

DOI: 10.12264/JFSC2022-0063

枸杞岛贻贝养殖海域碳通量及固碳能力研究

常佳楠¹, 段元亮^{1,5}, 张建琳¹, 沈亦非¹, 沈茜妤¹, 赵爽¹, 刘金林¹, 张建恒^{1,2,3,4}, 蔡春尔^{1,2,3,4}, 邵留^{1,2,3,4}, 何培民^{1,2,3,4}

1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;
2. 上海海洋大学水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306;
3. 上海海洋大学水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306;
4. 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 201206;
5. 四川省农业科学院水产研究所, 四川 成都 610066

摘要: 为研究枸杞岛贻贝养殖海域不同季节碳通量及固碳能力, 本研究在 2020—2021 年监测和分析了养殖海域温度、盐度、pH、总碱度(TA)及水体中溶解无机碳(DIC)、溶解有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)分布特征, 估算了枸杞岛贻贝养殖海域表层海水二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)及海-气界面二氧化碳交换通量(FCO_2)值, 并分析 $p\text{CO}_2$ 的影响因素, 探讨枸杞岛贻贝养殖海域固碳能力。结果表明, 枸杞岛海域表层海水 4 个季节的温度、盐度、pH、TA、DIC、DOC、POC 的空间分布在季节上差异极显著($P<0.01$)。枸杞岛海域 $p\text{CO}_2$ 全年的变化范围为 65.19~719.1 μatm , 水团混合和生物活动等是影响海域表层海水 $p\text{CO}_2$ 的重要因素。枸杞岛贻贝养殖海域 FCO_2 值的变化范围为 -63.75~99.18 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 四季变化极显著($P<0.01$), 全年碳分布格局有较大差异, 其中, 春、夏、秋三季均为碳汇, 分别为 (-18.86±12) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, (-11.59±7.95) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, (-3.61±37.22) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 冬季为碳源[(78.24±5.09) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$]。枸杞岛贻贝养殖区 FCO_2 值均高于外海非养殖区, 且达到显著水平($P<0.05$), 是弱汇区。本研究区域内贝壳固碳量为 18425.59 t, 贻贝软组织固碳量为 4973.97 t, 单位面积贻贝固碳量达 22.83 t/hm^2 。该研究可为贝类养殖碳汇评价提供参考。

关键词: 枸杞岛; 海水二氧化碳分压; 海-气二氧化碳交换通量; 海水养殖; 贝类养殖; 碳汇

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)11-1589-12

海洋占地球面积的 71%, 是地表系统中最大的碳库, 其碳储量是陆地碳储量的 20 倍、大气碳储量的 50 倍^[1], 同时, 海洋吸收了约 48% 人为活动释放的二氧化碳(CO_2)^[2], 是全球气候变化的“缓冲器”^[3]。海洋对 CO_2 的吸收和储存主要依赖于海洋生物对海水中碳的固定和转化, 生物储碳是形成海洋碳汇(蓝碳)的重要机制之一^[4]。我国是世界第一水产养殖大国^[5], 海水贝藻养殖平均年固碳量为 3.79×10^6 t, 其中可移出碳量为 1.2×10^6 t, 相当于植树造林约 5.0×10^5 hm^2 ^[6]。随着政府间气候

变化专门委员会(IPCC)把大型海藻纳入碳汇行列, 贝藻养殖活动正逐渐成为助力碳中和的有效手段^[7]。同时, 海-气界面碳的迁移是海洋碳循环的重要过程, 其通量(FCO_2)则被认为是海区碳源汇强度的直接体现^[3]。然而, 迄今为止, 有关表层水中 FCO_2 的研究主要集中在大洋等大尺度区域, 针对规模养殖对海水碳酸盐系统及 FCO_2 影响的研究较少, 主要集中在桑沟湾^[8-14]。

枸杞岛为浙江嵊泗列岛的第二大岛, 贻贝养殖产业是该区域的支柱产业之一, 2021 年贻贝养

收稿日期: 2022-03-27; 修订日期: 2022-05-07.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0901500); 上海市自然科学基金项目(21ZR1427400).

作者简介: 常佳楠(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋生态环境方面研究. E-mail: jnchang@163.com

通信作者: 何培民, 教授, 主要从事海洋生态环境方面研究. E-mail: pmhe@shou.edu.cn

殖面积 1120 hm², 总产量 1.008×10⁵ t, 主要养殖厚壳贻贝(*Mytilus coruscus*)和紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*), 其中厚壳贻贝产量占全国 70%以上, 因此有“贻贝之乡”之称。本研究区域位于枸杞岛后头湾贻贝养殖区, 该养殖区是枸杞岛最大的贻贝养殖聚集区, 约 1024.8 hm², 占枸杞乡贻贝总养殖面积的 77.4%。研究贝类及养殖模式对水体表层 pCO₂ 变化的影响, 对于了解规模化水产养殖活动对 CO₂ 源汇格局变化的影响具有重要意义。本研究估算了枸杞岛贻贝大规模养殖海域碳通量及生物固碳量, 为今后我国岛礁海域贝-藻综合生态养殖和渔业碳汇模式提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域站位设置

枸杞岛海域为开放海域, 海流湍急, 涨潮流向为 270°~330°, 落潮流向为 80°~150°。受地形影响, 岛屿附近海水多为贴岛流动, 后头湾养殖区多为东南-西北向往复流^[15], 且贻贝影响养殖区内部流速要小于涨落潮迎流面流速^[16]。据此, 本研究在后头湾贻贝养殖区设置采样点 8 个(图 1), 养殖区内部设置 5 个站位呈“十字形”断面(GQ-1~GQ-5), 养殖区外围的非养殖区相应设置 3 个站位(GQ-6~GQ-8)。为了确保每个站位的样品能保留站位的差异性及数据的科学性, 研究人员选择在天气晴朗、无风的情况下快速采集样品, 确保数据的准确性。

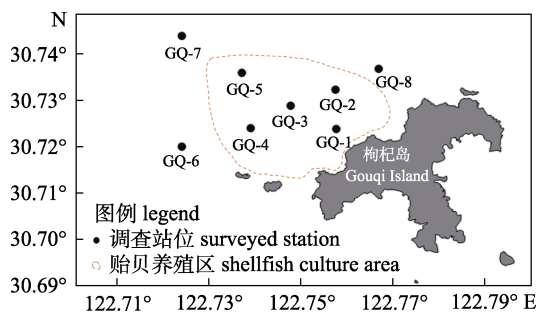


图 1 采样站位分布图

Fig. 1 Distribution diagram of sampling stations

1.2 样品采集与处理

本研究于 2020 年 7 月开始, 分别在夏季(2020 年 7 月)、秋季(2020 年 10 月)、冬季(2021 年 1 月)、

春季(2021 年 5 月)对枸杞岛后头湾养殖区进行为期 1 年的监测研究。现场监测温度(*T*)、盐度(*S*)、pH [采用美国国家标准局(NBS)标度对 PHS-25 型 pH 计标定, 精度为± 0.01], 并采集表层水样(水面下 0.5 m)及贻贝样品。水样的采集、分装、保存等方法均严格按照《海洋调查规范第 4 部分: 海水化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007)^[17]。水样采集后于 4 °C 低温避光条件下运送至实验室, 总碱度(TA)采用 pH 法测量(GB/T 12763.4—2007); 用于测定 DIC、DOC、POC 的水样, 现场使用 Whatman GF/F 玻璃纤维膜(在马弗炉中 450 °C 预灼烧 6 h 后称重)过滤, 滤膜于 -20 °C 保存, 采用德国 Elementar Analysensysteme GmbH 元素分析仪 Vario MAX CN 测定 POC; 同时取过滤后的水样于棕色玻璃瓶(450 °C 预灼烧 6 h)中避光保存, 并加入 0.02% 的饱和 HgCl₂ 溶液固定, 4 °C 低温保存^[18], 采用日本岛津总有机碳分析仪 TOC-L 测定 DIC、DOC。贻贝样品的取样方法按照《水产品抽样规范》(GB/T 30891-2014)^[18]中 5.3.2.2 规定的抽样方案执行。用剪刀、毛刷等工具去除贻贝外部的所有附着生物, 清洗干净并记录样品总湿重, 后将样品于 60 °C 烘干 48 h 分别获得贝壳和软组织干重, 计算得到贝壳与软组织的干重/总湿重数据。贻贝样品的含碳量利用元素分析仪 Vario MAX CN 测定。

