

研究综述

## 基于同位素的极区海洋生物泵运转及机制研究

陈敏<sup>1</sup> 范玲芳<sup>1</sup> 王博<sup>1,2</sup> 陈阳军<sup>1,3</sup> 张润<sup>1</sup> 方仔铭<sup>1</sup> 杨伟锋<sup>1</sup>  
郑敏芳<sup>1</sup> 陈梦雅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>厦门大学, 海洋与地球学院, 福建 厦门 361102;

<sup>2</sup>山东科技大学, 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590;

<sup>3</sup>江苏海洋大学, 海洋科学与水产学院, 江苏 连云港 222005)

**摘要** 生物泵是极区海洋净吸收大气 CO<sub>2</sub> 的重要路径之一, 也是连接海洋上层和底栖生态系统的关键环节。本文概述近 10 年来应用放射性核素和稳定同位素的独特指示功能, 系统地开展普里兹湾、阿蒙森海、宇航员海、白令海、楚科奇海和加拿大海盆等南北极海域生物泵运转规律及维系机制的研究, 探究了生物固碳、颗粒有机碳输出、有机物降解、营养盐再生和有机物埋藏等过程的动力学特征及空间变化规律, 揭示了淡水组分、颗粒物浓度和痕量营养盐 Fe 等环境因子对生物泵的影响。研究发现, 海冰融水、冰川融水/河水等淡水组分通过改变水体层化、光可获得性和营养盐供给等影响了生物固碳速率、Fe 吸收速率和颗粒有机碳(POC)输出通量的空间变化; 有机物降解及硝化作用主导着营养盐再生过程; 南极底层水形成和颗粒物跨陆架输送影响生物泵的表-底耦合状况。同时, 面对未来气候变化和人类活动的双重压力, 亟待加强生物泵与食物网相互作用的研究, 以准确掌握极区海洋生态系统变化的规律及机制。

**关键词** 海洋生物泵 放射性核素 稳定同位素 南大洋 北冰洋

doi: 10.13679/j.jdyj.20240026

### 0 引言

生物泵是指海洋真光层中浮游植物利用无机碳和无机营养盐(溶解无机氮 DIN、溶解无机磷 DIP、溶解态铁 DFe 等)进行光合作用合成有机物及其驱动的有机物输出、降解、埋藏等一系列过程。生物泵的运转实现了海洋净吸收大气 CO<sub>2</sub>, 并促进碳在无机和有机储库之间、表层水体与深层水体之间以及短时间尺度与长时间尺度之间转化, 从而对全球气候变化起着重要的调节作用<sup>[1-2]</sup>。生物泵也是联系上层生态系统与底栖生态系统的关键环节, 其输出的颗粒有机物为底栖生物生长提供了主要的食物来源, 维持着底栖生态系统的

稳定和多样性<sup>[3-4]</sup>。极地海洋生物泵的运转比中低纬度海域更加复杂, 受太阳辐射、海冰覆盖、冰川消融、海水温度和营养盐补给等变动幅度大的影响, 极地海洋生物泵具有时空可变性大的特点<sup>[5]</sup>。厘清极地海洋生物泵运转的规律及作用机制对于认识极地海洋生态系统的独特性及其面对全球气候变化和人类活动压力下的脆弱性具有重要意义。

本研究重点综述了近 10 年来依托中国历次南北极科学考察航次获得的极地海洋同位素研究成果。这些研究以放射性核素和稳定同位素为示踪手段, 围绕极地海洋生物泵的运转展开, 涉及生物固碳、浮游植物 Fe 吸收、颗粒有机碳(POC)输出、颗粒有机物降解、营养盐再生和沉积有机

[收稿日期] 2024 年 3 月收到来稿, 2024 年 4 月收到修改稿

[基金项目] 国家海洋局极地考察办公室项目(IRASCC 02-01-01, IRASCC 01-01-02C)和国家自然科学基金(41721005)资助

[作者简介] 陈敏, 男, 1970 年生。教授, 主要从事同位素海洋化学研究。E-mail: mchen@xmu.edu.cn

碳埋藏等生物地球化学过程,探讨了淡水组分、上升流、南极底层水形成、浮游植物群落组成、陆源输入和颗粒物水平输送等对极地海洋生物泵的影响。

## 1 生物固碳及淡水组分效应

真光层中的浮游植物吸收光能和无机营养盐(DIN, DIP, DFe等),将溶解无机碳(DIC)合成POC和溶解有机碳(DOC)的固碳过程是生物泵运转的引擎,推动着大气CO<sub>2</sub>进入表层海洋并向深层输送<sup>[4]</sup>。在生物固碳过程中,由于原子质量差异,碳、氮稳定同位素会发生同位素分馏,导致所合成的有机物富集轻质量数原子(<sup>12</sup>C, <sup>14</sup>N),而底物DIC和DIN富集重质量数原子(<sup>13</sup>C, <sup>15</sup>N);伴随着生物固碳作用加强,所合成有机物和底物中的重质量数原子也将逐步富集(即 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值增加),因此,颗粒有机物的 $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 值(分别以 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 表示)和DIN的 $\delta^{15}\text{N}$ 值成为指示生物固碳作用强弱变化的理想指标<sup>[6]</sup>。

