

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16300

桑沟湾表层水春夏两季二氧化碳分压变化和影响因素

刘毅^{1,2}, 蔺凡¹, 吴文广¹, 武宁宁⁴, 张义涛³, 王巍¹, 李敏^{1,5}, 张继红^{1,2}

1. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 农业部海洋渔业资源可持续发展重点实验室, 山东 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, 山东 青岛 266071;
3. 荣成东楮岛海洋科技有限公司, 山东 威海 264200;
4. 青岛市渔业技术推广站, 山东 青岛 266071;
5. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306

摘要: 为研究季节变化和养殖活动对桑沟湾表层海水二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)的影响, 尤其是海带(*Saccharina japonica*)养殖活动对表层水 $p\text{CO}_2$ 的影响, 本研究分别在海带收获前(2015年5月)、后(2015年8月)采用走航式二氧化碳分压仪对中国北方典型的贝藻筏式养殖海域——桑沟湾养殖区表层水 $p\text{CO}_2$ 及有关环境参数进行了大面调查, 探讨了季节、养殖模式以及海带收获前、后表层水 $p\text{CO}_2$ 的变化规律及影响因素。调查结果显示: (1)春夏两季桑沟湾湾内表层海水中 $p\text{CO}_2$ 的平均值分别为(346.78±13.85) μatm (1 atm=101325 Pa, 1 μatm =10⁻⁶ atm)和(351.50±8.00) μatm ; 湾外自然海域 $p\text{CO}_2$ 值分别为(353.42±0.71) μatm 和(358.05±2.01) μatm , 均小于大气中 $p\text{CO}_2$ 。(2) $p\text{CO}_2$ 的平面分布特性为: 由湾底向湾外递减并在外海空白区升高, 两个季节最低值都出现在海带养殖区, 最高值都出现在贝类养殖区。(3)春季表层海水 $p\text{CO}_2$ 与水温相关性不显著($P>0.05$), 而与叶绿素 a(Chl a)、溶解氧(DO)显著相关($P<0.05$), 反映了生命活动对 $p\text{CO}_2$ 影响较大; 夏季, 养殖海带已收获, 表层海水 $p\text{CO}_2$ 与水温、溶解无机碳(DIC)、Chl a、DO 显著相关($P<0.05$)。(4)桑沟湾养殖区以及外海自然海域表层水 $p\text{CO}_2$ 都低于大气中 $p\text{CO}_2$, 表现为二氧化碳(CO_2)的汇区。藻类养殖区表层水 $p\text{CO}_2$ 远低于自然海域, 表现为 CO_2 的强汇区; 贝类养殖区表层水 $p\text{CO}_2$ 略高于自然海域, 表现为 CO_2 的弱汇区, 贝藻混养区则介于二者之间。春季海带的光合作用是影响表层水 $p\text{CO}_2$ 的主要因素之一, 养殖活动对海区表层水 $p\text{CO}_2$ 的影响使得桑沟湾 $p\text{CO}_2$ 表现出不同于自然海域的特性。夏季养殖活动减少导致物理因素的影响开始显现。

关键词: 桑沟湾; 二氧化碳分压; 海水养殖; 春夏季

中图分类号: S913

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)05-1107-08

近年来, 全球变暖已成为人类最为关注的环境问题, 全球变暖所带来的冰川融化、海平面上升、气候反常等现象是国际社会以及人类生存所面临的最为严峻的挑战之一^[1]。工业革命之后, 人为排放的大量二氧化碳(CO_2)气体是造成全球变暖的主要原因, 如何有效地减排增汇是控制全球变暖、改善气候条件的重要手段。作为覆盖地球表面 70%的海洋, 每年可以吸收约 1/3 人类活动向大气所排放的碳^[2]。海洋对 CO_2 的吸收可以有

效降低大气中 CO_2 的浓度, 为缓解全球气候变暖作出了巨大贡献。海洋碳循环过程, 在一定程度上会影响全球气候的变化, 同时也是海洋生态系统持续发展和环境变化的基础。 CO_2 在海-气界面的转移这一生物化学过程是关键性的海洋碳循环过程, 研究表层海水中二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)大小, 是认识 CO_2 在海水中转移与归宿的基础^[3-5]。自中国学者率先提出碳汇渔业的概念以来, 作为海洋中的初级生产者——藻类, 在固碳方面的作用

收稿日期: 2016-10-13; 修订日期: 2016-12-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41276172); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2014A01YY01).

