快速融冰背景下北冰洋夏季表层海水 CO_2 分压的变异假设

陈立奇^{①②*}, 祁第^{①②}, 高众勇^②, 詹力扬^②, 孙恒^②, 许苏清^②, 张远辉^②, 汪燕敏^②

① 厦门大学海洋与地球学院, 厦门 361102;

② 国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室, 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005

* 联系人, E-mail: chenliqi@tio.org.cn

2016-02-15 收稿, 2016-04-05 修回, 2016-04-11 接受, 2016-06-14 网络版发表

国家自然科学基金(41230529, 41476172, 41476173, 41406221, 40531007)、南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2011-2016)和国家国际科技合作专项(2015DFG22010)资助

摘要 近几年来, 夏季北冰洋融冰出现明显加快的态势. 融冰过程引起了表层海水 CO_2 浓度的变化, 在2008年中国国家北极科学考察(CHINARE)航次通过深入到 88°N 的北冰洋中心区的 170°W 断面观测, 发现表层海水中 CO_2 在冰覆盖下, 融冰区和融冰后开阔水域等不同状况下出现了明显的变异性. 针对所观测到的表层海水二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)变异性现象, 我们提出了北冰洋快速融冰情景下的表层海水 $p\text{CO}_2$ 变异的“低-低-高”假设, 即海冰覆盖下的海水是“低” $p\text{CO}_2$, 刚融冰的海水是“低” $p\text{CO}_2$, 而融冰后的开阔海水会出现“高” $p\text{CO}_2$. 出现这种“低-低-高” $p\text{CO}_2$ 变异现象是由不同驱动过程引起的. 冰覆盖下海水低 $p\text{CO}_2$, 控制因素可能是水体受到不同水团的混合过程、温度变化、冰-水 CO_2 交换和生物冰藻微吸收 CO_2 过程控制, 其主要诱因还需要进一步探索; 现场观测表明刚融冰时海水的低 $p\text{CO}_2$ 主控因素可能是生物的 CO_2 吸收, 以及 CaCO_3 溶解共同作用; 而融冰后开阔海水的高 CO_2 已被论证为由于大气中 CO_2 快速进入海水和水体增温引起的.

关键词 $p\text{CO}_2$, 变异, 假设, 快速融冰, 北冰洋

工业革命以来, 人类活动促使大气 CO_2 浓度急剧上升, 导致全球变暖和海洋酸化, 已成为全球关注的热点问题^[1]. 北冰洋表层较低的水温和陆架区域较高的生产力, 导致北冰洋相对其他大洋, 具有吸收大气 CO_2 的更大潜力^[2,3]. 最近的集成研究认为, 北冰洋面积虽然只占全球海洋表层的3%, 且大部分区域被海冰覆盖, 然而其净的 CO_2 吸收量却占到全球海洋的5%~14%^[4]. 但是, 由于目前在中心北冰洋融冰区的观测数据还比较少, 而且近来北极地区正在发生快速变化, 导致这个估计值存在着很高的不确定性.

过去20年中, 全球变暖引起北极区域发生快速

环境变化, 包括表层海水加速升温^[5]、海冰快速融化^[6]、表层水变淡^[7]、初级生产力升高^[8]、以及碳酸钙饱和度降低^[9], 等等. 在最近10年, 北冰洋的海冰融化明显加快, 2007年北极海冰的覆盖面积为1979~2007年的最低值, 2012年9月北极海冰达到了自有卫星观测海冰数据以来的最低值^[10]. 模式研究者预测北冰洋夏季海冰全部消融将会出现在2035~2058年期间^[11,12].

