

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210419002

http://www.yykxjz.cn/

白怀宇, 刘赛, 杨茜, 黄凌风, 孙耀. 桑沟湾贝类养殖区沉积碳库年汇入速率的高分辨率记录及其对人类养殖活动的响应. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 98–105

BAI H Y, LIU S, YANG Q, HUANG L F, SUN Y. High-resolution records of the rate of carbon accumulation in the shellfish aquaculture area in Sanggou Bay and its response to human aquaculture activities. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5): 98–105

桑沟湾贝类养殖区沉积碳库年汇入速率的高分辨率记录及其对人类养殖活动的响应*

白怀宇^{1,2} 刘赛³ 杨茜^{2,4} 黄凌风^{1,5} 孙耀^{2,4①}

- (1. 厦门大学环境与生态学院 福建 厦门 361102; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 山东 青岛 266071; 3. 山东省海洋仪器仪表科技中心有限公司 山东 青岛 266100; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 山东 青岛 266071; 5. 厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室 福建 厦门 361102)

摘要 本研究对2014年取自桑沟湾贝类养殖区的柱状沉积物进行分析,测定每层沉积物中总碳(TC)、总有机碳(TOC)和总氮(TN)的质量分数,并计算总无机碳(TIC)、海源性有机碳(C_m)和贝壳无机碳(Shell-IC)的质量分数以及各组分碳在总碳中的贡献率,同时对其年汇入速率(BF)进行估算。结合²¹⁰Pb测年法,研究近80年沉积碳库各种碳的年汇入速率的高分辨率记录,发现其中TC、TIC、TOC、 C_m 和Shell-IC的平均含量分别为1.09%、0.75%、0.34%、0.15%和0.06%。研究还发现,TIC是TC的主要形式,在1960—2010年的贡献率保持在60%以上。 C_m 的质量分数在2010年前无较大幅度的波动,但在2010年后显著增加,使得 C_m /TC及TOC/TC也显著提升。Shell-IC在养殖活动开始后至2000年一直处于较低水平。各组分碳的年汇入速率在1960—2000年间随海水养殖活动呈现相应的变化,之后由于养殖规模和格局的调整,BF C_m 、BF_{TOC}和BF_{TC}显著升高,BF_{TIC}降低,BF_{Shell-IC}先升高后降低。桑沟湾的海水养殖活动影响着贝类养殖区沉积碳库的组成和年汇入速率,碳库各组分的变动也体现出与之相应的变化。本研究详细描述了人类海水养殖活动在开始后的50年里对沉积碳库年汇入速率的影响特征,也为今后陆架海区水产养殖活动的合理规划提供参考。

关键词 沉积碳库; 汇入速率; 海水养殖; 桑沟湾

中图分类号 P76 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)05-0098-08

碳元素是组成生命最重要的元素之一,同时也在地球的生物化学循环中起着至关重要的作用(蔡德陵等, 2014; 刘赛等, 2018; 秦琳等, 2020)。海洋是地球最大的碳汇,生活在其中的藻类等自养生物通过光合

作用将碳固定并带入海洋生态系统中。大陆架边缘海深受人类活动影响,加之地表径流、潮汐海流等也增加了陆架边缘海沉积物碳汇入及碳沉积的不确定性。陆架区的沉积碳库是陆地到大洋碳循环的过渡区域,

* 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2018YFD0900700)和山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020706)共同资助 [This work was supported by National Key Basic Research and Development Program "Blue Granary Science and Technology Innovation" Key Project (2018YFD0900700), and Major Science and Technology Innovation Project of Shandong Province (2019JZZY020706)]. 白怀宇, E-mail: xuehaiyouwo@163.com

① 通信作者: 孙耀, 研究员, E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2021-04-19, 收修改稿日期: 2021-06-19

联系着陆地和大洋的生态环境, 具有极其特殊的重要性(叶翔等, 2011)。深入研究陆架区海域尤其是人类养殖活动海域的沉积碳库信息对指导人类合理开发利用海洋资源、恢复近海生态具有重要意义。

目前, 相关专家学者对陆架区海洋沉积碳库的研究包括分析不同形态碳的比例及年汇入速率(也称埋藏通量, burial fluxes, BF)(秦琳等, 2020), 探讨碳元素的时空分布特征及其来源(叶翔等, 2011; 杨茜等, 2015), 以及重建海洋体系中碳的演变历史(蔡德陵等, 2014)等方面的内容。对于海水养殖区沉积碳库的研究包括对不同养殖区各组分碳的区域性差异分析(刘赛等, 2018), 以及悬浮颗粒物的沉降及再悬浮的影响等(杨茜等, 2014)。但以上研究的时间分辨率较低, 不足以细致地刻画近 50 年来人类海水养殖活动对碳的年汇入速率的影响特征。同时, 海水养殖区养殖生物的死亡事件(蒋增杰, 2004; 廉伟等, 2010), 也为科学合理地指导海水养殖活动提出了要求。

