

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.105>



晚更新世北极楚克奇陆架边缘有机碳的差异埋藏

宋 赛^{1,2}, 叶黎明^{2*}, 于晓果², 吴自银², 张永战¹, 章伟艳², 李中乔³,
季仲强³, 金海燕³, 张泳聪², 杨 映²

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏南京 210023
2. 自然资源部海底科学重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 浙江杭州 310012
3. 自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 浙江杭州 310012

摘 要: 有机碳埋藏是评价北冰洋碳封存能力的关键因素, 但其在轨道时间尺度上的埋藏特征目前还存在很大的争论. 通过分析楚克奇陆架边缘 M04 孔和周边表层沉积物中总有机碳、稳定碳同位素和生物标记物等指标, 进一步探讨了晚更新世楚克奇陆架边缘有机碳的组成、来源、埋藏速率及其与周边冰盖的协同演化. 结果表明, 陆源有机碳是楚克奇陆架边缘有机碳埋藏的主体, 且在冰期-间冰期旋回中表现出了显著的差异性, 间冰期(MIS1 和 MIS3)埋藏速率低, 冰期(MIS4 和 MIS2)埋藏速率急骤升高. 结合楚克奇陆架边缘的地貌特征和沉积环境, 东西伯利亚冰盖(ESIS)的扩张和冰下排水系统的输运可能是陆架有机碳二次搬运、并在陆架边缘高速埋藏的主要控制因素. M04 孔的沉积记录为梳理北冰洋有机碳的埋藏特征提供了新的视角, 进一步揭示了高速沉积区有机碳埋藏的驱动机制, 有助于客观评价北冰洋碳埋藏对全球碳封存的推动作用, 但仍需要更多、特别是来自北极加拿大一侧的数据才能有效刻画北冰洋碳埋藏与气候转型之间的耦合关系.

关键词: 北冰洋; 楚克奇陆架边缘; 有机碳; 碳埋藏; 碳封存; 冰期; 晚更新世.

中图分类号: P59

文章编号: 1000-2383(2024)09-3387-12

收稿日期: 2023-03-02

Differential Burial of Particulate Organic Carbon at the Chukchi Continental Margin, Arctic Ocean since Late-Pleistocene

Song Sai^{1,2}, Ye Liming^{2*}, Yu Xiaoguo², Wu Ziyin², Zhang Yongzhan¹, Zhang Weiyan², Li Zhongqiao³,
Ji Zhongqiang³, Jin Haiyan³, Zhang Yongcong², Yang Ying²

1. Key Laboratory of Coast and Island Development of Ministry of Education, School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China
2. Key Laboratory of Submarine Geosciences & Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China
3. Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics & Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

基金项目: 国家重点研发计划项目(Nos. 2022YFC2806600, 2019YFE0120900); 自然资源部第二海洋研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(No. JG1512).

作者简介: 宋赛(1996-), 女, 硕士研究生, 自然地理学专业. ORCID: 0009-0007-7090-1444. E-mail: 3247504896@qq.com

* **通讯作者:** 叶黎明, ORCID: 0000-0002-2786-8550. E-mail: lmye@sio.org.cn

引用格式: 宋赛, 叶黎明, 于晓果, 吴自银, 张永战, 章伟艳, 李中乔, 季仲强, 金海燕, 张泳聪, 杨映, 2024. 晚更新世北极楚克奇陆架边缘有机碳的差异埋藏. 地球科学, 49(9): 3387-3398.

Citation: Song Sai, Ye Liming, Yu Xiaoguo, Wu Ziyin, Zhang Yongzhan, Zhang Weiyan, Li Zhongqiao, Ji Zhongqiang, Jin Haiyan, Zhang Yongcong, Yang Ying, 2024. Differential Burial of Particulate Organic Carbon at the Chukchi Continental Margin, Arctic Ocean since Late-Pleistocene. *Earth Science*, 49(9): 3387-3398.

