



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

极地峡湾有机碳来源和埋藏研究进展

万 霞, 张海龙, 肖晓彤

Review of organic carbon source and burial in polar fjords

WAN Xia, ZHANG Hailong, and XIAO Xiaotong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022021401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

海洋环境中甲烷好氧氧化过程的研究进展

A review on microbial aerobic methane oxidation in marine environment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 67

海洋沉积物中金属依赖型甲烷厌氧氧化作用研究进展及展望

Research progress and prospects of metal-dependent anaerobic methane oxidation in marine sediments

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 58

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202



关注微信公众号，获得更多资讯信息

万霞, 张海龙, 肖晓彤. 极地峡湾有机碳来源和埋藏研究进展 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(4): 73-83.
WAN Xia, ZHANG Hailong, XIAO Xiaotong. Review of organic carbon source and burial in polar fjords[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(4): 73-83.

极地峡湾有机碳来源和埋藏研究进展

万霞¹, 张海龙^{1,2}, 肖晓彤^{1,2}

1. 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心和海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 青岛 266237

摘要: 峡湾是开阔海洋与陆地生态系统重要的连接区域, 在全球气候变化的背景下, 峡湾的生物地球化学过程正发生剧烈的变化。峡湾的特殊地形以及生物地球化学特性使其成为有机碳埋藏和储存的重要区域。研究表明, 全球峡湾的平均有机碳累积速率高达 $54 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 有机碳埋藏量为 $18 \times 10^{12} \text{ gC} \cdot \text{a}^{-1}$, 约占全球海洋有机碳埋藏量的 11%, 有巨大的储碳潜力。极地峡湾由于存在冰川作用, 其沉积有机碳的输入、迁移转化和埋藏呈现与温带峡湾不同的特征。极地峡湾内以及各峡湾之间的沉积有机碳来源、组成和累积、埋藏速率均存在空间差异, 湾内表现为由峡湾前端向湾口方向的梯度变化; 各峡湾之间表现为有冰川的峡湾比无冰川的峡湾有更高的碳累积速率; 沉积有机碳组成差异受到淡水和海水输入的影响。厘清峡湾沉积有机碳的来源对认识峡湾有机碳埋藏至关重要, 通过测定总有机碳及单体化合物放射性碳同位素可实现对不同来源有机碳的定量估算。全球变暖使冰川快速消融, 导致极地峡湾表现出不同的有机碳累积或埋藏特征, 而在全球碳循环中, 极地峡湾捕获和埋藏有机碳的能力是否能适应全球气候变化变得愈发重要。

关键词: 峡湾; 沉积物; ^{14}C ; 有机碳埋藏; 气候变化

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022021401

Review of organic carbon source and burial in polar fjords

WAN Xia¹, ZHANG Hailong^{1,2}, XIAO Xiaotong^{1,2}

1. *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, and Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ocean University of China, Ministry of Education, Qingdao 266100, China*

2. *Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*

Abstract: Fjords are an important interface between the open ocean and terrestrial ecosystems. In the context of global climate change, the biogeochemical processes in fjords are undergoing dramatic changes. The special topography and biogeochemical properties of fjord make it an important ecosystem for organic carbon (OC) burial and storage. Studies have shown that the average OC accumulation rate in the global fjords is as high as $54 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the OC burial amount is $18 \times 10^{12} \text{ gC} \cdot \text{a}^{-1}$, taking about 11% of the annual global marine OC burial and showing a great carbon storage potential. The input, composition, and accumulation or burial of sedimentary OC in polar fjords are different from those in temperate fjords due to glaciation. There are spatial differences in the source, composition, accumulation, and burial rate of sedimentary OC within and between polar fjords. Within a fjord, there is a gradient change from the front of the fjord to the mouth of the fjord; and between fjords, those with glaciers have higher carbon accumulation rates than those without glaciers. In addition, the composition of sedimentary OC varies due to the influence of different freshwater and seawater inputs. Clarifying the sources of fjord sediment OC is crucial to understanding fjord OC burial. Quantitative estimation of OC from different sources can be achieved by measuring total OC and radiocarbon isotopes of bulk organic matter and the technology of Compound-Specific Radiocarbon Analysis (CSRA). The accumulation or burial of OC in polar fjords shows different characteristics due to the rapid retreating of glaciers by global warming. Global warming is causing rapid glaciers to melt, causing polar fjords to exhibit different organic carbon accumulation or burial characteristics. In the global carbon cycle, it is increasingly important to study whether the ability of polar fjords to capture and bury OC can adapt to global climate change.

Key words: fjords; sediment; ^{14}C ; organic carbon burial; climate change

资助项目: 国家自然科学基金项目“北冰洋西部过去 130 ka 海冰演变记录及其对碳循环的影响”(41876214), “极地海洋地球化学: 北极海冰演变历史及驱动机制”(42022047); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室开放基金-青年培育“北冰洋边缘海有机碳来源和埋藏”(LMEES-YTSP-2018-02-05); 中央高校基本科研业务费-优青培育计划“极地海洋有机地球化学”(201841009)

作者简介: 万霞(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋有机地球化学研究, E-mail: wanxiaouc@163.com

通讯作者: 张海龙(1981—), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事海洋有机地球化学研究, E-mail: zhanghailong@ouc.edu.cn

收稿日期: 2022-02-14; 改回日期: 2022-03-16。周立君编辑

峡湾为末次冰盛期以来由冰川侵蚀和海平面波动而形成的中高纬度沿海河口，分布于 43°N 以北、42°S 以南，被海水淹没，呈槽型山谷^[1-2]。峡湾是地球系统的水生关键区 (Aquatic Critical Zones, ACZs)，位于陆地、冰冻层、海洋和大气层相互作用的交汇处，其生物地球化学过程对全球气候变化和人类活动极为敏感^[3]，具有全球单位面积最大的有机碳埋藏量^[4]、较高的沉积速率、沉积物累积速率和有机碳累积速率，是研究碳循环的重要区域^[1-5]。峡湾较高的沉积速率和较少的外部环境干扰能加速沉积有机碳埋藏到 Mn 富集厚度(即氧气穿透深度)^[6]以下，缺氧条件使有机碳降解由氧化分解转变为厌氧过程，而微生物通过厌氧过程分解的有机碳仅占氧化分解有机碳的 10% 左右^[7]，因此，峡湾是有机碳储存的理想场所，是研究碳循环以及重建高分辨率陆地和海洋古气候变化的最佳地点之一^[3, 8]。

与其他河口、海湾相比，峡湾具有独特的地形地貌，水道深而狭长，两岸陡峭而高深，并且在水下有一个或者多个残余冰碛堆积形成的海底冰坎（图 1），通常有河流流入峡湾前端^[2-3, 9]。峡湾有机碳来源和埋藏主要受以下 5 个因素影响：冰川类型、淡水颗粒物负荷量、气候条件、海洋学特征（例如峡湾的三维环流）、峡湾两岸斜坡的稳定性^[3]。根据气候条件，峡湾可分为极地气候峡湾、亚极地气候峡湾和温带气候峡湾^[3, 10-11]。极地气候峡湾几乎常年被海冰或冰架覆盖，并存在永久的冰川，沉积物主要来自冰河床，也来自冰山和冰川下的河流；亚极地气候峡湾在冬季有海冰覆盖，但通常在夏季融化，夏季平均气温在 0 °C 以上，冰川可能存在，沉积物主要来源于冰下物质、冰下径流、冰山和陆地径流；温带气候峡湾目前几乎没有冰川作用，并且全

