山东长岛海水养殖碳汇核算与能力评估

洪旭光[1,2]，王凯[3]，宋洪军[1,2]，初建松[3]，张朝晖[1,2]

（1.自然资源部第一海洋研究所 青岛 266061；
2.自然资源部渤海海峡生态通道野外科学观测研究站 青岛 266061；
3.中国海洋大学海洋生命学院 青岛 266003）

摘要：为促进长岛碳汇渔业的发展和国家公园的建设，文章首次核算长岛海域养殖贝藻类的碳汇数据，综合评估长岛海水养殖的碳汇能力及其影响因素，并提出对策建议。研究结果表明：长岛海水养殖具有一定的碳汇能力，2016—2020年长岛海域养殖贝藻类的平均碳汇量为2.94万t，其中贝类尤其是扇贝的碳汇量显著高于藻类；养殖结构和养殖产量是长岛海水养殖碳汇能力的主要影响因素，其中养殖产量又受养殖规模、环境、方式和技术等因素的影响；未来长岛发展碳汇渔业应进一步优化海水养殖结构、建立海水养殖碳汇核算体系以及制定和实施相关政策。

关键词：海水养殖；碳汇渔业；碳汇能力；碳汇量；碳汇转化比

中图分类号：F326.4；P745 **文献标志码**：A **文章编号**：1005－9857(2022)08－0012－05

Carbon Sink Accounting and Capacity Assessment of Mariculture in Changdao, Shandong Province

HONG Xuguang[1,2], WANG Kai[3], SONG Hongjun[1,2], CHU Jiansong[3], ZHANG Zhaohui[1,2]

(1.First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;
2.Observation and Research Station of Bohai Strait Eco-Corridor, MNR, Qingdao 266061, China;
3.College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: In order to promote the development of the carbon sink fisheries and the construction of national parks in Changdao, this paper calculated the carbon sink data of marine bivalves and seaweeds in Changdao for the first time, comprehensively evaluated the carbon sink capacity of mariculture in Changdao and its influencing factors, and put forward countermeasures and suggestions. The results showed that mariculture in Changdao had a certain carbon sink capacity. The average carbon sink of shellfish cultured in Changdao from 2016 to 2020 was 29 400 tons, and the carbon sink of shellfish, especially scallop, was significantly higher than that of algae; the structure and yield of mariculture were the main factors affecting the carbon sink capacity of

收稿日期：2021-12-08；**修订日期**：2022-07-03

基金项目：国家重点研发计划课题项目(2018YFD0900806).

作者简介：洪旭光，高级工程师，博士，研究方向为海洋生态保护与修复

通信作者：张朝晖，研究员，博士，研究方向为海洋保护地管理

Changdao mariculture, and the yield of mariculture was also affected by the scale, environment and technology. In the future, the development of carbon sink fisheries in Changdao should further optimize mariculture structure, establish mariculture carbon sink accounting system, and formulate and implement related policies.

Keywords: Mariculture, Carbon sink fisheries, Carbon sink capacity, Carbon sink, Carbon sink conversion ratio

0　引言

海洋是地球上最大的碳库，海洋生态系统固定的碳分别是大气和陆地生态系统的 50 倍和 20 倍[1]，海洋碳汇越来越受到社会各界的重视[2]。海洋渔业是重要的海洋生产活动，除产生经济效益外，还是海洋碳汇体系的重要组成部分[3-4]。碳汇渔业具体包括贝藻类养殖、滤食性鱼类养殖、增殖放流、海洋牧场和海洋捕捞等生产活动[4]。其中，贝藻类是我国海水养殖的主要品种，其生产活动通常无须投饵，且具有高效的碳汇功能；贝藻类养殖的碳汇过程包括 2 个部分，一方面可通过收获养殖贝藻类从海水中移除碳，另一方面可通过养殖贝类的生物泵和碳酸盐泵以及养殖藻类的光合作用从海水中吸收碳[5]。其中，滤食性贝类的滤水能力很强，可通过滤食水体中的悬浮有机碳颗粒显著降低海水中的含碳量[6-8]。