Abstract: The burial of particulate organic carbon is a critical factor in assessing the Arctic Ocean's carbon sequestration capacity, but its burial characteristics on orbital timescales remain highly debated. This study further explores the composition, source, and burial rate of organic matter in the Late Pleistocene and its co-evolution with the surrounding ice sheet by analyzing indicators such as total organic carbon, stable isotopes, and biomarkers in Core M04 at the Chukchi continental margin and the surrounding surface sediments. Results show that terrestrial organic carbon is the primary component of organic carbon burial at the Chukchi continental margin, with significant differences observed over glacial-interglacial cycles, with a low burial rate during the interglacial periods (MIS1 and MIS3) and a sharp increase in burial rate during the glacial periods (MIS4 and MIS2). Combined with the geomorphic features and depositional environment, the expansion of the East Siberian ice sheet (ESIS) and the transport of subglacial drainage systems may be the main controlling factors for the secondary transport of shelf organic carbon and its rapid burial at the continental margin. M04's records provide a new perspective to unravel the characteristics of organic carbon burial, further revealing the mechanisms in the high-sedimentation-rate area of the Arctic Ocean, and help to objectively evaluate the role of Arctic Ocean carbon burial in promoting global carbon sequestration. However, further research, especially records from Arctic Canada, is needed to fully describe the coupling relationship between Arctic Ocean carbon burial and climate transition.

Key words: Arctic Ocean; Chukchi continental margin; organic carbon; carbon burial; carbon sequestration; glacial period; Late Pleistocene.

0 引言

北冰洋对全球碳封存具有重要贡献,以占全球大洋 2.5% 的面积埋藏了全新世 7%~11% 的有机碳(Stein and Macdonald, 2004).随着全球变暖,广阔边缘海乃至整个北冰洋在 2054 年之后可能不再有夏季海冰(Peng *et al.*, 2020).更宽广的开放水域和更持久的光合作用将刺激初级生产力的勃发,进而促使北冰洋成为全球最大的新增碳汇(Bates, 2006; Harada, 2016).然而,全球超过 95% 的海相有机碳会在水体和沉积物中降解并以溶解无机碳(DIC)的形式重返海洋和大气(Coffin *et al.*, 2017).与此同时,陆源有机碳的大量埋藏短期内对北冰洋的碳封存能力不仅没有任何帮助,反而指示了冻土带中有机碳的释放和再迁移(Martens *et al.*, 2019).据估计,环北冰洋陆地冻土带中储藏的有机碳高达 1 300 PgC,正随着冻土消融而逐渐输入北冰洋,并与海相有机碳类似也要经历强烈的降解作用(Hugelius *et al.*, 2014; Martens *et al.*, 2020).因此,无论是海相还是陆源有机碳,光合固碳只是开端,能否被有效埋藏才是评价不同时间尺度上北冰洋碳封存能力的关键因素.

就中低纬度海区而言,晚更新世有机碳埋藏速率与大气中 CO₂ 含量在构造和轨道时间尺度上都呈现出了良好的负相关性(Cartapanis *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2023).据此,可以在气候模型中将开放大洋中有机碳的埋藏定义为驱动大气 CO₂ 含量变化的主要因素.问题在于,北冰洋有机碳的埋藏速率在氧

同位素第二期(MIS2)表现出了完全不同的变化趋势,远低于同期的中低纬度海区,也低于全新世的北冰洋(Cartapanis *et al.*, 2016).究其原因,上述研究中引用的沉积记录并没有概括北冰洋有机碳埋藏的整体状况.MIS2 期极低的沉积速率主要出现在北冰洋中心的罗蒙诺索夫洋脊,而南森、马卡洛夫和楚克奇等海盆中的沉积速率甚至超过了中低纬度海区,为埋藏有机碳创造了有利的物质条件(Jakobsson *et al.*, 2014; Schreck *et al.*, 2018).加强对高速沉积区有机碳的埋藏研究将有助于重新认识北冰洋在全球碳封存中的角色.同时,高沉积率往往意味着陆源有机碳的大量输入(Sparkes *et al.*, 2015).一方面,北冰洋被陆地环绕,是全球陆源有机碳埋藏比例最高的大洋(Stein and Macdonald, 2004).另一方面,冰期广袤的北极冰盖和冻土限制了陆地植被的生长,致使输入北冰洋的陆源有机碳中超过 70% 是老碳,代表了长时间尺度上的碳循环(Martens *et al.*, 2019).显然,有效区分沉积物中海相和陆源有机碳组成对估算北冰洋的碳汇能力及其对气候变化的反馈作用有特殊的意义.本次研究选取位于楚克奇陆架边缘 M04 孔和周边表层沉积物样品为主要研究材料,通过分析总有机碳(TOC)、稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)和生物标记物(正构烷烃和 GDGTs)等指标,识别沉积物中陆源和海相有机碳的组成和来源,结合沉积物密度和沉积速率计算其埋藏速率,并进一步探讨晚更新世楚克奇陆架边缘有机碳的埋藏特征及其与周边冰盖的协同演化.

