

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*

刘毅¹ 张继红^{1,2①} 房景辉¹ 蔺凡¹ 吴文广¹

(1. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071)

摘要 为研究不同养殖活动对海-气界面 CO₂ 交换通量(F)的影响,于2014年5月采用走航式 CO₂ 分压仪对中国北方典型的多营养层次混合养殖海域—桑沟湾养殖区的表层水 CO₂ 分压($p\text{CO}_2$)进行了大面调查,并通过数据计算桑沟湾海区的 F 值。在调查过程中,选择在网箱养殖区、贝类养殖区、藻类养殖区等区域内进行 24 h 定点连续观测。探讨了春季桑沟湾海-气界面 CO₂ 的交换通量及其主要影响因素。大面调查结果显示,桑沟湾内海水中 $p\text{CO}_2$ 总体变化趋势是由湾内向湾外递减,网箱养殖区海水中 $p\text{CO}_2$ 远远高于其他区域。在大面调查中,贝类、藻类、贝藻混养、网箱养殖区的 F 值分别为(-1.02±0.83)、(-15.40±1.28)、(-4.32±1.41)、8.14 mmol/(m²·d)。定点连续监测显示,藻类、贝类、网箱养殖区的 $p\text{CO}_2$ 24 h 平均值分别为(320±14)、(330±10)、(413±37) μatm。研究表明,光合作用是海-气界面 CO₂ 交换通量的主要影响因素之一,不同养殖区之间的海-气界面 CO₂ 交换通量差异显著。影响各养殖区海-气界面 CO₂ 交换通量日变化规律的影响因子与走航调查结果一致。养殖活动是影响海-气界面 CO₂ 交换通量的主导因素。

关键词 桑沟湾; 交换通量; CO₂ 分压; 海水养殖

中图分类号 S931.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2017)06-0001-08

海洋占据了地球表面积的 70%,从海洋中获取食物,发展海洋经济,是缓解粮食短缺这一世界性的重要手段之一。工业革命之后,由于人类使用化石燃料无节的制排放和对树木的乱砍乱伐,导致大气 CO₂ 浓度增加,所引起的“温室效应”是目前人类最为急切解决的问题之一。全球碳循环是国际地圈-生物圈计划(IGBP)的核心问题之一。人类通过燃烧的方式利用化石燃料,并向大气中排放 CO₂,人类活动每年向大气中排放约为 6 Gt 的碳,这些碳被海洋吸收了约 1/3,被吸收的碳量为 2.2 Gt/a(Baliño *et al.*, 2001)。海洋在吸收 CO₂、调节全球气候,缓解“温室效应”对

全球气候带来的变化做出了巨大贡献。碳是主要的生命元素,CO₂ 在海-气界面转移的生物化学过程是关键的海碳循环过程,研究海-气界面 CO₂ 交换通量是认识 CO₂ 在海水中转移与归宿的基础(李宁等, 2005)。我国在世界海水水产养殖产量和养殖规模上都稳居第一,人类的养殖活动可能成为减排增汇的有效手段(Tang *et al.*, 2011)。我国学者在 2010 年左右率先提出“碳汇渔业”的概念,近年来的不断探索在世界范围内引起了广泛关注,并逐渐被人们接受。目前,有关海-气界面 CO₂ 交换通量的研究主要集中在开阔海域,对人类活动集中的陆架边缘海中不同养殖区的

* 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2014A01YY01)、国家十二五支撑计划课题(2011BAD13B06)和国家自然科学基金项目(41276172)共同资助[This work was supported by Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2014A01YY01), National Key Technology R&D Program of China (2011BAD13B06), and National Natural Science Foundation of China (41276172)]. 刘毅, E-mail: liuyi@ysfri.ac.cn

① 通讯作者: 张继红, 研究员, E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2016-03-31, 收修改稿日期: 2016-04-28

研究鲜见报道。目前,对养殖区与非养殖区之间的不同变化影响研究(蒋增杰等, 2013)较少,随着“碳汇渔业”研究的不断深入,研究不同养殖模式对海-气界面 CO_2 交换通量的影响就显得尤为重要。

桑沟湾是我国典型的多营养层次综合养殖海域之一,同时也是我国北方重要的藻类养殖基地,养殖总面积达 135 km^2 。湾内共划分 4 个养殖区,分别是网箱养殖区、贝类养殖区、贝藻混养区以及藻类养殖区。本研究在 2014 年 5 月 20–24 日,通过对桑沟湾表层海水 $p\text{CO}_2$ 等参数的大面调查,以及不同养殖区的昼夜变化监测。分析了该海域不同养殖模式的 CO_2 交换通量及其影响机制。

1 调查海域与方法

1.1 调查海域及站位设置

桑沟湾位于山东半岛的最东端,是半岛东侧最开阔的海湾,海湾面积约为 150 km^2 。桑沟湾内分 4 类养殖区,湾内为贝类养殖区,靠近湾口为藻类养殖区,中间是贝藻混养区,网箱养殖区位于湾内的西南角。桑沟湾养殖海区分布情况以及本研究的调查站位见图 1,共设置 14 个调查站位,于 2014 年 5 月 20 日高潮时,分别由两条调查船沿海流方向同时出发,调查两条断面(断面 1 包括 18、15、10、6、3、1、21 站位;断面 2 包括 19、14、11、5、4、22 站位)。另外,于 5 月 21–24 日分别在贝类养殖区、藻类养殖区、网箱