年为开阔水域，海冰只出现在局部区域，沉积物来源主要为陆地径流^[3, 10-11]。

极地峡湾主要分为存在冰川作用的极地气候峡湾和亚极地气候峡湾，分布于格陵兰岛、加拿大北极区域、斯瓦尔巴特群岛、南极洲以及南极洲邻近岛屿^[11-13]，由于北大西洋暖流以及伊尔明厄洋流的影响，有部分温带气候峡湾位于亚极地区域的挪威和冰岛^[11, 14]（图 2）。峡湾–冰川系统具有较高的有机碳累积速率，但与温带峡湾系统相比，极地峡湾陆地植被覆盖较少，陆源有机碳输入和海洋初级生产力较低，即使有机碳累积速率的最大值出现在格陵兰岛峡湾，但从全球范围来看，温带峡湾系统整体上具有更高的有机碳累积速率（图 3）。南、北极峡湾冰川通过影响沉积有机碳的来源和保存，直接或间接控制沉积有机碳的累积和埋藏^[3]。冰川融水输入和海水输入可控制沉积有机碳组成在峡湾的空间变化，而峡湾有机碳的组成可直接影响其储存和埋藏，因此定量估算极地峡湾各来源沉积有机碳，对综合理解峡湾有机碳累积或埋藏在气候变化下的响应至关重要。目前，主要应用生物标志物、稳定同位素 (¹³C)、C/N 比值、总有机质放射性碳同位素 (¹⁴C) 和单体化合物放射性碳同位素^[5, 8, 12, 15-18]，结合端元模型对峡湾沉积有机质进行区分和定量估算，如陆源和海源^[19]，沉积岩源和生物源^[12, 15]，化石源、冰筏来源和海源^[17] 或者冻土有机碳源和海源等^[20]。在全球变暖的背景下，冰川快速消融^[3, 21-22]，南、北极峡湾–冰川系统有机碳的生物地球化学过程的响应不同^[13, 23-25]。因此，厘清极地峡湾在冰川作用下的沉积有机碳累积和埋藏机制，对认识南、北极沉积有机碳对气候变化的响应，以及全球碳循环和气候变化具有重要意义。

1 峡湾沉积有机碳空间分布特征

极地峡湾不同的气候环境、洋流、冰川条件使得沉积有机碳的含量和组成、有机碳累积速率在不同的峡湾之间均呈现出不同的分布^[22, 24]。首先，在峡湾区域内，沉积物有机碳的空间分布特征主要表现为从峡湾前端到峡湾口沉积有机碳含量和组成的梯度变化^[24]。由于极地峡湾前端冰川融水的释放、陆源物质的输入和峡湾口海水的输入，峡湾的水文动力和生物地球化学沿着纵轴具有显著的梯度变化^[26-28]。从最靠外的峡湾口到靠近冰川锋面的峡湾前端，峡湾的沉积速率和沉积物累积速率按量级递增；研究者通过将沉积物累积速率与沉积有机

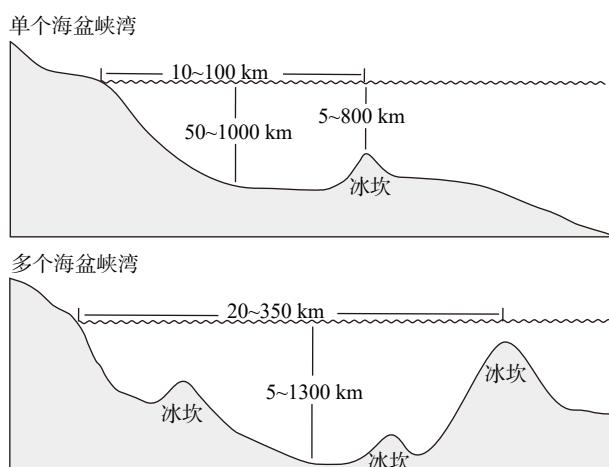


图 1 峡湾地形特征示意图^[2]

Fig.1 Schematic diagram of fjord topographic features^[2]

碳含量拟合发现, 两者呈现显著负相关, 表明基岩矿物对沉积有机碳的稀释是控制峡湾有机碳含量的主要因素之一^[19]。因此通常由于冰川和径流排出的大量悬浮矿物, 沉积有机碳含量从峡湾内部向外部峡湾递增, 例如位于斯瓦尔巴特群岛的孔斯峡湾, 其中部、外部站位的沉积有机碳含量是峡湾内

部站位的 4~6 倍^[29], 但有研究指出, 峡湾内部可能存在冰川来源有机碳的输入, 反而导致峡湾内部站位的沉积有机碳含量较高^[26]。峡湾内沉积有机碳组成的梯度变化表现为, 由峡湾前端向峡湾口方向, 海源有机碳含量逐渐增高^[22, 29], 并且总有机碳矿化速率向峡湾口方向增加, 主要是由于湾口方向易

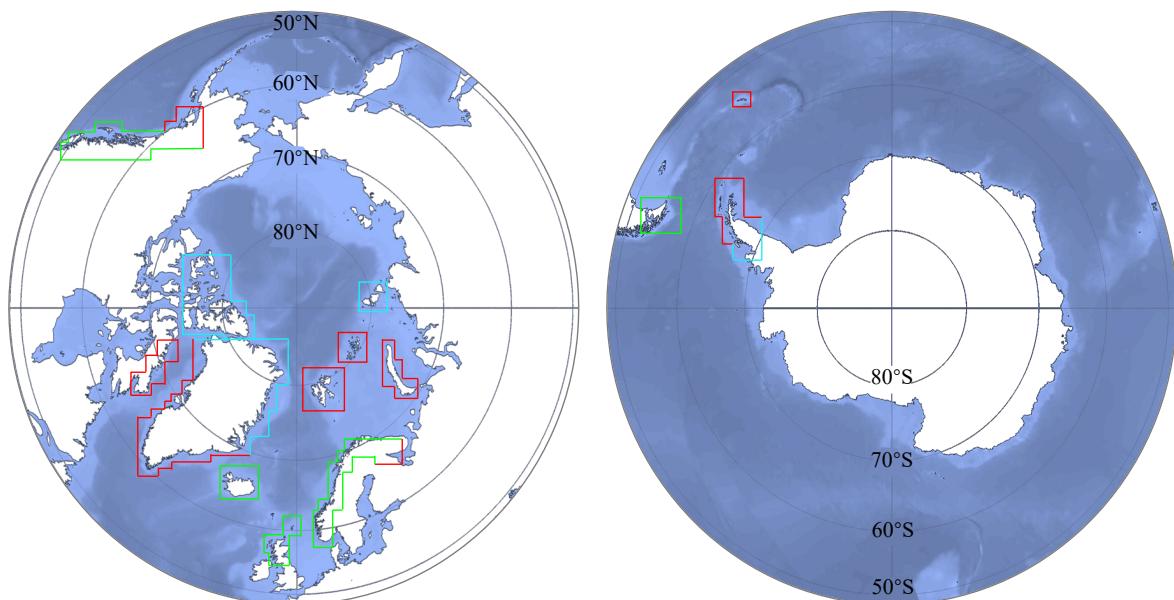


图 2 南北极峡湾分布图

蓝色线代表极地气候峡湾, 红色线代表亚极地气候峡湾, 绿色线代表温带气候峡湾。

Fig.2 Distribution of fjords in north and south polar regions

Polar fjords are shown in blue, subpolar fjords in red, and temperate fjords in green.

