

渤海湾渔业碳汇分析与预测初探

陈燕珊¹, 万萌萌¹, 林 锬¹, 于贞贞², 王 睿¹, 谭丽菊¹, 王江涛¹

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100; 2. 东营市海洋发展与渔业局, 山东 东营 257091)

摘要: 为了解渤海湾近 10 a 来渔业碳汇能力, 本研究汇总了渤海湾地区 2010—2020 年海水养殖的品种和产量。通过建立不同养殖品种固碳能力评估体系, 计算了不同养殖品种对渔业碳汇的贡献和渤海湾近 10 a 海水养殖固碳总量。结果表明, 2010—2020 年渤海湾海水养殖以池塘养殖为主要养殖模式, 年固碳量从 2010 年的 5.79 万吨增至 2020 年的 11.04 万吨, 10 a 内共计固碳 96.0 万吨, 平均碳转化比为 12.5%, 其中山东省贡献超过 65%。该探索对建立“渔业碳汇”计算的指标体系、科学发展碳汇渔业、提升海洋碳汇生态价值具有一定的指导意义。

关键词: 渤海湾; 海水养殖; 渔业碳汇

中图分类号: X145 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-3096(2022)09-0077-08

DOI: 10.11759/hyxx20220224001

为了应对全球性气候变化, 我国于 2020 年 9 月在第七十五届联合国大会上提出在 2020 年前做到碳达峰, 2060 年做到碳中和。碳达峰是指二氧化碳的排放不再增长, 达到峰值之后逐步降低。碳中和是指企业、团体或个人在一定时间内直接或间接产生的温室气体排放总量, 通过植树造林、节能减排等方式加以抵消, 从而实现二氧化碳的“零排放”^[1-2]。为实现减碳, 不仅要减小“碳源”, 增强“碳汇”也是一种有效手段。海洋存储了地球上 93% 的二氧化碳, 储存着约 3.8×10^{13} t 溶解无机碳^[3], 其容量是陆地碳库的 20 倍、大气碳库的 50 倍^[4], 是地球上最大的吸碳主体^[1]。Sabine 等^[5]认为海洋吸收了过去 400 a 间人类在生产 and 生活中所释放的接近一半的碳。海洋渔业作为现代海洋经济的重要组成部分, 是海洋碳库的“源”与“汇”。海洋捕捞渔船的燃油消耗^[3]、不合理的捕鱼作业方式等是海洋渔业的主要“碳源”^[5]。无机碳被海洋生物通过生物作用等转化为有机碳固定在体内或加速沉降, 从而移出海洋的过程称为“碳汇”。2010 年唐启升院士首次提出“渔业碳汇”概念以来, 越来越多的研究强调海水养殖在海洋碳汇中的重要作用^[1, 6]。通过养殖手段固碳, 不仅技术可行、成本低, 而且可以产生多种效益^[7]。2010 年至 2020 年我国海水养殖产量从 1.48×10^7 t 增至 2.14×10^7 t (图 1a), 海水养殖储碳能力不断增强, 逐渐形成了以泛环渤海经济区、泛长三角经济区、泛珠三角经济区三足鼎立的中国海水养殖分布。在综合多种海洋渔业碳排放量评估方法的基础上,

我们评估了环渤海湾地区海水养殖“碳汇”能力^[8], 对建立“渔业碳汇”计算的指标体系、科学发展碳汇渔业具有一定的指导意义。

1 研究内容

1.1 数据来源

参考 2010 年至 2020 年《中国渔业统计年鉴》《山东省渔业统计数据》《河北省渔业统计年鉴》《天津市渔业统计年鉴》《海洋生态环境公报》等公开文件, 并通过实地走访, 收集汇总了 2010—2020 年环渤海湾地区海水养殖的品种、产量、养殖模式、面积等信息。

1.2 计算方法

海洋中的贝类、藻类、硬骨鱼类等利用海洋中的碳进行呼吸、生长和代谢作用, 海蜇、海参摄食和利用水体和底泥中的颗粒有机物, 加快颗粒碳和溶解碳的沉降, 使得碳移出海洋^[9], 可视为“碳汇”过程^[8-10]。目前有很多方法用来计算海洋渔业碳排放

收稿日期: 2022-02-24; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1407802); 国家自然科学基金(41876078)

[Foundation: National Key Research and Development Project of China, No. 2019YFC1407802; National Natural Science Foundation of China, No. 41876078]

作者简介: 陈燕珊(1998—), 女, 山东省泰安市人, 主要从事海洋污染生态化学研究, E-mail: cheniansahn123cys@163.com; 王江涛(1967—), 通信作者, 男, 教授, 主要从事海洋化学和生态学研究, E-mail: jtawang@ouc.edu.cn