基于海冰融化导致北冰洋陆架区域初级生产增强和 CO_2 浓度降低, 促使海水吸收 CO_2 能力增强的观点, 有研究者认为北冰洋将成为减缓全球变暖的一

引用格式: 陈立奇, 祁第, 高众勇, 等. 快速融冰背景下北冰洋夏季表层海水 CO_2 分压的变异假设. 科学通报, 2016, 61: 2419–2425

Chen L Q, Qi D, Gao Z Y, et al. A hypothesis on variability of surface water $p\text{CO}_2$ under the rapid sea-ice retreat during summer in the Arctic Ocean (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2419–2425, doi: 10.1360/N972016-00183

个新的 CO_2 强汇区^[3]. 然而我们的研究却发现, 在北冰洋海盆海区, 表层海水的 CO_2 吸收能力反而下降^[13]. 该研究通过对加拿大海盆区进行高分辨率的表层 CO_2 含量测定, 发现海盆区的 CO_2 浓度比以前观测值明显增加. 随后2009年的一项观测研究结果也表明北冰洋海盆夏季冰融区的 CO_2 浓度并不像之前预测的那样低^[14]. 我们认为, 来自大气的 CO_2 入侵和低生物吸收是引起较高 CO_2 浓度的主要原因^[13]. 由于这种较高的 CO_2 水平阻碍大气 CO_2 的进一步输入, 预计北冰洋海盆在无冰的情景下不会成为大气 CO_2 的强汇^[13,14]. 然而上述研究结果似乎和近期基于卫星遥感的研究结果相矛盾, 这些卫星观测资料显示, 近年来由于夏季海冰快速消融, 北冰洋海盆区的初级生产已经增加了大约10%^[8]. 而最新的一些研究则表明, 当海冰刚刚融化, 伴随着光照增强, 生产力提升, 表层海水出现低的 CO_2 水平, 这一阶段可显著提升表层海水 CO_2 的吸收能力^[15,16]. 因此, 针对北冰洋海-气 CO_2 通量如何响应夏季海冰快速融化这一重大科学问题, 目前尚存较大争议, 还有许多过程需要厘清. 本文拟通过再次分析本课题组2008年CHINARE (Chinese National Arctic Research Expedition)航次北

冰洋现场观测数据^[13], 并且汇总分析前人的研究成果, 提出北冰洋夏季快速融冰条件下表层海水 CO_2 分压($p\text{CO}_2$)的变异假设.

1 假设提出

2008年航次期间, 在 $143^\circ\sim 169^\circ\text{W}$ 从白令海峡到北冰洋中心海域的调查断面观测到不同海冰条件下表层海水 $p\text{CO}_2$ 出现明显变化的情况(图1和表1), 即: 在加拿大海盆高纬度区域(84°N 以北)海冰覆盖超过90%条件下, $p\text{CO}_2$ 大约 $270\sim 280\ \mu\text{atm}$, 显著低于大气值($375\ \mu\text{atm}$); 在加拿大北部海盆 $77^\circ\sim 81^\circ\text{N}$ 区域, 海冰初融, $p\text{CO}_2$ 呈现最低值($250\sim 270\ \mu\text{atm}$); 而融冰时间较长, 无冰的南部海盆开阔水域, $p\text{CO}_2$ 则是 $320\sim 365\ \mu\text{atm}$, 接近大气值. 这里定义北冰洋表层海水 $p\text{CO}_2$ 低于大气 $p\text{CO}_2$ 实测值超过 $50\ \mu\text{atm}$ (即, $\Delta p\text{CO}_2 > 50\ \mu\text{atm}$)为海水“低” $p\text{CO}_2$; 反之, 二者数值接近(即, $\Delta p\text{CO}_2 < 50\ \mu\text{atm}$)为海水“高” $p\text{CO}_2$. 因此提出了北冰洋在融冰过程中海表 $p\text{CO}_2$ 呈“低-低-高”变异的假设(图1). 形成这种变异是在不同融冰条件下发生不同程度的海-气 CO_2 交换, 并结合表层海水水温变化, 生物活动和不同水团混合等多方面调控过程共同决定的.

图1 2008年夏季西北冰洋表层海水 $p\text{CO}_2$ (μatm , $1\ \text{atm}=101325\ \text{Pa}$)走航观测图

Figure 1 Distribution of sea surface $p\text{CO}_2$ in μatm during the summer of 2008

表1 西北冰洋不同海冰覆盖率下表层海水 $p\text{CO}_2$ 值

Table 1 Variability of sea surface $p\text{CO}_2$ under different sea ice melting scenario in the western Arctic Ocean

区域	海冰覆盖率 (%)	$p\text{CO}_2$ (μatm)	资料来源
无冰开阔海域	0	320~365	[13]
部分海冰覆盖海域	<50	250~270	[13]
	10±10	282~323	[16]
	80~90	300~304	[14]
高密度海冰覆盖海域	>90	270±280	[13]
	70~90	300~303	[16]

2 海冰覆盖下低 CO_2 的可能驱动机制

在加拿大海盆 84°N 以北的海域,海冰密集度都在80%以上,表层海水 $p\text{CO}_2$ 只有270~280 μatm (图1和表1). 几种可能的影响因素包括: (1) 海冰隔绝了海-气 CO_2 交换,冰下水温持续走低,相应的 $p\text{CO}_2$ 就会较低; (2) 海水与上覆的海冰之间存在微孔隙交换,可能使海水 CO_2 进入冰中,从而 $p\text{CO}_2$ 降低; (3) 北冰洋海冰底部附着大量的冰藻和低温藻类,初级生产过程降低了冰下海水的 $p\text{CO}_2$; (4) 水平输运过程.

Else等人^[14]应用我们2008年观测的数据,在不考虑生物和其他化学因素情况下,模拟了加拿大海盆表层海水 $p\text{CO}_2$ 与温度和海冰密度的关系. 结果表明,从夏季末到冬季,随着温度从 4°C 减低至 -1.4°C , $p\text{CO}_2$ 也从最初的370 μatm 减低至298 μatm ^[14]. 该结果和我们在高纬度海域多年冰密集区所观测到的冰下水 $p\text{CO}_2$ 值(270~280 μatm)基本吻合. 因此冰下水温下降可能是海冰覆盖下“低” $p\text{CO}_2$ 的一种原因.

Islam^[16]于2012年9月14日至10月7日利用北部海盆 80°N 附近的冰上浮标系统(ITP-65)观测,获取了多年冰下 $p\text{CO}_2$ 和溶解氧(DO)的时间序列数据,结果表明DO数据与海-气交换模型的模拟结果相当吻合,认为冰下净群落生产、盐卤水形成和垂直混合过程等的影响可以忽略. 冰下净群落生产低的原因应归因于多年冰覆盖下,冰下水体的光照度低,生物光化学反应受到限制. 另外,多年冰下的营养盐含量也几乎可以忽略,叶绿素 a 浓度极低($\sim 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$).

在9月14日~9月23日期间, Islam^[16]在海冰密集度为60%~80%时却观测到相对较高的“低” $p\text{CO}_2$ 值(305~325 μatm), 利用盐度数据分析结果, Islam^[16]认为该区域冰下水 $p\text{CO}_2$ 值主要受控于制水平输运过程. 然而,在9月23日~10月7日期间, Islam^[16]在海冰密集

度为70%~90%时,观察到表层海水“低” $p\text{CO}_2$ 值(300~303 μatm). 模型模拟的 $p\text{CO}_2$ 结果显示: (1) 如果不考虑海冰覆盖因素,忽略生物生产作用下,模拟值稍微高于实测值; (2) 如果考虑海冰覆盖因素,生物生产忽略情况下,模拟值稍微低于实测值; (3) 如果既考虑海冰覆盖因素又考虑生物生产的情况下,模拟值与实测值更为接近. 因此在海冰完全覆盖的海域,冰下水“低” $p\text{CO}_2$ 既可能受控于水平输运过程,也有可能受控于海冰微孔隙间海-气 CO_2 交换降碳及冰下附着的冰藻吸碳等调节作用.

3 融冰区表层低 CO_2 的驱动机制

在加拿大海盆南部海域 $78^\circ\sim 81^\circ\text{N}$ 附近,调查期间海冰刚开始消融,此时海冰密集度从原先的80%以上,迅速降低到50%以下,表层海水呈现较低 $p\text{CO}_2$ 值(250~270 μatm) (图1和表1). 可能的主要控制因素包括: (1) 低 CO_2 含量的海冰与海水混合后使表层海水 $p\text{CO}_2$ 值降低; (2) 在阳光的辐照下,海冰中的冰藻等微生物活跃和快速生长而促使生物碳泵增强; (3) 海冰融化过程,伴随着 CaCO_3 沉降物也出现溶解,提高了海水的总碱度(TAlk),增强了表层海水吸收 CO_2 的能力. 如前所述通过海水和融冰水混合所降低的 $p\text{CO}_2$ 值基本上抵消了由于变暖所增加的 $p\text{CO}_2$ 值^[13]. 因此,生物生产吸收碳和 CaCO_3 溶解消耗碳可能是低 $p\text{CO}_2$ 值最主要的控制因素.

3.1 生物吸收 CO_2

从春季到夏季,在2008年加拿大海盆区的西北部海域,海冰刚刚出现消融,海域观察到低 $p\text{CO}_2$ 值. Islam^[16]于2012年晚夏至秋季(8月27日~10月20日)在海盆北部海域 78°N 附近,通过自制的冰上浮标系统(ITP-64),获取了原位 $p\text{CO}_2$ 和DO时间序列数据. 此时海冰刚刚消融,海冰密集度在10±10%,观察到表层海水较低的 $p\text{CO}_2$ 值(282~323 μatm). 8月27日~9月23日期间的实测 $p\text{CO}_2$ 和DO较海-气 CO_2 交换模型的模拟结果相吻合,说明表层水的 $p\text{CO}_2$ 变化的主控因子是来自海-气 CO_2 交换. 然而,9月23日~10月20期间,海-气 CO_2 交换模型模拟的 $p\text{CO}_2$ 值却明显高于实测值,被认为由于存在着吸收水体中的 CO_2 的机制,减低了 $p\text{CO}_2$ 值. 在此观测期间,该站位的时间序列叶绿素 a 水平比邻近对比站位(ITP-65, 80°N 附近,海冰覆盖面积70%~90%)约高3倍;净群落生产力(NCP)和

硝酸盐浓度分别为 $7.4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $0.2\sim 2.0 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$, 而对比站位(ITP-65)都接近0. 当模型同时考虑海-气交换和NCP两个过程, 此时模拟出来的 $p\text{CO}_2$ 结果与实测结果吻合. 因此认为在此海冰刚刚融化的海域, 生物光合作用起到重要吸收 CO_2 作用.

因此, 在北冰洋海冰开始出现消融区域, 生物初级生产力显著提升可能是表层水低 $p\text{CO}_2$ 值形成的最主要原因. 海冰刚刚消融时期出现表层海水初级生产力升高的可能原因包括: 首先, 海冰的融化提高了表层海水光的可利用性^[8]; 其次, 海冰下附着的丰富冰藻^[17], 以及海冰与冰下水营养盐浓度的差异^[18], 导致融冰过程输出营养盐和冰藻到表层海水; 再者, 相对弱的层化作用, 在风驱动作用下表层海水通过与次表层的混合过程, 表层营养盐得到供给^[16]. 尽管海冰刚刚融化时诱发生产力提升的这些控制因素的贡献大小尚未有定量的结论, 但是北冰洋海冰融化过程有利于表层水初级生产力提升、微藻生物活动增强、 $p\text{CO}_2$ 降低已被许多现场观测证实.

3.2 碳酸钙溶解消耗 CO_2

近期有研究者在北极和南极海冰中发现六水方解石($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)^[19,20]. 随后的研究表明, 在海冰刚刚融化阶段, 随着温度升高, 融冰水中的 CaCO_3 沉积物开始出现溶解, 导致表层水体TAIk升高, $p\text{CO}_2$ 下降. 海水吸收 CO_2 能力提升^[21]. 在北冰洋上层海洋^[22]和东格陵兰陆架海域^[23], 融冰阶段, 均观测到超额的TAIk, 过程机制研究表明海-冰相互作用驱动了 CaCO_3 的溶解. 如前所述, 融冰过程同样提高了表层水的光利用率, 促进初级生产力增长, 因而进一步降低了表层水的 $p\text{CO}_2$ 水平. 然而现阶段研究结果还无法准确地定量区分海-冰相互作用驱动的 CaCO_3 溶解和生物生产这两个过程对表层 $p\text{CO}_2$ 的各自贡献份额.

Rysgaard等人^[21]对北冰洋弗拉姆海峡海域的大冰盘, 通过采集的冰芯和冰下水样, 获取了大量冰盘系统 CO_2 参数. 结果显示 $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 存在于海冰中, 且大多数分布于海冰上层. 海冰融化实验结果表明, 伴随着温度升高, CaCO_3 开始分解. 海冰融化和 CaCO_3 溶解过程, 会影响表层海水的 $p\text{CO}_2$ 水平. 应用碳酸盐系统混合模型, 发现每周海冰厚度下降0.2 m, CaCO_3 溶解所消耗的表层海水 CO_2 , 相当冰下表层水 $p\text{CO}_2$ 每周下降 $3.8 \text{ } \mu\text{atm}$. 如果融冰过程没有发生 CaCO_3 溶解时, 则 $p\text{CO}_2$ 每周只会下降 $2.2 \text{ } \mu\text{atm}$. 另外,

海冰融化过程伴随有 CaCO_3 溶解的贡献时表层海水 CO_2 吸收量只有纯海冰稀释作用的2倍左右. 因此认为海冰融化过程 CaCO_3 溶解所引起的 $p\text{CO}_2$ 下降作用比生物过程更为重要, 海冰融化同时发生的自生 CaCO_3 溶解, 有利于北冰洋表层海水从大气中吸收更多的 CO_2 .

4 融冰后表层高 $p\text{CO}_2$ 值是大气 CO_2 快速入侵的结果

在加拿大西南部海盆融冰后开阔水域 $72^\circ\sim 77^\circ\text{N}$ 附近, 观测到高的 $p\text{CO}_2$ 值(图1和表1). 主要控制因素包括: (1) 融冰后开阔水域, 太阳辐射增强, 温度上升, $p\text{CO}_2$ 升高; (2) 大气 CO_2 快速侵入表层海水; (3) 融冰引起的强烈的层化作用阻碍表层 CO_2 往下层转移; (4) 层化作用阻碍深层水的营养盐向上补充, 使得表层海水的初级生产较弱, 生物作用对 CO_2 的影响可以忽略.

从夏季到秋季, 北冰洋海盆区的季节性升温变暖是 $p\text{CO}_2$ 增加的因素之一. 一方面, 2008年夏季, 加拿大西南部海域表层水夏季温升高 $4\sim 6^\circ\text{C}$, 相应的 $p\text{CO}_2$ 大约增加 $50 \text{ } \mu\text{atm}$ ^[13]. 然而, 当把所有 $p\text{CO}_2$ 值规范到同样温度情景下比较, 2008年的观测值仍然大大高于1994和1999年在该海域的观测值(高 $100\sim 140 \text{ } \mu\text{atm}$), 这表明其他过程也起到重要作用^[13]. 另一方面, 海表溶解无机碳(DIC)与总碱度(TAIk)呈现出线性关系, 营养盐水平也很低, 因而可假设该海区在调查期间净的生物 CO_2 固定几乎为零^[13]. 加拿大海盆低的生物 CO_2 固定量可能是由于大量冰融水侵入而引起强烈的层化导致上混合层硝酸盐的供应贫乏. 通过混合分析计算出海水和低 CO_2 含量融冰水混合会降低 $50\sim 60 \text{ } \mu\text{atm}$ 的 $p\text{CO}_2$, 刚好抵消了由于变暖所增加的 CO_2 值^[13]. 因此扣除上述因素的影响, 可能存在其他重要过程导致2008年该海域 $p\text{CO}_2$ 显著升高. 通过模拟海-气 CO_2 交换过程, 得出表层 $p\text{CO}_2$ 增加的主要因素是由于无冰期间对大气 CO_2 的吸收. 模拟1~2个月无冰期间(8月底), 从大气的 CO_2 补充在该海区温度为 4°C 情况下会提高表层 $p\text{CO}_2$ 到 $340 \text{ } \mu\text{atm}$ 水平, 该结果与我们的2008年观测相一致. 而这种大气 CO_2 控制机制的产生是因为加拿大海盆夏季小于20 m的浅混合层深度. 这样浅的混合层深度和很强的层化作用允许海表很快地与大气进行再平衡, 迅速提高表层 $p\text{CO}_2$ ^[24].

为了进一步研究融冰后表层高 $p\text{CO}_2$ 的控制因素,

Else等人^[14]模拟了融冰过程加拿大海盆东南海域表层海水CO₂分压和吸收能力的变化。模拟结果证实,在加拿大海盆东南海域,海冰完全消失的状态下,pCO₂具有较高值,表层水无法大量吸收大气中的CO₂。其控制机制同样是由于吸收的CO₂在较浅的上混合层快速达到平衡,表层海水pCO₂迅速提高。Else等人^[14]特别强调,表层水快速升温同样起重要作用。该模拟的结果显示,加拿大海盆东南部海域pCO₂最高值能到达440 μatm水平,显著高于我们在加拿大海盆西南部海域的实测值或模拟值^[13],且表层海水CO₂吸收能力也更低。原因有两方面:(1)两者模型的差异,Else等人^[14]选择的融冰前pCO₂初始值为280 μatm高于本文选择的初始值225 μatm;(2)本文研究的加拿大海盆西南海域水团来自于强CO₂吸收能力的楚科奇海陆架水^[13],而Else等人^[14]研究的东南海域邻近的陆架水CO₂吸收能力相对较弱。无论如何,两者的研究结果都提出了一个重要的观点:在海冰完全消失阶段,大气CO₂可在1~2月内快速入侵,导致北冰洋海盆表层海水pCO₂显著增加;而强的层化作用和低的生物量又阻碍海表吸收的CO₂不能向深海输送,从而使融冰区吸收CO₂的能力迅速消退。因此,北冰洋在海冰融化后不会成为大气CO₂的强汇区。

5 小结

通过综合评述最近几年北冰洋碳循环研究的结果,探究北冰洋夏季快速融冰过程中表层海水pCO₂的变异特征及主要的控制因素。按照海冰密集度,把融冰情景划分为“无冰开阔海域”、“部分海冰覆盖海域”和“高密度海冰覆盖海域”等3种状态(表1)。根据

这3种冰情所代表的北冰洋夏季海冰变化的不同阶段,本文提出了北冰洋夏季快速融冰情景下表层海水pCO₂的“低-低-高”变异的假设,分析了温度变化、海-气CO₂交换,生物过程, CaCO₃沉淀和溶解,物理水团混合等不同的主控过程在这些pCO₂变异中所起的作用。

(1) 融冰后的开阔水域,太阳辐射增强,海水温度上升, CO₂溶解度下降,表层pCO₂升高;大气CO₂快速侵入表层海水,表层pCO₂显著升高;所观测的加拿大海盆区,融冰的分层作用和低生物生产力,阻碍表层CO₂往下层转移。因此融冰后开阔水域表层“高”pCO₂是由大气CO₂快速入侵机制驱动的结果。

(2) 刚融冰表层“低”CO₂则主要是由于海冰融化诱发生物生产力增强和融冰过程发生的CaCO₃溶解协同驱动的结果。在阳光的辐照下,海冰中的冰藻等微生物活跃和快速生长,生物作用增强。同时融冰过程,海冰中的CaCO₃发生溶解,消耗CO₂。这两个过程的共同作用是刚融冰状态下表层海水出现低pCO₂值的主要诱因。

(3) 海冰覆盖下“低” pCO₂的驱动机制主要因素是,海冰覆盖下的冰下水,水温较低, CO₂溶解度升高, pCO₂下降;另外,还可能包括海水上覆的海冰,仍存在着冰-水微孔气体交换而降低了表层海水CO₂水平,同时海冰底部寄生大量冰藻和低温藻类,微生物生产增强而降低了表层海水pCO₂值。

现场观测表明北冰洋快速融冰条件下,表层海水pCO₂出现了明显的变异性,本假设推断融冰过程不同状态表层pCO₂水平的规律性及主要驱动因子,将有助于改善基于遥感的快速融冰下北冰洋表层pCO₂大尺度模拟和碳源汇格局评估模型的不确定性。

致谢 感谢美国特拉华大学蔡卫君教授参加讨论,并提出宝贵意见;美国特拉华大学陈宝山博士协助处理2008年调查的pCO₂数据;中国北极科学考察队和中国“雪龙”号极地破冰船在北冰洋现场调查时的支持。

参考文献

- 1 Doney S C, Fabry V J, Feely R A, et al. Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Ann Rev Mar Sci*, 2009, 1: 169–192
- 2 Anderson L G, Olsson K, Chierici M. A carbon budget for the Arctic Ocean. *Glob Biogeochem Cycle*, 1998, 12: 455–465
- 3 Bates N R, Moran S B, Hansell D A, et al. An increasing CO₂ sink in the Arctic Ocean due to sea-ice loss. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L23609, doi: 10.1029/2006GL027028
- 4 Bates N, Cai W J, Mathis J. The ocean carbon cycle in the western Arctic Ocean: Distributions and air-sea fluxes of carbon dioxide. *Oceanography*, 2011, 24: 186–201
- 5 Steele M, Ermold W, Zhang J. Arctic Ocean surface warming trends over the past 100 years. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: 224–225

- 6 Perovich D K, Richter-Menge J A. Loss of sea ice in the arctic. *Ann Rev Mar Sci*, 2009, 1: 417–441
- 7 Yamamoto-Kawai M, McLaughlin F A, Carmack E C, et al. Surface freshening of the Canada Basin, 2003–2007: River runoff versus sea ice meltwater. *J Geophys Res*, 2009, 114: 363–364
- 8 Arrigo K R, van Dijken G, Pabi S. Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: 116–122
- 9 Yamamoto-Kawai M, McLaughlin F A, Carmack E C, et al. Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: Effects of ocean acidification and sea ice melt. *Science*, 2009, 326: 1098–1100
- 10 Liu Y, Key J R. Less winter cloud aids summer 2013 Arctic sea ice return from 2012 minimum. *Environ Res Lett*, 2014, 9: 044002, doi: 10.1088/1748-9326/9/4/044002
- 11 Wang M, Overland J E. A sea ice free summer Arctic within 30 years: An update from CMIP5 models. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: 550–556
- 12 Liu J, Song M, Horton R M, et al. Reducing spread in climate model projections of a September ice-free Arctic. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 12571–12576
- 13 Cai W J, Chen L, Chen B, et al. Decrease in the CO₂ uptake capacity in an ice-free Arctic Ocean basin. *Science*, 2010, 329: 556–559
- 14 Else B G T, Galley R J, Lansard B, et al. Further observations of a decreasing atmospheric CO₂ uptake capacity in the Canada Basin (Arctic Ocean) due to sea ice loss. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 1132–1137
- 15 Chen B. Responses of marine carbonate system to warming and sea-ice retreat in the Pacific sector of the Arctic Ocean. Doctor Dissertation. Athens: University of Georgia, 2015. 121–172
- 16 Islam A. CO₂ and O₂ variability in the partially ice-covered Arctic Ocean. Master Dissertation. Missoula: University of Montana, 2015. 31–51
- 17 Sørreide J E, Hop H, Carroll M L, et al. Seasonal food web structures and sympagic-pelagic coupling in the European Arctic revealed by stable isotopes and a two-source food web model. *Progr Oceanogr*, 2006, 71: 59–87
- 18 Dieckmann G, Lange M, Ackley S, et al. The nutrient status in sea ice of the Weddell Sea during winter: Effects of sea ice texture and algae. *Polar Biol*, 1991, 11: 449–456
- 19 Dieckmann G S, Nehrke G, Papadimitriou S, et al. Calcium carbonate as ikaite crystals in Antarctic sea ice. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: 307–315
- 20 Dieckmann G, Nehrke G, Uhlig C, et al. Ikaite (CaCO₃·6H₂O) discovered in Arctic sea ice. *Cryosphere*, 2010, 4: 227–230
- 21 Rysgaard S, Glud R N, Lennert K, et al. Ikaite crystals in melting sea ice: Implications for pCO₂ and pH levels in Arctic surface waters. *Cryosphere*, 2012, 6: 901–908
- 22 Rysgaard S, Bendtsen J, Pedersen L T, et al. Increased CO₂ uptake due to sea ice growth and decay in the Nordic Seas. *J Geophys Res*, 2009, 114: C09011
- 23 Sejr M K, Krause-Jensen D, Rysgaard S, et al. Air-sea flux of CO₂ in arctic coastal waters influenced by glacial melt water and sea ice. *Tellus B*, 2011, 63: 815–822
- 24 Zhai W D, Chen J F, Jin H Y, et al. Spring carbonate chemistry dynamics of surface waters in the northern East China Sea: Water mixing, biological uptake of CO₂, and chemical buffering capacity. *J Geophys Res Oceans*, 2014, 119: 5638–5653

A hypothesis on variability of surface water $p\text{CO}_2$ under the rapid sea-ice retreat during summer in the Arctic Ocean

CHEN LiQi^{1,2}, QI Di^{1,2}, GAO ZhongYong², ZHAN LiYang², SUN Heng², XU SuQing², ZHANG YuanHui² & WANG YanMin²

¹ Ocean and Earth Science College of Xiamen University, Xiamen 361102, China;

² Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry of State Oceanic Administration (SOA), Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China

The Arctic Ocean has been recognized to play an active role in global carbon cycle due to its potential to disproportionately take up CO_2 from the atmosphere especially under a dwindling ice extent. It is estimated that the Arctic Ocean will be responsible for up to 5%–14% of the total global oceanic CO_2 uptake even though it comprises only 3% of the world ocean surface area. Over the past decade, the sea ice in the Arctic Ocean has significantly retreated during summer. The rapid sea ice retreat is thought to cause corresponding changes in the distribution of $p\text{CO}_2$ in the surface waters of Arctic Ocean. However, the response of carbon dynamics to a changing Arctic Ocean remains poorly quantified. It has been postulated that an ice-free condition in the Arctic Ocean basins would allow for uptake of a substantial amount of carbon dioxide (CO_2) from the atmosphere as a result of sea ice melt and increasing primary productivity. However, the other direct observation-based study of high-resolution survey of sea-surface CO_2 concentration across the Canada Basin, showing a great high $p\text{CO}_2$ relative to earlier observations and predicted that the Arctic Ocean basin will not become a large atmospheric CO_2 sink under ice-free conditions. Due to the existing quite different views, thus, there is an implication of observation-based learning in the variations of the surface seawater $p\text{CO}_2$ under a scenario of rapid sea ice melting. In the summer of 2008, during the 3rd Chinese National Arctic Research Expedition (CHINARE) cruise, significant variability of $p\text{CO}_2$ in surface water has been observed along a trans-Arctic section of 150° – 160°W from the Chukchi Sea slope to 88°N in the western Arctic Ocean. We propose a hypothesis of “low-low-high” variation trend in surface water $p\text{CO}_2$ levels along a decreasing ice-cover gradient across three different zones in the Arctic Ocean under a rapid sea ice melting scenario in the summer. Specifically, there are (1) “low” $p\text{CO}_2$ levels of ~ 270 – $280 \mu\text{atm}$ in the sea ice-covered zone (north of 84°N) with a high ice concentration $>70\%$; (2) “low” $p\text{CO}_2$ of ~ 250 – $270 \mu\text{atm}$ in a sea ice melting zone (78° – 81°N) with a medium ice extent of around 50%; and (3) “high” $p\text{CO}_2$ of ~ 320 – $365 \mu\text{atm}$ in an ice-free zone (72° – 77°N) with a low ice concentration of $<15\%$. This “low-low-high” $p\text{CO}_2$ variation trend could be attributed to different driving forces. The low $p\text{CO}_2$ in the heavily ice-covered northern basin is likely influenced by a combination of several processes, including mixing of various source waters, CO_2 fixation by ice algae, ice-water gas exchange, and temperature change, although their relative roles remain to be quantified. The low $p\text{CO}_2$ observed in the partially ice-covered northern Canada Basin could be primarily derived from biological CO_2 fixation and the dissolution of CaCO_3 precipitates, both of which consume CO_2 . Primary productivity enhanced by the early melting of sea ice plays an important role in the decreased sea-surface $p\text{CO}_2$. In addition, sea ice melting also promotes the dissolution of authigenic CaCO_3 in the form of ikaite within the sea ice. Finally, results of tracer data and model simulations suggest that the rapid CO_2 invasion from the atmosphere and low biological export of CO_2 owing to a shallow mixed-layer depth, strong subsurface water stratification, and limited nutrient supply to the surface water are both responsible for the observed high $p\text{CO}_2$ values in the ice-free southern Canada Basin.

$p\text{CO}_2$, variability, hypothesis, rapid sea-ice retreat, Arctic Ocean

doi: 10.1360/N972016-00183