作者简介: 刘毅(1985-), 男, 助理工程师, 硕士, 从事水域生态学研究. E-mail: liuyi@ysfri.ac.cn

通信作者: 张继红, 研究员, 从事养殖生态学研究. E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

也引起了学者们的密切关注^[6-9]。

目前,有关表层水中 $p\text{CO}_2$ 的研究主要集中在大洋,仅有少量学者对养殖区之间的不同变化进行过研究^[10-11],而针对养殖模式和季节对表层水中 $p\text{CO}_2$ 的影响及其影响因素的研究鲜见报道。作为中国重要的多营养层次综合养殖模式基地的桑沟湾,其贝类和藻类的综合养殖模式已形成规模并逐步成熟,其中海带(*Saccharina japonica*)已成为桑沟湾水产养殖的支柱产业之一^[12]。研究海带等大型藻类及养殖模式对表层水中 $p\text{CO}_2$ 变化的影响,对于了解水产养殖活动对 CO_2 源汇格局变化的影响具有重要意义。本研究探讨了春夏两季桑沟湾养殖区表层水 $p\text{CO}_2$ 的变化和影响因素,

结合不同季节养殖活动的特点,了解养殖海带在浅海生态系统中的碳源/汇功能,可为渔业碳汇计量方法的建立提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 调查站位

2015年5月和8月对桑沟湾养殖海区进行了春夏两个航次的大面调查。调查站位及桑沟湾养殖布局情况如图1所示。共设置14个调查站位,每个调查航次都在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)。

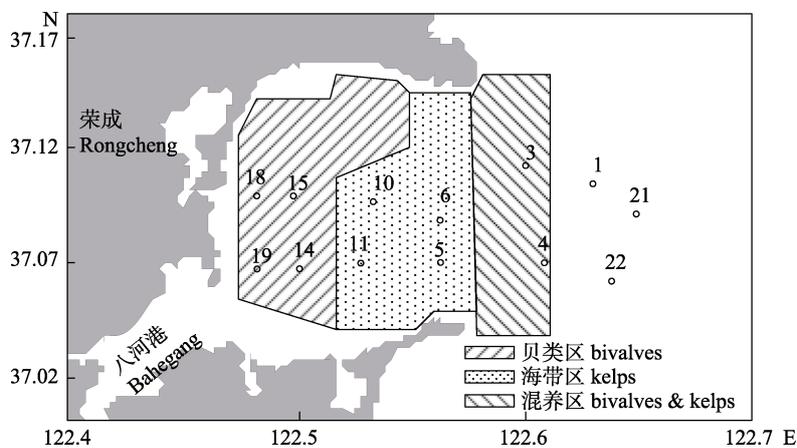


图1 桑沟湾养殖区域分布和调查站位

Fig. 1 Aquaculture area distribution and sampling stations in Sanggou Bay

1.2 调查参数与方法

样品均按《海洋监测规范》中的方法采集、处理和保存。现场使用美国 YSI-EXO2 型水质分析仪测定和读取溶解氧(DO)、温度(T)、pH(相对精度 ± 0.01)以及盐度(S)等指标。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,用于溶解无机碳浓度(DIC)的检测。醋酸纤维素膜和抽滤后的水样于 4°C 冷藏保存,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 848Titrino plus, Metrohm 公司,瑞士万通),测量精度 $\pm 0.01 \mu\text{mol/L}$ 。DIC 采用德国耶拿 multi N/C

总有机碳分析仪测得,表层水 $p\text{CO}_2$ 由德国 Csubtech 公司的 OceanPack 走航仪测定。

1.3 数据分析方法

实验数据采用 SPSS17.0 进行统计学分析,ANOVA 方差分析检验组间差异,独立样本 T 检验分析同一个养殖区在不同季节条件下的差异,Pearson 相关分析和双侧显著性检验表层水 $p\text{CO}_2$ 与环境因子回归关系的显著性,双因素方差分析环境因子在不同季节不同养殖区间的相关性。温度补偿采用 CO2SYS 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 各调查参数的季节变化