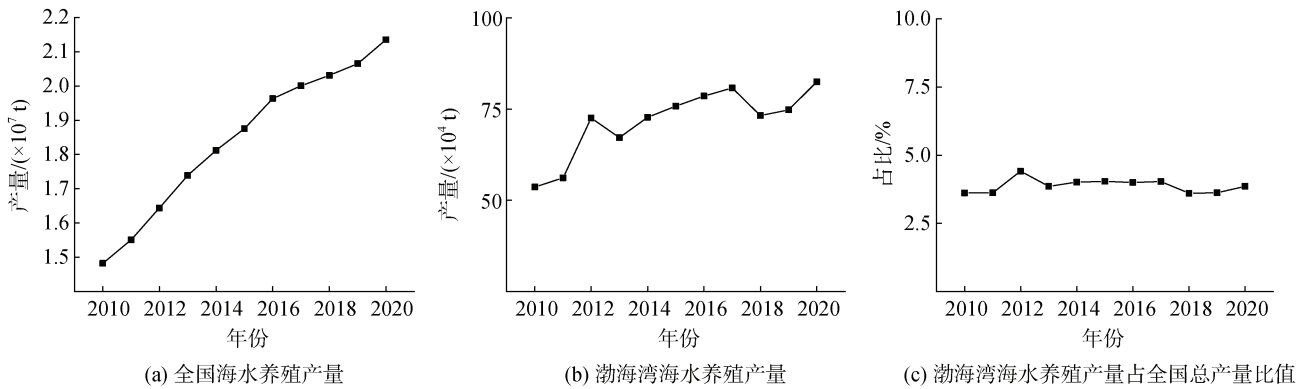


图1 2010—2020年间全国海水养殖产量、渤海湾海水养殖产量及占全国总产量比值

Fig. 1 National mariculture production, mariculture production in Bohai Bay, and the proportion of mariculture production in Bohai Bay to the total national production

量,如 LMDI 分解法^[11]、IPCC 碳排放评估法^[12]、Laspeyres 指数分解法^[13]等,但这些方法复杂,数据需求量大、计算量大并可能会引起较大的误差。本文选用海水养殖实地调查和产量估算相结合计算海水养殖碳汇量,简单直观。

1.2.1 贝藻类

参考孙康等^[6]、于佐安等^[14]、徐敬俊等^[15]人的方法,贝藻类碳汇量测算方法与核算系数为:

$$\text{贝类碳汇量} = \text{软组织碳汇量} + \text{贝壳碳汇量}, \quad (1)$$

$$\text{软组织碳汇量} = \text{贝类产量} \times \text{干湿系数} \times$$

$$\text{软组织占比} \times \text{软组织含碳量}, \quad (2)$$

$$\text{贝壳碳汇量} = \text{贝类产量} \times \text{干湿系数} \times \text{贝壳占比} \times$$

$$\text{贝壳含碳量}, \quad (3)$$

$$\text{藻类碳汇量} = \text{藻类产量} \times \text{干湿系数} \times \text{含碳量}. \quad (4)$$

表 1 列出了计算所用的相应的干湿系数、质量占比及相应的碳含量。

表 1 海水养殖碳汇能力核算系数^[14]

Tab. 1 Calculation coefficient of the carbon sink capacity of mariculture

种类	干湿系数/%	质量占比/%		碳含量/%	
		软组织	贝壳	软组织	贝壳
蛤	52.55	1.98	98.02	44.90	11.52
扇贝	63.89	14.35	85.65	42.84	11.40
牡蛎	65.10	6.14	93.86	45.98	12.68
贻贝	75.28	8.47	91.53	44.40	11.76
其他贝类	64.21	11.41	88.59	3.87	11.44
海带	20.00	1.00	0.00	31.20	0.00

1.2.2 鱼类

基于鲈鱼碳收支实验中发现鲈鱼体重对碳收支无显著影响^[16],各种海洋鱼类成分分析中发现鱼类各组分含量相当,且鱼类含水率约 80%~82%^[17-18],参考封闭养殖系统中鲟鱼的碳收支测算和鲟鱼能量收支实验^[19]测算数据得到,海洋硬骨鱼类生长碳约占 24%,排粪碳占比 5%,呼吸及代谢碳大于等于 70%,得出每千克鱼固碳 230 g。

1.2.3 虾类

对比对虾不同养殖品种和不同养殖模式,发现养殖期间对虾含碳率一直保持在 43.0%左右^[20],即

每千克对虾固碳 430 g。

1.2.4 蟹类

梭子蟹摄食和碳收支实验中,测算得到幼蟹生长碳占比平均 30.38%,蜕壳碳占比 4.47%,排粪碳占比 3.50%,代谢碳占比 61.65%^[21],利用产量与生长碳占比换算可得蟹类每千克固碳 1.26 kg。

