

桑沟湾表层水 $p\text{CO}_2$ 的季节变化及影响因素分析

张继红¹ 吴文广¹ 任黎华^{1,2} 韩婷婷^{1,2} 王巍¹ 方建光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 碳汇渔业实验室, 青岛 266071)

(²中国科学院海洋研究所, 青岛 266001)

摘要 根据2011年4、8、10月和2012年1月在桑沟湾获得的表层海水总碱度(TA)和pH值, 结合现场水文、化学、生物和养殖等参数, 探讨了桑沟湾海域 CO_2 体系各参数的空间分布特征、季节变化情况及其影响因素。调查结果显示, 10月和翌年1月, CO_2 体系各参数主要受温度和盐度的影响; 8月, pH和 $p\text{CO}_2$ 分别与初级生产力和溶解氧显著相关; 4月与水文、化学生物因子无显著相关性。8月各参数的空间差异最大, 其次是10月, 1月最小。4个航次的平均表层 $p\text{CO}_2$ 都低于大气 $p\text{CO}_2$, 为表观碳汇区; 季节变化趋势是8月<4月<1月<10月。 $p\text{CO}_2$ 总体的空间分布趋势都是湾内向湾外递增, 即贝类养殖区<贝藻混养区<藻类养殖区<非养殖区。8月, 桑沟湾较低的 $p\text{CO}_2$ 可能与赤潮有关, 而4月可能是物理、生物及大规模贝藻养殖的综合结果。桑沟湾较低的 $p\text{CO}_2$ 是由于受沿岸区高初级生产力的影响, 还是受大规模的贝藻养殖的影响, 尚需进一步的研究。

关键词 海水总碱度 pH值 表层水二氧化碳分压 海水养殖 桑沟湾

中图分类号 S917 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2013)01-0057-08

Seasonal variation of $p\text{CO}_2$ and its potential influencing factors in aquaculture areas of Sanggou Bay

ZHANG Ji-hong¹ WU Wen-guang¹ REN Li-hua^{1,2} HAN Ting-ting^{1,2}
WANG Wei¹ FANG Jian-guang¹

(¹Key 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)

(²Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

ABSTRACT Based on four investigations of total alkalinity and pH, and combined with other chemical, biological factors and mariculture activities, the distribution characteristics, seasonal variation of seawater CO_2 parameters and the major influencing factors were discussed in this research. The results showed that in October and January, the CO_2 system parameters were primarily influenced by temperature and salinity; while in August, the $p\text{CO}_2$ and pH were controlled by dissolved oxygen and primary productivity, respectively. While in April, no significant correlation was found between CO_2 system parameters and hydrological, chemical or biological factors. The maximum differences in spatial distribution of $p\text{CO}_2$ were in August, fol-

lowed by October, April and January. Average $p\text{CO}_2$ in the four investigations were below the atmospheric CO_2 pressure; seasonal trend in $p\text{CO}_2$ was August < April < January < October. Overall spatial distribution trend of $p\text{CO}_2$ was shellfish mono-culture zone < shellfish and seaweed polyculture zone < seaweed mono-culture zone < non-culture zone. In August, the low $p\text{CO}_2$ may be related to the red tide in Sanggou Bay. However, in April it might be the integrated influence of physical, biological factors and mariculture activity. Whether the lower $p\text{CO}_2$ in Sanggou Bay is due to the relatively high primary productivity or the influence of large-scale mariculture in the Bay requires further study.

KEY WORDS Total alkalinity pH Surface water pressure of carbon dioxide
Mariculture Sanggou Bay

海洋是地球上最大的碳库,人类活动每年排放的 CO_2 以碳计为 55 亿 t,有 20%~30% 被海洋所吸收。海洋增汇的主要策略是提高海洋吸收和存储大气 CO_2 的能力,调控海洋生物固碳是实现海洋增汇的手段之一。当然,这依赖于对海洋碳循环过程与机理的科学把握。我国的海水贝藻养殖居世界首位,贝藻养殖活动可能成为减排增汇的有效手段(Tang *et al.* 2011)。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不足,渔业碳汇计量方法和技术亟待建立。

桑沟湾是我国北方海域典型的贝藻养殖海域之一,研究该海域 CO_2 的源汇问题具有非常重要的意义。本研究对 2011~2012 年 4 个航次的调查数据进行比较、分析,以了解桑沟湾 $p\text{CO}_2$ 的季节变化主要影响因素,为碳汇渔业的发展提供科学依据。

1 调查海域与方法

调查站位、等深线及桑沟湾的养殖布局情况见图 1。共设置 19 个调查站位,分别于 2011 年 4、8、10 月、2012 年 1 月进行 4 个航次的大面调查。1[#] 站位为湾外的非养殖区,2[#]~4[#] 为海带养殖区,5[#]~7[#]、10[#]~12[#] 为贝类混养区,13[#] 为网箱养殖区,其他站位为贝类筏式养殖区。

