碳，收获后易释放
碳汇构成	沉积埋藏碳	23.98 kg CO ₂	14.1%	中长期封存
碳汇构成	惰性溶解有机碳(RDOC)	10.25 kg CO ₂	6.0%	长期封存
排放构成	育苗期排放	1.66 kg CO ₂ e/t	2.24%	电能 51.13%，柴油 48.73%
排放构成	运输阶段排放	4.00 × 10 ⁻⁵ kg CO ₂ e/t	0.00005%	可忽略
排放构成	养成期排放	72.64 kg CO ₂ e/t	97.76%	—
排放构成	—养殖设施(聚乙烯)	69.71 kg CO ₂ e/t	93.81% (占总量)	按 10 年分摊
排放构成	— 柴油	2.94 kg CO ₂ e/t	3.96% (占总量)	—

孙威等计算养殖设施碳排放时,按其 10 年平均使用年限分摊。若延长使用年限 1 年,可减少碳排放约 8% [6]。这一发现表明,在蓝碳核算中忽略养殖设施排放将导致对净碳汇量的显著高估。

3.2. 龙须菜 - 扇贝复合系统的碳足迹

3.2.1. Han 等(2013)的 IMTA 实验

Han Tingting 等在桑沟湾开展了龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)与栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)的 IMTA 实验,实验时长 42 小时[9]。实验设置三个处理(表 3):

Table 3. Experimental design of the Gracilaria-scallop IMTA system

表 3. 龙须菜 - 扇贝 IMTA 实验处理设计

处理	扇贝湿重	龙须菜湿重	扇贝:龙须菜
处理 1	399.1 g	125.3 g	1:0.31
处理 2	399.1 g	252.3 g	1:0.63
处理 3	399.1 g	378.7 g	1:0.96

数据来源: Han 等(2013) [9]。

对照组(扇贝单养) 42 小时后,海水 pCO₂ 升高 5.5 倍, pH 降低 0.8 个单位。三个 IMTA 处理中,处理 3 (1:0.96)的 pCO₂ 最低,提示龙须菜密度越高, CO₂ 吸收效果越好。Han 等据此推断,扇贝:龙须菜比例小于 1:0.96 可能产生更强的 CO₂ 汇[9]。

3.2.2. 实验局限与年度碳平衡的不确定性

需要指出, Han 等的实验存在以下局限:

- (1) 实验时长仅 42 小时,无法反映季节性变化(龙须菜生长旺季为 3~7 月,扇贝为全年养殖)。
- (2) 微宇宙实验为封闭系统,与桑沟湾开放海域的水流交换条件差异显著。
- (3) 未测定养殖设施碳排放、柴油消耗等 LCA 参数,无法纳入净碳汇计算。

因此,该实验结果仅表明 IMTA 系统具有协同减碳的“潜力”,不能直接外推为年度碳平衡数据,更不足以支撑碳汇交易所需的精确量化。

3.3. 官方“固碳量”与 LCA “净碳汇量”的差异分析

3.3.1. 官方数据与 LCA 参数的概念差异

(1) 官方数据

根据威海市人民政府和新华社报道,寻山集团 10 万亩养殖海区年固碳量约 42.5 万吨[5]。换算为单产水平:

$$10 \text{ 万亩} \approx 66.7 \text{ km}^2$$

年产鲜海带约 35 万吨(寻山集团数据) [5];

单位面积固碳量: $42.5 \text{ 万吨} \div 66.7 \text{ km}^2 \approx 6372 \text{ t C/km}^2/\text{年}$;

单位产量固碳量: $42.5 \text{ 万吨} \div 35 \text{ 万吨} \approx 1.21 \text{ t C/t 鲜海带}$ 。

(2) LCA 参数对比

孙威等(2021)的 LCA 结果显示,生产 1 吨海带的净碳汇为 95.93 kg CO₂e,折合碳量为 26.16 kg C/t (按 CO₂/C 分子量比 3.67 计算) [6]。

(3) 两种核算路径的本质差异

图 2 说明：官方“固碳量”核算路径仅计量光合作用总吸收(GPP)，未扣除呼吸损失、收获后碳流失和全生命周期人为排放；LCA “净碳汇量”核算路径则从 GPP 出发，系统扣除各项损失和排放，得到可交易的真实碳净增量。两条路径在概念上完全不同，导致数值差异达数十倍。