1.2.5 海参、海蜇

根据围堰养殖试验^[22]中测算的海参、海蜇养殖产量和总有机碳(TOC)收支情况,海参的产量为 125 kg 时,相当于生产 30.52 kg TOC。海蜇获量为 1 033 kg,相当于生产 5.86 kg TOC。即每千克海参固碳 0.244 kg,

每千克海蜇固碳 0.005 67 kg。

1.3 海水养殖固碳量方法对照

由于对贝藻类固碳量研究较多,鱼、虾、蟹类等养殖固碳计算研究较少,且缺少历史数据,无法准确比较,故参考张继红等^[23]和宋金明^[24]分别对2002年贝类养殖以及我国近海大型经济藻类固碳能力的测度,对贝藻类碳汇量进行重新估计。以2018—2020年渤海湾海水养殖产量为例计算,贝类碳汇转化系数约为0.088 8 t C/t,藻类碳汇转化系数约为0.341 3 t C/t,所得数据采用配对样本t检验法(SPSS 17.0)分析,以评估2种方法的相关性,结果显示2组结果没有显著性差异($P>0.05$),可知2种方法皆可以准确估算贝藻类碳汇。对于海水养殖而言,除贝类(滤食性动物)和藻类外,其他品种在养殖过程中都会投饵。相关研究表明,所投入饲料并不能完全被摄食,其中至少有10%转化为残饵,饵料系数为1.55~4^[25],残饵、粪便与残骸等大多沉积到养殖池塘底部^[26],构成了碳汇的一部分。鉴于现有的研究与数据,对于鱼类和蟹类,采用碳收支方法计算,将排粪碳算入碳汇。由于缺少相应的研究和数据,贝类、虾类和海参、海蜇则根据生物体本身的含碳量计算其碳汇,没有算及排粪碳的碳汇部分。鉴于鱼类和蟹类的排粪碳占比均不超过5%,我们预计采用该方法计算的渔业碳汇误差不会超过10%。

2 结果与讨论

2.1 渤海湾地区海水养殖业现状

渤海湾位于渤海西部,被唐山市、天津市、沧州市、滨州市、东营市5个城市包围,日本暖流(黑潮)分支汇入其中,使得渤海湾经济生物资源丰富,海洋渔业开发条件优越^[27-28]。据统计,2010—2020年间,环渤海湾地区海水养殖产量从 5.36×10^5 t增至 8.25×10^5 t(图1b),一直维持在全国海水养殖总产量的 $4.0\% \pm 0.2\%$ 左右(图1c)。由于地理条件不同,渤海湾沿海各地区养殖模式和养殖品种差异显著。养殖模式主要有工厂化养殖、海水网箱养殖、海水池塘养殖、浅海筏式养殖、浅海底播养殖,总体以海水池塘养殖为主。养殖品种主要有贝类(牡蛎、螺、蚶、贻贝、扇贝、蛤、蛏)、藻类(海带)、鱼类(鲷鱼、美国红鱼、鲈鱼、鲑鱼、河鲀、石斑鱼、半滑舌鳎、鳎鱼)、虾类(南美白对虾、斑节对虾、中国对虾、日本对虾)、蟹类(梭子蟹、青蟹)、海参和海蜇。

2010—2020年渤海湾海水养殖贝类年均产量 59.6×10^4 t、虾类年均产量 8.34×10^4 t,均增产趋势显著。渤海湾地区贝类养殖主要分布在山东省东营市、滨州市和河北省唐山市的近海地区。由于山东、河北两省海岸线狭长,浅海海域与滩涂面积广阔,为贝类养殖提供了良好的生长环境,故渤海湾贝类养殖具有种类多、规模大、产量大、产值高、营养级低、生态效率高等特点^[29],2010—2020年贝类养殖总产量约占海水养殖总产量80%~85%,与我国海水贝类养殖情况一致^[30]。2010—2020年间贝类养殖以5.0%的增幅稳定增长,其中蛤类产量增幅最大、增长最快。至2020年贝类年产量达到 6.59×10^5 t,预计到2030年,环渤海湾贝类海水养殖产量可达 8.00×10^5 t。虾类养殖中,南美白对虾因生长速度快、生态位较宽、饵料需求宽松、盐度适应性强等优点使其养殖规模不断递增。参考《2019年全国渔业统计年鉴》,全国海水养殖南美白对虾产量占海水养殖虾类总产量的79.3%^[31]。据统计,2010—2020年渤海湾地区南美白对虾产量以年平均12.6%的增幅从 3.81×10^4 t增至 1.19×10^5 t,从该地区海水养殖虾类总产量的79%增至92%,预计到2030年渤海湾地区南美白对虾年产量可达 2.00×10^5 t。