对东南极普里兹湾周边海域进行的多次夏季考察结果显示,以67°S为界,南部湾内混合层中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 值明显高于湾外,且最高值往往出现在埃默里冰架前沿,说明普里兹湾内的生物固碳作用强于湾外<sup>[7-9]</sup>。值得注意的是, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 与基于<sup>226</sup>Ra计算出的冰融水比例和POC浓度之间具有正相关关系,与混合层深度(MLD)和DIN之间呈负相关关系(图1),揭示出调控生物固碳的物理-生物耦合机制,即伴随着冰融水增加,水体稳定性加强,光合作用生物更多被保留在光充足的表层,从而促进了生物固碳作用<sup>[7, 10-11]</sup>。

淡水组分对生物固碳作用的影响在西南极海域(南极半岛海域和阿蒙森海)的固碳速率和Fe吸收速率上同样有所体现。对南极半岛附近海域的研究表明,因淡水组分(冰川融水或海冰融水)具有低盐和富Fe的特征,淡水输入通过补给Fe和加强水体层化提高了生物固碳速率和Fe吸收速率,且冰川融水比海冰融水的影响更加显著(图2)。另外,不同粒径浮游植物Fe吸收速率对淡水组分输入的响应存在差异,小粒径浮游植物(粒径范围为[0.7,10] μm)由于具有更大的细胞比表面积,其响应比大粒径浮游植物(粒径>10 μm)更加明

显。南极半岛海域正经历着南极区域最迅速的变暖历程,冰川融化剧烈,预计对Fe输入更敏感的小粒径浮游植物将在未来竞争中取得优势,驱动浮游植物群落结构小型化,并对浮游动物群落结构和碳输出产生影响<sup>[12]</sup>。与南极半岛海域Fe吸收速率主要受冰川融水调控不同,夏末秋初阿蒙森海的Fe吸收速率更多受到海冰融水的影响,其作用机制主要是海冰融水通过提供Fe和加强水体层化促进了阿蒙森海浮游植物的Fe吸收<sup>[13]</sup>。

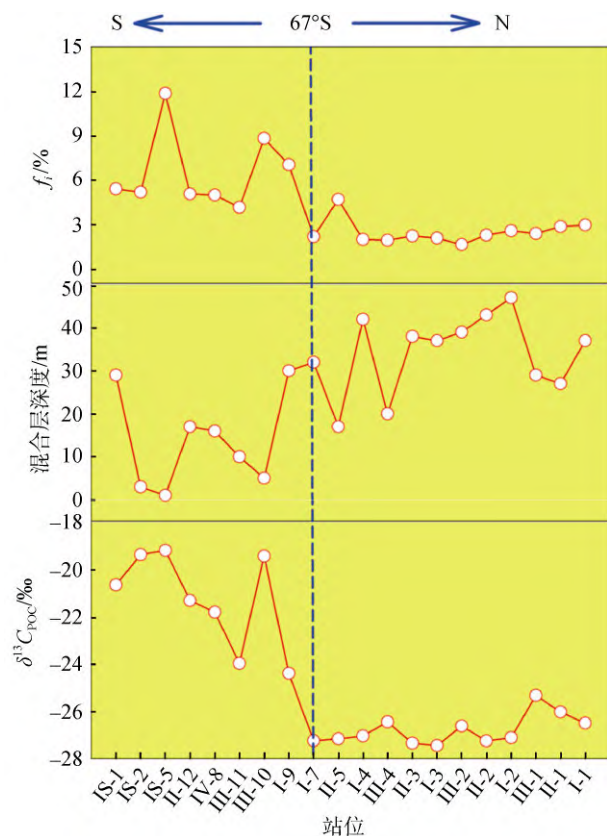


图1 普里兹湾内外混合层中冰融水比例( $f_i$ )、混合层深度和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 的变化<sup>[7]</sup>

Fig.1. Changes in ice-meltwater fraction ( $f_i$ ), mixed layer depth, and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  in the mixed layer inside and outside Prydz Bay<sup>[7]</sup>

西北冰洋生物固碳作用的空间变化很大,总体呈陆架区强于海盆区的特点。夏季积分固碳速率可从海盆区的 $3.8 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 升高至陆架区的 $197.1 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ,其中楚科奇陆架区具有尤其活跃的初级生产过程<sup>[14-16]</sup>。2003年夏季西北冰洋悬浮POC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现由陆架向外海降低的态势,且其与海水中溶解CO<sub>2</sub>浓度之间存在显著