1.3 碳通量估算

本研究中碳通量估算是根据 Dickson and Millero 给出的关系式。该公式可适用于估算盐度为 20~40、温度为 2~35 °C 的海水^[19]。

1.3.1 pH_{NBS} 与 pH_{SWS} 间的转化 由于本研究采用的是 NBS 标度, 美国国家标准 NBS 标度(pH_{NBS})与海水氢离子浓度标度(pH_{SWS})的转化公式如下^[20]:

$$\begin{aligned} \text{pH}_{\text{SWS}} &= \text{pH}_{\text{NBS}} + \text{pK}'_{1\text{SWS}(\text{M})} - \text{pK}'_{1\text{NBS}(\text{M})}; \\ \text{pK}'_{1\text{SWS}(\text{M})} &= 3670.7/T - 62.008 + 9.7944 \ln T - 0.0118 \times S + 0.000116 \times S^2; \\ \text{pK}'_{1\text{NBS}(\text{M})} &= -13.7201 + 0.031334 \times T + 3235.76/T + 0.000013 \times T \times S - 0.1032 \times S^{0.5}; \end{aligned}$$

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

式中, *T* 为绝对温度(K); *S* 为盐度; *t* 为摄氏温度。

1.3.2 海水 CO₂ 分压 本研究假设枸杞岛研究海域海水的 CO₂ 体系处于平衡状态, pCO₂ 根据海水的温度、盐度、pH 及 TA 等参数确定。

$$p\text{CO}_2 = \frac{\text{CA} \times a_{\text{H}^+}^2}{a_s \times k_1' \times (a_{\text{H}^+} + 2k_2')}$$

$$\text{CA} = \text{TA} - \frac{B_T \times K_B'}{a_{\text{H}^+} + K_B'}$$

$$\ln K_B' = (-8966.90 - 2890.51S^{0.5} - 77.942S + 1.726S^{1.5} - 0.0993S^2) / T + (148.0248 + 137.194S^{0.5} + 1.62247S) - (24.4344 + 25.085S^{0.5} + 0.2474S) \times \ln T + 0.053105S^{0.5} \times T$$

$$pK_1' = 845.0 / T + 3.248 - 0.0098S + 0.000087S^2;$$

$$pK_2' = 1377.3 / T + 4.824 - 0.0185S + 0.000122S^2;$$

$$\ln a_s = 60.2409 + 93.4517(100/T) + 23.3585 \ln(T/100) + [0.0235170 - 0.023656(T/100) + 0.0047036(T/100)^2] \times S$$

式中, CA 为碳酸盐碱度, a_{H^+} 为氢离子活度, k_1' 和 k_2' 为碳酸的表现离解常数, K_B' 为硼酸的第一表观离解常数, B_T 为海水中的总硼酸浓度, $B_T = 0.000416 (S/35) \text{ mol/kg}^{[21]}$ 。TA 单位 mmol/dm^3 。 K_B' 采用 Dickson^[22] 给出的值进行计算。 a_s 为溶解度系数 $[\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{atm})]$, 采用 Weiss^[23] 给出的值进行计算。

1.3.3 海-气界面 CO_2 交换通量 海-气界面 CO_2 交换通量 $[F, \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 指的是单位时间单位面积上 CO_2 在大气和海洋界面的净交换量, 计算公式如下:

$$F = k \times a_s \times \Delta p\text{CO}_2 = k \times a_s \times (p\text{CO}_{2\text{sea}} - p\text{CO}_{2\text{air}});$$

$$k = 0.31 \times u_{10}^2 \times (\text{Sc}/S^{\prime}c)^{-0.5};$$

$$\text{Sc} = \text{Sc}_{s=0} + S(\text{Sc}_{s=35} - \text{Sc}_{s=0})/35;$$

$$\text{Sc}_{s=35} = 2073.1 - 125.62t + 3.6276t^2 - 0.043219t^3;$$

$$\text{Sc}_{s=0} = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3;$$

式中, k 为气体传输速度, 采用 Wanninkhof^[24] 给出的公式; a_s 为 CO_2 在海水中的溶解度系数 $[\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{atm})]$; $\Delta p\text{CO}_2$ 为表层海水与大气中 CO_2 的分压差, 大气中 CO_2 分压根据 NOAA 全球监测实验室-地球系统研究实验室(Global Monitoring Laboratory-Earth System Research Laboratories) (https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_data.html) 监测结果, 本研究采用 $413.42 \mu\text{atm}$ 作为大气 CO_2 浓度值。 u_{10} 为海平面 10 m 处的风速(m/s), 采用 嵊泗气象台(58472)提供的日平均风速及月平均风速。 Sc 和 $S^{\prime}c$ 为施密特数^[22]; $S^{\prime}c$ 为相应盐度下

20 °C 时的施密特数, 盐度为 35 的海水 $S^{\prime}c = 660$; 相同盐度下 Sc 仅为温度 t (°C) 的函数, 在 0~30 °C 的范围内, $\text{Sc}_{s=35}$ 指盐度 35 的海水中 CO_2 的施密特数, $\text{Sc}_{s=0}$ 指淡水($S=0$)中 CO_2 的施密特数, t 为海水温度。当 $F > 0$ 表示海水向大气释放 CO_2 ; 当 $F < 0$ 表示海水吸收大气中的 CO_2 。

1.4 贻贝可移除碳量估算

估算方法及公式根据现行标准^[25]给出。

1.5 统计分析

使用 Microsoft Excel 软件进行数据预处理, 所有数据均采用平均值±标准误($\bar{x} \pm \text{SE}$)表示, 使用 Prism 8.0 软件进行 Two-way ANOVA 分析及线性分析, 当 $P < 0.01$ 时为差异极显著, 当 $P < 0.05$ 时为差异显著, 位点分布图及浓度分布图均采用 Surfer 16.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 表层海水碳酸盐体系基本参数

研究海域温度年变化范围为 8.59~27.4 °C, 夏季最高, 冬季最低。由于离岸越近水位越浅、升温越快, 温度变化趋势均为由岸向外递减。整个研究在夏、秋、冬、春四季海域最高温与最低温分别相差 1.8 °C、2.15 °C、1.45 °C、0.81 °C, 海域温度浮动较小。盐度年变化范围为 27.39~32.59, 冬季最高, 夏季最低。整个研究海域盐度浮动也较小。枸杞岛海域 pH 年变化范围为 7.79~8.75, 整个海域 pH 分布较均匀, 在夏、秋、冬、春四季 pH 最高值与最低值分别相差 0.47、0.36、0.06、0.73。TA 季节差异显著, 且冬季最高, 秋季最低; 整个研究海域在夏、秋、冬、春四季 TA 最高值与最低值分别相差 0.46、1.56、0.24、0.13, 秋季海域内 TA 变化较大(表 1)。双因素方差分析结果显示(表 2), 枸杞岛养殖海域表层海水的基本参数分别在不同季节差异极显著($P < 0.01$)。

表 1 枸杞岛贻贝养殖海域不同季节表层海水基本参数

Tab. 1 Basic parameters of surface seawater carbonate system in the shellfish culture area of Gouqi Island $\bar{x} \pm \text{SD}$

季节 season	水温/°C temperature	盐度 salinity	pH	总碱度/(mmol/dm ³) total alkalinity
夏季 summer	26.84±0.44 (25.6~27.4)	28.06±0.13 (27.39~28.57)	8.13±0.05 (7.83~8.30)	2.20±0.06 (1.88~2.34)
秋季 autumn	20.4±0.25 (19.48~21.63)	30.25±0.06 (30.01~30.53)	7.99±0.05 (7.79~8.15)	1.71±0.19 (0.78~2.34)
冬季 winter	9.10±0.2 (8.59~10.04)	32.2±0.1 (31.67~32.59)	7.96±0.01 (7.91~7.97)	2.94±0.03 (2.82~3.06)
春季 spring	20.61±0.10 (20.26~21.07)	28.24±0.11 (27.95~28.74)	8.32±0.09 (8.02~8.75)	2.83±0.01 (2.77~2.90)

注: 括号内数值表示范围。

Note: Figures in the bracket indicate ranges.