渤海湾海水养殖鱼类、蟹类、海蜇、藻类产量低且略有波动。我国海水鱼类一直以传统、粗放、低效能的养殖方式为主,由于种苗产业链分工和定价随机性强,鱼卵价格经常性短期波动,产业技术进步贡献度不足,海水养殖业资源配置效率较低,减产风险高,使得我国海水鱼类养殖地区发展不平衡,呈现出品种多、产量低、高价值鱼类大量依赖进口的现状^[32]。渤海湾海洋鱼类近10a养殖总产量在 1.25×10^4 t上下浮动,并呈波动性逐年下降的趋势。蟹类养殖品种少,主要以梭子蟹为主,主产于山东省东营市、滨州市、河北省沧州市,近十年产量波动小,平均产量为4 402 t。海蜇具有生长迅速、养殖周期短、成本低、收益高等特点,自2006年辽宁省养殖成功后向全国推广养殖^[33],渤海湾地区年平均产量约5 445 t。我国近海海藻养殖以海带、裙带菜、紫菜、江蓠等为主^[34],其中海带年产量占60.29%以上^[35],但由于近年来全球气温变化以及水体污染等原因,年产量大幅度下降,据统计,2010—2020年渤海湾地区海带年平均产量约318 t。

2003—2014年全国五大类海水养殖水产品产量比例分别为贝类72.6%~78.6%、藻类10.3%~

11.1%、甲壳类 5.3%~7.9%、鱼类 4.1%~6.6%和其他类 0.9%~2.2%^[36]，渤海湾 2010—2020 年 5 大类产量比例分别为贝类 75.5%~89.9%、藻类 0~0.14%、甲壳类 7.29%~16.7%、鱼类 1.31%~2.59%和其他类 1.15%~3.95%，除藻类外，其他养殖种类占比相当。渤海湾地区养殖产业总体呈现出养殖产量同比增长的同时，各养殖模式养殖面积同比下降，其中天津下降幅度最大，但单位产量不断增高。这对发展绿色渔业，提高产业技术，实现海水养殖的可持续发展，减少生态环境污染产生了积极意义。

2.2 渤海湾海水养殖固碳量及固碳能力分析

根据国家海洋局的监测报告，渤海区域的二氧化碳物理化学作用表现为，冬春季从大气中吸收二氧化碳，夏秋季节向大气释放二氧化碳，夏秋季高频率海水养殖渔业活动碳汇对减少海水二氧化碳的释放具有积极作用^[36]。如图 2 所示，2010—2020 年渤海湾海水养殖固碳总量呈逐年上升的趋势，贝类年固碳总量最高，占 41.87%~55.07%，其次是虾类 (32.13%~50.70%)、蟹类 (3.82%~9.52%)、海参 (1.16%~9.06%)、鱼类 (2.25%~5.04%)、海蜇 (0.04%) 和藻类 (0.06%)，这是养殖产量和不同养殖品类碳转化效率 (该地区海水养殖产量转化为碳汇的能力，即海水养殖碳汇量与总产量的比值^[37]) 双重作用的结果，而产量占据主导因素。蟹类、虾类、贝类由于贝类贝壳部分、甲壳类硬壳部分相较于软组织干重比大、含碳量高^[38]，故碳转化效率高。加之贝类、虾类产量大，为渤海湾海水养殖业碳汇贡献率达 86% 以上，使得渤海湾近十年海水养殖业平均碳汇转化效率约为 12.5%，比我国海水养殖业平均碳汇转化比 (9.2%) 略高^[38]。由于贝类壳肉比高，且为滤食性动物，不投饵率高 (98%~100%)^[39]，这也使得贝类成为我国海水养殖业碳汇能力最强、潜力最大的产业^[38]。

据统计，2010、2012、2014 年渤海海水养殖业碳汇总量分别为 216 551 t、255 413 t、289 361 t^[37]，其中渤海湾碳汇总量分别为 60 665.7 t、68 559.4 t、94 367.0 t，分别占渤海总碳汇的 28.0%、26.8%、32.6%。2005 年到 2012 年，环渤海沿海各地市之间低碳经济发展不均衡^[39]。就地区而言，山东省海水养殖碳汇量较多，产生的经济价值也大于其他各省 (区)，在沿海九省 (区) 中一直处于领先地位^[40]。2010—2020 年间山东省东营、滨州市海水养殖年固碳量自 3.6×10^4 t 增至 7.8×10^4 t，共计 6.48×10^5 t，约占渤海湾海水

