

大型藻类规模化养殖水域海-气界面 CO₂ 交换通量估算

蒋增杰 方建光 韩婷婷 李加琦 毛玉泽 王巍

(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 选择山东俚岛湾大型藻类养殖水域作为研究区域, 根据 2011 年 4、8、10 月和 2012 年 1 月 4 个航次的大面调查获得的 pH、总碱度(TA)、叶绿素 a 等基础数据, 分析了该区域表层海水溶解无机碳(DIC)体系各分量的浓度、组成比例及时空变化特征, 估算了海-气界面 CO₂ 的交换通量。结果表明, 该区域表层海水 DIC、HCO₃⁻、CO₃²⁻ 及 CO₂ 的年平均浓度分别为 2 024.8±147.0、1 842.4±132.1、170.0±42.8 和 12.4±2.5 μmol/L。养殖区与非养殖区之间 DIC、HCO₃⁻ 浓度差异不显著($P > 0.05$), 而 CO₂ 浓度差异极显著($P < 0.01$)。表层海水 $p\text{CO}_2$ 和海-气界面 CO₂ 的交换通量的年平均均值分别为 287.8±37.9 μatm 和 -32.7±17.2 mmol/m²·d, 养殖区与非养殖区之间、不同季节之间均差异极显著($P < 0.01$)。大型藻类的养殖活动有利于海洋对大气 CO₂ 的吸收。

关键词 溶解无机碳 $p\text{CO}_2$ 交换通量 大型藻类

中图分类号 X55;S968.31 文献标识码 A 文章编号 1000-7075(2013)01-0050-07

Estimation of sea-air CO₂ flux in seaweed aquaculture area, Lidao Bay

JIANG Zeng-jie FANG Jian-guang HAN Ting-ting
LI Jia-qi MAO Yu-ze WANG Wei

(Key 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 In order to assess the effect of seaweed aquaculture on sea-air CO₂ flux, a large-scale seaweed aquaculture area which is located in Lidao Bay, was selected as the investigation area. Based on the investigation data of pH, total alkalinity (TA), Chl-a, etc. during four cruises from April 2011 to January 2012, the spatial and seasonal variations of dissolved inorganic carbon (DIC) system parameters and aqueous $p\text{CO}_2$ were investigated. Results showed that the mean annual concentrations of DIC, HCO₃⁻, CO₃²⁻ and CO₂ were 2 024.8±147.0 μmol/L, 1 842.4±132.1 μmol/L, 170.0±42.8 μmol/L and 12.4±2.5 μmol/L, respectively. There were no significant differences between areas in concentrations of DIC and HCO₃⁻ ($P > 0.05$), while the differences for the concentration of CO₂ were highly significant ($P < 0.01$). The mean annual values of aqueous $p\text{CO}_2$ and sea-air CO₂ flux were 287.8±37.9 μatm and -32.7±17.2 μmol/m²·d, respectively. There were highly significant differences ($P < 0.01$) for aqueous $p\text{CO}_2$ and sea-air CO₂ flux not only between different areas, but also between different seasons. Seaweed aquaculture is helpful for the diffusion of CO₂ across the sea-air interface.

KEY WORDS DIC system $p\text{CO}_2$ Sea-air flux Seaweed

20 世纪以来,人类面临着一系列重大而紧迫的全球性环境问题,其中,“温室效应”与全球变暖,是大家最为关注的重大问题之一。全球变暖的根源主要在于人类对石油、煤炭、天然气等化石燃料的过度开发利用,使本该被长期封存在岩石圈中的有机碳被转换成 CO₂ 进入了大气圈(IPCC 2007)。通过海气界面交换,每年都有大量的 CO₂ 从大气圈进入了海洋,研究表明,人类活动每年排放的 CO₂ 以碳计为 55 亿 t,其中海洋吸收了人类排放 CO₂ 总量的 30%~50%(Siegenthaler *et al.* 1993),因此,海洋对缓解全球气候变化做出了巨大贡献,海洋碳循环是全球碳循环过程中最关键的一个环节(Battle *et al.* 2000;殷建平等 2006)。作为海洋碳循环的关键生物地球化学过程之一,海-气界面 CO₂ 交换通量的研究是认识 CO₂ 在海水中转移与归宿的基础(李 宁等 2005)。目前,有关海-气界面 CO₂ 交换通量的研究主要集中在外海及一些内湾非养殖水域(Broatrom 2000;谭 燕等 2004;Abdirahman *et al.* 2007;Urbain *et al.* 2010;刘启珍等 2010),随着“碳汇渔业”理念的提出以及相关研究的不断深入,海水养殖大型藻类在固碳方面的作用引起了学者们的密切关注(张继红等 2005),但到目前为止,有关大型藻类养殖水域海-气界面 CO₂ 交换通量的研究尚未见报道。本研究根据 2011 年 4 月~2012 年 1 月 4 个航次对俚岛湾规模化大型藻类养殖水域的大面调查数据,分析了大型藻类养殖区海水碳酸盐体系的季节变化,估算了海-气界面 CO₂ 的交换通量,研究结果对于认识规模化大型藻类养殖海区 CO₂ 源汇格局的季节变化、理解养殖生态系统碳的生物地球化学循环过程具有重要的科学意义。