养殖区进行 24 h 的连续观测。

1.2 调查参数与方法

所有取得的样品均按《海洋监测规范》(GB17378.3-2007)中规定的方法采集、处理和保存。现场使用美国 YSI-EXO2 型水质分析仪直接测定和读取溶解氧(DO)、水温(T)、pH(相对精度 ± 0.01)及盐度(S)等海洋监测指标。利用水样采集器采集表层水样并迅速导入 2.5 L 加仑桶,现场用 GF/F 膜及醋酸纤维素膜抽滤,将 GF/F 膜抽滤后的水样移入提前经过马弗炉 450°C 4 h 灼烧过的 30 ml 广口瓶中,用于溶解无机碳(DIC)的检测。醋酸纤维素膜和抽滤后的水样于 4°C 保存,用于叶绿素 a (Chl-a)以及总碱度(TA)的分析。TA 采用自动电位滴定法测定(自动滴定仪 848Titrimo plus, Metrohm 公司,瑞士),测量精度 $\pm 0.01 \mu\text{mol/L}$ 。DIC 采用德国耶拿 Multi N/C 总有机碳分析仪直接测得,表层水 CO_2 分压($p\text{CO}_2$)由德国 SubCtech 公司的 OceanPack 走航仪进行测定。

1.3 数据分析与计算方法

目前,关于海气界面 CO_2 交换通量的计算模式较多,其中,以 Wanninkhof(1999)提出的模式应用比较广泛(Rehder *et al*, 2001; Ternon, 2000),海-气界面 CO_2 交换通量采用以下公式进行估算:

$$F = k \times a_s \times \Delta p\text{CO}_2$$

式中, F 为海-气界面 CO_2 交换通量($\text{mmol/m}^2 \cdot \text{d}$), F 值为 CO_2 交换通量即大气 CO_2 源汇的强度,正负代

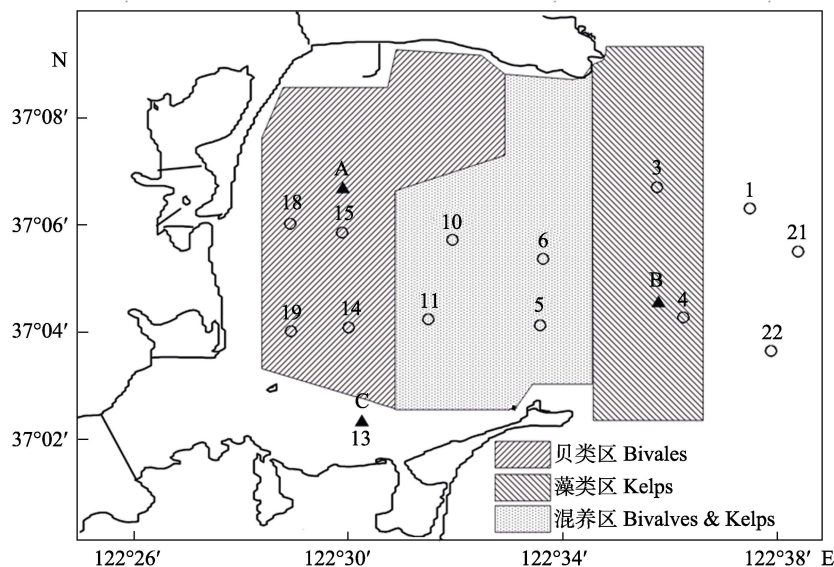


图 1 桑沟湾调查站位

Fig.1 Sampling stations in Sanggou Bay

A、B、C 分别为贝类养殖区、藻类养殖区、网箱养殖区的连续监测站

A, B and C refer to continuous observation stations in bivalves area, seaweed area and net-cage area, respectively

表源汇的方向。当海水从大气中吸收 CO₂, 表现为汇时 F 为负值; 当海水向大气中释放 CO₂ 时, 表现为源 F 为正值。 k 为海-气界面气体传输速度(cm/h); α_s 为 CO₂ 在海水中的溶解度系数(mol/kg·atm), 是与温度和盐度相关的函数, 参照 Weiss(1974)公式计算得到; $\Delta p\text{CO}_2$ 是海水与大气中 $p\text{CO}_2$ 的差值。本研究中, 大气 $p\text{CO}_2$ 取值为 397 μatm (World Meteorological Organization, 2014), 海气界面气体传输速度 k 取大陆架海区的平均值 10.3(Tsunogai *et al.*, 1999)。

等值线的绘制采用 Surfer 8.0 软件; 差异显著性及相关性分析采用 SPSS 17.0 软件, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 桑沟湾走航调查结果

2.1.1 表层水 $p\text{CO}_2$ 等参数的空间分布特征 由于桑沟湾内水位较浅, 受光照影响近岸升温较快, 水温的变化趋势由湾内向湾外递减。水温的最高值为 16.89°C(19 站位), 最低值为 11.47°C(1 站位), 相差 5.42°C。盐度集中在 30.20–30.94 之间, 变化较小。Chl-*a* 的浓度介于 0.14–1.40 $\mu\text{g/L}$ 之间, 平均值为 (0.67±0.39) $\mu\text{g/L}$, 平面分布从湾内向湾外逐渐升高(图 2-a)。TA 的平面分布趋势是从湾内向湾外递增(图 2-b), 变化幅度为 2251.93–2849.68 $\mu\text{mol/L}$ 。DIC 的浓度范围为 2120.74–2284.13 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为

