

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2026-0089

全球变化背景下北冰洋人为碳储量变化、 驱动机制与未来挑战

高 慧^{1,2}, 李华桢¹, 陈 莹¹, 赵 辉^{1,2}

(1.广东海洋大学 化学与环境学院, 广东 湛江 524088; 2.湛江市海岸带海水养殖污染物控制及生态修复重点实验室, 广东 湛江 524088)

摘 要: 北冰洋是全球重要碳汇, 北极放大效应驱动海冰快速消退, 引发学界对北极碳汇演变趋势争议。本文综述了北极碳汇与人为碳时空分布特征, 阐释海冰消融对北极碳循环的调控机制。研究表明, 北冰洋人为碳总储量为 2.5~3.5 Pg C, 呈陆架高于海盆、欧亚海盆高于美亚海盆的空间格局, 并主要富集于中层水体。海冰消融通过影响海气交换、水体层结、环流通风及生物地球化学过程, 重塑人为碳的吸收、输送与储存路径, 其对北冰洋碳汇和人为碳影响具有区域差异性与双重效应。总体来看, 海冰消融背景下北冰洋仍是全球重要的人为碳汇, 但长期储存效率仍存在较大不确定性。未来需加强长期观测与多过程耦合研究, 提高对北冰洋碳循环演变及其气候效应的预测能力。

关键词: 北冰洋; 人为碳; 海冰消融; 海洋酸化

中图分类号: P7

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2026)00-0001-12

Anthropogenic carbon in the arctic ocean in the context of global change: inventory evolution, driving mechanisms and future challenges

Gao Hui^{1,2}, Li Huazhen¹, Chen Ying¹, Zhao Hui^{1,2}

(1.College of Chemistry and Environmental Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2.Zhanjiang Key Laboratory of Coastal Zone Seawater Farming Pollutant Control and Ecological Restoration, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: The Arctic Ocean serves as a critical sink in the global carbon cycle. However, rapid sea ice retreat driven by Arctic amplification has sparked extensive debate over the future evolution of the Arctic carbon sink. This review synthesizes current understanding of Arctic carbon sink characteristics and the spatiotemporal distribution of anthropogenic carbon, and examines the regulatory mechanisms through which sea ice loss modulates Arctic carbon cycle. Existing studies indicate that the total anthropogenic carbon inventory in the Arctic Ocean is approximately 2.5-3.5 Pg C, with a spatial pattern characterized by higher concentrations on continental shelves than in deep basins, and markedly greater accumulation in the Eurasian Basin relative to the Amerasian Basin. Anthropogenic carbon is predominantly accumulated within intermediate waters. Sea ice loss reshapes the pathways of anthropogenic carbon uptake, transport, and storage by altering air-sea gas exchange, water-column stratification, ocean circulation, ventilation, and biogeochemical processes. Consequently, its impacts on Arctic carbon sink capacity and anthropogenic carbon budgets exhibit pronounced regional

收稿日期: 2026-05-20, 修订日期: 2026-06-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(4207060658); 广东海洋大学科研启动费资助项目(060302122304)

作者简介: 高 慧(1993—), 江苏淮安人, 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为海洋生物地球化学与物理过程耦合研究, E-mail: huigao@gdou.edu.cn

通信作者: 赵 辉(1978—), 男, 博士, 教授, 从事海洋资源开发环境影响研究, E-mail: huizhao1978@163.com

heterogeneity and dual effects. Overall, the Arctic Ocean remains an important anthropogenic carbon sink under ongoing sea ice loss, yet considerable uncertainty persists regarding its long-term storage efficiency. Future research should strengthen sustained observations and investigations of coupled physical and biogeochemical processes to improve predictions of Arctic carbon cycle dynamics and their climate implications.

Key words: Arctic Ocean; anthropogenic carbon; sea ice loss; ocean acidification

工业革命以来,以化石燃料燃烧和土地利用变化为主的人类活动向大气中释放了大量的二氧化碳(CO_2),使其浓度从工业革命前的 280 ppm 攀升至今已超过 430 ppm,较工业革命前增长 50% 以上^[1]。而在工业革命之前的 11000 年里,大气 CO_2 浓度基本稳定,变化幅度小于 20 ppm^[2]。人类活动引起的大气 CO_2 显著增长催生了“人为 CO_2 (C_{ant})”的概念。海洋 C_{ant} 是指工业革命以来因大气 CO_2 升高引起海水中溶解无机碳(DIC)增加的那部分过剩 CO_2 ,其来源明确、可定量识别,能够有效区分人为输入与自然碳循环信号,是定量研究海洋碳循环过程的重要指标^[3]。基于模式研究,工业革命以来海洋对 C_{ant} 的吸收主要由大气 CO_2 的人为扰动驱动^[4]。尽管海洋中的 C_{ant} 含量只占了自然无机碳总量的 1%^[5],但海洋累积吸收了约三分之一的 C_{ant} ^[6],显著减缓了大气 CO_2 的增长。然而,海洋对 C_{ant} 的持续吸收也导致海洋酸化^[7-8],改变了海洋的基本化学平衡与海洋生物地球化学环境,影响海洋生物钙化率以及生存^[9-10]。

北冰洋虽仅占全球海洋总面积的 3%~4%^[11],却凭借其独特的自然环境条件,成为全球单位面积碳汇强度最高的海域之一,其 CO_2 净吸收量占全球海洋的 5%~14%^[12],在全球碳循环研究中占据举足轻重的地位。作为全球气候变化的“放大器”与“指示器”,北极地区过去 40 年的变暖速率几乎是全球其他地区的 4 倍,即“北极放大效应”^[13-14]。该变暖驱动了北冰洋海冰覆盖范围的持续快速减少^[15]、表层水淡化^[16]、太平洋入流水流量增加^[17]、初级生产力提高^[18-19]等一系列环境响应^[20],进而改变了北冰洋碳循环的物理、化学与生物过程。海冰消融引发的多过程演变,调控北冰洋 C_{ant} 的储量、分布与迁移,也使得北冰洋碳汇的演变趋势与调控机制成为全球变化研究的前沿与热点^[21]。

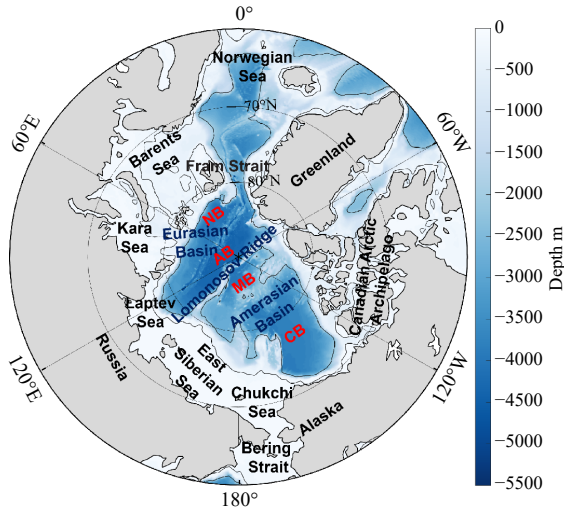
当前,围绕海冰消融对北极碳汇的调控效应、 C_{ant} 储量区域分布格局及驱动机制,国内外学者已开展了大量研究,取得了一系列重要进展。然而,不同研究在海冰消融对碳汇的影响以及 C_{ant} 在不同海盆和不同水层中的累积特征与长期演变等方面仍存在分歧,诸多关键科学问题尚未形成共识。本文基于国内外最新研究成果,梳理北冰洋碳循环与 C_{ant} 研究进展,重点总结海冰消融对北极碳汇的双重效应、北冰洋 C_{ant} 分布与储量变化,分析了当前研究存在的主要不足与挑战,并展望未来研究方向,以期北冰洋碳循环与 C_{ant} 研究提供科学参考。