所有样品均按《海洋监测规范》规定的方法采集、处理、保存。水温、盐度、DO 等指标使用美国 YSI-6600 型水质分析仪现场测定。初级生产力采用叶绿素 a 法,按照 Cadée(1975)提出的简化公式计算: $pp=C_{\text{Chl-a}} \cdot Q \cdot E \cdot D/2$ 。式中, pp 为初级生产力,以 C 计,单位为 $\text{mgC}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, $C_{\text{Chl-a}}$ 为表层水中叶绿素 a(Chl-a)浓度(mg/m^3), Q 为同化系数($\text{mg}/\text{mg} \cdot \text{h}$), E 为真光层的深度(m), D 为白昼时间的长短(h)。采用萃取荧光法测定 Chl-a 的浓度。样品的分析按照《海洋调查规范》中的要求执行。pH 采用校正过的 Thermo pH 计进行即时测定,pH 电极为 Orion 9107BNMD,精密度 ± 0.002 (使用 NBS 标定)。未能即时测定的样品,经 Whatman GF/F 滤膜过滤,加饱和氯化汞冷藏带回实验室。根据 pH 温度校正表进行 pH 的校正。TA 采用自动电位滴定法测定(自动滴定仪 848Titrino plus, Metrohm 公司,瑞士万通),滴定过程由 ROSS 玻璃电极监控,TA 数值由计算机程序自动计算得到,测量相对标准偏差为 $\pm 2 \mu\text{mol}/\text{L}$ 。

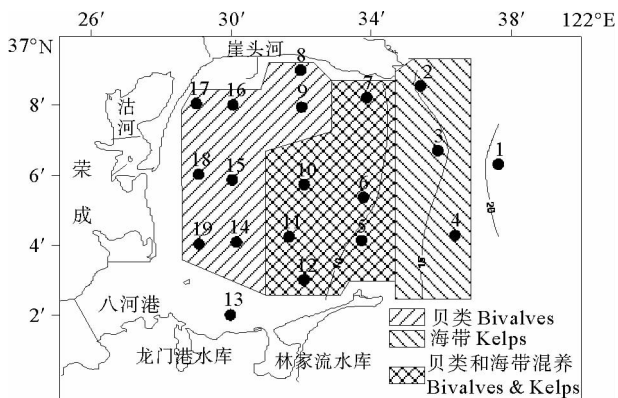


图 1 桑沟湾海域调查站位、养殖布局及等深线

Fig. 1 Survey stations, mariculture distribution and water isobath in Sanggou Bay

溶解无机碳的计算:当海水的 CO_2 体系处于平衡时,如果海水的温度、盐度和压力已经测定,那么 pH 值、

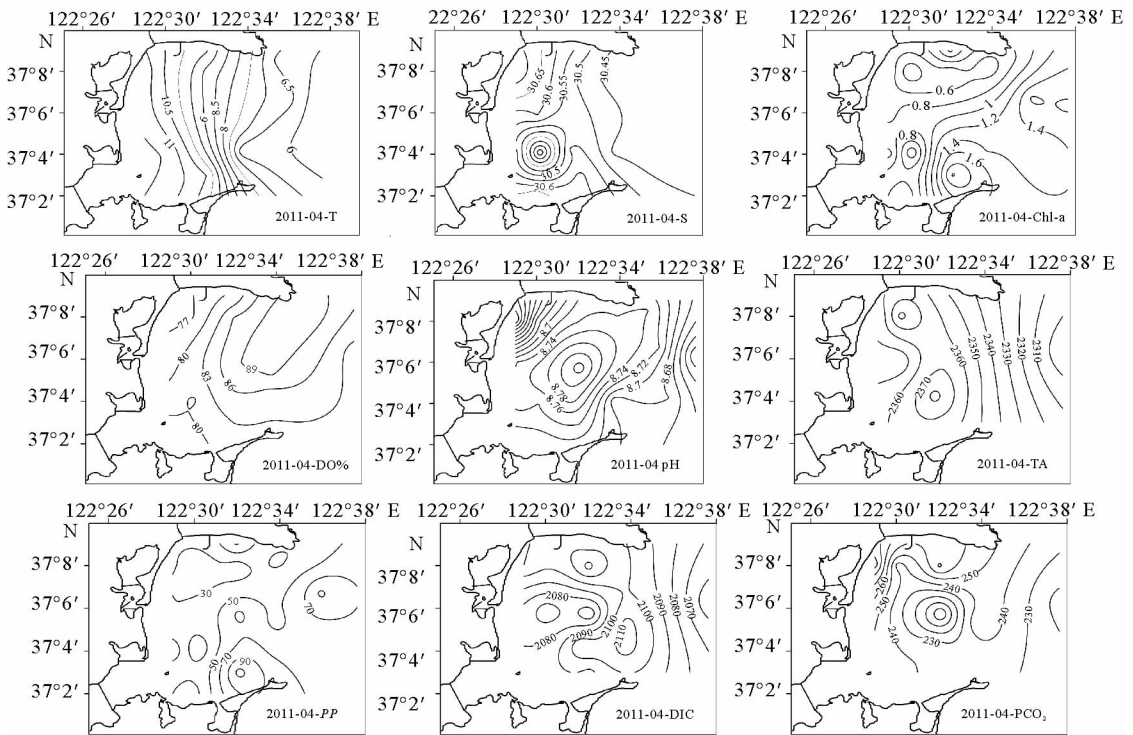
总碱度(TA)、溶解无机碳(DIC)和表层水二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)就可以任意测定两个,然后计算出其余的参数(Millero 1995)。本研究利用测得的 pH 和 TA 数据,利用 CO2SYS 软件,计算 CO_2 体系的其他参数。