1 区域概况

研究区位于西北冰洋楚克奇陆架边缘(图1). 在高海平面条件下, 阿拉斯加沿岸流(ACC)和阿纳德流(AC)穿过深约53 m的白令海峡, 呈扇形散布于宽广的楚克奇海陆架, 并与西伯利亚沿岸流(SCC)交汇, 最终融入西北冰洋波弗特环流(BG)和穿极流(TPD), 在驱动沉积物运输的同时也带来了丰富的营养盐, 催生了整个北冰洋最高的初级生产力(Bates, 2006; Hill *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2020).

楚克奇陆架及周边海域是北极响应全球变暖最典型的区域(Bates, 2006). 基于1981年至2010年的平均海冰界限, 楚克奇和东西伯利

亚陆架的夏季海冰前缘基本位于72°~73°N之间, 但海冰退去的范围近年来不断地向北扩张(Arguez *et al.*, 2012). 开放水体强烈的动力条件激发了沉积物的侧向搬运, 造就了楚克奇陆架边缘超高的沉积速率(Darby *et al.*, 2009; Danielson *et al.*, 2017; Schreck *et al.*, 2018). 从楚克奇陆架沉积物中的有机碳含量来看, 大部分有机碳颗粒没能在原地埋藏, 而是向陆架边缘和加拿大海盆运输(Astakhov *et al.*, 2013; O'Daly *et al.*, 2020; Xiang and Lam, 2020).

在楚克奇海沿岸没有大河入海, 海岸带侵蚀也相对较弱, 现代陆架上60%的沉积物来自太平洋水体的输入(Viscosi-Shirley *et al.*, 2003; Astakhov *et al.*, 2019). 这些沉积物与白令海北部育空河(Yukon)和