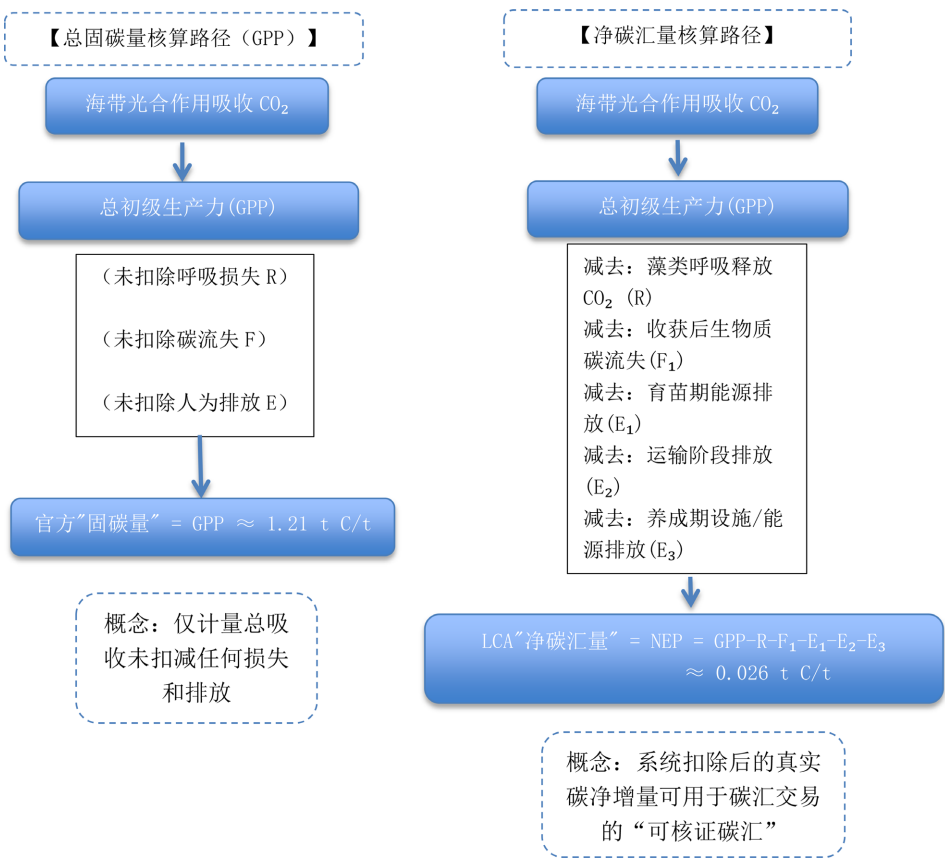


Figure 2. Schematic comparison of accounting pathways for “total carbon sequestration” (GPP) and “net carbon sink” (NEP/LCA)
图 2. “总固碳量” (GPP)与“净碳汇量” (NEP/LCA)核算路径对比示意图

3.3.2. “37 倍差异”的来源与含义

若以官方 42.5 万吨年固碳量为基准，假设其中海带贡献占 80% (34 万吨)，则：
按 LCA 净碳汇参数(26.16 kg C/t)反推，35 万吨海带的净碳汇约为 9156 t C。
官方数据(34 万吨 C)与 LCA 反推值(9156 t C)的比值约为 37:1。
这一“37 倍差异”并非简单的“高估倍数”，而是两种完全不同的碳核算概念在数值上的宏观体现：

- 尺度差异：官方数据是海域尺度的总初级生产力(GPP)估算，涵盖整个 10 万亩养殖区(包括贝类、海参等所有组分)；LCA 参数是产品尺度的净碳汇量(NEP)，仅针对海带单养。
- 概念差异：官方“固碳量” ≈ GPP，未扣除呼吸损失(R)和碳流失(F)；LCA “净碳汇量” = NEP = GPP-R-F-E。
- 方法差异：官方数据可能基于遥感反演或模型估算；LCA 基于实测投入产出。