桑沟湾位于山东半岛东部(37°01'~37°09'N, 122°24'~122°35'E), 是一个西、北、南三面临陆地的矩形半封闭海湾, 东临黄海, 面积约为 $1.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (刘赛等, 2014)。桑沟湾从 20 世纪 60 年代开始了海水养殖活动, 后经养殖规模扩大、养殖种类增加, 养殖转型及再调整, 发展到如今“贝藻混合、分区养殖”的现状, 已经是中国北方最重要的水产养殖海区 and 海产品基地之一(Sui *et al.*, 2019)。桑沟湾内水动力由潮驱动, 潮汐类型为不正规半日潮, 最大潮差可达 2 m 左右; 潮流类型为正规半日潮, 属于往复流类型(何宇晴等, 2016)。同时, 有 10 余条河流注入湾内, 导致桑沟湾以泥质粉砂为主要类型的沉积物受到海源及陆源两个方面的影响(刘赛等, 2018)。很多学者前期对桑沟湾沉积碳库开展了类似的研究, 刘赛等

(2014)研究了桑沟湾湾口南北 2 个藻类养殖区沉积碳库的年汇入速率变化特征, 本研究对其是一个很好的补充。Xia 等(2019)研究证实, 桑沟湾的养殖贝类沉积对表层沉积物碳库的组成具有深远的影响, 而本研究将利用贝类养殖区的柱状沉积物进一步说明近半个世纪中碳库的组成变化。

本文在已有相关研究工作的基础上, 将深入分析桑沟湾贝类养殖区沉积碳库中各类型碳的含量及年汇入速率等信息, 并阐述其对人类养殖活动的响应, 以期今后陆架海区养殖活动的合理规划提供参考信息, 同时为研究相关海域的生物化学循环提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查站位与样品处理

采样点位于桑沟湾湾底的贝类养殖区, 其养殖种类包括栉孔扇贝(*Chlamys farrei*)、长牡蛎(*Crasostrea gigas*)等。于 2014 年 8 月在 S 点(37°05' N, 122°33' E) (图 1)使用振荡式柱状采泥器采集柱状沉积物。沉积物柱样长 167 cm, 带回实验室后, 分别以 1 cm (0~15 cm 段)、2 cm (15~103 cm 段)、4 cm (103 cm 至末端)的厚度切割后放于 4℃ 冰箱保存。之后, 分层样品放置于 60℃ 恒温干燥箱中烘干至恒重, 测定其含水率, 并用电动研磨仪研磨后待进一步测定。

1.2 沉积物年代测定

本研究参考 Demaster 等(1985)和 Li (1993)的研究结果, 采用 ^{210}Pb 测年法测定柱状沉积物的年代, 以 2014 年为测年零点, 利用沉积速率推算各层沉积物的年代, 沉积速率计算公式如下:

$$D_R = H\lambda / [\ln(I_0/I_h)] \quad (1)$$

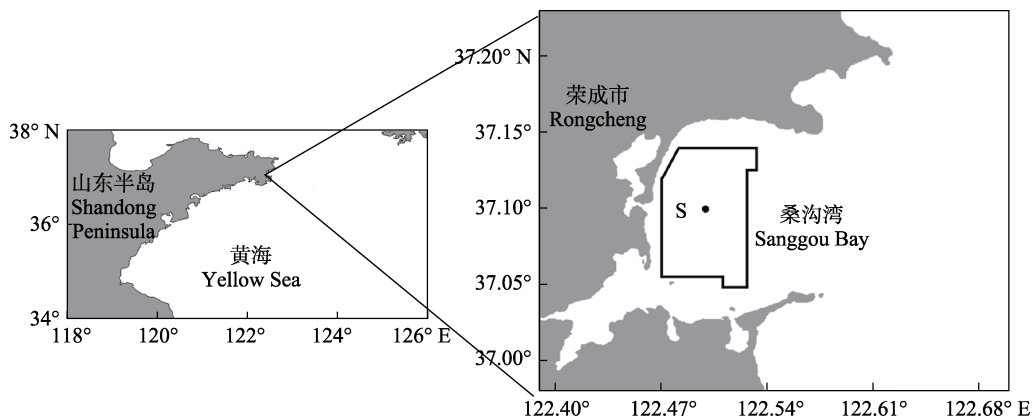


图 1 桑沟湾的位置及柱状沉积物采样点(所示区域为贝类养殖区)

Fig.1 Location of Sanggou Bay and columnar sediment sampling site (the area shown is the shellfish aquaculture zone)

式中, D_R (cm/a)为沉积速率; H (cm)为深度; λ (0.031 14/a)为 ^{210}Pb 的衰变常数; I_0 (Bq/kg)为柱状沉积物表层的 ^{210}Pb 放射性活度; I_h (Bq/kg)为深度 H 处的 ^{210}Pb 放射性活度。

1.3 TC、TOC、TN、TIC及Shell-IC的测定

本研究参考刘赛等(2014)研究中测定沉积物样品碳、氮的方式,利用德国Elementar vario EL III元素分析仪进行测定,测样时间为2015年,结果以百分含量呈现,其分析精度为0.1%,重复测量误差小于1%。一部分样品用于测定总碳(TC),另一部分测定总有机碳(TOC)和总氮(TN),沉积物总无机碳(TIC)由TC和TOC的差值得出。使用镜检法挑出每层的贝壳,贝壳无机碳(Shell-IC)由贝壳TC和TOC的差值得出。