(2213.91±43.05) $\mu\text{mol/L}$, 平面分布的趋势是由湾内向湾外递减, 并在外海空白区有一个明显升高的趋势(图 2-c)。由于数据丢失, DO 只有一条断面的数据得以保留, 通过对剩余数据的分析, DO 的变化也大体呈现由湾内向湾外递增的趋势。 pH 值的变化范围为 7.44–8.27, 最低值出现在贝类养殖区, 最高值出现在藻类养殖区, 平面分布也是由湾内向湾外递增。

调查海区表层海水中 $p\text{CO}_2$ 的平面分布见图 2-d。从图 2-d 可以看出, 在桑沟湾养殖海域表层海水的 $p\text{CO}_2$ 平面分布呈现从湾内向湾外逐渐降低的趋势, 最高值出现在网箱养殖区, 为 402.56 μatm 。且不同养殖区之间的 $p\text{CO}_2$ 差异显著($P < 0.05$)。

2.1.2 不同养殖区海-气界面 CO₂ 交换通量 表层海水中 $p\text{CO}_2$ 的变化范围在 323.42–402.56 μatm 之间。按照不同养殖海区划分各站位的 CO₂ 交换通量值 F 见表 1。空白区、藻类区、贝藻混养区、贝类区、网箱区的 CO₂ 通量分别为 (-3.30±0.35)、(-15.40±1.28)、(-4.32±1.41)、(-1.02±0.83)、8.14 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。除网箱区外, 其他各区都表现为汇区。其中, 藻类区的 F 值最大, 其次是贝藻混养区, 贝类区最小。各区之间的差异性显著($P < 0.05$)。

2.2 定点连续监测结果

藻类、贝类、网箱养殖区 24 h 连续监测的结果

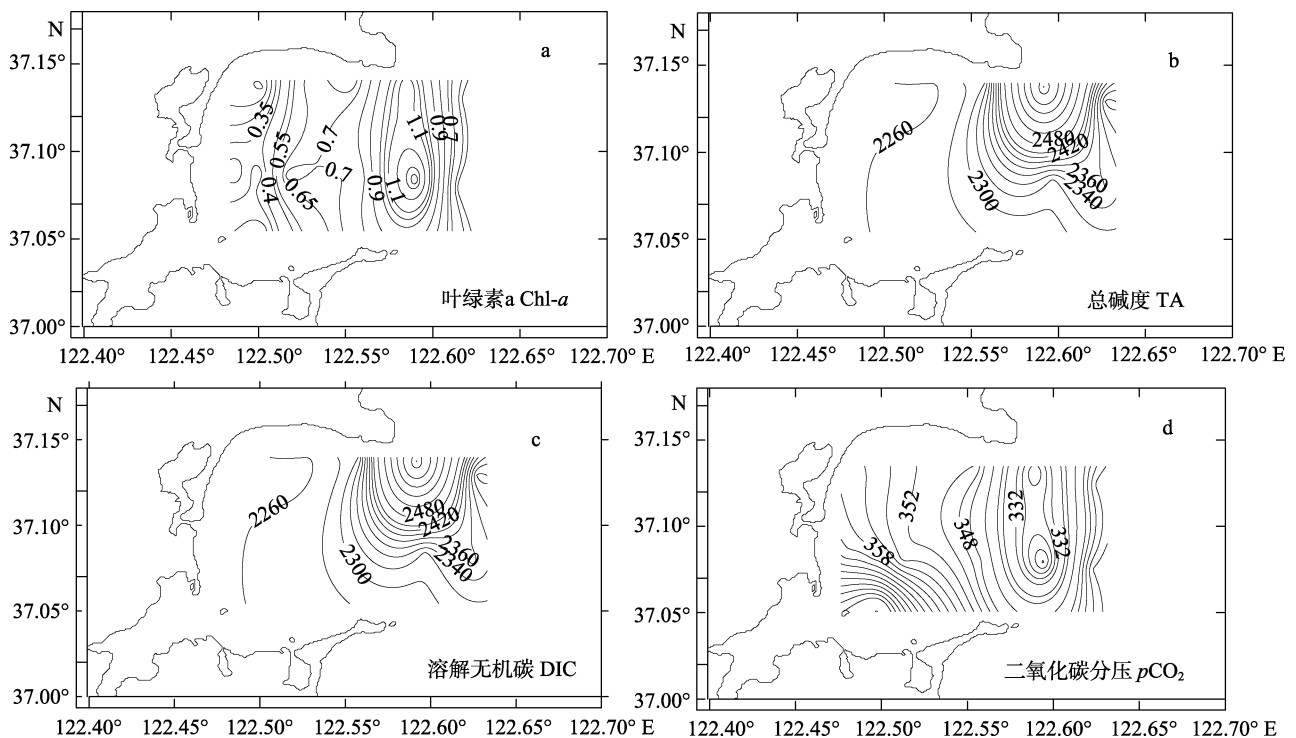


图 2 桑沟湾春季表层水中叶绿素 a、总碱度、溶解无机碳浓度和 CO₂ 分压的空间分布
Fig.2 Spatial distribution of Chl-*a*, TA, DIC and $p\text{CO}_2$ of surface water in Sanggou Bay in spring

