北极快速变化对北冰洋碳汇机制和过程的影响

陈建芳*, 金海燕, 李宏亮, 张海生, 季仲强, 庄燕培, 白有成

国家海洋局第二海洋研究所, 国家海洋局海洋生态系统和生物地球化学重点实验室, 杭州 310012

* 联系人, E-mail: jfchen@sio.org.cn

2014-04-30 收稿, 2014-10-13 接受, 2015-01-14 网络版发表

极地专项(Chinare 2014-03-04, Chinare 2014-04-03)、极地科学战略研究基金(2012-01-04)和国家自然科学基金(41276198, 91128212, 41076135)资助

摘要 北冰洋是全球海洋碳循环研究的关键地区之一, 其独特的地理位置决定了它是开展海陆统筹研究碳汇的一个绝佳的场所: 地形相对封闭, 边缘有世界上最大的陆架区, 外围有广袤的陆地冻土层和大河输入. 近年来, 由于全球变暖、海冰消退、北极快速变化所引起的一系列大气、冰雪、海洋、陆地和生物等多圈层相互作用过程的变化, 已经对北极地区碳的源、汇效应产生了深刻影响. 这种变化不仅体现在由于陆地冻土圈变化所引起的甲烷和二氧化碳释放, 而且, 随之而来的海水层化、混合和环流变化, 陆源有机碳和营养物质入海通量的增加, 改变了海洋二氧化碳“物理泵”、“生物泵”和“微型生物碳泵”作用的强度、方式, 以及海洋原有的海洋碳储库构成, 很可能对全球海陆碳源汇格局产生重要影响. 本文主要从北极快速变化所引起的海洋生物泵过程和陆地碳输入的变化来讨论全球变暖对沉积碳埋藏的影响.

关键词

北极快速变化
生物泵
陆源有机碳
沉积碳埋藏

温室气体CO₂的去处, 不仅是国际学术界的一个前沿研究领域, 也是目前各国政府争论的热门话题. 两极地区是全球海洋碳循环研究的关键地区之一. 由于南大洋存在地球上最大的高营养盐、低叶绿素(HNLC)区域^[1,2], 早期极区海洋碳循环的工作主要集中在南大洋^[3-5]. 近年来, 北极快速变化所引起的一系列大气、冰雪、海洋、陆地和生物等多圈层相互作用过程的变化^[6-9], 不仅导致包括我国在内的中高纬度国家极端气候事件的增加^[10,11], 生态系统动力学过程和渔业资源时空格局改变^[12,13], 而且对北极地区碳的源、汇效应也产生了深刻影响^[14-17]. 究其原因, 首先, 由于全球变暖, 海水温度上升, 夏季海冰的融化加剧, 北冰洋营养盐丰富的陆架海无冰海域面积增加, 浮游生物光限制消失, 上层营养盐被充分利用, 上层海洋生态系统结构和“生物泵”过程正经

历巨大的变化, 海洋“生物泵”过程将可能更高效地运转^[18]; 另一方面, 这些快速变化也很可能会引起新近提出的另一种储碳机制“微型生物碳泵”^[19,20]的变化. 其次, 冰雪融化、海面升温 and 淡水输入增加, 也改变了北冰洋的海水混合、水团运动和大尺度的环流过程^[21], 从而可能导致碳的“物理泵”过程的改变^[22]. 最后, 北冰洋冻土层的融化和退化, 一方面造成北极、亚北极地区陆地甲烷和二氧化碳等温室气体大量释放到大气中^[23-25]; 另一方面, 冻土层温度升高和降雨增加, 导致陆地风化作用加强^[26], 大量的陆源颗粒有机碳(POC)、溶解无机碳(DIC)、溶解有机碳(DOC)和营养盐随河流入海^[27], 不仅改变了原有的海洋碳储库构成, 而且增加的入海陆源营养盐也可以改变陆架海域“生物泵”和“微型生物碳泵”^[19,20]的运转, 从而造成北极地区海陆碳源汇格局的改变.

引用格式: 陈建芳, 金海燕, 李宏亮, 等. 北极快速变化对北冰洋碳汇机制和过程的影响. 科学通报, 2015, 60: 3406-3416

Chen J F, Jin H Y, Li H L, et al. Carbon sink mechanism and processes in the Arctic Ocean under arctic rapid change (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3406-3416, doi: 10.1360/N972014-00397

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972014-00397>

我国的黄东海陆架是仅次于北冰洋大陆架的世界第二大陆架,其海洋碳汇机制和过程也深受陆地气候、风化作用、人类活动、环流改变和与此密切相关的海洋生物地球化学过程影响。因此,了解北冰洋海陆联动的碳汇机制和过程对于我国陆架边缘海的相关研究具有重要启示意义。

1 北冰洋:开展陆海统筹碳汇研究的理想场所

北冰洋独特的地理位置决定了它是开展海陆统筹研究碳汇的一个绝佳的场所。北冰洋与其他大洋的不同之处在于:它周边有世界上最大的陆架包围,

陆架边缘海面积几乎占了整个北冰洋的1/2。北冰洋另一个特点与地中海极为相似,即它是一个半封闭的大洋,仅有少数通道与其他大洋相连,与大西洋相连的主要有弗拉姆海峡(Fram Strait)、巴伦支海和加拿大群岛;与太平洋只有水深50 m的白令海峡(Bering Strait)相连(图1)。北冰洋周围有超过其本身面积的流域盆地,包括POC, DOC, DIC在内的溶解和颗粒物质可以随径流带到北冰洋。输入北冰洋的河水总量为3336 km³ a⁻¹,大约为长江径流量的3.5倍。其中4大河流占了总径流量的60%以上:勒拿河(Lena River) 533 km³ a⁻¹,鄂毕河(Ob River) 419 km³ a⁻¹,叶尼塞河(Yenisey River) 562 km³ a⁻¹,马更些河(Mackenzie