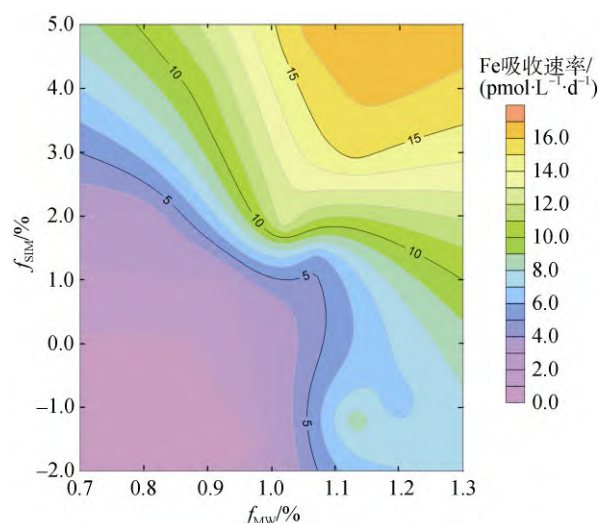


图2 南极半岛海域浮游植物 Fe 吸收速率与冰川融水 ( $f_{MW}$ )、海冰融水 ( $f_{SIM}$ ) 的关系<sup>[12]</sup>

Fig.2. Relationship between phytoplanktonic Fe uptake rate and fractions of glacier meltwater ( $f_{MW}$ ) and sea-ice meltwater ( $f_{SIM}$ ) in the sea area near the Antarctic Peninsula<sup>[12]</sup>

的负相关关系,说明浮游生物光合作用过程的同位素分馏主控着悬浮 POC 碳同位素组成的变化,且陆架区的生物固碳作用明显强于外海<sup>[17]</sup>。尽管夏季西北冰洋的颗粒有机物主要由初级生产的生源颗粒物占主导,但陆源输入的影响也不可忽视。基于颗粒有机物 C/N 比和  $\delta^{13}C$  值的质量平衡计算表明,夏季陆源有机物对西伯利亚海西部陆架区颗粒有机物的贡献比例超过 30%,对西伯利亚海东部陆架和楚科奇海陆架区的贡献则小于 20%<sup>[18]</sup>。楚科奇海有色溶解有机物(CDOM)和溶解态黑碳(DBC)的空间变化显著地受到陆源输入的影响,在河水组分高的区域,CDOM 和 DBC 的含量较高<sup>[19-20]</sup>。基于海水  $\delta^{18}O$ ,  $^{226}Ra$  和  $^{228}Ra$  揭示的淡水组分空间变化表明,楚科奇海和加拿大海盆具有较高的河水份额,反映了海流驱动的淡水累积和停留时间的共同影响<sup>[21-24]</sup>;河水组分从白令陆架输运至楚科奇陆架所需的平均时间为  $1.6 \pm 1.5$  a,从楚科奇陆架输运至加拿大海盆的平均时间为  $11.8 \pm 1.1$  a,显示出陆源组分的跨区域影响<sup>[25]</sup>。

## 2 真光层 POC 输出通量的空间变化

真光层 POC 输出通量是衡量生物泵运转效

率的重要指标之一,反映了千年尺度上海洋净吸收大气  $CO_2$  的能力<sup>[5]</sup>。定量 POC 输出的常用方法包括沉积物捕集器法和放射性核素示踪法。沉积物捕集器法具有直接采集并可开展多组分分析的优点,但捕集效率稳定性是值得关注的问题。放射性核素示踪法利用母子体核素的半衰期及颗粒活性差异,通过母子体放射性不平衡来定量颗粒物输出通量,常用的包括  $^{234}Th/^{238}U$  不平衡法和  $^{210}Po/^{210}Pb$  不平衡法,分别适用于季节尺度和年际尺度颗粒物输出的研究。放射性核素示踪法可获得高时空分辨率的数据,但易受到研究系统稳态与否的影响。在我国南北极研究中,沉积物捕集器和放射性核素示踪法均有所应用,开展了生物标志物<sup>[26]</sup>和 POC 输出通量的研究。

利用  $^{210}Po/^{210}Pb$  不平衡对南极普里兹湾邻近海域 POC 输出的研究发现,陆架区溶解态  $^{210}Po$  和  $^{210}Pb$  的比活度低于陆坡区和海盆区,且  $^{210}Po$  的固/液条件分配系数与 POC 之间呈良好的正相关关系,反映出陆架区具有更强烈的颗粒清除迁出作用。由  $^{210}Po/^{210}Pb$  不平衡估算出的普里兹湾邻近海域 100 m 层的 POC 输出通量落在  $0.8 \sim 31.9$   $mmol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  之间,高值出现在陆架区,对应于生物固碳速率和叶绿素 *a* (chl *a*) 含量的高值,说明夏季南大洋陆架区在净吸收大气  $CO_2$  方面起着重要作用<sup>[27-29]</sup>。

基于  $^{234}Th/^{238}U$  不平衡获得的 2003 年夏季西北冰洋 POC 输出通量显示,楚科奇陆架区 30/40 m 层的 POC 输出通量介于  $1.6 \sim 27.5$   $mmol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,平均值为  $14.9 \pm 9.4$   $mmol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,楚科奇陆坡、波弗特陆坡和加拿大海盆 100 m 层 POC 输出通量的变化范围为  $1.8 \sim 14.4$   $mmol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,平均值为  $9.2 \pm 4.8$   $mmol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ;若对积分深度进行归一化处理,陆架区 POC 的平均输出速率( $0.41 \pm 0.28$   $mmol \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ )也明显高于陆坡和海盆区( $0.09 \pm 0.05$   $mmol \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ ),证明西北冰洋 POC 输出由陆架到海盆呈降低趋势<sup>[14]</sup>。楚科奇陆架区和陆坡深海区的 *e* 比值(真光层 POC 输出通量与初级生产力的比值)分别为 0.20 和 0.46,明显高于中低纬度海域的典型值(0.02~0.10),反映出西北冰洋 POC 的有效输出<sup>[14]</sup>。