1 北冰洋环境特征及其对气候变化的敏感性

1.1 北冰洋高效碳汇的自然环境基础

北冰洋是全球纬度最高、面积最小的大洋,被欧亚大陆、北美大陆与格陵兰岛环绕,整体呈现宽阔陆架与深海海盆的地理结构。陆架区约占北冰洋总面积的 1/3,包括楚科奇海、巴伦支海、拉普捷夫海、喀拉海等流入型陆架。深海盆被罗蒙诺索夫海岭分隔为欧亚海盆(南森海盆、阿蒙森海盆)与美亚海盆(加拿大海盆、马卡罗夫海盆)两大体系(图 1)。

独特的高纬地理位置与海域结构,造就了北冰洋与自身体量不相称的高效碳汇能力。低温环境有利于提高 CO_2 在海水中的溶解度,是北冰洋吸收大气 CO_2 的天然优势^[22]。北冰洋的碳吸收驱动因素可归纳为物理与生物两大过程^[12]。物理过程方面,北冰洋高密度冷水的形成与潜沉过程,可将表层吸收的 CO_2 输送至中深层水体实现长期封存,是北极 CO_2 储存的关键物理路径^[23]。此外,淡水输入、海冰与海洋相互作用以及层化等过程,也共同调节着 CO_2 的吸收与储存^[24]。生物过程方面,夏季海冰消融伴随光照增加,会刺激浮游植物大量繁殖,形成密集的生物



注: Chukchi Sea: 楚科奇海、Barents Sea: 巴伦支海、Laptev Sea: 拉普捷夫海、Kara Sea: 喀拉海、East Siberian Sea: 东西伯利亚海、Norwegian Sea: 挪威海、Lomonosov Ridge: 罗蒙诺索夫海岭、Eurasian Basin 欧亚海盆、Amerasian Basin 美亚海盆、NB: 南森海盆(Nansen Basin)、AB: 阿蒙森海盆(Amundsen Basin)、CB: 加拿大海盆(Canada Basin)、MB: 马卡罗夫海盆(Makarov Basin)、Bering Strait: 白令海峡、Fram Strait: 弗拉姆海峡

图 1 北冰洋地形

Fig. 1 Bathymetric map of the Arctic Ocean

生产活动^[25]。浮游植物通过光合作用消耗表层海水中的 CO_2 , 从而降低海水 CO_2 分压($p\text{CO}_2$), 加强海气界面的 CO_2 梯度, 驱动更多大气 CO_2 进入海洋, 形成海冰消融提高生物生产, 进而增强碳吸收的正反馈效应^[26]。

1.2 北极放大效应与海冰消退的长期趋势

北冰洋正在经历升温、表层水淡化和碳循环重构等环境变化, 影响局地乃至全球气候^[27]。北极放大效应驱动的海冰快速消退, 是当前北冰洋环境变化最主要的特征, 也是北冰洋碳循环过程改变的驱动因子。Rantanen 等^[14]基于 1979 年以来的观测数据得出, 北极地区的变暖速率已接近全球平均水平的 4 倍, 远超此前学界普遍认知的 2~3 倍, 这一异常增温直接导致了北冰洋海冰覆盖范围的持续锐减^[15]。全球气候模式与观测分析一致表明, 北冰洋正加速走向季节性无冰的未来。其中, 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)模型模拟结果显示, 北冰洋在 2050 年之前的 9 月将首次出现海冰面积小于 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的近乎无冰状态^[28]。现有研究基于不同统计方

法与排放情景给出的首次无冰时间范围从 2037 年至 2072 年不等^[29-31]。海冰消退通过削弱海气 CO_2 交换物理屏障、加剧水体层化作用等物理过程, 与延长浮游植物生长时期、改变生物生产格局等生物过程, 共同作用于北冰洋碳循环, 也引发了学术界关于北极碳汇未来演变趋势的激烈讨论^[21]。

2 北冰洋 C_{ant} 研究进展

2.1 研究方法的发展

在北极碳汇功能争议的背景下, C_{ant} 作为区分人为扰动与自然碳循环的重要指标, 已成为解析北极碳汇变化驱动机制的关键研究对象。北冰洋 C_{ant} 研究的发展历程, 本质上是 C_{ant} 估算方法不断完善、区域约束不断增强、 C_{ant} 估算精度逐渐提升的过程。总体而言, 其方法演进大致经历了从早期粗略定量估算到利用瞬态示踪剂约束, 再到多示踪剂联合验证以及高分辨率模型等阶段。

北冰洋 C_{ant} 研究起步于 20 世纪 90 年代末, 早期主要依赖箱式模型和碳同位素方法进行初步估算。Anderson 等^[32]采用箱式模型方法结合观测的二氯二氟甲烷(CFC-12)、四氯化碳(CCl_4)示踪数据首次量化北冰洋 C_{ant} 储量约为 1.35 Pg C , 并指出 1991 年 C_{ant} 吸收量约为 $(0.026 \pm 0.009) \text{ Gt C/a}$ (其中欧亚海盆为 0.0194 Gt C/a , 加拿大海盆为 0.0070 Gt C/a), 占全球海洋吸收的 1%。但该研究假设海洋与大气 CO_2 浓度完全平衡, 未考虑示踪剂的饱和度差异, 导致 C_{ant} 估算偏低, 存在较大估算不确定性。Bauch 等^[33]采用浮游有孔虫碳同位素对比法, 结合北冰洋南森海盆水柱与表层沉积物的 $\delta^{13}\text{C}$ 观测数据, 估算北冰洋 C_{ant} 储量为 $4 \sim 7 \text{ Gt C}$, 占全球海洋 C_{ant} 吸收总量的 4%~6%。但该研究仅聚焦南森海盆, 观测空间覆盖不足, 且采用一阶估算、假设海水碱度恒定等简化条件, 叠加碳酸盐离子效应校正的不确定性, 因此, C_{ant} 储量估算误差达 $\pm 2 \sim 3 \text{ Gt C}$ 。

随着多种估算 C_{ant} 方法被提出^[34-36], 且对北冰洋通风过程与水团结构不平衡状态认识的加深, 北冰洋 C_{ant} 研究重心逐步转向基于瞬态示踪

剂的传输时间分布(TTD, transit time distribution)方法。Tanhua等^[37]基于TTD方法整合多年氯氟烃(氯氟碳化合物, CFCs)、六氟化硫(SF₆)瞬态示踪剂观测数据, 假设深层水形成后示踪剂饱和, 通过瞬态示踪剂刻画水体环流与通风年龄, 实现C_{ant}分离, 估算2005年北冰洋C_{ant}总储量为2.5~3.3 Pg C, 并发现欧亚海盆中层水通风时间(约200年)快于加拿大海盆(约300年), 阐明了海盆间通风差异对C_{ant}空间分布的调控机制, 修正了早期研究因方法不完善造成的C_{ant}储量估算偏差。针对传统TTD方法未充分考虑深层水形成期表层CFC-12不饱和而C_{ant}过饱和的不平衡条件可能导致北冰洋C_{ant}浓度被低估7%~12%的问题, 经修正后, Terharr等^[38]估算2005年北冰洋C_{ant}总储量为(3.3±0.3) Pg C。