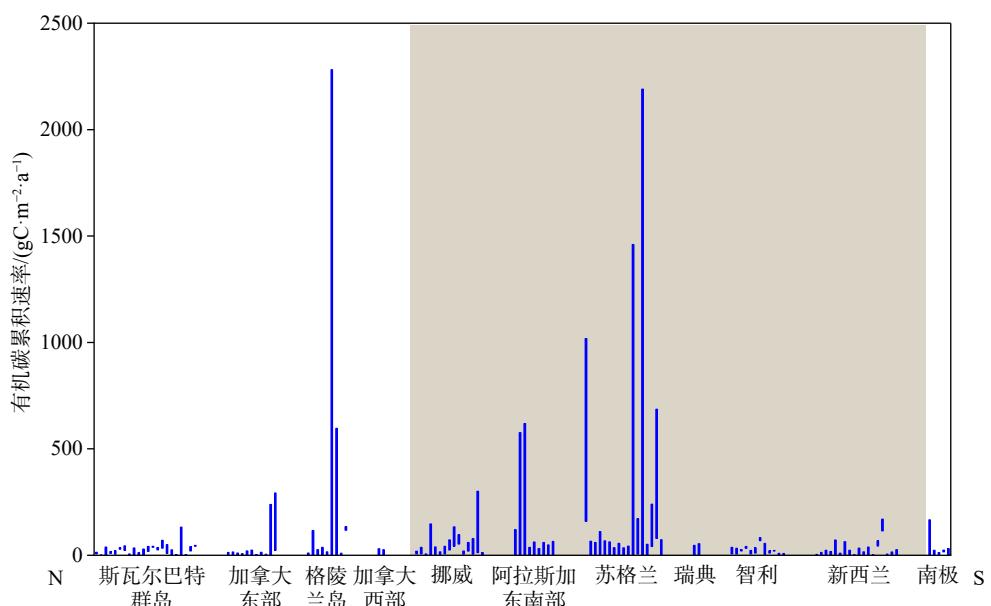


图 3 全球峡湾沉积物有机碳累积速率分布^[5, 13-14, 19, 23-25, 27]

灰色区代表温带峡湾分布区域。

Fig.3 Global distribution in accumulation rate of organic carbon in fjords^[5, 13-14, 19, 23-25, 27]

The shaded areas are temperate fjords.

降解的海源有机碳含量较高^[22]。几乎在所有峡湾沉积物分布模式中,粗粒度的沉积物通常更靠近峡湾的前端以及冰川的锋面,并且沉积物粒径向湾口方向减小,而初级生产力通常会在远离冰川前缘的区域增加,因此在海湾口的沉积物中具有相对高比例的海源有机碳^[30]。但在南极半岛西部区域弗兰德湾峡湾内沉积分布模式的研究中发现,由于邻近峡湾区域,强大的海流会使峡湾口沉积物再悬浮,冰川消融、海冰减少、上层南极绕极流($\geq 1.5^{\circ}\text{C}$)对初级生产力有促进作用,弗兰德峡湾的沉积分布模式和沉积有机碳组成的梯度变化与之前相关研究的结果相反,表现为沉积物粒径由峡湾前端向湾口方向增加,并且湾口主要为陆源有机质,而峡湾前端为海源有机质占主导(图 4)^[30],这样的特征是否还存在于南极半岛西部区域的其他峡湾,还需要进一步探究。

在各个极地峡湾之间,沉积有机碳含量主要受沉积物累积速率强烈波动的影响,区域性的有机碳含量与沉积物累积速率的显著负相关表明,沉积物累积速率越高的峡湾有机碳含量越低。此外,全球峡湾的区域平均沉积物累积速率与表层沉积物有机碳含量均值的相关性($R^2=0.69$)比全球各峡湾沉积物累积速率与表层沉积物的有机碳含量均值的相关性($R^2=0.41$)更强,说明沉积物累积速率对沉积有机碳含量的影响,在全球范围内比在单个峡湾区域研究中具有更重要的指示意义,例如,由于阿拉斯加东南部峡湾和巴芬岛峡湾涵盖了从北部(冰川覆盖)到南部(植被覆盖)的各种峡湾类型,两个区域的沉积物累积速率与区域各峡湾的沉积物有机

碳含量均值具有极强的相关性^[19]。在全球范围内,沉积物累积速率对有机碳累积速率和沉积有机碳含量的影响截然相反,研究者将有机碳累积速率与沉积物累积速率拟合发现,两者呈正相关($R^2=0.79$)^[19],即沉积物累积速率较高的峡湾普遍具有较高的有机碳累积速率,例如格陵兰岛峡湾的沉积物累积速率为 $(26.24\pm 59.26)\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,平均有机碳累积速率高达 $(356.6\pm 849.4)\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,而斯瓦尔巴特群岛峡湾的沉积物累积速率和平均有机碳累积速率分别为 $(3.15\pm 3.83)\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $(38.80\pm 47.40)\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[3]。各峡湾之间沉积物有机碳组成差异性主要受两个相反的过程控制:淡水的输入、海水的输入^[14],这两个基本过程又受到冰川活性和流域面积比值的控制^[14, 22],例如,北大西洋区域极地峡湾由于受到温暖和富营养的北大西洋暖流的影响,当地无冰川覆盖,而斯瓦尔巴特群岛和格陵兰岛东南部区域的峡湾受到海流影响依次减弱,有冰川作用和季节性海冰覆盖,因此挪威峡湾的海源有机质贡献整体高于斯瓦尔巴特群岛和格陵兰岛东南部。而对于分布在挪威中部和北部的峡湾,两个区域峡湾系统的主要区别是总排水面积与峡湾表面积的比值,分别为 14 和 1.3,对应的平均海源有机质占比分别为 46% 和 68%,比值越大表示淡水输入越多,海源有机质贡献越小^[14]。

2 冰川驱动下的有机碳埋藏机制

峡湾有机碳可分为原位产生和外源输入两类^[3, 14, 19],原位产生有机碳主要指峡湾生态系统中,

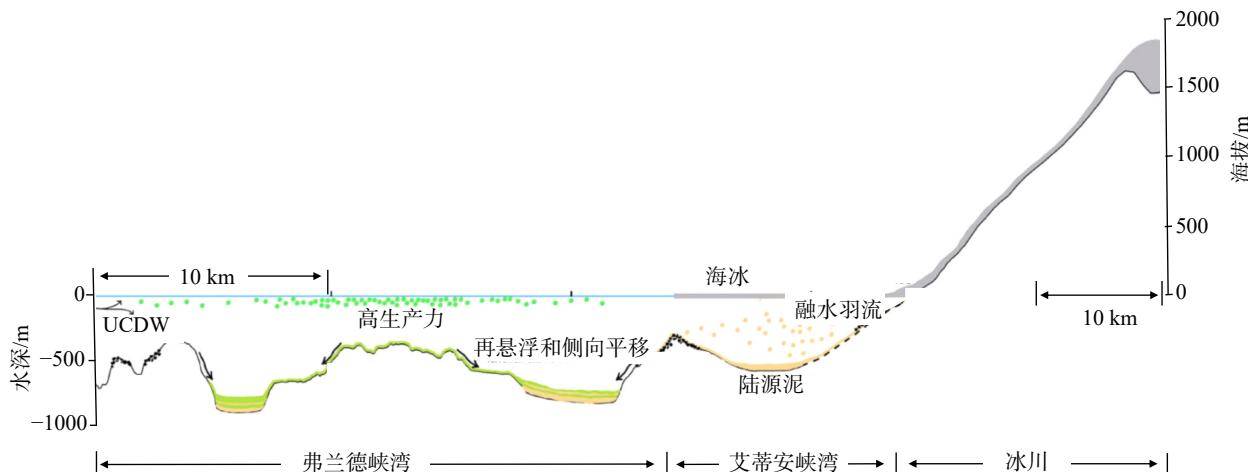


图 4 弗兰德峡湾和艾蒂安峡湾沉积分布示意图^[30]

UCDW 为深层绕极流上层水体。

Fig.4 Illustration of various sediment distribution processes in the Flandres Bay and Etienne^[30]

UCDW: upper circumpolar deep water.