1.4 海源有机碳(C_m)的计算

本研究采用钱君龙等(1997)研究提出的利用总有机碳和总氮比值(TOC/TN)定量估算的方法计算沉积物总有机碳中海源成分的含量(C_m)。其研究中海源和陆源有机质TOC/TN值分别为5和20(作为零级近似),公式如下:

$$\text{TOC} = C_m + C_t \quad (2)$$

$$\text{TN} = N_m + N_t \quad (3)$$

$$N_m = C_m/5 \quad (4)$$

$$N_t = C_t/20 \quad (5)$$

式中,TOC和TN是实验测量值, C_m 、 N_m 分别为海源总有机碳、总氮, C_t 、 N_t 分别为陆源总有机碳、总氮。由上式可推导出 C_m 的计算公式:

$$C_m = (20\text{TN} - \text{TOC})/3 \quad (6)$$

1.5 汇入速率的计算

沉积物中各组分碳的汇入速率利用Ingall等(1994)研究总结的经验公式:

$$\text{BF} = C_i \times S \times \rho_d \quad (7)$$

$$\rho_d = (1-\phi)/[(1-\phi)/\rho_s + \phi/\rho_w] \quad (8)$$

式中,BF[g/(m²·a)]为沉积物的汇入速率; C_i (%)为沉积物中碳的百分含量; S (cm/a)为沉积速率; ρ_d (g/cm³)为干密度; ϕ (%)为沉积物的含水率; $\rho_s=2.56$ g/cm³为沉积物的密度; ρ_w (g/cm³)为水的密度。

2 结果与讨论

2.1 ^{210}Pb 的垂直分布与沉积物年代测定

S点的沉积物 ^{210}Pb 垂直分布如图2所示,根据 ^{210}Pb 在各层样品中的活度计算可得到该点的沉积速率为2.08 cm/a。从计算结果可以看出,桑沟湾贝类养殖区的沉积速率远高于黄海(0.15 cm/a)和东海

(0.22 cm/a)等陆架边缘海域(杨茜等,2010),这说明海水养殖区由于受到地表径流的汇入和人类养殖活动(饵料投放、生物排泄等)两方面的影响,沉积速率较离陆地远的海区有所增加。此外,S点的沉积速率也高于湾口的藻类养殖区(0.593~0.726 cm/a)(刘赛等,2014)。这一方面是受湾内环流因素影响(何宇晴等,2016;刘赛等,2018);另一方面,贝类排泄作用造成的沉积效果也大于藻类碎屑沉积(杨茜等,2014)。

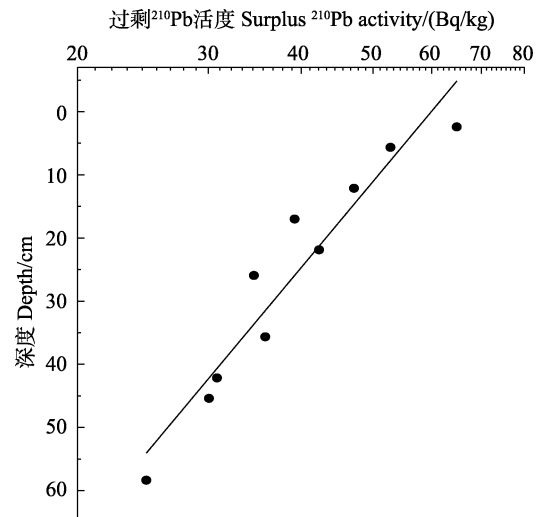


图2 采样点柱状沉积物 ^{210}Pb 的垂直分布
Fig.2 Vertical distribution of ^{210}Pb in columnar sediment of the sampling site

2.2 沉积物中各组分碳质量分数的年际变化及其贡献率

2.2.1 TC、TIC、TOC、Shell-IC和 C_m 的年际变化

桑沟湾S点柱状沉积物中各组分碳质量分数的年际变化如图3所示,TC范围为0.75%~1.35%,平均值为1.09%,TIC范围为0.57%~0.88%,平均值为0.75%,TOC范围为0.15%~0.69%,平均值为0.34%,Shell-IC范围为0.002%~0.31%,平均值为0.06%, C_m 范围为0.08%~0.37%,平均值为0.15%。从图3可以看出,在大部分时间,TC和TIC质量分数的年际变化基本一致,尤其是在1960年养殖活动开始后至2010年之间。二者在2000—2010年间有明显的降低,这可能是由于养殖贝类尤其是栉孔扇贝在20世纪90年代末出现了大面积死亡,贝类减产,从而降低了沉积物中TC和TIC的质量分数(张继红等,2010)。TOC和 C_m 质量分数的变化也基本一致,在2010年后二者出了明显上升,从而导致TC增加。Shell-IC的质量分数在1960年前波动较大,这可能是受原生贝类自然生长的影响,之后海水养殖活动占据了原生贝类的生长空间,养殖的贝类被定期收获无法进入沉积体系