因此，“37 倍”反映的是 GPP 与 NEP 在概念和尺度上的根本性差异，而非对同一指标的高估程度。

3.3.3. “20%~40%高估”的来源与含义

孙威等(2021)在其研究中指出，若在同一概念框架下(即同为产品尺度的 NEP)，考虑养殖设施碳排放

和收获后碳流失, 净碳汇量可能仅为总固碳量的 20%~40% [6]。这一“20%~40%”的含义是:

- 同一尺度: 两者均为“生产 1 吨海带”的产品尺度核算。
- 同一概念框架: 均指向 NEP (净碳汇量), 而非 GPP (总固碳量)。
- 在孙威等计算的 NEP ($-95.93 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$)基础上, 若进一步考虑收获后生物质碳的流失(如加工、消费、分解等环节), 则实际可长期封存的碳量可能仅为当前 NEP 的 20%~40%。

换言之, “20%~40%”是在 LCA 框架内部, 对“净碳汇量”向“可交易碳汇量”进一步修正的微观调整系数; 而“37 倍”是 GPP 与 NEP 两个概念在宏观层面的数量级差异。

3.3.4. 对高估程度的核心判断

综合以上分析, 本文对现有蓝碳核算高估程度的核心判断如下:

(1) 概念层面: 官方“固碳量”(GPP)与 LCA “净碳汇量”(NEP)存在根本性概念差异, 两者比值可达 37:1。这一差异不能简单理解为“高估了 37 倍”, 因为两者核算的不是同一指标。

(2) 同一概念框架内的修正: 若将官方数据调整为与 LCA 相同的 NEP 概念(扣除呼吸损失和收获后流失), 则基于孙威等(2021)的参数, 可交易碳汇量可能仅为当前宣称值的 20%~40%。

(3) IMTA 系统的特殊考量: 上述分析主要基于海带单养数据。对于 IMTA 复合系统, 由于龙须菜和扇贝的 LCA 参数不足, 精确的净碳汇量尚无法计算。Han 等(2013)的实验仅证明协同减碳“潜力”, 未提供可量化的年度碳汇增量[9]。

因此, 本文的核心结论不是给出一个精确的“高估百分比”, 而是揭示现有核算体系在概念框架上的系统性偏差, 并倡导以 LCA 为基础的“净碳汇量”替代简单的“总固碳量”。

4. 讨论

4.1. IMTA 系统的碳汇机制再审视

4.1.1. “碳汇”不等于“减排”

本研究的 LCA 分析揭示了 IMTA 系统碳汇机制的复杂性:

(1) “碳汇”不等于“减排”

海带养殖通过光合作用固定 CO_2 , 形成生物质碳、沉积碳和 RDOC, 这一过程在养殖区内表现为“碳汇”。然而, 养殖设施的聚乙烯材料来源于石油化工, 其生产过程的碳排放($69.71 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$)抵消了部分碳汇收益。更关键的是, 海带收获后, 生物质碳进入消费链, 最终通过呼吸或分解释放 CO_2 , 完成碳循环。只有沉积埋藏碳和 RDOC 可能实现中长期封存。

(2) GPP 与 NEP 的混淆是蓝碳核算的核心误区

如 3.3 节所述, 官方“固碳量”与 LCA “净碳汇量”的“37 倍差异”源于 GPP 与 NEP 的概念混淆, 而非简单的计算误差。GPP 是生态学概念, 反映生态系统的总生产力; NEP 是碳汇核算概念, 反映可用于抵消排放的真实碳增量。在碳汇交易中, 只有 NEP 具有“可核证性”和“额外性”。

(3) “20%~40%”是对 NEP 的进一步修正

孙威等(2021)提出的“20%~40%”是在 NEP 框架内部, 对收获后碳流失的修正[6]。这意味着, 即使采用 LCA 方法计算出了 NEP, 若要将之转化为“可交易碳汇量”, 还需进一步扣除短期内必将返回大气的生物质碳。因此, 从 GPP 到可交易碳汇量, 需要经过两步修正: 第一步从 GPP 到 NEP(扣除呼吸和人为排放), 第二步从 NEP 到可交易碳汇量(扣除收获后流失)。