上层水体浮游植物产生的有机碳; 外源输入有机碳则包括邻近沿海海洋初级生产力的有机碳、陆地生物源碳、沉积岩源碳、风成黑碳以及潜在的石油污染^[3]。研究发现, 陆源有机质占峡湾沉积有机碳的比例较高, 智利、欧洲西北部和格陵兰岛峡湾的沉积有机碳来源研究显示, 陆源有机碳占沉积总有机碳的 55%~62%, 并占了全球海洋埋藏的陆源有机碳的 (17±12)%^[3, 19]。海洋沉积物中有机碳的累积或埋藏受多种因素控制, 如海洋和陆地初级生产力、人类活动、沉积物累积速率、底层水氧化作用和底栖生物群落组成^[24], 较高的沉积有机碳通量主要受控于较高的沉积速率、较高的初级生产力、较高的真光层有机碳输出效率以及较为有利的有机碳保存环境等因素的共同作用^[6]。而高纬度峡湾的冰川作用可能使以上控制因素变得更加复杂。研究表明, 在洋流和气候环境相似的极地峡湾, 有冰川的北极峡湾通常比没有冰川的北极峡湾表现出更高的有机碳累积速率^[24]。冰川可直接或间接影响峡湾有机碳的来源和保存, 进而增加有机碳在峡湾的累积或埋藏速率。

首先, 冰川可通过改变特定时空范围内浮游植物生长的限制因子(光照、常量营养元素或微量元素)^[31-32](图 5), 间接影响峡湾-冰川系统的浮游植物初级生产力, 冰川对浮游植物初级生产力的影响在很大程度上取决于冰川类型(海洋终端或陆地终端)。冰川峡湾的研究调查显示, 在北极区域, 海

洋终端冰川峡湾通常比陆地终端冰川峡湾具有更高的初级生产力(图 6)^[33]。在陆地终端冰川峡湾, 由于冰川融水中泥沙含量较高, 以及细沉积物的再悬浮^[31], 高浑浊度的冰川融水流入会使峡湾下游海洋环境产生光限制^[3, 34], 冰川融水从地表释放, 促使水体层化, 阻碍了营养盐的垂直供应^[22, 35], 并且使冰川融水中溶解的常量营养元素浓度降低, 研究认为陆地终端冰川可能会抑制峡湾的初级生产力^[31]。而在海洋终端冰川峡湾, 冰川融水可从冰川接地线深处释放, 浮力和动量促使上升羽状流形成, 挟带周围的海水并混合^[36-38], 丰富的营养盐进入真光层, 进而提高初级生产力^[39]。但以上冰川对峡湾原位生产力的促进或抑制均在一定范围内, 例如在陆地终端冰川峡湾, 光限制范围会受到冰川融水流出距离的控制, 浮游植物初级生产力仅在光限制范围内被抑制; 在海洋终端冰川峡湾, 较高的初级生产力是在冰川锋面下游小于 80 km(冰川潜在影响范围)的区域内的总体表现^[31], 而在峡湾前端(靠近冰川锋面), 浑浊羽状流内部的初级生产力较低^[22]。因此, 冰川对极地峡湾初级生产力的影响需要结合采样位置和相应时空下的限制因子来进行具体分析, 也需要考虑季节和年际变化。其次, 峡湾-冰川系统中微量元素对浮游植物初级生产力的影响表现为冰川融水颗粒铁含量极高^[31], 但大量冰川来源的颗粒铁能在多大程度上迁移到开阔大洋, 并对存在铁限制海域的初级生产力的影响如何, 以及

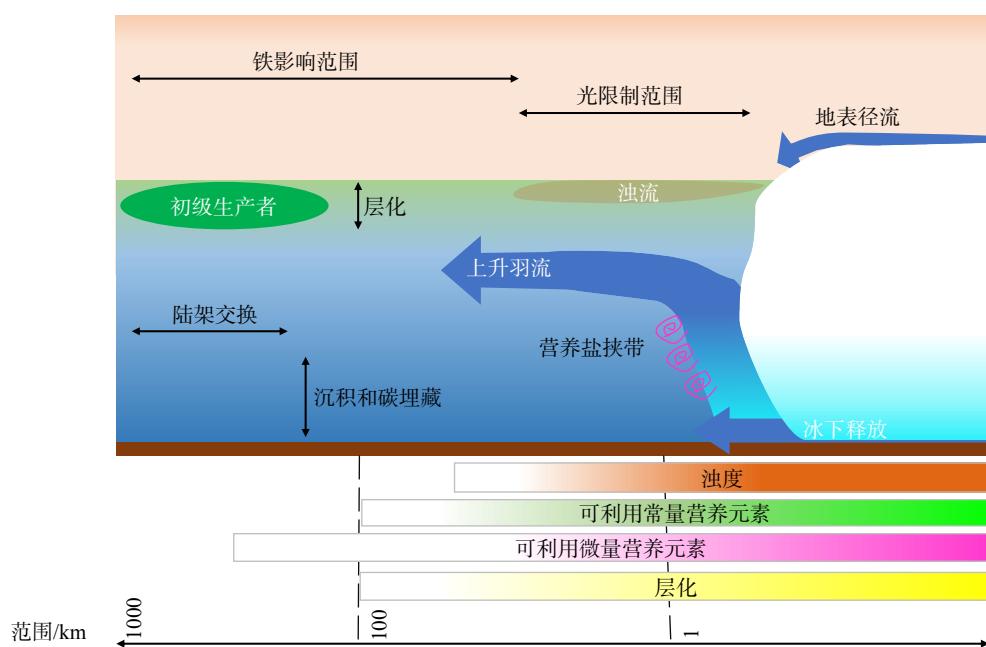


图 5 影响初级生产力驱动因素的空间示意图^[31]

Fig.5 Spatial diagram of driving factors affecting primary productivity^[31]

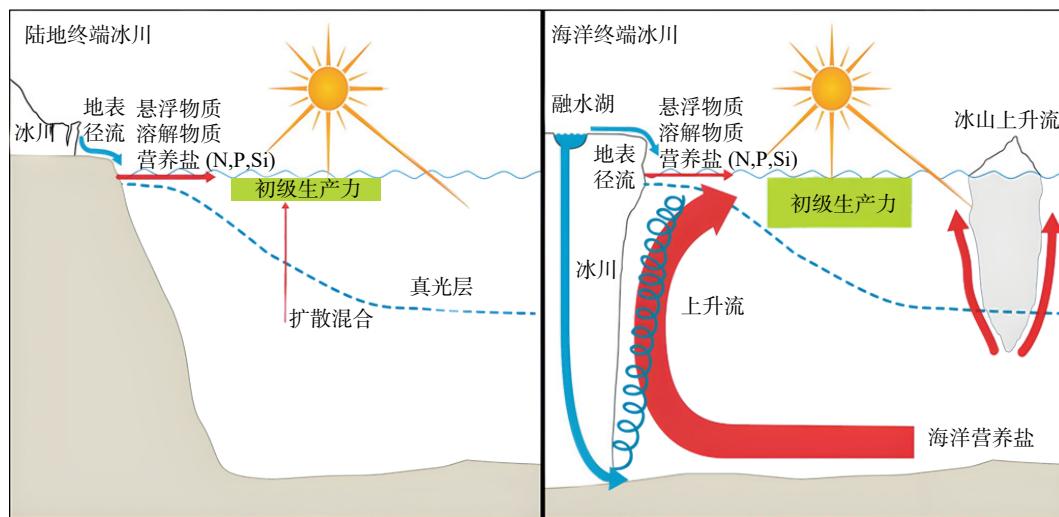


图 6 水文洋流及其对海洋终端冰川和陆地终端冰川峡湾生物
地球化学的影响^[38]

Fig.6 The hydrodynamic circulations and their impact on biogeochemistry of fjords affected by marine-terminating
glaciers and by land-terminating glaciers^[38]

颗粒铁如何转化为生物可利用溶解态铁, 还尚不明确^[31, 40]。此外, 在峡湾–冰川系统中, 冰川输入的大量岩性物质对有机碳具有压实作用^[31, 41], 加速有机碳被运移到深层, 提高了生物碳泵效率^[31], 因此, 与其他大陆架系统相比, 峡湾–冰川系统可能具有较高的真光层有机碳输出效率。