表 2 枸杞岛贻贝养殖海域不同季节表层海水基本参数的双因素方差分析

Tab. 2 Two-way ANOVA of basic parameters of surface seawater carbonate system in the shellfish culture area of Gouqi Island

变量 variable	变异来源 source of variable	df	F	P
水温 temperature	季节 season	3	692.1	<0.0001**
	站位 station	7	0.9029	0.5226
盐度 salinity	季节 season	3	664.1	<0.0001**
	站位 station	7	4.294	0.0043**
pH	季节 season	3	8.379	0.0007**
	站位 station	7	1.482	0.2272
总碱度 total alkalinity	季节 season	3	35.06	<0.0001**
	站位 station	7	1.168	0.3615

注: *表示差异显著 ($P < 0.05$); **表示差异极显著 ($P < 0.01$).

Note: * means significant difference ($P < 0.05$); ** means extremely significant difference ($P < 0.01$).

2.2 表层海水 DIC、DOC、POC 浓度的空间分布

养殖区在夏、秋两季的 DIC 浓度较非养殖区浓度高, 春、冬季较非养殖区低, 但平均 DIC 浓度分布表现为冬 $[(2173 \pm 3.39) \mu\text{mol/L}]$ 、春季 $[(2068 \pm 35.56) \mu\text{mol/L}]$ 高, 秋 $[(1955 \pm 14.47) \mu\text{mol/L}]$ 、夏季 $[(1888 \pm 33.98) \mu\text{mol/L}]$ 较低。养殖区在夏、冬两季的 DOC 浓度较非养殖区浓度高, 春、秋季较非养殖区低, 但平均 DOC 浓度在秋季 $[(115.6 \pm 6.91) \mu\text{mol/L}]$ 和夏季 $[(115 \pm 9.0) \mu\text{mol/L}]$ 较高, 冬季最低 $[(67.31 \pm 4.55) \mu\text{mol/L}]$, 春季 $[(101.4 \pm 12.99) \mu\text{mol/L}]$ 处于过渡水平。POC 浓度从高至低依次为夏季 $[(38.59 \pm 7.09) \mu\text{mol/L}]$ 、冬季 $[(31.16 \pm 6.38) \mu\text{mol/L}]$ 、春季 $[(21.71 \pm 5.82) \mu\text{mol/L}]$ 、秋季 $[(20.15 \pm 3.49) \mu\text{mol/L}]$, 没有明显的分布特征(图 2)。调查期间, 研究海域除

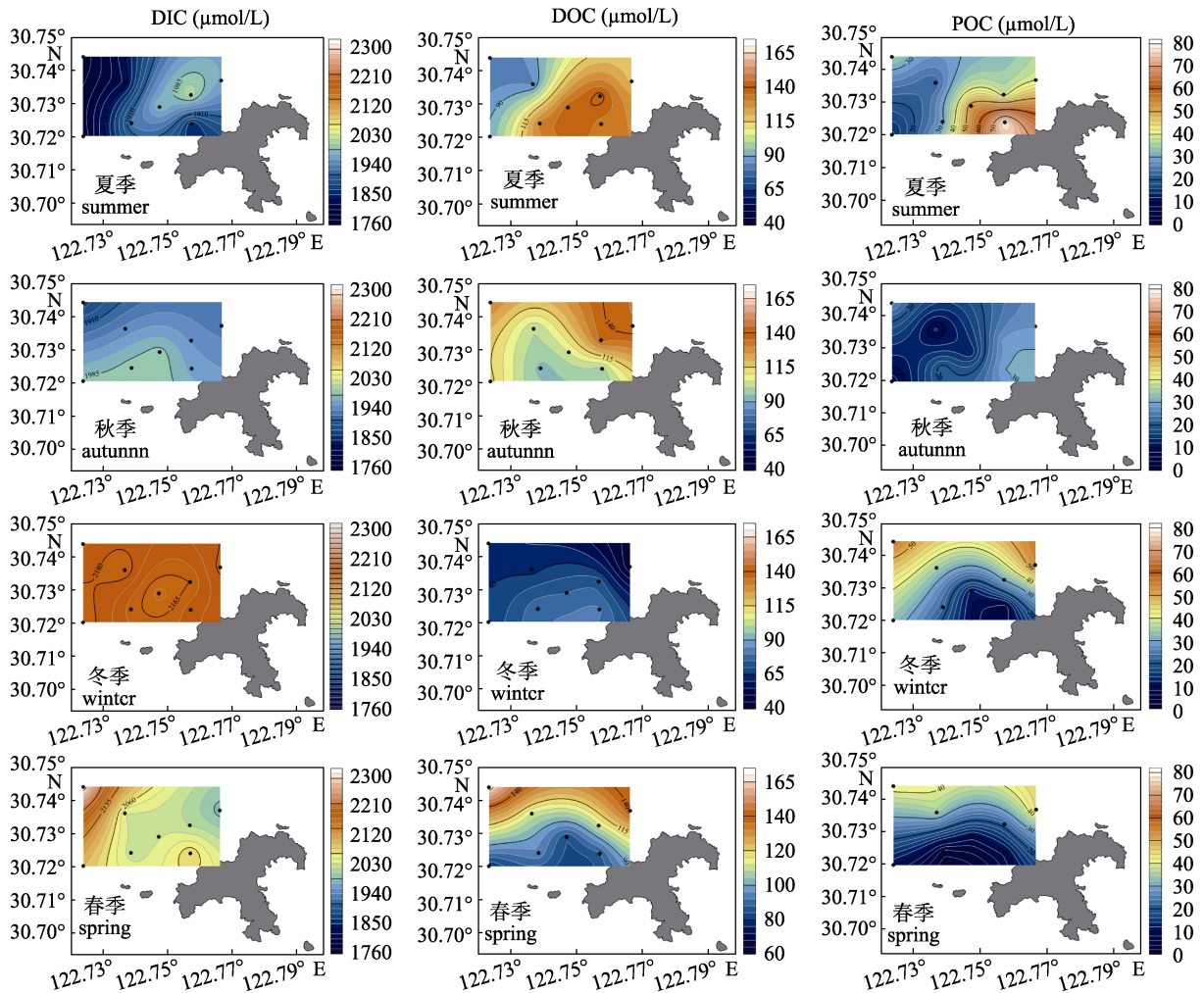


图 2 枸杞岛贻贝养殖海域不同季节表层海水溶解无机碳(DIC)、溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)浓度空间分布图
Fig. 2 Spatial distribution of dissolved inorganic carbon (DIC), dissolved organic carbon (DOC), and particulate organic carbon (POC) concentrations in surface seawater in different seasons in the shellfish culture area of Gouqi Island

POC 浓度在季节上没有显著差异外, 其他季节均有极显著差异($P<0.01$)(表 3)。

表 3 枸杞岛贻贝养殖海域不同季节表层海水 DIC、DOC、POC 浓度的双因素方差分析

Tab. 3 Two-way ANOVA for concentrations of DIC, DOC, and POC in surface seawater in different seasons in the shellfish culture area of Gouqi Island

变量 variable	变异来源 source of variable	df	F	P
溶解无机碳 DIC	季节 season	3	18.67	<0.0001**
	站点 station	7	0.1228	0.9957
溶解有机碳 DOC	季节 season	3	5.965	0.0042**
	站点 station	7	0.7012	0.6710
颗粒有机碳 POC	季节 season	3	2.422	0.0945
	站点 station	7	1.456	0.2364

注: *表示差异显著($P<0.05$); **表示差异极显著($P<0.01$)。

Note: * means significant difference ($P<0.05$); ** means extremely significant difference ($P<0.01$).