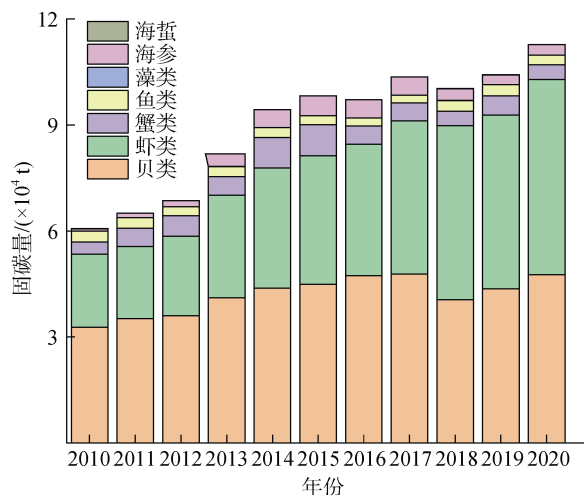


图 2 2010—2020 年渤海湾海水养殖固碳总量
Fig. 2 Total carbon sink of marine aquaculture in Bohai Bay from 2010 to 2020

养殖固碳总量的 65.6%。两市养殖品种多，产量大，南美白对虾、蛤为优势养殖品种，2020 年产量分别约为 9.20×10^4 t、 4.59×10^5 t。但东营、滨州市占山东省海水养殖总碳汇量低，在 2010、2012、2014 年仅占 7.24%、7.78%、10.63%，这是由于黄海沿岸的青岛、烟台、日照、威海作为山东省海水养殖主要贡献城市，年贡献率高达 55% 以上^[40]。河北省海洋渔业碳汇贡献量次于山东省，2010—2020 年河北省唐山、沧州市年固碳量从 1.82×10^4 t 增至 2.85×10^4 t，共计 2.58×10^5 t，约占渤海湾海水养殖固碳总量的 26.1%。两市养殖品种和总产量略少于东营、滨州市，但鱼虾类产量占比高，2020 年产鲜鱼 3 987 t、河鲀 2 167 t、对虾 2.58×10^4 t。唐山、沧州市在 2010、2012、2014 年分别占河北省海水养殖总碳汇量的 31.8%、24.1%、26.5%。天津市海水养殖品种少，无贝藻类养殖，且产量低，减产显著，南美白对虾养殖产量自 2010 年 11 162 t 下降至 2020 年 8 733 t，海水养殖固碳量自 2010 年 5 118 t 下降至 2020 年 3 786 t。由于天津市海岸线曲折，沿岸多港口、临海工业、旅游基础设施，渔业用海仅占 0.05%^[41]，海水养殖可利用面积小，使得天津抵消碳汇量后仍产生额外碳排放的可能性增强^[5]。

海水养殖业与海洋捕捞业作为海洋渔业的重要组成部分，在产生巨大经济价值的同时，对海洋碳库做出了不同程度的贡献。在整理并计算了 2016—2020 年渤海湾海洋捕捞渔业的产量及固碳量后发现，2016—2020 年间，海洋捕捞业与海水养殖业在品种

及产量上相互补充。渤海湾海洋捕捞鱼类、蟹类、海蜇、头足类分别以年均产量 181 390.8 t、14 316.6 t、14 171.2 t、1 269.4 t 远超海水养殖鱼类、蟹类、海蜇和头足类产量(12 164.8 t、3 802 t、5 506.6 t、0 t), 而海水养殖品类中虾类、海参、贝类、藻类分别以年均产量 108 418.6 t、15 774 t、633 368.8 t、596.4 t 远超海洋捕捞虾类、海参、贝类、藻类产量(69 630.6 t、0 t、45 803.4 t、0 t)。由于近几年鱼、虾、蟹类捕捞产量均逐年下降, 2016—2020 年渤海湾海洋捕捞固碳量自 109 343.9 t 下降至 82 062.2 t。结合海水养殖固碳量可知, 2016—2020 年渤海湾海洋渔业固碳量约为 2.0×10^5 t, 其中海水养殖固碳量占比 47%~57%。

重视以海水养殖业为主的海洋渔业, 可采用人为干预的方式, 提高碳转化能力强的经济养殖品类的质量和数量, 如加强贝类养殖, 采用虾蟹混养、贝藻比例混养^[10]、鱼藻混养^[42]等, 增强海水中有有机碳利用率, 提升综合效益。随着集约化养殖模式的发展, 促进海洋高新技术发展成为海水养殖业的必然趋势, 预计到 2030 年, 渤海湾海水养殖年产量可超 1.055×10^6 t, 渤海湾养殖年碳汇量可超 1.64×10^5 t。但海洋酸化、近海生态污染等问题使海水养殖在海洋碳循环及碳汇渔业中的地位正受到前所未有的威胁^[31]。