数据分析:应用 SPSS 10.0 软件进行线性相关分析及多元回归分析, $P < 0.01$ 视为差异极其显著, $P < 0.05$ 视为差异显著。

2 结果与讨论

2.1 表层海水中 pH 值、总碱度(TA)及相关环境参数的空间分布特征

4 月:湾内水较浅,升温较快,水温的等值线沿湾底向湾口递减(图 2)。水温的最高值为 11.61°C ($19^\#$ 站位),最低值为 5.5°C ($1^\#$ 站位),相差 6.11°C 。盐度的空间差异较小,介于 $30.21 \sim 30.74$ 之间。叶绿素 a 的浓度位于 $0.22 \sim 1.63 \mu\text{g/L}$ 范围,平均为 $1.01 \pm 0.51 \mu\text{g/L}$,等值线从湾内向湾口递增。溶解氧饱和度的平均值为 $83.37\% \pm 4.62\%$;等值线从湾底向湾口北部递增。总碱度的空间分布从湾底向湾口递减,变化幅度位于 $2291 \sim 2384 \mu\text{mol/kg}$ 范围。4 月是养殖海带及滤食性贝类(扇贝、牡蛎等)的生长旺季。海带光合作用可消耗水体中的 DIC,提高 pH,有使 $p\text{CO}_2$ 降低的可能;滤食性贝类的呼吸、钙化会释放 CO_2 ,同时摄食浮游植物等颗粒有机碳。贝藻的共同作用,使 4 月的无机碳体系非常复杂。逐步回归结果显示,DIC、TA、pH 及 $p\text{CO}_2$ 与水温、盐度、DO%、Chl-a 等均无显著的相关性。



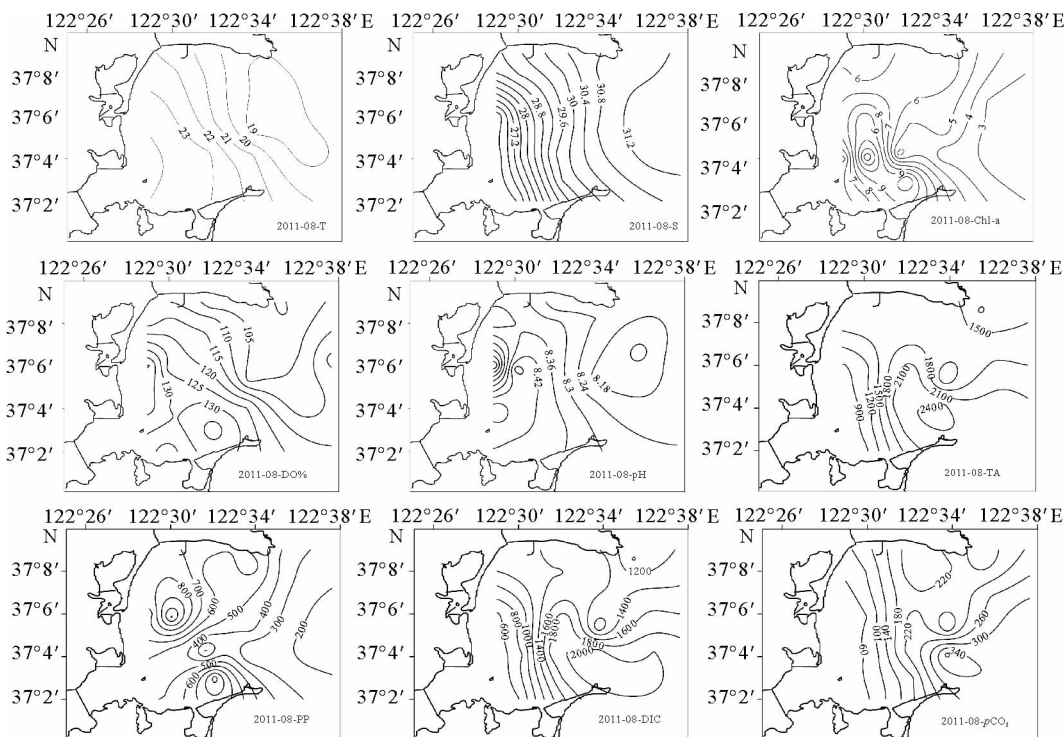
注:各项参数的单位分别为:水温($^\circ\text{C}$);盐度($\%$);溶解氧饱和度($\%$);叶绿素 a ($\mu\text{g/L}$);
初级生产力($\text{mg}/\text{m} \cdot \text{d}$); DIC($\mu\text{mol/L}$);总碱度($\mu\text{mol/L}$); $p\text{CO}_2$ (μatm)