2.3 表层海水 pCO_2 与 FCO_2 空间分布

调查海域表层海水的 pCO_2 年变化范围为 65.19~719.1 μatm , 平均值在春季最低 (310.3 ± 65.7) μatm , 冬季最高 (654.3 ± 15.7) μatm , 夏、秋季分别为 (347 ± 45.59) μatm 、(395.2 ± 66.15) μatm 。夏、冬两季分压值均表现为由外海向近岸逐渐递增, 1 号站位为最大值; 秋季分压值则表现为北低南高, 最大值出现在贻贝养殖区中心的 3 号站位; 春季整体趋势与秋季相反, 呈北高南低, 最高值依然出现在 1 号站位(图 3)。 FCO_2 与 pCO_2 有相同的分布特征, 春季 FCO_2 值最低, 为 (-18.86 ± 12) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 夏季为 (-11.59 ± 7.95) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 秋季为 (-3.61 ± 37.22) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 冬季 FCO_2 值最高, 为 (78.24 ± 5.09) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。双因素方差分析结果显示(表 4), 枸杞岛研究海域 pCO_2 与 FCO_2 值在四季差异极显著($P<0.01$)。

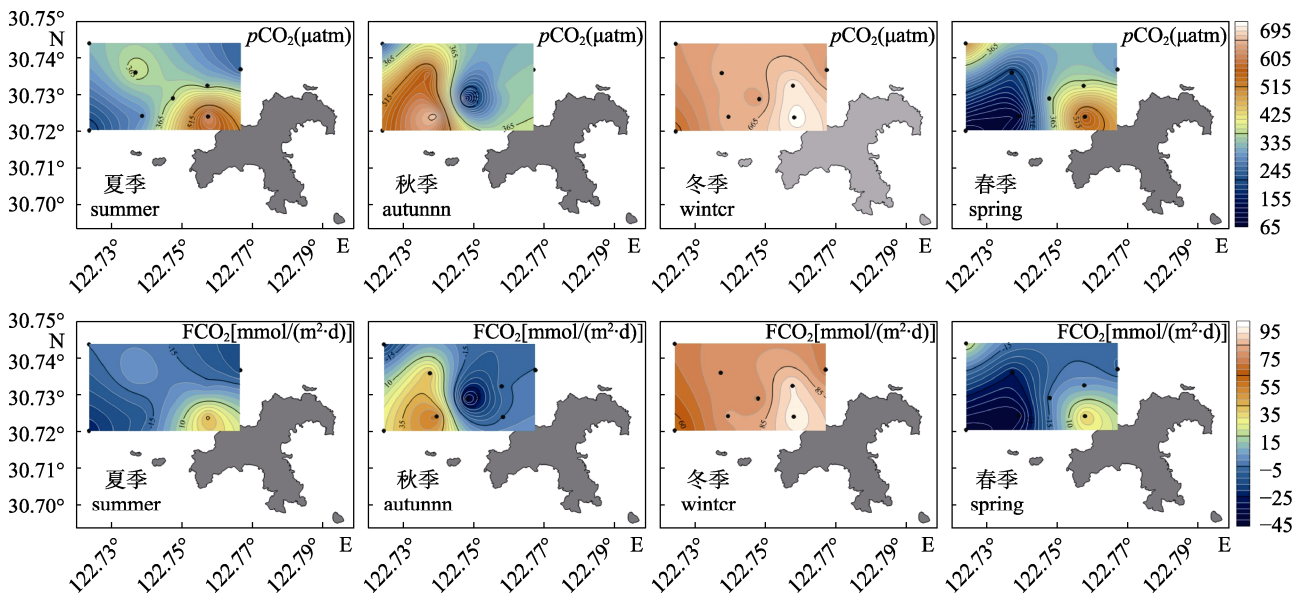


图 3 枸杞岛贻贝养殖海域不同季节表层海水二氧化碳分压(pCO_2)和海-气界面二氧化碳交换通量(FCO_2)空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of surface seawater partial pressure of seawater CO_2 (pCO_2) and sea-air CO_2 exchange flux (FCO_2) in different seasons in the shellfish culture area of Gouqi Island

2.4 不同养殖模式的碳通量与贻贝生物固碳量

从枸杞岛海域的整体碳汇分布格局来看, 枸杞岛海域在春、夏、秋季 $FCO_2<0$, 为碳汇, 冬季 $FCO_2>0$, 为碳源(表 5)。从海域的不同区域来看, 枸杞岛贻贝养殖区的 FCO_2 值虽然在春、夏、秋季均为负值, 但均显著高于外海非养殖区(表 6),

是弱汇区。枸杞岛后头湾贻贝养殖区的贻贝生物固碳量及该贻贝养殖海域单位面积固碳量如表 7 所示。

2.5 表层海水 pCO_2 的影响因素

经过对 pCO_2 与温度、盐度、pH、TA、DIC、DOC、POC 的线性拟合(图 4)和其显著性分析, 发

表 4 枸杞岛贻贝养殖海域不同季节表层海水 $p\text{CO}_2$ 和 FCO_2 的双因素方差分析
Tab. 4 Two-way ANOVA of $p\text{CO}_2$ and FCO_2 in surface water in different seasons in the shellfish culture area of Gouqi Island

变量 variable	变异来源 source of variable	df	F	P
二氧化碳分压 $p\text{CO}_2$	季节 season	3	8.413	0.0007**
	站位 station	7	0.8253	0.5777
海-气界面 CO_2 交换通量 FCO_2	季节 season	3	19.67	<0.0001**
	站位 station	7	0.9082	0.5190

注: *表示差异显著($P<0.05$); **表示差异极显著($P<0.01$).

Note: * means significant difference ($P<0.05$); ** means extremely significant difference ($P<0.01$).

表 5 枸杞岛贻贝养殖海域不同季节不同区域表层海水 $p\text{CO}_2$ 和 FCO_2 值
Tab. 5 The $p\text{CO}_2$ and FCO_2 values of surface water in different seasons and different areas in the shellfish culture area of Gouqi Island

指标 item	区域 area	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter	春季 spring
$p\text{CO}_2$	总体 total	347±45.59	395±66.15	654.3±15.7	310.3±65.7
	贻贝养殖区 shellfish culture area	402±58.1	411±98.52	677±15.36	320.9±83.62
	外海非养殖区 seawater control area	255.4±37.89	368.9±89.06	615.2±29.44	292.7±129.3
FCO_2	总体 total	-11.59±7.95	-3.61±37.22	78.24±5.09	-18.86±12
	贻贝养殖区 shellfish culture area	-2.232±10.19	-0.476±19.62	85.91±4.95	-16.91±15.27
	外海非养殖区 seawater control area	-27.17±7.02	-8.832±17.62	65.46±5.44	-22.13±23.65

表 6 枸杞岛贻贝养殖海域不同季节不同区域表层海水 FCO_2 值双因素方差分析
Tab. 6 Two-way ANOVA of FCO_2 value of surface seawater in different seasons and different areas in the shellfish culture area of Gouqi Island

变量 variable	变异来源 source of variable	df	F	P
FCO_2	季节 season	3	58.38	<0.0001**
	区域 area	1	7.249	0.016*

注: *表示差异显著($P<0.05$); **表示差异极显著($P<0.01$).