## 3 颗粒有机物降解和营养盐再生

由真光层输出的颗粒有机物在中深层停留及

迁出至沉积物过程中不断被微生物降解,引起 POC 输出通量的降低和营养盐的再生,再生的部分 DIN 通过水体垂向混合进入真光层并重新驱动生物泵的运转,部分通过反硝化作用转化为  $N_2$  从而离开海洋,因此,中深层 POC 降解和营养盐再生反映了垂向上生物泵的衰减程度<sup>[5]</sup>。

对东南极普里兹湾邻近海域的研究显示,  $\delta^{13}C_{POC}$  和  $\delta^{15}N_{PN}$  在真光层以深均随着深度的增加而增大,同时伴随着 POC 和 PN 含量的降低,反映出颗粒有机物降解过程中优先降解含“轻”原子( $^{12}C$ ,  $^{14}N$ )的有机物,但该过程的同位素分馏效应较小,其中氮同位素分馏因子小于 3.6‰<sup>[8-9]</sup>。由有机物降解产生的铵盐在硝化微生物的作用下逐步转化为亚硝酸盐和硝酸盐,从而完成营养盐的再生环节。依托中国第 34—36 次南极科学考察航次,在国际上首次开展了西南极阿蒙森海亚硝

酸盐氮、氧同位素的研究,发现夏季上层水体的亚硝酸盐具有异常低的  $\delta^{15}N$  值和异常高的  $\delta^{18}O$  值(图 3),酶驱动的硝酸盐和亚硝酸盐之间的同位素交换是产生这些异常的原因;亚硝酸盐双同位素组成同时证明了混合层以深水体中的亚硝酸盐主要来自氨氧化的贡献(图 3),体现了夏季真光层中硝化作用的重要性<sup>[30-31]</sup>。基于  $^{15}N$  示踪法获得的硝化速率及底物加富动力学实验结果表明,夏季宇航员海真光层中存在明显的硝化作用,其中真光层底部硝化速率最高;光抑制是真光层硝化作用的首要限制因素,但有机质降解向下补给的铵盐与绕极深层水上升提供的对铵盐亲和力更强的硝化菌群和溶解态 Fe 相互耦合,缓冲了硝化的光抑制效应,促进了真光层中的硝化作用(图 4)。这些研究结果挑战了南大洋夏季硝化作用受光抑制故而不重要的传统观点<sup>[32]</sup>。

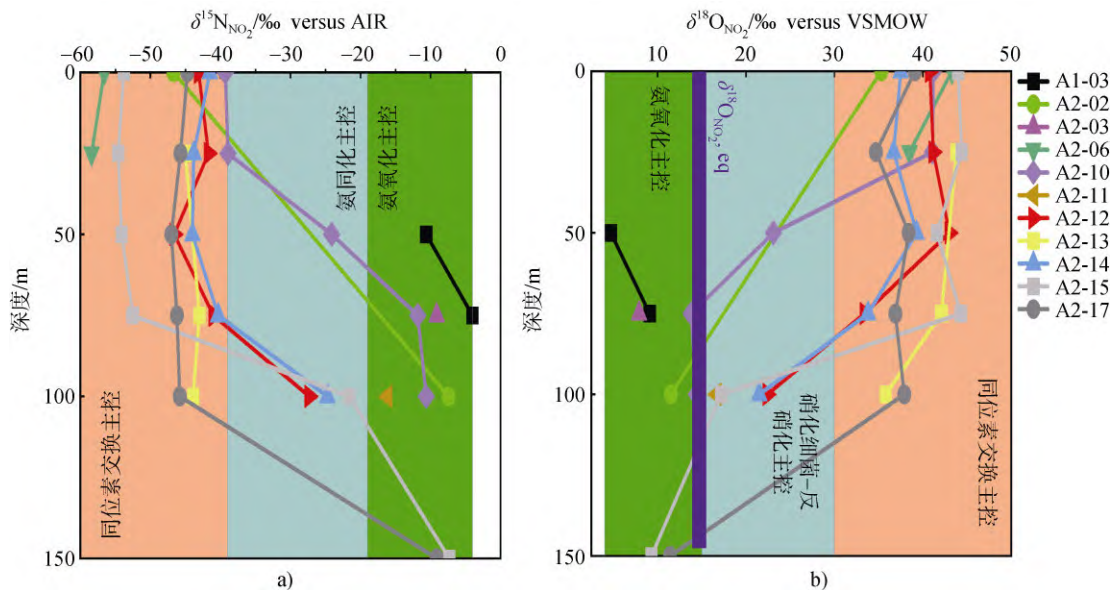


图 3 夏季阿蒙森海亚硝酸盐氮、氧同位素组成的垂直分布<sup>[30]</sup>。a)  $\delta^{15}N_{NO_2}$ ; b)  $\delta^{18}O_{NO_2}$