与浮游植物初级生产力相比, 冰川对陆源有机碳的影响更为直接, 陆源有机碳可分为沉积岩源有机碳($OC_{petr-terr}$)和生物源有机碳($OC_{bio-terr}$)^[3]。冰川通过对极地峡湾基岩的物理侵蚀, 将基岩颗粒输送到峡湾。 $OC_{petr-terr}$ 是指在基岩中被保存了上千年的生物成因有机碳^[3], 极地峡湾中 $OC_{petr-terr}$ 输入除了受到冰川侵蚀的驱动, 还与峡湾基岩的类型有关, 因为 $OC_{petr-terr}$ 主要存在于沉积岩中, 而在火成岩、火山岩和变质岩中含量极少可忽略不计^[3]。例如, 阿拉斯加东南部峡湾基岩主要由沉积岩组成, 贡献了北美东南沿海最多的 $OC_{petr-terr}$ 输入^[15], 而新西兰峡湾基岩为火成岩, 沉积物中的 $OC_{petr-terr}$ 含量较小^[42]。此外, $OC_{petr-terr}$ 在进入海洋环境后仍与云母和绿泥石等矿物紧密结合, 可减少有机碳在水环境中的释放, 并降低潜在反应活性^[3], 因此, 与存在土壤有机质输入的中纬度峡湾相比, 极地峡湾有机碳埋藏程度可能更高。除了冰川侵蚀搬运的 $OC_{petr-terr}$, 陆地有机碳也可通过冰川融水形成的径流进入峡湾^[22]。 $OC_{bio-terr}$ 指新鲜的陆地植被与维管植物的降解残留物质和腐殖质退化物质组成的土壤有机碳^[3]。通过对峡湾沉积物中单体化合物的放射性碳同位素分析, 发现极地峡湾沉积物中土壤有机碳的停留时间

比温带峡湾长^[3], 例如, 挪威斯和瓦尔巴群岛峡湾沉积物的放射性碳测定表明, 土壤有机碳可能有数千年的停留时间^[17], 而新西兰峡湾沉积物土壤有机碳的年龄仅有几百年^[42]。因此, 冰川侵蚀和冰川融水对 $OC_{petr-terr}$ 和 $OC_{bio-terr}$ 的搬运, 以及峡湾内较高的沉积速率^[43], 使南、北极峡湾具有巨大的有机碳埋藏潜能。

在沉积有机碳的保存方面, 有机碳沉积到海底后有三种结果, 一是经历再矿化过程, 成为溶解有机碳、营养盐和二氧化碳, 重新进入生物地球化学循环; 二是通过摄食被储存在底栖生物中; 三是被埋到更深的沉积层进而与大气隔离上百年^[24]。由于冰川侵蚀搬运和峡湾地形地貌的几何特征, 极地峡湾的沉积速率普遍较高^[43-44], 目前在发生冰川消融的峡湾中, 已测得最大沉积速率为 $1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[45]。另外, 较高的沉积物累积速率, 可迅速将累积的有机碳埋藏在 Mn 富集层厚度以下, 减少了有机碳在有氧环境中的暴露时间, 有利于沉积有机碳的保存。研究表明, 有机质的埋藏速率和保存程度与总沉积速率呈正相关^[46]。此外, 冰川输入的无机相(铁、锰)可能有效地吸附溶解有机碳, 或与溶解的有机化合物共沉淀, 促进有机碳长期埋藏^[3, 47]。在冰川融水和陆地径流的影响下, 极地峡湾水体可能出现季节性层化, 以及可能会出现底层水低氧、缺氧的情况, 微生物的厌氧氧化作用所消耗的有机碳较少, 有利于保存更多的有机碳^[48]。但目前有相关峡湾底层水缺氧或低氧的研究较少^[5], 水体层化的现象是否普遍存在于南、北极峡湾尚不清楚^[3]。

3 放射碳同位素技术在峡湾有机碳埋藏研究中的应用

近年来, 峡湾在全球碳循环和有机碳埋藏中发挥着重要作用, 因此了解峡湾沉积有机碳的来源特征, 对准确估算有机碳埋藏速率, 以及认识峡湾有机碳埋藏和沉积有机碳组成对气候变化、冰川加速消融的响应至关重要。目前主要通过测定多参数生物标志物, 包括烷烃、烯酮、甾醇、脂肪酸、木质素、甘油二烷基甘油四醚(GDGts), 结合有机碳稳定同位素¹³C 和端元模型估算不同来源有机碳的贡献。多参数生物标志物法相对减小了单一生物标志物或指数估算方法的不确定性, 例如, 在冰岛峡湾全新世陆源有机碳沉积记录的研究中, 不同生物标志物的陆源指标具有相似的变化趋势, 基于GDGts的BIT指数、烷烃烯酮指数(*n*-alkane/alkenone)和C/N比值, 结合3种指标的端元模型可得到近似准确的陆源有机碳变化^[8], 全新世以来沉积物中陆源有机碳存量的贡献持续增加, 这可能是由气候变化而非沉积速率变化所驱动, 并且在全新世晚期, 人类活动可能逐渐成为重要影响因素之一^[8]。前人研究显示, 峡湾沉积有机碳近1000年来的变化不仅由气候变化驱动, 而且还受到人类活动的影响, 在人类活动导致陆源扰动的时期, 有机碳埋藏速率远远超过了更早的全新世^[49], 这表明, 在有机碳大量输入的时期, 峡湾具有较高的有机碳储存能力, 以此起到气候调节的作用^[50]。双碳同位素(¹³C 和¹⁴C)技术被广泛用于估算极地环境沉积有机质中不同来源和不同年龄有机质的贡献, 如多年冻土土壤有机质^[51]以及含有来自多年冻土土壤有机质的极地海洋沉积物^[52]。研究者利用沉积短柱中的脂质生物标志物和总有机质¹⁴C 同位素, 量化了亚南极区域两个峡湾的有机碳埋藏记录, 结果显示, 在1985—2017年, 入海冰川消融, 使峡湾东部和西部区域的沉积岩源有机碳累积有所增加, 因此, 连续消融的冰川不仅释放了沉积岩源有机碳, 而且还增加了峡湾有机碳的埋藏量^[3, 12]。尽管应用双碳同位素技术能够区分多年冻土和海源有机质来源以及可以区分不同冻土沉积类型的有机质, 但总有机质¹⁴C 的应用在化石源有机质广泛输入的环境下受到很大的干扰, 这限制了利用总有机质¹⁴C 评估多年冻土有机质及峡湾沉积有机质的逗留时间^[17]。另外, Hage等利用RPO-¹⁴C(ramped pyrolysis/oxidation radiocarbon analysis)技术对加拿大峡湾浊流中的POC进行分

析, 发现粗颗粒浊流沉积物中有机质含量远高于泥质层, 年轻的生源有机质被很好地保存(>70%), 提高了有机碳的埋藏效率。由于砂质浊流普遍存在于峡湾区域, 因此, 对峡湾有机碳埋藏的进一步研究, 有助于更加清楚地估算全球有机碳的埋藏和循环^[53]。

生物标志物单体¹⁴C技术被用于从分子水平进一步来评估沉积有机质中不同来源和不同年龄有机质的贡献^[20, 54]。比如, 该技术已经成功应用于定量估算中国陆架边缘海沉积有机质中不同来源和不同年龄有机质的组成, 结果发现非现代有机质(陈化有机质和化石源有机质)相对贡献比例为(51±10)%, 与沉积物中陆源有机质的相对比例(平均(51±14)%)大致相等^[55]。研究显示, 随着气候变暖, 北极多年冻土有机质的释放量增加和搬运过程增强。Feng等对北极地表和深层(永久冻土)随气候变化的搬运机制进行了研究^[56-57]。木质素单体¹⁴C结果显示河流径流输入是表层沉积物中年轻有机碳的主要来源, 而¹⁴C年龄相对老的植物蜡质生物标志物则主要来自不连续冻土层的古老有机质。近些年来随着河流径流输入增加, 流动中古老碳的比例相对增加了3%~6%。有研究表明气候变化是导致老的多年冻土有机质被搬运的重要因素^[56]。还有研究发现, Bayelva河和孔斯峡湾沉积物中有机质¹⁴C受到化石源有机碳输入的限制; 而来自长链脂肪酸¹⁴C年龄(大约8000~11000 aBP)数据揭示了深层活动层/多年冻土有机碳的大量输入, 尤其是在Bayelva河及其河口位置; 在孔斯峡湾中部长链烷酸年龄(2500 aBP)相对年轻, 可能来自其他冻土有机质输入影响, 也可能是由于不同沉积速率或沉积物分选等物理因素所影响^[20]。