中, 导致 Shell-IC 一直处于较低水平, 2000 年后随着养殖区的调整, 部分养殖贝类的壳沉积下来, Shell-IC 再次上升而后下降。

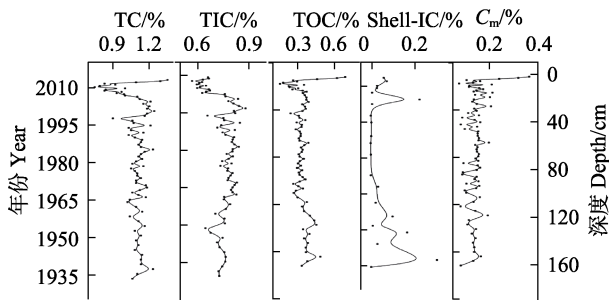


图 3 各组分碳在沉积物中质量分数的年际变化
Fig.3 Interannual variation of the mass fraction of carbon in sediment

桑沟湾 S 点沉积物各组分碳质量分数的平均值均高于黄海、东海陆架区(蔡德陵等, 2014; Yang *et al.*, 2015), 但相对于湾口的藻类养殖区(刘赛等, 2018), TC、TIC、TOC 和 Shell-IC 的质量分数偏低, C_m 却略高。这种情况一方面或许是由于湾口有更多的地表径流汇入(Sui *et al.*, 2019; Xia *et al.*, 2019), 使得陆源有机碳(C_l)的含量更高, 从而增加了 TOC 和 TC 的绝对含量; 另一方面, 贝类养殖区的沉降通量大于藻类养殖区(杨茜等, 2014), 这也使得 S 点沉积物中的 C_m 大于湾口的藻类养殖区。

2.2.2 各组分碳的贡献率 TIC、TOC、Shell-IC 和 C_m 在 TC 中的贡献率见图 4。由图 4 可以看出, TIC 是 TC 的主要成分, 在 1960 年海水养殖活动开始后至 2010 年间一直在 60% 以上。2010 年后养殖规模及养殖格局进行调整(傅明珠等, 2013), C_m 的质量分数显著增加, 导致 C_m 及 TOC 在 TC 中的贡献率显著提升, Shell-IC 的贡献率呈现与其质量分数相似的变化趋势(图 3、图 4)。

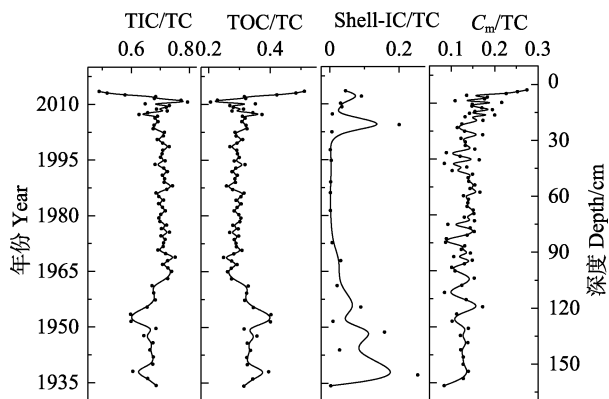


图 4 TIC、TOC、Shell-IC 和 C_m 在总碳中的贡献率
Fig.4 Contribution ratios of TIC, TOC, Shell-IC and C_m in TC

Shell-IC 在 TIC 中的贡献率一直低于 40%, 尤其是在 1960—2000 年, 一度低于 10% (图 5), 沉积物 TIC 中其他成分的来源目前尚不明确, 一种解释是, 桑沟湾贝类养殖区的沉积物多为泥砂底质(平均粒径 $<20 \mu\text{m}$)(Xia *et al.*, 2019), 从而构成了其 TIC 的主要成分。另外, 陆源输入或也增加了贝类养殖区的 TIC 含量。 C_m 在 TOC 中的贡献率自养殖活动开始后呈现整体上升的趋势, 在 2010 年前后最高达到 70%(图 5), 这表明海水养殖活动能显著提升海源有机碳的含量。此外, C_m 在 TOC 中贡献率的变动也体现出海水养殖活动中播种和收获的更迭情况。

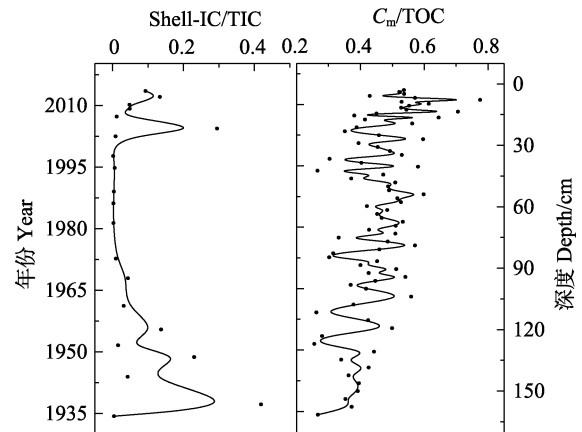


图 5 Shell-IC 在 TIC 及 C_m 在 TOC 中的贡献率
Fig.5 Contribution ratios of Shell-IC in TIC and C_m in TOC