Fig.3. Profiles of nitrogen and oxygen isotopic compositions in nitrite in the Amundsen Sea in summer<sup>[30]</sup>. a)  $\delta^{15}N_{NO_2}$ ; b)  $\delta^{18}O_{NO_2}$

营养盐再生过程中硝化作用的重要性在亚北极太平洋和西北冰洋同样有所体现。对夏季白令海硝酸盐和颗粒有机物氮同位素组成的研究表明,白令海陆坡区比海盆区具有更明显的硝化作用,原因在于陆坡区具有更高的初级生产力和更活跃的有机物降解作用<sup>[33]</sup>。亚硝酸盐的氮、氧同位素组成也表明,白令海、楚科奇海次表层亚硝酸盐

初级极大值(primary nitrite maximum, PNM, 指真光层底部附近深度亚硝酸盐浓度累积的现象)的形成和亚硝酸盐储库的变化由氨氧化主控,而且亚硝酸盐的生物周转时间比低纬度海区更短,体现出活跃的动力学特征<sup>[34]</sup>。在楚科奇海,部分再生的硝酸盐会通过反硝化作用转化为  $N_2$  并离开海洋。2012 年夏季利用  $^{15}N$  示踪法测得的反硝化速

率介于  $1.8\sim 75.9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  之间, 在国际上首次证实了楚科奇陆架富氧水体中存在活跃的反硝化

作用, 提出沉积物再悬浮及颗粒物微环境可能是富氧水体发生反硝化的重要机制<sup>[35]</sup>。

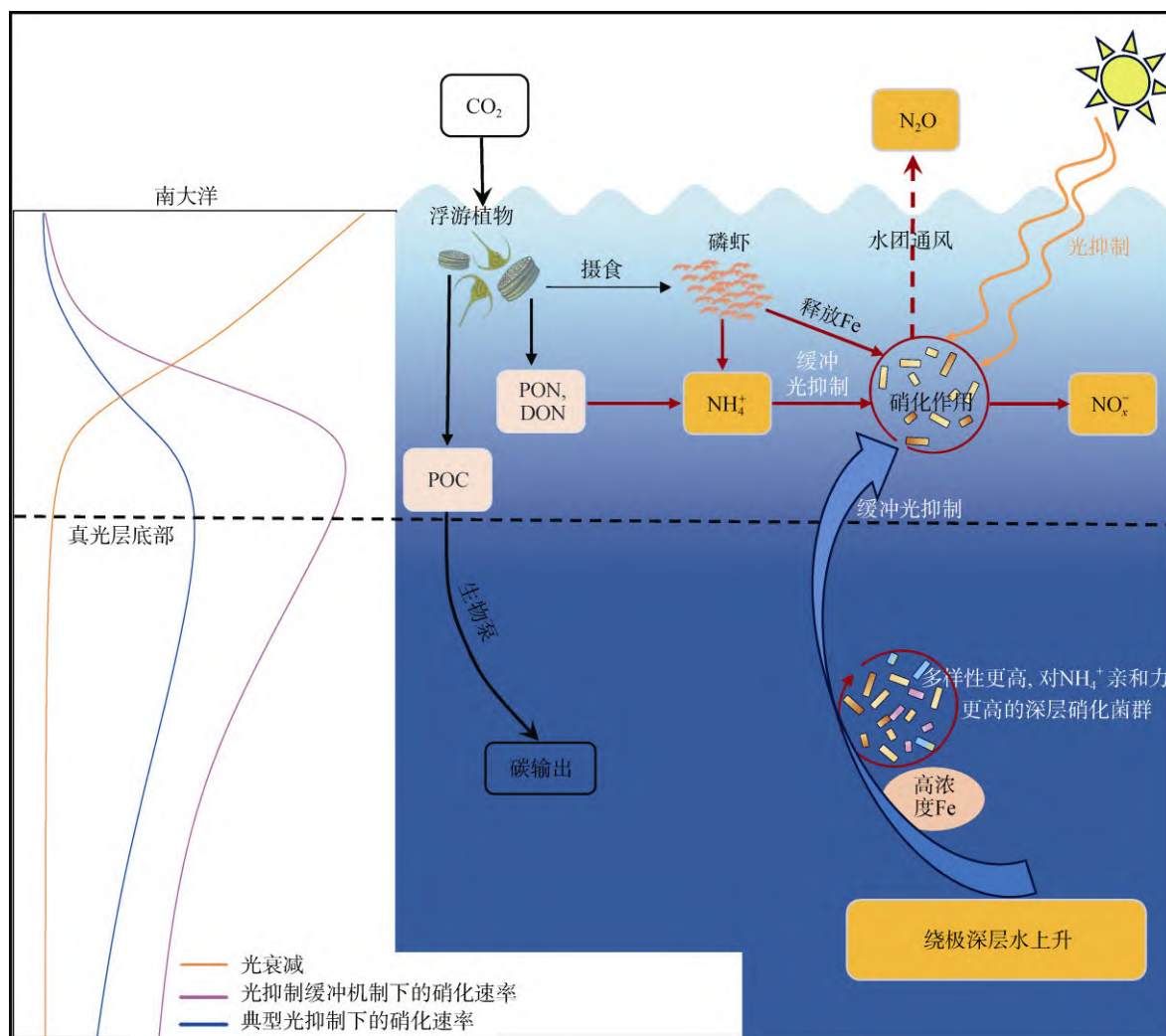


图4 夏季宇航员海硝化作用的光抑制及铵盐和上升流缓解机制<sup>[32]</sup>

Fig.4. Photoinhibition of nitrification in the Cosmonaut Sea in summer and its buffering mechanisms by ammonium and upwelling<sup>[32]</sup>

#### 4 生物泵表-底耦合状况

输出至沉积物的有机物通量大小直接影响到底栖生物的生长和底栖生态系统的结构和功能, 掌握生物泵表-底层的耦合状况具有重要科学意义。对南极宇航员海沉积物岩心开展的 <sup>230</sup>Th 和 <sup>210</sup>Pb 研究表明, 宇航员海的沉积速率、生物扰动系数和有机质降解速率均显著低于南极其他边缘海, 与该海域表层水体低的初级生产力相吻合, 显示出生物泵表-底耦合的特征<sup>[36]</sup>。与南大洋生物泵宏观尺度上的表-底耦合类似, 北极楚科奇陆架

区也表现出表-底耦合的特征。夏季楚科奇陆架沉积有机碳的埋藏速率达到  $25\sim 35 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , 占水柱初级生产力的  $59\%\sim 82\%$ , 证明楚科奇陆架是有机碳的一个高效汇区<sup>[37]</sup>, 同时也是生物泵表-底耦合的生态系统<sup>[38]</sup>。

对于受水平输运过程影响强烈的局部区域而言, POC 输出通量的表-底耦合关系可能被打破, 造成生物泵表-底的解耦现象。对普里兹湾邻近海域海水  $\delta^{18}\text{O}$  的研究显示, 达恩利角和普里兹湾水道存在高密陆架水下沉并形成南极底层水的过程<sup>[39]</sup>, 由此将沉降至陆架深层的 DBC, DOC 和悬

浮 POC 沿陆坡底部输送进入南大洋深层, 从而影响到有机碳输出的表-底耦合状况<sup>[40-41]</sup>。尽管埋藏于北极楚科奇陆架区沉积物的 POC 主要来自当地初级生产过程, 但同时也会受到水平输运的影响, 这可从<sup>210</sup>Pb 和黑碳未达到收支平衡得到佐证<sup>[42-43]</sup>。颗粒物的水平输运对海盆区中深层颗粒动力学的影响更加明显, 可造成海盆区颗粒输出通量表-底解耦合的现象。<sup>210</sup>Po/<sup>210</sup>Pb 不平衡的研究表明, 白令海海盆区 1000 m 以深水体<sup>210</sup>Po 比活度明显低于<sup>210</sup>Pb, 即<sup>210</sup>Po 相对于母体<sup>210</sup>Pb 出现明显亏损, 说明深层水存在强烈的颗粒清除迁出作用, 陆架向海盆输送的颗粒物是导致这种现象的主要原因<sup>[44-45]</sup>。

## 5 结语

近 10 年来, 运用同位素开展的极地海洋生物泵研究揭示了生物固碳、POC 输出通量、有机物

降解、营养盐再生和表-底耦合等生物泵过程的空间变化规律, 为评估不同时间尺度上极地海洋吸收大气 CO<sub>2</sub> 的潜力做出了积极贡献。展望未来, 有必要加强生物泵与食物网相互作用的研究, 诸如碳沿食物网流动的路径和效率、食物网结构对生物泵的影响、典型生境(冰间湖、锋面区、海山区)生物泵与食物网的关系等科学问题亟待解决, 以准确把握气候变化和人类活动双重压力下极地海洋生态系统的变化规律及驱动机制。

**致谢** 感谢中国极地研究中心(中国极地研究所)、中国历次南、北极科学考察队和“雪龙”号、“雪龙 2”号科考船在样品采集与样品现场处理等方面给予的大力支持。感谢课题组成员邱雨生、马婧、胡王江、童金炉、潘红、任春燕、曾健、贾仁明、杨紫菲、朱晶、林辉、胡慧娜、陈倩娜、李琦、康佳雯等在相关研究中做出的贡献。

