

桑沟湾养殖区春季 $p\text{CO}_2$ 分布特征及影响机制

邱爽¹ 龚信宝¹ 张继红² 任黎华² 刘志媛¹ 张龙军^{1*}

(¹中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

(²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 碳汇渔业实验室, 青岛 266071)

摘要 2012年5月27~29日对桑沟湾贝类养殖、贝藻混养、藻类养殖等区域水-气界面区 $p\text{CO}_2$ 等参数的连续走航和贝类养殖区的日变化观测, 讨论了桑沟湾不同养殖区域水-气界面区 $p\text{CO}_2$ 的分布特性及机制。结果显示, 在该航次水质及气候条件下, 桑沟湾养殖区域叶绿素偏高, 溶解氧始终处于过饱和状态, 最高达 140%, 强烈的浮游藻类光合作用消耗大量无机碳, 水-气界面始终是大气 CO_2 的汇。其中贝类养殖区 $p\text{CO}_2$ 低于贝藻混养区, 低于藻类养殖及湾外近海区域。当然, 这还不足以说明这一海区水-气界面可能是大气 CO_2 的汇区, 需要精细的航次计划做全面观测, 例如养殖区域沉积的大量颗粒有机物在某些特定条件下的再悬浮、降解对水气界面 CO_2 的贡献以及实际意义上的埋藏通量究竟有多大等。

关键词 桑沟湾 养殖区 $p\text{CO}_2$

中图分类号 P734.2; P734.4⁺4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2013)01-0031-07

Distribution and affecting factors of $p\text{CO}_2$ in aquaculture areas of Sanggou Bay during spring

QIU Shuang¹ GONG Xin-bao¹ ZHANG Ji-hong² REN Li-hua²
LIU Zhi-yuan¹ ZHANG Long-jun^{1*}

(¹College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(²Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Carbon-Sink Fisheries Laboratory, Qingdao 266071)

ABSTRACT Based on continuous measuring of $p\text{CO}_2$ and other carbon parameters in the shellfish beds, shellfish-algae co-culture areas and algae farming areas of Sanggou Bay from 27th to 29th May, 2012, as well daily observation in the shellfish beds, the distribution characteristics and affecting factors of $p\text{CO}_2$ between air-sea interface in the different aquaculture zones of Sanggou Bay were discussed in this paper. It was found that Chl-a was extremely high during the investigations. As a result, dissolved oxygen was always saturated, even up to 140% saturation, while a large amount of inorganic carbon was strongly consumed by photosynthesis. Thus, this area was considered to be a CO_2 sink. More specifically, $p\text{CO}_2$ of the shellfish beds was small compared to that of the shellfish-algae co-culture area, algae farming area and coastal

国家自然科学基金(41276172)资助

* 通讯作者。E-mail: longjunz@ouc.edu.cn, Tel: (0532)66782967

收稿日期: 2012-10-05; 接受日期: 2012-12-04

作者简介: 邱爽(1992-), 女, 本科生, 主要从事环境科学研究。E-mail: qsregina@yeah.net

zones. Undoubtedly, this investigation is not enough to prove that Sanggou Bay is a CO_2 sink, but more observations are still needed in large temporal-spatial scales in order to answer the questions such as how much the resuspension and degradation of the deposited particulate organic matter contributes to the $p\text{CO}_2$ in the water-air interface, and how much the particulate organic matter is actually buried, etc.

KEY WORDS Sanggou Bay Aquaculture area $p\text{CO}_2$

进入 21 世纪以来,迫于人口增长压力,粮食安全已成为国际社会广泛关注的重大问题,而发展海洋经济、从海洋获取食物来源成为全球性的需求。中国是浅海贝藻养殖第一大国,年产量超过 1 000 万 t。因而水产养殖成为我国近海生态系统的重要组成部分,并由此丰富了碳收支的研究内容。我国陆架边缘海域十分广阔,面积约有 300 万 km^2 ,占全球陆架海的 12.5%,是世界上最宽、生产力最高的陆架海之一。尤其是浅海区域,海洋碳循环异常活跃,一方面因为它是自然生产力特别高的区域,另一方它又是人类水产养殖活动最集中的区域。自 2010 年我国率先提出碳汇渔业以来,已经引起国内外各界的广泛关注。但是,关于碳汇渔业的过程与机制等方面的基础研究严重不足。开展近海水产养殖过程的碳源/汇特征研究,对于合理构建养殖生态系统,在有效保护环境的前提下,获取最大经济效益的发展是极其有益的。