表1 桑沟湾不同养殖区的 CO₂ 通量 *F*
Tab.1 Flux of CO₂ in different areas of Sanggou Bay

养殖区 Culture area	站位 Station	CO ₂ 交换通量 <i>F</i> (mmol/m ² ·d)
空白 Control	21	-3.68
	1	-3.23
	22	-3.00
	平均值 Mean	-3.30±0.35
藻类 Seaweed	3	-14.50
	4	-16.31
	平均值 Mean	-15.40±1.28
贝藻 Bivalves and seaweed	5	-6.22
	6	-4.43
	10	-3.70
	11	-2.93
	平均值 Mean	-4.32±1.41
贝类 Bivalves	14	-0.68
	15	-2.08
	18	-1.21
	19	-0.12
	平均值 Mean	-1.02±0.83
网箱 Cage	13	8.14

见图3—图5(贝类养殖区的 DO 和温度数据丢失)。从图3—图5可以看出,藻类区的温度明显低于贝类区及网箱区,与走航调查的结果一致。各监测点之间以及每个监测点的盐度昼夜变化都不大。贝类区的 pH 显著低于藻类区和网箱区($P<0.05$)。藻类区的平均 DO 浓度为(9.37±0.35) mg/L,显著高于网箱区($P<0.05$)(贝类区溶氧数据丢失无法比较)。藻类区的 Chl-*a* 浓度最高,平均值为(1.56±0.54) μg/L,网箱区最低,平均值为(1.18±0.20) μg/L。藻类区、贝类区、网箱区 pCO₂ 的 24 h 平均值分别为(320±14)、(330±10)、(413±37) μatm。相互间关系为藻类区<贝类区<网箱区,与走航调查的结果相一致。藻类区的 pCO₂ 变化范围为 298–340 μatm,最大值与最小值相差 42 μatm,贝类区 pCO₂ 变化范围为 313–344 μatm,最大值与最小值相差 31 μatm,网箱区 pCO₂ 变化范围为 324–467 μatm,最大值与最小值相差 143 μatm。藻类区与贝类区的 pCO₂ 与 Chl-*a* 浓度显著负相关,同时,藻类区 Chl-*a* 与 DO 显著正相关($R=0.97, P<0.01$)。

通过连续 24 h 观测,网箱养殖区始终是 CO₂ 的源区,Chl-*a*、pH 值等相关参数的变化幅度较小,且网箱养殖区更靠近陆地,受陆源以及人为因素的影响较大,导致网箱养殖区各时间点参数均无明显的相关性,但从总体分析来看,网箱区较其他区的低 Chl-*a* 浓度,低 pH 值仍然可以解释此区域的高 pCO₂。

3 讨论

3.1 桑沟湾表层水 pCO₂ 空间变化特征

3.1.1 CO₂ 体系各参数与环境因子的关系 走航作业中, DIC 最低值出现在藻类养殖区 3 站位,最高值出现在贝类养殖区 15 站位, DIC 含量的最高值与最低值相差约 164 μmol/L。由于调查海区筏架较多,且盐度相差较小,可以排除海流对 DIC 分布的影响作用,但是整个桑沟湾内表层海水温差较大,湾内贝类养殖区温度比湾外藻类养殖区温度高 5℃左右,通过 CO₂ SYS 软件对温度差进行校正发现,当温度升高 5℃时,会促使 DIC 降低 27 μmol/L。扣除温度的影响,藻类养殖区的 DIC 含量仍然低于贝类养殖区,可见大型藻类对 DIC 的大量消耗,所以, DIC 的浓度差异是大型藻类的光合作用消耗的结果。各站位 pH 差别较大,最低值出现在贝类养殖区,最高值出现在藻类养殖区。贝类自身的呼吸排泄导致贝类养殖区 pH 降低,而大型藻类的光合作用可以提高水体 pH 值,有效改善水体环境(Tang *et al.*, 2011)。所以,从 pH 的差别可以推断,不同养殖模式对水质的变化也有直接影响。

表层海水 pCO₂ 会受到物理、化学、生物的各种影响,水温和盐度是重要的影响因素之一(Weiss, 1974)。温带表层海水 pCO₂ 和水温之间存在显著的正相关关系(宋金明, 2004)。本研究结果并未与这种普遍规律相一致。可能的原因是养殖生物的生理活动对表层海水 pCO₂ 变化的影响强度大于温度对海水 pCO₂ 变化的影响,且桑沟湾内水温差形成的主要原因是湾内筏架较多,水体交换不明显,湾内水深较浅,受光照影响升温较快。在本次调查中由于仪器原因,丢失了其中一条断面的 DO 数据,导致数据不完整,无法准确分析相关参数的相关性。通过对剩余一条断面 DO 的分析,整体分布趋势是由湾内向湾外递增,且 DO 浓度与本条断面的 Chl-*a* 浓度呈现正相关($R=0.89, P<0.05$),与表层水 pCO₂ 呈负相关($R=0.90, P<0.05$)。可以推断,在春季桑沟湾养殖海区影响表层海水 pCO₂ 的主要因素是大型藻类的光合作用,即光合作用越强,吸收的 CO₂ 越多,释放的 O₂ 越多,海水中的 pCO₂ 越低。

3.1.2 养殖活动对 pCO₂ 及交换通量 *F* 的影响 春季是藻类的生长旺季,大型藻类在生长过程中可以通过光合作用吸收水体中的 DIC,从而降低水体中 DIC 的浓度和表层水的 pCO₂,提高水体 pH 值,有效改善