4 峡湾沉积有机碳对全球气候变暖的响应

在未来几十年里, 许多海洋终端冰川将在全球变暖的条件下撤退到陆地上, 极地峡湾冰川类型的转变将直接影响极地峡湾生态系统的生物地球化学过程^[22]。例如, 冰川向陆地的撤退改变了冰川锋面上升流, 并减少了营养物质向峡湾真光层的通量, 进而减少海洋初级生产力^[38-39]。另外, 矿物质运输减少和沉积物累积速率降低, 可能导致冰川峡湾中有机碳埋藏速率下降^[24]; 但气候变暖也使得极地峡湾海冰更薄、覆盖范围更小或者覆盖时间更短, 促使浮游植物生长周期变长; 大气CO₂的增加, 将

会促进初级生产力并向海底输送更多海源有机碳^[24, 58](图 7), 冰川撤退可能促进浮游植物初级生产力, 也可能抑制初级生产力。因此, 评估气候变化对峡湾生态系统的影响是一个极大的挑战^[22]。另外, 冰川撤退并非是一个简单、渐进的过程, 研究表明, 在斯瓦尔巴特群岛的 163 个冰川中, 14 个海洋终端冰川在过去的 30~40 年转变为陆地终端冰川, 而有 11 个陆地终端冰川已经进入海洋^[22]。在长时间尺度上(约 10 700 cal.aBP), 峡湾浮游植物初级生产力可能受到流域面积和营养盐供应的调控。全新世以来, 北半球太阳辐射和经向翻转流强度的改变, 形成了不同的洋流系统, 影响了营养盐供应, 进而影响了峡湾浮游植物的初级生产力^[8]。研究表明, 全新世温暖的表层海洋环境可能会导致初级生产力的增加和陆源物质贡献的降低^[59]。但极地峡湾的沉积主要受冰川融水动力作用和海冰、冰川侵

蚀作用的控制, 因此有大量的陆源有机碳来源^[60]。在未来气候变暖条件下, 陆源有机碳输入将显著增加^[3]。根据冰岛峡湾岩芯全新世以来的沉积记录, 陆源有机碳的输入受气候变化的控制, 全新世早期, 由于太阳辐射增强, 冰川不断消融, 土壤面积和陆地植被覆盖增加, 峡湾陆源有机碳贡献由 2% 增至 18%; 约 8200 年前, 冷事件又阻止了冰岛北部区域陆地土壤和植被的发展, 峡湾陆源有机碳贡献减少; 上述冷事件持续的时间较短, 在早全新世暖期(8600~5400 cal.aBP), 冰岛峡湾陆源有机碳输入整体呈现增加趋势^[8]。然而, 冰川消融也可能使陆源输入峡湾的粗颗粒物质减少, 这是由于大量粗颗粒物质会首先在陆地河床沉积, 在上游形成的湖泊将形成临时的汇, 显著改变沉积物进入峡湾的路线, 同时缺乏冰山的搬运, 所以从长时间尺度来看, 冰川的减少将导致悬浮物质输出减少甚至使浊流停

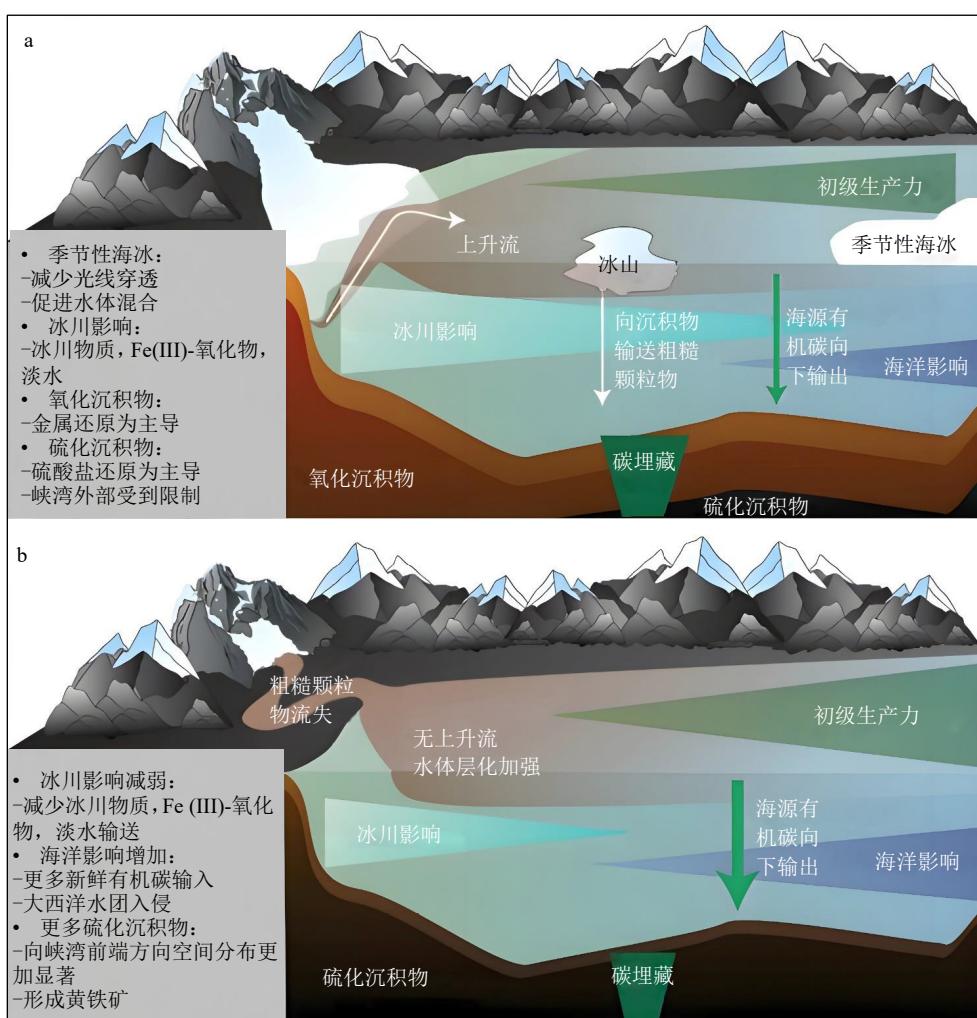


图 7 极地峡湾陆源物质运输和生物地球化学过程示意图^[22]

a. 目前的海洋终端冰川, b. 未来的陆地终端冰川。

Fig.7 Schematic of material transport and biogeochemical processes by (a) the present marine terminating glaciers and (b) the future land terminating glaciers in polar fjords^[22]

止^[61-63]。因此, 冰川未来的撤退模式将决定峡湾沿岸的水动力条件, 以及其对碳埋藏和生态系统的影晌^[62]。另外, 冰川的撤退模式可能与峡湾的地形条件有关, 在 1992—2010 年, 新地群岛 90% 的冰川都在撤退, 其中海洋终端冰川的退缩率 ($52.1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$) 比陆地终端冰川的退缩率 ($4.8 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$) 高一个数量级, 并且峡湾宽度变化是调节冰川对气候变化响应的一个关键因素, 表现为峡湾宽度与冰川总退缩率之间显著相关^[21]。