图1 北冰洋周围的河流、海水交换通道和内部环流。绿线、红线、蓝线分别代表太平洋、大西洋入流、河流输入,粉线表示北冰洋内部环流
Figure 1 Major rivers around the Arctic Ocean, seawater exchange channels and circulation of surface water. Green, red and blue lines represent input of Pacific, Atlantic and river, respectively; pink line represents internal circulation

River) $440 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$ [28]。周边陆地大体积的淡水注入、巨大的大陆架体系、随季节而变的海冰覆盖和输运情况构成了北冰洋独特的区域海洋环境,也决定了北冰洋陆地有机碳保存、埋藏和海洋“生物泵”与“微型生物碳泵”[19]运转效率。北冰洋另一个明显的特征是呈块状覆盖的海冰,它的面积夏季末(9月)最小(图2),冬季末(3月)最大。海冰分布的季节、年际变化主要受气温与环流控制。海冰不仅影响海洋生物过程,而且还可以把其从近岸裹挟的陆源沉积物一直带到夏季海冰退缩的最北缘。

北冰洋碳汇过程有几个非常显著的特点:(1) 陆源有机碳搬运和埋藏不仅受陆地风化作用和径流影响[29~31],而且受近岸侵蚀作用[32]和冰的搬运用[33~35]的影响;(2) 由于光和温度的限制,全年高生物生产力的季节主要集中于夏季,海洋“生物泵”过程很大程度上受控于海冰的覆盖情况;(3) 上述2个过程对气候变化响应十分敏感:即当全球变暖,陆地风化作用加强时,不仅会通过向北冰洋输入大量的陆源有机碳(POC, DOC)增加陆地碳在海洋碳储库构成;而且,其同时输入的营养盐也会在广袤的北冰洋陆架区促进“生物泵”的运转,改变“微型生物碳泵”[19,20]的储碳效应,从而改变北冰洋的碳汇过程。

2 全球变暖对北冰洋“生物泵”过程的影响

我国最近几次北极科学考察期间走航 CO_2 观测结

果[16,36,37]表明,夏季西北冰洋从楚科奇海到高纬度中央海盆的海冰覆盖区, pCO_2 总是在 $300 \mu\text{atm}$ 以下,表明北冰洋夏季是大气 CO_2 的汇区。随着海冰覆盖度的减少,北冰洋,尤其是其巨大的陆架区很可能成为全球 CO_2 的重要汇区[38~40]。估算显示,在气温持续变暖条件下,如果夏季欧亚海盆区海冰全部消融,每年海洋上表层100 m对大气将增加 50 g C m^{-2} 的吸收值[41]。

一般认为北冰洋“生物泵”过程对调控该海域海气 CO_2 通量起着十分关键的作用。众所周知,光合作用的主要控制因素是光、营养物质和温度等环境参数。在北极海域,海冰覆盖程度、持续时间、海水温度、水团运动和营养盐供应是制约北极海区浮游植物类群及生产力的重要因素[42,43]。北冰洋浮游植物群落结构区域性差异显著,陆架富营养海域主要由粒径较大的小型浮游植物(如硅藻)占据,而微型和微微型浮游植物则是海盆寡营养海区主要的群落组成[44]。20世纪80年代之前,北冰洋广袤的陆架区尽管有可观的营养物质,但由于海冰覆盖(光限制)、温度很低等因素,在一年的大部分时间里其生物生产力较低。但最近几十年北极正在发生快速的变化[6,7,9]:海冰范围每10年减小2.9%,厚度减少3%~5%,多数海区海冰覆盖度持续减小;除加拿大东部岛群区外,北极地面持续升温,广大陆地地区每10年变暖 0.5°C ,导致冻土层退化和风化作用增强,1972年以来春季欧亚冰雪盖减小10%。由此引起河流径流量增大,输向北

图2 2012年9月海冰覆盖情况。黄线表示1979~2000年9月平均海冰范围,图片来源 www.arctic.noaa.gov

Figure 2 Sea ice extent in September 2012. Yellow line indicates the mean extent of the ice cover for the period 1979–2000, source from www.arctic.noaa.gov

冰洋陆架的营养盐增加. 海冰覆盖度减少(光限制减少), 径流输入增加(营养物质增加), 与北大西洋与北太平洋的水交换改变等因素, 促使北极碳的生物地球化学循环正在发生明显的变化. 近10年来的研究表明, 夏季融冰季节, 北冰洋部分陆架区是全球生产力最高的海区之一^[45,46]. 尤其是我国北极考察的主要海域楚科奇海和加拿大海盆边缘是近十几年来成为北冰洋海冰减小幅度最大的地方^[47]. 我国自1999年以来的5次北极考察观测结果表明, 楚科奇海水柱平均叶绿素a浓度可达2.5~2.8 $\mu\text{g/L}$, 比通常情况下我国黄东海夏季的生物量还要高. 叶绿素a分级及浮游生物鉴定均表明, 大于20 μm 的部分可以占到70%以上^[48,49], 表明浮游生物以大的颗粒为主, 大的颗粒粒径结构意味着高的生物泵输出效率.