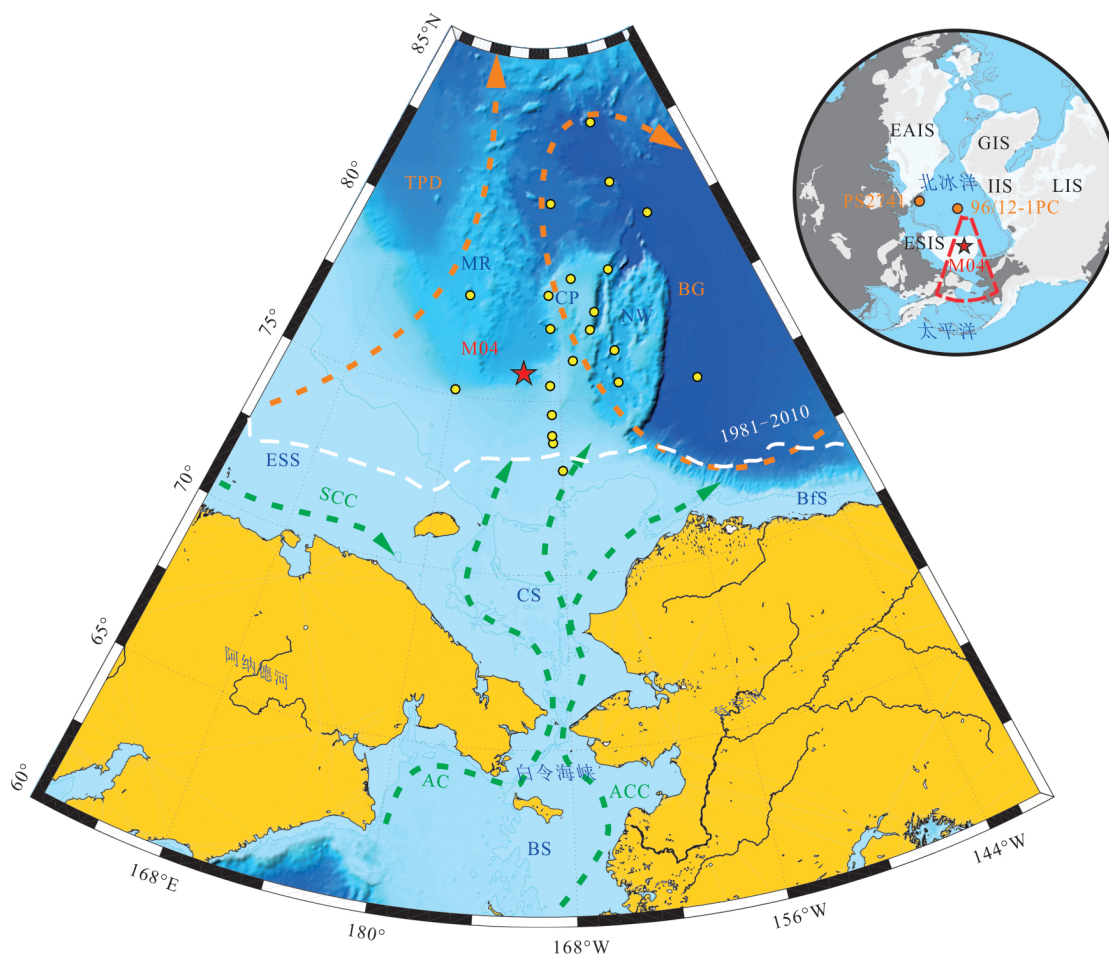


图1 研究站位及区域概况

Fig.1 Core sites and geographic settings

红色五角星指示 M04 孔站位, 黄色圆点指示表层样站位; TPD 和 BG 及橙色虚线箭头分别代表穿极流和波弗特环流, 据 Talley *et al.* (2011); SCC、AC 和 ACC 及绿色虚线箭头分别指示西伯利亚沿岸流、阿纳德流和阿拉斯加沿岸流, 据 Corlett and Pickart (2017); 白色虚线指示 1981 年至 2010 年夏季平均海冰前缘, 据 Arguez *et al.* (2012); MR、CP、NW、ESS、CS、BfS 和 BS 分别代表门捷列夫洋脊、楚克奇海台、北风洋脊、楚克奇陆架、东西伯利亚陆架、波弗特陆架和白令海陆架; 右上角小图中 PS2741 和 96/12-1PC 及橙色圆点指示参考柱样站位, 据 Löwemark *et al.* (2014)、Stein *et al.* (2001); ESIS、LIS、IIS、GIS 和 EAIS 分别代表东西伯利亚、劳伦泰、因纽特、格陵兰和欧亚冰盖

阿纳德河(Anadyr)的输入有关,特别是育空河,流域内大量分布富含冰楔和有机碳的特殊冻土(Yedoma),对全球变暖非常敏感(Anthony *et al.*, 2014; Olefeldt *et al.*, 2016).在晚更新世冰期,随着劳伦泰冰盖、欧亚冰盖和格陵兰冰盖的扩张,海平面下降,楚克奇陆架出露海面,因而有可能也被巨厚的东西伯利亚冰盖覆盖,强烈的冰蚀作用可以为深海沉积提供丰富的物源(Hill *et al.*, 2007; Niessen *et al.*, 2013; Ye *et al.*, 2022).

2 材料与方 法

2.1 沉积物样品

2012年,中国第5次北极科学考察航次在楚克奇陆架边缘利用重力采样器获取了M04孔柱状沉积物(172.199°W, 75.982°N),采样水深2 003 m,样品长度560 cm(图1).M04孔具有明显的岩性旋回,分别在0~38 cm和160~250 cm出现了标志性的富锰褐色层(B1和B2),指示间冰期相对温暖的气候条件,其间则夹杂形成于冰期气候条件下的橄榄绿-灰绿色沉积;位于B2层顶部的另一个标志层是富Ca沉积,指示了北极加拿大一侧的陆源输入(图1; Ye *et al.*, 2020).Ye *et al.* (2022)已通过¹⁴C测年、古地磁和旋回地层学建立了轨道尺度上的年龄框架.M04孔柱样的底界年龄约为70 ka,连续记录了氧同位素第4期以来(MIS1~MIS4)的沉积特征.

表层沉积物样品共计21站,由2014年和2016年中国第6次和第7次北极科学考察航次在楚克奇陆架边缘和加拿大海盆中利用箱式取样器采集,采样水深介于265~3 763 m,取上层0~5 cm沉积物作为表层样.