3 结论

本研究估算了 2010—2020 年渤海湾地区海水养殖渔业固碳量, 发现渤海湾地区贝类、虾类养殖在海洋碳汇中具有突出作用。对比养殖品种、养殖产量、养殖方式、碳转化率等不同因素的影响, 评估了渤海湾地区海水养殖碳汇的发展潜力。研究结果对评估渤海湾碳汇能力生态价值具有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 程娜, 陈成. 海洋碳汇、碳税、绿色技术: 实现“双碳”目标的组合策略研究[J]. 山东大学学报(哲学社会科学版), 2021(6): 150-161.
CHENG Na, CHEN Cheng. Marine carbon sink, carbon tax, and green technology: are search on combination strategy to achieve “double carbon”goals[J]. Journal of Shandong University (Philosophy and Social Sciences), 2021(6): 150-161.
- [2] 丁曙东, 陈芳, 黄文建, 等. 环渤海海水养殖业发展现状及未来趋势[J]. 河北渔业, 2019(2): 7-11.
DING Shudong, CHEN Fang, HUANG Wenjian, et al. Development status and future trends of marine aquaculture in the Bohai Rim Region[J]. Hebei Fisheries, 2019(2): 7-11.
- [3] 徐敬俊, 张洁, 余翠花. 海洋碳汇渔业绿色发展空间外溢效应评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(2): 99-110.
XU Jingjun, ZHANG Jie, SHE Cuihua. Evaluation of spatial spillover effect of green development of marine carbon-sink fisheries[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(2): 99-110.
- [4] 中国致公党上海市委会课题组. 加快构建我国现代能源体系, 统筹实现“双碳”目标[J]. 中国发展, 2022, 22(3): 3-9.
Research Group of Shanghai Municipal Committee of China Zhi Gong Party. Accelerate the development of China's modern energy system and coordinate efforts to achieve the “Dual Carbon” goal[J]. China Development, 2022, 22(3): 3-9.
- [5] SABINE C L, FEELY R A, GRUBER N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO₂[J]. Science, 2004, 305(5682): 367-371.
- [6] 孙康, 崔茜茜, 苏子晓, 等. 中国海水养殖碳汇经济价值时空演化及影响因素分析[J]. 地理研究, 2020, 39(11): 2508-2520.
SUN Kang, CUI Qianqian, SU Zixiao, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of the economic value for mariculture carbon sinks in China[J]. Geographical Research, 2020, 39(11): 2508-2520.
- [7] 肖乐, 刘禹松. 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, 2010(8): 4-8.
XIAO Le, LIU Yusong. Carbon sink fisheries have important and practical significance for the development of low-carbon economy carbon sink fisheries will become the driving force of a new round of fisheries development—Interview with Tang Qisheng, Vice-Chairman of China Association of Science and Technology and Academician of China Academy of Engineering[J]. China Fisheries, 2010(8): 4-8.
- [8] 公丕海. 海洋牧场中海珍品的固碳作用及固碳量估算[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
GONG Pihai. The effect of carbon fixation and carbon sequestration estimate of seafood in marine ranching[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014.
- [9] 马晓琳. 环渤海地区海洋经济产业结构优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
MA Xiaolin. The research to optimize the industrial structure of marine economy of bohai rim region[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.