Note: * means significant difference ($P<0.05$); ** means extremely significant difference ($P<0.01$).

$p\text{CO}_2$ 与 pH、TA 四季均有显著相关性($P<0.05$), 其中春、夏季呈极显著相关($P<0.01$), 这表明研究海域养殖场内的大型海藻、微藻等初级生产力对

现 $p\text{CO}_2$ 与温度无显著相关性($P>0.05$), 从春季至夏季, 海温平均增加了 5 °C, $p\text{CO}_2$ 平均仅增加 36.7 μatm ; 夏季到秋季, 海温平均降低了 5.2 °C, $p\text{CO}_2$ 依然增加了 48 μatm ; 冬季 $p\text{CO}_2$ 与温度没有明显的相关性, 但冬季 $p\text{CO}_2$ 比秋季高 259 μatm (表 5), 温度对 $p\text{CO}_2$ 的影响不显著。养殖海域 $p\text{CO}_2$ 与盐度仅在秋季呈显著负相关关系($P<0.05$), 而在其他季节均无显著相关性, 这说明秋季养殖海域存在水体混合现象, 同时表明秋季盐度是影响该海域 $p\text{CO}_2$ 的因素之一。

$p\text{CO}_2$ 产生较大影响。贻贝养殖区与外海非养殖区的 $p\text{CO}_2$ 差值在夏季最大, 达 146.6 μatm (表 5), 说明夏季生物活动对 $p\text{CO}_2$ 影响显著。枸杞岛研究海域的 DIC 浓度在夏、秋季较低, 且 $p\text{CO}_2$ 随 DIC 浓度的降低而升高, 结合同时期的高 pH、低 TA 特征, 同时冬季养殖区浓度明显高于外海浓度, 论证了生物活动对 $p\text{CO}_2$ 产生较大影响这一推论, 而养殖海域 $p\text{CO}_2$ 与 DOC、POC 浓度在夏季呈正相关, 秋季为负相关关系(图 4c)。

综上可以推断出贻贝场内的生物生理活动是影响该研究海域 $p\text{CO}_2$ 的主要原因, 且秋季还同时受水团混合的影响。

表 7 枸杞岛贻贝养殖海域贻贝固碳量
Tab. 7 Maricultural bivalve carbon sequestration amount in the shellfish culture area of Gouqi Island

	干重/总湿重/% dry weight/total wet weight	含碳率/% carbon percentage	固碳量/t carbon sequestration amount	单位面积固碳量/(t/hm ²) carbon sequestration of unit area
贝壳 shell	43.5	11.45	18425.59	22.83
软组织 soft tissue	3.14	42.82	4973.97	

注: 碳汇量以 CO_2 计, 碳储量以 C 计。

Note: Carbon sink amount is calculated based on CO_2 , and carbon stock is calculated based on C.

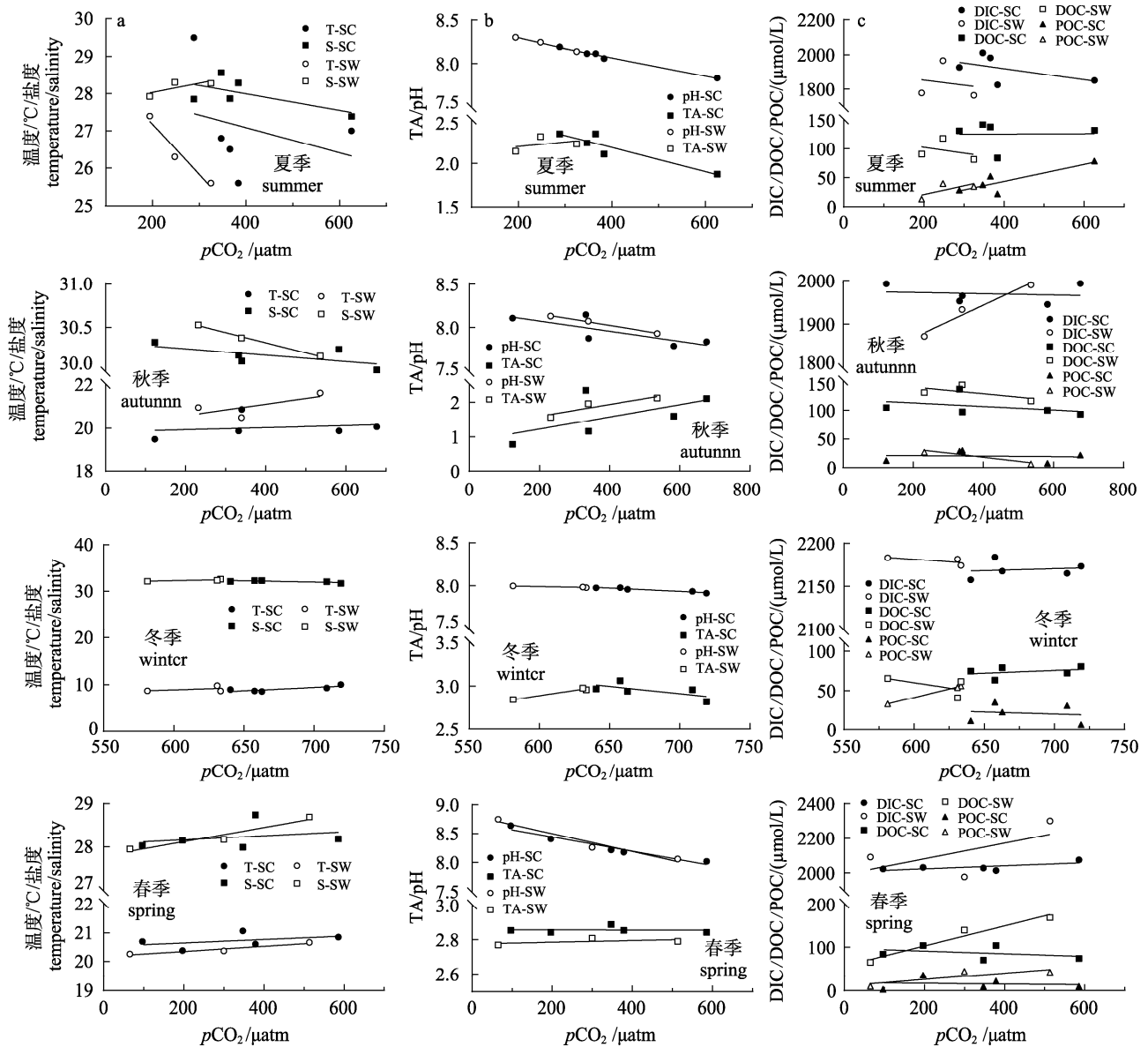


图 4 枸杞岛养殖海域不同季节、不同分区表层海水 $p\text{CO}_2$ 与碳酸盐体系参数的相关关系图

a. $p\text{CO}_2$ 与温度(T)和盐度(S)的关系; b. $p\text{CO}_2$ 与 pH 和总碱度(TA)的关系; c. $p\text{CO}_2$ 与 DIC、DOC、POC 的关系。

SC 表示贻贝养殖区, SW 表示外海非养殖区。

Fig. 4 Correlation between $p\text{CO}_2$ and carbonate system parameters in surface seawater in different seasons and different areas in the shellfish culture area of Gouqi Island

a. $p\text{CO}_2$ vs. temperature (T) and salinity (S); b. $p\text{CO}_2$ vs. pH and total alkalinity (TA); c. $p\text{CO}_2$ vs DIC, DOC, POC.

SC means shellfish culture area. SW means seawater control area.