2.2 测试方法

2.2.1 有机碳含量和稳定同位素 柱样沿中间线纵向剖分,以10 cm间隔用注射器(去顶)取沉积物3 cm³,称重后计算沉积物密度,另在柱样上部200 cm以2 cm间隔、下部360 cm以10 cm间隔取沉积物约3g,所有表层沉积物也取等量样品,冷冻干燥后研磨,再从中称取约0.3 g样品,加入1 mol/L的盐酸预处理以去除碳酸盐.在自然资源部海底科学重点实验室分析沉积物中TOC含量和稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$)组成.元素分析仪(Thermo NE1112)通过ConFlo III接口与Thermo Finnegan Delta plus AD质谱仪相连,将不含碳酸盐的样品转化为气体.含氧反应器和还原反应器

的温度分别为1 020 °C和650 °C,填充柱的温度为40 °C.分别用USGS-24、GBW4408和IAEA-N1标准物质对实验室钢瓶中的CO₂进行标定;TOC重复样标准偏差为0.04%, $\delta^{13}\text{C}$ 分析精度约0.2%.

2.2.2 正构烷烃和甘油二烷基甘油四醚 分别在M04柱样MIS1和MIS2期的3个层位各取约5 g沉积物样品,冷冻干燥后研磨,加二氯甲烷和甲醇(3:1)混合萃取液及24D烷内标,充分混合,经超声、离心分离,收集上层清液并重复8次.萃取液在氮吹仪下缓慢吹干后,加入KOH体积含量为6%的CH₃OH溶液5 mL超声处理,加4 mL正己烷使溶液混合均匀,离心后转移上层萃取液重复4次.正己烷萃取后的溶液进行硅胶柱层析分离,用正己烷淋洗得烷烃组分,将洗脱液吹干浓缩,在自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室用气相色谱(Gas Chromatograph; Agilent 7890A)进行定量分析.分子化合物根据峰的保留时间来定性,定量采用内标法,通过目标峰和内标峰的面积比来确定含量,采集柱流失图谱,用于扣除柱流失峰面积.三次测定相对标准偏差小于5%.

甘油二烷基甘油四醚酯(GDGTs)测定方法参照Ji *et al.* (2019)和Kremer *et al.* (2018).加入C₄₆ GDGT作为内标,使用DCM/CH₃OH(体积比为3:1)对沉积物进行超声提取.提取时使用KOH体积含量为6%的CH₃OH溶液并使用正己烷萃取,使用硅胶柱将回收的样品分离成非极性和极性部分.含有GDGTs的极性部分在平缓的N₂下干燥,重新溶解在正己烷/异丙醇(体积比为99:1)中,通过PTFE过滤器(0.45 μm)过滤,在自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室用三重四极杆质谱仪(Waters-Quattro Ultima mass)耦合的超高效液相色谱(LC)-质谱(MS)设备(Agilent 1200)进行检测,平均相对标准偏差<10%.

2.3 数据分析

基于 $\delta^{13}\text{C}$ 的双端元混合模型被用于识别M04孔沉积物中陆源(TerrOC)和海相(MarOC)有机碳的相对比例.

$$\text{TerrOC}(\%) = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{mar}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{terr}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{mar}}} \times 100, \quad (1)$$

$$\text{MarOC}(\%) = 100 - \text{TerrOC}(\%), \quad (2)$$

埋藏速率 = TerrOC/MarOC(%) × TOC × 沉积速率 × 干样密度, (3)

其中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{terr}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{mar}}$ 分别代表陆源和海相稳定碳

同位素的端元组成.高纬度地区的海相 $\delta^{13}\text{C}$ 通常在 $-30.4\text{‰} \sim -16.7\text{‰}$ 之间 (Stein and Macdonald, 2004).东西伯利亚海开阔水域浮游植物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值约为 -21‰ ,多被定义为研究区的海相 $\delta^{13}\text{C}$ 端元值 (Martens *et al.*, 2019).冰藻 $\delta^{13}\text{C}$ 则相对较重,可达 $-15\text{‰} \sim -8\text{‰}$ (Stein and Macdonald, 2004).M04 孔位于夏季平均海冰前缘(接近 73°N)以北,冰藻在初级生产力中的比重超过 10% ,表层沉积物中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 通常 $> -21\text{‰}$ (图1; Naidu *et al.*, 2000; Goñi *et al.*, 2013).此外,东西伯利亚、阿拉斯加及北极加拿大地区冰杂沉积物中陆源植物碎屑的 $\delta^{13}\text{C}$ 可低至 -32.1‰ ,活跃层中陆源有机碳平均 $\delta^{13}\text{C}$ 约为 -27.8‰ ,冻土中老碳的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 约为 -26.6‰ ,而 M04 孔所在的陆架边缘以陆源老碳沉积为主,新鲜的植物碎屑基本在近岸带被降解 (Vonk *et al.*, 2010; Semiletov *et al.*, 2016; Schwab *et al.*, 2021).因此, M04 孔混合模型中海相端元 $\delta^{13}\text{C}$ 被定义为 -17.5‰ ,陆源端元 $\delta^{13}\text{C}$ 被定义为 -26.6‰ (Belicka and Harvey, 2009; Schwab *et al.*, 2021).此外,在陆源和海相有机碳埋藏过程中,稳定同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 随着总有机碳含量而改变, TOC 与 $\text{TOC} \times \delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 之间的斜率可用来指示总有机碳增加或减少时陆源或海相有机碳的相对贡献,被定义为“净碳同位素” (Aller *et al.*, 2008; Coffin *et al.*, 2017).

通常,陆源高等植物以高分子奇碳正构烷烃占优势 (C_{27} 、 C_{29} 、 C_{31}),在 $\text{C}_{23} \sim \text{C}_{33}$ 范围内有明显的奇碳优势 (Goñi *et al.*, 1997; 高超等, 2018),低碳数正构烷烃主要来源于低等生物,包括细菌和藻类 (Cranwell *et al.*, 1987),以 C_{15} 、 C_{17} 、 C_{19} 和 C_{21} 代表海相来源.尽管在海洋中也会有 brGDGT (支链甘油二烷基甘油四醚酯) 的产生,但在该区域占比较小,基本可忽略不计,故 brGDGT 是追踪陆地土壤衍生有机碳的可靠参数.相关指标计算公式如下 (于晓果等, 2015; 高超等, 2018; Ji *et al.*, 2019; 张佳皓等, 2020; 丁江辉等, 2023):

$$\sum T / \sum M = (\sum C_{25-35}) / (\sum C_{15-21}), \quad (4)$$

$$\text{OEP} = 2C_{29} / (C_{28} + C_{30}), \quad (5)$$

$$\text{CPI} = 1/2 (\sum C_{25-33(\text{odd})} / \sum C_{24-32(\text{even})} + \sum C_{25-33(\text{odd})} / \sum C_{26-34(\text{even})}), \quad (6)$$

$$\text{BIT} = (\text{I a} + \text{II a} + \text{III a}) / (\text{I a} + \text{II a} + \text{III a} + \text{IV}), \quad (7)$$

其中, $\sum C_{25-35}$ 与 $\sum C_{15-21}$ 分别代表正构烷烃中长链 C_{25} 到 C_{35} 和短链 C_{15} 到 C_{21} 在沉积物中的含量总和; C_{28} 、

C_{29} 和 C_{30} 分别代表正构烷烃中 C_{28} 、 C_{29} 和 C_{30} 在沉积物中的含量; $\sum C_{25-33(\text{odd})}$ 、 $\sum C_{24-32(\text{even})}$ 和 $\sum C_{26-34(\text{even})}$ 分别代表正构烷烃中 C_{25} 到 C_{33} 奇碳数烷烃、 C_{24} 到 C_{32} 偶碳数烷烃和 C_{26} 到 C_{34} 偶碳数烷烃在沉积物中的含量; BIT 指数为 GDGTs 中 brGDGT 与 brGDGT 和 Crenarchaeol (IV) 之和的比.

3 结果

3.1 总有机碳含量

M04 孔沉积物中总有机碳含量介于 $0.19\% \sim 0.81\%$, 平均值为 0.48% (图2).在冰期-间冰期旋回中,总有机碳含量波动幅度明显,且也呈现出了一定的旋回性.总有机碳最高含量出现在最底部的 MIS4 期沉积物中,对应于冰期气候条件,同为冰期的 MIS2 期沉积物中也有较高含量的有机碳.总有机碳最低含量出现在 MIS3 期沉积物中,对应于间冰期气候条件,同为间冰期的 MIS1 期沉积物中总有机碳含量波动更为明显,早期总有机碳含量要高于 MIS2 期,晚期(顶部 10 cm 以浅)总有机碳含量呈现持续上升的趋势.

表层沉积物中总有机碳含量介于 $0.36\% \sim 2.02\%$, 平均值为 0.87% .