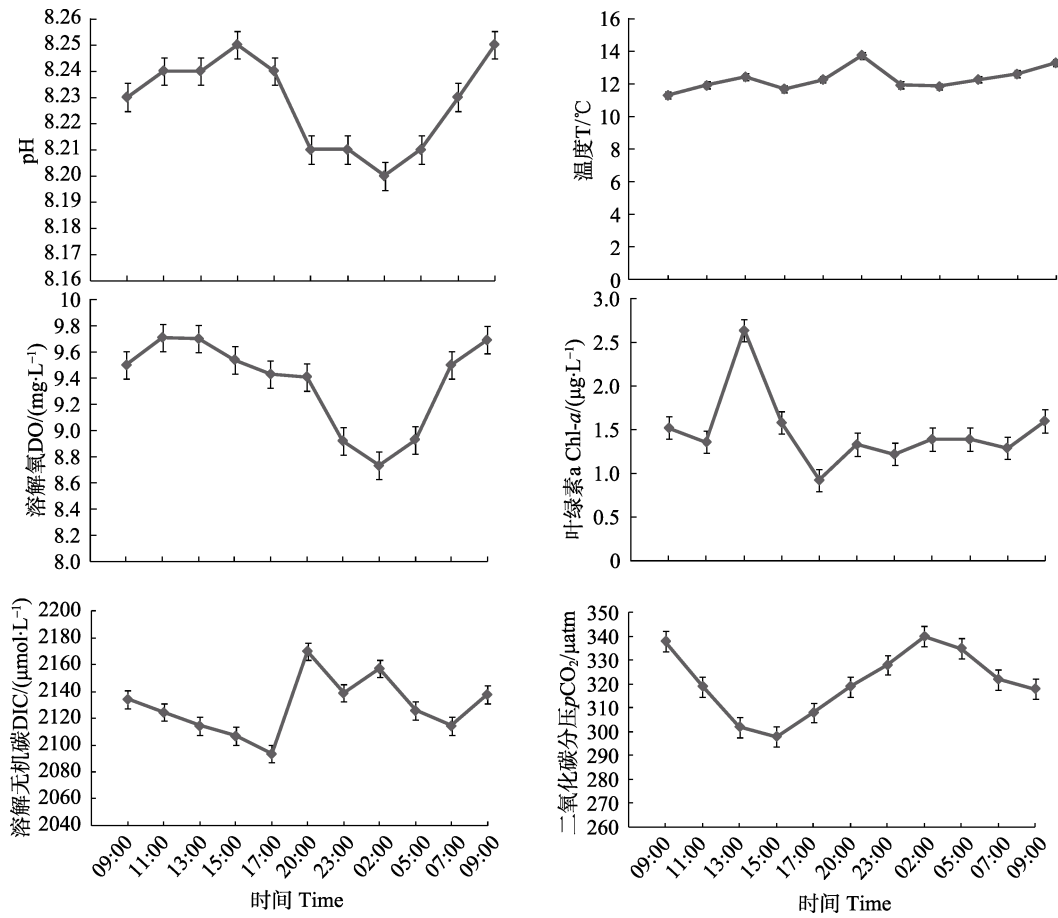


图 3 藻类养殖区环境参数的昼夜变化

Fig.3 Daily changes of environmental parameters in seaweed area

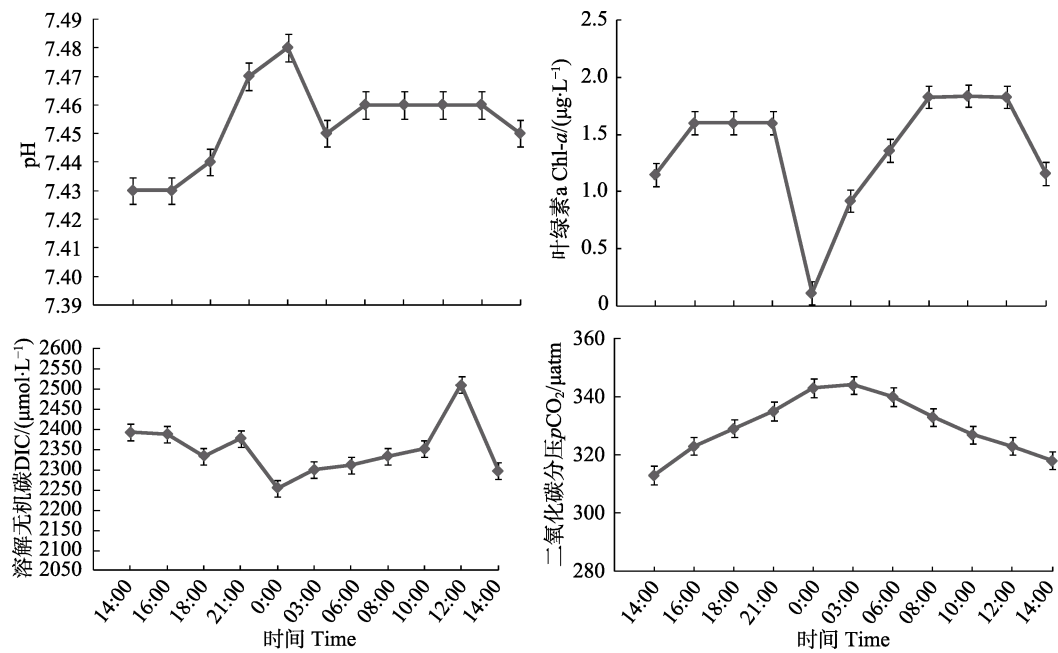


图 4 贝类养殖区环境参数的昼夜变化

Fig.4 Daily changes of environmental parameters in bivalves area

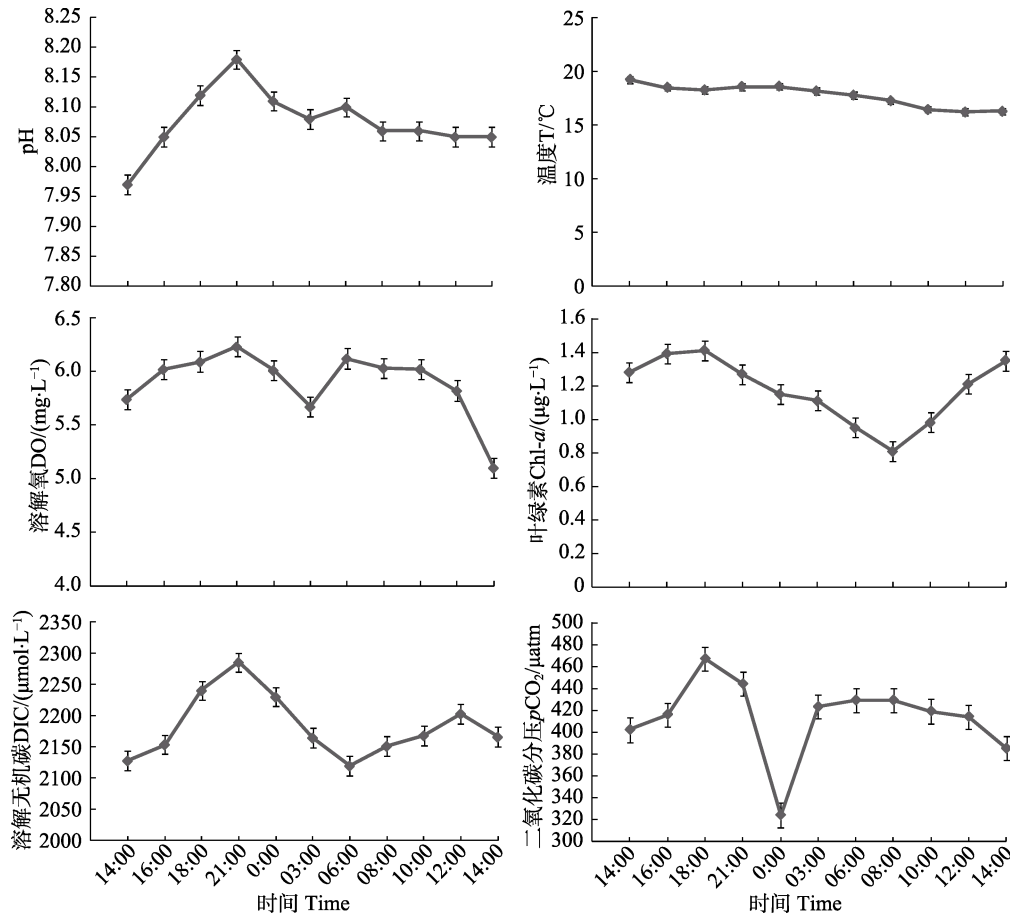


图 5 网箱养殖区环境参数的昼夜变化

Fig.5 Daily changes of environmental parameters in cage culture area

水体环境(韩婷婷, 2013)¹⁾。DIC 浓度的高低, 也会成为影响大型藻类生长的限制因子(Zou *et al.*, 2004)。走航调查和定点连续监测的结果都显示, DIC 和 $p\text{CO}_2$ 浓度最低值出现在藻类养殖区, 与上述大型藻类的光合作用功能相一致, 由于 DIC 的消耗在一定程度上也会促使海洋吸收大气中的 CO_2 , 从而使 $p\text{CO}_2$ 下降(Tang *et al.*, 2011)。藻类区的高 Chl-*a* 浓度以及高 DO 可以推断, 藻类的光合作用在海-气界面 CO_2 交换通量的变化中起到主导作用。因此, 藻类养殖区表现为 CO_2 的汇区。