3 讨论

3.1 枸杞岛研究海域主要影响因子对表层海水 $p\text{CO}_2$ 的影响

在近大陆架及河口地区, 关于温度和盐度与表层海水 $p\text{CO}_2$ 的相关性已经做了很多研究, 表明了温度和盐度是影响表层海水 $p\text{CO}_2$ 的重要因

素。韦章良等^[14]在三沙湾的研究结果表明, 温度在春、冬季对 $p\text{CO}_2$ 影响显著; 张继红等^[26]则显示温盐的共同作用在秋、冬季对 $p\text{CO}_2$ 影响显著。而在本研究中温度对 $p\text{CO}_2$ 的影响不显著, 与刘毅等^[8]、张继红等^[26]及蒋增杰等^[27]的结果一致。这可能与枸杞岛所处的交界位置有关, 上述海湾均位于半封闭海域, 而枸杞岛位于开放海域, 会

受到多种因素的影响,但多种因素交互作用后对枸杞岛海域反而影响不显著,导致该海域的碳酸盐体系复杂多变,需要进一步对开放海域大规模养殖碳酸盐体系开展研究。

开阔海域的 $p\text{CO}_2$ 与盐度呈正相关关系,而在水团混合区域则会表现为负相关关系^[28]。宋金明等^[29]也指出开阔海域的 $p\text{CO}_2$ 与盐度呈正相关关系,而在水团混合区域,由于咸淡水的混合作用,使盐度升高,但混合了低 $p\text{CO}_2$ 值的海水,从而使得 $p\text{CO}_2$ 值降低,最终呈现出负相关关系。本研究中,养殖海域的盐度仅在秋季与 $p\text{CO}_2$ 显著负相关,表明枸杞岛海域在秋季存在强烈的水体混合现象,而在其他季节盐度与 $p\text{CO}_2$ 无显著相关,这与张继红等^[26]和杨旭锋等^[30]的研究结果一致。长江径流水团混合区域, DIC 含量低, DOC 与 POC 含量高;台湾暖流水团混合区域, DIC 含量高,而 DOC 与 POC 含量低^[31],与本研究中秋季 DIC、DOC、POC 的分布特征(图 2)基本一致。

近海海域的强汇现象主要归因于强烈的初级生产过程^[30],有机质生产或者降解可影响海域碳源/汇格局^[32],杨旭锋等^[30]研究表明,长江水的混合及有机物的降解可导致 $p\text{CO}_2$ 的升高,而强烈的生物活动过程又可促使低 $p\text{CO}_2$ 的出现,与本研究中生物活动对 $p\text{CO}_2$ 产生较大影响这一结果一致。枸杞岛养殖海域有十分丰富的大型海藻资源^[33-35],夏、秋季是大型海藻快速生长期,也分别是生物量最大、多样性最高的时期^[36],此时大型海藻可吸收大量的 CO_2 及营养盐,显著提高水体 pH,降低 $p\text{CO}_2$ 。有机质分解、碳酸盐的沉淀或溶解、降水与蒸发均会影响海水 TA^[37],进而影响海域 $p\text{CO}_2$ 分布格局。本研究中,夏、秋季为贻贝快速生长期,钙化作用强烈,表层水大量消耗 HCO_3^- 生成碳酸钙,导致 TA 下降^[38],贻贝释放的铵态氮(NH_4^+)增加 TA,而 NH_4^+ 的硝化作用和有机碎屑(动物粪便、饲料残渣等)的再矿化降低 TA^[39-40];同时,大型海藻也可通过对硝酸盐(NO_3^-)和 NH_4^+ 的吸收改变 TA^[41-42]。POC 浓度的高低与生物代谢活动以及人为扰动关系密切。林晶^[43]在长江口附近海域的研究表明,夏季浮游植物对 POC 的贡献率达 15.3%。杨茜等^[44]研究表明养殖海域在秋季

的再悬浮率显著高于其他季节,即有高的 POC 浓度。而枸杞岛养殖海域的 POC 浓度与养殖区呈相反趋势,可能是由于该海域秋季贻贝场的快速滤食作用促进了该养殖海域的沉降通量,进一步佐证春、夏、秋季该海域生物过程对 $p\text{CO}_2$ 有较大的影响,枸杞岛海域的 $p\text{CO}_2$ 值与碳通量主要受养殖区内生物活动影响。

3.2 枸杞岛研究海域碳通量与固碳能力

枸杞岛后头湾贻贝养殖区的贝壳固碳量达 53334.46 t,软组织固碳量为 1029.45 t,单位面积固碳量达 22.83 t/hm²,其固碳量是非常可观的。但贻贝钙化作用是固定 2 个碳的同时会释放 1 个碳,因此,即使有可观的贻贝的生物碳汇量,在养殖过程中依然会释放大量的 CO_2 。刘毅等^[10]在贝、藻及混合养殖区的研究表明,藻类养殖区 $p\text{CO}_2$ 远低于外海海域,是强汇区;贝类养殖区 $p\text{CO}_2$ 略高于外海海域,是弱汇区;贝藻混养区则介于二者之间。蒋增杰等^[27]的研究也表明,在秋季对乳山湾太平洋牡蛎养殖水域是碳汇;这与本研究中春、夏、秋季贻贝养殖区的 FCO_2 值为负值结果一致,而本研究区域秋季的 FCO_2 最低,可能是因为秋季贻贝活动强烈产生大量排泄物,且秋季的海藻生物量较低,导致秋季 FCO_2 低。本研究海域虽然春、夏、秋季为碳汇,但冬季碳源强度大,使得整个研究区域在全年表现为碳源,与 Chauvaud 等^[45]和 Martin 等^[46]显示贝类区域是碳源的结果一致,但张继红等^[26]的研究显示贝类养殖区全年均为碳汇。这可能是因为枸杞岛海域的贻贝大规模养殖,冬季贻贝呼吸、有机物分解的加剧,释放出较多的 CO_2 ,与 $p\text{CO}_2$ 仅在冬季和 POC 浓度呈显著正相关($P=0.023$)相呼应;此外,冬季表层海水 CO_2 的增加可能是由于冬季海水的垂直输送将底层 CO_2 输送到表层^[47-48],致使冬季碳源强度大,从而影响整个区域的碳汇格局。

Han 等^[12]在大亚湾研究表明,牡蛎养殖区是 CO_2 释放源,贝藻混养区则可以有效降低 CO_2 排放量;同时,Han 等^[13]在深澳湾的结果表明,在养殖区内大型海藻是 CO_2 的最大固定者,贡献力高达 58%,在大规模海水养殖活动中,可以通过扩大海藻养殖实现更高的碳汇强度。章守宇等^[36]在

枸杞岛海域对贻贝养殖筏架上附着野生海藻的研究结果显示, 该海域大型海藻夏季平均生物量最高, 达 55.29 t/hm², 春季平均生物量为 35.08.6 t/hm², 秋、冬季的平均生物量较低, 分别为 23.41 t/hm² 和 24.42 t/hm²。根据大型海藻的碳汇计量方法^[24], 可得出大型海藻在夏季可吸收 11.79 t/hm² 的 CO₂, 春季可吸收 7.48 t/hm² 的 CO₂, 秋季可吸收 4.99 t/hm² 的 CO₂, 冬季可吸收 5.21 t/hm² 的 CO₂。因此不管是从碳通量还是自身的生物固碳来说, 大型海藻都会对养殖区域 FCO₂ 值的降低产生很大的影响^[49]。贝类与大型海藻以适当比例进行养殖可产生最有效的净碳汇, 同时最大程度上减少养殖活动对环境的负面影响^[11]。因此, 若要强化枸杞岛海域碳汇分布格局, 应把大型海藻考虑到养殖系统中, 发展以多种养殖个体的营养层级综合养殖。合适的多营养层级综合养殖既可以在一定程度上改善海水养殖带来的富营养化, 还促进养殖海域海-气 CO₂ 通量及生物固碳量的增加。在后续的研究中可根据不同的综合养殖模式开展海-气 CO₂ 碳通量及生物固碳的测算工作, 进一步阐述贝藻混合养殖下碳酸盐体系的相互作用。