国内对于海水养殖碳汇核算与能力评估已开展许多研究工作。齐占会等[9]、李昂等[10]和邵桂兰等[11]基于《中国渔业统计年鉴》的数据分别核算广东、河北和山东等地海水养殖的碳汇量；邵桂兰等[12]进一步评估我国 9 个沿海地区的海水养殖碳汇能力，并分析区域差异及其主要影响因素。海水养殖碳汇核算与能力评估是配置碳补偿额度和建立碳交易市场的基础，对于促进我国生态用海管理工作也具有重要意义[13]。

长岛位于渤海海峡的黄、渤海交汇处，史称庙岛群岛，又名长山列岛，2018 年 6 月“长岛海洋生态文明综合试验区”正式设立。长岛拥有丰富的海洋资源，海洋渔业一直是其支柱产业和民生产业，海洋渔业产值占其生产总值的 60%[14]。长岛是我国著名的海带鲍鱼之乡，贝藻类养殖的产量较高。随着国家公园创建工作的逐步推进，长岛启动全国首个海洋类国家公园的申报工作。因此，更好地平衡海洋生态环境保护与海洋渔业发展成为长岛面临的重要工作任务。

本研究根据 2016—2020 年长岛海水养殖的统计数据，首次核算长岛海域养殖贝藻类的碳汇量和碳汇价值量，并综合评估其碳汇能力，以期为长岛海水养殖业的发展和国家公园的建设提供参考，并促进长岛发展碳汇渔业。

1　数据与方法

1.1　数据来源

本研究主要分析通过收获养殖贝藻类移除碳的碳汇情况。数据来源于历年《山东省渔业统计年报》，根据养殖面积和产量等数据分析 2016—2020 年长岛海域贝藻类养殖状况、碳汇能力及其碳汇价值量。各种贝藻类的含碳率根据相关文献资料确定。

1.2　碳汇量和碳汇转化比

长岛海域贝类的统计对象包括牡蛎（*Ostrea gigas*）、贻贝（*Mytilus edulis*）、扇贝（Pectinidae）和鲍鱼（*Abalone*），藻类的统计对象包括海带（*Laminaria japonica*）、裙带菜（*Undaria pinnatifida*）和紫菜（*Porphyra*）。

参考邵桂兰等[11]的研究方法，贝藻类碳汇量为贝类固碳量与藻类固碳量之和。其中：

贝类固碳量＝软组织含碳量＋贝壳含碳量

软组织含碳量＝贝类产量×φ_1×ω_1

贝壳含碳量＝贝类产量×φ_2×ω_2

式中：φ_1和 φ_2分别表示软组织和贝壳的质量比重；ω_1和 ω_2分别表示软组织和贝壳的含碳率。

藻类固碳量＝藻类产量×λ

式中：λ 表示藻类的含碳率。藻类干重比为 20%。

贝类碳汇核算参数和贝藻类的含碳率如表 1 和表 2 所示。

表 1 贝类碳汇核算参数[15] %

品种	湿、干重转换系数	质量比重	
		软组织	贝壳
牡蛎	65.10	6.14	93.86
贻贝	75.28	8.47	91.53
扇贝	63.89	14.35	85.65
其他(鲍鱼)	64.21	11.41	88.59

表 2 贝藻类的含碳率

品种		含碳率/%
贝类[3]	牡蛎	45.95(软组织) 12.68(贝壳)
	贻贝	44.40(软组织) 11.76(贝壳)
	扇贝	42.84(软组织) 11.40(贝壳)
	其他(鲍鱼)	43.87(软组织) 11.44(贝壳)
藻类	海带[16]	31.20
	裙带菜[17]	26.40
	紫菜[18]	38.19

碳汇转化比是衡量海水养殖碳汇能力的重要依据之一。根据邵桂兰等[12]的研究方法,碳汇转化比为碳汇量与产量的比值。

1.3 碳汇价值量

《联合国气候变化框架公约的京都议定书》预计工业化国家减排二氧化碳的费用为 150～600 美元/t,折合人民币为 975～3 900 元/t,据此评估养殖贝藻类的碳汇价值量[9-10],具有一定的社会和经济价值。