春季的藻类和贝类生长活动旺盛, 桑沟湾的碳酸盐体系受藻类和贝类生长活动的影响, 以及他们之间的相互作用, 造成了这一体系的异常复杂。研究何种养殖活动对 $p\text{CO}_2$ 的影响占据主导地位, 对研究桑沟湾海区海-气界面 CO_2 交换通量起着至关重要的作用。通过相关性分析显示, $p\text{CO}_2$ 与 Chl-*a* 成显著负相

关($R=0.87, P<0.01$), 可以推断, 光合作用对影响表层水 $p\text{CO}_2$ 起到决定性作用。Chauvaud 等(2003)和 Martin 等(2006)在研究野生贝类群落对海洋碳循环影响的过程中认为, 贝类会在生长过程中呼吸和钙化释放出 CO_2 , 从而认为贝类群落应该是碳源。在本次调查中没有发现贝类养殖区的 $p\text{CO}_2$ 高于空气中的 $p\text{CO}_2$ 。虽然贝类养殖区的 CO_2 交换通量 F 最低, 但是仍然表现为 CO_2 的汇区。通过分析发现, 贝类自身旺盛的呼吸代谢作用提高了该区域表层海水中 CO_2 的含量, 这也是导致了贝类养殖区 pH 值较低的原因。虽然贝类养殖区的 Chl-*a* 浓度较其他养殖区域略低, 但是整个桑沟湾海区的营养盐浓度水平较高, 浮游植物可以大量繁殖, 贝类的滤食作用又可以促进浮游植物的生长。浮游植物的光合作用会降低水体中的 $p\text{CO}_2$ (张龙军等, 2008), 说明贝类养殖区浮游植物的光合作用可以抵消部分贝类的呼吸和钙化作用, 从而