“微型生物碳泵”是最近提出的一种储碳新机制^[19]. 有别于传统的生物泵, 这种机制可以在微型生物作用下把海洋活性有机质转化为惰性的溶解有机碳, 随着海水下沉, 可以使碳在海洋中储存千百年的时间. 而且这种储碳机制与其他生物地球化学过程如营养盐的输入有密切关系^[20]. 遗憾的是, 目前相关研究在北冰洋开展得非常少. 尽管目前无法回答北极快速变化究竟能使“微型生物碳泵”加强还是减弱, 然而, 在北极目前发生的温度快速升高、淡水和营养盐输入增加、深层水形成受阻等影响下, “微型生物碳泵”发生重大变化是肯定的. 因此, 今后开展北极快速变化下生物泵和微型生物碳泵耦合研究将具有十分重要的意义.

与其他中低纬度海域不同, 北冰洋生态系统中对生物泵有贡献的海洋浮游生物除了极地最常见的浮游硅藻、甲藻、绿藻、隐藻、定鞭藻等^[44,50~52]以外, 冰藻的生物量也相当可观. 海冰本身是一个独特的生态系统, 一般来说, 海冰生物主要分布于海冰底部, 海冰硅藻等主要寄居在网状的卤水通道中, 主要靠利用卤水中的营养盐和透过冰体的阳光进行光合作用合成有机物. 每年夏天, 随着海冰的融化, 海冰不仅向海水提供直接的生源颗粒通量, 而且也向水体提供藻类“种子”和营养物质^[53]. 在冰边缘区, 与海冰消融过程相关的初级生产量可高达60%以上^[54], 在海冰覆盖度大于90%海域, 海冰生物对生物初级生产的贡献率高达60%^[55]. 如在北冰洋中部海域常年海冰覆盖的区域, 由于光限制, 初级生产力很低^[56], 那里冰藻一般生长在海冰底部几厘米厚的位

置^[57], 对初级生产力产生的主要贡献可达57%^[58]. 随着气候变暖, 海冰逐渐从永久冰变为多年冰, 甚至一年冰^[59]. 因此, 冰藻的生产力也可能改变. 因为一年期海冰比多年冰能支持更高的生物量, 与海冰相关的生产力也将会增加^[55]. 因此, 在全球变暖背景下, 冰藻的变化将可能改变该区域有机碳的收支^[60~63].

另外, 食物链的长短也是决定生物泵效率的一个主要因素. 融冰初期, 在北极高生产力海区, 由于水深较浅、食物链比较短, 一旦低级营养层发生变化, 则很快会影响到食物链的结构. 如冰融初期, 冰藻藻华后大量沉降到海底, 为底栖生物提供了丰富的食物, 底栖食物链发育. 而海冰减少、开阔海出露时间较长时, 浮游生态系统可以充分发展, 食物链加长, 可由底栖食物链为主转向浮游食物链为主, 从而影响北极整个海洋生态系统结构^[42,64,65]和生物泵的运作.

沉积碳埋藏是生物泵作用的最终归宿. 白令海和楚科奇海陆架沉积物有机质中海洋自生源主要由硅质生物组成^[49], 并且大粒径(>20 μm)的硅藻是楚科奇海水体中生物硅现存量的主要贡献者^[66]. 早期的研究表明, 楚科奇海“生物泵”向沉积物的输出效率要远远高于其他陆架区^[67]. Chen等人^[68]通过短柱样的初步研究也表明楚科奇海是一个高效的有机碳汇区. 在我国北极考察中, 我们发现楚科奇海沉积叶绿素a的含量要比长江口赤潮多发区沉积物中高1~2个数量级^[69~71], 而且高的叶绿素a含量一直持续到短柱样的底部(20~35 cm的深度), 北极海域由于浮游生物粒径较大易于沉降输出, 以及温度较低有利于有机质保存等因素, 使得生物泵的输出效率(到达沉积物的有机碳与初级生产力的比值)比其他海区要高出很多^[67,68,72,73]. 这从另一侧面佐证楚科奇海沉积物是生物有机碳的高效汇区.

3 全球变暖对陆源有机碳输入的影响

环绕北冰洋广布着苔原等陆生植物和巨厚的、陆源有机质含量十分丰富的冻土层^[74]. 这种特殊的地理位置、特有的生态环境和对气候变化响应的“放大效应”, 使其成为地球全球变化最为敏感的地区之一. 多种模拟结果显示, 北极近表层永冻土面积将由20世纪末的约1000万平方千米下降到21世纪末的不到100万平方千米^[26,75]. 冻土层的退化, 不仅意味着土壤中的甲烷和CO₂等温室气体的释放^[76], 而且将使

大量的陆地有机质通过陆地冰融水和径流等途径输向北冰洋^[31,77]. 注入北冰洋的各大河流总径流量占全球径流的10%以上^[78], 河流径流和漂浮的海冰可以携带陆地、近岸和陆架的沉积物输向北冰洋各处, 对北极陆源有机质的沉积和埋藏过程产生深刻的影响. 在北极快速变化的背景下, 北冰洋也是全球海洋碳收支评估主要的不确定地区之一^[16,31,79].

同时, 全球变暖和陆地环境变化会造成冻土层退化、土壤风化和沿岸侵蚀加强、陆坡稳定性结构变化, 进而导致大量固定在冻土层中的古老和现代有机质被释放出来, 通过径流输入、海冰搬运、海流输送使陆源有机碳在北冰洋进行大规模、长距离和短期沉积的再分配^[80]. 因此, 全球变暖背景下, 北冰洋陆源有机质的输入与埋藏正在发生着巨大的变化^[81], 北极海域陆源有机碳库追踪和评估也愈发显示出其重要的地位^[82-84]. 如德国极地与海洋研究所(AWI)牵头的重大研究计划PACES(polar regions and coasts in the Changing earth system, 2009~2014)中就将“冻土层退化、碳的周转在近海、陆架和深海环境中的角色及其对碳收支的影响”列为核心科学研究内容. 但其研究的重点区域是在北冰洋的欧洲一侧, 西北冰洋的

工作涉及较少.