图 2 2011 年 4 月桑沟湾表层水与溶解无机碳系统相关的环境参数的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of parameters related to DIC system of surface water in Sanggou Bay in April 2011

8 月:水温、盐度呈现较好的梯度分布(图 3)。温度由湾内向湾外递减,水温最高值(24°C)与最低值(18.5°C)相差 5.5°C 。受冲淡水的影响,盐度由湾内向湾外递增,最高与最低值的差为 5.17。整个湾溶解氧处于过饱和状态,说明初级生产者活动极其强烈;溶解氧饱和度的高值区出现在湾内的 $18^\#$ (饱和度达

140.5%)。初级生产力 pp 、叶绿素 a 由湾内向湾外递减,高值区与 pH 、 DO 的高值区相一致,同时,该区的 DIC 也相应较低。可见,海洋生物的光合作用强于呼吸分解作用,对 DIC 的消耗较为强烈,海水中出现 CO_2 的净消耗,使 pH 值升高。 CO_2 在海气界面的交换以及海洋生物对 CO_2 的吸收和释放不会影响总碱度(Ferial *et al.*, 2001)。TA 代表的是海水中弱酸阴离子的总量,与盐度密切相关(Broecker 1982),虽然这一结论是对开阔大洋表层海水的研究而得来的,但是,本研究 8 月航次的结果与此相一致;桑沟湾 TA 的等值线从湾底西南向湾外递增,仅与盐度呈现显著的正相关性($r=0.670$, $P<0.01$)。 pCO_2 的分布存在着较大的不均匀性,最高值是最低值的 11.7 倍,不同于大洋上 pCO_2 的分布(Cooper *et al.*, 1998),体现了近岸养殖生态系统的复杂性。



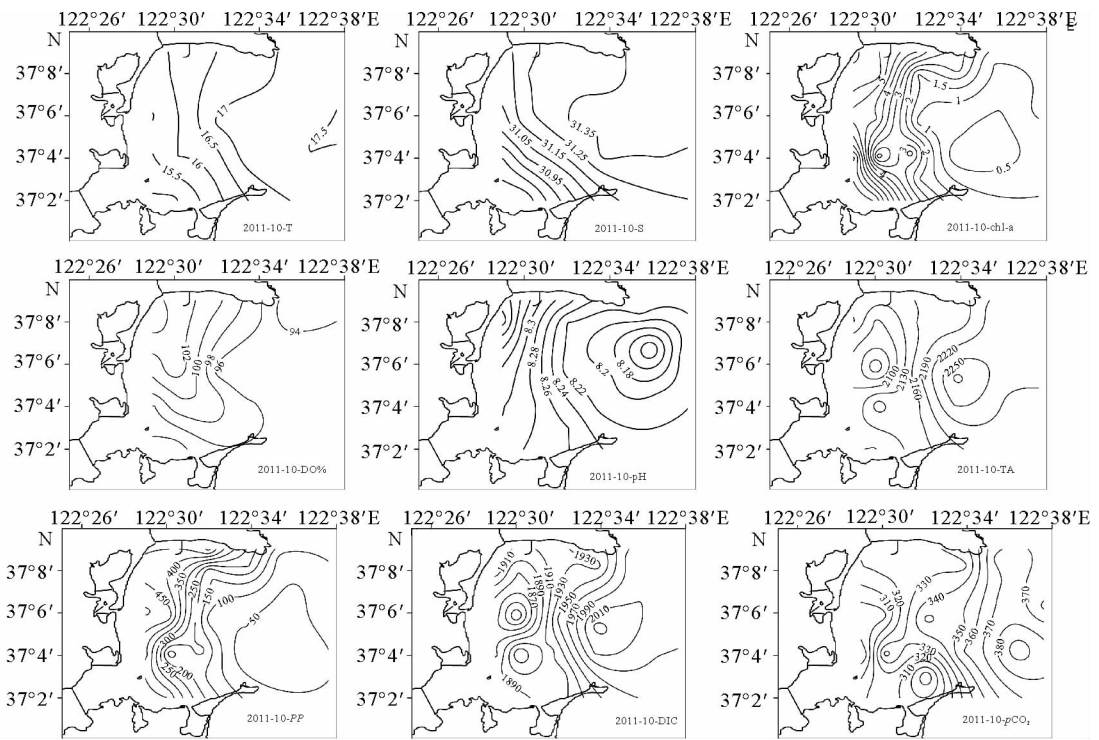
注:各项参数的单位分别为:水温($^{\circ}C$);盐度($\%$);溶解氧饱和度($\%$);叶绿素 a ($\mu g/L$);
初级生产力($mgC/m^2 \cdot d$); DIC ($\mu mol/L$);总碱度($\mu mol/L$); pCO_2 (μatm)

图3 2011年8月桑沟湾表层水与溶解无机碳系统相关的环境参数的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of parameters related to DIC system of surface water in Sanggou Bay in August 2011

10月:10月航次桑沟湾表层海水中温度、盐度和 pH 、TA 等各参数的平面分布见图4。温盐分布从湾内向湾口外递增,同夏季航次相比,空间差异性较小。 $Chl-a$ 、 pp 、 $DO\%$ 及 pH 分布趋势相同,均由湾内向湾口递减。TA 与 DIC 的等值线均从湾内向湾外递增,空间差异性较小。湾口以外的 pCO_2 高于大气 pCO_2 , 表现为 CO_2 的源区;湾内的 pCO_2 小于大气 pCO_2 , 为 CO_2 的汇区;等值线从湾内向湾外递增。

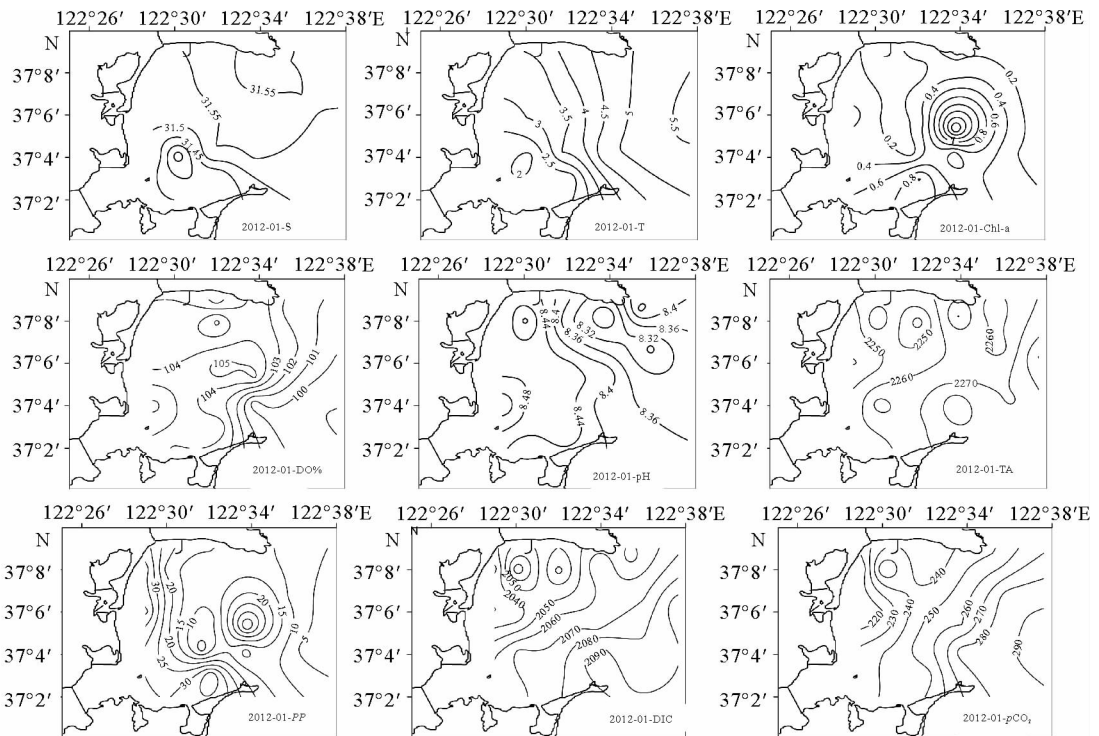
1月:冬季,全湾的各个环境因子的空间分布差异性较小(图5)。水温等值线从湾内向湾口递增。盐度在林家流水库附近有一小的低值区,从湾内向湾外递增。 pp 等值线从湾内向湾外递减, $Chl-a$ 在湾口中部有高值区。溶解氧含量较高,85%的站点处于过饱和状态。虽然冬季 $Chl-a$ 及 pp 较低,但是该季是养殖海带的生长旺季,较高的 DO 可能与海带光合作用有关。 pCO_2 的等值线从湾内向湾外递增,整个调查海域的 pCO_2 都低于大气 pCO_2 分压,即使是在湾外的非养殖区,也表现为碳的汇区。