高纬度峡湾被认为是不成熟的生态系统^[9], 地质构造年轻。对于北极区域的峡湾生态系统, 研究认为变暖会改变其有机碳来源的相对贡献, 并诱导峡湾海底系统的成熟, 形成稳定的、生物适应的底栖生物群落, 减少有机碳在沉积物中的埋藏^[22-23]。此外, 研究认为北大西洋暖流的流入维持了欧洲西北部以及挪威北部峡湾的高有机碳埋藏速率, 而持续的气候变化将改变北大西洋暖流的强度, 进而可能对北大西洋峡湾的碳埋藏产生显著影响, 例如, 温暖、富营养的北大西洋海水往欧洲北极海域流入持续增强, 即北欧海域的大西洋化^[64], 会增加对欧洲西北部峡湾的营养盐供应, 提供利于生物生长繁殖的温盐条件, 使峡湾生物量增加^[14], 并且北极海冰覆盖面积的减小也会提高浮游植物生产力, 并改变峡湾的沉积速率^[65], 从而影响峡湾有机质通量和有机碳累积或埋藏量。目前南极半岛西部 90% 的冰川正在加速撤退, 峡湾成为南极洲增长最快和最新的栖息地之一。据估算, 在南极半岛新出现的峡湾系统中每年有超过 $7.8 \times 10^8 \text{ gC}$ 被埋藏, 表明即使冰川退缩, 极地峡湾仍然具有很强的碳埋藏能力^[13]。因此, 不同地域条件的极地峡湾, 其海洋环境、冰川状态对全球变暖的响应不同, 沉积物有机碳的累积或埋藏受到的影响不同, 为了能够严格评估和进一步预测冰川撤退对峡湾沉积物生物地球化学的影响, 还需要对冰前带 (proglacial zone) 与峡湾沉积物的生物地球化学过程、陆海相互作用、生态系统功能之间的联系和反馈展开进一步研究^[3]。

5 总结和展望

(1) 在全球气候变化的背景下, 峡湾的生物地球化学过程发生了剧烈的变化。峡湾的特殊地形及生物地球化学特性使其成为有机碳埋藏和储存的重要区域。全球峡湾的有机碳埋藏量约占全球海洋有机碳埋藏量的 11%, 由于存在冰川作用, 极地峡湾沉积有机碳的输入、迁移转化和埋藏呈现出

与温带峡湾不同的特征, 并且极地峡湾内以及各峡湾之间的沉积有机碳来源、组成和累积、埋藏速率均存在空间差异。因此, 厥清峡湾沉积有机碳的来源对认识峡湾有机碳埋藏至关重要

(2) 目前有关峡湾传输、储存以及向沿海延迟输送的有机碳定量研究还较少, 也难以明确冰川输入有机碳的确切归宿。此外, 富载铁和悬浮颗粒物的冰川融水可能有利于有机碳矿物组合的形成, 从而降低了从冰冻圈输出有机碳的生物利用度。但冰川输出物质中有多少被代谢, 或被埋藏在峡湾沉积物中, 还需要进一步探讨。

(3) 近年来, 预测全球气候变化是否会对峡湾的陆源有机碳输入、海洋生产力和生物地球化学过程起协同或对抗作用, 以及在不同的纬度梯度上如何发生变化仍然是一个关键的挑战, 因此, 为了厘清气候变化下峡湾沉积有机碳对冰川撤退的响应机制, 还需进一步对峡湾区域长时间尺度沉积物岩芯中不同来源和不同年龄有机碳来源和组成开展研究。

参考文献 (References)

- [1] Syvitski P M, Burrell D C, Skei J M. Fjords. Processes and Products [M]. New York: Springer, 1987: 3-377.
- [2] Syvitski J P M, Shaw J. Sedimentology and geomorphology of fjords [J]. Developments in Sedimentology, 1995, 53: 113-178.
- [3] Bianchi T S, Arndt S, Austin W E N, et al. Fjords as aquatic critical zones (ACZs) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 203: 103145.
- [4] Smith R W, Bianchi T S, Allison M, et al. High rates of organic carbon burial in fjord sediments globally [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(6): 450-453.
- [5] Smeaton C, Yang H D, Austin W E N. Carbon burial in the mid-latitude fjords of Scotland [J]. *Marine Geology*, 2021, 441: 106618.
- [6] 胡利民, 石学法, 刘焱光, 等. 白令海西部柱样沉积物中有机碳的地球化学特征与埋藏记录 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(3): 37-47. [HU Limin, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Geochemical characteristics and burial records of organic carbon in the column sediments from Western Bering sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(3): 37-47.]
- [7] Lee C. Controls on organic carbon preservation: The use of stratified water bodies to compare intrinsic rates of decomposition in oxic and anoxic systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(8): 3323-3335.
- [8] Moosess H, Abell R, Quillmann U, et al. Holocene changes in marine productivity and terrestrial organic carbon inputs into an Icelandic fjord: Application of molecular and bulk organic proxies [J]. *The Holocene*, 2013, 23(12): 1699-1710.
- [9] Nuwer J M, Keil R G. Sedimentary organic matter geochemistry of

- Clayoquot Sound, Vancouver Island, British Columbia [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, 50(4): 1119-1128.
- [10] Gilbert R. Environmental assessment from the sedimentary record of high-latitude fjords [J]. *Geomorphology*, 2000, 32(3-4): 295-314.
- [11] Howe J A, Austin W E N, Forwick M, et al. Fjord systems and archives: a review [M]//Howe J A, Austin W E N, Forwick M, et al. *Fjord Systems and Archives*. London: Geological Society of London, 2010, 344: 5-15.
- [12] Berg S, Jivcov S, Kusch S, et al. Increased petrogenic and biospheric organic carbon burial in sub-Antarctic fjord sediments in response to recent glacier retreat [J]. *Limnology and Oceanography*, 2021, 66(12): 4347-4362.
- [13] Zwierschke N, Sands C J, Roman-Gonzalez A, et al. Quantification of blue carbon pathways contributing to negative feedback on climate change following glacier retreat in West Antarctic fjords [J]. *Global Change Biology*, 2021, 28(1): 8-20.
- [14] Faust J C, Knies J. Organic matter sources in North Atlantic fjord sediments [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(6): 2872-2885.
- [15] Cui X Q, Bianchi T S, Jaeger J M, et al. Biospheric and petrogenic organic carbon flux along southeast Alaska [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 452: 238-246.
- [16] Galy V, Peucker-Ehrenbrink B, Eglington T. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion [J]. *Nature*, 2015, 521(7551): 204-207.
- [17] Kim J H, Peterse F, Willmott V, et al. Large ancient organic matter contributions to Arctic marine sediments (Svalbard) [J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56(4): 1463-1474.
- [18] Kumar V, Tiwari M, Nagaji S, et al. Evidence of Anomalously Low $\delta^{13}\text{C}$ of Marine Organic Matter in an Arctic Fjord [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 36192.
- [19] Cui X Q, Bianchi T S, Savage C, et al. Organic carbon burial in fjords: Terrestrial versus marine inputs [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 451: 41-50.
- [20] Kusch S, Rethemeyer J, Ransby D, et al. Permafrost organic carbon turnover and export into a high-Arctic fjord: a case study from Svalbard using compound-specific ^{14}C analysis [J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2021, 126(3): e2020JG006008.
- [21] Carr J R, Stokes C, Vieli A. Recent retreat of major outlet glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic, influenced by fjord geometry and sea-ice conditions [J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(219): 155-170.
- [22] Jørgensen B B, Laufer K, Michaud A B, et al. Biogeochemistry and microbiology of high Arctic marine sediment ecosystems-Case study of Svalbard fjords [J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, 66(S1): S273-S292.
- [23] Zaborska A, Włodarska-Kowalcuk M, Legeżyńska J, et al. Sedimentary organic matter sources, benthic consumption and burial in west Spitsbergen fjords-Signs of maturing of Arctic fjordic systems? [J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 180: 112-123.
- [24] Włodarska-Kowalcuk M, Mazurkiewicz M, Górska B, et al. Organic carbon origin, benthic faunal consumption, and burial in sediments of Northern Atlantic and arctic fjords (60-81°N) [J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2019, 124(12): 3737-3751.
- [25] Eidam E F, Nittrouer C A, Lundsgaard Ø, et al. Variability of sediment accumulation rates in an Antarctic fjord [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22): 13271-13280.
- [26] Koziorska K, Kuliniński K, Pempkowiak J. Sedimentary organic matter in two Spitsbergen fjords: Terrestrial and marine contributions based on carbon and nitrogen contents and stable isotopes composition [J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 113: 38-46.
- [27] Kim H, Kwon S Y, Lee K, et al. Input of terrestrial organic matter linked to deglaciation increased mercury transport to the Svalbard fjords [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1).
- [28] Svendsen H, Beszczynska-Möller A, Hagen J O, et al. The physical environment of Kongsfjorden-Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard [J]. *Polar Research*, 2002, 21(1): 133-166.
- [29] Bourgeois S, Kerhervé P, Calleja M L, et al. Glacier inputs influence organic matter composition and prokaryotic distribution in a high Arctic fjord (Kongsfjorden, Svalbard) [J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 164: 112-127.
- [30] Munoz Y P, Wellner J S. Local controls on sediment accumulation and distribution in a fjord in the West Antarctic Peninsula: implications for palaeoenvironmental interpretations [J]. *Polar Research*, 2016, 35(1): 25284.
- [31] Hopwood M J, Carroll D, Dunse T, et al. Review Article: How does glacier discharge affect marine biogeochemistry and primary production in the Arctic? [J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(4): 1347-1383.
- [32] Szeligowska M, Trudnowska E, Böhnke R, et al. The interplay between plankton and particles in the Isfjorden waters influenced by marine- and land-terminating glaciers [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: 146491.
- [33] Vonnahme T R, Persson E, Dietrich U, et al. Early spring subglacial discharge plumes fuel under-ice primary production at a Svalbard tide-water glacier [J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(4): 2083-2107.
- [34] Kumar V, Tiwari M, Rengarajan R. Warming in the Arctic captured by productivity variability at an Arctic fjord over the past two centuries [J]. *PLoS One*, 2018, 13(8): e0201456.
- [35] Torsvik T, Albretsen J, Sundfjord A, et al. Impact of tidewater glacier retreat on the fjord system: modeling present and future circulation in Kongsfjorden, Svalbard [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 220: 152-165.
- [36] Carroll D, Sutherland D A, Hudson B, et al. The impact of glacier geometry on meltwater plume structure and submarine melt in Greenland fjords [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(18): 9739-9748.
- [37] Kanna N, Sugiyama S, Ohashi Y, et al. Upwelling of macronutrients and dissolved inorganic carbon by a subglacial freshwater driven plume in Bowdoin fjord, northwestern Greenland [J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2018, 123(5): 1666-1682.
- [38] Meire L, Mortensen J, Meire P, et al. Marine-terminating glaciers sustain high productivity in Greenland fjords [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(12): 5344-5357.
- [39] Hopwood M J, Carroll D, Browning T J, et al. Non-linear response of summertime marine productivity to increased meltwater discharge around Greenland [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3256.