2.3 TC、TIC、TOC、 C_m 和 Shell-IC 的年汇入速率及其对人类养殖活动的响应

2.3.1 TC、TIC、TOC、 C_m 和 Shell-IC 的年汇入速率

桑沟湾 S 点各组分碳的年汇入速率如图 6 所示, 其变动趋势和对应各组分的碳质量分数的变动趋势基本一致。其中, BF_{TC} 、 BF_{TIC} 、 BF_{TOC} 和 BF_{C_m} 的平均值分别为 234、161、73 和 33 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。在 1960 年以前, 由于 S 点没有海水养殖活动, 各组分碳的汇入速率主要受自然生长的小型贝类影响, 除 Shell-IC 外均呈现较平稳的波动。1960 年以后, 养殖活动逐步展开, 使得各组分碳的汇入速率尤其是 BF_{C_m} 呈现较大波动。2010 年后, 桑沟湾养殖规模转型, 湾口藻类养殖规模增加, 湾底贝类养殖规模减小(Sui *et al.*, 2019), 在湾内逆时针环流的带动下, S 点的 BF_{C_m} 显著升高, 从而带动 BF_{TOC} 和 BF_{TC} 的升高。

同其他海域相比, S 点的 BF_{TIC} 和 BF_{TOC} 显著高于黄海(Yang *et al.*, 2015)、东海(蔡德陵等, 2014)陆架区, 也高于台湾海峡(叶翔等, 2011)及南海海域(秦琳等, 2020), 可见人类养殖活动增加了海洋沉积物中各

组分碳的汇入速率。同时,与之前研究的湾内藻类养殖区沉积碳库相比,S点的 BF_{TIC} 和 BF_{TOC} 略低于湾口北部,但高于湾口南部(刘赛等,2018),这或是受湾内逆时针环流影响所致。

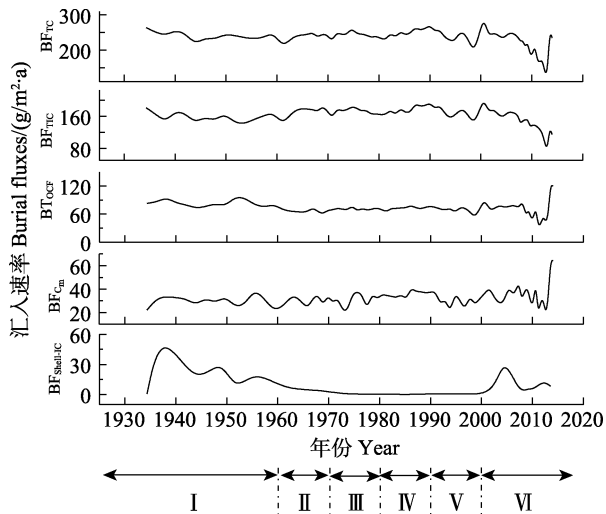


图6 TC、TIC、TOC、 C_m 和Shell-IC的年汇入速率
Fig.6 Burial fluxes of TC, TIC, TOC, C_m and Shell-IC

- I: 养殖活动之前; II: 海带养殖初期;
III: 养殖规模剧增,开始进行贝类养殖;
IV: 养殖规模进一步扩大,扇贝人工育苗获得成功;
V: 海水养殖高峰期,养殖贝类由扇贝转为牡蛎;
VI: 养殖规模调整,“贝藻混养”新格局。

I: Before aquaculture activities; II: Early stage of kelp aquaculture; III: The scale of aquaculture increased sharply and shellfish aquaculture was carried out; IV: The scale of aquaculture has been further expanded, and artificial seedlings of scallop have been successfully raised; V: The peak of aquaculture activities, shellfish were changed from scallops to oysters; VI: Aquaculture scale adjusted, "shellfish mixed with algae".

2.3.2 沉积碳库的汇入速率对人类养殖活动的响应

桑沟湾的海水养殖活动开始于20世纪60年代(傅明珠等,2013),在此之前,沉积物中各组分碳的质量分数受天然生物的影响而波动,S点周围海域有小型贝类生长,其在特定年代的偶然暴发导致了 C_m 、TOC、TC及Shell-IC质量分数的增长(如1938年前后、1956年前后,图3)。各组分碳的汇入速率也受天然生物影响,除1938和1949年前后 $BF_{Shell-IC}$ 有较大波动外,其他组分在1960年前波动平稳,并与相应组分的质量分数波动基本一致。

从20世纪60年代开始,桑沟湾开展海水养殖活动。首先以海带(*Saccharina japonica*)作为代表种类在湾中养殖,此时S点受到湾内环流影响,海带碎屑为

天然贝类提供养料,加速了天然贝类的生长,从而在1960年后的初期造成各组分碳的质量分数及汇入速率的增长(图3、图6)。60年代中期以后,各组分碳先下降后上升,表明在养殖活动开始初期,因为技术水平和环境的限制,养殖海带的产量出现波动,进而影响了沉积碳库的组成。