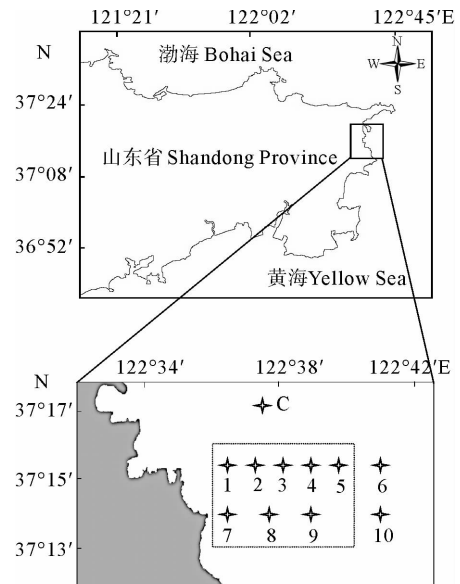
1 材料与方 法

1.1 调查区域概况

调查区域位于山东省荣成市俚岛镇养殖水域(37°13'~37°16'N, 122°35'~122°41'E),俚岛镇是我国著名的海带养殖大镇,拥有海带养殖面积近 6 667hm²,2009 年鲜海带产量达 70 多万 t,是我国最大的海带产业研发、生产、集散中心。为充分利用养殖设施、降低生产成本、提高单位水体的经济效益,目前该区域采用海带 *Laminaria japonica* 与龙须菜 *Gracilaria lemaneiformis* 轮养的养殖策略,即在海带收获后利用海带养殖设施轮养龙须菜,经济效益显著。

1.2 站位设置及研究方法

2011 年 4、8、10 月和 2012 年 1 月 4 个航次在俚岛湾设置 11 个站位进行调查(图 1),其中,1~5 和 7~9 号站位位于藻类养殖区内,6 号和 10 号位于非养殖区,C 站位作为非养殖区的对照区。利用德国 HYDRO-BIOS 公司 Ruttner 水样采集器采集表层(水下 0.5 m)水样,迅速导入 500 ml 磨口玻璃瓶,保存在 4 °C 冷藏样品盒中备用。利用美国 Thermo Scientific Orion 精密型便携式 pH 计(相对精度±0.01)现场测定 pH(NBS 标度),美国 YSI Professional Plus 便携式水质分析仪测定表层水温(SST)、盐度(S)、溶解氧(DO)。总碱度(TA)的测定采用瑞士万通 Metrohm 848 Titrino plus 自动电位滴定仪,测量精度±5 mmol/L。叶绿素 a 含量测定采用日本 ALEC ACLW 叶绿素浊度测定仪,相对精度±0.1 μg/L,并与经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后丙酮萃取法获得的叶绿素 a 含量相互校正。根据 pH、总碱度、温度和盐度计算海水中无机碳体系各分量的浓度和 pCO₂(Prieto *et al.* 2002)。



1~5 和 7~9 号站位位于养殖区内,6 号和 10 号位于非养殖区。
C 站位作为非养殖区的对照区
Station 1~5 and 7~9 located in the seaweed area, Station 6 and 10 located in the control area. Station C is designed as the comparison station with Station 6 and 10

图 1 研究区域及站位设置

Fig. 1 Location of the study area and station design

海-气界面 CO_2 交换通量采用公式 $F = k \times \alpha_s \times \Delta p\text{CO}_2$ 进行估算。其中, F 为海-气界面 CO_2 交换通量 ($\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$), 若 F 为负值, 则此区域为大气 CO_2 的汇, 即大气中的 CO_2 溶入到海水中, 若 F 为正值, 则此区域为 CO_2 的源, 海水中的 CO_2 向大气释放; k 是海-气界面气体传输速度 (cm/h); α_s 为 CO_2 在海水中的溶解度系数 ($\text{mol}/\text{kg} \cdot \text{atm}$), 是与温度和盐度相关的函数, 参照 Weiss(1974)公式计算得到, K 为热力学温度, $T(\text{K}) = 273.15 + t(^{\circ}\text{C})$; $\Delta p\text{CO}_2$ 是海水和大气中 $p\text{CO}_2$ 的差值。本研究中大气 $p\text{CO}_2$ 取值为 $361 \mu\text{atm}$, 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; 宋金明 2004)。