- [10] 吴杭纬等. 东极养殖海域碳通量计算及扩增碳汇研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.
WU Hangweijing. Study on carbon flux calculation and amplification of carbon sequestration in Dongji aquaculture area[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019.
- [11] 宗虎民, 袁秀堂, 王立军, 等. 我国海水养殖业氮、磷产出量的初步评估[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(3): 336-342.
ZONG Humin, YUAN Xiutang, WANG Lijun, et al. Preliminary evaluation on the nitrogen and phosphorus loads by mariculture in China[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(3): 336-342.
- [12] 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.
SHAO Guilin, CHU Rui, LI Chen. Research on carbon balance of marine fishery in Shandong Province using the calculation results of carbon emission and carbon sink[J]. Chinese Fisheries Economics, 2018, 36(4): 4-13.
- [13] 纪建悦, 王萍萍. 海水养殖贝类碳汇分解研究——基于修正的 Laspeyres 指数分解法[J]. 中国渔业经济, 2016, 34(5): 79-84.
JI Jianyue, WANG Pingping. Carbon sink decomposition research of seawater cultured shellfish based on the modified Laspeyres index decomposition method[J]. Chinese Fisheries Economics, 2016, 34(5): 79-84.
- [14] 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 Zu'an, XIE Xi, ZHU Shouwei, 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.
- [15] 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 Jingjun, QIN Tiantian, HAN Limin. A review of research on marine carbon sink fisheries[J]. Resources Science, 2018, 40(1): 161-172.
- [16] XIAN W W, LIU R Y, ZHU X H. Carbon budget of bastard halibut *Paralichthys olivaceus* in relation to body weight and temperature[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2003, 21(2): 134-140.
- [17] 刘世禄, 王波, 张锡烈, 等. 美国红鱼的营养成分分析与评价[J]. 海洋水产研究, 2002, 23(2): 25-32.
LIU Shilu, WANG Bo, ZHANG Xilie, et al. Analysis and evaluation of nutrition composition of red drum (*Sciaenops ocellatus*) [J]. Progress in Fishery Sciences, 2002, 23(2): 25-32.
- [18] 王瑁, 丘书院, 杨圣云, 等. 花尾胡椒鲷幼鱼的生化组成和比能值[J]. 中国水产科学, 2001, 8(3): 5-9.
WANG Mao, YUE Shuyuan, YANG Shengyun, et al. Biochemical composition and calorific value in juvenile *Plectorhynchus cinctus* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2001, 8(3): 5-9.
- [19] 李军, 徐长安, 徐世宏, 等. 真鲷能量收支和氮与碳收支的初步研究[J]. 海洋科学, 1998, 22(2): 46-48.
LI Jun, XU Changan, XU Shihong, et al. Study on energy budget, nitrogen and carbon budget in young red sea bream [J]. Marine Sciences, 1998, 22(2): 46-48.
- [20] 苏跃朋, 马姓, 田相利, 等. 中国明对虾精养池塘氮、磷和碳收支的研究[J]. 南方水产, 2009, 5(6): 54-58.
SU Yuepeng, MA Shen, TIAN Xiangli, et al. An experimental study on nitrogen phosphorus and carbon budgets in intensive pond of shrimp *Fenneropenaeus chinensis* [J]. South China Fisheries Science, 2009, 5(6): 54-58.
- [21] 王俊, 姜祖辉, 陈瑞盛, 等. 三疣梭子蟹幼蟹的摄食和碳收支[J]. 海洋水产研究, 2004, 25(6): 25-29.
WANG Jun, JIANG Zuhui, CHEN Ruisheng, et al. Ingestion and carbon budget of juvenile *Portunus trituberculatus* [J]. Progress in Fishery Sciences, 2004, 25(6): 25-29.
- [22] 李俊伟. 刺参—海蜇—对虾综合养殖系统和投喂鲜活硅藻养参系统的碳氮磷收支[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
LI Junwei. Studies on the carbon, nitrogen, phosphorus budgets in the integrated aquaculture of sea cucumber-jellyfish-shrimp and sea cucumber monoculture fed with benthic diatom [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [23] 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.
ZHANG Jihong, LIU Jihua, ZHANG Yongyu, et al. Strategic approach for mariculture to practice ‘ocean negative carbon emission’ [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 252-258.
- [24] 宋金明. 中国近海生态系统碳循环与生物固碳[J]. 中国水产科学, 2011, 18(3): 703-711.
SONG Jinming. Carbon cycling processes and carbon fixed by organisms in China marginal seas [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(3): 703-711.
- [25] 王成成, 焦聪, 沈珍瑶, 等. 中国水产养殖尾水排放的影响与防治建议[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 89-98.
WANG Chengcheng, JIAO Cong, SHEN Zhenyao, et al. Effect of wastewater discharge of aquaculture and its prevention & treatment suggestion in China [J]. Pearl River, 2020, 41(1): 89-98.
- [26] 李凯. 山东省海水鱼虾养殖氮磷污染负荷及能耗分析[J]. 渔业研究, 2019, 41(5): 399-403.