20世纪70年代后,桑沟湾养殖规模剧增,并开始养殖贝类(傅明珠等,2013),沉积碳库的组成进一步频繁波动。这期间贝类的排泄物溶入水体中,为养殖海带提供营养盐,海带的碎屑也为养殖贝类提供食物,2种养殖生物的生命活动加速了碳库的沉积,从而在70年代初期各组分碳的质量分数和汇入速率有了明显上升;而后随着海带和贝类的收获,到70年代中后期,碳库各组分又有了明显下降(图3)。

到20世纪80年代,桑沟湾养殖规模进一步扩大,栉孔扇贝的人工育苗获得成功(傅明珠等,2013)。1980—1990年期间,S点的TC和TIC呈现较大波动,而TOC和 C_m 变动相对较为平稳,Shell-IC一直处于较低水平。不同生长阶段的养殖生物充斥湾内,在每年都有收获的前提下仍有相当一部分保有量,使得碳库的TOC和 C_m 及 BF_{TOC} 和 BF_{C_m} 几乎没有较大波动。这段时间桑沟湾贝藻混养的局面缺乏科学管理,养殖海带的腐烂碎屑没有足够的贝类消耗,对桑沟湾水体包括沉积物产生了影响(张义涛等,2016)。

20世纪90年代初期,桑沟湾养殖规模达到高峰(宋娴丽等,2012),湾内海带养殖面积达3200 hm^2 ,养殖产量为2万t(方建光等,1996)。各组分碳的质量分数又一次呈现较大波动。在1997、1998年发生了2次扇贝死亡事件(蒋增杰,2004),死亡率达50%以上,这导致90年代后期各组分碳尤其是TIC和TC的急剧下降, BF_{TIC} 和 BF_{TC} 也随之出现下降。此外,扇贝死亡事件促使养殖种类和规模进行调整,也为科学合理利用桑沟湾的养殖空间提出了要求。

进入21世纪后,桑沟湾S点周围海域原本的扇贝养殖转变为牡蛎养殖,同时贝藻的养殖规模开始调整,湾口的海带养殖区向湾外扩展,湾中部为贝藻混养过渡带,逐渐形成了由湾底至湾口的“贝类-贝藻混合-藻类”的养殖格局(傅明珠等,2013; Sui *et al.*, 2019)。此外,各养殖筏间距增大,以促进湾内水流交换,这期间,海带的标准化养殖相对于传统养殖模式的优势凸显(房景辉等,2020、2021)。更加科学合理的养殖模式使得S点的各组分碳,尤其是TC和TIC,在经历扇贝死亡事件后显著升高,对应的汇入速率也有提升。2000—2006年间,各组分碳及其汇入速率维持在较高水平并平稳波动。而后随着养殖格局和规模的

进一步调整,藻类养殖比例增加,最大海带养殖产出为 7.21 万 t 淡干重(史洁等, 2010), 贝类养殖比例减少, 栉孔扇贝的产量由 1997 年的 45 000 t 降为 2000 t (张继红等, 2010)。同时, 桑沟湾内开展了小规模网箱鱼类养殖(Sui *et al.*, 2019), 这使得由 TIC 主导的 TC 在 2010 年前后降低, 此后, TIC 较之前持续偏低(图 3、图 4)。由于海水体系中大量富余的海带碎屑未被足够的贝类吸收, 从而导致 BF_{C_m} 和 BF_{TOC} 升高, 进一步使得 TC、TOC 和 C_m 的质量分数显著上升, 直到采样的测年零点(2014 年)。Shell-IC 及 $BF_{Shell-IC}$ 在养殖调整后出现了一次明显的上升, 这可能是由养殖贝类沉积所致, 而后随着养殖贝类的播种和收获出现相应的变动。

3 结论

桑沟湾贝类养殖区近 80 年沉积物碳库的总碳(TC)平均质量分数为 1.09%, 其中主要成分为总无机碳(TIC), 贡献率达 60%以上。总有机碳(TOC)中的海源成分(C_m)在养殖活动开始后整体呈现上升趋势。各组分碳(除 Shell-IC 外)的汇入速率在 2010 年前平稳波动, Shell-IC 则一直处于较低水平, 在 2010 年后由于养殖格局的调整发生了较大变化, 导致 BF_{TIC} 下降、 BF_{C_m} 、 BF_{TOC} 和 BF_{TC} 上升。桑沟湾的海水养殖活动影响着贝类养殖区沉积碳库的组成和汇入速率, 碳库各组分的变动也体现出其对人类养殖活动的响应。