春季水温的变化趋势是沿湾底向湾外递减。

水温的最高值为 16.98℃(19#站), 最低值为 11.57℃(1#站), 最高温和最低温相差 5.41℃; 夏季水温的变化趋势与春季相同, 由湾底向湾外递减。最高值出现在离岸最近的 19#站, 为 26.23℃, 最低值出现在离岸最远的 21#站, 为 20.12℃, 最高值与最低值相差 6.11℃。春季盐度的变化幅度较小, 分布均匀, 最高值与最低值仅相差 0.71; 夏季盐度的变化趋势由湾底向湾外递增, 最高值与最低值相差 1.56。春季和夏季整个桑沟湾都处于溶解氧过饱和状态, DO 的变化趋势都由湾底向湾外递增。春季 pH 的变化范围为 7.47~8.45; 夏季 pH 的变化范围为 7.19~8.17, 与春季相同, pH

最低值出现在贝类养殖区, 最高值出现在藻类养殖区。详细数据参见表 1。

Chl a、TA、DIC 以及表层海水中 pCO_2 的变化如图 2 所示, Chl a 浓度夏季高于春季, 春季 Chl a 的浓度介于 0.14~1.41 $\mu\text{g/L}$, 平均值为(0.74±0.32) $\mu\text{g/L}$, 变化趋势由湾底侧向湾外递增, 并在外海空白区下降; 夏季 Chl a 的浓度介于 1.54~5.72 $\mu\text{g/L}$, 平均值为(3.24±1.43) $\mu\text{g/L}$, 变化趋势与春季一致, 从湾底向湾外先递增再递减。

春季 TA 的变化趋势也由湾底向湾外递增, 并在外海区开始降低, 变化幅度为 2251.50~2363.97 $\mu\text{mol/L}$; 夏季 TA 的变化幅度为 2157.28~

表 1 桑沟湾春夏季的环境因子
Tab. 1 The physical and chemical factors in spring and summer in Sanggou Bay

理化因子 physical and chemical factor	春季 spring		夏季 summer	
	平均值 average value	范围 range	平均值 average value	范围 range
表层水温/℃ SST	14.62±2.10	11.57–16.98	23.20±1.89	20.12–26.23
盐度 salinity	30.68±0.31	30.20–30.91	30.96±0.54	30.38–31.94
溶解氧/(mg·L ⁻¹) DO	8.62±0.52	8.06–9.71	7.99±0.41	7.01–8.63
pH	8.03±0.45	7.47–8.45	8.03±0.08	7.95–8.17

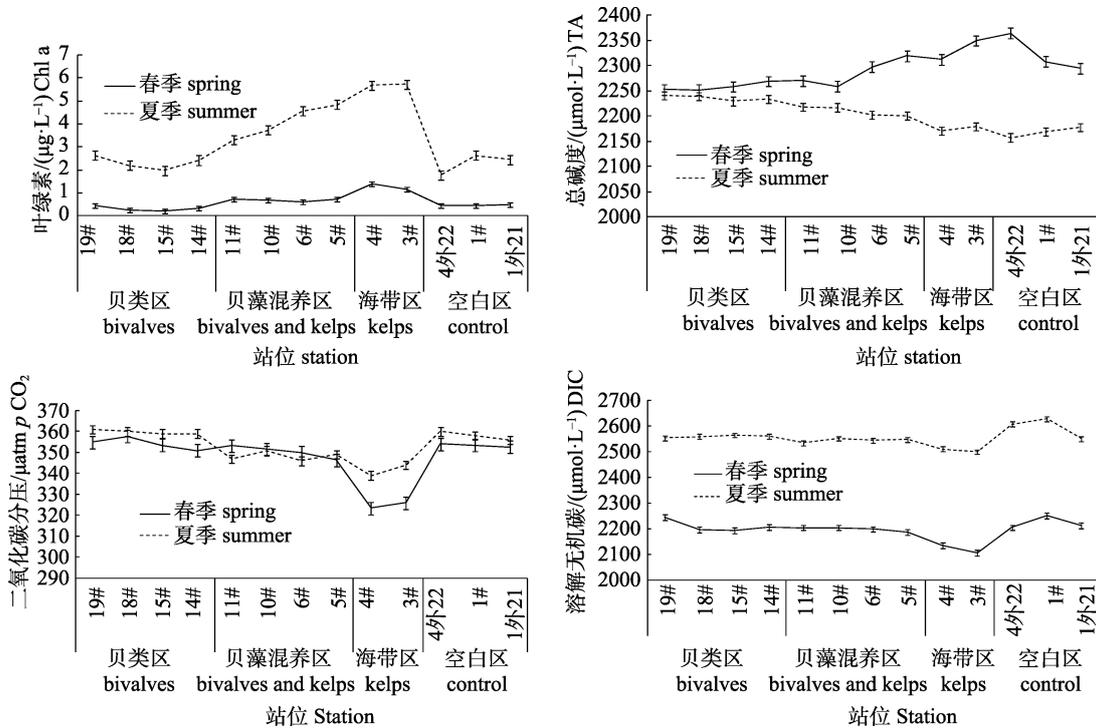


图 2 桑沟湾表层水叶绿素 a、总碱度、溶解无机碳浓度和二氧化碳分压

Fig. 2 Spatial distribution of Chl a, total alkalinity(TA), dissolved inorganic carbon concentration(DIC) and pCO_2 of surface water in Sanggou Bay

2250.07 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为(2206.01 \pm 30.93) $\mu\text{mol/L}$, 变化趋势由湾底向湾外递减。

夏季 DIC 显著高于春季, 春季 DIC 的浓度范围为 2105.62~2278.06 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为(2201.50 \pm 43.21) $\mu\text{mol/L}$, 整体变化趋势由湾底向湾外递减, 并在外海空白区有一个明显升高的趋势。其中, DIC 最低值出现在藻类养殖区的 3# 站位, 最高值出现在贝类养殖区的 15# 站位, DIC 高值区较低值区的含量高约 164 $\mu\text{mol/L}$ 。夏季 DIC 的浓度范围为 2500.79~2629.11 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为(2555.74 \pm 32.70) $\mu\text{mol/L}$, 在养殖区内平面分布较为均匀, 藻类养殖区略低, 网箱区和外海空白区有升高的趋势。

春、夏两季调查海区表层海水中 $p\text{CO}_2$ 的平面分布均呈现从湾底到湾外逐渐降低并在外海空白区出现升高的趋势, 最高值出现在贝类养殖区, 最低值出现在藻类养殖区。除贝藻混养区外, 其余各区夏季的表层海水 $p\text{CO}_2$ 均高于春季。

2.2 表层海水 $p\text{CO}_2$ 及环境因子的相关性分析

春季 DO 与 Chl a 无显著相关性, 夏季 DO 与 Chl a 显著正相关($P<0.01$)。春季 DIC 与温度和盐度无显著相关性, 夏季 DIC 与温度和盐度显著正相关。双因素方差分析结果表明, 不同的养殖区之间, Chl a 的差异不显著($P>0.05$), DO 差异显著

($P<0.05$), DIC、 $p\text{CO}_2$ 以及 pH 差异极显著($P<0.01$); 不同季节之间 pH 差异不显著($P>0.05$), DO 差异显著($P<0.05$), 其余变量差异均极显著($P<0.01$)(表 2)。各养殖区在不同季节条件下均差异显著($P<0.05$)。季节和养殖区交互作用不明显。

春夏两个季节表层海水 $p\text{CO}_2$ 与水环境因子的相关关系见表 3。春季 $p\text{CO}_2$ 与 DIC 成极显著正相关, 与 Chl a 成极显著负相关, 与 DO 成显著负相关, 即 DIC、Chl a 和 DO 是影响春季表层海水 $p\text{CO}_2$ 大小的关键因子; 夏季表层海水 $p\text{CO}_2$ 与水温、DIC 成显著正相关, 与 Chl a、DO 成极显著负相关。结论认为, Chl a、DO 和水温是影响夏季表层海水 $p\text{CO}_2$ 的关键因子。

温带表层海水 $p\text{CO}_2$ 与水温之间存在显著相关性。由于调查过程中桑沟湾湾底与湾外以及不同季节水温差别较大, 所以为了更好地比较大中型藻类对表层海水 $p\text{CO}_2$ 的影响, 本研究选择利用 CO2SYS 软件对表层海水 $p\text{CO}_2$ 进行温度补偿。春季和夏季不同养殖区域温度补偿后变化趋势以及差异性仍与原结果一致, 即贝类养殖区>空白区>贝藻混养区>海带养殖区且差异显著, 而将春季各养殖区域的温度补偿到夏季温度后, 结果见表 4。通过单因素方差分析, 春季贝类区、空白区

表 2 不同季节海水 CO_2 体系各变量差异显著性的双因素方差分析
Tab. 2 Two-way ANOVA tests of CO_2 system for all the sampling seasons

变量 variable	变异来源 source of variability	F	df	P	变量 variable	变异来源 source of variability	F	df	P
溶解无机碳 浓度 DIC	季节 season	325.75	1	0.000**	溶解氧 DO	季节 season	5.10	1	0.017*
	养殖区 area	7.18	4	0.003**		养殖区 area	4.59	4	0.018*
$p\text{CO}_2$	季节 season	38.97	1	0.000**	叶绿素 a Chl a	季节 season	14.59	1	0.000**
	养殖区 area	11.22	4	0.001**		养殖区 area	2.16	4	0.136
pH	季节 season	11.79	1	0.326					
	养殖区 area	1.30	4	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 ($P<0.01$).

表 3 表层水 $p\text{CO}_2$ 与水环境因子的相关关系

Tab. 3 Pearson correlation coefficients between $p\text{CO}_2$ and environmental factors

季节 season	变异来源 source of variability	表层水温 SST	pH	溶解无机碳浓度 DIC	叶绿素 a Chl a	溶解氧 DO
春季 spring	$p\text{CO}_2$	0.396	-0.394	0.906**	-0.866**	-0.623*
夏季 summer	$p\text{CO}_2$	0.553*	-0.364	0.656*	-0.899**	-0.852**

注: *表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: * denotes significant correlation($P<0.05$), **denotes extremely significant correlation($P<0.01$).

表 4 春季温度补偿后表层海水 $p\text{CO}_2$ 与夏季表层海水 $p\text{CO}_2$
 Tab. 4 $p\text{CO}_2$ after temperature compensation in spring and $p\text{CO}_2$ in summer

季节 season	站点 station												
	贝类区 bivalves region				贝藻混养区** bivalves and kelps region				海带区** kelps region		空白区 control region		
	19#	18#	15#	14#	11#	10#	6#	5#	4#	3#	4w22	1#	1w21
补偿后春季 spring	362.50	364.82	360.53	359.50	360.23	358.44	356.95	353.39	330.42	333.02	361.11	360.45	357.70
夏季 summer	361.12	360.40	359.32	358.50	347.55	351.00	346.50	349.10	339.54	344.23	360.21	359.42	356.45

注: **表示温度补偿后养殖区春夏两季差异显著($P<0.01$).

Note: ** denotes after temperature compensation, highly significant difference ($P<0.01$).

表层海水 $p\text{CO}_2$ 经过温度补偿后与夏季无显著差异; 春季贝藻混养区、海带养殖区表层海水 $p\text{CO}_2$ 经过温度补偿后与夏季差异极显著($P<0.01$).

3 讨论

3.1 环境因子的变化特征

桑沟湾是我国典型的半封闭海湾, 近年来贝类养殖、贝藻混养以及海带养殖已成为该区域主要渔业活动的模式^[12-14]。海带等大型藻类的光合作用所固定的碳是海洋初级生产力的基础之一, 对海洋碳循环起着至关重要的作用^[15]。本研究结果表明, 受养殖设施和养殖生物的阻挡作用, 桑沟湾水体交换能力较弱^[16-17], 各养殖区的环境参数区域分布明显, 受不同养殖生物活动的影响, 显现出不同于自然海域的特性。春季调查中 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 $\mu\text{mol/L}$ 。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。所以海带养殖区 DIC 的低含量可能与养殖海带光合作用的吸收利用有关。

养殖活动有非常明显的季节特性。海带的养殖活动从每年的 11 月开始至次年的 6 月结束。在本次调查的 8 月, 桑沟湾养殖海带已收获完毕, 生物量处于全年的最低时期, 夏季 DIC 含量远高于春季, 但是 DIC 的低值区仍然出现在海带养殖区。分析原因, 认为由于缺少了海带对营养盐的竞争, 再加之温度升高适宜繁殖, 海带养殖区以及贝藻混合养殖区内的浮游植物得以在一定时间内快速生长, 所以夏季 Chl a 浓度明显高于春季并在海带养殖区出现峰值。浮游植物生长的消耗,

造成了 DIC 的低值区仍然出现在海带养殖区。受贝类呼吸作用的影响, 贝类养殖区的 pH 最低。夏季当海带生物量减少, 桑沟湾内, 尤其是海带养殖区各环境因子间的相关关系与自然海域的普遍规律一致^[10, 17], 即 DO 与 Chl a、DIC 与 T 和 S 均存在显著相关性。而春季受大型藻类以及贝类强烈的生理活动的影响, 各环境因子间均未呈现相关关系。说明, 养殖生物的生理活动可以使养殖海域与自然海域产生巨大差异, 并影响养殖海区内环境因子间的相互关系。

3.2 表层海水 $p\text{CO}_2$ 的变化特征及影响因素

表层海水 $p\text{CO}_2$ 受各种物理、化学和生物因素的影响, 其中, 水温和盐度是其重要的影响因素之一^[18]。通常, 温带自然海域的 $p\text{CO}_2$ 和水温存在显著的正相关关系^[4]。本研究发现, 桑沟湾的碳酸盐体系异常复杂。春季的藻类和贝类生长活动旺盛, 受藻类和贝类生长活动的影响, $p\text{CO}_2$ 与水温没有显著的相关性, 而是与 DIC、Chl a 以及 DO 显著相关, 可见, 春季生物活动是 $p\text{CO}_2$ 变化的主要影响因素。夏季由于养殖海带的收获, 桑沟湾养殖生物的生物量处于全年最低时期, 养殖生物的活动不如春季时强烈, 所以水温开始对 $p\text{CO}_2$ 的变化产生影响。夏季 $p\text{CO}_2$ 的变化, 受水温、养殖活动、浮游植物等多种因素共同影响。

夏季与春季的温度差以及部分养殖区养殖模式的改变共同作用造成了各个养殖区 $p\text{CO}_2$ 在不同季节差异显著。因此尚不能推断各养殖区存在显著差异的主要影响因素是养殖活动还是水温等物理因素。本研究通过 CO_2SYS 软件对春季 $p\text{CO}_2$ 进行温度补偿后发现, 没有养殖活动改变的区域补偿后与夏季无明显差异。说明当养殖活动未进

行改变时温度对表层海水 $p\text{CO}_2$ 变化的影响开始显现, 并占据主导地位。而夏季即使藻类养殖区浮游植物大量繁殖, 春季藻类养殖区在温度补偿后 $p\text{CO}_2$ 仍远低于夏季, 可以推断大型藻类对表层海水 $p\text{CO}_2$ 的影响程度远大于温度以及浮游植物对表层海水 $p\text{CO}_2$ 的影响。与春季不同的是, 夏季 $p\text{CO}_2$ 与水温显著相关, 桑沟湾内水温差异较大, 我们针对夏季的不同养殖区域进行温度补偿后, 发现各养殖区之间的变化趋势与差异性并未发生改变, 这一结果说明温度并不是唯一影响夏季 $p\text{CO}_2$ 养殖区之间差异的因素, 也从一方面证明了养殖生物生理活动的影响大于温度对 $p\text{CO}_2$ 的影响这一推论。春季贝藻混养区即使未进行温度补偿, 表层海水 $p\text{CO}_2$ 仍高于夏季, 造成这一现象的原因可能是: 一方面, Chauvaud 等^[19]以及 Martin 等^[20]在研究野生贝类群落对海洋碳循环影响的过程中发现贝类生长过程中呼吸和钙化释放 CO_2 以及摄食浮游植物, 认为贝类群落应该是碳源。虽然本次调查中并未发现贝类养殖区是碳源区, 但是其生理活动也使得该区域的表层海水 $p\text{CO}_2$ 值最高, 春季贝类生长活动较夏季旺盛, 不同季节贝类生长活动的强弱差异可能也会对表层海水 $p\text{CO}_2$ 产生不同程度的影响。所以在贝类生理活动更为旺盛的春季, 贝类养殖区在温度补偿后表层海水 $p\text{CO}_2$ 略高于夏季, 也可以证明此推论。另一方面, 浮游植物大量繁殖, 其光合作用会吸收水体中的 CO_2 ^[21], 实验过程中未调查贝藻养殖比例, 若海带养殖比例较小, 夏季浮游植物生物量的增加可能会使其影响程度大于春季时贝藻混养区内海带的影响, 从而使夏季贝藻混养区表层海水 $p\text{CO}_2$ 低于春季。同时, 浮游植物的影响也是贝类养殖区表层水 $p\text{CO}_2$ 仍低于大气中 $p\text{CO}_2$ 的原因之一, 所以对浮游植物的固碳作用也应有充分认识, 但是值得注意的是, 浮游植物所固定的碳, 除被摄食之外是无法移除的, 而大型藻类不但固碳效果要强于微藻, 当藻类收获后, 其从海洋碳库中移除的碳也可以更好地实现碳汇渔业的功能和目的。

本研究采用 CO_2 走航仪直接读取 $p\text{CO}_2$ 的数值, 走航仪的优点是快速直观地给出表层海水二

氧化碳分压, 适用于任何海域, 而传统的根据 pH 和总碱度推算的结果, 适用于无机碳体系相对稳定的系统, 虽然测定的原理不同, 但是反映的趋势应该是一致的。通过对春夏两个季节的调查发现, 养殖生物的生理活动对表层海水 $p\text{CO}_2$ 的大小起到决定性作用, 其影响程度大于浮游植物以及物理水文等, 同时养殖海带对养殖海区的水环境也有一定改善作用。后续的工作中要进行各种养殖模式对表层海水 $p\text{CO}_2$ 的影响以及相互间的作用程度的探讨, 最终为渔业碳汇计量方法的建立提供科学依据。

参考文献:

- [1] Gao X L. Biogeochemical characteristics of dissolved inorganic carbon system in the typical coastal waters of China[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005. [高学鲁. 中国近海典型海域溶解无机碳系统的生物地球化学特征[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.]
- [2] Beatriz M B, Michael J R F, Margaret C B. Ocean biogeochemistry and global change[J]. ICBP Sci, 2001, 2: 1-36.
- [3] Li N, Li X G, Song J M. Key biogeochemistry processes of marine carbon cycle[J]. 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[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(2): 75-80.]
- [4] Song J M. Biogeochemistry of China Seas[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2004: 1591. [宋金明. 中国近海生物地球化学[M]. 济南: 山东科技出版社, 2004: 1-591.]
- [5] De_Richter R K, Ming T, Caillol S. Fighting global warming by photocatalytic reduction of CO_2 , using giant photocatalytic reactors[J]. Renew Sust Energ Rev, 2013, 19(1): 82-106.
- [6] Zhang J H, Fang J G, Tang Q S. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem[J]. Advances Earth Science, 2005, 20(3): 359-365. [张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 359-365.]
- [7] Gao K S. Algal Carbon Fixation-Basis, Advances and Methods[M]. Beijing: China Science Publishing, 2014: 1-491. [高坤山. 藻类固碳-理论、进展与方法(精)[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-491.]
- [8] Huang Y. Photosynthetic carbon acquisition and diet contri-

- bution to abalone, and sea cucumber in macroalgae[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2013. [黄瑶. 大型藻类光合固碳作用及对鲍、参供饵力的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013.]
- [9] Tang Q S, Zhang J H, Fang J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems[J]. *Mar Ecol-Prog Ser*, 2011, 424: 97–104.
- [10] Jiang Z J, Fang J G, Han T T, et al. Estimation of sea-air CO₂ flux in seaweed aquaculture area, Lidao Bay[J]. *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[J]. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 50–56.]
- [11] Qiu S, Gong X B, Zhang J H, et al. Distribution and affecting factors of pCO₂ in aquaculture areas of Sanggou Bay during spring[J]. *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 pCO₂ 分布特征及影响机制[J]. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 31–37.]
- [12] Fang J G, Sun H L, Kuang S H, et al. Assessing the carrying capacity of Sanggou Bay for culture of kelp *Laminaria japonica*[J]. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 7–18. [方建光, 孙慧玲, 匡世焕, 等. 桑沟湾海带养殖容量的研究[J]. *海洋水产研究*, 1996, 17(2): 7–18.]
- [13] Sun S, Liu S M, Ren J L, et al. Distribution features of nutrients and flux across the sediment-water interface in the Sanggou Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(6): 108–117. [孙珊, 刘素美, 任景玲, 等. 桑沟湾养殖海域营养盐和沉积物-水界面扩散通量研究[J]. *海洋学报*, 2010, 32(6): 108–117.]
- [14] Zhang J H, Wang W, Han T T, et al. The distributions of dissolved nutrients in spring of Sanggou Bay and potential reason of outbreak of red tide[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(1): 132–139. [张继红, 王巍, 韩婷婷, 等. 桑沟湾春季营养盐分布特征及赤潮暴发诱因[J]. *水产学报*, 2012, 36(1): 132–139.]
- [15] Yang Y F, Song J M, Lin X T, et al. Seaweed cultivation and its ecological roles in coastal waters[J]. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(3): 77–80. [杨宇峰, 宋金明, 林小涛, 等. 大型海藻栽培及其在近海环境的生态作用[J]. *海洋环境科学*, 2005, 24(3): 77–80.]
- [16] Yan Z, Ren J L, Liu S M, et al. Distribution and seasonal variation of total dissolved inorganic arsenic in Sanggou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(5): 432–436. [闫哲, 任景玲, 刘素美, 等. 桑沟湾总溶解态无机砷的分布与季节变化[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(5): 432–436.]
- [17] 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. [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.]
- [18] Weiss R F. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas[J]. *Mar Chem*, 1974, 2: 203–215.
- [19] Chauvaud L, Thompson J K, Cloern J E, et al. Clams as CO₂ generators: the *Potamocorbula* example in San Francisco Bay[J]. *Limnol Oceanogr*, 2003, 48(6): 2086–2092.
- [20] 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[J]. *Limnol Oceanogr*, 2006, 51(5): 1996–2005.
- [21] 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. [张龙军, 王婧婧, 张云, 等. 冬季北黄海表层海水 CO₂ 分压分布及其影响因素探讨[J]. *中国海洋大学学报*, 2008, 38(6): 955–960.]