1) Han TT. Photosynthetic physiological responses of macroalgae to different CO_2 concentrations and their ecological effects. Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Sciences, 2013 [韩婷婷. 大型海藻对不同 CO_2 浓度的光合生理响应及其生态效应. 中国科学院研究生院博士研究生学位论文, 2013]

使得海水中的 $p\text{CO}_2$ 仍然低于大气。所以对浮游植物等的固碳作用也应有充分的认识。同时作者也认为,若养殖密度过大,贝类养殖区将对环境造成一定的负面影响。 pH 降低过多会严重影响贝类的钙化和呼吸活动,不利于贝类的生长。Zhang 等(2011)研究表明, pH 值为 7.3 时,栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)的钙化率接近于 0,将不能合成贝壳。所以,如何在保证经济利益的同时科学养殖贝类是我们面临的一大问题。

网箱养殖区表现为 CO₂ 的源区,可能是春季(5 月)气温升高,正是鱼类繁殖与生长的季节,鱼类的呼吸作用占据了主导地位,从而影响了 CO₂ 交换通量,使网箱养殖区成为 CO₂ 的源区。不同的养殖活动对海-气界面的 CO₂ 交换通量有不同的影响结果。但本研究所得到的不同养殖区 CO₂ 交换通量的变化趋势与邱爽等(2013)对桑沟湾 2012 年春季 $p\text{CO}_2$ 分布的研究结论不同。可能的原因是,本研究海区水体环境情况良好,而张继红等(2013)在调查中遇到赤潮发生,而浮游藻类大量繁殖造成的赤潮可能会导致调查结果的偏差。最后,根据近年来对大气中 CO₂ 含量的检测,发现空气中 $p\text{CO}_2$ 有时会超过 400 μatm ,本研究仍采用世界气象组织 2014 年温室气体公报中的 CO₂ 平均值,可能会与实际情况存在差别,进而会造成实验误差。

3.2 养殖活动对 CO₂ 通量 F 昼夜变化的影响

在本研究中,通过对藻类和贝类养殖区的 24 h 连续监测,更好地验证了走航调查中所得出的相关推论。同时,根据昼夜变化的数据分析可以推断,养殖生物的生理活动对表层海水 $p\text{CO}_2$ 的变化也有影响。在藻类养殖区,夜间藻类进行呼吸作用,光合作用减弱,表层海水 $p\text{CO}_2$ 升高, pH 值降低,同时,由于光合作用的减弱,藻类对 DIC 的利用也会减弱,夜间 DIC 浓度高于日间 DIC 浓度。在贝类养殖区,表层海水中 $p\text{CO}_2$ 与 Chl-*a*、 pH 呈负相关关系,与 DIC、TA 成正相关关系(李宁等, 2005)。同时,贝类养殖区的 DIC 最高、 pH 值最低也证明了不同养殖活动对水体环境的不同影响。

4 结论

本次调查中,春季桑沟湾养殖海区除网箱养殖区外都表现为大气 CO₂ 的汇区。其中,CO₂ 交换通量表现为藻类养殖区>贝藻混养养殖区>空白海区>贝类养殖区,说明在一定条件下,贝类养殖区仍然可以表现为大气 CO₂ 的汇。不同养殖模式对 CO₂ 交换通量的影响差异显著。此次调查中,Chl-*a* 是影响海-气界面

CO₂ 交换通量 F 的主要因素之一,DO、 pH 和 DIC 是表层海水中 $p\text{CO}_2$ 的影响因子。藻类对 DIC 的吸收和利用会在一定程度上影响碳酸盐体系的平衡,促使平衡向着 CO₂ 溶解的方向进行,同时提高水体 pH ,有效地改善水体环境。而贝类的呼吸排泄导致水体中 pH 降低,过度养殖贝类将会对环境有一定负面影响,并且可以预见若贝类养殖密度过大,贝类养殖区可能会出现 CO₂ 的源,所以适当的贝藻混养可以有效地保护水域环境、提高作物产量。