注:各项参数的单位分别为:水温($^{\circ}\text{C}$);盐度(‰);溶解氧饱和度($\%$);叶绿素 a ($\mu\text{g/L}$);
初级生产力($\text{mgC/m}^2 \cdot \text{d}$); DIC($\mu\text{mol/L}$);总碱度($\mu\text{mol/L}$); $p\text{CO}_2$ (μatm)

图 4 2011 年 10 月桑沟湾表层水与溶解无机碳系统相关的环境参数的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of parameters related to DIC system of surface water in Sanggou Bay in October 2011



注:各项参数的单位分别为:水温($^{\circ}\text{C}$);盐度(‰);溶解氧饱和度($\%$);叶绿素 a ($\mu\text{g/L}$);
初级生产力($\text{mgC/m}^2 \cdot \text{d}$); DIC($\mu\text{mol/L}$);总碱度($\mu\text{mol/L}$); $p\text{CO}_2$ (μatm)

图 5 2012 年 1 月桑沟湾表层水与溶解无机碳系统相关的环境参数的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of parameters related to DIC system of surface water in Sanggou Bay in January, 2012

2.2 CO₂体系各参数的季节变化及与环境因子的关系

表1列出了调查海域表层海水中各调查因子的平均浓度。调查结果显示,水温、盐度与历史数据相比差异不大(Duarte *et al.* 2003; 闫哲等 2008)。叶绿素a浓度除1月外,均高于20世纪80、90年代的结果(季如宝等 1998)。可能原因是营养盐浓度升高,有利于浮游植物的生长;另外,5月底桑沟湾发生大规模的赤潮,持续的时间长达两个多月,8月,贝类区部分站位叶绿素a浓度高于10 μg/L(张继红等 2012)。浮游植物光合作用会降低海水的pCO₂(张龙军等 2008),8月的表层水pCO₂最低,可能与赤潮暴发有一定的关系。从图6可以看出,8月贝类区的pCO₂很低。即使是pCO₂最高的10月,全湾的pCO₂平均值也低于大气pCO₂。结果显示,桑沟湾在4月、8月、10月和11月,都为CO₂的汇区。8月、10月、1月整体趋势是湾外的pCO₂高于湾内的pCO₂。关于桑沟湾表层水pCO₂,没有历史数据可以比较。桑沟湾10月、1月pCO₂的值位于整个北黄海pCO₂的变化范围内,但是,低于北海黄海的平均值(盛桂云 2009; 张龙军等 2008、2009)。

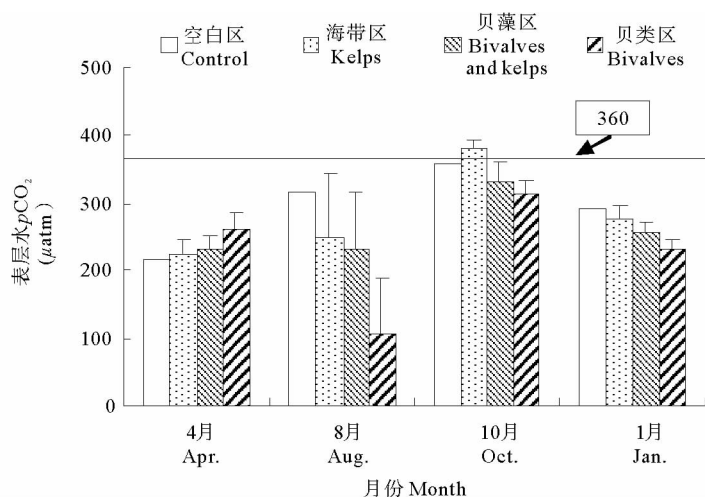


图6 桑沟湾不同养殖区表层水pCO₂分压的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of pCO₂ of different maricultural areas in Sanggou Bay

表1 桑沟湾表层海水中环境因子平均浓度的季节变化

Table 1 Seasonal variation of average value of different environmental parameters in Sanggou Bay