2 结果与分析

2.1 长岛海域贝藻类养殖状况

2016—2020 年长岛海域贝藻类养殖面积和产量如图 1 所示。

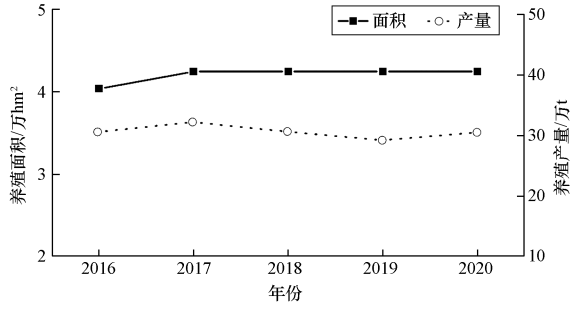

图 1 2016—2020 年长岛海域贝藻类养殖面积和产量

2016—2020 年长岛海域贝藻类养殖面积和产量均较为稳定,年均养殖面积约为 4.21 万 hm^2(贝类约为 3.73 万 hm^2,藻类约为 0.48 万 hm^2),年均养殖产量约为 30.62 万 t(贝类约为 25.90 万 t,藻类约为 4.72 万 t);其中,养殖面积和产量最大的品种均为扇贝,养殖面积约为 2.86 万 hm^2,养殖产量约为 10.80 万 t。

2.2 碳汇量和碳汇转化比

2016—2020 年长岛海域养殖贝藻类的碳汇数据如表 3 所示。

表 3 2016—2020 年长岛海域养殖贝藻类的碳汇数据

项目		2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均值
贝类	养殖面积/万 hm^2	3.61	3.72	3.72	3.80	3.80	3.73
	养殖产量/万 t	26.04	27.31	25.28	24.77	26.12	25.90
	碳汇量/万 t	2.68	2.80	2.59	2.52	2.65	2.65
	碳汇转化比/%	10.29	10.25	10.25	10.17	10.15	10.22
藻类	养殖面积/万 hm^2	0.42	0.53	0.53	0.45	0.45	0.48
	养殖产量/万 t	4.54	4.89	5.36	4.43	4.38	4.72
	碳汇量/万 t	0.28	0.30	0.33	0.28	0.27	0.29
	碳汇转化比/%	6.17	6.13	6.16	6.32	6.16	6.19
总碳汇量/万 t		2.96	3.10	2.92	2.80	2.92	2.94
总碳汇转化比/%		9.68	9.63	9.53	9.59	9.57	9.60

由表 3 可以看出:2016—2020 年长岛海域养殖贝藻类的平均碳汇量为 2.94 万 t,其中贝类为 2.65 万 t,藻类为 0.29 万 t;贝类的碳汇量显著高于藻类,碳汇量最大的为贝类中的扇贝(约为 1.10 万 t)。

从年际变化来看,2016—2020 年长岛海域养殖贝藻类碳汇量的整体变化较小(图 2)。

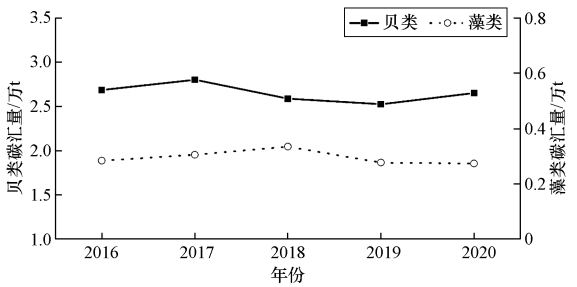

图 2 2016—2020 年长岛海域养殖贝藻类的碳汇量

2.3 碳汇价值量

根据《山东省渔业统计年报》,2016—2020 年长岛海水养殖产值的平均值约为 591 170.2 万元。根据本研究计算数据,2016—2020 年长岛海域养殖贝

藻类的平均碳汇量为 2.94 万 t，相当于平均减排二氧化碳 10.78 万 t（按照 C/CO_2 为 3/11 换算），平均碳汇价值量为 10 510.5 万～42 042.0 万元，占海水养殖产值平均值的 1.78%～7.11%。

3　讨论

3.1　长岛海域养殖贝藻类的碳汇能力

碳汇量和碳汇转化比是衡量海水养殖碳汇能力的主要标准和重要依据[12]。由于贝类和藻类的生物结构不同，其碳汇转化比有所不同。其中，藻类的含水量较高而干重较低，因此含碳量较低；贝类作为软体动物，其含水量较高的软组织重量占比小于 10%，而贝壳的干重比和含碳率均较高，因此贝类的碳汇转化比显著高于藻类[19-21]。