参考文献:

- [1] Libes S M. Introduction to marine biogeochemistry[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2009.
- [2] Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO₂[J]. Science, 2004, 305(5682): 367-371.
- [3] DeVries T, Holzer M, Primeau F. Recent increase in oceanic carbon uptake driven by weaker upper-ocean overturning[J]. Nature, 2017, 542(7640): 215-218.
- [4] Jiao N Z, Liang Y T, Zhang Y Y, et al. Carbon pools and fluxes in the China Seas and adjacent oceans[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61: 1535-1563. [焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 等. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 1393-1421.]
- [5] Fang J H, Fang J G, Chen Q L, et al. Assessing the effects of oyster/kelp weight ratio on water column properties: An experimental IMTA study at Sanggou Bay, China[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2020, 38(6): 1914-1924.
- [6] Tang Q S, Liu H. Strategy for carbon sink and its amplification in marine fisheries[J]. Engineering Sciences, 2016, 18(3): 68-73. [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.]
- [7] Tang Q S, Zhang J H, Fang J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems[J]. Marine Ecology Progress Series, 2011, 424: 97-104.
- [8] Liu Y, Zhang J H, Fang J H, et al. Analysis of the air-sea surface carbon dioxide flux and its interaction with aquaculture activities in sanggou bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2017, 38(6): 1-8. [刘毅, 张继红, 房景辉, 等. 桑沟湾春季海-气界面 CO₂ 交换通量及其与养殖活动的关系分析[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(6): 1-8.]
- [9] Qiu S, Gong X B, Zhang J H, et al. Distribution and affecting factors of pCO₂ in aquaculture areas of Sanggou Bay during spring[J]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(1): 31-37. [邱爽, 龚信宝, 张继红, 等. 桑沟湾养殖区春季 pCO₂ 分布特征及影响机制[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 31-37.]
- [10] Liu Y, Lin F, Wu W G, et al. Seasonal variations (spring and summer) of the surface seawater pCO₂ in Sanggou Bay and corresponding impact factors[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(5): 1107-1114. [刘毅, 蔺凡, 吴文广, 等. 桑沟湾表层水春夏两季二氧化碳分压变化和影响因素[J]. 中国水产科学, 2017, 24(5): 1107-1114.]
- [11] Jiang W W, Fang J H. Effects of mussel-kelp ratios in integrated mariculture on the carbon dioxide system in Sanggou Bay[J]. Journal of Sea Research, 2021, 167: 101983.
- [12] Han T, Shi R, Qi Z, et al. Interactive effects of oyster and seaweed on seawater dissolved inorganic carbon systems: Implications for integrated multi-trophic aquaculture[J]. Aquaculture Environment Interactions, 2017, 9: 469-478.
- [13] Han T, Shi R, Qi Z, et al. Impacts of large-scale aquaculture activities on the seawater carbonate system and air-sea CO₂ flux in a subtropical mariculture bay, southern China[J]. Aquaculture Environment Interactions, 2021, 13: 199-210.
- [14] Wei Z L, Han H B, Hu M, et al. Seasonal variation of sea-air CO₂ flux in mariculture area in Yantian Harbor, Sansha Bay[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(1): 106-115. [韦章良, 韩红宾, 胡明, 等. 三沙湾盐田港海水养殖海域海-气界面 CO₂ 交换通量的时空变化[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(1): 106-115.]
- [15] Lin J, Zhang S Y. A numerical simulation of environment improvement in the aquaculture sea area of Gouqi Island[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2003, 12(2): 140-145. [林军, 章守宇. 枸杞岛养殖海域流场环境改造的数值模拟[J]. 上海水产大学学报, 2003, 12(2): 140-145.]
- [16] Chen Q M, Zhang S Y, Lin J, et al. Growth conditions of *Mytilus edulis* Linnaeus and its relationship with environmental factors in Gouqi Island[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(5): 809-815. [陈清满, 章守宇, 林军, 等. 枸杞岛紫贻贝生长状况及其与环境因子关系[J]. 上海海

- 洋大学学报, 2012, 21(5): 809-815.]
- [17] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Specifications for oceanographic survey - Part 4: Survey of chemical parameters in sea water, GB/T 12763.4-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 海洋调查规范第 4 部分: 海水化学要素调查. GB/T 12763.4-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [18] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Practice of sampling plans for aquatic products, GB/T 30891-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 水产品抽样规范. GB/T 30891-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.]
- [19] Dickson A G, Millero F J. A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in seawater media[J]. Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers, 1987, 34(10): 1733-1743.
- [20] Sheng G Y. The carbon dioxide system in seawater of north Yellow Sea and Qingdao coast[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. [盛桂云. 北黄海和青岛近海的二氧化碳体系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.]
- [21] Millero F J, Leung W H. The thermodynamics of seawater at one atmosphere[J]. American Journal of Science, 1976, 276(9): 1035-1077.
- [22] Dickson A G. Thermodynamics of the dissociation of boric acid in synthetic seawater from 273.15 to 318.15 K[J]. Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers, 1990, 37(5): 755-766.
- [23] Weiss R F. Carbon dioxide in water and seawater: The solubility of a non-ideal gas[J]. Marine Chemistry, 1974, 2(3): 203-215.
- [24] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(C5): 7373.
- [25] Ministry of Natural Resources, People's Republic of China, Industrial Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Estimation method of maricultural seaweed and bivalve carbon sink—Carbon stock variation method HY/T 0305-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. [中华人民共和国自然资源部. 中华人民共和国推荐性行业标准: 养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法 碳储量变化法 HY/T 0305-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.]
- [26] Zhang J H, Wu W G, Ren L H, et al. Seasonal variation of $p\text{CO}_2$ and its potential influencing factors in aquaculture areas of Sanggou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(1): 57-64. [张继红, 吴文广, 任黎华, 等. 桑沟湾表层水 $p\text{CO}_2$ 的季节变化及影响因素分析[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 57-64.]
- [27] Jiang Z J, Fang J G, Wang W, et al. Sea-air CO_2 flux in *Crassostrea gigas* aquaculture area of East Gongjia Island, Rushan, Shandong, in autumn[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(10): 1592-1598. [蒋增杰, 方建光, 王巍, 等. 乳山宫家岛以东牡蛎养殖水域秋季海—气界面 CO_2 交换通量研究[J]. 水产学报, 2012, 36(10): 1592-1598.]
- [28] Qu B X, Song J M, Yuan H M, et al. Advances of seasonal variations and controlling factors of the air-sea CO_2 flux in the East China Sea[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(7): 783-793. [曲宝晓, 宋金明, 袁华茂, 等. 东海海—气界面二氧化碳通量的季节变化与控制因素研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 783-793.]
- [29] 宋金明, 朱连磊, 李学刚, 等. 东海中西部海域海气界面碳的迁移通量[C]//中国海洋湖沼学会第十次全国会员代表大会暨学术研讨会论文集. 青岛, 2012: 113.
- [30] Yang X F, Yu P S, Pan J M, et al. Spatial variation of underway surface $p\text{CO}_2$ and its controls in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent sea area in late summer of 2019[J]. Journal of Marine Sciences, 2021, 39(4): 63-72. [杨旭锋, 于培松, 潘建明, 等. 2019 年夏末长江口及其邻近海域走航 $p\text{CO}_2$ 变化及控制机制[J]. 海洋学研究, 2021, 39(4): 63-72.]
- [31] Chen X, Song J M, Yuan H M, et al. CO_2 fluxes across the air-sea interface of the East China Sea in summer 2012 and the change tendency of regional carbon sink strength[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(12): 18-31. [陈鑫, 宋金明, 袁华茂, 等. 东海 2012 年夏季海—气界面碳交换及其区域碳汇强度变化趋势初探[J]. 海洋学报, 2014, 36(12): 18-31.]
- [32] Li D W, Lin H, Chen S Y, et al. Distributions and controlling factors of $p\text{CO}_2$ in the Changjiang (Yangtze River) estuary-east China Sea continuum in spring of 2017[J]. Journal of Marine Sciences, 2021, 39(4): 52-62. [李德望, 林华, 陈思杨, 等. 2017 年春季长江口-东海连续体 $p\text{CO}_2$ 的空间分布特征及其控制因素[J]. 海洋学研究, 2021, 39(4): 52-62.]
- [33] Zhang S Y, Liang J, Wang Z H, et al. Distribution characteristics of benthic algae in intertidal zone of Ma'an Archipelago of Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2299-2307. [章守宇, 梁君,