	4月 Apr.	8月 Aug.	10月 Oct.	1月 Jan.
水温 Temperature (°C)	9.00±2.12	21.36±2.02	16.43±0.79	3.76±1.22
盐度 Salinity	30.55±0.10	29.39±1.78	31.18±0.23	31.52±0.064
叶绿素a浓度 Chl-a (μg/L)	1.01±0.51	5.94±2.85	2.91±2.34	0.40±0.42
溶解氧饱和度 DO (%)	83.37±4.62	117.99±12.96	97.81±3.72	103.25±2.10
初级生产力(mgC/m ² ·d) Primary production	49.17±28.65	514.76±268.14	221.46±184.44	18.75±13.79
pH值 pH	8.261±0.042	8.273±0.154	8.114±0.028	8.224±0.033
总碱度 Total alkalinity (μmol/L)	2 354.32±25.13	1 603.26±553.54	2 166.95±66.86	2 261.47±15.04
溶解无机碳 DIC (μmol/L)	2 094.76±24.70	1 324.80±517.99	1 933.35±64.36	2 061.39±21.97
表层水二氧化碳分压 pCO ₂ (μatm)	242.35±27.97	176.91±107.28	333.08±31.93	249.58±24.47

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等等。物理过程如水温、盐度是重要的影响因素之一(Weiss 1974)。本研究逐步回归分析结果显示,对于空间分布数据而言,总体上盐度、温度是和CO₂体系各参数关系最为密切的环境因子(表2)。季节变化带来的海水温度变化特别是表层海水温度变化是决定海-气界面交换大气CO₂量的最直接因素。温带海域表层水pCO₂和水温之间存在显著的正相关关系(宋金明 2004)。桑沟湾4个航次,只有10月和1月的结果与这种普遍的规律相一致。在温度最高的8月,pCO₂的平均值在4个航次的结果中最低。pCO₂与水温无显著的相关性,而是与盐度和DO显著相关。说明水体的物理混合和生物活动的共同作用是造成pCO₂空间变化的主要因素。通常,初级生产者的光合作用是造成DO过饱和的主要原因。8月,虽然养殖的海带已全部收获,但是,近几年养殖龙须菜的规模日趋增加,大型藻类的光合作用可能是影响pCO₂的原因之一。另外,DO%与Chl-a及pp显著正相

关, pH 与 $p\text{p}$ 显著正相关, 以上的统计学分析结果说明 8 月浮游植物的光合作用与桑沟湾较低的 $p\text{CO}_2$ 有关。4 月是养殖海带和滤食性贝类的生长旺季。滤食性贝类的摄食、呼吸、钙化等生理活动旺盛, 会对 Chl-a、 $p\text{p}$ 产生摄食压力或促进作用, 而呼吸及钙化作用会直接影响水体中的 CO_2 。海带的光合作用会降低 $p\text{CO}_2$ 。以上养殖生物的生理过程及浮游生物、物理过程的综合作用, 使得桑沟湾 4 月 $p\text{CO}_2$ 的结果更为复杂, CO_2 体系各参数与环境因子均无显著相关性。

表 2 桑沟湾 CO_2 体系各参数与环境因子空间分布数据的逐步回归分析结果

Table 2 Stepwise regression analyses results of CO_2 system parameters with environmental factors of spatial distribution data

月份 Month	逐步回归方程 Stepwise regression function	N	R	P
4 月 April	无显著相关	—	—	—
	$\text{pH} = 2.002 \times 10^{-4} PP - 0.0571S + 9.848$	18	0.875	<0.001
8 月 August	$TA = 0.502S + 0.292T - 19.396$	18	0.827	<0.001
	$\text{DIC} = 449.832S + 234.737T - 16909.3$	18	0.843	<0.001
	$p\text{CO}_2 = 64.83S + 54.269\text{DO} - 2205.521$	18	0.873	<0.001
	$\text{pH} = 8.524 - 0.025T$	17	0.695	<0.001
10 月 October	$TA = 0.12T - 0.202S + 6.49$	17	0.874	<0.001
	$\text{DIC} = 118.242T - 202.143S + 6289.362$	17	0.879	<0.001
	$p\text{CO}_2 = 32.514T - 202.594$	17	0.801	<0.001
	$\text{pH} = 0.271S - 0.030T - 0.205$	17	0.799	<0.001
1 月 January	$TA = 0.006T + 2.237$	17	0.52	<0.05
	DIC 无显著相关	—	—	—
	$p\text{CO}_2 = 22.275T - 190.525S + 6170.326$	17	0.823	<0.001