从碳汇量来看，2016—2020 年长岛海域养殖贝藻类的平均碳汇量为 2.94 万 t，其中贝类为 2.65 万 t，显著高于藻类的 0.29 万 t。从碳汇转化比来看，2016—2020 年长岛海域养殖贝藻类的平均碳汇转化比为 9.60%，其中贝类为 10.22%，同样显著高于藻类的 6.19%。总体来看，长岛海域养殖贝藻类具有一定的碳汇能力，为碳汇渔业做出一定的贡献。长岛海域倾向于贝类养殖的养殖结构促使贝类养殖产量提高，进而带来较高的碳汇量，加上贝类具有较高的碳汇转化比，因此贝类成为长岛海水养殖碳汇能力较强的品种。

3.2　长岛海水养殖碳汇能力的影响因素

养殖结构是长岛海水养殖碳汇能力的主要影响因素之一。由于各养殖品种因本身结构特性不同导致碳汇能力不同，在布局养殖生产活动时，可结合养殖品种的碳汇能力和养殖需求优化养殖结构，提高扇贝等碳汇能力较强品种的养殖占比，从而整体提高长岛海水养殖碳汇能力。

养殖产量决定碳汇能力的规模效应[12]，贝藻类的养殖产量越高，其带来的碳汇量越高。养殖产量受养殖规模的影响，而养殖规模主要受政策调控的影响，2017 年以来长岛加强对海洋生态环境的管理和保护力度，积极处理养殖筏架，避免过多无机氮排入海洋，2019 年按照“生态优先、规划引导、保障民生”的原则完成近海养殖腾退 840 hm^2；养殖规模同时受市场因素的影响，养殖水产品收购价格越高，养殖户收益越高，其养殖积极性越高，有利于扩大养殖规模。此外，养殖产量也受养殖环境、养殖方式和养殖技术的影响。例如：海水温度较低和营养盐缺乏会抑制藻类的光合作用；海洋微生物（如条件致病菌）会感染鱼、虾和贝等海洋经济动物[22-23]；筏式养殖更有利于贝类的生长[24]。这些因素都会影响贝藻类养殖产量，进而影响其碳汇能力。

总体来看，长岛须在选择适宜养殖品种的基础上改善养殖环境和改进养殖方式，并通过获得政府和市场的双重支持扩大养殖规模，从而提高海水养殖碳汇能力。

3.3　对策建议

3.3.1　优化海水养殖结构

在长岛海洋生态环境承载力范围内优化贝藻类养殖结构，建设海水增养殖产业化基地，建立多营养层次的综合养殖模式，以获得更多的碳汇量。加大科研投入力度，加强对高碳汇能力新养殖品种的研究和筛选，通过研发清洁生产和减排技术等发展绿色养殖，推动碳汇渔业的发展。

3.3.2　建立海水养殖碳汇核算体系

除本研究分析的养殖贝藻类外，鱼类也是长岛海水养殖的重要组成部分，后续须进一步调查分析长岛海域养殖鱼类的“碳汇”和“碳源”问题并进行碳汇核算，整体评估长岛海水养殖碳汇能力及其带来的生态和经济效益。

3.3.3　制定和实施碳汇渔业政策

政府在激励碳汇渔业的发展中发挥重要作用。一方面，建立碳汇渔业的生态补偿制度，以税收或补贴的方式提高渔民从事碳汇渔业的积极性；另一方面，加快碳汇交易的市场化进程，促进更多渔民参与碳汇交易，推动碳汇渔业的发展。

4　结语

2016—2020 年长岛海域养殖贝藻类的平均碳汇量为 2.94 万 t，具有一定的碳汇能力，其中贝类尤其是扇贝的碳汇量显著高于藻类，带来一定的社会和经济效益。长岛海水养殖碳汇能力的影响因素主要包括养殖结构和养殖产量，未来长岛亟须合理优化海水养殖结构、加快建立海水养殖碳汇核算体

系以及大力发展碳汇渔业，更好地平衡海水养殖的社会、经济和生态效益，保障长岛国家公园的顺利建设。

参考文献

[1] KHATIWALA S, PRIMEAU F, HALL T. Reconstruction of the history of anthropogenic CO_2 concentrations in the ocean [J]. Nature, 2009, 462: 346－349.