参 考 文 献

- CAI D L, SUN Y, ZHANG X Y, *et al.* Reconstructing a primary productivity history over the past 200 a using the sediment organic carbon content and the stable isotope composition from the East China Sea and the Yellow Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(2): 40–50 [蔡德陵, 孙耀, 张小勇, 等. 由东海、黄海沉积物中有机碳含量及稳定同位素组成重建 200 a 以来初级生产力历史记录. *海洋学报*, 2014, 36(2): 40–50]
- DEMASTER D J, MCKEE B A, NITTROUER C A, *et al.* Rates of sediment reworking at the HEBBLE site based on measurements of Th-234, Cs-137 and Pb-210. *Marine Geology*, 1985, 66(1/2/3/4): 133–148
- FANG J G, SUN H L, KUANG S H, *et al.* Assessing the carrying capacity of Sanggou Bay for culture of kelp *Lamnaria japonica*. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 7–17 [方建光, 孙慧玲, 匡世焕, 等. 桑沟湾海带养殖容量的研究. *海洋水产研究*, 1996, 17(2): 7–17]
- FANG J H, HE W, MAO Y Z, *et al.* A comparison of nutrients in kelp cultured in standardized and traditional long-line modes in Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(2): 170–175 [房景辉, 何为, 毛玉泽, 等. 桑沟湾标准化与传统养殖模式海带的营养成分比较. *渔业科学进展*, 2021, 42(2): 170–175]
- FANG J H, JIANG Z J, LIN F, *et al.* Analysis on the advantages of standard kelp long line culture in Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(5): 134–140 [房景辉, 蒋增杰, 蔺凡, 等. 桑沟湾海带标准化养殖模式的优势探析. *渔业科学进展*, 2020, 41(5): 134–140]
- FU M Z, PU X M, WANG Z L, *et al.* Integrated assessment of mariculture ecosystem health in Sanggou Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 238–248 [傅明珠, 蒲新明, 王宗灵, 等. 桑沟湾养殖生态系统健康综合评价. *生态学报*, 2013, 33(1): 238–248]
- HE Y Q, HUANG D J, ZENG D Y, *et al.* Effect of suspended kelp culture on vertical structure of tidal current in Sanggou Bay, China. *Journal of Marine Sciences*, 2016, 34(4): 20–27 [何宇晴, 黄大吉, 曾定勇, 等. 桑沟湾筏式海带养殖对潮流垂直结构的影响. *海洋学研究*, 2016, 34(4): 20–27]
- INGALL E, JAHNKE R. Evidence for enhanced phosphorus regeneration from marine sediments overlain by oxygen depleted waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(11): 2571–2575
- JIANG Z J. Analysis of the causes of mass mortality of *Chlamys farrei* in Sanggou Bay. *Shandong Fisheries*, 2004(8): 10–11, 4 [蒋增杰. 桑沟湾栉孔扇贝大规模死亡原因分析. *齐鲁渔业*, 2004(8): 10–11, 4]
- LI F Y. Modern sedimentation rates and sedimentation feature in the Huanghe River estuary based on ^{210}Pb technique. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1993, 11: 333–342
- LIAN W, WEN H S, MAO Y Z, *et al.* Study on the relationship between Pacific oyster *Crassostrea gigas* summer mortality with culture environment and organism condition. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 92–100 [廉伟, 温海深, 毛玉泽, 等. 长牡蛎夏季死亡与养殖环境及自身体质关系的初步研究. *渔业科学进展*, 2010, 31(4): 92–100]
- LIU S, YANG Q, YANG S, *et al.* The long-term records of carbon burial fluxes in sediment cores of culture zones from Sanggou Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(8): 30–38 [刘赛, 杨茜, 杨庶, 等. 桑沟湾养殖海域沉积物中碳埋藏通量的长期记录. *海洋学报*, 2014, 36(8): 30–38]
- LIU S, YANG S, YANG Q, *et al.* The long-term changes of annual carbon sequestration rate and regional difference in culture areas of Sanggou Bay. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(1): 47–56 [刘赛, 杨庶, 杨茜, 等. 桑沟湾沉积碳库年汇入速率的长期变化及其区域性差异. *海洋学报*, 2018, 40(1): 47–56]
- QIAN J L, WANG S M, XUE B, *et al.* A method of quantitatively calculating amount of allochthonous organic carbon in lake sediments. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(15): 1655–1658 [钱君龙, 王苏民, 薛滨, 等. 湖泊沉积