2.3 实验存在的问题

本研究是基于测定 pH、总碱度来计算所有的其他碳酸盐参数。该计算方法的前提条件是基于碳酸盐体系的化学平衡。然而, 在浅海养殖区域, 由于受多种因子如陆地径流、养殖生物的生命活动、有机碳代谢、浮游植物强烈的光合作用等复杂过程的影响, 水体中碳酸盐体系有时会处于非平衡状态。另外, 剩余碱度的问题也会引起 DIC 计算数据的误差。而 pH 与 TA 的微小测量误差就会造成 $p\text{CO}_2$ 计算结果的较大误差, 因此, 用基于化学平衡的方法计算浅海养殖区的 $p\text{CO}_2$ 所得的数据有一定的“不确定性”和局限性。虽然反映出的桑沟湾表层水 $p\text{CO}_2$ 的季节变化的“规律”十分有意义, 但计算所得的 CO_2 体系各参数的浓度的值与实际情况可能会存在差别。另外, 桑沟湾大面调查时, 通常是早出晚归, 各站的调查时间不一致, $p\text{CO}_2$ 的昼夜变化可能会带来一定误差。这些问题, 将在今后研究中着重解决。

3 结语

2011 年 4、8、10 月及 2012 年 1 月 4 个调查航次结果显示, 桑沟湾表层 $p\text{CO}_2$ 较低, 为表观碳汇区。 $p\text{CO}_2$ 总体的趋势都是湾内向湾外递增, 即贝类养殖区 < 贝藻混养区 < 藻类养殖区 < 非养殖区。8 月, 桑沟湾较低的 $p\text{CO}_2$ 可能受赤潮的影响, 而 4 月可能受大规模养殖贝藻的影响, 而使海水中 CO_2 体系各参数的量值与环境因子无显著的相关性。海水中 CO_2 体系各参数的量值及其时空变化特征是各种物理、化学、生物等因素综合作用的结果, 海洋环境中许多生物地化反应能够对 pH 值、TA 及 DIC 产生影响(高学鲁 2005)。浮游植物对于 NO_3^- 的同化会使 pH 值和 TA 增加, 而对于 NH_4^+ 的同化则会使 pH 值和 TA 降低。碳酸钙的生产过程会引起

pH值和TA的变化。桑沟湾较低的 $p\text{CO}_2$ 是由于受沿岸区高初级生产力的影响,还是受大规模的贝藻养殖的影响,尚需进一步的研究。

参 考 文 献

- 闫 哲,任景玲,刘素美,张继红,张 经. 2008. 桑沟湾总溶解态无机砷的分布与季节变化. 海洋环境科学, 27(5):432-436
- 张龙军,郭 朝,薛 亮. 2009. 秋季北黄海表层海水 CO_2 分压分布及其影响因素探讨. 中国海洋大学学报, 39(4):587-591
- 张龙军,王婧婧,张 云,薛 亮. 2008. 冬季北黄海表层海水 CO_2 分压分布及其影响因素探讨. 中国海洋大学学报, 38(6):955-960
- 宋金明. 2004. 中国近海生物地球化学. 济南:山东科技出版社, 606
- 季如宝,毛兴华,朱明远. 1998. 贝类养殖对海湾生态系统的影响. 黄渤海海洋, 16(1):21-27
- 高学鲁. 2005. 中国近海典型海域溶解无机碳系统的生物地球化学特征. 见:中国科学院研究生院博士研究生学位论文, 13-16
- 盛桂云. 2009. 北黄海和青岛近海的二氧化碳体系. 见:中国海洋大学硕士研究生学位论文, 33
- Broecker WS, Peng TH. 1982. Tracers in the Sea. New York: Eldigio Press 690
- Cadée GC. 1975. Primary production off the Guyuan coast. Netherlands J Sea Res 9(1):128-134
- Cooper DJ, Watson AJ, Ling RD. 1998. Variation of $p\text{CO}_2$ along a North Atlantic shipping route(U. K. to Caribbean): A year of automated observations. Mar Chem 60:147-164
- Duarte P, Meneses R, Hawkins AJS and 3 others. 2003. Mathematical modeling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters. Ecological Modelling 168: 109-143
- Ferial L, Diana PRP, Catherine J. 2001. Dissolved inorganic carbon, alkalinity, nutrient and oxygen seasonal and interannual variations at the Antarctic Ocean JGOFS-KERFIX site. Deep-Sea Research I 48:1581-1603
- Millero FJ. 1995. Thermodynamics of the carbon dioxide system in the oceans. Geochimica et Cosmochimica Acta 59: 661-677
- Tang QS, Zhang JH, Fang JG. 2011. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO_2 absorption by coastal ecosystems. Mar Ecol Prog Ser 424: 97-104
- Weiss RF. 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non ideal gas. Marine Chemistry 2:203-215