- 汪振华, 等. 浙江马鞍列岛海域潮间带底栖海藻分布特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2299-2307.]
- [34] Zeng Y P, Ma J H, Chen B B, et al. Survey on the community of benthic macro-algae in Gouqi Island of Zhejiang Province [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(5): 1096-1102. [曾宴平, 马家海, 陈斌斌, 等. 浙江省枸杞岛潮间带大型底栖海藻群落的研究[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(5): 1096-1102.]
- [35] Bao Y L, Duan Y L, Yang N, et al. Comparison of community structure of large seaweed in mussel culture area of Shengsi Islands and intertidal zone of Xiasanhengshan Island[J]. Marine Fisheries, 2020, 42(5): 595-607. [包炎琳, 段元亮, 杨娜, 等. 嵊泗列岛贻贝养殖区与无人岛潮间带大型海藻群落结构比较[J]. 海洋渔业, 2020, 42(5): 595-607.]
- [36] Zhang S Y, Cui X, Wang Z H, et al. Community structure of epiphytic macroalgae on mussel culture rafts in Gouqi Island [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(5): 726-739. [章守宇, 崔潇, 汪振华, 等. 枸杞岛贻贝养殖筏架附着海藻的群落结构[J]. 水产学报, 2021, 45(5): 726-739.]
- [37] Sui Y N. Alkalinity of seawater[J]. Periodical of Ocean University of China, 1986, 16(1): 160-172, 208. [隋永年. 海水总碱度及其示性特征[J]. 山东海洋学院学报, 1986, 16(1): 160-172, 208.]
- [38] Li J Q, Zhang W W, Ding J K, et al. Effect of large-scale kelp and bivalve farming on seawater carbonate system variations in the semi-enclosed Sanggou Bay[J]. Science of the Total Environment, 2021, 753: 142065.
- [39] PATRICK MEGONIGAL J, Schlesinger W. Enhanced CH₄ emission from a wetland soil exposed to Elevated CO₂[J]. Biogeochemistry, 1997, 37(1): 77-88.
- [40] Wolf-Gladrow D A, Zeebe R E, Klaas C, et al. Total alkalinity: The explicit conservative expression and its application to biogeochemical processes[J]. Marine Chemistry, 2007, 106(1-2): 287-300.
- [41] Brewer P G, Goldman J C. Alkalinity changes generated by phytoplankton growth1[J]. Limnology and Oceanography, 1976, 21(1): 108-117.
- [42] Goldman J C, Brewer P G. Effect of nitrogen source and growth rate on phytoplankton-mediated changes in alkalinity1[J]. Limnology and Oceanography, 1980, 25(2): 352-357.
- [43] Lin J. Distributions of dissolved organic carbon and particulate organic carbon in the Changjiang Estuary and its adjacent area[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007. [林晶. 长江口及其毗邻海区溶解有机碳和颗粒有机碳的分布[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.]
- [44] Yang Q, Yang S, Song X L, et al. Vertical flux and resuspension of settling particulate matter of Sanggou Bay in summer and autumn[J]. 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[J]. 海洋学报, 2014, 36(12): 85-90.]
- [45] Chauvaud L, Thompson J K, Cloern J E, et al. Clams as CO₂ generators: The *Potamocorbula amurensis* example in San Francisco bay[J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(6): 2086-2092.
- [46] Martin S, Thouzeau G, Chauvaud L, et al. Respiration, calcification, and excretion of the invasive slipper limpet, *Crepidula fornicata* L.: Implications for carbon, carbonate, and nitrogen fluxes in affected areas[J]. Limnology and Oceanography, 2006, 51(5): 1996-2007.
- [47] Chou W C, Sheu D, Chen C T A, et al. Seasonal variability of carbon chemistry at the SEATS time-series site, northern South China Sea between 2002 and 2003[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2005, 16(2): 445-465.
- [48] Tseng C M, Wong G T F, Chou W C, et al. Temporal variations in the carbonate system in the upper layer at the SEATS station[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2007, 54(14-15): 1448-1468.
- [49] Mao Y Z, Li J Q, Xue S Y, et al. Ecological functions of the kelp *Saccharina japonica* in integrated multi-trophic aquaculture, Sanggou Bay, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3230-3237. [毛玉泽, 李加琦, 薛素燕, 等. 海带养殖在桑沟湾多营养层次综合养殖系统中的生态功能[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3230-3237.]

Carbon flux and carbon sequestration capacity in a shellfish culture area of Gouqi Island

CHANG Jianan¹, DUAN Yuanliang^{1,5}, ZHANG Jianlin¹, SHEN Yifei¹, SHEN Qianyu¹, ZHAO Shuang¹, LIU Jinlin¹, ZHANG Jianheng^{1,2,3,4}, CAI Chun'er^{1,2,3,4}, SHAO Liu^{1,2,3,4}, HE Peimin^{1,2,3,4}

1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. Water Environment and Ecology Engineering Center of Shanghai Institute of Higher Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201206, China;
5. Fisheries Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

Abstract: To study the carbon flux and carbon sequestration capacity of a shellfish culture area in Gouqi Island in different seasons, the temperature, salinity, pH, total alkalinity (TA), and the distribution differences of dissolved inorganic carbon (DIC), dissolved organic carbon (DOC), and particulate organic carbon (POC) in the water were monitored and analyzed in 2020–2021, and the partial pressure of CO₂ ($p\text{CO}_2$) in the surface seawater and the flux value of CO₂ (FCO_2) at the sea-air interface in the shellfish culture area of Gouqi Island were estimated. The influencing factors of $p\text{CO}_2$ were also analyzed, and the carbon sequestration capacity of the shellfish culture area in Gouqi Island was explored. The results showed that the distributions of temperature, salinity, pH, TA, DIC, DOC, and POC in the surface seawater of Gouqi Island during the four seasons were significantly different ($P < 0.01$). The annual variation range of $p\text{CO}_2$ in the sea area of Gouqi Island is 65.19–719.1 μatm , and water mass mixing and biological activity are important factors that affect $p\text{CO}_2$ in the surface seawater of the sea area. The variation range of the FCO_2 value in the mussel culture area of Gouqi Island was $-63.75\text{--}99.18 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, with significant changes among the four seasons ($P < 0.01$). There was a significant difference in the carbon distribution pattern throughout the year. The carbon sinks in spring, summer, and autumn were $(-18.86 \pm 12) \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, $(-11.59 \pm 7.95) \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, and $(-3.61 \pm 37.22) \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, and the carbon source in winter was $(78.24 \pm 5.09) \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. FCO_2 values in the shellfish culture area of Gouqi Island were higher than those in offshore non-culture areas and reached significant levels, indicating that it was a weak sink area. The carbon sequestration of seashells in the study area was 18425.59 t, that of mussel soft tissues was 4 973.97 t, and the carbon sequestration of mussel per unit area reached 22.83 t/hm². This study provided a reference for the evaluation of carbon sinks in shellfish cultures.

Key words: Gouqi Island; partial pressure of seawater CO₂; sea-air CO₂ exchange flux; mariculture; shellfish culture; carbon sink

Corresponding author: HE Peimin. E-mail: pmhe@shou.edu.cn