在TTD框架基础上, 新型放射性核素示踪剂的应用, 有效规避了传统气体示踪剂的饱和缺陷, 同时也实现了多示踪剂交叉验证。Smith等^[39]基于2015年国际海洋痕量元素及其同位素研究计划(GEOTRACES)航次的碘129(¹²⁹I)、三氯一氟甲烷(CFC-11)与SF₆示踪观测数据, 采用TTD方法刻画北冰洋环流的平均年龄(Γ)与混合参数(Δ), 确定气体示踪剂饱和度为0.90时估算结果最优, 发现北冰洋上层、中层水 Δ 稳定在6~10年, 以强平流输送为主, Γ 随大西洋水环流路径逐步增加, 同时揭示了冬季太平洋水与大西洋水的混合调控机制, 完善了北冰洋TTD方法的参数约束与水团混合框架, 为后续C_{ant}精准估算提供了关键的环流与示踪参数支撑。Raimondi等^[40]将¹²⁹I与铀236(²³⁶U)放射性核素作为新型示踪剂, 通过TTD方法估算2015年北冰洋C_{ant}储量为(0.85±0.17) Pg C, 与传统气体示踪剂法得出的(1.0±0.03) Pg C结果在误差范围内完全一致(若按体积比例外推至北冰洋全海域, 采用核素法估算的C_{ant}约为2.85 Pg C, 采用体法估算的C_{ant}约为3.62 Pg C), 证实了放射性核素¹²⁹I与²³⁶U在北冰洋C_{ant}研究中的可靠性, 同时指出气体示踪剂的饱和度问题是传统TTD方法的主要不确定性来源, 推动北冰洋C_{ant}研究向多示踪剂联合应用方向发展。

TTD方法在刻画北冰洋复杂水团混合与陆

架海盆相互作用与年代际C_{ant}变化识别方面存在一定局限, 因此多元线性回归方法也被引入北冰洋C_{ant}研究。Ulfssbo等^[41]应用了拓展多元线性回归(eMLR)方法估算了1996至2015年北冰洋欧亚海盆C_{ant}变化, 指出在南森海盆和阿蒙森海盆的中层水体C_{ant}呈现出快速的年代际积累。Woosley和Millero^[42]进一步采用集合eMLR方法估算了1994年至2015年西北冰洋C_{ant}变化, 即在传统eMLR方法基础上同时运行42组参数组合回归并取平均, 降低单一参数选择带来的主观偏差与过拟合问题, 结果指出尽管大气CO₂持续上升, 但1994至2015年加拿大海盆与马卡罗夫海盆几乎没有新增C_{ant}累积。

在数值模式方面, Terhaar等^[43]证实, 提升模型分辨率(从2°到0.25°)可使C_{ant}估算结果(0.25°高分辨率模拟2005年的C_{ant}结果为2.6 Pg C)更接近观测约束, 并明确侧向输运是C_{ant}进入北冰洋的主要途径, 其贡献约为海气通量的3倍。此外, 碳同位素示踪技术的应用也实现了重要突破, Ko和Quay^[44]基于GEOTRACES航次的 $\delta^{13}\text{C}$ 高精度观测数据, 系统评估了C_{ant}对北冰洋 $\delta^{13}\text{C}$ 的苏斯效应(Suess effect), 从表层到2000 m水深均观测到C_{ant}增加和 $\delta^{13}\text{C}$ 降低, 为认识北冰洋C_{ant}输送过程与储存机制提供了独立证据。

综上所述, 北冰洋C_{ant}研究方法已经由早期依赖简化假设的箱式模型和同位素估算, 逐步发展为以TTD方法为核心、eMLR估算为补充、多示踪剂联合约束和高分辨率模式模拟相结合的综合研究体系, C_{ant}储量估算结果逐渐收敛(表1)。研究重点也由早期的C_{ant}总量估算, 逐渐转向水团通风、输运路径及长期储存机制的解析, 为认识海冰消融背景下北冰洋C_{ant}演变提供了重要技术支撑。

2.2 北冰洋C_{ant}的时空分布与储量格局

经过三十余年的观测积累与方法发展, 目前学界已基本形成共识, 受环流通风、水团混合与陆架海盆相互作用共同调控, 北冰洋C_{ant}在水平和垂直上分布极不均匀。海冰消融通过调控海气交换、层结强度及水团输运等物理过程以及促进生物生产等生物过程, 进一步重塑北冰洋

表 1 北冰洋 C_{ant} 主要估算方法对比

Tab.1 Comparison of methods for anthropogenic carbon estimation in the Arctic Ocean

方法类型	原理	优势	局限性	代表性研究
箱式模型法	基于CFC-12、 CCl_4 等示踪剂观测数据, 假设海气 CO_2 平衡, 通过箱式模型初步量化 C_{ant} 储量与吸收通量	方法简便, 首次实现北冰洋 C_{ant} 的定量估算, 奠定研究基础	假设海气 CO_2 完全平衡, 未考虑示踪剂饱和度差异, 导致估算结果偏低; 整体不确定性较大	[32]
碳同位素法	利用浮游有孔虫与水体的 $\delta^{13}C$ 观测数据, 识别水体的碳同位素苏斯效应, 示踪 C_{ant} 的入侵与储存	开创同位素示踪北冰洋 C_{ant} 的新路径, 可反映 C_{ant} 的入侵深度与过程	早期研究数据空间覆盖不足且假设海水碱度恒定, 叠加碳酸盐离子效应校正误差, 储量估算偏差大	[33, 44]
TTD 示踪法	基于传输时间分布(TTD)通过CFCs、 SF_6 等瞬态示踪剂刻画水体环流与通风年龄, 实现 C_{ant} 的分离与储量估算	结合水体环流过程, 结果稳健性较好; 可阐明海盆间通风差异对 C_{ant} 分布的调控机制	传统方法假设深层水形成期示踪剂饱和, 导致 C_{ant} 浓度被低估 7% ~ 12%; 气体示踪剂饱和度和校正存在不确定性	[37-38]
eMLR法	基于海水温度、盐度、营养盐等环境参数与溶解无机碳的统计关系, 分离出 C_{ant} 组分	计算便捷, 集合eMLR可消除单一参数选择的主观偏差, 降低过拟合风险, 适合区域高分辨率观测分析	依赖环境参数选择的合理性; 水团混合复杂区域的估算偏差较大	[41-42]
放射性核素示踪法	以 ^{129}I 与 ^{236}U 等放射性核素为新型示踪剂, 结合TTD方法估算 C_{ant} 储量, 实现多示踪剂交叉验证	规避传统示踪剂的饱和缺陷, 结果可靠性高; 可与气体示踪法交叉验证, 完善TTD方法的参数体系	放射性核素观测数据稀缺, 空间覆盖范围有限; 全海域储量外推存在一定不确定性	[40]
数值模式模拟法	利用海洋生物地球化学数值模式, 模拟 C_{ant} 的吸收、输运与储存过程, 评估不同情景下的演变趋势	可实现多过程耦合模拟, 量化不同驱动因子的贡献; 支持不同排放情景下的预估; 提升模式分辨率可有效降低估算偏差	模式参数化方案存在不确定性, 对中小尺度过程(如陆架海盆相互作用)的模拟精度不足; 高分辨率模拟计算成本较高	[43]