- 研究中一种定量估算陆源有机碳的方法. 科学通报, 1997, 42(15): 1655–1658]
- QIN L, WAN S M. Sea level change and monsoon dominated evolution of terrigenous organic carbon burial flux in the northeastern South China Sea since the last glacial. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 875–888 [秦琳, 万世明. 末次冰期以来南海东北部陆源有机碳埋藏通量演变: 海平面和季风驱动. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 875–888]
- SHI J, WEI H, ZHAO L, *et al.* Study on ecosystem model of multi-species culture in Sanggou Bay: III Numerical study on the kelp culture carrying capacity. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 43–52 [史洁, 魏皓, 赵亮, 等. 桑沟湾多元养殖生态模型研究: III 海带养殖容量的数值研究. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 43–52]
- SONG X L, YANG Q, SUN Y, *et al.* Study of sedimentary section records of organic matter in Sanggou Bay over the last 200 years. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(3): 120–126 [宋娴丽, 杨茜, 孙耀, 等. 近 200 年桑沟湾养殖海域柱状沉积剖面的污染有机质记录与评价. 海洋学报, 2012, 34(3): 120–126]
- SUI J J, ZHANG J H, REN S J, *et al.* Organic carbon in the surface sediments from the intensive mariculture zone of Sanggou Bay: Distribution, seasonal variations and sources. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(4): 985–996
- XIA B, HAN Q, CHEN B J, *et al.* Influence of shellfish biodeposition on coastal sedimentary organic matter: A case study from Sanggou Bay, China. *Continental Shelf Research*, 2019, 172: 12–21
- YANG Q, SUN Y, WANG D D, *et al.* Biogenic silica distributions in recent sediments of the East China Sea and the Huanghai Sea and implications for productivity reconstructions. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(3): 51–59 [杨茜, 孙耀, 王迪迪, 等. 东海、黄海近代沉积物中生物硅含量的分布及其反演潜力. 海洋学报, 2010, 32(3): 51–59]
- YANG Q, SUN Y. The spatial and temporal distribution of the biogenic elements sedimentation flux in the East China Sea and the Yellow Sea. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(5): 680–685 [杨茜, 孙耀. 东、黄海生源要素的埋藏通量及其时空分布特征. 海洋环境科学, 2015, 34(5): 680–685]
- YANG Q, YANG S, SONG X L, *et al.* Vertical flux and resuspension of settling particulate matter of Sanggou Bay in summer and autumn. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(12): 85–90 [杨茜, 杨庶, 宋娴丽, 等. 桑沟湾夏、秋季悬浮颗粒物的沉降通量及再悬浮的影响. 海洋学报, 2014, 36(12): 85–90]
- YANG S, YANG Q, LIU S, *et al.* Burial fluxes and sources of organic carbon in sediments of the central Yellow Sea mud area over the past 200 years. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(10): 13–22
- YE X, CHEN J, WANG A J, *et al.* Sources, burial fluxes of carbon in sediments of the western Taiwan Strait. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 33(5): 73–82 [叶翔, 陈坚, 王爱军, 等. 台湾海峡西部沉积物中碳的来源及埋藏. 海洋学报, 2011, 33(5): 73–82]
- ZHANG J H, WANG W, JIANG Z J, *et al.* Variation of water quality inside scallop lantern nets in Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 9–15 [张继红, 王巍, 蒋增杰, 等. 桑沟湾夏季栉孔扇贝养殖笼内水质变化. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 9–15]
- ZHANG Y T, ZHANG J H, YANG F, *et al.* Degradation rate and influencing factors of *Sacharina japonica* debris from the Sanggou Bay mariculture ecosystem. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(2): 139–145 [张义涛, 张继红, 杨凤, 等. 桑沟湾养殖海带(*Sacharina japonica*)碎屑降解速率及影响因素. 渔业科学进展, 2016, 37(2): 139–145]

(编辑 马瑾艳)

High-Resolution Records of the Rate of Carbon Accumulation in the Shellfish Aquaculture Area in Sanggou Bay and Its Response to Human Aquaculture Activities

BAI Huaiyu^{1,2}, LIU Sai³, YANG Qian^{2,4}, HUANG Lingfeng^{1,5}, SUN Yao^{2,4}^①

(1. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361102, China;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China;

3. Shandong Technological Center of Oceanographic Instrumentation Co., Ltd, Qingdao, Shandong 266100, China;

4. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes,

Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266071, China;

5. Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361102, China)

Abstract In this study, columnar sediments taken from the shellfish aquaculture area of Sanggou Bay in 2014 were analyzed to determine the mass fraction of total carbon (TC), total organic carbon (TOC), and total nitrogen (TN) in each layer of sediments, and to calculate the mass fraction of total inorganic carbon (TIC), marine organic carbon (C_m), shell inorganic carbon (Shell-IC), and their contribution ratios to TC. The accumulation rate (or burial flux, BF) of each component was estimated. High-resolution records of various carbon accumulation rates in sedimentary carbon pools in the last 80 years were obtained using the ²¹⁰Pb dating method. The average contents of TC, TIC, TOC, C_m , and Shell-IC were 1.09%, 0.75%, 0.34%, 0.15%, and 0.06%, respectively. Results showed that TIC was the main form of TC, with a contribution ratio greater than 60% between 1960 and 2010. The mass fraction of C_m did not fluctuate significantly before 2010, but increased significantly after 2010, significantly increasing C_m /TC and TOC/TC. Shell-IC remained at a low level from the start of aquaculture activities until 2000. The carbon accumulation rate of each component responded to human marine aquaculture activities from 1960 to 2000. Due to the modification of aquaculture scale and pattern after 2000, BF _{C_m} , BF_{TOC}, and BF_{TC} increased significantly, BF_{TIC} decreased, and BF_{shell-IC} first increased and then decreased. Marine aquaculture activities in Sanggou Bay influenced the composition and accumulation rate of the carbon pool in the shellfish aquaculture area, and the carbon components responded to changes in aquaculture activities. The research results describe the effects of human aquaculture activities on the accumulation rate of sedimentary carbon pools in detail over 50 years after the start of aquaculture activities. This study also provides a reference for rational planning of aquaculture activities in continental shelf areas in the future.

Key words Sedimentary carbon pool; Accumulation rate; Marine aquaculture; Sanggou Bay

① Corresponding author: SUN Yao, E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn