第598次学术讨论会·北极海洋在全球变化中的作用及其对中国的影响

北冰洋海洋酸化和碳循环的研究进展

祁第¹, 陈立奇^{1*}, 蔡卫君², 高众勇¹, 陈宝山², 钟文理³, 魏皓⁴, 孙恒¹,
张远辉¹, 许苏清¹, 张逸行^{1,5}

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

2. School of Marine Science and Policy, University of Delaware, Newark 19716, USA;

3. 中国海洋大学物理海洋学教育部重点实验室, 青岛 266100;

4. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072;

5. 山东大学海洋研究院, 济南 250100

* 联系人, E-mail: chenliqi@tio.org.cn

2018-04-08 收稿, 2018-05-18 修回, 2018-05-21 接受, 2018-06-29 网络版发表

国家自然科学基金(41230529, 41630969, 41476172, 41476173, 41406221, 40531007)、南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2011-2018)、国家国际科技合作专项(2015DFG22010)、国家海洋局双边海洋国际事务合作(2200207)、国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费(2017029)和国家海洋局西太平洋海洋环境监测预警体系建设专项(SOA201303)资助

摘要 海洋响应大气CO₂升高, 引起海水pH和碳酸钙饱和度下降, 这一过程称为海洋酸化. 海洋酸化可能会对海洋生物和生态系统造成严重危害. 在过去的20年中, 全球气候变化引起北冰洋发生一系列快速变化, 包括: 海表温度上升、海冰快速后退、太平洋入流水增多、北冰洋和大气环流异常、淡水储量增加、初级生产力变异等. 全球气候变化所诱发的北极快速变化预计将放大北冰洋海洋酸化, 通过CO₂吸收和碳输送, 北冰洋在响应气候变化较其他大洋更快速和显著. 本文以北冰洋近岸碳吸收和碳封存研究, 海盆区域表层海水pCO₂变异机理研究, 20年来西北冰洋的酸化水体扩张现象为主线, 综述了北冰洋快速融冰背景下的区域碳循环研究进展, 并分析了其酸化水体增长与过去20年的环境和气候变化之间的联系.

关键词 CO₂, 海洋酸化, 气候变化, 快速融冰, 北冰洋

自工业革命以来, 由于化石燃料使用、水泥生产、森林砍伐等人类活动, 使得大量的二氧化碳释放到大气中, 其中有40%被海洋所吸收^[1]. 海洋响应大气CO₂升高, 引起海水的pH和碳酸钙饱和度(Ω)下降, 这就是海洋酸化的过程^[2,3]. 其中 Ω 包括文石饱和度($\Omega_{\text{文石}}$)和方解石饱和度($\Omega_{\text{方解石}}$), 由于文石的溶解度比方解石高, 特别定义 $\Omega_{\text{文石}} < 1$ 的海水为腐蚀性水^[4]. 自工业革命以来, 与大气CO₂平衡的表层海水的pH已经从8.2下降到8.1, $\Omega_{\text{文石}}$ 下降0.4^[3]. 一些试验研究表明, 海水pH和 $\Omega_{\text{文石}}$ 下降将对珊瑚、有孔虫和其他一些钙质浮游生物的生长发育产生不利影响^[5,6].

过去20年中, 全球变暖引起北极区域环境发生快速变化, 如表层海水加速升温^[7]、海冰快速融化^[8]、环流改变^[9]、表层水变淡^[10]、太平洋入流水进入西北冰洋流量增加^[11]、周边河流径流量增加^[12]和初级生产力升高^[13]. 实测资料研究表明, 海冰融化^[14]、河流输入^[15]和次表层上涌^[16]等将造成表层CO₂分压变异和 $\Omega_{\text{文石}} < 1$ 的现象出现^[17]. 此外, 太平洋冬季水(PWW)输运造成的陆架泵运转效率改变会影响陆架-海盆碳循环过程, 引起海盆次表层酸化进一步增强^[18,19]. 本文对这些研究进展进行概述, 并对未来的研究架构做出展望.

引用格式: 祁第, 陈立奇, 蔡卫君, 等. 北冰洋海洋酸化和碳循环的研究进展. 科学通报, 2018, 63: 2201-2213

Qi D, Chen L Q, Cai W J, et al. Review on ocean acidification and carbon cycling in the Arctic Ocean (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2201-2213, doi: 10.1360/N972018-00334

1 北冰洋气候与环境变化

1.1 海冰快速融化

近来的观测表明, 北极地区大气-冰-海洋体系出现了快速的变化^[20,21]. 北极近地面气温的增幅是同期全球平均增温的2.5倍^[21], 称为“北极放大”现象^[22]. 2013年IPCC第5次评估报告指出, 北冰洋海冰范围在1979~2012期间快速下降, 非常可能以每10年3.5%~4.1%的速率下降^[23]. 卫星观测数据显示, 1979~2007年间, 北冰洋夏季海冰覆盖的范围大幅缩减^[23], 在2012年9月更是曾经低达341万平方千米(图1), 为有卫星观测记录以来的历史最低值. 其中最显著的是加拿大海盆出现了大范围的海冰退缩, 在夏季出现了大片的开阔水域. Wang和Overland^[24]预测2037年夏季北冰洋将处于无冰状态. 而Liu等人^[25]则认为北冰洋9月出现无海冰的时间将在2054~2058年之间, 比较原来基于CMIP5模式预测的时间跨2011~2098年, 已经大大地将北冰洋无海冰时间收窄到5年的跨度.

1.2 太平洋入流水增加和路径改变

传统认识上, 从北太平洋通过白令海峡向北进入北冰洋的水体是由局地风作用及太平洋与北冰洋之间的海表面高度差所驱动的^[26]. 然而近年来, 潜标观测数据显示, 白令海峡入流水流量已经从2001年的~0.7 Sv增加至2011年的~1.1 Sv, 同时带来热通量和淡水通量的增加^[11]. 太平洋入流水增加与太平洋-北冰洋之间的压位差增加(~30%)密切相关, 其大

约贡献了2/3的作用, 余下部分则归因于当地南向风力减弱.

冬季太平洋入流残留水体, 一般介于水深50~250 m之间(核心水体的盐度约33.1), 也被称为太平洋冬季水(PWW), 水体中含有大量的营养盐和溶解无机碳(DIC), 部分可以向南侵入巴芬湾^[27]. 从北太平洋流经白令海, 通过白令海峡进入到北冰洋, 最终进入北大西洋的淡水通量形成了一个小的热盐环流短路, 被视作为全球热盐环流的重要组成部分^[28]. 图2展示了2002~2006和2007~2010年间PWW流动路径的变化过程. 在2002~2006年间, 冬季太平洋水从北风海脊(northwind ridge)最南端进入波弗特海(Beaufort Sea). 在2007~2010年, 冬季太平洋水流动路径发生了变化, 从哈罗德海(Herald Canyon)谷沿着楚科奇海台(Chukchi Plateau)直接向北流动. 冬季太平洋水路径的改变可能与风驱动的海冰运动的强度和空间特征紧密相关(图2, 底图). 虽然冬季太平洋水受风应力影响程度还不明确, 但是近年来向西的风的加强(海冰西向运动也随之加强)会阻碍冬季太平洋水直接向东延伸. 物理海洋环境的变化导致了北极太平洋扇区生物地球化学过程的变化.

1.3 北冰洋环流异常

北冰洋涛动(AOO)是揭示北冰洋环流变化的重要指示. 与北大西洋涛动(NAO)和北极涛动(AO)不同的是, 北冰洋涛动指数的定义基于模式模拟海表面高度的空间梯度, 其更能表征北冰洋海洋环流的

图1 (网络版彩色)1997~2017年9月份北极海冰范围变化趋势, 平均每10年减少13.2%(美国国家冰雪数据中心, <http://nsidc.org/>)

Figure 1 (Color online) Monthly September ice extent for 1979 to 2017 shows a decline of 13.2% per decade

图2 (网络版彩色)西北冰洋中太平洋冬季水路径变化. NOAA, Arctic report card: Update for 2011

Figure 2 (Color online) The changing pathways of the Pacific Winter Waters in the western Arctic Ocean

变化特征^[29]. 该指数用于评估北冰洋风驱动环流的强度和特征(顺时针/反气旋或者逆时针/气旋). 北冰洋涛动与许多环境参数密切相关^[29,30], 表征了加拿大海盆的年际变化^[31], 波弗特环流淡水含量^[32,33], 以及整个北冰洋淡水储量的变化^[34].

在AOO指数为负的年份, 即气旋式环流(CCR)主导下, 北冰洋中部被低压中心所占据, 气旋式风场驱动海冰以逆时针方向漂移. 在气旋式环流期间, 流向格陵兰-冰岛-挪威海的海冰(淡水通量的固体成分)和低盐度极地水(液态淡水通量)都有所增加^[29,30]. 异常高的淡水通量使得格陵兰海-冰岛海-挪威海(GIN)的海水淡化. 20世纪70~90年代在GIN观察到的极端盐度异常事件(great salinity anomaly)与北冰洋CCR环流形态下淡水向亚北极地区的输出密切相关^[35~37]. 而在AOO指数为正的年份, 北大西洋气旋向东移动, 导致到达北极中部的气旋减少. 在这种情形下反气旋式环流形态占据主导(ACCR), 高压中心占据北冰洋, 反气旋式风场驱动海冰顺时针漂移. 在反气旋环流主导期间, 埃克曼输送将淡水/太平洋冬季水辐聚在加拿大海盆波弗特流涡处^[33,38], 从而减少了向北大西洋亚北极地区(包括拉布拉多海和北欧海域)的淡水输运^[38].

早期的北冰洋涛动指数时间序列表明, CCR和ACCR这两种环流形态每隔5~7年发生更替, 涛动时间约为10~15年. 然而1997年以来这种格局发生了改变, ACCR连续18年(1997~2016年)在北极地区居于主

导地位(图3). 反气旋式环流异常现象体现在波弗特流涡自旋加速上, 这意味着更强的艾克曼辐聚, 从而有利于加拿大海盆上层海洋辐聚PWW, 影响范围变深、变广.

了解过去20年来北冰洋气候和环境的变化, 包括: 海冰快速融化、太平洋入流水增加和路径改变, 以及风驱动环流的变化, 有利于进一步分析北极系统内部变化的调控机制, 有助于读者理解2.2节对快速融冰驱动北冰洋碳循环变异的论述; 也有利于在3.2节就西北冰洋酸化海水快速增加的驱动作用进行更为清晰地分析.

2 北冰洋碳循环研究进展

2.1 近岸碳吸收和碳封存研究

我国北极科学考察期间的走航CO₂观测结果以及国外的相关研究都表明, 西北冰洋从陆架边缘海楚科奇海延伸到高纬度中央海盆海冰覆盖区, 在夏季具有较高的初级和群落生产力, 是大气CO₂的强汇区^[14,39,40]. 早期研究表明北冰洋对大气中CO₂的吸收速率为24 Tg C a⁻¹^[41]. Cai等人^[42]基于全球边缘海的分析数据, 认为整个北冰洋的大气CO₂吸收速率为41 Tg C a⁻¹. 然而Bates等人^[43]基于不同站位的DIC和TA计算得来的pCO₂值, 推算楚科奇海和整个北冰洋的CO₂海气通量分别为38和66 Tg C a⁻¹. 而最新的研究基于多年北冰洋历史数据并结合叶绿素a (chloro-

图3 北冰洋涛动指数. 数据下载自<http://www.whoi.edu/page.do?pid=66578>

Figure 3 Arctic Ocean Oscillation index. Data are from <http://www.whoi.edu/page.do?pid=66578>

phyll a)数据估算出整个北冰洋 CO_2 吸收速率为 $180 \pm 130 \text{ Tg C a}^{-1}$ ^[44]. 总体而言, 北冰洋对大气中 CO_2 吸收速率仍然存在很大不确定性.

Bates^[43]和Anderson等人^[18]认为北冰洋“陆架碳泵”驱动力来自富含营养盐的太平洋水向北部输入到楚科奇海, 陆架生成的有机碳和无机碳通过陆架坡折地带和狭窄的边缘区水平输运到邻近的加拿大海盆太平洋夏季水层(PSW, 50~100 m)和太平洋冬季水层(PWW, 100~200 m)封存, 维持楚科奇海陆架和陆坡常年较高的固碳水平. 在PSW层, 由上游白令海和楚科奇海陆架高生产力表层水(高有机碳含量, 低 CO_2 , 高 $\Omega_{\text{文石}}$)平流输送而形成, 同时也受原位光合作用影响, 主要以有机碳形式进行保存, 同时也观察到了 $\Omega_{\text{文石}}$ 的极大; 而在次表层PWW层, 则由流过陆架底层PWW, 进一步吸收有机物再矿化释放的额外 CO_2 的水体输运形成, 因此具有溶解无机碳(DIC)最大值, 主要以DIC形式进行碳封存, 同时引起 $\Omega_{\text{文石}} < 1$ 和低至7.85的pH^[19]. 然而, 早期的研究认为颗粒有机物的循环局限在陆架海域, 海盆次表层观测到的DIC最大值是由于冬季期间起源于高DIC太平洋水的陆架水的平流导致^[45]. 按照早期的观点, 则北冰洋海盆碳封存中陆架贡献的有效DIC比例将减小, 即深海碳封存效率将大打折扣. 因此, 楚科奇海表层海水 $p\text{CO}_2$ 变异性, 估算和预测 CO_2 海气通量, 不同季节陆架碳泵形成机制和运转效率, 伴随的酸化速率和调控机制还有很大的不确定.

由于 CO_2 是生物生产力和生物降解的主要指标, 也是主要的温室气体, 因而, 准确评估未来北极海域碳吸收量和埋藏通量的变化, 及其对气候变化的反馈, 都是极其重要的. 过去20年中, 全球气候变化引起北极区域环境发生快速变化, 实测资料研究表明, 河流输入^[15]、海冰融化^[14]和次表层上涌^[16]等造成的表层海-气 CO_2 通量变化以及PWW^[18]输运造成的陆架泵运转效率改变会影响楚科奇海陆架碳循环过程, 导致海洋酸化将进一步增强.

通过汇总过去16年来5个西北冰洋东侧航次数据, 分析发现全球气候变化引起了北冰洋环流模式异常, 北冰洋海冰覆盖面积快速后退驱动着太平洋冬季水的大范围入侵, 导致了西北冰洋次表层高DIC和低 $\Omega_{\text{文石}}$ 水体快速扩张^[19]. 伴随着海盆次表层PWW水储量增加, 碳埋藏通量将同时增加. 然而, 海盆次表层观测到的碳储量增加有可能是来自于冬季期

间起源于高DIC太平洋水的陆架水的平流导致^[45], 从楚科奇海当地海冰融化驱动生产的碳埋藏份额未必增加. 因此, 西北冰洋不同季节陆架泵形成机制和运转效率需要进一步的研究. 由于数据覆盖海区的限制性, 尚不清楚楚科奇海碳循环时空变异性及其相应的机制对环境变化的响应. 近年来北冰洋环境的快速变化对楚科奇海吸收大气 CO_2 能力, 碳埋藏效率及碳循环过程季节与年际变化造成什么样的影响? 这是当前北极碳循环研究的一个关键科学问题(图4).

2.2 快速融冰驱动海盆表层海水 CO_2 分压变异

基于海冰融化引起北冰洋陆架区域初级生产力增强和海表 CO_2 浓度降低, 导致海水吸收 CO_2 能力增强的观点, 曾有学者认为北冰洋广域的海盆将可成为减弱大气 CO_2 升高的一个新的 CO_2 强汇区^[39]. 然而我们的研究发现, 北冰洋海盆无冰开阔区域的 CO_2 吸收能力反而下降^[14]. 通过对南部加拿大海盆区进行高分辨率的表层走航 CO_2 测定, 发现海盆区的 CO_2 浓度相比以前观测值明显升高. 2009年的一项观测结果也表明北冰洋海盆区夏季融冰区的 CO_2 浓度并不像之前预测的那么低^[47]. 来自大气的 CO_2 入侵和较弱的生物吸收是导致表层海水 CO_2 浓度较高的主要原因^[14]. 由于这种较高的表层水 CO_2 浓度会阻碍大气 CO_2 的进一步入侵, 预计北冰洋海盆区在无冰的状况下不会成为大气 CO_2 的强汇^[14,47]. 然而上述研究结果不同于近期基于卫星遥感的研究结果, 这些卫星遥感观测资料显示, 近年来由于北冰洋夏季海冰快速消退, 北冰洋海盆区的初级生产力已经增加了大约10%^[13]. 而最新的一些研究则表明, 海冰刚融化时, 伴随着光照增强, 生产力的提升, 表层海水出现低的 CO_2 浓度, 这一阶段可显著增强表层海水 CO_2 的吸收能力^[48]. 因此, 针对海-气 CO_2 通量如何响应北冰洋夏季海冰快速消融这一重大科学问题, 目前尚存较大争议. 2008年中国第4次北极考察航次期间, 在 $143^\circ \sim 169^\circ \text{W}$ 从白令海峡到北冰洋中心海域观测到不同海冰覆盖条件下表层海水 $p\text{CO}_2$ 明显变化的现象(图5), 即: 在海冰覆盖超过90%的加拿大海盆高纬度区域(84°N 以北), $p\text{CO}_2$ 大约为270~280 μatm , 显著低于大气值(375 μatm); 在海冰初融期的加拿大北部海盆 $77^\circ \sim 81^\circ \text{N}$ 区域, $p\text{CO}_2$ 呈现低值(250~270 μatm); 而融冰时间较长, 处于无冰状态下的南部海盆开阔水域, $p\text{CO}_2$ 则大约为320~365 μatm , 接近大气值. 这

图4 北冰洋碳循环概念图^[46]. 北冰洋海洋酸化对海洋碳、营养盐和水循环的响应. 来自大气、陆地、原位生产以及其他大洋输送引起北冰洋碳增加, 通过内部、物理、生物地球化学过程驱动, 海洋酸化将进一步增强

Figure 4 A conceptual view for the Arctic Ocean carbon cycle^[46]. Arctic Ocean acidification is responding to changes in the marine carbon, nutrients and hydrological cycles. Increases in carbon are sourced from the atmosphere, land, local production and advection from other oceans. Ocean acidification can be further regulated or enhanced by internal, physical, biogeochemical processes

图5 2008年夏季西北冰洋表层海水 $p\text{CO}_2$ (μatm)走航观测图^[49]

Figure 5 Distribution of $p\text{CO}_2$ in μatm in the sea surface of western Arctic Ocean during the summer of 2008

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 μatm (即, $\Delta p\text{CO}_2 > 50 \mu\text{atm}$)为海水“低” $p\text{CO}_2$; 反

之, 海水“高” $p\text{CO}_2$ 为二者数值接近($\Delta p\text{CO}_2 < 50 \mu\text{atm}$). 因此, 我们提出了北冰洋在融冰过程中表层海水 $p\text{CO}_2$ 呈现“低-低-高”变异的假设.

在海冰完全覆盖的海区, 冰下水“低” $p\text{CO}_2$ 的驱动因素尚不确定. 据推测, 既有可能受控于水平运输过程, 又可能同时受控于海冰微孔隙间冰-气 CO_2 交换的降碳过程及冰下附着的冰藻的吸碳过程等调节机制^[50]; 海冰融化诱发冰藻等微生物的生物生产力增强和海冰里 CaCO_3 的溶解过程, 二者协同驱动可能是刚融冰海区表层“低” CO_2 的主要因素^[50,51]. 开阔水域在融冰后, 一方面太阳辐射增强, 海水升温导致表层 $p\text{CO}_2$ 显著上升; 另一方面表层海水吸收大气 CO_2 , 也会引起表层 $p\text{CO}_2$ 上升. 在加拿大海盆区, 由于低生物生产力和融冰的分层作用, 使得表层 CO_2 难以往下层转移. 因此大气 CO_2 快速入侵和较低的生物 CO_2 吸收是导致融冰后开阔水域表层“高” CO_2 的主要因素(图6)^[14,47]. 另一方面, 海冰融化稀释作用和大

图6 北冰洋表层海水 $p\text{CO}_2$ 影响因素的数据和模型模拟^[14]

Figure 6 Model simulations of factors influencing surface-water $p\text{CO}_2$ in the Arctic Ocean^[14]

气 CO_2 快速入侵, 表层水 $p\text{CO}_2$ 上升, 同时也带来了表层酸化水体的扩张, 引起 $\Omega_{\text{文石}}$ 和 pH 大范围下降^[19]. 现场观测的结果显示, 在北冰洋快速融冰条件下使得表层海水 $p\text{CO}_2$ 发生了明显的变异性, 我们的研究推断出不同融冰状态表层 $p\text{CO}_2$ 水平分布的规律性及主要驱动因子, 将有利于改善基于卫星遥感的快速融冰情景下北冰洋表层海水 $p\text{CO}_2$ 大尺度模拟和碳源汇外推评估模型的不确定性.

3 西北冰洋快速酸化

3.1 北冰洋酸化研究进展

目前, 欧盟、美国、加拿大、日本和韩国等的科学家已经对北冰洋海洋酸化的研究给予高度关注, 并对陆架海域和南部海盆海水的酸化状况、海冰融化、生物过程、太平洋冬季水入侵影响、陆坡“上升流”以及人为 CO_2 入侵的影响等进行了研究, 美国NOAA成立了海洋酸化研究中心, 策划北冰洋酸化研究的新一轮5年国际计划. 北冰洋酸化研究已成为全球海洋酸化研究的“领头羊”, 并成为近10年来北冰洋研究的热点之一^[52]. 以科学考察船为平台的现场调查, 获得走航和断面海水碳酸盐系统现场观测资料,

包括: 海水 $\Omega_{\text{文石}}$ 、 pH 、总溶解无机碳(DIC)、总碱度(TALK)和海-气 CO_2 交换, 是分析北冰洋海洋酸化的必要条件. Jutterström等人^[53]于1991~1997年首次对北冰洋文石和方解石饱和度进行大范围地观测. 北冰洋中上层水体 $\Omega_{\text{文石}}$ 基本处于过饱和状态. 因此, 至1997年北冰洋上层海洋仍然有利于钙化生物形成外壳或者骨骼. 然而, 近10年(2005~2013年)的调查研究 and 模型预测表明, 受气候变暖、海冰快速融化等环境变化影响, 靠近太平洋一侧的西北冰洋海域, 包括加拿大海盆表层海水和陆架折坡区^[17,19,54], 楚科奇海陆架底层水^[55], 东西伯利亚海底层水^[56], 波弗特海陆架区域^[57,58], 加拿大北极群岛^[58,59], 巴芬湾等区域, 海洋酸化速率较高. 相比之下, 受大西洋入流水影响的区域则酸化较为缓慢. 这些海域包括格陵兰海、巴伦支海、喀拉海和拉普捷夫海的外大陆架深水海域等^[60,61]. 因此, 对北冰洋酸化的研究主要集中在太平洋扇区的西北冰洋.

最近实测资料和模式研究的结果表明, CO_2 吸收、海冰融化和次表层水的上涌造成表层海水的酸化^[16,17,44,62], 太平洋冬季水输运造成的次表层海水的酸化^[17]以及北大西洋水携带人为 CO_2 下沉输运导致的中层水酸化^[61]. 然而, 国外的西北冰洋酸化研究

都是基于陆坡和南部海盆极其有限的数据开展,或者是在两个航次之间进行比较,尚未开展较大时间和空间尺度的观测研究。

3.2 西北冰洋酸化水体快速增加

Qi等人^[19]首次全面分析了1994~2010年间夏季西北冰洋从边缘海到深海海盆(最北达88°N)上层海洋(300 m以上)的 $\Omega_{\text{文石}}$ 分布与年代际变化。研究结果显示,西北冰洋断面上 $\Omega_{\text{文石}} < 1$ 的区域已经显著扩张,深度加深的同时还向北延伸到86°N的海域。其250 m的上层(0~250 m和70°~90°N) $\Omega_{\text{文石}} < 1$ 在断面上所占的比例从1994年5%一直扩张到2010年的31%,16年间断面面积增长了6倍,平均每年增长1.5%。

分析讨论“酸化”海水快速扩张的因素,对于表层海水(<30 m),我们的结果与前期报道结果一致^[14,63],是由于海-气 CO_2 交换和海冰融化导致。相关的盐度数据显示加拿大海盆上层海水(<300 m)从1994~2010年已经明显淡化。我们整理的TAlk与盐度比值结果再次证实太平洋水(这里是PWW)在西北冰洋次表层扩张。通过对1994~2010年期间采集的与本研究密切相关的盐度, N/P比值和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据进行量化分析发现次表层水 $\Omega_{\text{文石}}$ 的高低和太平洋冬季水所占的比例(f_{PW})呈显著的负相关关系^[19]。这些结果将次表层海水的酸化加强与PWW入侵加强置换大西洋水(AW)的过程联系在一起。因为太平洋水相对AW水,具有更低的盐度和TAlk,更高的DIC值。当PWW流过陆架底层,进一步吸收有机物再矿化释放的额外 CO_2 ,直接的结果是生物驱动的DIC储量增加和水体酸化增强(图8,箭头“B”)。PWW替换AW不仅会降低海水的盐度,还会显著降低海水TAlk对DIC的比率,降低 $\Omega_{\text{文石}}$ 。因太平洋入流水入侵增加直接导致了北冰洋酸化海水的蔓延(图8(b)箭头“P”)^[19]。

研究还发现,在PWW核心周围($f_{\text{PW}} > 90\%$),2010年北部海盆的 $\Omega_{\text{文石}}$ 值显著低于楚科奇海深海平原(Chukchi abyssal plain)和南部海盆(图8(b))^[19]。因此, $\Omega_{\text{文石}}$ 微小下降是北部海盆原位微生物呼吸消耗的有机物含量增多的结果。这是由于刚刚融冰阶段来自北部海盆表层初级生产力提高了水体有机物含量^[48,64,65](通过北部海盆次表层水体表观耗氧量(AOU)和营养盐浓度高于南部海盆指示)。最后,进一步分析了250 m左右的AW端元,发现在AW端元观测到2010年 $\Omega_{\text{文石}}$ 平均值比1994年低了

0.17 ± 0.03 (图8(b))^[19]。从1994~2010年,AW吸收来自大气人为 CO_2 将导致 $\Omega_{\text{文石}}$ 值下降0.09,通过营养盐和AOU数据估算的呼吸增加导致 $\Omega_{\text{文石}}$ 值进一步下降约0.03~0.06。因此,认为流入北冰洋该深度人为 CO_2 浓度的增加是观察到AW层的 $\Omega_{\text{文石}}$ 值下降主要原因(图8(b),箭头“A”)^[19]。

我们发现^[19]存在多个物理过程可以影响PWW扩张。首先,北冰洋和太平洋大尺度海表高度差引起白令海水从白令海峡向北运动进入到北冰洋^[26]。近年来白令海峡入流水流量已经增加了50%。在这同一时期,沿波弗特海陆坡向东的边界流流量减弱超过80%,这意味着更多的PWW和太平洋夏季水(PSW),在通过白令海峡后直接进入到楚科奇海北部和加拿大海盆(图2)。路径的改变很可能与近年来西风增强密切相关,使得向东的边界流减弱^[66]。第二个物理过程是结冰析盐过程,这来自冬季结冰期间阿拉斯加沿岸冰间湖生成的高密度水的贡献^[67]。PWW核心盐度 ≈ 32.9 ,且核心温度接近冰点温度(约 -1.5°C),其相对高密度的特性使其在向北运动过程中将沿着与其相匹配的等密度面潜入北冰洋海盆,或是受到涡旋卷携进入^[68]。近年来在北冰洋秋季出现了更多的无冰海域,表层海水温度迅速降低且降温时间提前,如果这伴随着沿岸冰间湖海冰的大量生成,那么将产生大量的高盐陆架水($S > 33$)^[69]。而基于生物地球化学示踪参数报道的北冰洋海盆太平洋水增加进一步支持了上述一系列证据^[10,70]。简而言之,西北冰洋海盆最近和过去相比,表层出现更多无冰状态,次表层则有更多的PWW。

此外,PWW入流水受到波弗特流涡(Beaufort Gyre, BG)的影响越发显著^[67]。1994年观测期间北冰洋以气旋式环流为主,波弗特流涡中心位于加拿大海盆东南角,其范围小辐聚水体的能力弱。然而1997年以后,反气旋式环流占据主导地位,并且维持了整整19年(1997~2015年)。即对应着从1997年开始到2010年间波弗特流涡呈现增强的趋势(图3),同时有利于更多的太平洋水在海盆中辐聚,在加拿大海盆的下降流显著增加(downwelling, Ekman Pumping),所有这些物理过程都将导致PWW范围扩张和变深(图9)。尽管1994年的观测断面位于加拿大海盆西部(波弗特流涡外围)(图7),而1998,2005,2010年的航次则全部位于流涡内部(尤其是东侧断面轨迹位于流涡中心附近),所有这些结果均可见从1990~2010年PWW(伴随文石不饱和和范围)显著扩张趋势(图9)。综

图7 1994–2010年间航次调查所获取的西北冰洋文石饱和度(Ω_{arag})纬向分布和各航次位置(c)^[19]

Figure 7 Latitudinal distributions of aragonite mineral saturation state (Ω_{arag}) in the western Arctic Ocean from multiple cruises during 1994–2010 and their locations^[19]

上, 大尺度气候变化模式是酸化增强的主要过程(图8)^[19].

4 展望

未来20年或者更久的时间尺度上, 北冰洋碳循环和海洋酸化将会发生什么变化呢? 对于表层海水(<30 m), 碳酸钙不饱和现象是由于近期吸收 CO_2 增加和海冰融化所导致^[14,19,62]. 加拿大海盆南部表层接近无冰的现状(高 $p\text{CO}_2$ 和 $\Omega_{\text{文石}} < 1$), 为未来北冰洋夏季无冰情境下的 CO_2 变异研究提供了一个很好的模拟样板. 模型研究表明, 北冰洋海冰将持续减少, 并预

测整个北冰洋将在2037年夏季出现无冰状态^[24]. 所以, 可以预测整个西北冰洋表层海水将在未来大约20年出现高 $p\text{CO}_2$, 同时伴随着文石不饱和; 在次表层海水(50–250 m), 同样观测到PWW(高DIC和 $\Omega_{\text{文石}} < 1$)海水在垂向上面积所占的比例显著增长, 平均每年增加1.5%. 如果这种趋势持续下去, 推测西北冰洋上层水体(<250 m)将于大约20年后全部变为碳酸钙(文石)不饱和. 另一方面, 与之相伴的碳埋藏将同步增加, 西北冰洋陆架碳泵运转效率将提升. 过去19年(1997–2015年)中北冰洋环流模式以反气旋式环流为主, 而不是按照1997年之前, 每隔5–7年在气旋和反气旋之

图8 西北冰洋文石饱和度影响因素的数据和模型模拟。(a) 表层水(约 0~50 m); (b) 次表层水(约 50~250 m)。 $f_{PW}(\%)$ 表示太平洋水的比例。红色箭头表示由B(生物过程), P(PWW入侵), I(融冰水)和A(大气 CO_2 入侵)混合的过程^[19]

Figure 8 Data and model simulations of factors influencing aragonite saturation in the upper waters of western Arctic Ocean. (a) Surface water (~0–50 m) and (b) subsurface water (~50–250 m). Here, $f_{PW}(\%)$ is the fraction of Pacific water. The red arrows represent processes denoted by P (PWW intrusion), B (biology), I (ice melt), and A (atmospheric CO_2 invasion)^[19]

图9 20世纪90年代初(a)~21世纪10年代(b)之间由环境和气候变化所驱动的西北冰洋文石饱和度变化范围的示意图^[19]

Figure 9 Schematic illustrating the extent of Ω_{arag} change driven by climate and environmental changes in the Arctic Ocean between the early 1990s and late 2000s^[19]

间交替演变(图3)。研究表明,反气旋模式一直占统治地位这一反常现象,与气候变暖引起的格陵兰淡

水输出通量异常单调增加现象密切相关^[71]。因此,全球气候变暖引起的格陵兰冰盖持续消失可能将间

接通过影响波弗特流涡,从而有利于加拿大海盆上层海洋聚集PWW,并且未来可能将持续下去. 尽管目前并没有报道预测北冰洋环流未来的变化趋势,然而如果环流模式转回到气旋模式,那么酸化海水向北扩张到更深和更靠近北部纬度的趋势将减弱,甚至可能会改为将酸化海水释放到北大西洋^[72]. 简言之,北冰洋碳储量增加和海水酸化范围大幅扩张的现象凸显出北冰洋过去20年环境快速变化的显著性.

在国际期刊*Science*, *Nature Climate Change*, *Deep Sea Research*, *Marine Chemistry*等发表系列成

果凸显中国北极科学考察研究的重要意义,同时也强调了海洋观测的巨大价值. 北冰洋是全球大洋研究最为匮乏的区域之一,原因在于海冰覆盖、自然条件恶劣、调查成本高,以及一些区域的非开放政策. 因此,在国际范围内协调北冰洋研究是非常必要的. 为了支持和协调海洋酸化的持续观测,基于全球海洋观测网计划(GOA-ON)和北冰洋酸化计划(AOA),我们提出一个以北冰洋和北太平洋酸化为重点海区的观测网计划(nPAOA-ON),希望以深入全面的科学研究服务于未来的区域管理和生态系统安全保障.

致谢 感谢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给予的支持.

参考文献

- 1 Ciais P, Sabine C, Bala G, et al. Carbon and other biogeochemical cycles. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al, eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 465–570
- 2 Feely R A, Sabine C L, Lee K, et al. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*, 2004, 305: 362–366
- 3 Orr J C, Fabry V J, Aumont O, et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 2005, 437: 681–686
- 4 Feely R A, Sabine C L, Hernandez-Ayon J M, et al. Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the continental shelf. *Science*, 2008, 320: 1490–1492
- 5 Riebesell U, Zondervan I, Rost B, et al. Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature*, 2000, 407: 36–367
- 6 Gao K, Aruga Y, Asada K, et al. Calcification in the articulated coralline alga *Corallina pilulifera*, with special reference to the effect of elevated CO₂ concentration. *Mar Biol*, 1993, 117: 129–132
- 7 Steele M J, Morison W, Ermold I R, et al. Circulation of summer Pacific halocline water in the Arctic Ocean. *J Geophys Res*, 2004, 109: C02027
- 8 Perovich D K, Richter-Menge J A. Loss of sea ice in the Arctic. *Ann Rev Mar Sci*, 2009, 1: 417–441
- 9 Wood K R, Bond N A, Danielson S L, et al. A decade of environmental change in the Pacific Arctic region. *Progr Oceanogr*, 2015, 136: 12–31
- 10 Yamamoto-Kawai M, McLaughlin F A, Carmack E C, et al. Freshwater budget of the Canada Basin, Arctic Ocean, from salinity, $\delta^{18}\text{O}$, and nutrients. *J Geophys Res*, 2008, 113, doi: 10.1029/2006jc003858
- 11 Woodgate R A, Weingartner T J, Lindsay R. Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: 2012gl054092
- 12 Peterson B J, Holmes R M, McClelland J W, et al. Increasing river discharge to the Arctic Ocean. *Science*, 2002, 298: 2171–2173
- 13 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
- 14 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
- 15 Tank S E, Raymond P A, Striegl R G, et al. A land-to-ocean perspective on the magnitude, source and implication of DIC flux from major Arctic rivers to the Arctic Ocean. *Glob Biogeochem Cycles*, 2012, 26: 1–15
- 16 Mathis J T, Pickart R S, Byrne R H, et al. Storm-induced upwelling of high $p\text{CO}_2$ waters onto the continental shelf of the western Arctic Ocean and implications for carbonate mineral saturation states. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: 127–137
- 17 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

- 18 Anderson L G, Tanhua T, Björk G, et al. Arctic ocean shelf–basin interaction: An active continental shelf CO₂ pump and its impact on the degree of calcium carbonate solubility, *Deep Sea Res Part I*, 2010, 57: 869–879
- 19 Qi D, Chen L, Chen B, et al. Increase in acidifying water in the western Arctic Ocean. *Nat Clim Change*, 2017, 7: 195–199
- 20 Dickson B. All change in the Arctic. *Nat Int Wkly J Sci*, 1999, 397: 389–391
- 21 Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 2010, 464: 1334–1337
- 22 Zhao J P, Shi J X, Wang Z M, et al. Arctic amplification produced by sea ice retreat and its global climate effects. *Adv Earth Sci*, 2015, 30: 985–995 [赵进平, 史久新, 王召民, 等. 北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应. *地球科学进展*, 2015, 30: 985–995]
- 23 Stroeve J, Holland M M, Meier W, et al. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: 1–11
- 24 Wang M, Overland J E. A sea ice free summer Arctic within 30 years? *Geophys Res Lett*, 2009, 36: 550–556
- 25 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
- 26 Coachman L K, Aagaard K, Tripp R B. Bering Strait. The regional physical oceanography. Seattle: University of Washington Press, 1975. 172
- 27 Tremblay J É, Gratton Y, Carmack E C, et al. Impact of the large-scale Arctic circulation and the North Water Polynya on nutrient inventories in Baffin Bay. *J Geophys Res*, 2002, 107: 26-1–26-14
- 28 Wijffels S E, Schmitt R W, Bryden H L, et al. Transport of freshwater by the oceans. *J Phys Oceanogr*, 2010, 222: 155–162
- 29 Proshutinsky A Y, Johnson M A. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean. *J Geophys Res*, 1997, 102: 12493–12514
- 30 Proshutinsky A, Polyakov I, Johnson M. Climate states and variability of Arctic ice and water dynamics during 1946–1997. *Pol Res*, 1999, 18: 135–142
- 31 Carroll M L, Jr W G A, Levin B S, et al. Pan-Svalbard growth rate variability and environmental regulation in the Arctic bivalve *Serripes groenlandicus*. *J Mar Syst*, 2011, 88: 239–251
- 32 Proshutinsky A, Krishfield R, Timmermans M L, et al. The Beaufort Gyre fresh water reservoir: State and variability from observations. *J Geophys Res*, 2009, 114, doi: 10.1029/2008 JC0055104
- 33 Krishfield R A, Proshutinsky A, Tateyama K, et al. Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle. *J Geophys Res*, 2014, 119: 1271–1305
- 34 Rabe B, Karcher M, Kauker F, et al. Arctic Ocean basin liquid freshwater storage trend 1992–2012. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 961–968
- 35 Dickson R R, Meincke J, Malmberg S A, et al. The great salinity anomaly in the northern North Atlantic 1968–1982. *Prog Oceanogr*, 1988, 20: 103–151
- 36 Häkkinen S. Arctic source for great salinity anomaly: A simulation of the Arctic ice ocean system for 1955–1975. *J Geophys Res*, 1993, 98: 16397–16410
- 37 Belkin I M, Levitus S, Antonov J, et al. “Great Salinity Anomalies” in the North Atlantic. *Progin Oceanogr*, 1998, 41: 1–68
- 38 Proshutinsky A, Bourke R H, McLaughlin F A. The role of the Beaufort Gyre in Arctic climate variability: Seasonal to decadal climate scales. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 15-1–15-4
- 39 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
- 40 Gao Z, Chen L, Sun H, et al. Distributions and air-sea fluxes of carbon dioxide in the Western Arctic Ocean. *Deep Sea Res I*, 2012, 81-84: 46–52
- 41 Anderson L G, Olsson K, Chierici M. A carbon budget for the Arctic Ocean. *Glob Biogeochem Cycles*, 1998 12: 455–465
- 42 Cai W J, Bates N R, Guo L, et al. Carbon Fluxes Across Boundaries in the Pacific Arctic Region in a Changing Environment. *The Pacific Arctic Region*. Netherlands: Springer, 2014. 199–222
- 43 Bates N R. Air-sea CO₂ fluxes and the continental shelf pump of carbon in the Chukchi Sea adjacent to the Arctic Ocean. *J Geophys Res*, 2006, 111: C10013
- 44 Yasunaka S, Siswanto E, Olsen A, et al. Arctic Ocean CO₂ uptake: An improved multiyear estimate of the air-sea CO₂ flux incorporating chlorophyll a concentrations. *Biogeosciences*, 2018, 15: 1643–1661
- 45 Cooper L W, Whitley T E, Grebeier J M, et al. The nutrient, salinity, and stable oxygen isotope composition of Bering and Chukchi Seas waters in and near the Bering Strait. *J Geophys Res*, 1997, 102: 12563–12573
- 46 Bellerby, Richard G J. Oceanography: Ocean acidification without borders. *Nat Clim Change*, 2017, 7: 241–242
- 47 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

- 48 Chen B. Responses of marine carbonate system to warming and sea-ice retreat in the Pacific sector of the Arctic Ocean. Doctor of Philosophy Thesis. Georgia: University of Georgia, 2015
- 49 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 [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]
- 50 Islam F, Degrandpre M D, Beatty C M, et al. Sea surface $p\text{CO}_2$ and O_2 dynamics in the partially ice-covered Arctic Ocean. *J Geophys Res*, 2017, 122: 1425–1438
- 51 Rysgaard S, Glud R N, Lennert K, et al. Ikaite crystals in melting sea ice—implications for $p\text{CO}_2$ and pH levels in Arctic surface waters. *Cryosphere*, 2012, 6: 901–908
- 52 Fabry V J, Mcclintock J B, Mathis J T, et al. Ocean acidification at high latitudes: The Bellwether. *Oceanography*, 2009, 22: 160–171
- 53 Jutterström S, Anderson L G. The saturation of calcite and aragonite in the Arctic Ocean. *Mar Chem*, 2005, 94: 101–110
- 54 Bates N R, Mathis J T, Cooper L W. Ocean acidification and biologically induced seasonality of carbonate mineral saturation states in the western Arctic Ocean. *J Geophys Res*, 2009, 114, doi: 10.1029/2008jc004862
- 55 Bates N R, Orchowska M I, Garley R, et al. Summertime calcium carbonate undersaturation in shelf waters of the western Arctic Ocean—how biological processes exacerbate the impact of ocean acidification. *Biogeosciences*, 2013, 10: 5281–5309
- 56 Semiletov I, Pipko I, Gustafsson Ö, et al. Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon. *Nat Geosci*, 2016, 9: 361–365
- 57 Mathis J T, Cross J N, Bates N R. Coupling primary production and terrestrial runoff to ocean acidification and carbonate mineral suppression in the eastern Bering Sea. *J Geophys Res*, 2011, 116, doi: 10.1029/2010jc006453
- 58 Chierici M, Fransson A. Calcium carbonate saturation in the surface water of the Arctic Ocean: Undersaturation in freshwater influenced shelves. *Biogeosciences*, 2009, 6: 2421–2431
- 59 Yamamoto-Kawai M, McLaughlin F, Carmack E. Ocean acidification in the three oceans surrounding northern North America. *J Geophys Res*, 2013, 118: 6274–6284
- 60 Popova E, Yool A, Coward A, et al. Regional variability of acidification in the Arctic: A sea of contrasts. *Biogeosci Discuss*, 2013, 10: 2937–2965
- 61 Luo Y, Boudreau B P, Mucci A. Disparate acidification and calcium carbonate desaturation of deep and shallow waters of the Arctic Ocean. *Nat Commun*, 2016, 7, doi: 10.1038/ncomms12821
- 62 Robbins L L, Wynn J G, Lisle J T, et al. Baseline monitoring of the Western Arctic Ocean estimates 20% of the Canadian Basin surface waters are undersaturated with respect to aragonite. *PLoS One*, 2013, 8: e73796
- 63 Steinacher M, Joos F, Frolicher T, et al. Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. *Biogeosciences*, 2009, 6: 515–533
- 64 Arrigo K R, Swift J H. Massive phytoplankton blooms under Arctic sea ice. *Science*, 2012, 336: 1408
- 65 Lee S H, Joo H M, Liu Z, et al. Phytoplankton productivity in newly opened waters of the Western Arctic Ocean. *Deep Sea Res II*, 2012, 81–84: 18–27
- 66 Brugler E T, Pickart R S, Moore G W K, et al. Seasonal to interannual variability of the Pacific water boundary current in the Beaufort Sea. *Prog Oceanogr*, 2014, 27: 1–20
- 67 Itoh M, Shimada K, Kamoshida T, et al. Interannual variability of Pacific Winter Water inflow through Barrow Canyon from 2000 to 2006. *J Oceanogr*, 2012, 68: 575–592
- 68 Pickart R S, Weingartner T J, Pratt L J, et al. Flow of winter-transformed Pacific water into the Western Arctic. *Deep Sea Res II*, 2005, 52: 3175–3198
- 69 Weingartner T, Aagaard K, Woodgate R, et al. Circulation on the north central Chukchi Sea shelf. *Deep Sea Res II*, 2005, 52: 3150–3174
- 70 Jones E P, Anderson L G, Jutterström S, et al. Pacific freshwater, river water and sea ice meltwater across Arctic Ocean basins: Results from the 2005 Beringia Expedition. *J Geophys Res*, 2008, 113, doi: 10.1029/2007jc004124
- 71 Proshutinsky A, Dukhovskoy D, Timmermans M L, et al. Arctic circulation regimes. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2015, 373, doi: 10.1098/rsta.2014.0160
- 72 Giles K A, Laxon S W, Ridout A L, et al. Western Arctic Ocean freshwater storage increased by wind-driven spin-up of the Beaufort Gyre. *Nat Geosci*, 2012, 5: 194–197

Summary for “北冰洋海洋酸化和碳循环的研究进展”

Review on ocean acidification and carbon cycling in the Arctic Ocean

Di Qi¹, Liqi Chen^{1*}, Weijun Cai², Zhongyong Gao¹, Baoshan Chen², Wenli Zhong³, Hao Wei⁴, Heng Sun¹, Yuanhui Zhang¹, Suqing Xu¹ & Yixing Zhang^{1,5}

¹Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry of State Oceanic Administration (SOA), Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China;

²School of Marine Science and Policy, University of Delaware, Newark 19716, USA;

³Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

⁴School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

⁵Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Jinan 250100, China

* Corresponding author, E-mail: chenliqi@tio.org.cn

The uptake of anthropogenic CO₂ by the ocean decreases seawater pH and carbonate mineral aragonite saturation state (Ω_{arag}), a process known as Ocean Acidification (OA). This could be detrimental to marine organisms and ecosystems. It is well known that the Arctic Ocean is a “Bellwether” for prospective changes in the global ocean acidification. Over the past two decades, global warming and climate change have caused rapid changes in the Arctic, especially in the western Arctic Ocean. These changes include rapid sea ice retreat and increases in sea surface temperatures, Pacific water inflow, freshwater storage, primary production, and surface CO₂ concentrations. Projected climate change processes are thought to amplify OA in the Arctic Ocean, and absorption of CO₂ and carbon burial in the arctic ocean makes it more rapid and significant in response to climate change than other basins. Based on the advantages of high-level China-US cooperation over the past decade, thorough and complete work of data collection, sorting and analysis for the 7 Chinese Arctic Research Expedition (CHINARE-Arc) cruises from 1999 to 2016 with the icebreaker R/V Xuelong, and a supplement of other US database collected during 1994–2011 which have provided opportunities for Chinese and U.S. scientists to investigate the status and changes of the Arctic Ocean. In this review, we first summarize the climate and environmental change in the arctic over the past 20 years. These changes have important implications for the carbon cycle and ocean acidification. With respect to carbon cycle, we summarize influences of rapidly changing sea-ice and growing Pacific inflow on the absorption of atmospheric CO₂ in the Chukchi Sea, the response of deep-ocean carbon sequestration (continental shelf pump) to the changing environment, and to summarize a hypothesis of “low-low-high” variation trend in sea surface water $p\text{CO}_2$ along a decreasing ice-cover gradient across three different zones in the western Arctic Ocean under a rapid sea ice melting scenario in the summer. In particular, high resolution survey of sea surface CO₂ level (high $p\text{CO}_2$) were reported across the Canada Basin, showing a great increase over earlier observations. Contrary to the current prediction, the Arctic Ocean basin would not become a large atmospheric CO₂ sink under ice-free conditions. In addition, we review the rate and scale of ocean acidification in the western Arctic Ocean and evaluate links to environmental and climate change over the past two decades. Our new research indicates that, between the 1990’s and 2010, acidified waters has increased in the upper 250 m from 5% to 31% of the total area north of 70°N. The Arctic Ocean is the first open ocean where we see such a large-scale increase in acidification, more than two times faster than that observed in the Pacific or Atlantic oceans. Tracer data and model simulations suggest that increased Pacific Winter Water (PWW), driven by retreating sea ice and anomalous circulation patterns in the summer season, is primarily responsible for this OA expansion. Finally, the future changes of carbon cycling and ocean acidification in the context of climate change are outlined.

CO₂, ocean acidification, climate change, rapid sea ice retreat, Arctic Ocean

doi: 10.1360/N972018-00334