北极陆源有机质主要通过以下途径进入北冰洋: (1) 河流的输入; (2) 海岸侵蚀; (3) 漂浮海冰携带输入; (4) 大气输入(图3). 北极河流每年通过径流输入至北冰洋的颗粒有机质就有 $12 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$ ^[29]. 关于河流陆源有机碳的输出通量及其在河口的埋藏, 已有文献报道^[30,31]. 此外, 沿岸侵蚀也是沉积物输入的一个重要来源, 尤其在北冰洋的中西部陆架区^[32]. 与一般大陆边缘不同, 北冰洋除了海流和浊流把沉积物搬运至外海外, 一个很重要的途径是通过近岸高混浊区海水结冰、海冰的漂浮和融化向外输送^[85]. 但陆源物质通过海冰海岸侵蚀和海冰搬运进入北冰洋的研究还相对比较少^[31]. 以往的陆源有机质输入研究主要集中于北冰洋周边的大河口, 在这些河口如马更些(Mackenzie)河口, 河流输入的贡献较为重要, 而沿岸侵蚀则相对弱些^[33]. 实际上, 北极海域沿岸侵蚀的陆源输入被严重低估. 如在阿拉斯加沿岸的科尔维尔(Colville)河口, 海冰沿岸侵蚀作用对波弗特海的沉积物量的贡献是河流输入的7倍^[86]. 在北冰洋俄罗斯一侧的拉普捷夫(Laptev)海的部分海岸, 海冰沿岸侵蚀作用可以达到河流搬运的2倍^[32].

图3 北冰洋有机碳输入示意图. 据 Stein 等人^[85]改绘

Figure 3 Schematic diagram of organic carbon input in the Arctic Ocean. Modified from Stein et al.^[85]

漂浮的海冰作为陆源物质的载体,其进退也影响河流对陆源有机碳的输运。大量研究表明,近海海冰中携带的沉积物往往可以达到10~100 mg/L,特别在北冰洋广泛分布的周边陆架区更是如此^[34,87]。因此,海冰对陆源有机碳的搬运过程是北极沉积碳埋藏体系中最重要的一部分^[33]。正是由于海冰的作用,使得陆源有机质跨海盆尺度的搬运成为可能,如陆源物质可以穿越北冰洋,从西伯利亚搬运至格陵兰^[34],使北极地区的陆源有机物搬运至欧洲海域。在北冰洋的部分深海沉积物中,从海冰融化释放的沉积物占了全新世沉积的大部分^[35]。最后一个输入途径是大气。据估计,大气沉降对北冰洋沉积物的贡献很有限,在马更些河口陆架区,大气沉降通量只有 $1.4 \times 10^4 \text{ t a}^{-1}$,大约只有河流输送量的万分之一,即便是在北冰洋中心区,大气沉降的沉积物也只占1%~5%^[88],因此,大气输入对沉积有机碳的堆积可以忽略。Schubert等人^[89]发现,在北冰洋冰期与间冰期的旋回中,冰期时由于冰山的覆盖抑制光合作用使沉积有机碳以陆源为主,间冰期则以海洋自身来源的有机质为主。因此,海冰的覆盖状况与生物泵过程、陆源有机碳输入及沉积有机碳组成与堆积的关系,是北冰洋尤其是陆架区碳循环研究的一个重要科学问题。

4 全球变暖对北冰洋碳汇的影响:尚未解决的问题

4.1 北冰洋生物泵加强和陆源有机碳输入增多对沉积碳汇产生多大影响?

在一定的时间尺度内,海洋“生物泵”引起的沉积有机碳堆积则可以认为是海洋碳汇作用的最终净效应,因而海洋沉积有机碳的堆积在碳收支中具有重要意义^[90,91]。尽管大陆架只占海洋表面积的7%、海水体积的0.5%,但其碳埋藏量可以占到全球海洋的80%。北冰洋有全球最大的陆架边缘海,北极陆架又是世界上最大的陆架之一(其总面积占世界陆架1/4),其占2.5%的海洋面积,但埋藏的沉积有机碳占全球的11%^[30],而其埋藏的主要区域在于陆架。模型结果表明,气候的变暖也将增加冰藻的生产力^[92];同时,陆源颗粒有机物从海冰释放进入海水,也将增加陆源有机质的输入。因此,在一定时间尺度内,随着全球变暖,“生物泵”加强,陆源有机碳输入增多,

最终导致沉积物碳埋藏增加,是有相当依据的(图4)。但北冰洋陆架沉积有机碳组成在不同的海域有很大的不同。在欧洲与俄罗斯一侧,沉积物碳埋藏以陆源有机质为主。如Stein等人^[93]根据Rock-Eval热解参数和C/N比的工作、Fahl等人^[94]根据生物标志物的工作、Boucsein等人^[95]根据有机地球化学的工作均表明,沉积有机碳中以陆源物质为主。而亚-美区则不尽然。在Mackenzie河口和Beaufort陆架,沉积有机碳以陆源为主(50%~80%);而楚科奇海表层沉积有机碳中,其陆源有机质仅占11%~44%,海洋自身来源占有绝对优势^[69,96]。在北极周边冻土层加速退化、河流淡水输入增加、作为北冰洋营养盐重要来源的北太平洋入流水异动、北冰洋海冰和环流变化加剧等一系列北极快速变化的情况下,楚科奇海埋藏的沉积有机碳结构可能会产生巨大变化(图4)。冻土层退化和风化作用加强是一个向大气释放碳的过程,其与不断加强的生物泵过程如何平衡?全球变暖下北冰洋沉积碳埋藏在全球的碳收支有多大影响?这些问题是目前摆在我们面前的一个很重大的挑战。

4.2 物理泵和微型生物碳泵改变会抵消生物泵过程的增强吗?