3.2 稳定碳同位素

M04 孔稳定碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 介于 $-25.7\text{‰} \sim -22.1\text{‰}$, 平均值为 -24.4‰ (图2).在整个深度剖面中,稳定碳同位素基本上与总有机碳含量呈镜像关系 (10 cm 以深呈负相关关系, $R^2=0.66$), MIS4 和 MIS2 期稳定碳同位素轻,而 MIS3 期稳定碳同位素偏重.在顶部 10 cm 以浅,稳定碳同位素与总有机碳含量变化趋势相同 (10 cm 以浅呈正相关关系, $R^2=0.72$), 沉积层越浅,稳定碳同位素越重.

表层沉积物中稳定碳同位素介于 $-25.0\text{‰} \sim -20.2\text{‰}$, 平均值为 -22.3‰ .结合总有机碳含量,表层样中 TOC 与 $\text{TOC} \times \delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 之间的斜率为 -21.4‰ , M04 孔 TOC 与 $\text{TOC} \times \delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 之间的斜率为 -25.9‰ (图3).

3.3 有机碳组成及埋藏速率

混合模型计算结果显示, M04 孔陆源有机碳埋藏速率 (TerrOC BR) 介于 $2.4 \sim 100.5 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{ka})$, 平均值为 $29.4 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{ka})$, 且有明显的冰期-间冰期旋回 (图2). MIS4 期平均有机碳埋藏速率高达 $72.0 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{ka})$, 约是 MIS3 期平均埋藏速率 $8.7 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{ka})$ 的 10 倍. MIS2 期平均埋藏速率为

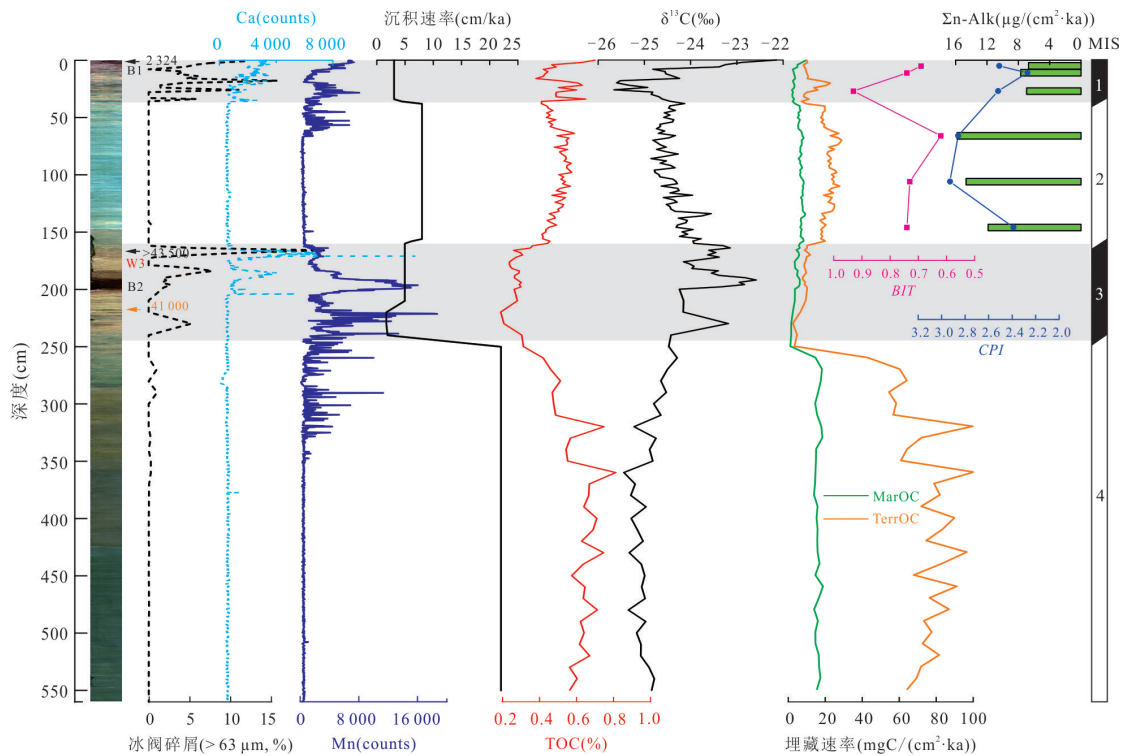


图2 M04孔沉积地层和有机碳埋藏特征

Fig.2 Sedimentary stratigraphy and organic carbon burial characters in Core M04

B1和B2指示富锰褐色层;W3指示富钙白色层;带数字的黑色和橙色箭头分别指示AMS¹⁴C和古地磁年龄(a B.P.),引自Ye *et al.* (2022); 深海氧同位素阶段(MIS)用白色框(间冰期)和黑色框(冰期)表示,灰色条带指示间冰期