Seasonal variations (spring and summer) of the surface seawater $p\text{CO}_2$ in Sanggou Bay and corresponding impact factors

LIU Yi^{1,2}, LIN Fan¹, WU Wenguang¹, WU Ningning⁴, ZHANG Yitao³, WANG Wei¹, LI Min^{1,5}, ZHANG Jihong^{1,2}

1. Key Laboratory for Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes; Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;
3. Rongcheng Dongchudao Ocean Science and Technology Co., Ltd., Weihai 264200, China;
4. Qingdao Fishery Technology Service Station, Qingdao 266071, China;
5. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: This study aimed to assess the effect of aquaculture activity, especially the cultivation of large algae such as kelp, on the seasonal variation of $p\text{CO}_2$ in surface seawater. The $p\text{CO}_2$ and related parameters of the surface water were measured by the OceanPack™ (SubCTech, Kiel, Germany) before and after kelp harvesting (May and August, 2015) in a typical polyculture area in Sanggou Bay, China. The variations of $p\text{CO}_2$ and its corresponding impact factors are discussed for different seasons and culture modes, and before and after kelp harvesting. The results showed that: (1) the mean values of $p\text{CO}_2$ in the surface seawater during the spring and summer seasons were $(346.7 \pm 13.85) \mu\text{atm}$ ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$) and $(351.50 \pm 8.00) \mu\text{atm}$ in the inner bay, and those of the outer waters were $(353.42 \pm 0.71) \mu\text{atm}$ and $(358.05 \pm 2.01) \mu\text{atm}$, respectively. All these values were lower than atmospheric $p\text{CO}_2$. (2) The horizontal distribution of $p\text{CO}_2$ decreased from the coast of the bay to the outside waters and rose at the reference outer region. The lowest $p\text{CO}_2$ values in both seasons appeared in the algal culture area and the highest values appeared in the shellfish culture area. (3) No significant correlation was found between $p\text{CO}_2$ and water temperature in the spring; however, $p\text{CO}_2$ was significantly correlated with chlorophyll a and dissolved oxygen, indicating that organic activity had a great impact on $p\text{CO}_2$. In summer, after kelp harvesting, $p\text{CO}_2$ and water temperature, dissolved inorganic carbon, chlorophyll a, and dissolved oxygen were significantly correlated. (4) The $p\text{CO}_2$ values of Sanggou Bay and the adjacent outer surface waters were lower than the atmospheric $p\text{CO}_2$, showing that the bay acted as a sink for CO_2 . The algal culture area was a strong carbon sink zone, because its $p\text{CO}_2$ value was much lower than that of the natural sea area. The shellfish culture area was a weak carbon sink zone, because its $p\text{CO}_2$ value was slightly higher than that of the natural sea area. The $p\text{CO}_2$ values in the algae-shellfish polyculture area were intermediate between the two monoculture areas. The photosynthetic activity of kelp in spring was a major factor affecting the surface water $p\text{CO}_2$. The aquaculture activity in Sanggou Bay resulted in altered $p\text{CO}_2$ values compared with those of the natural sea area. The effects of physical factors on surface water $p\text{CO}_2$ became apparent in summer owing to a lack of aquaculture in that season.

Key words: Sanggou Bay; carbon dioxide pressure; mariculture; spring and summer

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