C_{ant} 在水平和垂向上的分布格局。

水平分布上, 不同海盆之间的 C_{ant} 累积速率存在显著差异, 欧亚海盆(南森海盆、阿蒙森海盆)是北冰洋 C_{ant} 富集区, C_{ant} 浓度与累积速率显著高于美亚海盆(加拿大海盆、马卡罗夫海盆)^[37, 41, 45-47]。拉普捷夫海以北及大西洋入流影响显著的区域通常对应北冰洋 C_{ant} 高值区, 而随着大西洋水沿边界流向内陆输送, C_{ant} 浓度呈现逐步递减趋势^[37]。从累积速率来看, 欧亚海盆 C_{ant} 年累积速率约为 $0.4 \sim 1.0 \text{ mol C m}^2/\text{a}$, 其中南森海盆和阿蒙森海盆的累积尤为显著; 相比之下, 加拿大海盆和马卡罗夫海盆的 C_{ant} 累积速率仅为 $0.1 \sim 0.2 \text{ mol C m}^2/\text{a}$, 不足欧亚海盆的一半, 部分研究显示其在 1994—2015 年新增 C_{ant} 有限, 甚至接近无净累积状态^[41-42, 45]。这一差异主要反映了欧亚海盆受大西洋入流通风和侧向输送的控制更强, 大西洋来源水是北冰洋 C_{ant} 输入最重要的外源通道。进入北冰洋后的大西洋水沿欧亚海盆边界流向东传播, 在输送过程中持续向周围海域输送 C_{ant} , 因此欧亚海盆形成北冰洋最显著的 C_{ant} 高值区^[37, 41]。而美亚海盆则受淡水输入增强和层化加剧影响, 垂向交换和中层通风较弱, 导致 C_{ant} 累积速率明显偏低^[42, 45]。基

于我国北极科考资料, Deng 等^[46] 和 Wang 等^[47] 进一步表明, 北冰洋上层 4000 m C_{ant} 柱储量显著高于白令海, 加拿大海盆 C_{ant} 高于楚科奇海又显著高于白令海, 且加拿大海盆南部 200 ~ 600 m C_{ant} 浓度明显低于北部, 说明水团输送路径、通风效率及边界流过程共同决定了 C_{ant} 在不同海盆中的空间累积格局。

与水平分布相比, 北冰洋 C_{ant} 的垂向分布规律更为一致。北冰洋 C_{ant} 主要储存在上层至中层水体, 整体呈现表层较高、随深度递减、中层为核心储库的结构^[37, 40, 44, 48-49]。现有研究普遍认为, 上层 1500 m 的水体存储了北冰洋绝大部分的 C_{ant} , 其中约 500 m 附近的大西洋水层通常形成明显的 C_{ant} 高值中心, 而 500 m 以下 C_{ant} 浓度则随深度快速下降, 底层水一般低于 $8 \mu\text{mol/kg}$ ^[37, 40, 46]。 C_{ant} 通过海气界面 CO_2 交换进入海洋, 表层海水作为海洋与大气接触的上边界, 通常呈现相对较高的 C_{ant} 浓度。而北冰洋中层水体中的 C_{ant} 并非主要来自局地海气交换的简单累积, 而是以大西洋来源水的侧向通风输送为主导。大西洋来源水沿边界流的侧向输送, 结合海盆内部通风以及水团混合过程, 持续将 C_{ant} 输送并累积至中层水体中。但同时, 北冰洋显著的层化结构削弱了

垂向交换,使进入中层的 C_{ant} 难以继续向深层扩散,因而在 C_{ant} 不断输入和水团滞留效应的共同作用下,中层水体成为北冰洋 C_{ant} 的主要富集层^[44, 46, 48]。海冰消融进一步强化了这一垂向分布特征。随着海冰覆盖减弱,表层开阔水域增加,海气 CO_2 交换增强,短期内有利于 C_{ant} 在表层快速积累。但与此同时,融冰淡水输入又会显著降低表层盐度和总碱度^[42],增强水体层结,抑制垂向混合和深层通风,使新增的 C_{ant} 更难向深层输送^[50]。

总体来看,随着观测资料不断积累以及 TTD、eMLR、碳同位素等方法的发展,北冰洋 C_{ant} 研究已由早期的粗略定量逐步转向多方法交叉验证与多过程联合约束。早期研究受限于观测覆盖不足和方法假设, C_{ant} 储量估算差异较大,范围从 1.35 Pg C 到 7 Pg C 不等^[32-33];而近年来,多示踪剂、多方法和高分辨率模型研究基本收敛于 2.5 ~ 3.5 Pg C 的估算区间,约占全球海洋 C_{ant} 总储量的 4% ~ 6%^[37-40, 43]。这一收敛不仅说明北冰洋 C_{ant} 总量已获得较稳定的定量认识,也表明北冰洋 C_{ant} 的研究重心正由总量是多少逐渐转向 C_{ant} 是如何进入、如何输送、如何储存以及如何响应海冰消融等过程性问题。北冰洋显示出远高于全球平均水平的单位面积储碳效率,既体现了北冰洋强大的碳汇能力,也反映出其由海气交换、大西洋入流、海盆通风和层化结构共同控制的高灵敏度碳循环特征,因此在全球碳收支与海洋酸化研究中具有重要地位。

3 海冰消融对北冰洋碳汇功能与 C_{ant} 影响

3.1 海冰消融对北冰洋碳汇功能的双重效应

3.1.1 海冰消融驱动碳汇增强

海冰消融是北极气候变化最主要的特征,也是调控北冰洋碳汇功能的重要外部驱动因子。多项研究从开阔水域扩张、生物生产提升和碳吸收强度修正角度,论证了海冰消融对北冰洋碳汇的促进作用。Bates 等^[51] 最早基于观测数据定量指出海冰消退导致开阔水域增加,进而使北冰洋对大气 CO_2 的吸收量显著增强。其后相关研究进一步表明,海冰消退不仅通过增加海气接触面积直接促进 CO_2 交换,还可以通过延长无冰

期、增加光照,提升北极海域浮游植物初级生产力,放大生物碳泵对 CO_2 的固定能力^[52-53]。尤其在营养盐相对充足的陆架海域,海冰消退往往伴随初级生产力增强和春、夏季生物生产期延长,从而提升局地碳汇强度^[52]。Lannuzel 等^[22] 也指出,尽管海冰消退导致冰藻碳泵效率降低,但开阔水域浮游植物生产的增加可在一定程度上重新配置碳输出路径,未来北极碳汇仍可能保持增强趋势。

除生物过程外,部分研究还指出,传统观测可能低估了海冰消融条件下北极碳吸收的强度。Richaud 等^[54] 研究发现,北冰洋海冰消融过程与季节性碳吸收增强存在显著线性关系,当前北极碳吸收强度被低估约 30%。Tozawa 等^[55] 针对 2021 年北冰洋太平洋扇区的碳酸盐体系观测也指出,楚科奇海的 $p\text{CO}_2$ 主要受生物活动与温度调控,加拿大海盆则以淡水输入为主导,且海冰消融降低 $p\text{CO}_2$ 的程度强于河水与融雪,说明海冰减少在某些区域和季节能够增强北冰洋的 CO_2 吸收能力。总体而言,这类观点强调海冰消融通过扩大开阔水域、增强光照和延长生长季,可在短期或局地尺度上增强北冰洋碳汇。