桑沟湾是我国北方典型的贝藻筏式养殖海域,贝藻混养养殖生态系统具有典型性,仅栉孔扇贝的年产量就有约 1.7×10^4 t。本研究通过 2012 年 5 月 27~29 日对桑沟湾表层海水 $p\text{CO}_2$ 等参数的连续走航和贝类养殖区的日变化观测,对比分析了贝类养殖、贝藻混养、藻类养殖以及湾外非养殖区等不同区域的 $p\text{CO}_2$ 分布特性及其影响机制。虽然一个航次的调查数据还不能给出季节尺度的水-气界面 CO_2 的通量值,但对于认识不同养殖类型区影响 $p\text{CO}_2$ 分布的特定水环境因素、科学评估养殖区域 CO_2 源/汇过程具有重要意义。

1 调查区域与方法

1.1 调查区域及站位设置

桑沟湾位于山东半岛的东端,海湾面积约 133 km^2 ,海湾口门宽 11 km,海区养殖状况及站位布设如图 1 所示。湾内侧为贝类养殖区,外侧为海带大型藻养殖区,中部则是贝藻混养区。其中 10m 等深线位于贝藻混养区外侧。 $p\text{CO}_2$ 等参数的连续走航观测于 5 月 29 日 10:00 起,自湾内的 18# 站至 12:30 到达湾外 1# 站位,之后再由 1# 站位返回 18# 站,14:50 左右结束。连续走航的同时在传统的 18#、15#、10#、6#、4#、1# 站位采取相关参数样品。受湾内养殖设施的影响,连续走航线路并非直线。另外 5 月 27 日 18:00~28 日 18:00 在贝类养殖区的 15# 站对 $p\text{CO}_2$ 等参数的日变化实施了连续观测。

1.2 调查参数及方法

测定参数包括温度(T)、盐度(S)、溶解氧饱和度(DO%)、二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)、pH、溶解无机碳(DIC)、总碱度(TA)、叶绿素(Chl-a)。

水体温度(T)、盐度(S)、溶解氧饱和度(DO%)及二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)由走航式连续综合观测设备获得,

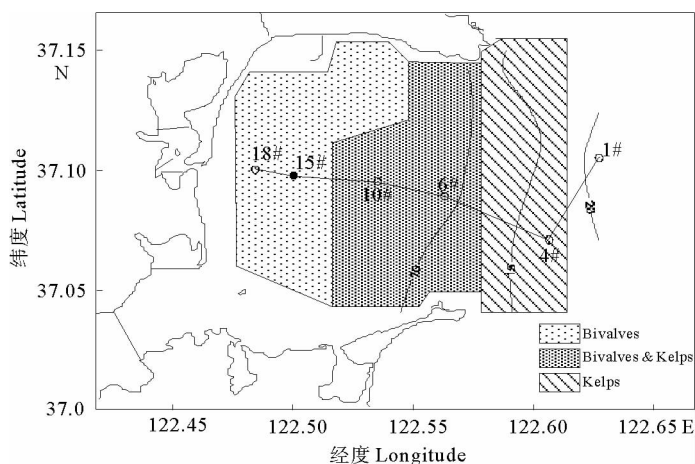


图 1 桑沟湾研究区域及调查站位

Fig. 1 Study area and sampling stations in Sanggou Bay

其中, T 和 S 由 SBE 45 MicroTSG (Sea-Bird Inc, Bellevue, WA, USA) 走航获得; $p\text{CO}_2$ 是将表层海水经连续流动式水-气平衡器平衡并除湿后用 Li-Cor 7000 非色散红外分析仪测定 (Zhang *et al.* 2010, 2012); $\text{DO}\%$ 由 YSI-5000 溶氧仪 (膜电极法) 走航连续测定, 温克勒法校正。

pH 采用 pH S-2 型 (Ross 电极) 酸度计 (Thermo Fisher Scientific Inc., Beverly, MA, USA) 测定平行双样, 所用标度为 NBS 标度。

其他参数测定所需水样则通过水泵抽取至 5 L 的硬质塑料桶中, 现场过滤、分样。返回实验室后 7 d 内测定。

1.2.1 具体方法

叶绿素 a (Chl-a): 用混合纤维膜 (孔径 $0.45\ \mu\text{m}$) 过滤水样, 泵压 $<0.05\ \text{MPa}$, 滤膜加饱和 MgCO_3 溶液固定后在 $-20\ ^\circ\text{C}$ 下避光保存。回实验室用 10 ml 9:1 丙酮溶液低温萃取 24 h 后离心 10 min, 取上清液用荧光仪 (Turner Designs 7200-000, USA) 测定。

溶解无机碳 (DIC): 水样用醋酸纤维膜过滤, 滤液加饱和 HgCl_2 溶液固定后于 $<4\ ^\circ\text{C}$ 环境中冷藏保存。用日本岛津公司 TOC-V_{CPN} 分析仪测定。

总碱度 (TA): 水样用醋酸纤维膜过滤, 滤液加饱和 HgCl_2 溶液固定, 采用 Gran 作图-酸直接滴定法用 AS-ALK2 碱度滴定仪 (Apollo SciTech) 测定。

2 结果与讨论

2.1 走航大面站 $p\text{CO}_2$ 等相关参数的分布

图 2 是走航观测过程中温度 (T)、盐度 (S) 的变化。贝类养殖区位于湾内侧, 温度基本维持在 $18.5\ ^\circ\text{C}$, 盐度 30.7 左右, 而在贝类海带混养区的 6# 站附近受剧烈水交换的影响, 盐度迅速上升至 31.07 , 而温度则下降到 $13\ ^\circ\text{C}$ 左右, 这一区域大约位于 10 m 等深线附近。之后在海带养殖区, 直至湾外近外海区, 温度、盐度变化趋势缓慢, 盐度大致维持在 31.1 , 温度则下降到 $12\ ^\circ\text{C}$ 左右。受潮汐的影响, 往返观测的温度、盐度剧烈变化区域略有不同。

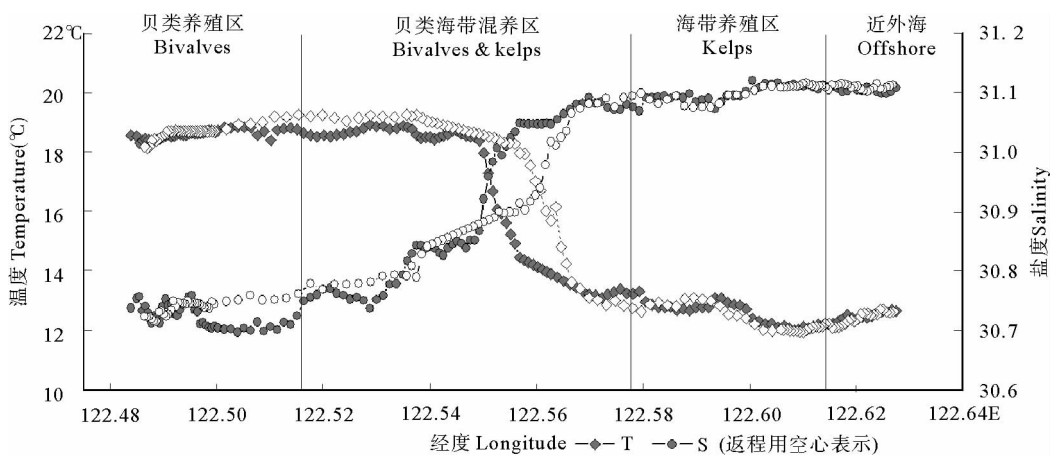


图 2 走航观测过程中温度、盐度的变化

Fig. 2 Variations of temperature and salinity during the shipboard continuous observation

走航观测过程中 $p\text{CO}_2$ 与溶解氧饱和度 ($\text{DO}\%$) 的变化如图 3 所示。观测航次内, 桑沟湾养殖区 $p\text{CO}_2$ 的分布始终低于大气, 是 CO_2 的汇区; 而溶解氧 (DO) 则一直维持在过饱和状态。贝类养殖区呈现出高 $\text{DO}\%$ 、低 $p\text{CO}_2$ 的性质, 且变化比较平稳; DO 饱和程度在 130% 以上, $p\text{CO}_2$ 的则在 $240\ \mu\text{atm}$ 或以下。湾外近海区域的

DO 维持在 105%~110%， $p\text{CO}_2$ 分布在 340~360 μatm 之间。 $p\text{CO}_2$ 、DO% 剧烈变化区域与温度、盐度的混合区域一致，均发生在贝藻混养区的 10m 等深线(6#站)附近。 $p\text{CO}_2$ 迅速升高，DO% 迅速降低。

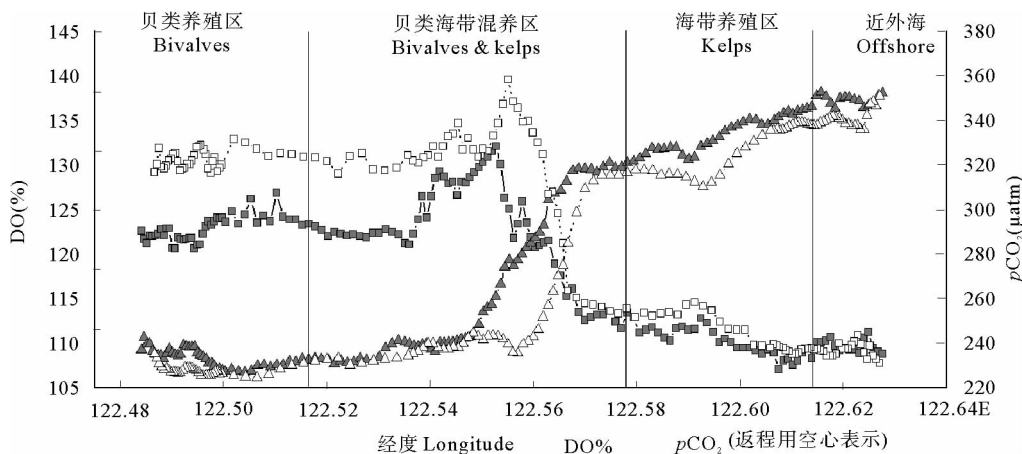


图3 走航观测过程中 DO% 及 $p\text{CO}_2$ 的变化

Fig. 3 Variations of DO% and $p\text{CO}_2$ during the shipboard continuous observation

走航观测过程中与 $p\text{CO}_2$ 分布对应的 pH、Chl-a、DIC、TA 的变化如图 4 所示。pH 和 Chl-a 在贝类养殖区具有最高值，在返程观测过程中观测到最高 pH 达 8.4 以上，最高 Chl-a 为 $7\mu\text{g/L}$ ，并且从湾内侧的贝类养殖区向贝藻混养区、藻类养殖区、湾外近海依次逐渐降低。贝类养殖区的高 pH、高 Chl-a 浓度分布是有道理的。高 pH 正好对应于低的 $p\text{CO}_2$ ；DO 的过饱和程度达 130%，说明了浮游藻类光合作用极其强烈，这与极高的 Chl-a 浓度分布又一致。

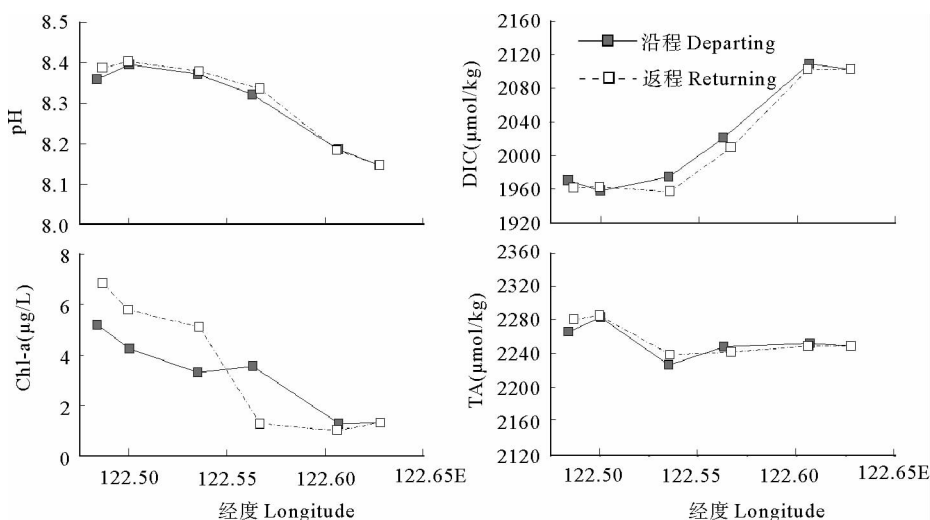


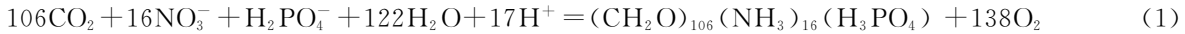
图4 走航观测过程 pH、Chl-a、DIC、TA 的变化

Fig. 4 Variations of pH, Chl-a, DIC and TA during the shipboard continuous observation

桑沟湾 DIC 及 TA 的分布明显显示出浮游藻类光合作用对无机碳的大量消耗。贝类养殖区 DIC 浓度 ($1960\mu\text{mol/kg}$) 较湾外近海 ($2110\mu\text{mol/kg}$) 大约低 $150\mu\text{mol/kg}$ ，而盐度之差仅为 0.4，这显然不是水体混合稀释作用的结果。图 2 表明，贝类养殖区温度比湾外近海高 7°C 左右，作者通过程序 CO2SYS 对温度对 DIC 的影响做了校正，发现温度升高 7°C 能够导致桑沟湾 DIC 降低 $47\mu\text{mol/kg}$ ，约占贝类养殖区和湾外近海 DIC 浓

度总差的 1/3 左右。而另外 2/3 的 DIC 浓度差异显然是浮游藻类光合作用大量消耗无机碳的结果。

根据生物光合作用反应式:



光合作用每消耗 106 个 DIC(CO_2), 产生 17 个 TA, 因而 TA 的变化趋势与 DIC 不同且变化幅度小于 DIC。当然贝类养殖区的总碱度数值除了藻类光合作用的贡献之外, 还应该还有养殖过程中产生的有机弱酸以及营养盐的贡献, 即剩余碱度。

2.2 贝类养殖区 $p\text{CO}_2$ 等相关参数的日变化

5月27日18:00~28日18:00在贝类养殖区的15#站 $p\text{CO}_2$ 等参数的日变化连续观测结果如图5所示。

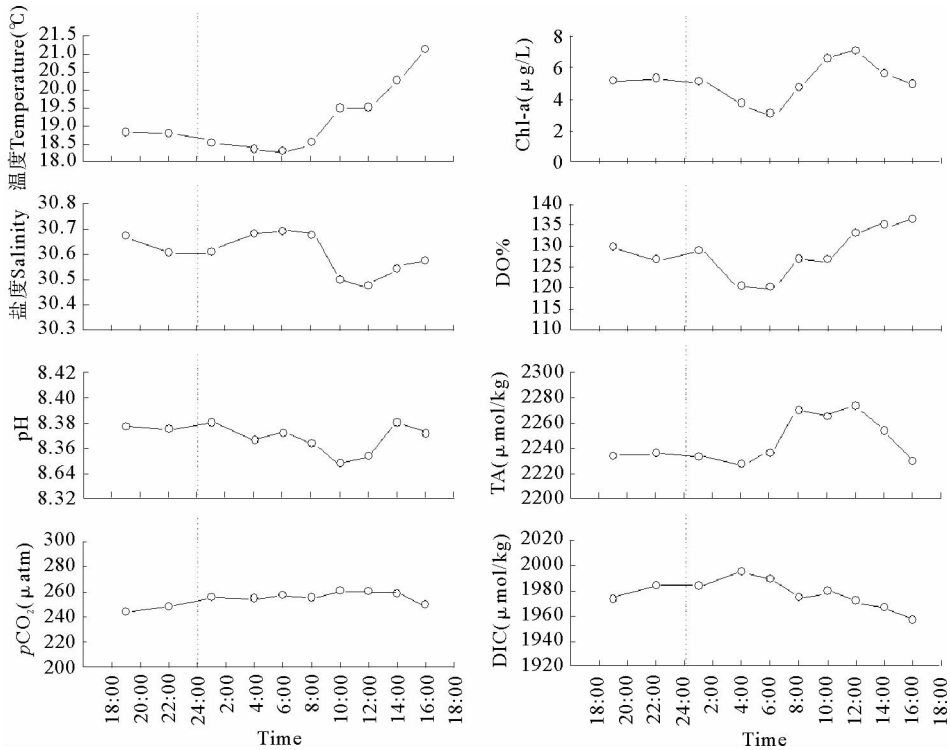


图5 连续站(15#)观测结果

Fig. 5 Continuous observation results of Station 15#

表层海水盐度日变化幅度仅为 0.3 左右, 从变化趋势看应该是主要受到潮汐作用的影响。温度变化由 18.3~21.1 $^{\circ}\text{C}$, 幅度为 3 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 主要受气温变化的影响。Chl-a 的日变化大约在 3~7 $\mu\text{g}/\text{L}$ 之间, 始终维持较高数值, 但昼夜差别仍相当显著, 最高值出现在中午时分, 最低值是在凌晨。DO% 的变化趋势与 Chl-a 基本一致, 仅在下午 16:00 出现异常, 当然作者知道实测的 Chl-a 仅为表观数值, 因为有动物摄食问题。pH 的变化也与 Chl-a 的变化趋势基本吻合, 但存在滞后现象。 $p\text{CO}_2$ 的昼夜变化始终维持在低值 244~262 μatm 之间, 变化幅度仅 18 μatm , 贝类养殖区水-气界面昼夜均是大气 CO_2 的汇。这与日变化中 Chl-a、DO% 始终维持较高数值有关。当然, 对近海陆架区定点观测 $p\text{CO}_2$ 日变化的全面解释是困难的, 因为 $p\text{CO}_2$ 日变化, 除了受温度变化引起的碳酸盐体系平衡移动和 CO_2 溶解度的变化以及温度、光照对藻类光合作用影响的反馈之外, 夜间的好氧呼吸作用、表层海流和风生垂直混合作用的叠加使问题变得更加复杂。Bates 等(1998) 在北大西洋观测到表层海水 $p\text{CO}_2$ 的日变化大致是 5~25 μatm , 大风天气会使 $p\text{CO}_2$ 下降 45~50 μatm 。

连续站 DIC 的日变化除反映了温度变化对 DIC 的影响外(日间温度升高 3 $^{\circ}\text{C}$, 可导致 DIC 降低约 20 $\mu\text{mol}/\text{kg}$), 主要还反映了强烈的浮游藻类光合作用对无机碳酸盐浓度的消耗, DIC 在夜间偏高, 而白天偏低。

TA 分布态势则与 Chl-a 的昼夜变化几乎完全一样,且受控于 pH 值的变化。

2.3 桑沟湾 $p\text{CO}_2$ 分布机制的讨论

Chauvaud 等(2003) 以及 Martin 等(2006) 在研究野生贝类群落对近海碳循环影响的过程中,针对贝类生长过程呼吸、钙化放出 CO_2 的量要高于当地初级生产力,而认为贝类群落应该是碳源。然而在本研究航次内并没有观测到贝类养殖区海水有较高的 $p\text{CO}_2$,使海区成为大气 CO_2 的源。似乎在一定的时间尺度内贝类生长过程呼吸、钙化放出 CO_2 未能显现出来。可能的解释是,由于养殖区为保证有足够的浮游藻类供贝类食用而维持了较高的营养盐浓度,浮游藻类大量繁殖,贝类的大量滤食又促进了浮游藻类生长。极高的 Chl-a 浓度和 DO 过饱和程度是极高初级生产力的表现,较高的 pH 值说明了较低 $p\text{CO}_2$ 分布观测结果的正确性,而较低 $p\text{CO}_2$ 分布是由大量浮游藻类光合作用消耗无机碳所致。

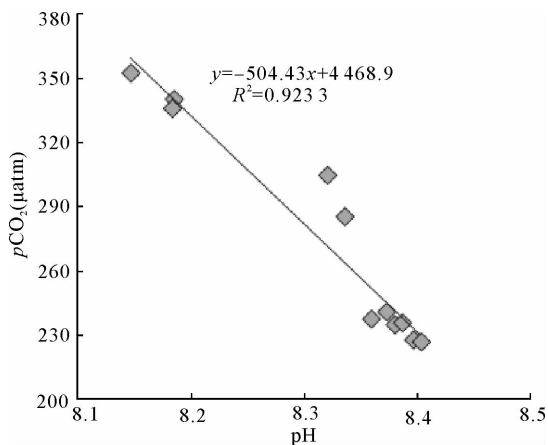


图6 $p\text{CO}_2$ 与 pH 的关系

Fig. 6 Scatter plot of $p\text{CO}_2$ versus pH

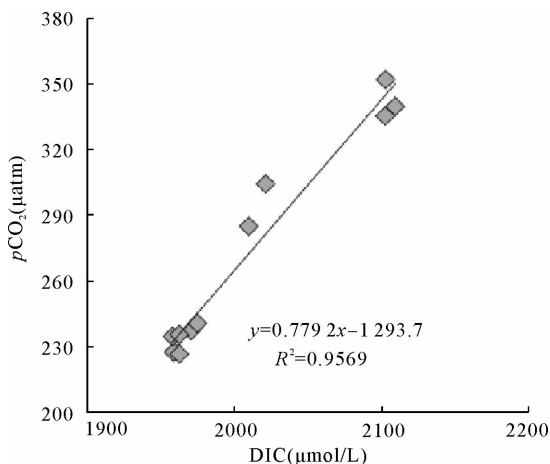
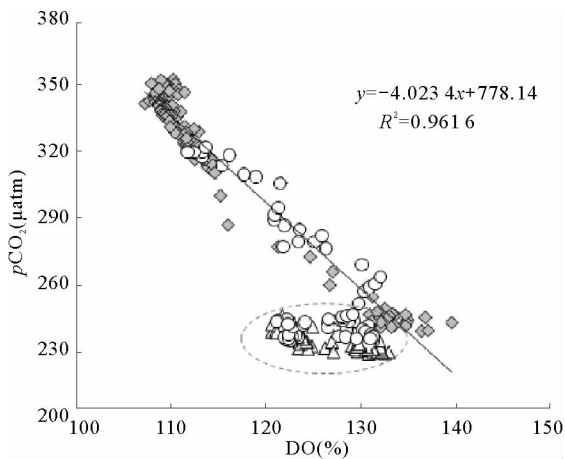


图7 $p\text{CO}_2$ 与 DIC 的关系

Fig. 7 Scatter plot of $p\text{CO}_2$ versus DIC

桑沟湾走航大面站 $p\text{CO}_2$ 与 pH 呈现的负相关关系(图6), $p\text{CO}_2$ 与 DIC 呈现的正相关关系(图7),而且相关性极好是有力的佐证。

图8是走航大面站 $p\text{CO}_2$ 与 DO% 的相关性分析。桑沟湾海区海带养殖区及湾外近海、临近海带养殖区的部分贝类海带混养区区域 $p\text{CO}_2$ 与 DO% 呈现出良好的负相关关系。相关系数 R^2 达到 0.96,说明这些区域的 $p\text{CO}_2$ 与 DO% 分布主要受藻类光合作用活动控制。但贝类养殖区和贝类海带混养区靠近贝类养殖区一侧区域呈现出较高的 DO%(在 120%~135% 之间的范围内波动),而 $p\text{CO}_2$ 一直维持在 230 μatm 的较低水平。依照这个水平的 $p\text{CO}_2$ 分布,其 DO% 水平应该在 140% 左右甚至更高。之所以出现这种情况,作者认为,虽然调查航次期间强烈的浮游藻类光合作用活动是控制桑沟湾养殖区水-气界面 $p\text{CO}_2$ 的主要机制,但贝类养殖产生的有机物降解耗氧肯定是存在的。这是有贝类养殖的区域 DO% 相对于 $p\text{CO}_2$ 分布偏低的主要原因。有机物降解消耗氧气但会产生 CO_2 ,但在 230 μatm 左右的低



贝类养殖区(Δ)、贝类海带混养区(\circ),其他区域(\blacklozenge)
Bivalves aquaculture area(Δ), Bivalves and Kelps
mixed aquaculture area(\circ), other areas(\blacklozenge)

图8 $p\text{CO}_2$ 与 DO 的关系

Fig. 8 Scatter plot of $p\text{CO}_2$ versus DO

$p\text{CO}_2$ 水平下,浮游藻类繁殖所需的生源要素 CO_2 本身已经需要大气来补充,因此有机物降解产生的 CO_2 即使被浮游藻类所利用,而显现不出 $p\text{CO}_2$ 升高的迹象。当然氧气在水-气界面有较快的传输速率,溶解氧饱和度过高的水体极其不稳定也是可能原因之一。

桑沟湾走航大面站 DO% 与 Chl-a 呈现出较好的正相关关系(图 9), $p\text{CO}_2$ 与 Chl-a 分布的负相关关系(图 10)进一步说明浮游藻类光合作用是该区域 DO% 分布、 $p\text{CO}_2$ 与 Chl-a 分布的主要控制因素。

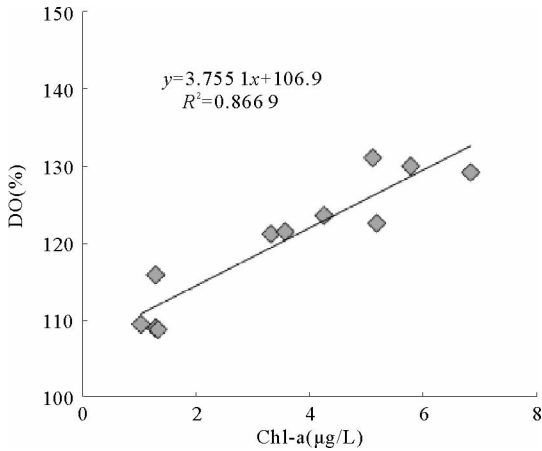


图 9 DO 与 Chl-a 的关系

Fig. 9 Scatter plot of DO versus Chl-a

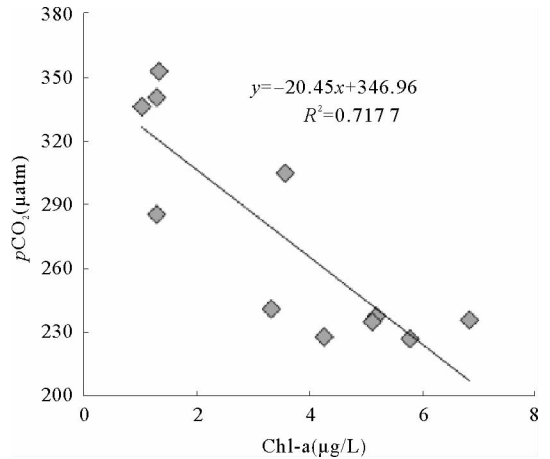


图 10 $p\text{CO}_2$ 与 Chl-a 的关系

Fig. 10 Scatter plot of $p\text{CO}_2$ versus Chl-a

3 结语

2012 年春季调查航次内桑沟湾养殖区域叶绿素偏高,溶解氧始终处于过饱和状态,最高达 140%,强烈的藻类光合作用消耗大量无机碳,水-气界面始终是大气 CO_2 的汇。其中贝类养殖区 $p\text{CO}_2$ 低于贝藻混养区、藻类养殖及湾外近海区域。当然,这还不足以说明这一海区水-气界面可能是大气 CO_2 的汇区,需要精细的航次计划做全面观测。例如,养殖区域沉积的大量颗粒有机物在某些特定条件下的再悬浮、降解对水气界面 CO_2 的贡献等。即使是本调查航次水质状况条件下也仅能说明水-气界面观测的是大气 CO_2 的汇,因为评价养殖区域 CO_2 源/汇问题除了水-气界面交换,还要对实际意义上的碳垂直通量等问题做出科学评价。无论如何,本研究为相关研究者提供了这样的信息:近海水产养殖区域水-气界面在一定条件下是大气 CO_2 的汇。即使是贝类养殖区,也是如此。

参 考 文 献

- Bates NR, Takahashi T, Chipman DW, Knap AH. 1998. Variability of $p\text{CO}_2$ on diel to seasonal timescales in the Sargasso Sea near Bermuda. *Journal of Geophysical Research* 103(C8):15567-15585
- Chauvaud L, Thompson JK, Cloern JE, Thouzeau G. 2003. Clams as CO_2 generators: the *Potamocorbula amurensis* example in San Francisco Bay. *Limnol Oceanogr* 48(6): 2086-2092
- Martin S, Thouzeau G, Chauvaud L and 3 other. 2006. Respiration, calcification, and excretion of the invasive slipper limpet, *Crepidula fornicata* L. Implications for carbon, carbonate, and nitrogen fluxes in affected areas. *Limnol Oceanogr* 51(5): 1996-2005
- Zhang LJ, Xue L, Song MQ, Jiang CB. 2010. Distribution of the surface partial pressure of CO_2 in the southern Yellow Sea and its controls. *Continental Shelf Research* 30: 293-304
- Zhang LJ, Xue M, Liu QZ. 2012. Distribution and seasonal variation in the partial pressure of CO_2 during autumn and winter in Jiaozhou Bay, a region of high urbanization. *Marine Pollution Bulletin* 64(1):56-65