

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*

袁雪婷^{1,2}, 罗丽娟^{1,2}, 曾雪兰^{1,3}, 张远¹, 栾天罡^{1,2,4}

- 广东省流域水环境治理与水生态修复重点实验室/广东工业大学生态环境与资源学院, 广东广州 510006
- 化学与精细化工广东省实验室揭阳分中心, 广东揭阳 515200
- 广东工业大学碳中和与绿色发展协同创新研究院, 广东广州 510006
- 水产动物疫病防控与健康养殖全国重点实验室/中山大学生命科学学院, 广东广州 510275

摘要: 湛江市的海水养殖面积3.7万hm², 是广东省乃至全国重要的水产品生产和加工基地, 对其进行海水贝藻养殖碳汇核算, 为湛江市未来开展渔业碳汇交易, 服务国家碳中和需求提供数据支持具有重要意义。本研究依据实地调查以及实验室分析检测获得湛江市本土贝藻碳汇核算的关键性基础数据, 并基于贝藻类全生命周期碳排放, 精准评估湛江市海水贝藻养殖碳汇能力。研究表明, 2021年湛江市海水养殖贝藻碳汇总量(以CO₂计)为155 436 t, 其中贝类155 359 t, 藻类77 t。按照我国目前蓝碳交易市场中CO₂交易价格, 湛江市贝类和藻类碳汇创造的经济价值为1 648万元。综合贝藻类全生命周期碳排放的方法, 湛江市贝类净碳汇为135 176 t, 藻类为39 t。由此可见, 湛江市具有较高的海水贝藻养殖碳汇能力, 能带来可观的减排经济效益, 为我国实现气候变化的解决方案以及完成“双碳”目标做出重要贡献。

关键词: 蓝碳; 碳汇; 生命周期评价; 双壳贝类; 碳足迹

中图分类号: S937.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)03-0080-08

Carbon sink assessment of bivalve and seaweed mariculture based on life-cycle carbon emissions: A case study of Zhanjiang City, Guangdong Province

YUAN Xueting^{1,2}, LUO Lijuan^{1,2}, ZENG Xuelan^{1,3}, ZHANG Yuan¹, LUAN Tiangang^{1,2,4}

- Guangdong Provincial Key Laboratory of Water Quality Improvement and Ecological Restoration for Watersheds / School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China
- Guangdong Provincial Laboratory of Chemistry and Fine Chemical Engineering Jiayang Center, Jiayang 515200, China
- Collaborative Innovation Institute for Carbon Neutrality and Green Development, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China
- State Key Laboratory of Biocontrol / School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Zhanjiang City, with an area of 37 000 hm² of mariculture, is an important production and

* 收稿日期: 2024-01-03

录用日期: 2024-01-24

网络首发日期: 2024-03-20

基金项目: 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(粤自然资合[2023]43号);

广东省重点领域研发计划项目(2020B1111350003); 广东引进创新创业团队项目(2019ZT08L213)

作者简介: 袁雪婷(1999生), 女; 研究方向: 海洋蓝碳、水处理理论与技术; E-mail: 2112124024@mail2.gdut.edu.cn

通信作者: 罗丽娟(1984生), 女; 研究方向: 海洋蓝碳、新污染物降解; E-mail: luolij3@gdut.edu.cn

processing base for aquatic products in Guangdong Province and even in the whole country. Conducting carbon sink accounting for mariculture bivalve and seaweed is of great significance, as it will provide data support for Zhanjiang City to conduct fishery carbon sink trading in the future and meet the national carbon neutral demand. Based on the field surveys and laboratory analysis, the key basic data of carbon sink accounting of native bivalve and seaweed in Zhanjiang was obtained in this study. And the carbon sink capacity of mariculture in Zhanjiang based on the whole life cycle carbon emissions of bivalve and seaweed were also evaluated. The results showed that the total carbon sink (measured in CO₂) of mariculture bivalve and seaweed in Zhanjiang was 155 436 t in 2021, with bivalve accounting for 155 359 t and seaweed accounting for 77 t. According to the current CO₂ trading price in China's blue carbon market, the economic value created by the carbon sinks of bivalve and seaweed in Zhanjiang was 16.48 million RMB. Using the comprehensive method of carbon emission in the whole life cycle assessment, the net carbon sink of the bivalve in Zhanjiang City was 135 176 t, and the seaweed was 39 t. It is evident that Zhanjiang City has a high carbon sequestration capacity in marine bivalve cultivation, which can bring significant economic benefits through emission reduction, and making an important contribution to China's climate change solutions and achieving the "dual carbon" goals.

Key words: blue carbon; carbon sink; life-cycle assessment; bivalve; carbon footprint

近年来, 由全球变暖等气候异常引起的自然灾害频繁发生, 发展低碳经济, 减少温室气体排放, 扩大碳汇, 已成为应对全球气候变化、实现可持续发展的战略选择。通过海洋活动和海洋生物吸收大气中的CO₂并将其储存在海洋中的“蓝碳”概念正在引起全球对减缓气候变化方面的关注(Macreadie et al., 2019)。相较于植物通过光合作用吸收CO₂的过程, 海洋具有固碳量大、效率高、储存时间长的特点。森林、草原等陆地生态系统的碳储存周期只有几十年, 而海洋碳储存可以持续数百年甚至数千年(唐启升等, 2016)。在海洋碳汇中, 海水养殖碳汇是重要的组成部分(Siikamäki et al., 2013)。通过水产养殖促进水生生物吸收水体中的CO₂, 并通过收获把这些碳移出水体的过程, 尤其是不以饲料投放的贝藻类养殖, 能够充分发挥碳汇功能, 直接或间接吸收并储存水体中的CO₂, 降低大气中的CO₂浓度, 具有巨大的海洋“负碳排放”潜力(Ahmed et al., 2017; Kuwae et al., 2022)。贝类和藻类是海水养殖碳汇的主要贡献者。藻类通过光合作用将海水中的无机碳转化为生物体内的有机碳进行固定, 促进大气中的CO₂不断溶解到海水中, 从而降低大气中的CO₂浓度(Krause-Jensen et al., 2016; Pessarrodona et al., 2018; Yong et al., 2022)。滤食性贝类通过食物摄入过程从海水中去除大量颗粒有机碳, 并通过生物矿化作用形成贝壳(主要是碳酸钙), 实现对海水中碳的吸收和固定(Sharma et al., 2022)。不仅如此, 贝

类可通过生物碳泵功能促进水体中有机碳的沉积和封存, 对近海水域养殖区及邻近海域的碳循环产生重要影响(于佐安等, 2020; Dahl et al., 2021)。

中国是世界上水产养殖业最发达的国家, 贝藻类养殖占海水养殖产量的90%, 每年利用浅海生态系统固定的碳达350多万t, 相当于人工造林150万hm²(胡忠健, 2023)。因此, 开展水产养殖贝藻类碳汇核算, 不仅是顺应国家的政策导向和现实需求, 对于我国实施减排增汇战略和完成“双碳”目标同样具有重要意义。

我国“海洋渔业碳汇”发展起步较晚, 自唐启升院士提出渔业碳汇以来, 陆续有科学家对我国水产养殖贝藻类开展碳汇估算(邵桂兰等, 2019; 关洪军等, 2023)。张继红等(2005)根据能量收支模型以及贝藻类产量概算了2002年中国浅海生态系统养殖贝藻类的固碳量。在此基础上, 更多的学者选择以碳含量计量法, 根据从藻类或双壳贝类幼苗的初始投放到成体收获这一个养殖周期内碳储量变化来计算养殖贝藻类碳汇量(岳冬冬等, 2012; Fakhraini et al., 2020; 叶旺旺等, 2022; 谢宇阳等, 2023)。在水产养殖中, 贝类、藻类除了是“碳汇”, 养殖过程中的材料及能源投入以及食用后的废弃物处理都会带来碳排放, 有可能成为“碳源”。因此, 需要对贝藻类整个生命周期的碳汇进行核算, 但是还缺少完整的评估体系。

生命周期评价(LCA, life-cycle assessment)是一种用于评价产品或服务相关的环境因素及其整

个生命周期环境影响的工具,有助于量化产品过程中的能量输入和输出,以及废弃物的环境排放所造成的环境负载(Clune et al., 2017)。通过LCA我们可以更加准确地了解产品碳足迹,但直到最近10年才有学者将该方法应用于渔业和水产养殖研究(Henriksson et al., 2012; Tamburini et al., 2015; Burman et al., 2018; 孙威等, 2022)。

湛江市位于中国大陆最南端,海水养殖面积3.7万 hm^2 ,是广东省乃至全国重要的水产品生产和加工基地。贝藻类是湛江海水养殖的重要对象,但目前湛江市尚未对水产养殖贝藻类碳汇开展系统性、常态化的调查与统计,缺少海水养殖碳汇的相关数据。本研究将调查湛江市贝类和藻类养殖情况,开展海水养殖贝藻类碳汇储量监测和样本采集,进行海洋水产养殖碳汇计算,并基于贝藻类全生命周期碳排放,精准评估湛江市海水贝藻类养殖碳汇能力,为湛江市未来开展海水养殖碳汇交易、服务国家碳中和需求提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源

湛江市2021年海水养殖规模及养殖贝藻类的产量由湛江市农业农村局、统计局提供。

1.2 贝藻类样品采集方法

贝藻类样品的采集按照《GB/T 30891—2014 水产品抽样规范》进行。藻类采集:从养殖区提取上来的养殖绳中随机取5绳,分别从每绳的上、中、下段取藻体,各段取样不少于3株,每绳不少于10株;去除砂石等杂质后均质,再从所取样品中随机称取不少于400 g作为待检测样品。

贝类的采集:分别在海流的上、中、下游和海域的内、中、外层进行取样,将采集的贝类充分混合,随机选取,保证成贝的样品量 ≥ 3 kg,检样量 ≥ 700 g。将采集到的样品按品种分装于密封袋,记录样品名称、种类、取样量、取样日期等数据。将封装好的样品保持在低温状态($0\sim 10$ °C),及时将样品冷冻并送回实验室,并尽快对样品进行处理。

1.3 干湿比、质量比及含碳率的测定

藻类干湿比和含碳量的测定:将待检测的藻类样品用蒸馏水冲洗干净,控干表面水分,称量湿质量,于 60 °C烘干48 h至恒质量后记录干质量,计算干湿比。将烘干后的样品研磨成均匀粉末并过80目筛($178\ \mu\text{m}$),采用元素分析仪(Elemantar:

Vario EL cube,德国)测定藻体的含碳率。按照仪器的样品进样量要求进行样品的包埋,每份样品取3个平行样进行检测,取平均值进行计算。

贝类干湿比、质量比、碳含量测定:在养殖区随机采集贝类样本,用塑料刀或毛刷去除壳外附着的所有生物后清洗干净,将贝壳和软体部分分开,分别用蒸馏水洗涤,控干表面水分后称量湿质量,在 60 °C下干燥48 h至恒质量,记录干质量,然后分别计算贝壳和软体部分的干湿比和质量比。将干燥后的贝壳和软体部分磨成均匀的粉末,过80目筛。碳含量由元素分析仪测定,每个品种的贝壳做3个重复。贝壳和软体部分样品含碳形式不一样,因此采用不同类型的元素分析仪。贝壳主要成分是无机碳酸钙,取用碳硫元素分析仪(LECO CS230,美国)进行分析;软体部分主要为有机碳,采用有机元素分析仪(Elemantar: Vario EL cube,德国)进行分析。

1.4 海水养殖碳汇核算方法

海水养殖碳汇的核算方法采用《HY/T 0305—2021 养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法 碳储量变化法》,与标准不同之处在于:贝藻类幼体部分的碳储量相对于成体碳储量较低,不纳入计算。

1.5 生命周期评价方法

LCA是一种基于过程的清单分析,包括4个阶段:目标和范围定义、清单分析、影响评估和解释(ISO, 2006a; ISO, 2006b)。其中,清单分析是对产品,工艺过程或活动等研究系统整个生命周期阶段,资源和能源的使用及向环境排放废物进行定量的技术过程,也是LCA分析中的核心环节。通过行业从业人员走访、养殖户走访等调研获得水产养殖贝藻从育苗、收获到包装,包括所有生长阶段、设备、技术服装、材料、电力、燃料、水的使用,以及用于耕作的船只等基本设施投入等前景数据。结合公式,单一产品碳足迹可以通过生产过程中资源或能源的消耗/产出量与其对应碳排放因子的乘积之和进行计算;也可以通过OpenLCA™开源软件建模计算分析,据此得到养殖产品在生命周期内较为准确的碳排放数据,结合相应碳汇数据可以获得养殖贝藻类的净碳汇。本研究中的碳足迹数据是引用国内外相同贝藻养殖模式下的其他学者的研究数据,对净碳汇分析影响较小。

2 结果

2.1 湛江市海水养殖贝藻类产量

本研究通过湛江市农业农村局和统计局获得2021年湛江市水产养殖数据。湛江市各地级市、县、区2021年海水养殖贝类和藻类的产量及养殖面积如表1所示。湛江地处热带、亚热带, 海藻多为野生藻类, 至今没有大规模的海藻养殖。湛江市目前主要养殖的海藻种类包括马尾藻属、江蓠、礁膜等, 其中马尾藻和礁膜为试验性栽培, 尚未商业化养殖。龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*), 是目前湛江地区商业化栽培规模最大的种类, 主要栽培区域为东海岛, 2021年产量为507 t, 养殖面积为16 hm²。对于贝类来说, 遂溪县的海水养殖产量和面积均为最大, 雷州市仅次之, 麻章区的海水养殖面积低于东海岛, 但是养殖产量高于东海岛, 说明麻章区的海水养殖效率高于东海岛。开发区和赤坎区没有海水贝类养殖产业。

2021年湛江双壳贝类总产量达43.58万t, 主要养殖品类包括牡蛎、扇贝、贻贝、蛤、江珧和蛭。湛江市各地区主要养殖贝类品种及养殖产量见图1。牡蛎作为湛江产量最高的水产品, 产量接近22万t, 主要养殖地点为遂溪县、廉江市和麻章区海域。扇贝产量次之, 接近10万t, 主要产于雷州流沙湾和遂溪草潭镇, 多为吊笼养殖。蛤类等多见底播养殖, 主要产于遂溪县和雷州市附近滩涂区, 产量约8万t。贻贝的产量约为1.37万t, 主要产地为东海岛, 江珧主要产地为遂溪县, 产量

表1 湛江市2021年海水养殖贝藻类的产量及养殖面积

Table 1 Production and cultivation area of mariculture bivalve and seaweed in Zhanjiang in 2021

地区	海水养殖产量/t		海水养殖面积/hm ²	
	贝类	藻类	贝类	藻类
开发区	0	0	0	0
赤坎区	0	0	0	0
霞山区	6 984	0	114	0
坡头区	29 013	0	1 623	0
东海岛	33 568	507	2 437	16
麻章区	43 782	0	2 119	0
吴川市	530	0	30	0
徐闻县	24 122	0	2 243	0
雷州市	100 716	0	5 260	0
遂溪县	183 109	0	5 615	0
廉江市	36 350	0	767	0

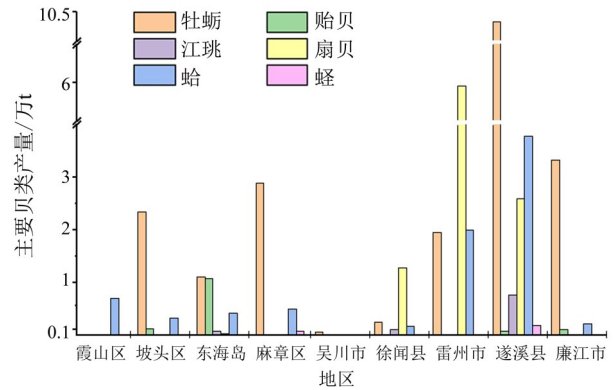


图1 湛江市各地区2021年主要贝类养殖产量

Fig. 1 Major bivalve aquaculture production in each region of Zhanjiang in 2021

不超过1万t。蛭是所有贝类中产量最低的, 仅2 700 t, 主要分布于麻章区和遂溪县。

2.2 湛江市养殖贝藻类干湿比及含碳率

经测定, 湛江市商业化养殖藻类龙须菜的干湿比为12.55%, 含碳率为(32.90 ± 0.70)%。湛江常见双壳贝类的干湿比、贝壳及软体部分的质量比和含碳率见表2。不同种类贝类贝壳部分的平均含碳量为12.22%, 与碳酸钙的含碳量(11.99%)基本相同, 说明贝类的贝壳部分基本为碳酸钙。湛江双壳类贝类软体部分含碳量为35.50%~44.00%, 平均值为39.26%, 与常见贝类含碳率推荐数值不完全一致, 原因是不同海域的营养条件不同, 导致贝类软体部分成分存在一定差异。

2.3 湛江市海洋水产养殖碳汇核算

2021年湛江市海水养殖主要贝藻类碳汇结果(以CO₂计)以及各品类占总碳汇的百分比见图2。牡蛎的碳汇最高, 达81 762 t, 占总碳汇量的52.60%; 其次为扇贝, 碳汇为34 440 t, 占总碳汇量的22.16%; 由于湛江大型藻类的养殖不多, 只占总碳汇量的0.05%, 可忽略不计。

此外, 贝类软体部分储存的有机碳很容易转化, 重新进入碳循环, 而贝壳部分的碳是无机碳酸钙, 能长期储存在环境中。本研究对各品种贝类的贝壳部分和软体部分碳汇分别进行了计算, 结果见图3。各品种双壳贝类的贝壳部分碳汇占比为39.0%~87.0%, 牡蛎贝壳部分的碳汇占比最高(87.0%), 蛭的占比最低(39.0%)。就整体而言, 贝壳部分占总碳汇的80%以上, 说明贝类具有很大的固碳潜力。当CO₂被以CaCO₃的形式封存于贝壳中, 可使其长期脱离碳循环, 因而对碳捕集和封存的贡献最大, 对碳减排的作用最明显。

表2 双壳贝类的干湿比、贝壳及软体部分的质量比和含碳率
Table 2 Wet-dry ratio, mass ratio and carbon content of shell and soft part of bivalve %

品种	干湿比	贝壳部分		软体部分	
		质量比	含碳率	质量比	含碳率
华贵栉孔扇贝 (<i>Mimachlamys nobilis</i>)	65.78	91.64	12.20 ± 0.17	8.36	39.73 ± 1.26
丽文蛤 (<i>Meretrix lusoria</i>)	76.63	93.34	12.13 ± 0.06	6.66	35.50 ± 1.57
方形马珂蛤 (<i>Macra veneriformis</i>)	63.97	90.87	12.37 ± 0.46	9.13	40.53 ± 0.46
尖紫蛤 (<i>Hiatula acuta</i>)	44.07	67.03	12.97 ± 0.12	32.97	42.63 ± 0.83
菲律宾蛤仔 (<i>Ruditapes philippinarum</i>)	69.86	92.20	11.47 ± 0.68	7.80	38.57 ± 0.21
波纹横帘蛤 (<i>Paphia undulatu</i>)	66.54	88.71	11.33 ± 0.35	11.29	35.83 ± 0.68
缢蛏 (<i>Sinonovacula constricta</i>)	40.73	68.47	12.23 ± 0.49	31.53	41.47 ± 0.25
翡翠贻贝 (<i>Perna viridis</i>)	65.61	91.64	13.87 ± 0.23	8.36	38.17 ± 0.68
白贝 (<i>Monetaria moneta</i>)	81.62	95.98	12.17 ± 0.12	4.02	38.77 ± 1.23
文蛤 (<i>Meretrix meretrix</i>)	84.89	97.59	12.17 ± 0.12	2.41	36.80 ± 1.11
中国江珧 (<i>Atrina chinensis</i>)	53.09	82.43	12.00 ± 0.50	17.57	39.33 ± 0.25
近江牡蛎 (<i>Magallana ariakensis</i>)	78.53	96.17	11.73 ± 0.06	3.83	44.00 ± 2.44

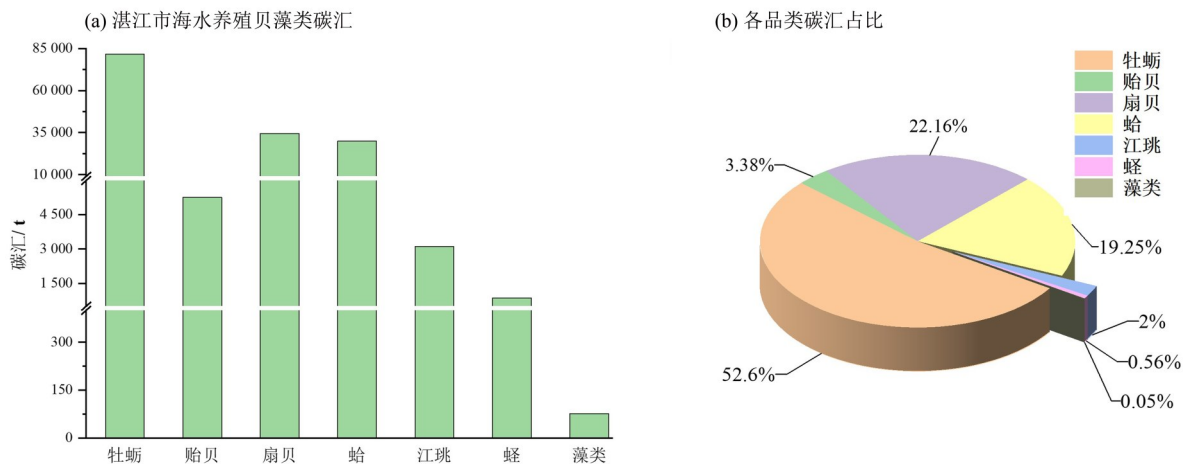


图2 湛江市海水养殖贝藻类碳汇及各品类的碳汇占比

Fig. 2 Carbon sink of maricultured bivalve and seaweed in Zhanjiang and the percentage of carbon sink of each category

2021年湛江市各地区海水贝藻类养殖碳汇总量及碳汇占比情况如图4所示。遂溪县碳汇最高, 达63 764 t, 占湛江海水贝藻养殖碳汇的41.0%; 其次是雷州市, 碳汇为35 587 t, 占22.9%; 坡头区、东海岛、麻章区和连江市的碳汇相当, 分别占总碳汇的6.7%、6.5%、8.3%和8.7%; 吴川市碳汇最低, 仅为187 t, 仅占总碳汇的0.1%。结合湛江市各区市的养殖种类及产量, 可发现养殖产量、养殖面积与碳汇大小成正相关关系, 这为今后提高湛江市碳汇提供了数据支持。

2.4 湛江市养殖贝藻类全生命周期碳排放及净碳汇量

湛江市养殖贝藻类产品碳排放数据见表3。根

据孙威等(2022)的研究结果表明, 在整个养殖周期内, 养殖1 t藻类的碳排放约为74.30 kg CO₂, 结合藻类养殖产量可估算, 湛江市养殖大型藻类在整个养殖周期内的碳排放约为37.67 t, 全生命周期内养殖大型藻类的净碳汇量为39 t。平均养殖1 t大型藻类的碳足迹为-77.10 kg CO₂-eq, 其中“-”表示负排放(下同)。

水产养殖贝类的生命周期碳排放量会因品种的不同而存在一定差异(表3)。基于每收获1 t贝类产品CO₂的排放量, 可知湛江市在养殖周期内, 贝类从养殖初期到收获期CO₂总排放量为20 221 t。本研究中, 2021年湛江市贝类总碳汇为155 359 t

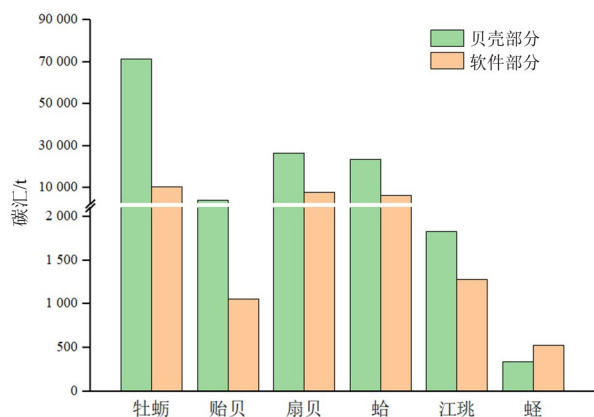


图3 湛江市主要养殖贝类的贝壳部分和软体部分碳汇

Fig. 3 Carbon sink of shell and soft part of main cultured bivalve in Zhanjiang

(图2), 减去养殖周期中CO₂的总排放量, 湛江市养殖贝类净碳汇为135 176 t。经计算, 平均养殖1 t双壳贝类的碳足迹为-319.20 kg CO₂-eq, 显著低于大型藻类的碳足迹(-77.10 kg CO₂-eq)。

2.5 湛江市养殖贝藻类碳汇价值评估

2021年湛江市海水养殖贝藻类的碳汇总量为155 436 t, 其中藻类的总碳汇为77 t, 约占总碳汇

的0.05%, 占比极小。贝类总碳汇为155 359 t, 其中牡蛎占52.60%, 其次是扇贝和蛤类, 分别占22.16%和19.25%。按照我国目前蓝碳交易市场中106元/t的CO₂交易价格(汪文正, 2023), 湛江市贝类和藻类碳汇创造的经济价值相当于1 648万元。由此可见, 养殖贝藻类不仅通过自身的商品市场交易创造价值, 还可以移除水生生物汇集的碳, 提高水生态系统吸收和存储碳的能力, 并通过碳汇交易实现渔业养殖“绿色收入”增加。

3 讨论

3.1 湛江市养殖贝藻类碳汇核算方法评价

本研究在碳储量变化法基础上, 结合LCA对湛江市海水贝藻养殖碳汇进行了较为全面的分析, 充分证明了海水贝藻养殖具有强大的渔业碳汇功能。贝类和藻类作为海洋生物碳泵, 在养殖过程中能降低海水CO₂分压, 而为了维持海水中CO₂分压的平衡, 大气中的CO₂将进一步向海水中溶解, 从而缓解陆地温室效应。不仅如此, 本研究结果对于海水养殖贝藻到底是“碳汇”还是“碳源”问题也做出了明确的回答。当然, 在本研究中还存在

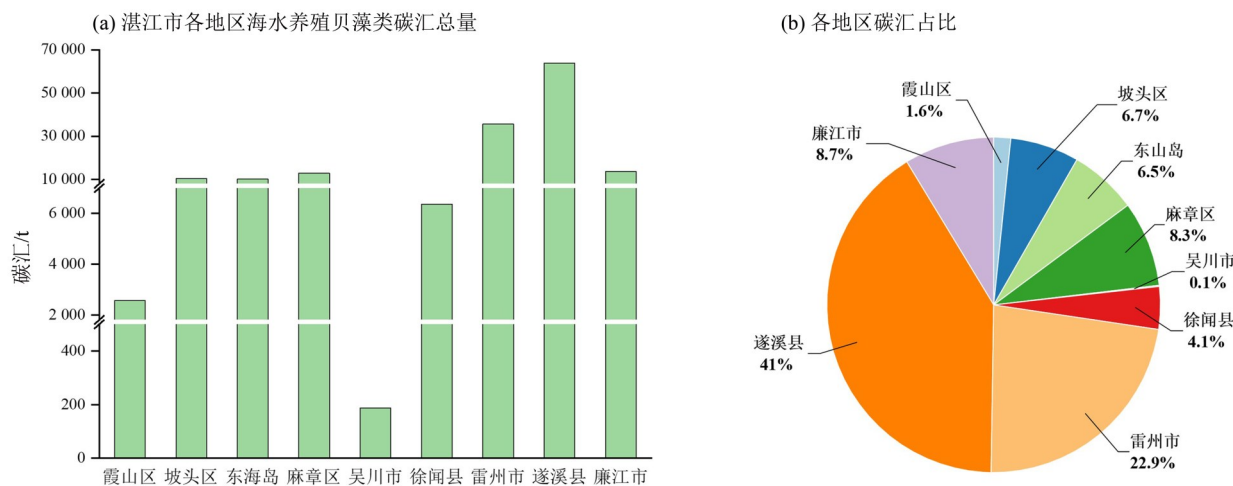


图4 湛江市各地区海水养殖贝藻类碳汇总量及其占比

Fig. 4 Total carbon sink and percentage of maricultured bivalve and seaweed in each region of Zhanjiang

表3 湛江市养殖贝藻类产品碳排放数据

Table 3 Carbon emission data of cultured bivalve and seaweed products in Zhanjiang

品种	收获1 t产品CO ₂ 排放量/kg	产品量/t	CO ₂ 总排放量/t	净碳汇(以CO ₂ 计)/t
藻类	74.30 (孙威等, 2022)	507	38	39
牡蛎	60.2 (颜铭呈, 2014)	218 997	13 184	68 578
蛤	22 (Tamburini et al., 2022)	80 586	1 773	28 155
贻贝	55 (Tamburini et al., 2022)	13 743	756	4 501
其他双壳贝类	40.4 (Ray et al., 2018)	110 665	4 471	33 941

一些情况需要说明,具体如下。

首先,在计算贝类养殖的碳汇时,本研究没有将鲍鱼、螺等单壳贝类涵盖在内,主要有两方面原因:一是单壳贝类养殖面积和养殖产量占比不大,湛江市单壳贝类养殖产量约占 6.8%;更重要的原因是,渔业碳汇的贝类主要是指滤食性贝类,而单壳贝类不仅以藻类为食,更多的是肉食性或食腐性,这一部分的碳汇会在其他地方进行计算,因此不在渔业碳汇中重复计算(肖乐等,2010)。

其次,根据《HY/T 0305—2021 养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法 碳储量变化方法》中规定的碳汇算法,贝藻类单位培养周期的碳储量变化应从幼苗播种时的碳储量中减去。由于播种的幼苗数量与收获成体总量并不严格成正比,而且会受到养殖水平、海洋营养状况以及台风、暴雨等极端天气的影响。另外,由于幼苗数量少,相对于成体的碳储量,可以忽略不计。因此,这里的贝藻类碳汇只计算了收获成体部分的碳储量,忽略了幼苗部分。在中国各省市贝类碳汇计算中,大部分学者研究中的贝类产量数据均来自《中国渔业统计年鉴》的统计数据,该统计数据只统计了成体藻类和贝类的产量,没有包括贝藻类幼苗的数据。因此,其他研究者在计算海水养殖碳汇的过程中也同样忽略了幼苗的碳储量。

最后,在运用 LCA 评估养殖贝藻类碳排放时,忽略了 LCA 是一种典型的静态而非动态的方法,其本身在过程的划分中就存在一定的主观性,而时间和空间的动态变化也会显著影响评价结果。不仅如此,产品生产、使用和废弃处置的时间模式也会影响 LCA 结果的准确性。在计算中,由于缺乏湛江市当地养殖过程相关详细资料,计算过程中使用的碳足迹(即“收获 1 t 产品 CO₂ 排放量”)是引用他人近几年研究中的具体数值,养殖模式与湛江市较为一致,具有较大的参考价值。但不可否认的是,这些数据来自国内外,尽管养殖模式与湛江市基本一致,但养殖过程的能耗不尽相同,存在一定误差。在养殖模式不断优化和能源结构不断调整的今天,想获得更为准确的碳足迹

数据,还需要对湛江市海水养殖贝藻的碳排放过程进行深入且细致的研究。

3.2 湛江市养殖贝藻类碳汇潜力提升及建议

为进一步明确贝藻类养殖碳汇的贡献,将其与湛江市其他海洋碳汇进行对比分析。2021 年湛江市海洋碳汇总量为 29.27 万 t,其中水产养殖、红树林、盐沼和海草床的碳汇量分别为 15.54 万、9.40 万、4.24 万和 0.1 万 t,占比分别为 53.10%、32.10%、14.46% 和 0.34%(未发表数据)。从这些数据中不难看出,湛江市渔业碳汇是湛江市海洋碳汇的最重要组成部分,是固碳增汇的主要抓手。

虽然贝藻类养殖碳汇的预期较为乐观,但是不可否认的是贝藻类的养殖规模受到气候、空间及消费需求等诸多因素的限制,可能会导致未来的碳汇强度达不到预期。不仅如此,湛江市的碳汇渔业绝大部分都是贝类养殖,藻类养殖占比极低(0.05%)。从长远来看,这将限制湛江市贝藻类养殖规模,进而影响未来海水贝藻类养殖碳汇容量。因此,合理提高藻类的养殖量,一方面可以改善湛江市贝藻养殖结构,另一方面也有助于保护水生生物多样性,对湛江市未来发展可持续性碳汇具有重要的意义。

在提高贝藻类养殖碳汇强度方面,除了养殖模式结构的调整,还可以从研发提高养殖单产技术、合理安排养殖区域的捕捞制度、减少养殖区域碳排放、促进养殖区域废弃物的资源化利用等方面入手。例如构建多营养层次综合养殖模式,即利用不同营养级层次生物的生态学特性,在养殖环节使营养物质循环重复利用,不仅可以减少养殖自身的污染,还可以增加经济效益(李强等,2023)。在政策方面,政府可以对碳汇渔业市场进行研究,制定合理的补贴与激励机制,充分激发渔民和消费者对增加渔业碳汇量的积极性,使碳汇渔业发展成为多元主体共同参与的碳减排工程。同时,开展渔业碳汇定价机制和标准制定研究,探索建立渔业碳汇上市交易制度,促进水产养殖渔业碳汇生态服务补偿,实现海洋渔业碳汇价值。

参考文献:

关洪军,陈玉环,赵爱武,2023. 中国海洋渔业碳中和能力评估[J]. 中国农业科技导报, 25(4): 215-224.
胡忠健,2023. 温州碳汇渔业现状及升级措施建议[J]. 新农村, 3: 15-16.

李强,张云霞,2023. 辽宁省海洋渔业现状与高质量发展对策研究[J]. 中国渔业经济, 41(2):82-89.
邵桂兰,刘冰,李晨,2019. 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,39(7):2614-2625.
- 孙威,张继红,吴文广,等,2022.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,43(5):16-23.
- 唐启升,刘慧,2016.海洋渔业碳汇及其扩增战略[J].中国工程科学,18(3):68-73.
- 汪文正,2023.“蓝碳”经济成为新“蓝海”[N].人民日报(海外版),2023-04-05(11).
- 肖乐,刘禹松,2010.碳汇渔业对发展低碳经济具有重要和实际意义 碳汇渔业将成为新一轮渔业发展的驱动力——专访中国科学技术协会副主席、中国工程院院士唐启升[J].中国水产,8:4-8.
- 谢宇阳,苏洁,邵魁双,等,2023.海洋渔业碳汇计量与评估方法研究进展[J].河北渔业,354(6):39-46.
- 颜铭呈,2014.牡蛎养殖之碳足迹估算-以七股牡蛎养殖为例[D].台南:成功大学.
- 叶旺旺,张麋鸣,孙恒,等,2022.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,41(4):715-723.
- 于佐安,谢玺,朱守维,等,2020.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,35(3):382-386.
- 岳冬冬,王鲁民,2012.中国海水贝类养殖碳汇核算体系初探[J].湖南农业科学,(15):120-122+130.
- 张继红,方建光,唐启升,2005.中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J].地球科学进展,20(3):359-365.
- AHMED N, BUNTING S W, GLASER M, et al, 2017. Can greening of aquaculture sequester blue carbon? [J]. *Ambio*, 46(4): 468-477.
- BURMAN N W, CROFT J, ENGELBRECHT S, et al, 2018. Review: Life-cycle assessment, water footprinting, and carbon footprinting in Portugal [J]. *Int J Life Cycle Assess*, 23(8): 1693-1700.
- CLUNE S, CROSSIN E, VERGHESE K, 2017. Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories[J]. *J Clean Prod*, 140: 766-783.
- DAHL M, BJÖRK M, GULLSTRÖM M, 2021. Effects of seagrass overgrazing on sediment erosion and carbon sink capacity: Current understanding and future priorities [J]. *Limnol Oceanogr Lett*, 6(6): 309-319.
- FAKHRAINI M S, WISNU W, KHATHIR R, et al, 2020. Carbon sequestration in macroalgae *Kappaphycus striatum* in seaweed aquaculture site, Alaang village, Alor Island, East Nusa Tenggara [J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 404(1): 012044.
- HENRIKSSON P J G, GUINÉE J B, KLEIJN R, et al, 2012. Life cycle assessment of aquaculture systems: A review of methodologies [J]. *Int J Life Cycle Assess*, 17(3): 304-313.
- ISO, 2006a. Environmental management: Life-cycle assessment: Principles and framework: ISO 14040[S]. Geneva:[s.n.].
- ISO, 2006b. Environmental management: Life cycle assessment: Requirements and guidelines: ISO 14044[S].Geneva:[s.n.].
- KRAUSE-JENSEN D, DUARTE C M, 2016. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration[J]. *Nat Geosci*, 9: 737-742.
- KUWAE T, WATANABE A, YOSHIHARA S, et al, 2022. Implementation of blue carbon offset crediting for sea-grass meadows, macroalgal beds, and macroalgae farming in Japan [J]. *Mar Policy*, 138: 104996.
- MACREADIE P I, ANTON A, RAVEN J A, et al, 2019. The future of Blue Carbon science[J]. *Nat Commun*, 10: 3998.
- PESSARRODONA A, MOORE P J, SAYER M D J, et al, 2018. Carbon assimilation and transfer through kelp forests in the NE Atlantic is diminished under a warmer ocean climate[J]. *Glob Chang Biol*, 24(9): 4386-4398.
- RAY N E, O'MEARA T, WILIAMSON T, et al, 2018. Consideration of carbon dioxide release during shell production in LCA of bivalves [J]. *Int J Life Cycle Assess*, 23(5): 1042-1048.
- SHARMA D, BISWAS H, BANDYOPADHYAY D, 2022. Simulated ocean acidification altered community composition and growth of a coastal phytoplankton assemblage (South West coast of India, eastern Arabian Sea) [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 29(13): 19244-19261.
- SIKAMÄKI J, SANCHIRICO J N, JARDINE S, et al, 2013. Blue carbon: Coastal ecosystems, their carbon storage, and potential for reducing emissions[J]. *Environ Sci Policy Sustain Dev*, 55(6): 14-29.
- TAMBURINI E, PEDRINI P, MARCHETTI M, et al, 2015. Life cycle based evaluation of environmental and economic impacts of agricultural productions in the Mediterranean area[J]. *Sustainability*, 7(3): 2915-2935.
- TAMBURINI E, TUROLLA E, LANZONI M, et al, 2022. Manila clam and Mediterranean mussel aquaculture is sustainable and a net carbon sink [J]. *Sci Total Environ*, 848: 157508.
- YONG W T L, THIEN V Y, RUPERT R, et al, 2022. Seaweed: A potential climate change solution [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 159: 112222.