3.1.2 海冰消融导致碳汇潜力受限/减弱

与海冰消融驱动北冰洋碳汇增强的观点相对,另一类研究则指出,海冰消融未必导致碳汇持续增长,甚至可能出现碳汇功能减弱的情况。其原因在于海冰消退往往伴随强淡水输入和层化加剧,从而形成物理阻碍,削弱垂向交换、抑制营养盐供给,并改变海水 $p\text{CO}_2$ 与碳酸盐体系平衡,限制生物碳泵效率与碳的长期封存。

在物理阻碍方面,Cai 等^[56] 基于 2008 年夏季在加拿大海盆的观测指出,海冰融化形成的强淡水层结限制表层水体与深层海水之间的交换,阻碍了已吸收的 CO_2 向深海的输送。Miller 等^[57] 研究也指出,冰川融化与河流径流带来的淡水输入增加,会强化上层海洋的层化结构,抑制深层营养盐向表层供应,进而限制浮游植物初级生产及其对 CO_2 的吸收。Lewis 等^[58] 进一步证实,当前北极浮游植物初级生产的增长已从海冰消退驱动的光照增加,转向营养盐供给限制的阶段,未来浮游植物初级生产力的增长空间可能有限。

在碳酸盐体系方面,海冰消退可能加速表层水 $p\text{CO}_2$ 上升并削弱碳汇稳定性。Ouyang 等^[59] 通过长期观测数据发现,海冰减少导致的加拿大海盆海水 $p\text{CO}_2$ 上升速度是全球平均的两倍,说明海冰减少可能使局地海洋更快接近或超过大气平衡状态,从而削弱继续吸收 CO_2 的潜力,并可能导致 CO_2 潜在释放。Fransson 等^[60] 也指出,海冰消退会导致深层高 $p\text{CO}_2$ 水向上输送,使北冰洋 CO_2 吸收能力呈下降趋势。

在生物碳泵效率方面,海冰消融对碳汇的长期作用同样存在不确定性。Wu 等^[61] 基于 2003–2022 年卫星观测数据指出,北极生物泵在 2013 年出现明显转折,在近无冰条件下生物泵转向持续减弱,同时,北冰洋碳酸盐体系中 $p\text{CO}_2$ 升高,碳酸盐离子浓度下降,进一步削弱海水对 CO_2 的吸收与碳封存能力。Knies 等^[62] 以北极斯瓦尔巴群岛孔斯峡湾为研究区,通过沉积物岩芯与生物地球化学监测证实,海冰消退初期浮游植物初级生产力虽有所提升,但在水体分层加剧、深层营养盐供给受限、浮游植物群落小型化的共同作用下,颗粒有机碳沉降效率反而下降,最终导致北极峡湾碳汇能力减弱,挑战了生产力提升即碳汇增强的传统认知。

此外,海冰消融还可能通过新的物理压载机制影响碳输出过程。Swoboda 等^[63] 基于北冰洋弗拉姆海峡 13 年的通量观测发现,海冰融化释放的石膏与陆源颗粒可通过压载作用使有机聚集体沉降速度提升 10 倍、碳输出增加 30%,为海冰消融背景下北极碳循环提供了全新的生物地球化学机制。

综合现有研究来看,海冰消融对北极碳汇的影响具有明显的双重性与区域异质性,难以简单归结为碳汇增强或减弱。在较短时间尺度或局地尺度上,海冰减少通过扩大开阔水域、延长生长季、增强初级生产力,在一定程度上促进了大气 CO_2 的吸收,这一效应在营养盐充足的陆架区尤为明显。而在较长时间尺度或深海盆区,淡水输入增加、层化增强、营养盐限制、 $p\text{CO}_2$ 升高以及生物泵效率下降等过程的负向反馈逐步显现,制约了碳汇能力的持续增强。值得注意的是,2013 年前后北极生物泵与碳汇响应的阶段性转

折,表明上述两种效应的相对主导地位可能随冰退进程发生动态切换,北极碳循环或已进入一个新的演变阶段。因此,海冰消融实质上是通过重塑物理过程、生物过程与碳酸盐化学过程之间的耦合关系,改变北冰洋碳汇功能的时空演变格局,其综合效应与长期趋势目前仍存在较大不确定性,有待通过更系统的长期观测与多过程耦合模型加以厘清。

3.2 海冰消融对 C_{ant} 影响

3.2.1 正向驱动效应: 海冰消融强化 C_{ant} 吸收与中层累积

海冰消融可通过垂向混合与侧向输运过程促进北冰洋中层水体 C_{ant} 快速累积^[48]。基于 1991–2011 年多航次观测数据,Ericson 等^[48] 指出西北冰洋中层水输入是 C_{ant} 浓度显著增加的主因。海冰消融使冬季开阔水域面积增加,促进海冰生成与卤水析出,强化高密度水形成和陆架海盆对流,将表层吸收的 C_{ant} 高效输送至深度为 150 ~ 1400 m 的水体中,该层位 C_{ant} 柱储量年增长速率为 $0.6 \sim 0.9 \text{ mol C m}^{-2} / \text{a}$,其中阿蒙森海盆的增长速率比全球海洋平均水平高出近 2/3。说明海冰消融并不仅是改变表层海气交换,更是通过影响水团形成与通风过程改变 C_{ant} 吸收。Ulfssbo 等^[41] 进一步证实,1996–2015 年欧亚海盆中层水体 C_{ant} 快速累积,其中南森、阿蒙森海盆中层 C_{ant} 年累积速率可达 $(0.44 \sim 0.73) \pm 0.14 \text{ mol C m}^{-2} / \text{a}$ 与 $(0.63 \sim 1.04) \pm 0.09 \text{ mol C m}^{-2} / \text{a}$ 。这与海冰消融驱动的大西洋入流通风增强有关,海冰退缩使边界流和中间层侧向输送效率提高,从而促进富含 C_{ant} 的大西洋来源水不断向欧亚海盆内部输入。Tanhua 等^[37] 也指出,海冰消融引发的环流调整会进一步放大欧亚海盆与加拿大海盆的通风差异,加速 C_{ant} 沿大西洋入流路径的侧向输送与埋藏。尤其在欧亚海盆,由于直接受到大西洋温暖、高盐、富含 C_{ant} 水体的影响,海冰消融对 C_{ant} 累积的促进作用更加明显。

3.2.2 负向抑制效应: 海冰消融削弱 C_{ant} 长期储存能力与吸收潜力

海冰消融对 C_{ant} 吸收的影响并非全是正面促进吸收的,其负向抑制效应同样不容忽视。随着大量融冰淡水进入海洋表层,北冰洋水体层结

不断增强,垂向交换和深层通风能力受到抑制,从而限制 C_{ant} 的长期埋藏与深层储存。这一效应在美亚海盆表现得尤为突出。Woosley 和 Millero^[42] 基于加拿大海盆的观测数据指出,海冰消融带来的大量淡水输入增强水体垂直层结,尽管大气 CO_2 浓度持续上升,但该区域 C_{ant} 累积基本为零,说明淡化和层化增强已明显削弱 C_{ant} 向深层的输送效率。Rajasakaren 等^[45] 也表明,海冰消融导致的淡水输入增加,与水体较弱的通风条件共同抑制了 C_{ant} 向加拿大海盆深层水体的输送与储存,导致南加拿大海盆 C_{ant} 年增幅不足欧亚海盆的一半。从过程机制看,海冰融水虽可使部分 C_{ant} 在中层水体短期富集,但同时长期也会削弱水体垂向通风,使新增 C_{ant} 更难进入深层长期封存,进而削弱北冰洋碳汇的稳定性^[48]。Terhaar 等^[50] 也指出,海冰减退引发的北极表层淡化与层结增强,会通过改变水体通风与混合效率,影响包括西北冰洋在内的全北极 C_{ant} 储存格局与酸化发展趋势。