## 参考文献

- 1 BUESSELER K O, ANTIA A N, CHEN M, et al. An assessment of the use of sediment traps for estimating upper ocean particle fluxes[J]. *Journal of Marine Research*, 2007, 65(3): 345-416.
- 2 CLAUSTRE H, LEGENDRE L, BOYD P W, et al. The oceans' biological carbon pumps: Framework for a research observational community approach[J]. *Frontier in Marine Science*, 2021, 8: 780052.
- 3 TURNER J T. Zooplankton fecal pellets, marine snow, phytodetritus and the ocean's biological pump[J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 130: 205-248.
- 4 IVERSEN M H. Carbon export in the ocean: A biologist's perspective[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2023, 15: 357-381.
- 5 GRAY A R. The four-dimensional carbon cycle of the Southern Ocean[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2024, 16: 163-190.
- 6 STIRNIMANN L, BORNMAN T G, FORRER H J, et al. A circum-Antarctic plankton isoscape: Carbon export potential across the summertime Southern Ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2024, 38(1): e2023GB007808.
- 7 ZHANG R, ZHENG M F, CHEN M, et al. An isotopic perspective on the correlation of surface ocean carbon dynamics and sea ice melting in Prydz Bay (Antarctica) during austral summer[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, 83: 24-33.
- 8 任春燕, 陈敏, 高众勇, 等. 南极普里兹湾及其邻近海域悬浮颗粒有机物的碳同位素组成及其影响因素[J]. *海洋学报*, 2015, 37(12): 74-84.
- 9 REN C Y, CHEN M, GUO L D, et al. Nitrogen isotopic fractionation of particulate organic matter production and remineralization in the Prydz Bay and its adjacent areas[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(12): 42-53.
- 10 陈倩娜, 任春燕, 李琦, 等. 南极普里兹湾及其邻近海域表层水镭同位素的分布及应用[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(1): 77-87.
- 11 ZHANG R, MA Q, CHEN M, et al. Nitrogen uptake regime regulated by ice melting during austral summer in the Prydz Bay, Antarctica[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(8): 1-7.
- 12 WANG B, CHEN M, CHEN F, et al. Meteoric water promotes phytoplankton carbon fixation and iron uptake off the eastern tip of the Antarctic Peninsula (eAP)[J]. *Progress in Oceanography*, 2020, 185: 102347.
- 13 WANG B, FAN L F, ZHENG M F, et al. Carbon and iron uptake by phytoplankton in the Amundsen Sea, Antarctica[J]. *Biology*, 2022, 11(12): 1760.

- 14 MA Q, CHEN M, QIU Y S, et al. Regional estimates of POC export flux derived from thorium-234 in the western Arctic Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(6): 97-108.
- 15 CHEN M, HUANG Y P, GUO L D, et al. Biological productivity and carbon cycling in the Arctic Ocean[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(12): 1037-1040.
- 16 CHEN M, HUANG Y P, CAI P H, et al. Particulate organic carbon export fluxes in the Canada Basin and Bering Sea as derived from  $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$  disequilibria[J]. *Arctic*, 2003, 56(1): 32-44.
- 17 ZHANG R, CHEN M, GUO L D, et al. Variations in the isotopic composition of particulate organic carbon and their relation with carbon dynamics in the western Arctic Ocean[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 81: 72-78.
- 18 JIA R M, MU X Y, CHEN M, et al. Sources of particulate organic matter in the Chukchi and Siberian shelves: Clues from carbon and nitrogen isotopes[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(9): 96-108.
- 19 LIN H, CHEN M, ZENG J, et al. Size characteristics of chromophoric dissolved organic matter in the Chukchi Seas[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(8): 6403-6417.
- 20 FANG Z M, YANG W F, STUBBINS A, et al. Spatial characteristics and removal of dissolved black carbon in the western Arctic Ocean and Bering Sea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 304: 178-190.
- 21 TONG J L, CHEN M, QIU Y S, et al. Contrasting patterns of river runoff and sea-ice melted water in the Canada Basin[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(6): 46-52.
- 22 TONG J L, CHEN M, YANG W F, et al. Accumulation of freshwater in the permanent ice zone of the Canada Basin during summer 2008[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(8): 101-108.
- 23 PAN H, CHEN M, TONG J L, et al. Variation of freshwater components in the Canada Basin during 1967–2010[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(6): 40-45.
- 24 潘红, 陈敏, 童金炉, 等. 2003–2012年间白令海峡断面淡水构成的时空变化[J]. *海洋学报*, 2015, 37(11): 135-146.
- 25 LI Q, CHEN M, JIA R M, et al. Transit time of river water in the Bering and Chukchi Seas estimated from  $\delta^{18}\text{O}$  and radium isotopes[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 159: 115-129.
- 26 BAI Y C, SICRE M A, CHEN J F, et al. Seasonal and spatial variability of sea ice and phytoplankton biomarker flux in the Chukchi Sea (western Arctic Ocean)[J]. *Progress in Oceanography*, 2019, 171: 22-37.
- 27 HU H N, LIU X, REN C Y, et al.  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  disequilibria and its estimate of particulate organic carbon export around Prydz Bay, Antarctica[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 701014.
- 28 CHEN M Y, CHEN M, ZHENG M F, et al. Particle dynamics revealed by  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  disequilibria around Prydz Bay in summer[J]. *Advances in Polar Science*, 2022, 33(1): 71-85.
- 29 CHEN M Y, CHEN M, ZHENG M F, et al.  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  disequilibria influenced by production and remineralization of particulate organic matter around Prydz Bay, Antarctica[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2021, 191-192: 104961.
- 30 CHEN Y J, CHEN M, CHEN J X, et al. Dual isotopes of nitrite in the Amundsen Sea in summer[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 843: 157055.
- 31 CHEN Y J, CHEN J X, WANG Y, et al. Sources and transformations of nitrite in the Amundsen Sea in summer 2019 and 2020 as revealed by nitrogen and oxygen isotopes[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 42(4): 16-24.
- 32 FAN L F, CHEN M, YANG Z F, et al. Alleviated photoinhibition on nitrification in the Indian Sector of the Southern Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2024, in press.
- 33 ZHU J, CHEN M, HU W J, et al. Biogeochemical cycling of nutrient in the western Bering Sea as revealed by nitrogen isotopic composition of nitrate and suspended particles[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2021, 174: 103551.
- 34 CHEN Y J, CHEN M. Nitrite cycling in warming Arctic and subarctic waters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(12): e2021GL096947.
- 35 ZENG J, CHEN M, ZHENG M F, et al. A potential nitrogen sink discovered in the oxygenated Chukchi shelf waters of the Arctic[J]. *Geochemical Transactions*, 2017, 18(1): 5.
- 36 YANG Z F, CHEN M, TANG Z, et al. The sedimentation, bioturbation, and organic matter degradation as revealed by excess  $^{230}\text{Th}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in the Cosmonaut Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2022, 198: 105049.
- 37 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[J]. *自然科学进展*, 2002, 12(5): 515-518.
- 38 ZHANG R, CHEN M, MA Q, et al. Insights into the coupling of upper ocean-benthic carbon dynamics in the western Arctic Ocean from