[2] 焦念志，刘纪化，石拓，等.实施海洋负排放践行碳中和战略[J].中国科学：地球科学，2021，51(4)：632－643.

[3] 张继红，方建光，唐启升.中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J].地球科学进展，2005，20(3)：359－365.

[4] 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.

[5] 张继红，刘纪化，张永雨，等.海水养殖践行“海洋负排放”的途径[J].中国科学院院刊，2021，36(3)：252－258.

[6] ZHOU Y, YANG H, ZHANG T, et al. Influence of filtering and biodeposition by the cultured scallop *Chlamys farreri* on benthic-pelagic coupling in a eutrophic bay in China[J]. Marine Ecology Progress Series, 2006, 317: 127－141.

[7] CERRATO R M, CARON D A, LONSDALE D J, et al. Effect of the northern quahog *Mercenaria mercenaria* on the development of blooms of the brown tide alga *Aureococcus anophagefferens* [J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 281: 93－108.

[8] BACHER C, BIOTEAU H, CHAPELLE A. Modeling the impact of a cultivited oyster population on the nitrogen dynamics: the Thau Lagoon Case (France)[J]. Ophelia, 1995, 42: 29－54.

[9] 齐占会，王珺，黄洪辉，等.广东省海水养殖贝藻类碳汇潜力评估[J].南方水产科学，2012，8(1)：30－35.

[10] 李昂，刘存歧，董梦荟，等.河北省海水养殖贝类与藻类碳汇能力评估[J].南方农业学报，2013，44(7)：1201－1204.

[11] 邵桂兰，褚蕊，李晨.基于碳排放和碳汇核算的海洋渔业碳平衡研究：以山东省为例[J].中国渔业经济，2018，36(4)：4－13.

[12] 邵桂兰，刘冰，李晨.我国主要海域海水养殖碳汇能力评估及其影响效应：基于我国9个沿海省份面板数据[J].生态学报，2019，39(7)：2614－2625.

[13] 于梦璇，田天，马云瑞.浅析碳汇渔业所需的碳交易市场规模：基于海洋渔业生产数据的测算[J].海洋开发与管理，2018，35(7)：88－93.

[14] 长岛综合试验区经济发展局.2020年长岛县国民经济和社会发展统计公报[Z].2021.

[15] 岳冬冬，王鲁民.基于直接碳汇核算的长三角地区海水贝类养殖发展分析[J].山东农业科学，2012，44(8)：133－136.

[16] 周毅，杨红生，刘石林，等.烟台四十里湾浅海养殖生物及附着生物的化学组成、有机净生产量及其生态效应[J].水产学报，2002，26(1)：21－27.

[17] 纪建悦，王萍萍.我国海水养殖藻类碳汇能力及影响因素研究[J].中国海洋大学学报(社会科学版)，2014(4)：17－20.

[18] 林贞贤，汝少国，杨宇峰.大型海藻对富营养化海湾生物修复的研究进展[J].海洋湖沼通报，2006(4)：128－134.

[19] 林碧琴，姜彬慧.藻类与环境保护[M].沈阳：辽宁民族出版社，1999.

[20] 曾呈奎，毕列爵.藻类名词及名称(第二版)[M].北京：科学出版社，2005.

[21] 蔡英亚，张英，魏若飞.贝类学概论[M].上海：上海科学技术出版社，1995.

[22] 王凤青，孙玉增，任利华，等.海水养殖中水产动物主要致病弧菌研究进展[J].中国渔业质量与标准，2018，8(2)：52－59.

[23] 曾福源，苏泽辉，周诗慧，等.溶藻弧菌PEPCK蛋白原核表达及其乙酰化、琥珀酰化修饰的鉴定[J].生物技术通报，2021，37(5)：84－91.

[24] 冯继兴，许修明，吴雪，等.贝类筏式养殖产业发展的主要问题及对策[J].水产养殖，2016，37(3)：30－32.