尽管目前已知北冰洋是大气CO₂的“汇”,但这个“汇”究竟有多大?随着全球变暖和北极快速变化如何变化?目前尚没有很好的回答。从物理过程来讲,海水温度升高也可以改变CO₂溶解度和分压;海水变暖、海冰融化、径流增加、北冰洋淡水增多,可导致夏季海水层化加强,冬季海水下沉受阻。这些均会造成CO₂物理泵的作用减弱(图3)。从生物泵作用讲,冰覆盖减少、河流入海营养物质增加、开阔海持续时间增加等因素可以导致北极陆架“生物泵”过程加强^[97];另一方面,“微型生物碳泵”也可能在这种快速变化下发生改变。陆地营养盐输入过多可能会减少“微型生物碳泵”的储碳效能,尤其在北冰洋河口和陆架区^[20]。此外,到了海冰融化后的后期,营养盐完全利用后,也可能影响“微型生物碳泵”的运作。而温度增加可能促进“微型生物碳泵”的工作^[98]。由于目前相关的观测和研究有限,这些物理、化学和生物过程产生的储碳能力分别是什么量级?全球变化会对这些过程产生怎样的影响?最后的净效应如何?这些均是尚待解决的问题,需要今后加强研究。

图 4 北极快速变化引起的海洋和生物地球化学过程的变化. 实线部分是北极原先的作用过程, 虚线表示全球变暖背景下的情形, 据 Stein 等人^[90]改绘

Figure 4 Change of biogeochemistry processes in the Arctic Ocean under arctic rapid change. Solid lines indicate original processes in the Arctic Ocean, dotted lines indicate processes under global warming, modified from Stein et al.^[90]

致谢 中国极地研究中心何剑锋研究员提供部分材料, 浙江大学地球科学系李德望博士和国家海洋局第二海洋研究所硕士生张海舟帮助绘制图件和整理文献, 在此一并致谢。

参考文献

- Martin J H. Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, 1990, 5: 1–13
- Martin J H, Gordon R M, Fitzwater S E. Iron in Antarctic waters. *Nature*, 1990, 345: 156–158
- Boyd P W, Watson A J, Law C S, et al. A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature*, 2000, 407: 695–702
- Sigman D M, Boyle E A. Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. *Nature*, 2000, 407: 859–869
- Sigman D M, Boyle E A. Palaeoceanography: Antarctic stratification and glacial CO₂. *Nature*, 2001, 412: 606
- Parkinson C L, Cavalieri D J, Gloersen P, et al. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978–1996. *J Geophys Res*, 1999, 104: 20837–20856
- Stroeve J C, Serreze M C, Fetterer F, et al. Tracking the Arctic's shrinking ice cover: Another extreme September minimum in 2004. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L04501
- Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L01703
- Wang M, Overland J E. A sea ice free summer Arctic within 30 years? *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L07502
- Durate C M, Lenton T M, Wadhams P, et al. Abrupt climate change in the Arctic. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 60–62
- Overland J E, Wang M, Walsh J E, et al. Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation time scales. *Earth's Future*, 2013, 2: 68–74
- Grebmeier J M, Moore S E, Overland J E, et al. Biological response to recent Pacific Arctic sea ice retreats. *EOS Trans Am Geophys Union*, 2010, 91: 161–168
- Grebmeier J M. Shifting patterns of life in the Pacific Arctic and sub-Arctic seas. *Annu Rev Mar Sci*, 2012, 4: 63–78
- Chen L Q, Gao Z Y, Yang X L, et al. Prospects of Research on carbon cycle in the Arctic (in Chinese). *Chin J Polar Res*, 2004, 16: 171–180 [陈立奇, 高众勇, 杨绪林, 等. 北极地区碳循环研究意义和展望. *极地研究*, 2004, 16: 171–180]
- Chen L Q. Variability and vulnerability of carbon pools in Southern Ocean and western Arctic Ocean and their exploratory engineering technology (in Chinese). *Eng Sci*, 2009, 11: 79–85 [陈立奇. 极区海洋碳池变化性和脆弱性及其探测工程技术. *中国工程科学*, 2009, 11: 79–85]
- Cai W J, Chen L Q, Chen B S, et al. Decrease in the CO₂ uptake capacity in an ice-free Arctic Ocean Basin. *Science*, 2010, 329: 556–559
- Bates N R, Cai W J, Mathis J T. The ocean carbon cycle in the western Arctic Ocean: Distributions and air-sea fluxes of carbon dioxide. *Oceanogr-Oceanogr Soc*, 2011, 24: 186–201
- Arrigo K R, van Dijken G, Pabi S. Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L19603
- Jiao N Z, Herndl G J, Hansell D A, et al. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nat Rev Microbiol*, 2010, 8: 593–599
- Jiao N Z, Tang K, Cai H Y, et al. Increasing the microbial carbon sink in the sea by reducing chemical fertilization on the land. *Nat Rev Microbiol*, 2011, 9: 75
- Rudels B, Schauer U, Björk, G, et al. Observations of water masses and circulation in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean from the 1990s to the late 2000s. *Ocean Sci*, 2013, 9: 147–169
- 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
- Christensen T R, Johansson T, Åkerman H J, et al. Thawing sub-arctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L04501
- Shakhova N, Semiletov I, Salyuk A, et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 2010, 327: 1246–1250
- Oechel W C, Laskowski C A, Burba G, et al. Annual patterns and budget of CO₂ flux in an Arctic tussock tundra ecosystem. *J Geophys Res*, 2014, 119: 323–339
- Lawrence D M, Slater A G, Tomas R A, et al. Accelerated Arctic land warming and permafrost degradation during rapid sea ice loss. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L11506
- Frey K E, McClelland J W. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry. *Hydrol Process*, 2009, 23: 169–182
- Holmes R M, McClelland J W, Peterson B J, et al. A circumpolar perspective on fluvial sediment flux to the Arctic Ocean. *Glob Biogeochem Cycles*, 2002, 16: 1098
- Rachold V, Eicken H, Gordeev V V, et al. Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean. In: Stein R, Macdonald R W, eds. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 33–55