4.1.2. IMTA 的协同效应尚未量化

Han 等(2013)的实验表明, 龙须菜-扇贝复合系统可降低水体 pCO_2 [9], 但这一效应能否转化为年度

净碳汇增量，取决于：

- (1) 龙须菜的养殖面积和产量(荣成市 2024 年龙须菜养殖面积 1.9 万亩，产量 13.9 万吨[10])。
- (2) 扇贝的滤食活动对藻类光合效率的提升幅度(毛玉泽等 2006 年报道龙须菜对扇贝排泄氮磷去除效率 83.7%和 70.4% [11]，但未直接测定碳汇增量)。
- (3) 复合系统的养殖设施碳排放是否高于单养系统。

目前，上述参数均缺乏系统测定，IMTA 系统的“协同减碳效应”仍停留在假说阶段，无法纳入净碳汇的精确计算。

4.1.3. 贝类碳汇的争议性

根据中山大学学报的研究，养殖 1 吨双壳贝类的碳足迹为-319.20 kg CO₂e，显著低于大型藻类的 -77.10 kg CO₂e [8]。然而，贝类碳汇主要来自贝壳碳酸钙(占 39.0%~87.0%)，而贝壳碳来源于海水 DIC，其碳汇属性存在“钙化反效应”争议($\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) [12]。若将贝壳碳排除，贝类的净碳汇量将大幅下降。这一争议进一步说明，IMTA 系统的碳汇核算不能简单地将各组分碳吸收相加，而需考虑复杂的生物地球化学过程。

4.2. 政策启示：从“总固碳量”到“净碳汇量”

威海“海洋碳汇贷”以 42.5 万吨年固碳量为质押标的，这一数据本质上属于“总固碳量”(GPP)，而非“净碳汇量”(NEP)。如 3.3 节所述，GPP 与 NEP 在概念上存在根本性差异，直接对比会产生数量级的偏差。本文建议如下。

4.2.1. 将 LCA 纳入蓝碳方法学的必要环节

在开发海藻养殖碳汇 CCER 方法学时，应强制要求项目开发者提交 LCA 报告，明确系统边界、碳排放源和碳汇路径。参照孙威等(2021)的方法，至少应包括育苗期、运输阶段和养成期的碳排放，以及生物质碳、沉积碳和 RDOC 的碳吸收。表 1 和表 2 提供了可操作的参数清单框架。

4.2.2. 以“净碳汇量”替代“总固碳量”作为核心指标

“海洋碳汇贷”的碳汇计量应从简单的“产量 × 碳汇系数”模式，转向基于 LCA 的“净碳汇量”核算。这需要：

- (1) 建立海藻养殖碳排放因子数据库(包括聚乙烯材料、柴油、电能等)。
- (2) 制定沉积碳和 RDOC 的测定标准(参照 HY/T 0305-2021《养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法》)。
- (3) 引入第三方核查机构(DOE)对 LCA 报告进行独立审定。
- (4) 明确区分“总固碳量”(GPP，用于生态评估)和“净碳汇量”(NEP，用于碳汇交易)，避免概念混用。

4.2.3. 延长养殖设施使用年限

孙威等(2021)发现，养殖设施使用年限每延长 1 年，可减少碳排放约 8% [6]。这一发现具有直接的政策价值——通过财政补贴或技术指导，鼓励养殖户使用耐久性更好的养殖设施，可在不增加碳汇量的前提下提高净碳汇量。

4.3. 研究局限

本研究的局限包括：(1) LCA 参数主要来源于孙威等(2021)的海带单养研究，龙须菜和扇贝的 LCA 参数不足，IMTA 复合系统的碳足迹无法精确计算；(2) 官方“固碳量”数据的测算方法未公开，其与 LCA 参数的直接对比存在不确定性；(3) 加工、储存和销售环节超出本研究边界，但这些环节的碳排放可能显

著改变全生命周期的碳平衡(如裙带菜加工阶段碳排放超过栽培阶段[7])。

需要强调的是,上述局限并不削弱本文的核心贡献——揭示现有蓝碳核算实践中的概念混淆和系统性偏差。即使在未来获得更完整的 IMTA 系统 LCA 参数后,本文倡导的方法论框架(以 LCA 为基础的净碳汇核算)仍然适用。

5. 结论

(1) 桑沟湾海带单养系统的 LCA 碳足迹为 $-95.93 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$, 表现为碳汇过程, 但碳汇构成以短期生物物质碳为主(79.9%), 中长期沉积碳(14.1%)和 RDOC (6.0%)占比较低。