- an isotopic ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ) perspective[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(6): 26-33.
- 39 JIA R M, CHEN M, PAN H, et al. Freshwater components track the export of dense shelf water from Prydz Bay, Antarctica[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2022, 196: 105023.
- 40 FANG Z M, YANG W F, CHEN M, et al. Transport of dissolved black carbon from the Prydz Bay Shelf, Antarctica to the deep Southern Ocean[J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 63(5): 2179-2190.
- 41 FANG Z M, ZHANG K, YANG W F, et al. Top-down control over dissolved organic carbon in the bottom water of the Weddell Sea and its implication for the continental shelf pump[J]. *Progress in Oceanography*, 2023, 219: 103145.
- 42 CHEN M, MA Q, GUO L D, et al. Importance of lateral transport processes to  $^{210}\text{Pb}$  budget in the eastern Chukchi Sea during summer 2003[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 81-84: 53-62.
- 43 FANG Z M, YANG W F, CHEN M, et al. Abundance and sinking of particulate black carbon in the western Arctic and Subarctic Oceans[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29959.
- 44 HU W J, CHEN M, YANG W F, et al. Enhanced particle scavenging in deep water of the Aleutian Basin revealed by  $^{210}\text{Po}$ - $^{210}\text{Pb}$  disequilibria[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(6): 3235-3248.
- 45 HU W J, CHEN M, YANG W F, et al. Low  $^{210}\text{Pb}$  in the upper thermocline in the Canadian Basin: Scavenge process over the Chukchi Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(6): 28-39.

## Isotopic insights into the operation and mechanisms of biological pumps in polar oceans

CHEN Min<sup>1</sup>, FAN Lingfang<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>1,2</sup>, CHEN Yangjun<sup>1,3</sup>, ZHANG Run<sup>1</sup>, FANG Ziming<sup>1</sup>,  
YANG Weifeng<sup>1</sup>, ZHENG Minfang<sup>1</sup>, CHEN Mengya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

<sup>2</sup> College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

<sup>3</sup> School of Marine Science and Fisheries, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

### Abstract

The biological pump is one of the important pathways for the net absorption of atmospheric CO<sub>2</sub> and is also a key linkage between the upper ocean and benthic ecosystems in the polar oceans. This article summarizes the research on biological pumps carried out systematically in the Prydz Bay, Amundsen Sea, Cosmonaut Sea, Bering Sea, Chukchi Sea, Canada Basin, and other Arctic and Antarctic seas in the past 10 years by utilizing the unique functions of radionuclides and stable isotopes. These studies depicted the dynamic characteristics and spatial variation of processes such as biological uptake of carbon, export of particulate organic carbon, degradation of organic matter, regeneration of nutrients, and burial of sedimentary organic matter. In addition, the effects of environmental factors such as freshwater components, particle concentration, and trace Fe on the biological pump were also explored. Our study found that freshwater components, such as sea ice meltwater, glacier meltwater/river water, etc., affect the spatial variation of carbon fixation rate, Fe uptake rate, and POC export flux by changing water stratification, light availability, and nutrient supply; organic matter degradation and nitrification dominate the nutrient regeneration; and the formation of Antarctic bottom water and the cross-shelf transport of particulate matter affect the surface-bottom coupling of biological pumps. Facing the dual pressures of future climate change and human activities, it is urgent to strengthen research on the interaction between biological pumps and food webs to accurately grasp the laws and mechanisms of changes in polar marine ecosystems.

**Keywords** marine biological pump, radionuclide, stable isotope, Southern Ocean, Arctic Ocean