参 考 文 献

- Baliño BM, Fasham MJR, Bowles MC. Ocean biogeochemistry and global change. ICBP Science, 2001(2): 1-36
- Chauvaud L, Thompson JK, Cloern JE, et al. Clams as CO₂ generators: The *Potamocorbula amurensis* example in San Francisco Bay. Limnology and Oceanography, 2003, 48(6): 2086-2092
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The specification of marine monitoring—Part 3: Sample collection, storage and transportation (GB17378.3-2007), 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. 海洋监测规范第 3 部分: 样品采集、贮存与运输 (GB17378.3-2007), 2007]
- Jiang ZJ, Fang JG, Han TT, et al. Estimation of sea-air CO₂ flux in seaweed aquaculture area, Lidao Bay. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(1): 50-56 [蒋增杰, 方建光, 韩婷婷, 等. 大型藻类规模化养殖水域海-气界面 CO₂ 交换通量估算. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 50-56]
- Li N, Li XG, Song JM. Key biogeochemistry processes of marine carbon cycle. Marine Environmental Science, 2005, 24(2): 75-80 [李宁, 李学刚, 宋金明. 海洋碳循环研究的关键生物地球化学过程. 海洋环境科学, 2005, 24(2): 75-80]
- Martin S, Thouzeau G, Chauvaud L, et al. Respiration, calcification, and excretion of the invasive slipper limper, *Crepidula fornicata* L.: Implications for carbon, carbonate, and nitrogen fluxes in affected areas. Limnology and Oceanography, 2006, 51(5): 1996-2007
- Qiu S, Gong XB, Zhang JH, et al. Distribution and affecting factors of $p\text{CO}_2$ in aquaculture areas of Sanggou Bay during spring. 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 $p\text{CO}_2$ 分布特征及影响机制. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 31-37]
- Rehder G, Suess E. Methane and $p\text{CO}_2$ in the Kuroshio and the South China Sea during maximum summer surface temperatures. Marine Chemistry, 2001, 75(1-2): 89-108
- Song JM. China offshore biogeochemistry. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2004, 1-591 [宋金明. 中国近海生物地球化学. 济南: 山东科学技术出版社, 2004, 1-591]
- Tang QS, Zhang JH, Fang JG. Shellfish and seaweed mariculture

- increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 2011(424): 97–105
- Ternon JF, Oudot C, Dessier A, *et al.* A seasonal tropical sink for atmospheric CO₂ in the Atlantic Ocean: The role of the Amazon River discharge. *Marine Chemistry*, 2000, 68(3): 183–201
- Tsunogai S, Watanabe S, Sato T. Is there a “continental shelf pump” for the absorption of atmospheric CO₂? *Tellus B*, 1999, 51(3): 701–712
- Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 97(C5): 7373–7382
- Weiss RF. Carbon dioxide in water and seawater: The solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry*, 1974, 2(3): 203–215
- World Meteorological Organization. WMO greenhouse gas bulletin (GHG bulletin) climate cummit edition: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2013. 2014, 10, 1–4
- Zhang JH, Wu WG, Ren LH, *et al.* Seasonal variation of *p*CO₂ and its potential influencing factors in aquaculture areas of Sanggou Bay. *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*CO₂ 的季节变化及影响因素分析. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 57–64]
- Zhang LJ, Wang JJ, Zhang Y, *et al.* Distribution and controlling factors of surface seawater partial pressure of CO₂ in the northern Yellow Sea during winter. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(6): 955–960 [张龙军, 王婧婧, 张云, 等. 冬季北黄海表层海水 *p*CO₂ 分布及其影响因素探讨. *中国海洋大学学报*, 2008, 38(6): 955–960]
- Zhang ML, Fang JG, Zhang JH, *et al.* Effect of marine acidification on calcification and respiration of *Chlamys farreri*. *Journal of Shellfish Research*, 2011, 30(2): 267–271
- Zou DH, Xia JR, Yang YF. Photosynthetic use of exogenous inorganic carbon in the agarophyte *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta). *Aquaculture*, 2004, 237(1–4): 421–431

(编辑 马瑾艳)

Analysis of the Air-Sea Surface Carbon Dioxide Flux and Its Interaction with Aquaculture Activities in Sanggou Bay

LIU Yi¹, ZHANG Jihong^{1,2①}, FANG Jinghui¹, LIN Fan¹, WU Wenguang¹

(1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071)

Abstract To study the impact of different aquaculture activities on the air-sea carbon dioxide flux (*F*), a cruise research was carried out in May, 2014 in Sanggou Bay, the most representative area of integrated multi-trophic aquaculture in northern China. During the study, the partial pressure (*p*CO₂) of the surface sea water was measured using the *p*CO₂ underway system (OceanPack, SubCtech Co., German). The CO₂ flux of the Sanggou Bay was evaluated through following parameters. Twenty-four hours monitoring was set up and performed in the caging culture area, bivalves culture area and kelp culture areas. Furthermore, the in situ hydrodynamic, chemical, biological and culture conditions, the impact factor of the air-sea CO₂ flux in Sanggou Bay in spring were discussed. The results showed that the *p*CO₂ in cage culture areas was much higher than the other culture areas. The *F* value was (−1.02±0.83) mmol/(m²·d) in bivalves culture area, (−15.40±1.28) mmol/(m²·d) in kelp culture area, (−4.32±1.41) mmol/(m²·d) in bivalves-kelp culture area, and 8.14 mmol/(m²·d) in cage culture area. The continuous 24 h observation showed that the average values of *p*CO₂ in kelp, bivalves and cage culture area were (320±14) μatm, (330±10) μatm, (413±37) μatm, respectively. The results showed that the Chl-*a* value was one of the key factors for the air-sea carbon-dioxide flux *F*, with significant differences in *F* value among different culture areas. The *F* value was negative in the bivalves, kelp and bivalves-kelp multi-culture areas, which means these areas 'sank' or absorbed the atmospheric CO₂. By contrast, *F* value in cage culture area was positive, which indicated that it was a 'source' or producer of the atmospheric CO₂.

Key words Sanggou Bay; Sea-air flux; *p*CO₂; Mariculture

① Corresponding author: ZHANG Jihong, E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn