

文章编号: 1674-5566(2016)01-0106-10

三沙湾盐田港海水养殖海域海-气界面 CO_2 交换通量的时空变化

韦章良^{1,2}, 韩红宾¹, 胡明¹, 吴海龙¹, 张建恒³, 霍元子^{1,2}, 何培民^{1,2}

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 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; 3. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 根据 2012 年 11 月和 2013 年 2、5、8 月对福建三沙湾盐田港养殖海域进行 4 个季节调查获得的 pH、总碱度(TA)、表层水温、盐度、溶氧和溶解无机碳(DIC)以及叶绿素 a 等基础数据, 估算该区域表层海水溶解无机碳体系各分量的浓度、 $p\text{CO}_2$ 和海-气界面 CO_2 交换通量, 并对影响因素进行分析。结果表明, 盐田港表层海水 4 个季节的 DIC、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 CO_2 浓度分别为 955 ~ 1 957.08、905.08 ~ 1 848.13、10.14 ~ 124.78 和 11.48 ~ 39.78 $\mu\text{mol/L}$, 不同季节之间差异极显著($P < 0.01$)。盐田港表层海水中的 $p\text{CO}_2$ 在一年中的变化范围为 391.27 ~ 1 200.49 μatm , 海-气界面 CO_2 交换通量全年的范围为 0.25 ~ 6.93 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 表现为大气 CO_2 的弱源。盐田港海-气界面 CO_2 交换通量不同季节的差异极显著($P < 0.01$), 在不同站位之间的差异显著($P < 0.05$)。秋、春季的碳通量最高, 夏季碳通量最低, 冬季显著低于秋季, 但与春季差异不显著。分析表明, 水文要素和生物要素等是影响盐田港表层海水中 $p\text{CO}_2$ 和海-气界面 CO_2 交换通量的重要生态因子, 其中, 大型海藻的栽培活动有利于该养殖海域对大气 CO_2 的吸收。

关键词: 盐田港; $p\text{CO}_2$; CO_2 交换通量; 海水养殖; 大型海藻

中图分类号: P 714; S 912 **文献标志码:** A

温室气体的控制大概是最具有挑战性的环境政策问题。二氧化碳(CO_2)在全球性长期稳定的温室气体中含量最高, 占总数的 63% 以上, 也是导致全球变暖的主要温室气体^[1-2]。

海洋对调节全球气候至关重要, 特别是对减缓温室效应的影响起着巨大的作用, 通过物理溶解、海水碳酸盐系统缓冲作用和海洋浮游植物光合作用吸收大气中的 CO_2 ^[3], 同时, 海水中 CO_2 体系影响着海洋中许多化学平衡。目前人类活动每年排放的 CO_2 以碳计为 55 亿吨, 其中海洋吸收了人类排放 CO_2 总量的 30% ~ 50%^[4], 所以区域性以及全球海洋是吸收(汇)还是排放(源) CO_2 就显得非常重要^[5]。

我国的海水养殖已经居世界首位, 其中贝藻养殖活动可能成为减排增汇的有效手段^[6], 有关

养殖海域海水中的 $p\text{CO}_2$ 的变化特征与 CO_2 交换通量已进行了一些研究报道。张继红等^[7]于 2011-2012 年对桑沟湾表层水 CO_2 体系各参数进行研究, 分析了该海域 $p\text{CO}_2$ 的季节变化可能与物理、生物和大规模贝藻养殖之间的相关性。蒋增杰等^[8]对山东俚岛湾养殖海域海-气界面 CO_2 交换通量进行估算, 指出栽培大型海藻促进了海洋对大气中 CO_2 的吸收。王文松等^[9]于 2011 年春季对胶州湾春季表层海水 $p\text{CO}_2$ 和海-气界面 CO_2 交换通量进行测量时得出该海域表现为大气中 CO_2 强汇, 生物活动是影响海水 $p\text{CO}_2$ 的主要因素。

福建省三沙湾总面积为 714 km^2 , 水域开阔, 仅东南方经东冲口与东海相通, 是我国南方典型的近海封闭型海湾, 湾内咸淡水交混, 营养盐丰

收稿日期: 2015-01-22 修回日期: 2015-08-25

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201205009-5); 国家科技支撑计划课题(2012BAC07B03); 上海高校新进教师培训及科研启动基金(ZZZZHY15007); 上海海洋大学博士启动基金(A2-0302-14-300069); 上海高校高原高峰学科建设项目(海洋科学)

作者简介: 韦章良(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海水养殖生态学。E-mail: 315907746@qq.com

通信作者: 霍元子, E-mail: yzhuo@shou.edu.cn

富,具有独特的海洋生态环境,不仅是全国唯一的内湾性大黄鱼产卵场与最大的海水网箱养殖基地^[10-11],同时还有大型海藻、贝类和海参等养殖种类,盐田港是三沙湾重要港湾组成之一。然而,对该海湾的 CO₂ 的源汇问题的研究尚未进行。本研究根据 2012-2013 年 4 个调查航次的调查数据,估算了该养殖水域的海-气界面 CO₂ 交换通量,并对影响其时空变化的环境因子进行分析,为我国封闭型海湾海水养殖业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究海域概况

福建省三沙湾盐田港主要养殖大黄鱼 (*Pseudosciaena crocea*)、长牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 和海参 (Sea Cucumber), 根据季节更替栽培龙须菜 (*Gracilaria lemaneiformis*) 和海带 (*Laminaria japonica*)。鱼类网箱养殖规模为 1.15×10^4 个网箱,鱼类的饵料主要是冰鲜小杂鱼,养殖周期通常是 2~3 年。除了鱼类,长牡蛎养殖规模是 3.37 km^2 ,养殖海参约 1 100 口,总产量约 160 t。大型海藻龙须菜和海带是本地在不同季节养殖的主要物种,9 月份至来年 2 月份主要栽培龙须菜,海带大规模栽培时间是 12 月底至次年 5 月份,调查期间两者栽培规模分别是 72.44 km^2 和 181.89 km^2 。

1.2 采样时间、站位及方法

本研究分别于 2012 年 11 月和 2013 年 2 月、5 月、8 月共 4 个航次在福建省三沙湾内的盐田港 ($26.72^\circ \sim 26.84^\circ \text{N}$, $119.76^\circ \sim 119.83^\circ \text{E}$) 10 个站位进行调查 (图 1)。其中,1 号站位位于非养殖区,2 号和 5-10 号位于大型海藻养殖区内,3 号位于长牡蛎养殖区内,4 号位于大黄鱼网箱养殖区内。

样品均按《海洋监测规范》规定的方法采集、处理和保存。在每个调查站位应用 Niskin 采水器采集表层 (水面下 0.5 m) 3 个水样作为重复,迅速导入 500 mL 磨口玻璃瓶中,保存在 4°C 冰箱中备用。现场应用 YSI 多参数水质分析仪测定 pH、表层水温 (SST) 和盐度 (S),应用碘量法测定溶解氧 (DO) 含量 (GB 17378.4-2007)。将 500 mL 水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤后冷冻保存带回实验室,经丙酮萃取后应用 Turner 荧

光仪测定叶绿素 a (*Chl. a*) 的含量。总碱度 (TA) 采用 pH 法测量 (GB12763.4-2007),溶解无机碳 (DIC) 应用日本岛津总有机碳分析仪 (TOC-V_{CPH}) 进行测定。

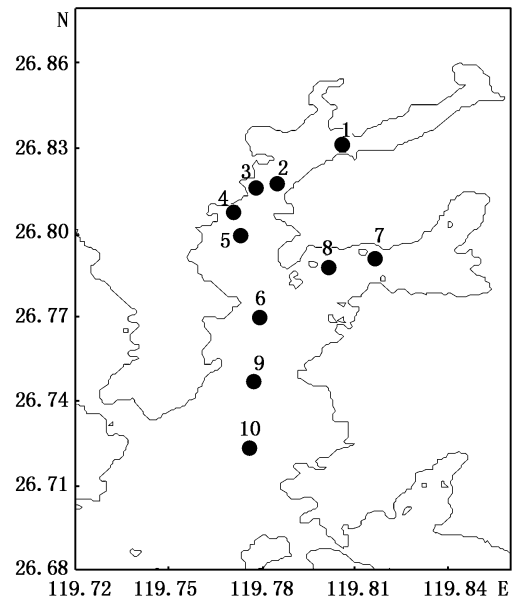


图 1 盐田港调查站位图

Fig. 1 Location of sampling sites in Yantian Harbor

1.3 CO₂ 交换通量和无机碳体系各分量浓度估算方法

海-气界面 O₂ 交换通量的计算公式^[8]为

$$F = k \times \alpha_s \times \Delta p\text{CO}_2 \quad (1)$$

式中: F 为海-气界面 CO₂ 交换通量 ($\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$); k 是海-气界面气体传输速度 (cm/h); $\Delta p\text{CO}_2$ 是海水和大气中 CO₂ 分压的差值。本研究中 k 取大陆架海区的平均值 10.3, 大气 $p\text{CO}_2$ 取值为 $361 \mu\text{atm}$ ^[12-13]; α_s 为 CO₂ 在海水中的溶解度系数 [$10^{-2} \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{atm})$], 根据温度、盐度和海水中 CO₂ 溶解度得到^[14]。根据计算结果,若 F 为负值,则此区域为大气 CO₂ 的汇;若 F 为正值,则此区域为 CO₂ 的源。

假定海水中 CO₂ 体系处于平衡,如果海水的温度、盐度和压力已经测定,那么 pH、总碱度 (TA)、溶解无机碳 (DIC) 和表层水二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$) 就可以任意测定两个,然后计算出其余的参数^[15-16]。本文利用获得 pH 和 TA 数据,计算 CO₂ 体系的其他参数。

$$\begin{aligned} CA &= [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] \\ &= \text{TA} - c_{\text{TB}} \frac{K'_B}{a_{\text{H}^+} + K'_B} \end{aligned} \quad (2)$$

$$[\text{HCO}_3^-] = CA \times \frac{a_{\text{H}^+}}{a_{\text{H}^+} + 2K'_2} \quad (3)$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = CA \times \frac{K'_2}{a_{\text{H}^+} + 2K'_2} \quad (4)$$

$$[\text{CO}_2] = CA \times \frac{[a_{\text{H}^+}]^2}{K'_1 \times (a_{\text{H}^+} + 2K'_2)} \quad (5)$$

$$p\text{CO}_2 = \frac{[\text{CO}_2]}{\alpha} \quad (6)$$

式中:CA为碳酸盐碱度, K'_1 、 K'_2 为碳酸的第一、第二级解离常数, K'_B 为硼酸的解离常数, α 为海水中 CO_2 的溶解度系数, c_{TB} 为海水中的总硼酸浓度, a_{H^+} 为海水中 H^+ 活度。

1.4 数据分析

所有数据均用平均值 \pm 标准误表示,应用SPSS 13.0软件对不同季节和不同站位的无机碳体系各分量的浓度、 $p\text{CO}_2$ 和 CO_2 交换通量进行双因素方差分析(ANOVA),当 $P < 0.01$ 时为差异极显著,当 $P < 0.05$ 时为差异显著,数据的多重比较采用SPSS软件中的LSD法及Duncan氏法进行分析。分布图中的绘制采用Surfer 8.0软件。

2 结果

2.1 海区水文环境特征

三沙湾盐田港表层水温四季变化明显,调查海域春季和夏季水温较高,平均值分别为 $(23.38 \pm 0.67)^\circ\text{C}$ 和 $(29.97 \pm 0.08)^\circ\text{C}$,水温由湾内上游到下游逐渐降低;秋季水温逐渐下降,变化范围在 $16.61 \sim 19.71^\circ\text{C}$ 之间,冬季表层水温仅有 $(12.96 \pm 0.27)^\circ\text{C}$ 。夏季pH最低,为 7.53 ± 0.14 ,上游站位偏低,其他3个季节是大型海藻栽培的季节,pH有所升高,其中冬季pH达到最高,为 7.87 ± 0.05 ,春季和秋季pH分别 7.71 ± 0.17

和 7.75 ± 0.03 ,在这3个季节中,位于下游的海藻栽培区pH高于其他功能区。海水表层盐度具有显著的四季变化,表现为上游到下游逐渐增加的分布特征。夏季盐度最高,平均值为 26.66 ± 1.60 ,春季盐度最低,平均值仅有 19.03 ± 4.51 ,其中,位于上游的1号站位盐度全年最低只有10.30,秋季和冬季变化范围分别为 $20.03 \sim 25.72$ 和 $19.73 \sim 24.18$ 。该海域叶绿素a(*Chl. a*)由春季到冬季逐渐降低,变化范围在 $1.12 \sim 3.92 \mu\text{g/L}$ 之间,夏季5号和6号站位*Chl. a*高于上游和下游的其他站位,最高达 $3.61 \mu\text{g/L}$ 。溶解氧(DO)冬季最高,为 $(8.14 \pm 0.12) \text{mg/L}$,夏季最低,平均值是 $(6.49 \pm 0.07) \text{mg/L}$,春季和秋季为 $(7.08 \pm 0.28) \text{mg/L}$ 和 $(7.33 \pm 0.04) \text{mg/L}$,呈现海藻养殖区 > 非养殖区 > 贝类物养殖区 > 网箱养殖区的分布特征(表1)。

2.2 表层海水中无机碳体系各分量的季节变化

调查期间,三沙湾盐田港表层海水中无机碳体系各分量浓度在不同季节间差异极显著。DIC和 HCO_3^- 浓度年变化范围分别为 $955.00 \sim 1957.08$ 和 $905.08 \sim 1848.13 \mu\text{mol/L}$,平均值为 $(1628.74 \pm 142.84) \mu\text{mol/L}$ 和 $(1536.14 \pm 109.58) \mu\text{mol/L}$,其中 HCO_3^- 是其重要的组成部分,占全年DIC平均值的94.32%,秋、冬季节表层海水的 HCO_3^- 浓度比春、夏季节高。海水中 CO_3^{2-} 年变化范围为 $10.14 \sim 124.78 \mu\text{mol/L}$,平均值为 $(70.16 \pm 16.42) \mu\text{mol/L}$,该海域夏季 CO_3^{2-} 浓度显著高于其他3个季节; CO_2 浓度的季节变化在 $11.48 \sim 39.78 \mu\text{mol/L}$ 之间,均值为 $(22.44 \pm 10.51) \mu\text{mol/L}$,与 CO_3^{2-} 浓度季节变化相反,夏季 CO_2 浓度低于其他3个季节,仅为3个季节浓度均值的58.25%(表2)。同一季节 CO_2 和 CO_3^{2-} 的浓度在不同站位之间差异显著和极显著,而DIC和 HCO_3^- 浓度在同一季节的不同站位之间的差异不显著(表3)。

表 1 不同季节表层海水基本参数
Tab.1 The basic parameters of surface water in different seasons

季节 season		水温/°C temperature	pH	盐度 salinity	叶绿素 a Chl. a/(μg/L)	溶解氧 DO/(mg/L)
2012.11 秋季 autumn	平均数 average value	17.57 ± 0.95	7.75 ± 0.03	23.76 ± 1.63	1.47 ± 0.40	7.33 ± 0.04
	范围 range	16.61 ~ 19.71	7.72 ~ 7.81	20.03 ~ 25.72	0.95 ~ 2.02	7.27 ~ 7.42
2013.2 冬季 winter	平均数 average value	12.96 ± 0.27	7.87 ± 0.05	23.27 ± 1.91	1.12 ± 0.15	8.14 ± 0.12
	范围 range	12.61 ~ 13.63	7.81 ~ 7.95	19.73 ~ 24.18	0.88 ~ 1.34	7.94 ~ 8.31
2013.5 春季 spring	平均数 average value	23.38 ± 0.67	7.71 ± 0.17	19.03 ± 4.51	3.92 ± 2.88	7.08 ± 0.28
	范围 range	22.01 ~ 23.94	7.36 ~ 7.96	10.31 ~ 22.39	0.85 ~ 9.62	6.62 ~ 7.43
2013.8 夏季 summer	平均数 average value	29.97 ± 0.08	7.53 ± 0.14	26.66 ± 1.60	2.61 ± 0.53	6.49 ± 0.07
	范围 range	29.98 ~ 30.14	7.32 ~ 7.74	24.05 ~ 28.83	1.81 ~ 3.63	6.33 ~ 6.56

表 2 不同季节表层海水无机碳体系各分量浓度
Tab.2 DIC concentration and its component forms in different seasons

季节 season		DIC	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	CO ₂
2012.11 秋季 autumn	平均数 average value	1 730.12 ± 78.88	1 643.63 ± 72.20	59.93 ± 8.87	26.55 ± 2.08
	范围 range	1 555.90 ~ 1 812.52	1 483.01 ~ 1 716.49	47.83 ~ 79.32	22.25 ~ 29.17
2013.2 冬季 winter	平均数 average value	1 849.02 ± 161.82	1 755.21 ± 151.20	69.47 ± 13.11	24.34 ± 2.99
	范围 range	1 401.14 ~ 1 957.08	1 335.01 ~ 1 848.13	45.20 ~ 87.83	20.93 ~ 30.41
2013.5 春季 spring	平均数 average value	1446.17 ± 260.47	1366.94 ± 241.63	55.3 ± 27.73	23.93 ± 7.54
	范围 range	955.00 ~ 1720.97	905.08 ~ 1626.94	10.14 ~ 92.37	12.8 ~ 39.78
2013.8 夏季 summer	平均数 average value	1479.49 ± 205.25	1368.02 ± 190.54	96.94 ± 15.33	14.53 ± 2.69
	范围 range	1215.9 ~ 1835.9	1123.3 ~ 1694.11	74.5 ~ 124.78	11.48 ~ 18.82

表 3 不同季节表层海水无机碳体系各分量的双因素方差分析
Tab.3 Two-way ANOVA tests of CO₂ system in different seasons

变量 variables	变异来源 source of variables	df	F	P
DIC	站位 station	9	1.695 1	0.139 0
	季节 season	3	12.389 8	0.000 0 **
HCO ₃ ⁻	站位 station	9	1.529 6	0.187 9
	季节 season	3	14.124 4	0.000 0 **
CO ₃ ²⁻	站位 station	9	5.963 3	0.000 1 **
	季节 season	3	25.397 8	0.000 0 **
CO ₂	站位 station	9	2.805 0	0.018 3 *
	季节 season	3	21.590 8	0.000 0 **

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 highly significant difference, $P < 0.01$.

2.3 盐田港表层海水 $p\text{CO}_2$ 的时空分布特征

盐田港表层海水中 $p\text{CO}_2$ 的平面分布如图 2 所示,由于养殖海域水环境系统的复杂性,该海域海水中 $p\text{CO}_2$ 的分布不均匀,四季变化显著。调查期间,表层海水中 $p\text{CO}_2$ 的年变化范围为 391.27 ~ 1 200.49 μatm,平均值为 (652.71 ± 51.73) μatm。春季和秋季 $p\text{CO}_2$ 的平均值分别为 (744.44 ± 62.56) μatm 和 (724.66 ± 58.41) μatm,差异不显著 ($P = 0.740$);冬季与夏季之间差异不显著,平均值为 (572.99 ± 32.63) μatm 和 (561.89 ± 28.37) μatm,显著低于秋季和春季 ($P_{\text{冬秋}} = 0.015$ 、 $P_{\text{冬春}} = 0.006$ 、 $P_{\text{夏秋}} = 0.009$ 和

$P_{\text{夏春}} = 0.004$),见表 4。海水 $p\text{CO}_2$ 的值在同一季节的不同站位之间的差异显著 ($P = 0.039$,表 5),在不同季节之间的差异极显著 ($P = 0.001$)。秋、冬、春 3 个季节大型海藻生长旺盛,下游大规模栽培的海藻活动加剧,吸收海水中大量无机碳,使得 $p\text{CO}_2$ 偏低;从图 2 可知这 3 个季节的表层海水中 $p\text{CO}_2$ 分布趋势相同,表现为上游向下游不断降低;夏季是海藻栽培的空白期,5 号和 6 号站位较高的 Chl. a 含量佐证了中游区域浮游植物活动加剧, $p\text{CO}_2$ 分布表现为中部区域偏低,向上游和下游呈辐射状增加的趋势。

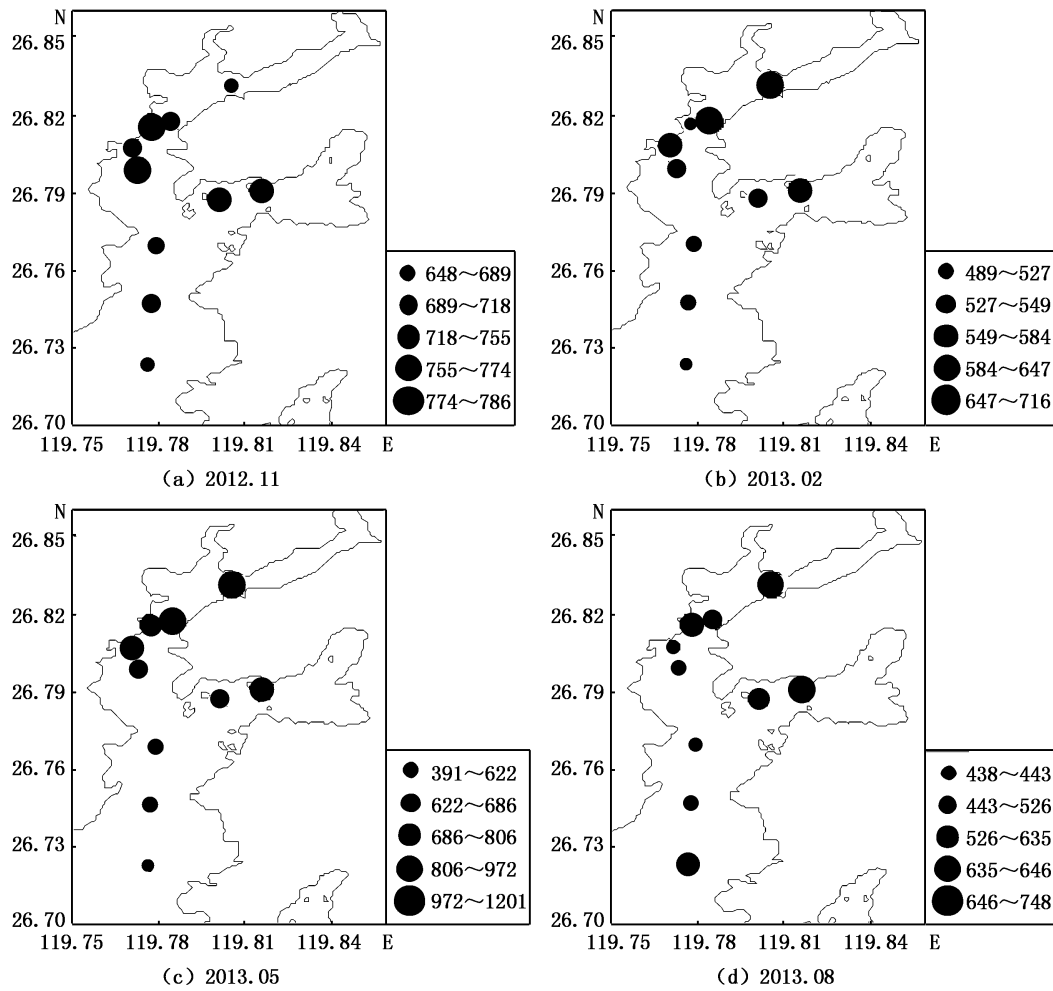


图2 盐田港表层海水 $p\text{CO}_2$ 分布 (μatm)

Fig.2 Distribution of sea surface $p\text{CO}_2$ in Yantian Harbor (μatm)

表4 不同季节表层海水 $p\text{CO}_2$

季节 season		$p\text{CO}_2$
2012.11 秋季 autumn	平均数 average value	724.66 ± 58.41
	范围 range	649.59 ~ 784.81
2013.2 冬季 winter	平均数 average value	572.99 ± 32.63
	范围 range	489.63 ~ 715.93
2013.5 春季 spring	平均数 average value	744.44 ± 62.56
	范围 range	391.27 ~ 1 200.49
2013.8 夏季 summer	平均数 average value	561.89 ± 28.37
	范围 range	438.28 ~ 747.55

表5 不同季节海水 $p\text{CO}_2$ 的方差分析

变量 variables	变异来源 source of variables	df	F	P
海水 $p\text{CO}_2$	站位 station	9	2.376	0.039 *
$p\text{CO}_2$ of seawater	季节 season	3	7.219	0.001 **

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 highly significant difference, $P < 0.01$.

2.4 盐田港海-气界面 CO_2 交换通量

盐田港的海-气界面 CO_2 交换通量的季节变化显著, 全年海-气界面 CO_2 交换通量范围在 $0.25 \sim 6.93 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 之间, 平均值为 $(2.54 \pm 0.92) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 表现为大气 CO_2 的源。盐田港秋、春季海-气界面 CO_2 交换通量的均值为 $(3.37 \pm 0.88) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $(3.12 \pm 1.85) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 差异不显著 ($P = 0.553$), 冬季平均值为 $(2.304 \pm 0.72) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 显著低于秋季 ($P = 0.029$), 但与春季差异不显著 ($P = 0.102$); 夏季显著低于秋、春和冬季 ($P = 0.000$, $P = 0.001$ 和 $P = 0.043$) 见表 6、7。根据图 3 可知, 在秋、冬、春 3 个季节中, 盐田港 CO_2 交换通量均表现为上游向下游不断降低, 下游海藻栽培区表现的源弱于 3 号长牡蛎养殖区和 4 号网箱养殖区; 在夏季表现为从中部区域向上游和下游辐射状增加的趋势, 除了 10 号站位, 位于上

游的长牡蛎养殖区和网箱养殖区表现的源要强于下游的非养殖区。

表 6 不同季节海-气界面 CO₂ 交换通量 F

Tab. 6 Sea-air CO₂ flux in different seasons

seasons		$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
季节 season		F
2012. 11 秋季 autumn	平均数 average value	3.37 ± 0.48
	范围 range	2.43 ~ 3.96
2013. 2 冬季 winter	平均数 average value	2.30 ± 0.72
	范围 range	1.41 ~ 3.74
2013. 5 春季 spring	平均数 average value	3.12 ± 1.85
	范围 range	0.25 ~ 6.93
2013. 8 夏季 summer	平均数 average value	1.29 ± 0.68
	范围 range	0.52 ~ 2.39

表 7 不同季节海-气界面 CO₂ 交换通量的方差分析

Tab. 7 Two-way ANOVA tests of sea-air CO₂ flux in different seasons

变量 variables	变异来源 source of variables	df	F	P
CO ₂ 交换通量	站点 station	9	2.616 9	0.025 6*
CO ₂ flux	季节 season	3	10.835 1	0.000 1**

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 highly significant difference, $P < 0.01$.

2.5 海-气界面 CO₂ 交换通量与水环境因子的相关性

由表 8 可知,从全年的尺度来看,海-气界面 CO₂ 交换通量与 pH 极显著负相关,与盐度(S)和总碱度(TA)显著负相关, 而与其他环境因子不

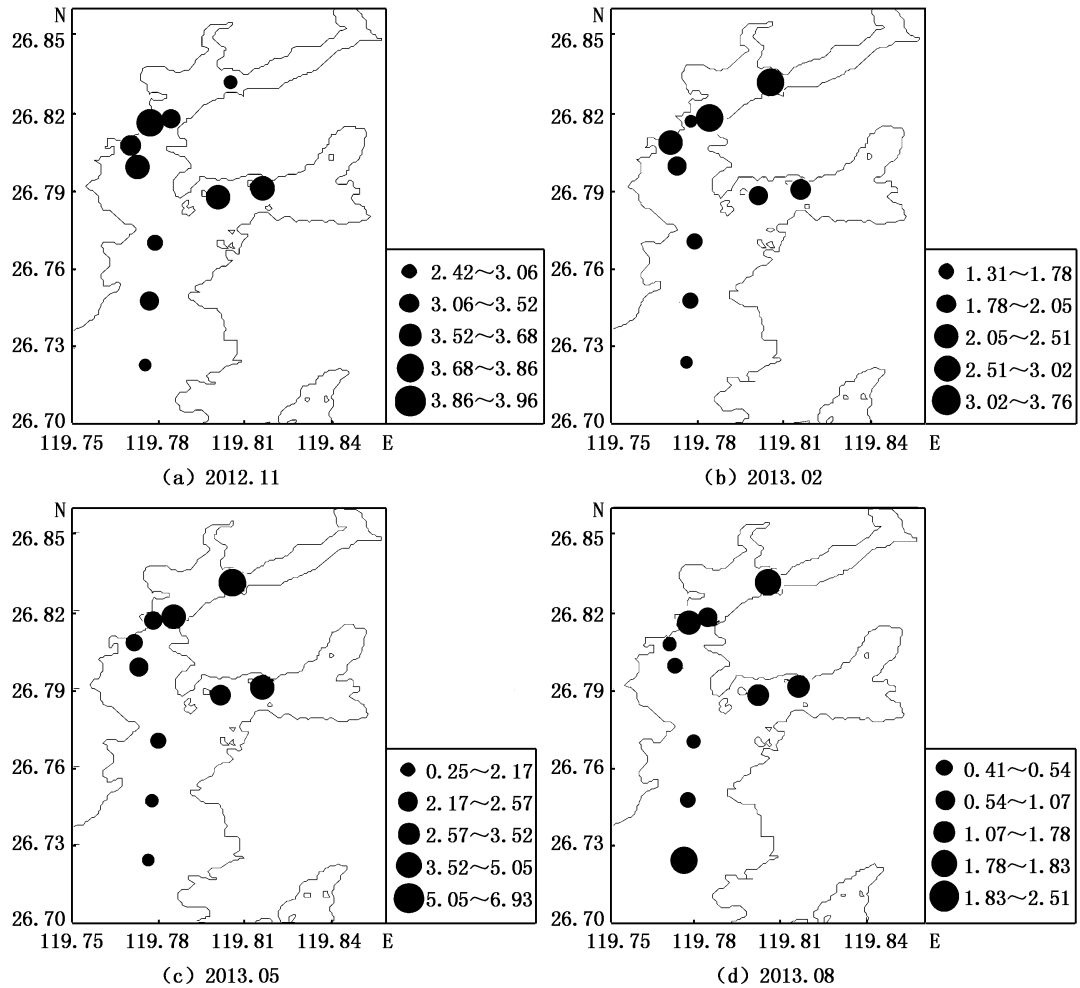


图 3 盐田港海-气界面 CO₂ 交换通量分布 (μatm)

Fig. 3 Distribution of sea-air CO₂ flux (μatm) in Yantian Harbor

相关。从不同季节来看,CO₂ 交换通量与 4 个季节的 pH 显著和极显著负相关;表层水温(SST)和盐度(S)影响冬、春季节 CO₂ 交换通量的环境因子;DIC 和总碱度(TA)是影响春、夏季节 CO₂ 交换通量的环境因子;另外,春季 CO₂ 交换通量与 DO 含量显著负相关,而各季节的 *Chl. a* 浓度与 CO₂ 交换通量均无显著的相关性。

3 讨论

3.1 环境因子对表层海水 pCO₂ 的影响

三沙湾为我国南方位于福建省东北部沿海的一个复杂的海湾^[17],盐田港位于三沙湾内湾之中。本研究结果表明,盐田港表层海水 DIC 浓度低于我国北方典型海湾桑沟湾和乳山湾的 DIC 浓度^[4,8],这可能与盐田港所在的地理区位与水文条件有关。研究表明,表层水 pCO₂ 受到各种物理、化学、生物条件的影响,如水温、盐度、深度、pH、N、P、*Chl. a*、PP 等^[7]。其中,物理过程如水温、盐度是重要的影响因素之一^[18]。盐田港受到陆源输入的影响,盐度由上游到下游逐渐增加,海水中离子浓度加大,导致海水中碳酸盐体系电离度下降,CO₂ 在海水中的溶解度随之降低,与表层海水 pCO₂ 由上游到下游降低的分布趋势相一致。

宋金明^[5]报道温带海域表层水 pCO₂ 和水温之间存在着显著的正相关性。但近岸养殖生态系统的复杂性使得 pCO₂ 的分布存在着较大的不均匀性^[7],不同于大洋上 pCO₂ 的分布^[19]。生物条件可能是影响三沙湾表层水 pCO₂ 空间分布的

主要生态因子^[7-8]。夏季,表层海水温度达到全年最高,CO₂ 的溶解度随之下降,有利于 CO₂ 从水体进入大气中;盐田港夏季并无大型海藻类栽培,但随着水温和营养盐浓度的升高,浮游植物的现存量($2.72 \times 10^4 \sim 16.23 \times 10^4$ cells/L)显著高于其他季节,浮游植物光合作用会降低海水中的 pCO₂^[20],这可能是 8 月份盐田港海水表层部分监测站位的 pCO₂ 低于其他季节的原因。

盐田港每年从 10 月份开始大规模进行龙须菜养殖,至 12 月份开始陆续更换为海带,栽培时间持续到来年的 5 月份。盐田港龙须菜和海带栽培的区域主要集中在盐田港的湾口区域,龙须菜和海带等大型海藻通过光合作用将海水中的溶解无机碳转化为有机碳,吸收水体中的 DIC,使得水体中 pCO₂ 有所降低。因此,秋季(11 月)、冬季(2 月)和春季(5 月)表层海水 pCO₂ 的空间分布表现为盐田港湾口海藻养殖区低于湾内长牡蛎和网箱养殖区域。盐田港夏季(8 月)无大规模海藻栽培,下游表层海水 pCO₂ 的平均值与部分站位的 pCO₂ 值低于秋、冬和春季的相应区域。贝类生长过程中通过呼吸作用和钙化作用释放 CO₂ 的量高于本海域的初级生产力,因此四季中长牡蛎养殖区 pCO₂ 处于较高水平^[21]。4 号网箱养殖区在春季和夏季 pCO₂ 低于邻近的贝类养殖区和非养殖区,鱼类排泄和残饵使得该区域水体营养盐丰富,此期间该功能区 *Chl. a* 在 3.42 ~ 8.62 μg/L 之间,浮游植物的光合作用为降低 pCO₂ 做出主要贡献。

表 8 CO₂ 交换通量与水环境因子的相关系数

Tab. 8 Pearson correlation coefficients between sea-air CO₂ flux and environmental factors

季节 season	变异来源 source of variables						
	pH	表层水温 SST	DIC	DO	叶绿素 a <i>Chl. a</i>	盐度 salinity	总碱度 TA
2012.11							
秋季 autumn	-0.934 **	-0.510	0.259	0.081	0.097	0.140	0.143
2013.2							
冬季 winter	-0.657 *	0.798 **	0.340	-0.157	-0.269	-0.667 *	0.250
2013.5							
春季 spring	-0.970 **	0.654 *	-0.652 *	-0.666 *	-0.163	-0.793 **	-0.706 *
2013.8							
夏季 summer	-0.735 **	0.601	0.792 **	-0.519	0.349	-0.505	0.747 **
全年 the whole year	-0.801 **	-0.301	-0.022	0.114	-0.061	-0.699 *	-0.157 *

注: * 表示相关性显著 $P < 0.05$, ** 表示相关性极显著 $P < 0.01$ 。

Note: * means significant difference, $P < 0.05$; ** means highly significant difference, $P < 0.01$.

3.2 海-气界面 O₂ 交换通量的季节变化与分析

盐田港四个季节均表现为大气 CO₂ 的弱源,而北方的桑沟湾、乳山湾、大连湾以及胶州湾的大部分区域均表现为大气 CO₂ 的汇^[4,8,22-23]。虽然大型海藻和浮游植物会通过光合作用降低海水 pCO₂,但这表明有其他无机碳源的输入。一方面,大规模养殖的长牡蛎在形成贝壳的钙化过程中与呼吸作用协同释放 CO₂^[4],同时,过于密集的网箱养殖产生残饵和粪便,鱼类生长代谢过程中产生 CO₂^[11];另一方面两岸村镇农业与生活污染物输入以及沉积物溶解释放,加之大型海藻的栽培量较少,使得三沙湾盐田港养殖海域表现为 CO₂ 的弱源。盐田港夏季海-气界面 O₂ 交换通量显著低于其他季节,这可能与夏季 DIC 输入减少和浮游植物较强烈的光合作用有关^[24]。另外,湾口区域与湾内区域的水文动力条件的差异也是影响盐田港海-气界面 O₂ 交换通量时空差异的原因之一,但还有待于进一步研究。

温带海域表层海水 pCO₂ 与水温之间存在着显著的正相关关系^[15]。盐田港 4 个季节的航次调查,只有冬、春季 pCO₂ 与这种普遍的规律相一致。盐田港春季海-气界面 O₂ 交换通量与 DIC 和水体 DO 的含量显著相关,表明水体的物理过程和生物活动的耦合作用造成 pCO₂ 的变化。通常,初级生产者的光合作用是影响 DO 含量的主要原因。5 月份,盐田港大规模的海带和龙须菜栽培同时存在,同时随着水温升高和营养盐浓度的增加,浮游植物的生物量也增加(*Chl. a* 的最高值为 9.62 μg/L),因此春季初级生产者的光合作用可能是影响盐田港海-气界面 O₂ 交换通量的主要原因之一。盐田港夏季海-气界面 O₂ 交换通量与 pH、DIC 和 TA 显著相关外,与 DO 并无显著的相关关系。虽然浮游植物光合作用是影响盐田港夏季海水表层的 pCO₂ 的主要因素之一,但其他来源的 DIC 输入可能也是影响海-气界面 O₂ 交换通量的重要生态要素。总体来看,与环境因子之间关系的复杂性表明 CO₂ 交换通量是受到养殖生物、浮游生物的生理生态过程与海域物理过程耦合作用的结果。

本研究结果对评价海水养殖海域生态环境状况和指导海水养殖可持续发展都具有一定的指导意义。调查期间,海藻大规模栽培的季节 CO₂ 交换通量与长牡蛎养殖区、网箱养殖区和夏

季无海藻栽培区相比,表现的大气 CO₂ 源偏弱。龙须菜和海带的轮换栽培吸收水体中的碳,减弱表层海水的 pCO₂,提高养殖海域生态系统吸收 CO₂ 的能力。GAO 等^[25]研究认为大型海藻不仅吸收水体中的 CO₂,同时对 HCO₃⁻ 具有较强的吸收能力,能直接吸收 HCO₃⁻ 作为外在光合作用的碳源。可见开展多营养层次的综合养殖可在一定程度上调节海产经济动物养殖区海-气界面 O₂ 交换通量。本文碳酸盐参数的计算前提是基于碳酸盐体系的化学平衡,而在浅海养殖区域水体中碳酸盐体系有时会处于非平衡状态^[7]。因此,应用化学平衡方法估算海湾养殖区 pCO₂ 和 CO₂ 通量有一定的“不确定性”和局限性,这将在今后的研究中重点解决。

参考文献:

- [1] LI L, ZHAO N, WEI W, et al. A review of research progress on CO₂ capture, storage, and utilization in Chinese Academy of Sciences [J]. Fuel, 2013, 108: 112 - 130.
- [2] DE_RICHTER R K, MING T Z, CAILLOL S. Fighting global warming by photocatalytic reduction of CO₂ using giant photocatalytic reactors [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19: 82 - 106.
- [3] 宋金明. 二氧化碳的温室效应与全球气候及海平面的变化[J]. 自然杂志, 1991, 14(9): 649 - 653.
SONG J M. The CO₂ greenhouse effect and global climate and sea level changes [J]. The Journal Nature, 1991, 14(9): 649 - 653.
- [4] 蒋增杰, 方建光, 王巍, 等. 乳山官家岛以东牡蛎养殖水域秋季海-气界面 CO₂ 交换通量研究[J]. 水产学报, 2012, 36(10): 1592 - 1598.
JIANG Z J, FANG J G, WANG W, et al. Sea-air CO₂ 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.
- [5] 宋金明. 海洋碳的源与汇[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(2): 75 - 80.
SONG J M. Carbon sources and sinks in oceans [J]. Marine Environmental Science, 2003, 22(2): 75 - 80.
- [6] 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 - 105.
- [7] 张继红, 吴文广, 任黎华, 等. 桑沟湾表层水 pCO₂ 的季节变化及影响因素分析[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 57 - 64.
ZHANG J H, WU W G, REN L H, et al. Seasonal variation of pCO₂ and its potential influencing factors in aquaculture

- areas of Sanggou Bay [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 57–64.
- [8] 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[J]. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 50–56.
JIANG Z J, FANG J G, HAN T T, et al. Estimation of sea-air CO₂ flux in seaweed aquaculture area, Lido Bay [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 50–56.
- [9] 王文松, 薛明, 张龙军. 2011 年 3 月胶州湾表层海水 pCO₂ 及海-气界面通量[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2012, 42(7/8): 144–149.
WANG W S, XUE M, ZHANG L J. Distribution and controlling factors of sea surface partial pressure of CO₂ and Air-Sea CO₂ flux in Jiaozhou Bay during March, 2011 [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(7/8): 144–149.
- [10] 蔡清海. 福建三沙湾海洋生态环境研究[J]. *中国环境监测*, 2007, 23(6): 101–105.
CAI Q H. Study on Maine ecological environment of Sansha Bay in Fujian [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(6): 101–105.
- [11] 马祖友, 夏永健, 石志洲, 等. 2011 年三沙湾增殖区水环境质量评价[J]. *海洋开发与管理*, 2013(7): 75–78.
MA Z Y, XIA Y J, SHI Z Z, et al. The assessment of water environmental quality in the mariculture area of Sansha Bay in 2011 [J]. *Marine Development and Management*, 2013(7): 75–78.
- [12] TSUNOGAI S, WATANABE S, SATO T. Is there a “continental shelf pump” for the absorption of atmospheric CO₂ [J]. *Tellus B*, 1999, 51(3): 701–712.
- [13] 宋金明. 中国近海生物地球化学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2004.
SONG J M. *China Offshore Biogeochemistry* [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2004.
- [14] 陈佳荣. 水化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
CHEN J R. *Water Chemistry* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996.
- [15] MILLERO F J. Thermodynamics of the carbon dioxide system in the oceans[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(4): 661–677
- [16] MEHRHACH C, CULLBERSON C H, HAWLEY J E, et al. Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater of at atmospheric pressure [J]. *Limnology and Oceanography*, 1973, 18(6): 897–907
- [17] 中国海湾志编纂委员会, 中国海湾志[M]. 北京: 海洋出版社, 1994.
The gulf records compilation committee of China, *The gulf records* [M]. Beijing: Marine Press, 1994.
- [18] WEISS R F. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas [J]. *Marine chemistry*, 1974, 2(3): 203–215.
- [19] COOPER D J, WATSON A J, LING R D. Variation of pCO₂ along a North Atlantic shipping route (U. K. to the Caribbean): A year of automated observations [J]. *Marine Chemistry*, 1998, 60(1/2): 147–164.
- [20] 张龙军, 王婧婧, 张云, 等. 冬季北黄海表层海水 pCO₂ 分布及其影响因素探讨[J]. *中国海洋大学学报*, 2008, 38(6): 955–960.
ZHANG L J, WANG J J, ZHANG Y, et al. Distribution and controlling factors of surface seawater partial pressure of CO₂ in the Northern Yellow Sea during winter [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(6): 955–960.
- [21] MARTIN S, THOUZEAU G, CHAUVAU D, 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*, 2003, 51(5): 1996–2007.
- [22] 刘启珍, 张龙军, 薛明. 胶州湾秋季表层海水 pCO₂ 分布及水-气界面通量[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(10): 127–132.
LIU Q Z, ZHANG L J, XUE M. Distribution and controlling factors of surface seawater partial pressure of CO₂ and Air-Sea carbon fluxes in Jiaozhou Bay during autumn [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(10): 127–132.
- [23] 嵇晓燕, 崔广柏, 杨龙元, 等. 太湖水-气界面 CO₂ 交换通量观测研究[J]. *环境科学*, 2006, 27(8): 1479–1486.
JI X Y, CUI G B, YANG L Y, et al. Measurement of the CO₂ flux on the water-air interface of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(8): 1479–1486.
- [24] 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.
Qu B X, SONG J M, YUAN H M, et al. Advances of seasonal variations and controlling factors of the sea-air CO₂ flux in the East China Sea [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(7): 783–793.
- [25] GAO K S, MCKINLEY K R. Use of macroalgae for marine biomass production and CO₂ remediation: a review [J]. *Journal of Applied Phycology*, 1994, 6(1): 45–60.

Seasonal variation of sea-air CO₂ flux in mariculture area in Yantian Harbor, Sansha Bay

WEI Zhangliang^{1,2}, HAN Hongbin¹, HU Ming¹, WU Hailong¹, ZHANG Jianheng³, HUO Yuanzi^{1,2}, HE Peimin^{1,2}

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Water Environment and Ecology Engineering Center of Shanghai Institute of Higher Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the investigation data of pH, total alkalinity (TA), sea surface temperature (SST), salinity (S), dissolved oxygen (DO), dissolved inorganic carbon (DIC), *Chl. a*, etc. during four cruises from November 2012 to August 2013, the spatial and seasonal variations of dissolved inorganic carbon system parameters and aqueous $p\text{CO}_2$ were investigated in a large-scale mariculture area in Yantian Harbor, Sansha Bay. And the sea-air CO₂ flux was also evaluated. The results showed that the annual concentration of DIC, HCO₃⁻, CO₃²⁻ and CO₂ was in the range of 955 – 1957.08, 905.08 – 1848.13, 10.14 – 124.78 and 11.48 – 39.78 μmol/L, respectively. There were significant differences between seasons in concentrations of DIC, HCO₃⁻, CO₃²⁻ and CO₂ ($P < 0.01$). The annual value of aqueous $p\text{CO}_2$ was in the range of 391.27 – 1 200.49 μatm, and sea – air CO₂ flux was in the range of 0.252 – 6.925 μmol / (m² · d). These demonstrated that the Yantian Harbor was the weak source of atmospheric CO₂. There was significant difference for sea-air CO₂ between different sampling sites ($P < 0.05$), and highly significant difference between different seasons ($P < 0.01$). The sea-air CO₂ flux was the highest in autumn and spring, and was the lowest in summer. The sea-air CO₂ flux in winter was lower than that in autumn, but there was no significant difference with that in spring. The sea-air CO₂ flux was lower in the bay mouth than that in the upstream sea area in autumn, spring and winter. Distribution of $p\text{CO}_2$ and sea-air CO₂ flux were mainly controlled by hydrological conditions and biological uptake in Yantian Harbor. The large-scale seaweed aquaculture is helpful diffusion of CO₂ across the sea-air interface.

Key words: Yantian Harbor; $p\text{CO}_2$; CO₂ flux; mariculture; large-scale seaweed