- [40] Schlosser C, Schmidt K, Aquilina A, et al. Mechanisms of dissolved and labile particulate iron supply to shelf waters and phytoplankton blooms off South Georgia, Southern Ocean [J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(16): 4973-4993.
- [41] Pabortsava K, Lampitt R S, Benson J, et al. Carbon sequestration in the deep Atlantic enhanced by Saharan dust [J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(3): 189-194.
- [42] Cui X Q, Bianchi T S, Savage C. Erosion of modern terrestrial organic matter as a major component of sediments in fjords [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(3): 1457-1465.
- [43] Walinsky S E, Prahl F G, Mix A C, et al. Distribution and composition of organic matter in surface sediments of coastal Southeast Alaska [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(13): 1565-1579.
- [44] Syvitski J P M. Glaciomarine environments in Canada: an overview [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1993, 30(2): 354-371.
- [45] Boldt K V. Fjord sedimentation during the rapid retreat of tidewater glaciers: observations and modeling [D]. Doctor Dissertation of University of Washington, 2014.
- [46] Berner R A. Biogeochemical cycles of carbon and sulfur and their effect on atmospheric oxygen over Phanerozoic time [J]. *Global and Planetary Change*, 1989, 1(1-2): 97-122.
- [47] Salvadó J A, Tesi T, Andersson A, et al. Organic carbon remobilized from thawing permafrost is resequestered by reactive iron on the Eurasian Arctic Shelf [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(19): 8122-8130.
- [48] Bianchi T S, Schreiner K M, Smith R W, et al. Redox effects on organic matter storage in coastal sediments during the Holocene: a biomarker/proxy perspective [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, 44(1): 295-319.
- [49] Smeaton C, Austin W E N, Davies A L, et al. Substantial stores of sedimentary carbon held in mid-latitude fjords [J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(20): 5771-5787.
- [50] Smeaton C, Cui X Q, Bianchi T S, et al. The evolution of a coastal carbon store over the last millennium [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 266: 107081.
- [51] Zimov S A, Davydov S P, Zimova G M, et al. Permafrost carbon: Stock and decomposability of a globally significant carbon pool [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(20): L20502.
- [52] Winterfeld M, Goñi M A, Just J, et al. Characterization of particulate organic matter in the Lena River delta and adjacent nearshore zone, NE Siberia-Part 2: Lignin-derived phenol compositions [J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(7): 2261-2283.
- [53] Hage S, Galy V V, Cartigny M J B, et al. Efficient preservation of young terrestrial organic carbon in sandy turbidity-current deposits [J]. *Geology*, 2020, 48(9): 882-887.
- [54] Eglington T I, Benítez-Nelson B C, Pearson A, et al. Variability in radiocarbon ages of individual organic compounds from marine sediments [J]. *Science*, 1997, 277(5327): 796-799.
- [55] Yu M, Eglington T I, Haghipour N, et al. Contrasting fates of terrestrial organic carbon pools in marginal sea sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 309: 16-30.
- [56] Feng X J, Vonk J E, Van Dongen B E, et al. Differential mobilization of terrestrial carbon pools in Eurasian Arctic river basins [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(35): 14168-14173.
- [57] Meyer V D, Heftet J, Köhler P, et al. Permafrost-carbon mobilization in Beringia caused by deglacial meltwater runoff, sea-level rise and warming [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(8): 085003.
- [58] Holding J M, Duarte C M, Sanz-Martín M, et al. Temperature dependence of CO₂-enhanced primary production in the European Arctic Ocean [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(12): 1079-1082.
- [59] 陈漪馨, 刘焱光, 姚政权, 等. 末次盛冰期以来挪威海北部陆源物质输入对气候变化的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(3): 95-108. [CHEN Yixin, LIU Yanguang, YAO Zhengquan, et al. Response of terrigenous input to the climatic changes of Northern Norwegian sea since the last glacial maximum [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(3): 95-108.]
- [60] Winkelmann D, Knies J. Recent distribution and accumulation of organic carbon on the continental margin west off Spitsbergen [J]. *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(9): Q09012.
- [61] Milner A M, Khamis K, Battin T J, et al. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(37): 9770-9778.
- [62] Normandeau A, Dietrich P, Clarke J H, et al. Retreat pattern of glaciers controls the occurrence of turbidity currents on high-latitude fjord deltas (Eastern Baffin Island) [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124(6): 1559-1571.
- [63] Zajączkowski M. Sediment supply and fluxes in glacial and outwash fjords, Kongsfjorden and Adventfjorden, Svalbard [J]. *Polish Polar Research*, 2008, 29(1): 59-72.
- [64] Weydmann-Zwolicka A, Prątnicka P, Łącka M, et al. Zooplankton and sediment fluxes in two contrasting fjords reveal Atlantification of the Arctic [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 773: 145599.
- [65] Zajączkowski M, Nygård H, Hegseth E N, et al. Vertical flux of particulate matter in an Arctic fjord: the case of lack of the sea-ice cover in Adventfjorden 2006-2007 [J]. *Polar Biology*, 2010, 33(2): 223-239.