- LI Kai. Analysis on the nitrogen and phosphorus pollution loads, as well as energy consumption of sea fish and shrimp in Shandong Province[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2019, 41(5): 399-403.
- [27] 唐启升, 方建光, 王俊, 等. 福建省海洋渔业绿色发展战略研究报告[J]. *学会*, 2021(8): 47-51.
TANG Qisheng, FANG Jianguang, WANG Jun, et al. Research report on green development strategy of marine fishery in Fujian Province[J]. *Society*, 2021(8): 47-51.
- [28] 曾瑞娟, 陈镇铃, 蔡依凡, 等. 海水养殖对沿岸生态环境的影响及其可持续发展对策[J]. *中国食品*, 2021(23): 136-138.
ZENG Rujuan, CHEN Zhenling, CAI Yifan, et al. Influence of mariculture on coastal ecological environment and its sustainable development countermeasures[J]. *China Food*, 2021(23): 136-138.
- [29] 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.
ZHANG Jihong, FANG Jianguang, TANG Qisheng, et al. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 359-365.
- [30] 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 Lin, HAO Xinya, SHEN Chunlei, 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.
- [31] 张灿, 孟庆辉, 初佳兰, 等. 我国海水养殖状况及渤海养殖治理成效分析[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(6): 887-894.
ZHANG Can, MENG Qinghui, CHU Jialan, et al. Analysis on the status of mariculture in China and the effectiveness of mariculture management in the Bohai Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(6): 887-894.
- [32] 吕为群, 陈阿琴, 刘慧. 鱼类肠道的碳酸盐结晶物: 海水鱼类养殖在碳汇渔业中的地位和作用[J]. *水产学报*, 2012, 36(12): 1924-1932.
LV Weiqun, CHEN Aqin, LIU Hui. Carbonate deposits in marine fish intestines: contribution of marine fish cultures to carbon sink fisheries[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(12): 1924-1932.
- [33] 游奎, 迟旭朋, 马彩华, 等. 我国海蜇产业发展分析[J]. *中国渔业经济*, 2012, 30(5): 108-112.
YOU Kui, CHI Xuming, MA Caihua, et al. Analysis on the development of jellyfish industry in China[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2012, 30(5): 108-112.
- [34] 李云峰, 李玉龙, 周遵春, 等. 我国北方地区海蜇池塘养殖技术研究进展[J]. *水产科学*, 2020, 39(2): 286-291.
LI Yunfeng, LI Yulong, ZHOU Zunchun, et al. Pondculture of edible jellyfish *Rhopilema esculentum* in north chinacoast: research progress[J]. *Fisheries Science*, 2020, 39(2): 286-291.
- [35] 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): 509-514.
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): 509-514.
- [36] 潘晓滨. 环渤海区域海洋碳汇市场建设的法律路径[J]. *天津法学*, 2017, 33(4): 39-44.
PAN Xiaobin. Legal path for construction of marine carbon sink market with in Bohai Rim Region[J]. *Tianjin Legal Science*, 2017, 33(4): 39-44.
- [37] 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.
SHAO Guilan, LIU Bing, LI Chen. Evaluation of carbon dioxide capacity and the effects of decomposition and spatio-temporal differentiation of seawater in China's main sea area based on panel data from 9 coastal provinces in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2614-2625.
- [38] 唐启升, 韩冬, 毛玉泽, 等. 中国水产养殖种类组成、不投饵率和营养级[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(4): 729-758.
TANG Qisheng, HAN Dong, MAO Yuze, et al. Species composition, non-fed rate and trophic level of Chinese aquaculture[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(4): 729-758.
- [39] LAPOINTE B E, LITTLER M M, LITTLER D S. Nutrient availability to marine macroalgae in siliciclastic versus carbonate-rich coastal waters[J]. *Estuaries*, 2007, 15(1): 75-82.
- [40] XIE S Q, LIU J S, LI Z J. Evaluation of the carbon removal by fisheries and aquaculture in freshwater bodies[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 82-89.
- [41] 韩增林, 郭媛媛, 王泽宇, 等. 环渤海沿海地市低碳转型绩效评价与影响因素分析[J]. *人文地理*, 2017, 32(3): 108-116.
HAN Zenglin, GUO Yuanyuan, WANG Zeyu, et al. Performance evaluation of low-carbon transformation and influence factors analysis in Bohai Rim coastal cities[J]. *Human Geography*, 2017, 32(3): 108-116.
- [42] 穆雪男. 天津滨海新区围填海演进过程与岸线、湿地变化关系研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
MU Xuenan. Research on the relationship between the evolution process of reclamation, shoreline and wetland changes of Tianjin Binhai new area[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

Analysis and prediction of the fishery carbon sink in Bohai Bay

CHEN Yan-shan¹, WAN Meng-meng¹, LIN Kun¹, YU Zhen-zhen², WANG Rui¹,
TAN Li-ju¹, WANG Jiang-tao¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Dongying Research Institute for Oceanography Development, Dongying 257091, China)

Received: Feb. 24, 2022

Key words: Bohai Bay; mariculture; fishery carbon sink

Abstract: To understand the carbon sink capacity of fisheries in Bohai Bay in the recent decade, the varieties and yields of mariculture in Bohai Bay from 2010 to 2020 were collected. A carbon sequestration capacity assessment system of mariculture was established to calculate the contribution of different species to the fishery carbon sink and the total carbon sequestration of marine aquaculture in Bohai Bay in a recent decade. The results showed that pond aquaculture was the main aquaculture mode in Bohai Bay from 2010 to 2020. Annual carbon sequestration amounts increased from 57 900 tons to 110 400 million tons, and the average carbon conversion ratio was 12.5%. A total of 960 000 tons of carbon were sequestered, of which Shandong Province contributed >65%. The results have a certain guiding significance for establishing a “fishery carbon sink” calculation system, transforming China’s offshore marine carbon sink economy, the scientific development of the fishery carbon sink, and promoting marine carbon sink ecological value.

(本文编辑: 赵卫红)