此外,海冰消融带来的淡水输入,会直接稀释海水碱度,降低海水碳酸盐系统的缓冲能力,削弱北冰洋对大气 C_{ant} 的持续吸收潜力。Woosley 和 Millero^[42] 指出,加拿大海盆冰融淡水的稀释效应导致海水碱度降低,总 DIC 反而随大气 CO_2 增加出现下降,区域 C_{ant} 吸收通量较预期降低约 40%,部分海域甚至出现 C_{ant} 弱释放现象。Terhaar 等^[64] 基于 CMIP6 的 14 个地球系统模型量化结果证实,海冰融化使西北冰洋海水碱度降低 8 ~ 15 $\mu\text{mol/kg}$,削弱了海水的 CO_2 缓冲能力。虽然淡水化可在短期内小幅增加表层 C_{ant} 的瞬时吸收,但从长期来看会大幅降低海洋对 C_{ant} 的持续容纳能力,并加剧海洋酸化。

3.2.3 长期演变趋势与生态环境连锁效应

综合现有观测与模式研究结果来看,海冰消融对北冰洋 C_{ant} 的影响并不只是简单吸收增强或减弱,而是通过改变海气交换、环流通风、水体层结及水团混合过程,重塑 C_{ant} 的吸收、输送与储存路径^[37, 40, 42, 44, 48-49]。总体来看,海冰减少有利于增加表层 C_{ant} 输入,并促进 C_{ant} 向中层水体输送和积累;与此同时,淡水化和层结增强又会限制 C_{ant} 进一步向深层扩散和长期封存。因

此,海冰消融正在加剧北冰洋 C_{ant} 在不同海盆和不同深度层位之间的空间分异。欧亚海盆受大西洋来源水持续输入及通风增强的影响,中层水体 C_{ant} 持续富集;而美亚海盆则因淡水输入增加和层结强化,深层输送受限,形成更明显的 C_{ant} 中层富集、深层贫化结构。

在此背景下,北冰洋 C_{ant} 未来的演变趋势及其生态环境效应受到广泛关注。短期(数十年尺度)内,海冰持续消融可通过扩大开阔水域、延长无冰期、提升初级生产力和增强海气交换,带来北冰洋 C_{ant} 的有限净增长。但长期(百年尺度)来看,其净效应仍存在显著不确定性,可能存在 C_{ant} 汇源逆转的临界风险。Terhaar 等^[64] 基于模型预估,至 21 世纪末西北冰洋 C_{ant} 库存将达到 $(6.2 \pm 1.3) \sim (10.3 \pm 2.2)$ Pg C,但该结果对海冰消融速率、海洋环流变化、淡水输入以及陆源碳输入等过程高度敏感,存在极大不确定性。随着海冰持续减少,表层海水吸收更多大气 CO_2 ,其 $p\text{CO}_2$ 逐渐趋近大气水平,海洋对新增 C_{ant} 的吸收能力可能逐步减弱。与此同时,淡水化引起的层结增强也会削弱垂向混合与深层通风,限制 C_{ant} 向深层水体的长期埋藏^[42, 50, 64]。最新模式研究进一步表明,未来北极海洋 CO_2 吸收呈现先上升后逐渐下降的非单调变化,并伴随吸收中心向更高纬度海域迁移的趋势,其变化主要受海冰退缩和海气 CO_2 分压差减小的共同控制^[65]。这一结果表明,海冰消融不仅影响北冰洋 C_{ant} 的吸收强度,还可能重塑其空间分布格局和长期储存路径。因此,未来北冰洋 C_{ant} 是否能够持续维持高效储存能力,以及不同海盆之间储存格局将如何演变,仍是当前研究关注的重要科学问题。

海冰消融背景下 C_{ant} 的持续累积与北冰洋海洋酸化密切相关。已有研究表明, C_{ant} 增加已成为驱动北冰洋酸化的重要因素之一^[41, 48, 64]。Ulfso 等^[41] 指出,欧亚海盆近二十年来 C_{ant} 快速累积已导致上层水体 pH 年均下降 (0.0021 ± 0.0004) 。Ericson 等^[48] 测算 1991—2011 年 C_{ant} 累积已导致北冰洋中层水体 pH 下降 0.02 ~ 0.05 个单位。基于模式研究,21 世纪西北冰洋酸化过程中, C_{ant} 增加贡献率达 68% ~ 79%,海冰融化导致的淡水化贡献率为 21% ~ 32%,二者协同加剧

了北极海洋酸化的进程^[64]。随着 C_{ant} 持续向中层水体累积, 未来大西洋来源水层可能率先出现文石不饱和状态, 从而对浮游有孔虫、翼足类等钙化生物以及底栖生态系统带来持续压力^[48, 64]。总体来看, 海冰消融并未改变北冰洋作为重要 C_{ant} 汇区的基本属性, 但正在重塑 C_{ant} 的吸收路径、储存位置及其生态后果。海冰消融如何通过物理过程与生物地球化学过程的耦合作用影响 C_{ant} 收支平衡, 以及北冰洋碳汇格局是否会发生区域性重构, 仍是未来北冰洋碳循环研究需要重点关注的关键科学问题。

4 挑战与展望

4.1 科学挑战

现有研究已初步揭示北冰洋 C_{ant} 的分布、储量特征及海冰消融对其的部分调控作用, 但受极区观测环境恶劣、时空变化快以及多过程耦合复杂性的影响, 当前研究仍面临诸多挑战, 主要包括:

第一, 海冰消融驱动的多过程耦合调控机制量化不足。当前对海冰消融引发的物理、生物化学过程对 C_{ant} 的调控效应研究, 多停留在定性识别与单一过程分析阶段, 缺乏多过程耦合作用的量化分析, 无法明确不同过程对 C_{ant} 分布与储量变化的相对贡献, 这也是导致当前关于北冰洋碳汇增强还是减弱学术争议的重要原因。

第二, 观测数据的时空覆盖仍存在显著短板。现有观测时间主要集中在夏季海冰消退期, 观测海域主要集中在楚科奇海、加拿大海盆南部等海域, 冬季海冰覆盖期以及俄罗斯北极陆架等区域的观测数据严重稀缺。由于 C_{ant} 对季节变化和通风过程高度敏感, 现有观测无法完整刻画 C_{ant} 的季节变化与全海域分布特征, 导致 C_{ant} 储量估算存在较大不确定性。

第三, 模型模拟与预估能力仍有待提高。多数全球气候模式对北冰洋的分辨率较低, 难以准确刻画陆架海盆相互作用、中尺度涡旋、边界流侧向输送等关键过程, 同时, 针对海冰生物过程、陆源有机碳循环、淡水增加与碳酸盐体系耦合等北冰洋特有过程的参数化方案不完善, 导致模拟结果与观测数据存在明显偏差, 限制了预

估 C_{ant} 未来演变趋势的可靠性。

4.2 未来研究方向

针对当前研究面临的挑战, 结合全球气候变化与北极科学发展的需求, 未来北冰洋 C_{ant} 研究可重点聚焦以下方向:

第一, 量化海冰消融对 C_{ant} 循环的多过程耦合调控机制。聚焦北冰洋关键海域, 通过现场观测、控制实验与数值模拟相结合的手段, 系统量化海冰消融引发的物理输运、生物生产、碳酸盐体系变化等过程对 C_{ant} 吸收、输运、储存的调控效应, 明确不同过程的相对贡献, 厘清碳汇增强与减弱的临界条件, 进一步完善北冰洋 C_{ant} 理论体系。

第二, 构建全季节、全海域的立体观测网络。未来需进一步加强国际合作, 整合各国北极科考资源, 重点提升冬季海冰覆盖期、数据稀缺区的观测, 推广应用生物地球化学阿尔戈计划 (BGC-Argo) 浮标、锚系潜标、冰基观测平台 (如北极气候多学科漂流冰站观测计划 MOSAiC)、无人潜航器等技术, 构建覆盖北冰洋全海域、全季节、全水深的碳酸盐体系立体观测网络, 获取长期连续观测数据, 为 C_{ant} 估算、模型验证以及机制研究提供数据支撑。

第三, 发展高分辨率、多过程全耦合的数值模型。未来需提升北冰洋区域模型的空间分辨率, 完善海冰生物过程、陆源有机碳循环、淡水与碳酸盐体系耦合等关键过程的参数化方案, 构建大气、陆地、海洋、海冰、生态系统多圈层全耦合模型, 结合数据同化技术融合多源观测数据, 降低模拟结果的不确定性, 提升北冰洋 C_{ant} 演变趋势的预估能力。

5 结论

北冰洋虽仅占全球海洋面积的 1%, 却贡献了全球海洋 5%~14% 的 CO_2 净吸收量, 是全球碳循环的重要组成部分。受北极放大效应影响, 北冰洋正经历海冰快速消退、表层水淡化、水体层结增强等剧烈环境变化, 深刻改变了区域碳循环过程, 也引发了学术界关于北极碳汇未来演变趋势的激烈争议。支持碳汇增强的研究认为, 海冰消退通过扩大开阔水域、促进浮游植物生产、

提升碳输出效率等机制,持续增强北极碳汇能力。而质疑碳汇潜力的研究则指出,海冰消退引发的水体层化加剧、营养盐限制、生物碳泵效率下降、淡水输入稀释碱度抵消效应等,将制约甚至削弱北极碳汇功能。二者对于多过程耦合效应的量化与长期趋势判断存在差异。

北冰洋 C_{ant} 研究方法经历了从早期箱式模型,到 eMLR 与 TTD 方法应用,再到多示踪剂联合、高分辨率模型优化的演进历程,估算精度与结果稳健性持续提升,当前修正后的 2005 年北冰洋 C_{ant} 总储量为 $(3.3 \pm 0.3) \text{ Pg C}$ 。北冰洋 C_{ant} 主要储存在欧亚海盆及中层水体,并呈现明显的陆架海盆分异和垂向分层特征。海冰消融不仅影响 C_{ant} 的吸收路径和储存位置,还通过淡化、层化和酸化过程进一步加剧北冰洋碳循环的空间异质性与生态风险。

北冰洋 C_{ant} 研究已从总量是多少逐步进入 C_{ant} 是如何输送、如何储存、如何反馈的机制解析阶段。未来仍需围绕海冰消融多过程耦合调控机制量化、全海域立体观测网络构建、高分辨率全耦合模型发展以及酸化与生态效应评估等研究方向持续推进,全面提升对北冰洋碳循环的系统认识,为应对全球气候变化与保护北极生态环境提供坚实的科学支撑。

参考文献:

- [1] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2025[J]. *Earth System Science Data*, 2026, 18(5): 3211-3288.
- [2] Joos F, Prentice I C. A Paleo-perspective on changes in atmospheric CO_2 and climate[M]//Field C B, Raupach M R. The global carbon cycle: integrating humans, climate and the natural world. Washington: Island Press, 2004: 165-186.
- [3] 黄 鹏, 陈立奇, 蔡明刚. 全球海洋人为碳储量估算及时空分布研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(8): 952-959.
- [4] Gruber N, Friedlingstein P, Field C B, et al. The vulnerability of the carbon cycle in the 21st century: an assessment of carbon-climate-human interactions[M]//Field C B, Raupach M R. The global carbon cycle: integrating humans, climate, and the natural world. Washington: Island Press, 2004: 45-76.
- [5] Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO_2 [J]. *Science*, 2004, 305(5682): 367-371.
- [6] Khatiwala S, Tanhua T, Mikaloff Fletcher S, et al. Global ocean storage of anthropogenic carbon[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(4): 2169-2191.
- [7] Kleypas J A, Buddemeier R W, Archer D, et al. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs[J]. *Science*, 1999, 284(5411): 118-120.
- [8] Orr J C, Fabry V J, Aumont O, et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms[J]. *Nature*, 2005, 437(7059): 681-686.
- [9] 汪思茹, 殷克东, 蔡卫君, 等. 海洋酸化生态学研究进展 [J]. *生态学报*, 2018, 32(18): 5859-5869.
- [10] 焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 等. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(11): 1393-1421.
- [11] Rudels B. Arctic Ocean circulation, processes and water masses: a description of observations and ideas with focus on the period prior to the International Polar Year 2007-2009[J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 132: 22-67.
- [12] 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[J]. *Oceanography*, 2011, 24(3): 186-201.
- [13] England M R, Eisenman I, Lutsko N J, et al. The recent emergence of arctic amplification[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(15): e2021GL094086.
- [14] Rantanen M, Karpechko A Y, Lipponen A, et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3(1): 168.
- [15] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 881-889.
- [16] 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]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C1): C01007.
- [17] 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[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(24): L24603.
- [18] Arrigo K R, van Dijken G, Pabi S. Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(19): L19603.
- [19] 陈建芳, 金海燕, 白有成, 等. 北极快速变化的生态环境响应 [J]. *海洋学报*, 2018, 40(10): 22-31.
- [20] 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 [J]. *科学通报*, 2018, 63(22): 2201-2213.
- [21] Ye X D, Zhang B Y, Dawson J, et al. Arctic oceanic carbon cycle: a comprehensive review of mechanisms, regulations, and models[J]. *Water*, 2024, 16(12): 1667.
- [22] Lannuzel D, Tedesco L, van Leeuwe M, et al. The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems

- [J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(11): 983-992.
- [23] Bates N R, Mathis J T. The Arctic Ocean marine carbon cycle: evaluation of air-sea CO₂ exchanges, ocean acidification impacts and potential feedbacks[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(11): 2433-2459.
- [24] Vonk J E, Fritz M, Speetjens N J, et al. The land-ocean Arctic carbon cycle[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2025, 6(2): 86-105.
- [25] Oziel L, Gürses Ö, Torres-Valdés S, et al. Climate change and terrigenous inputs decrease the efficiency of the future Arctic Ocean's biological carbon pump[J]. *Nature Climate Change*, 2025, 15(2): 171-179.
- [26] Omar A M, Johannessen T, Olsen A, et al. Seasonal and inter-annual variability of the air-sea CO₂ flux in the Atlantic sector of the Barents Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 104(3/4): 203-213.
- [27] 高众勇, 陈立奇, Cai W J, 等. 全球变化中的北极碳汇: 现状与未来 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 857-865.
- [28] Zhao J Z, He S P, Wang H J, et al. Constraining CMIP6 projections of an ice-free arctic using a weighting scheme[J]. *Earth's Future*, 2022, 10(10): e2022EF002708.
- [29] Wang M Y, Overland J E. A sea ice free summer Arctic within 30 years?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(7): L07502.
- [30] Liu J P, Song M R, Horton R M, et al. Reducing spread in climate model projections of a September ice-free Arctic[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(31): 12571-12576.
- [31] Bilgili M. Multivariate deep learning approach to forecast of an ice-free Arctic summer under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios[J]. *Polar Science*, 2026, 47: 101308.
- [32] Anderson L G, Olsson K, Jones E P, et al. Anthropogenic carbon dioxide in the Arctic Ocean: inventory and sinks[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C12): 27707-27716.
- [33] Bauch D, Carstens J, Wefer G, et al. The imprint of anthropogenic CO₂ in the Arctic Ocean: evidence from planktic $\delta^{13}\text{C}$ data from watercolumn and sediment surfaces[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000, 47(9/11): 1791-1808.
- [34] Gruber N, Sarmiento J L, Stocker T F. An improved method for detecting anthropogenic CO₂ in the oceans[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 809-837.
- [35] Hall T M, Haine T W N, Waugh D W. Inferring the concentration of anthropogenic carbon in the ocean from tracers[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1131.
- [36] Friis K, Körtzinger A, Pätsch J, et al. On the temporal increase of anthropogenic CO₂ in the subpolar North Atlantic[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(5): 681-698.
- [37] Tanhua T, Jones E P, Jeansson E, et al. Ventilation of the Arctic Ocean: mean ages and inventories of anthropogenic CO₂ and CFC - 11[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C1): C01002.
- [38] Terhaar J, Kwiatkowski L, Bopp L. Emergent constraint on Arctic Ocean acidification in the twenty-first century[J]. *Nature*, 2020, 582(7812): 379-383.
- [39] Smith J N, Smethie Jr W M, Casacuberta N. Synoptic ¹²⁹I and CFC-SF₆ transit time distribution (TTD) sections across the central arctic ocean from the 2015 GEOTRACES cruises[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(9): e2021JC018120.
- [40] Raimondi L, Wefing A M, Casacuberta N. Anthropogenic carbon in the Arctic Ocean: perspectives from different transient tracers[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2024, 129(1): e2023JC019999.
- [41] Ulfssbo A, Jones E M, Casacuberta N, et al. Rapid changes in anthropogenic carbon storage and ocean acidification in the intermediate layers of the Eurasian Arctic Ocean: 1996-2015[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32(9): 1254-1275.
- [42] Woosley R J, Millero F J. Freshening of the western Arctic negates anthropogenic carbon uptake potential[J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, 65(8): 1834-1846.
- [43] Terhaar J, Orr J C, Gehlen M, et al. Model constraints on the anthropogenic carbon budget of the Arctic Ocean[J]. *Biogeosciences*, 2019, 16(11): 2343-2367.
- [44] Ko Y H, Quay P D. Origin and accumulation of an anthropogenic CO₂ and ¹³C suess effect in the Arctic Ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2020, 34(2): e2019GB006423.
- [45] Rajasakaren B, Jeansson E, Olsen A, et al. Trends in anthropogenic carbon in the Arctic Ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 2019, 178: 102177.
- [46] Deng H X, Ke H W, Huang P, et al. Ventilation time and anthropogenic CO₂ in the Bering Sea and the Arctic Ocean based on carbon tetrachloride measurements[J]. *Journal of Oceanography*, 2018, 74(5): 439-452.
- [47] Wang W M, Zheng X L, Huang P, et al. Ventilation in the Arctic Ocean and the role of pacific inflow deduced from transient tracer measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(6): e2019JC015683.
- [48] Ericson Y, Ulfssbo A, van Heuven S, et al. Increasing carbon inventory of the intermediate layers of the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(4): 2312-2326.
- [49] Payne A, Raimondi L, Wefing A M, et al. Nuclear waste radionuclides unveil three decades of anthropogenic carbon in

- the Canada Basin of the Arctic Ocean[J]. *Nature Communications*, 2026, 17(1): 4977.
- [50] Terhaar J, Tanhua T, Stöven T, et al. Evaluation of data-based estimates of anthropogenic carbon in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(6): e2020JC016124.
- [51] Bates N R, Moran S B, Hansell D A, et al. An increasing CO₂ sink in the Arctic Ocean due to sea-ice loss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(23): L23609.
- [52] Gao Z Y, Chen L Q, Sun H, et al. Distributions and air-sea fluxes of carbon dioxide in the Western Arctic Ocean[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 81/84: 46-52.
- [53] Schuster U, Mckinley G A, Bates N, et al. An assessment of the Atlantic and Arctic sea-air CO₂ fluxes, 1990–2009[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(1): 607-627.
- [54] Richaud B, Fennel K, Oliver E C J, et al. Underestimation of oceanic carbon uptake in the Arctic Ocean: ice melt as predictor of the sea ice carbon pump[J]. *The Cryosphere*, 2023, 17(7): 2665-2680.
- [55] Tozawa M, Nomura D, Matsuura M, et al. Quantitative assessment of factors contributing to variations in sea surface pCO₂ in the pacific sector of the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2024, 129(6): e2024JC021012.
- [56] Cai W J, Chen L Q, Chen B S, et al. Decrease in the CO₂ uptake capacity in an ice-free arctic ocean basin[J]. *Science*, 2010, 329(5991): 556-559.
- [57] Miller L A, Burgers T M, Burt W J, et al. Air-sea CO₂ flux estimates in stratified arctic coastal waters: how wrong can we be?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(1): 235-243.
- [58] Lewis K M, Van Dijken G L, Arrigo K R. Changes in phytoplankton concentration now drive increased Arctic Ocean primary production[J]. *Science*, 2020, 369(6500): 198-202.
- [59] Ouyang Z X, Qi D, Chen L Q, et al. Sea-ice loss amplifies summertime decadal CO₂ increase in the western Arctic Ocean[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(7): 678-684.
- [60] Fransson A, Chierici M, Skjelvan I, et al. Effects of sea-ice and biogeochemical processes and storms on under-ice water fCO₂ during the winter-spring transition in the high Arctic Ocean: implications for sea-air CO₂ fluxes[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(7): 5566-5587.
- [61] Wu M, Hu Y H, Le C F, et al. Sea Ice Loss leads to regime shifts in the arctic biological pump[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 10331.
- [62] Knies J, Ahn Y, Ebner B, et al. Arctic fjord ecosystem adaptation to cryosphere meltdown over the past 14, 000 years[J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6(1): 298.
- [63] Swoboda S, Krumpen T, Nöthig E M, et al. Release of ballast material during sea-ice melt enhances carbon export in the Arctic Ocean[J]. *PNAS Nexus*, 2024, 3(4): pgae081.
- [64] Terhaar J, Torres O, Bourgeois T, et al. Arctic Ocean acidification over the 21st century co-driven by anthropogenic carbon increases and freshening in the CMIP6 model ensemble[J]. *Biogeosciences*, 2021, 18(6): 2221-2240.
- [65] Pan R R, Shu Q, Wang Q, et al. Poleward shift of arctic oceanic CO₂ uptake from asymmetric seasonal changes under climate warming[J]. *Earth's Future*, 2026, 14(5): e2025 EF007550.