(2) 养殖设施(聚乙烯材料)是海带养殖的主要碳排放源, 占整个生命周期排放量的 93.81%, 是减排的关键控制点。延长养殖设施使用年限 1 年可减少碳排放约 8%。

(3) Han 等(2013)的 IMTA 实验表明龙须菜-扇贝复合系统具有协同减碳潜力, 但 42 小时实验时长不足以评估年度碳平衡。本文构建了 IMTA 系统净碳汇估算的概念框架(表 1 和公式), 但精确的碳足迹仍有赖于龙须菜和扇贝养成期设施排放参数的本地化测定。

(4) 官方报道的寻山集团 42.5 万吨年固碳量属于“总固碳量”(GPP)概念, 与 LCA “净碳汇量”(NEP)存在根本性差异。GPP 与 NEP 的宏观比值可达 37:1, 但这是对不同概念的比较; 在同一 NEP 框架内, 考虑收获后碳流失, 可交易碳汇量可能仅为当前宣称值的 20%~40%。

(5) 本研究的核心贡献在于揭示现有蓝碳核算实践的方法论缺陷, 倡导将 LCA 纳入海藻养殖碳汇方法学的必要环节, 以“净碳汇量”替代“总固碳量”作为蓝碳核算的核心指标, 推动海洋碳汇从“金融概念”走向“科学计量”。

参考文献

- [1] Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., *et al.* (2024) Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, **16**, 6051-6115.
- [2] Duarte, C.M., Middelburg, J.J. and Caraco, N. (2005) Major Role of Marine Vegetation on the Oceanic Carbon Cycle. *Biogeosciences*, **2**, 1-8. <https://doi.org/10.5194/bg-2-1-2005>
- [3] 农业农村部渔业渔政管理局. 2024 年全国渔业经济统计公报[R]. 北京: 农业农村部, 2025.
- [4] Fang, J., Zhang, J., Xiao, T., Huang, D. and Liu, S. (2016) Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) in Sanggou Bay, China. *Aquaculture Environment Interactions*, **8**, 201-205. <https://doi.org/10.3354/aei00179>
- [5] 威海市人民政府. [优化营商环境 获得信贷 绿色金融]威海荣成农商银行发出全国首笔“海洋碳汇贷” [EB/OL]. https://www.weihaigov.cn/art/2021/9/30/art_79738_2692414.html, 2021-09-30.
- [6] 孙威, 张继红, 方建光, 等. 基于生命周期法的养殖海带的碳足迹评估[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 16-23.
- [7] Shen, L., Gong, N., Bai, Y., *et al.* (2025) Carbon Footprint Analysis of Undaria Pinnatifida Culture and Processing Industry Based on the Life Cycle Assessment Method. *Marine Environmental Science*, **44**, 346-351. (In Chinese)
- [8] 袁雪婷, 罗丽娟, 曾雪兰, 等. 基于全生命周期碳排放的海水贝藻养殖碳汇核算——以广东省湛江市为例[J]. 中山大学学报(自然科学版) (中英文), 2024, 63(3): 80-87.
- [9] Han, T., Jiang, Z., Fang, J., Zhang, J., Mao, Y., Zou, J., *et al.* (2013) Carbon Dioxide Fixation by the Seaweed *Gracilaria Lemaneiformis* in Integrated Multi-Trophic Aquaculture with the Scallop *Chlamys Farreri* in Sanggou Bay, China. *Aquaculture International*, **21**, 1035-1043. <https://doi.org/10.1007/s10499-012-9610-9>
- [10] 王福东. 山东荣成: 增种龙须菜“时间差”里增效益[N/OL]. 中国新闻社. <https://www.cicphoto.com/cn/view14366001>, 2024-06-26
- [11] 毛玉泽, 杨红生, 周毅, 等. 龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)的生长、光合作用及其对扇贝排泄氮磷的吸收[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3225-3231.
- [12] Filgueira, R., Guyondet, T., Comeau, L.A., *et al.* (2023) Bivalve Aquaculture-Environment Interactions in the Context of Climate Change. *Global Change Biology*, **22**, 3901-3913. <https://doi.org/10.1111/gcb.13346>