利用同质缓冲系数 (Homogeneous buffer factor) β 来分析水体中无机碳、有机碳代谢份额, 计算公式为:

$$\beta = \left(\frac{\Delta p\text{CO}_2}{p\text{CO}_2} \right) \left(\frac{\Delta \text{DIC}}{\text{DIC}} \right)^{-1} = \frac{d\ln(p\text{CO}_2)}{d\ln(\text{DIC})}$$

当溶解 CO_2 是影响无机碳浓度变化的唯一因素时, β 值约为 12; 当 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 H_3O^+ 均参与生物地球化学循环过程中时, β 值会存在相应变化。Frankignoulle(1994)的研究结果表明, 当有机碳代谢(光合、呼吸作用)和无机碳代谢(钙化、溶解作用)同时影响水体无机碳体系时, 可以利用公式 $\beta = -7.02 + 0.186 \times \%C_{org}$ ($r^2 = 0.9994$) 对有机碳、无机碳代谢所占的比例进行估算, 式中, $\%C_{org}$ 表示有机碳代谢所占的比例 (Frankignoulle 1994)。

差异显著性检验及相关性分析采用 SPSS 10.0 软件, 根据方差齐次性检验结果, 选择多重比较方法(当方差齐次性时, 选择“Tukey’s HSD”, 当方差不具有齐次性时选择“Tamhane’s T2”), 等值线的绘制采用 Surfer 7.0 软件。

2 结果

2.1 表层海水溶解无机碳体系的季节变化

俚岛湾养殖水域表层海水 DIC 浓度及各分量浓度见表 1。结果表明, DIC 浓度年变化范围为 $1766.9 \sim 2282.8 \mu\text{mol}/\text{L}$, 平均值为 $2024.8 \pm 147.0 \mu\text{mol}/\text{L}$, 养殖区和非养殖区平均值分别为 2016.1 ± 140.9 和 $2062.3 \pm 119.7 \mu\text{mol}/\text{L}$; HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 CO_2 年平均值分别为 1842.4 ± 132.1 、 170.0 ± 42.8 、 $12.4 \pm 2.5 \mu\text{mol}/\text{L}$, 养殖区和非养殖区 HCO_3^- 和 CO_2 的平均浓度分别为 1831.8 ± 129.0 、 $1883.8 \pm 128.3 \mu\text{mol}/\text{L}$ 和 11.5 ± 2.5 、 $13.4 \pm 3.4 \mu\text{mol}/\text{L}$ 。双因素方差分析结果表明, 养殖区和非养殖区之间水体 DIC 和 HCO_3^- 浓度差异不显著 ($P > 0.05$), 而 CO_2 浓度差异极显著 ($P < 0.01$), 所有变量不同季节之间差异均极显著 ($P < 0.01$) (表 2)。C 站位 DIC 浓度及各分量浓度与非养殖区差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 1 不同季节表层海水无机碳体系各分量浓度 (Mean \pm SD, $\mu\text{mol}/\text{L}$)

Table 1 DIC concentration and its component forms in different season (Mean \pm SD, $\mu\text{mol}/\text{L}$)

季节 Season	区域 Area	DIC	HCO_3^-	CO_3^{2-}	CO_2
春季 Spring	藻类养殖区 Seaweed area	1969.4 ± 128.3	1823.0 ± 121.6	132.7 ± 14.3	13.7 ± 1.7
	非养殖区 Control area	2070.9 ± 24.3	1932.2 ± 24.7	122.1 ± 0.9	16.6 ± 0.5
	C 站位 Station C	2088.1 ± 12.0	1949.7 ± 11.2	121.5 ± 0.5	16.9 ± 0.7
夏季 Summer	藻类养殖区 Seaweed area	2221.3 ± 59.0	1984.4 ± 50.9	225.6 ± 15.2	11.3 ± 0.7
	非养殖区 Control area	2189.0 ± 27.6	1966.4 ± 20.3	210.7 ± 7.4	11.9 ± 0.1
	C 站位 Station C	2169.5 ± 24.4	1952.1 ± 15.3	205.5 ± 9.5	12.0 ± 0.3
秋季 Autumn	藻类养殖区 Seaweed area	1909.3 ± 50.9	1704.1 ± 47.5	195.7 ± 7.7	9.5 ± 0.5
	非养殖区 Control area	1887.8 ± 52.2	1679.8 ± 44.2	199.0 ± 7.8	9.0 ± 0.1
	C 站位 Station C	1851.0 ± 37.0	1648.5 ± 20.5	193.4 ± 4.3	9.0 ± 0.4
冬季 Winter	藻类养殖区 Seaweed area	2084.4 ± 21.5	1935.8 ± 22.5	133.3 ± 5.8	15.3 ± 0.9
	非养殖区 Control area	2101.6 ± 1.5	1956.7 ± 0.0	128.7 ± 1.7	16.2 ± 0.2
	C 站位 Station C	2102.7 ± 3.7	1956.8 ± 1.7	129.9 ± 2.3	16.1 ± 0.2

表 2 不同季节海水 CO₂ 体系各变量差异显著性的双因素方差分析Table 2 Two-way ANOVA tests of CO₂ system for all the sampling seasons

变量 Variables	变异来源 Source of variability	F	df	P	变量 Variables	变异来源 Source of variability	F	df	P
DIC	季节 Season	20.557	3	0.000**	CO ₃ ²⁻	季节 Season	114.463	3	0.000**
	区域 Area	0.329	1	0.571		区域 Area	2.402	1	0.131
	季节 * 区域 Season * Area	1.143	3	0.346		季节 * 区域 Season * Area	0.834	3	0.485
HCO ₃ ⁻	季节 Season	23.049	3	0.000**	CO ₂	季节 Season	59.586	3	0.000**
	区域 Area	0.687	1	0.413		区域 Area	6.036	1	0.020**
	季节 * 区域 Season * Area	1.345	3	0.277		季节 * 区域 Season * Area	2.857	3	0.052

注: * 表示差异显著 $P < 0.05$ ** 表示差异极显著 $P < 0.01$

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

2.2 表层海水 pCO₂ 及海-气界面 CO₂ 交换通量的时空变化

该区域表层海水 pCO₂ 的年变化范围为 207.9 ~ 352.9 μatm, 平均值为 287.8 ± 37.9 μatm (表 3)。

表 3 不同季节表层海水 pCO₂ (Mean ± SD, μatm)Table 3 pCO₂ of surface seawater in different season (Mean ± SD, μatm)

季节 Season	区域 Area	pCO ₂ (μatm)	范围 Range (μatm)	季节 Season	区域 Area	pCO ₂ (μatm)	范围 Range (μatm)
春季 Spring	藻类养殖区 Seaweed area	267.7 ± 31.6	207.9 ~ 307.9	秋季 Autumn	藻类养殖区 Seaweed area	264.7 ± 13.1	245.1 ~ 277.4
	非养殖区 Control area	318.8 ± 9.0	312.4 ~ 325.2		非养殖区 Control area	255.3 ± 3.4	252.9 ~ 257.7
夏季 Summer	藻类养殖区 Seaweed area	328.3 ± 20.9	293.8 ~ 352.9	冬季 Winter	藻类养殖区 Seaweed area	285.2 ± 16.3	262.6 ~ 310.0
	非养殖区 Control area	350.2 ± 3.0	348.1 ~ 352.4		非养殖区 Control area	304.7 ± 5.1	301.0 ~ 308.3

不同季节表层海水 pCO₂ 的平面分布特征见图 2。从图 2 中可以看出,春、夏季表层海水 pCO₂ 平面分布表现为由近岸向外海递增,秋季呈现辐射扩散趋势,最低值出现在中部区域,最高值出现在近岸,冬季表现为由近岸向外海递增,但在中部区域形成高值区。该区域海-气界面 CO₂ 交换通量在 -66.4 ~ -2.9 mmol/m² · d 之间,平均值为 -32.7 ± 17.2 mmol/m² · d,养殖区与非养殖区分别为 -34.9 ± 17.5 和 -24.2 ± 14.1 mmol/m² · d (图 3)。

双因素方差分析结果表明,海-气界面 CO₂ 交换通量无论是不同季节之间,还是不同区域之间均存在极显著的差异 ($P < 0.01$),但季节和区域二者的交互作用不显著 ($P > 0.05$) (表 4)。进一步 Tukey HSD 多重比较结果表明,夏季与春、秋、冬季之间差异极显著 ($P < 0.01$) (表 5)。

2.3 海气界面 CO₂ 交换通量与水环境因子的相关性分析

CO₂ 交换通量与水环境因子的相关关系见表 6。从全年的尺度来看,CO₂ 交换通量与表层水温、DIC、Chl-a 均呈现极显著的正相关,而与 pH 和溶解氧呈现极显著的负相关。从不同季节来看,春季, DIC 和 pH 是影响 CO₂ 交换通量的关键因子, pH、表层水温分别是秋、冬季的关键影响因子,夏季 CO₂ 交换通量与表层水温、pH 和溶解氧存在极显著的负相关,而与 DIC 和 Chl-a 极显著正相关。

养殖区和非养殖区的同质缓冲系数 β 值分别为 5.305 和 1.237 (图 4),表明大型藻类、浮游植物、浮游动物等生物的生理活动(光合作用、呼吸作用、钙化过程等)均参与了水体中碳的地球化学循环过程,养殖区和非养殖区 %C_{inorganic} : %C_{organic} 分别为 1 : 1.84 和 1 : 0.80,养殖区的有机碳代谢份额(约占 64.81%)强于非养殖区(约占 44.39%)。

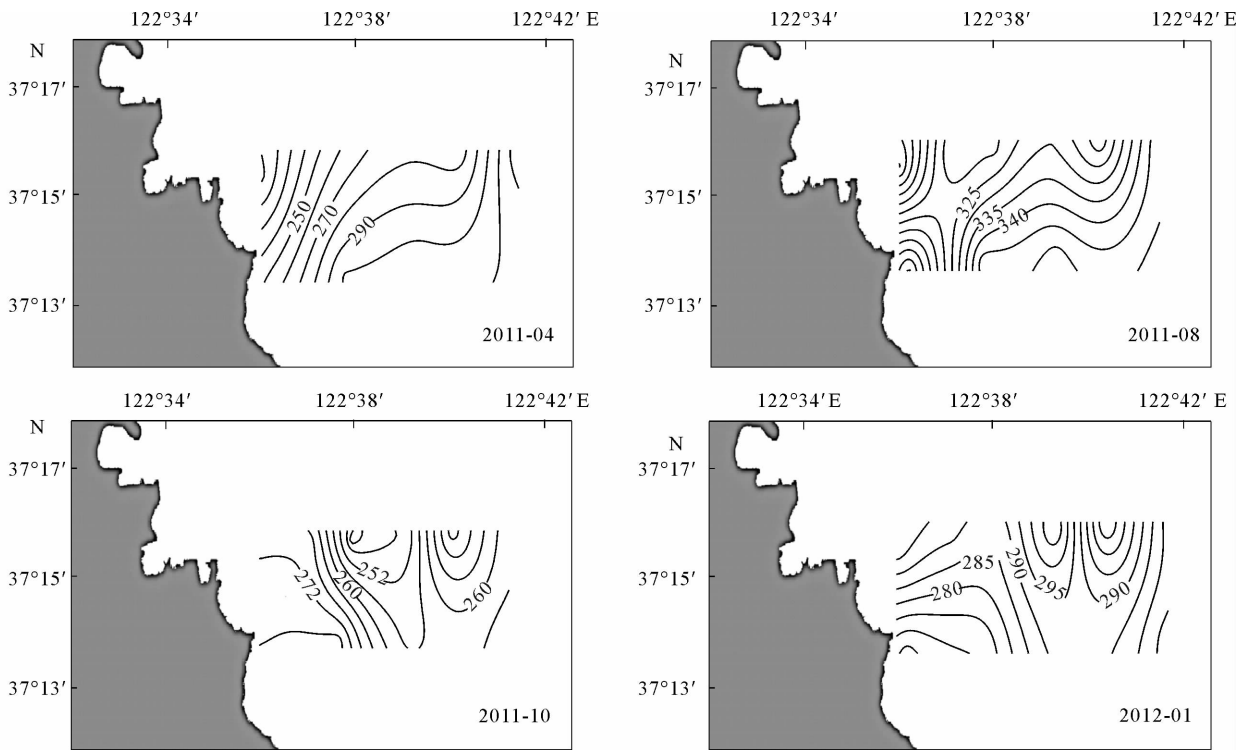


图2 不同季节表层海水 $p\text{CO}_2$ 平面分布

Fig. 2 Horizontal distribution of sea surface $p\text{CO}_2$ in different season

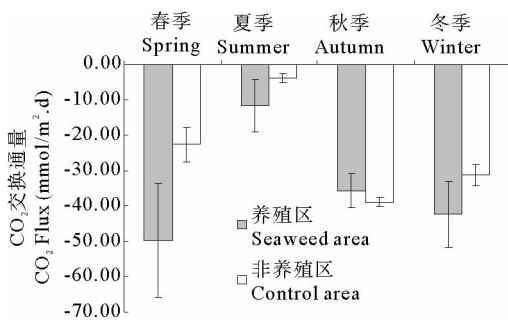


图3 不同区域海-气界面 CO_2 交换通量的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of sea-air CO_2 flux in seaweed and control area

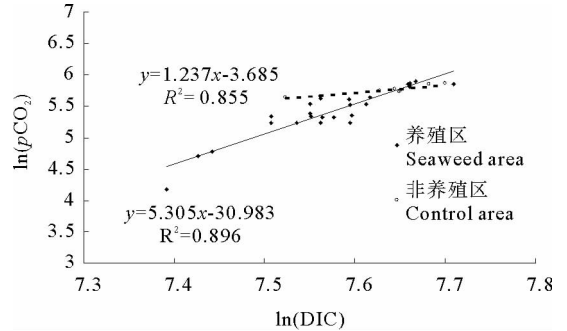


图4 $\ln(p\text{CO}_2)$ 与 $\ln(\text{DIC})$ 的相关关系

Fig. 4 Plots of $\ln(p\text{CO}_2)$ versus $\ln(\text{DIC})$ in aquaculture area

表4 不同季节海-气界面 CO_2 交换通量差异显著性的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA tests of sea-air CO_2 flux for all the sampling seasons

变量 Variable	变异来源 Source of variability	F	df	p
CO_2 交换通量 CO_2 Flux	季节 Season	14.419	3	0.000**
	区域 Area	7.802	1	0.009**
	季节-区域 Season-Area	2.635	3	0.067

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

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

表5 海-气界面 CO_2 交换通量季节差异显著性的 Tukey HSD 多重比较

Table 5 Post Hoc Tukey HSD tests for the seasonal data of sea-air CO_2 flux

变量 Variable	变异来源 Source of variability	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
CO_2 交换通量 CO_2 Flux	春季 Spring	0.000**	0.277	0.782
	夏季 Summer		0.000**	0.000**
	秋季 Autumn			0.811

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

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

表 6 CO₂ 交换通量与水环境因子的相关关系Table 6 Pearson correlation coefficients between CO₂ sea-air flux and the environmental factor

季节 Season	变异来源 Source of variability	表层水温 SST	pH	DIC	叶绿素 a Chl-a	溶解氧 DO
全年 The whole year	CO ₂ 交换通量 CO ₂ flux	0.658 **	-0.638 **	0.671 **	0.721 **	-0.688 **
春季 Spring	CO ₂ 交换通量 CO ₂ flux	-0.492	-0.716 **	0.691 **	0.187	-0.322
夏季 Summer	CO ₂ 交换通量 CO ₂ flux	-0.876 **	-0.997 **	0.888 **	0.833 **	-0.897 **
秋季 Autumn	CO ₂ 交换通量 CO ₂ flux	-0.413	-0.860 **	0.543	0.355	-0.472
冬季 Winter	CO ₂ 交换通量 CO ₂ flux	0.435 **	-0.964	0.553	0.234	-0.466

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

Notes: * means significant correlation, $P < 0.05$; ** means highly significant correlation, $P < 0.01$

3 讨论

大型海藻的光合固碳是构成海域初级生产力的基础之一,在海洋碳循环中起着至关重要的作用(杨宇峰等 2005)。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,导致水体的 $p\text{CO}_2$ 降低,造成了海洋-大气界面的 $p\text{CO}_2$ 差,促进了大气 CO₂ 向海水中扩散(邹定辉等 2002)。本研究结果表明,俚岛湾大型藻类养殖水域海-气界面 CO₂ 交换通量年平均值为 $-32.7 \pm 17.2 \text{ mmol/m}^2 \cdot \text{d}$,变动范围为 $-66.4 \sim -2.9 \text{ mmol/m}^2 \cdot \text{d}$,4 个季节均表现为大气 CO₂ 的汇,且 CO₂ 汇强度强于东海、胶州湾(Zhai *et al.* 2009; Li *et al.* 2007)。从养殖区与非养殖区交换通量的比较来看,养殖区海-气界面的 CO₂ 交换通量显著强于非养殖区,虽然目前的数据尚不能准确量化光合、呼吸和钙化作用对海-气界面 CO₂ 交换通量的贡献度,但在浮游植物现存量(Chla 表征)没有显著差异且养殖区有机碳代谢份额高于非养殖区近 20% 的数据支撑条件下,有理由认为,养殖区海-气界面较强烈的 CO₂ 交换是由大型藻类的光合作用造成的,养殖区与非养殖区 CO₂ 浓度存在极显著性差异也佐证了这一点。从养殖区不同季节海-气界面 CO₂ 交换通量来看,夏季养殖区水体对 CO₂ 的吸收能力显著弱于秋、冬及春季,这与大型藻类的生物量有关(夏季,大部分海带已经收获完毕,而龙须菜刚开始养殖,海区大型藻类的生物量是全年最低的时期)。

在自然海水中,由于较高的 pH(8.0~8.2),CO₂ 浓度不到总 DIC 的 1%,而且 CO₂ 在海水中的扩散速率要比在空气中慢 10 000 倍,而大型海藻 Rubisco 的 $K_m(\text{CO}_2)$ 为 30~70 mmol/L(Kerby *et al.* 1985),远远高于外界海水中的 CO₂ 浓度,所以大型海藻可能会面临 CO₂ 缺乏(Raven *et al.* 1990)。因此,许多海藻在长期的进化过程中具备了利用海水中 HCO₃⁻ 作为光合作用外源无机碳源的能力(Larsson *et al.* 1999; 邹定辉等 2001)。大量的研究表明,绿藻(石莼、肠浒苔、礁膜等)、红藻(红毛菜、细基江篱、龙须菜等)等大型藻类(Haglund *et al.* 1992; Axelsson *et al.* 1995; Stephen *et al.* 2002; 田其然 2007)均能够利用 HCO₃⁻ 作为光合作用无机碳源。但从本研究结果来看,养殖区与非养殖区的 HCO₃⁻ 浓度并没有显著性的差异,其中的原因尚有待于进一步探讨。

海-气界面 CO₂ 分压差法是目前估算海-气界面 CO₂ 通量较常用的方法(徐永福等 2004),该方法涉及到两个主要参数,一个是大气和海水中的 $p\text{CO}_2$ 差,另一个是海气交换系数 k 。本研究通过对比大型藻类养殖区与非养殖区 CO₂ 交换通量的差异,分析了大型藻类生理活动对 CO₂ 交换通量的影响,但 CO₂ 交换通量的估算过程可能存在误差:如海水 $p\text{CO}_2$ 是基于 pH 和 TA 两个参数通过化学平衡法计算获得,由于观测手段限制, DIC、 $p\text{CO}_2$ 两个参数没有进行测定,因此,计算获得的数值会存在一定的误差。有研究表明,采用不同的热力学常数表达式能够导致计算所得的 $p\text{CO}_2$ 值的差达到 3Pa(Lee *et al.* 2000)。此外,由于人类活动的影响,养殖海湾大气 CO₂ 浓度可能要不同于全球大气平均 CO₂ 浓度,使用 361 μatm 的经验值来估算 CO₂ 交换通量也会给估算结果带来偏差。气体交换系数 k ,即 CO₂ 在海-气界面的传输速率,涉及到 CO₂ 在海-气界面迁移交换这个非常复杂的动力学过程,比如表层水温、盐度、碎浪作用、气泡作用、上升流、生物活动、海表风速、大气边界

层性质等都对其有重要影响(Bock *et al.*, 1999; Wanninkhof *et al.*, 2009)。由于观测条件及技术手段所限,本研究中 k 值只是简单采用大陆架海区的平均值 10.3, 经验值的使用势必会对交换通量的估算带来误差。因此,针对特定海区进行 k 值的准确测定以及海水与大气 $p\text{CO}_2$ 的同步测定是后续研究中进行 CO_2 交换通量估算的关键环节。此外,本研究在数据应用上主要局限在化学参数,尚需与其他数据,如浮游生物尤其是钙化生物的种类组成、分布、生物量等相结合,才能更加深入地揭示规模化大型藻类养殖区海-气界面 CO_2 交换通量的控制机制。