- 30 Stein R, Macdonald R W. Organic carbon budget: Arctic Ocean vs. global ocean. In: Stein R, Macdonald R W, eds. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 315–322
- 31 Stein R. *Arctic Ocean Sediments: Processes, Proxies, and Palaeoenvironment*. Hungray: Elsevier, 2008
- 32 Rachold V, Grigoriev M N, Are F E, et al. Coastal erosion vs. riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas. *Int J Earth Sci*, 2000, 89: 450–460
- 33 Macdonald R W, Solomon S M, Cranston R E, et al. A sediment and organic carbon budget for the Canadian Beaufort Shelf. *Mar Geol*, 1998, 144: 255–273
- 34 Pfirman S L, Clolny R, Nürnberg D, et al. Reconstructing the origin and trajectory of drifting Arctic sea ice. *J Geophys Res*, 1997, 102: 12575–12586
- 35 Nørgaard-Pedersen N, Spielhagen R F, Thiede J, et al. Central Arctic surface ocean environment during the past 80000 years. *Palaeoceanography*, 1998, 13: 193–204
- 36 Chen L Q, Gao Z Y, Yang X L, et al. Comparison of air-sea fluxes of CO₂ in the southern Ocean and the western Arctic Ocean. *Acta Oceanol Sin*, 2004, 23: 647–653
- 37 Gao Z, Chen L, Sun H, et al. Distributions and air-sea fluxes of carbon dioxide in the western Arctic Ocean. *Deep Sea Res Pt II*, 2012, 81: 46–52
- 38 Walsh J J. Arctic carbon sinks: Present and future. *Glob Biogeochem Cycles*, 1989, 3: 393–411
- 39 Luchetta A, Lipizer M, Socal G. Temporal evolution of primary production in the central Barents Sea. *J Marine Syst*, 2000, 27: 177–193
- 40 Smith S V. Parsing the oceanic calcium carbonate cycle: A net atmospheric carbon dioxide source, or a sink? L&O e-Books. Association for the Sciences of Limnology and Oceanography (ASLO) Waco, TX. 10.4319/svsmith.2013.978-0-9845591-2-1. 2013
- 41 Anderson L G, Kaitin S. Carbon fluxes in the Arctic Ocean—Potential impact by climate change. *Polar Res*, 2001, 20: 225–232
- 42 Grebmeier J M, Overland J E, Moore S E, et al. A Major ecosystem shift observed in the northern Bering Sea. *Science*, 2006, 311: 1461–1464
- 43 Reid P C, Johns D G, Edwards M, et al. A biological consequence of reducing Arctic ice cover: Arrival of the Pacific diatom *Neodenticula seminae* in the North Atlantic for the first time in 800,000 years. *Glob Change Biol*, 2007, 13: 1910–1921
- 44 Hill V, Cota G, Stockwell D. Spring and summer phytoplankton communities in the Chukchi and Eastern Beaufort Seas. *Deep Sea Res Pt II*, 2005, 52: 3369–3385
- 45 Feder H M, Naidu A S, Jewett S C, et al. The northeastern Chukchi Sea: Benthos-environmental interactions. *Mar Ecol-Prog Ser*, 1994, 111: 171–190
- 46 Cota G F, Pomeroy L R, Harrison W G, et al. Nutrients, primary production and microbial heterotrophy in the southeastern Chukchi Sea: Arctic summer nutrient depletion and heterotrophy. *Mar Ecol-Prog Ser*. Oldendorf, 1996, 135: 247–258
- 47 Steele M, Ermold W, Zhang J. Arctic Ocean surface warming trends over the past 100 years. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L02614
- 48 Liu Z L, Chen J F, Zhang T, et al. The size-fractionated chlorophyll a concentration and primary productivity in the Chukchi Sea and its northern Chukchi Plateau (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2007, 27: 4953–4962 [刘子琳, 陈建芳, 张涛, 等. 楚科奇海及其海台区粒度分级叶绿素a和初级生产力. *生态学报*, 2007, 27: 4953–4962]
- 49 Li H L, Chen J F, Jin H Y, et al. Biogenic constituents of surface sediments in the Chukchi Sea: Implications for organic carbon burying efficiency (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2008, 30: 165–17 [李宏亮, 陈建芳, 金海燕, 等. 楚科奇海表层沉积物的生源组分及其对碳埋藏的指示意义. *海洋学报*, 2008, 30: 165–171]
- 50 Yang Q L, Lin G M, Lin M, et al. Species composition and distribution of phytoplankton in chukchi sea and bering sea (in Chinese). *Chin J Polar Res*, 2002, 14: 113–125 [杨清良, 林更铭, 林茂. 楚科奇海和白令海浮游植物的种类组成与分布. *极地研究*, 2002, 14: 113–125]
- 51 Ashjian C J, Gallagher M, Plourde S. Transport of plankton and particles between the Chukchi and Beaufort Seas during summer 2002, described using a Video Plankton Recorder. *Deep Sea Res Pt II*, 2005, 52: 3259–3280
- 52 Gradinger R. Sea-icealgae: Major contributors to primary production and algal biomass in the Chukchi and Beaufort Seas during May/June 2002. *Deep Sea Res Pt II*, 2008, doi: 10.1016/j.dsr2.2008.10.016
- 53 Riebesell U. Particle aggregation during a diatom bloom. 11. Biological aspects. *Mar Ecol-Prog Ser*, 1991, 69: 281–291
- 54 Legendre L, Ackley S F, Dieckmann G S, et al. Ecology of sea ice biota. *Polar Biol*, 1992, 12: 429–444
- 55 Gosselin M, Levasseur M, Wheeler P A, et al. New measurements of phytoplankton and ice algal production in the Arctic Ocean. *Deep Sea Res Pt II*, 1997, 44: 1623–1644
- 56 Anderson O G N. Primary production, chlorophyll, light, and nutrients beneath the arctic sea ice. In: Herman Y, ed. *The Arctic Seas*. New York: Springer, 1989. 147–191
- 57 Welch H E, Bergmann M A. Seasonal development of ice algae and its prediction from environmental factors near Resolute, NWT, Canada. *Can J Fish Aquat Sci*, 1989, 46: 1793–1804
- 58 Lizotte M P. The contributions of sea ice algae to Antarctic marine primary production. *Am Zool*, 2001, 41: 57–73
- 59 Laxon S, Peacock N, Smith D. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region. *Nature*, 2003, 425: 947–950

- 60 Gobeil C, Sundby B, Macdonald R W, et al. Recent change in organic carbon flux to Arctic Ocean deep basins: Evidence from acid volatile sulfide, manganese and rhenium discord in sediments. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 1743–1746
- 61 Boetius A, Albrecht S, Bakker K, et al. Export of algal biomass from the melting Arctic sea ice. *Science*, 2013, 339: 1430–1432
- 62 Xiao X, Fahl K, Stein R. Biomarker distributions in surface sediments from the Kara and Laptev seas (Arctic Ocean): Indicators for organic-carbon sources and sea-ice coverage. *Quat Sci Rev*, 2013, 79: 40–52
- 63 Brown K A, McLaughlin F, Tortell P D, et al. Determination of particulate organic carbon sources to the surface mixed layer of the Canada Basin, Arctic Ocean. *J Geophys Res*, 2014, 119, 1084–1102
- 64 Walsh J J, Dieterle D A. Decadal shifts in biophysical forcing of Arctic marine food webs: Numerical consequence. *J Geophys Res*, 2004, 109: C05031
- 65 Grebmeier J M, Cooper L W, Feder H M. Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced northern Bering and Chukchi Seas in the Amerasian Arctic. *Prog Oceanogr*, 2006, 71: 331–361
- 66 Li H L, Chen J F, Liu Z L, et al. Size structure of particulate biogenic silica in the Chukchi Sea and Southern Canadian Basin (in Chinese). *Prog Nat Sci*, 2007, 17: 72–78 [李宏亮, 陈建芳, 刘子琳, 等. 北极楚科奇海和加拿大海盆南部颗粒生物硅的粒级结构. *自然科学进展*, 2007, 17: 72–78]
- 67 Walsh J J, McRoy C P. Ecosystem analysis in the southeastern Bering Sea. *Cont Shelf Res*, 1986, 5: 259–288
- 68 Chen M, Huang Y P, Guo L, et al. Biological productivity and carbon cycling in the Arctic Ocean. *Chin Sci Bull*, 2002, 47: 1037–1040
- 69 Chen J F, Zhang H S, Jin H Y, et al. Accumulation of sedimentary organic carbon in the Arctic shelves and its significance on global carbon budget (in Chinese). *Chin J Polar Res*, 2004, 16: 93–201 [陈建芳, 张海生, 金海燕, 等. 北极陆架沉积有机碳埋藏及其在全球碳循环中的作用. *极地研究*, 2004, 16: 93–201]
- 70 Li X N, Zhou W H, Liu S M, et al. Sediment chlorophyll in HAB(Harmful Algal Bloom) area of East China Sea (in Chinese). *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14: 1102–1106 [李肖娜, 周伟华, 刘素美, 等. 东海赤潮高发区沉积物中叶绿素的分析. *应用生态学报*, 2003, 14: 1102–1106]
- 71 Liu Z L, Chen J F, Liu Y L, et al. The size-fractionated chlorophyll a and primary productivity in the surveyed area of the western Arctic Ocean during the summer of 2008 (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2011, 33: 124–133 [刘子琳, 陈建芳, 刘艳岚, 等. 2008 年夏季西北冰洋观测区叶绿素 a 和初级生产力粒级结构. *海洋学报*, 2011, 33: 124–133]
- 72 Cranston R E. Organic carbon burial rates across the Arctic Ocean from the 1994 Arctic Ocean Section expedition. *Deep Sea Res Pt II*, 1997, 44: 1705–1723
- 73 Yang W F, Chen M, Liu G S, et al. Distribution of radionuclides at sediments and its tracing to the deposition environment in Chukqi Shelf (in Chinese). *Prog Nat Sci*, 2002, 12: 515–518 [杨伟锋, 陈敏, 刘广山, 等. 楚克奇海陆架区沉积物中核素的分布及其对沉积环境的示踪. *自然科学进展*, 2002, 12: 515–518]
- 74 Nuttall M. *Encyclopedia of the Arctic*. New York: Routledge, 2005
- 75 Lawrence D M, Slater A G. A projection of severe near surface permafrost degradation during the 21st century. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L24401
- 76 Vogel J, Schuur E A G, Trucco C, et al. Response of CO₂ exchange in a tussock tundra ecosystem to permafrost thaw and thermokarst development. *J Geophys Res*, 2009, 114: G04018
- 77 Macdonald R W, Harner T, Fyfe J. Recent climate change in the Canadian Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Sci Total Environ*, 2005, 342: 5–86
- 78 Shiklomanov I A. *Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World: Assessment of Water Resources and Water Availability in the World*. Geneva: WMO, 1998. 88
- 79 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
- 80 Eicken H. The role of Arctic Sea ice in transporting and cycling terrigenous organic matter. In: Stein R, Macdonald R W, eds. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Berlin: Springer-Verlag. 2004. 45–53
- 81 Macdonald R W, Naidu A S, Yunker M B, et al. The Beaufort Sea: Distribution, sources, fluxes, and burial of organic carbon. In: Stein R, Macdonald R W, eds. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 177–192
- 82 Goñi M A, Yunker M B, Macdonald R W, et al. Distribution and sources of organic biomarkers in arctic sediments from Mackenzie River and Beaufort shelf. *Mar Chem*, 2000, 71: 23–51
- 83 Belicka L L, Macdonald R W, Yunker M B, et al. The role of depositional regime on carbon transport and preservation in Arctic Ocean sediments. *Mar Chem*, 2004, 86: 65–88
- 84 Yamamoto M, Okino T, Sugisaki S, et al. Late Pleistocene changes in terrestrial biomarkers in sediments from the central Arctic Ocean. *Org Geochem*, 2008, 39: 754–763

- 85 Stein R, Korolev S. Shelf-to-basin sediment transport in the eastern Arctic Ocean. *Report Polar Res*, 1994, 144: 87–100
- 86 Reimnitz E, Graves S M, Barnes P W. Beaufort Sea coastal erosion, sediment flux, shoreline evolution and the erosional shelf profile. US Geological Survey to Accompany Map I-1182-G, 1988. 1–22
- 87 Eicken H, Kolatschek J, Freitag J, et al. A key source area and constraints on entrainment for basin-scale sediment transport by Arctic sea ice. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 1919–1922
- 88 Darby D A, Naidu A S, Mowatt T C. Sediment composition and sedimentary processes in the Arctic Ocean. In: Herman Y, ed. *The Arctic Seas*. New York: Springer 1989. 657–720
- 89 Schubert C J, Stein R. Deposition of organic carbon in Arctic Ocean sediments: terrigenous supply vs. marine productivity. *Org Geochem*, 1996, 24: 421–436
- 90 Stein R, Macdonald R W. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Chapter 1. *The Arctic Ocean: Boundary Conditions and Background Information*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 1–32
- 91 Berger W H, Smetacek V S, Wefer G. Productivity of the Ocean: Present and Past. New York: Wiley, 1989. 429–455
- 92 Tedesco L, Vichi M, Thomas D N. Process studies on the ecological coupling between sea ice algae and phytoplankton. *Ecol Model*, 2012, 226: 120–138
- 93 Stein R, Grobe H, Wahsner M. Organic carbon, carbonate, and clay mineral distributions in eastern central Arctic Ocean surface sediments. *Mar Geol*, 1994, 3–4: 269–285
- 94 Fahl K, Stein R. Modern organic carbon deposition in the Laptev Sea and adjacent continental slope: Surface water productivity vs. terrigenous input. *Org Geochem*, 1997, 26: 379–390
- 95 Boucsein B, Stein R. Particulate organic matter in the surface sediments of the Laptev Sea (Arctic Ocean): Application of maceral analysis as organic carbon source indicator. *Mar Geol*, 2000, 162: 573–586
- 96 Belicka L L, Macdonald R W, Harvey H R. Sources and transport of organic carbon to shelf, slope, and basin surface sediments of the Arctic Ocean. *Deep Sea Res Pt I*, 2002, 49: 1463–1483
- 97 Chen L Q, Gao Z Y, Wang W Q, et al. Characteristics of pCO₂ in surface water of the Bering Abyssal Plain and their effects on carbon cycle in the western Arctic Ocean. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2004, 47: 1035–1044
- 98 Kirchman D L, Morán X A G, Ducklow H. Microbial growth in the polar oceans—Role of temperature and potential impact of climate change. *Nat Rev Microbiol*, 2009, 7: 451–459

Carbon sink mechanism and processes in the Arctic Ocean under arctic rapid change

CHEN JianFang, JIN HaiYan, LI HongLiang, ZHANG HaiSheng, JI ZhongQiang, ZHUANG YanPei & BAI YouCheng

Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry of SOA, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration (SOA), Hangzhou 310012, China

The Arctic Ocean plays a key role in the global carbon cycle and budget. This semi-closed ocean and its vast and shallow marginal shelf seas surrounded by widespread tundra makes it a unique area to study the carbon source, sink and budget, with consideration of land-ocean interaction and land and ocean as a whole. Over the last three decades because of global warming, sea ice has rapidly decreased. This has induced air-ice-sea-land multi-geosphere interaction that has greatly affected the carbon source and sink in the arctic areas. Such rapid change has not only led to the release of methane and carbon dioxide in degraded permafrost but has also altered the physical, biological and microbial carbon pumps. This process may be attributed to changes of freshwater input, water mixing and circulation, terrestrial fluvial transport, and nutrient supply to the Arctic Ocean. In this review paper, we discuss how global warming and rapid sea ice retreat affects the Arctic carbon sink and source, with a focus on the biological pump, terrestrial carbon input, and carbon burial in the Arctic Ocean.

Arctic rapid change, biological pump, terrestrial carbon, carbon burial

doi: 10.1360/N972014-00397