参 考 文 献

- 田其然. 2007. 经济红藻红毛菜的生物学特性研究. 见: 汕头大学硕士研究生学位论文
- 刘启珍, 张龙军, 薛明. 2010. 胶州湾秋季表层海水 $p\text{CO}_2$ 分布及水-气界面通量. 中国海洋大学学报, 40(10): 127-132
- 李 宁, 李学刚, 宋金明. 2005. 海洋碳循环研究的关键生物地球化学过程. 海洋环境科学, 24(2): 75-80
- 杨宇峰, 宋金明, 林小涛, 聂湘平. 2000. 大型海藻栽培及其在近海环境的生态作用. 海洋环境科学, 24(3): 77-80
- 宋金明. 2004. 中国近海生物地球化学. 济南: 山东科技出版社, 1-591
- 邹定辉, 高坤山. 2001. 大型海藻类光合无机碳利用研究进展. 海洋通报, 20(5): 83-90
- 邹定辉, 高坤山. 2002. 高 CO_2 浓度对大型海藻光合作用及有关过程的影响. 生态学报, 22(10): 1750-1757
- 徐永福, 赵 亮, 浦一芬, 李阳春. 2004. 二氧化碳海气交换通量估计的不确定性. 地学前沿, 11(2): 565-571
- 殷建平, 王友绍, 徐继荣, 孙 松. 2006. 海洋碳循环研究进展. 生态学报, 26(2): 566-575
- 谭 燕, 张龙军, 王 凡, 胡敦欣. 2004. 夏季东海西部表层海水中的 $p\text{CO}_2$ 及海-气界面通量. 海洋与湖沼, 35(3): 241-244
- 张继红, 方建光, 唐启升. 2005. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献. 地球科学进展, 20(3): 359-365
- Abdirahman MO, Truls J, Are O, *et al.* 2007. Seasonal and interannual variability of the air-sea CO_2 flux in the Atlantic sector of the Barents Sea. Marine Chemistry 104: 203-213
- Axelsson L, Ryberg H, Beer S. 1995. Two modes of bicarbonate utilization in the marine green macroalgae *Ulva lactuca*. Plant Cell Environment 18: 439-445
- Battle M, Bender ML, Tans PP and 4 others. 2000. Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O_2 and ^{13}C . Science 287: 2467-2470
- Bock EJ, Hara T, Nelson MF, McGillis WR. 1999. Relationship between air-sea gas transfer and short wind waves. Journal of Geophysical Research 104: 821-825, 831
- Brostrom G. 2000. The rate of the annual cycles for the air-sea exchange of CO_2 . Marine Chemistry 72: 151-169
- Frankignoulle M. 1994. A complete set of buffer factors for acid/base CO_2 system in seawater. Journal of Marine Systems 5: 111-118
- Haglund K, Bjork M, Ramazanov Z, *et al.* 1992. Role of external carbonic anhydrase in photosynthesis and inorganic carbon assimilation in the red alga *Gracilaria tenuistipitata*. Planta 187: 275-281
- IPCC. 2007. 气候变化 2007: 综合报告. 政府间气候变化专门委员会第四次评估报告第一、第二和第三工作组的报告[核心撰写组 Pahauri R K & Reisinger A(编辑)]. IPCC, 瑞士, 日内瓦
- Kerby NW, Raven JA. 1985. Transport and fixation of inorganic carbon by marine algae. Adv Bot Res 11: 71-123
- Larsson C, Axelsson L. 1999. Bicarbonate uptake and utilization in marine macroalgae. Eur J Phycol 34: 79-86
- Lee K, Millero FJ, Byrne RH and 2 others. 2000. The recommended dissociation constants for carbonic acid in seawater. Geophys Res Letters 27: 229-232
- Li XG, Song JM, Niu LE and 3 others. 2007. Role of the Jiaozhou Bay as a source/ sink of CO_2 over a seasonal cycle. Scientia Marina 71(3): 441-450
- Prieto FJM, Miller OFJ. 2002. The values of $pK_1 + pK_2$ for the dissociation of carbonic acid in seawater. Geochimica et Cosmochimica Acta 66: 2529-2540
- Raven JA, Johnston AM, Macfarlane JJ. 1990. Carbon metabolism. In KM Cole, RG Sheath, eds, Biology of the Red Algae. Cambridge University Press, Cambridge 171-202
- Siegenthaler U, Sarmiento JI. 1993. Atmospheric carbon dioxide and the ocean. Nature 365: 119-125
- Stephen CM, Tom VM. 2002. Use of bicarbonate ions as a source of carbon in photosynthesis by *Callitriche hermaphrodita*. Aquatic Botany 73: 1-7
- Tsunogai S, Watanabe S, Sato T. 1999. Is there a "continental shelf pump" for the absorption of atmospheric CO_2 ? Tellus B, 51: 701-712
- Urbain K, Nathalie L, Georges K, *et al.* 2010. Surface CO_2 parameters and air-sea CO_2 flux distribution in the eastern equatorial Atlantic Ocean. Journal of Marine Systems (82): 135-144
- Wanninkhof R, Asher EWE, Ho DT and 2 others. 2009. Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing. Annual Review of Marine Science 1: 213-244
- Weiss RF. 1974. Carbon dioxide in water and seawater; the solubility of a non-ideal gas. Mar Chem 2: 203-215
- Zhai WD, Dai MH. 2009. On the seasonal variation of air-sea CO_2 fluxes in the outer Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea. Mar Chem 117(1-4): 2-10