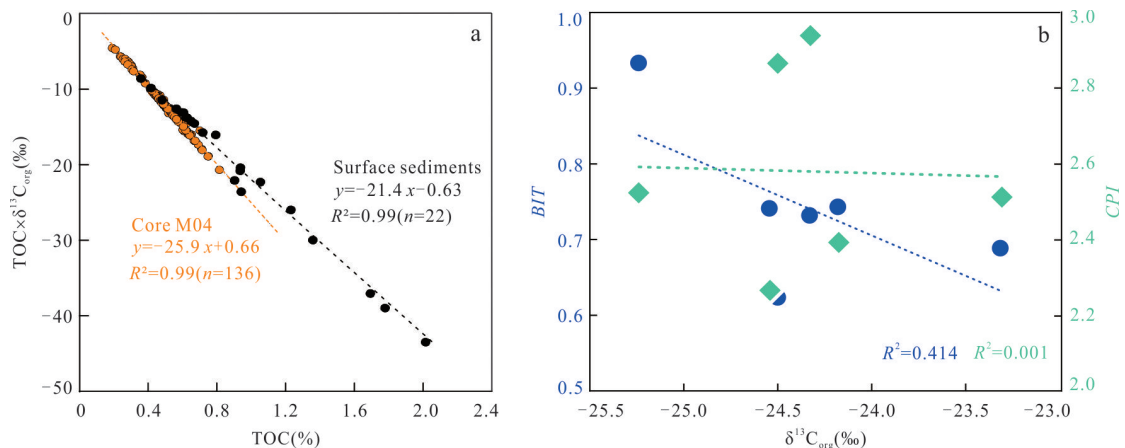


图3 稳定碳同位素与总有机碳含量和生物标志物的相关性

Fig.3 Correlations of stable carbon isotope with its content and biomarkers

21.6 mg/(cm²·ka),也低于同为冰期气候条件的 MIS4期,但要高于 MIS1期平均埋藏速率 11.7 mg/(cm²·ka).与总有机碳含量类似,MIS1早期陆源有机碳平均埋藏速率也出现了峰值.海相有机碳埋藏速率(MarOC BR)介于1.0~18.7 mg/(cm²·ka),平均值为7.9 mg/(cm²·ka),波动幅度很小,冰期-间冰期旋回不明显,在 MIS4和 MIS2期

略有升高,顶部10 cm以浅也有升高的趋势(图2).

3.4 生物标记物指标

M04孔样品正构烷烃碳数范围介于C₁₄~C₃₅,总正构烷烃(Σn-Alk)的埋藏速率介于6.71~15.83 µg/(cm²·ka),MIS2期的平均埋藏速率明显高于 MIS1期(图2和表1).沉积物中正构烷烃峰型分布总体上以高碳奇数烷烃占优势,碳数范围在23~33的奇数

表1 生物标志化合物分子组合指标

Table 1 Proxies of molecular combination of biomarkers

年代	层位 (cm)	$\Sigma n\text{-Alk}$ ($\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{ka})$)	$\Sigma T/\Sigma M$	<i>BIT</i>	<i>OEP</i>	<i>CPI</i>
MIS1	5	6.71	2.19	0.69	3.05	2.51
	11	7.69	2.68	0.74	2.89	2.27
	27	6.95	2.72	0.93	3.39	2.52
MIS2	66	15.83	1.83	0.62	3.67	2.86
	106	14.68	2.06	0.73	3.83	2.93
	146	11.86	2.21	0.74	2.84	2.39

烷烃含量占 $\Sigma n\text{-Alk}$ 约50%。所有样品单个最高浓度正构烷烃全部落在 C_{29} ,较为稳定。陆源正构烷烃含量 ΣC_{25-35} 与海源正构烷烃含量 ΣC_{15-21} 之比 $\Sigma T/\Sigma M$ 介于1.83~2.68;碳优势指数 CPI 均小于3;有机碳成熟度 OEP 介于2.84~3.83,两者在上层10 cm均出现较低值,MIS2晚期和MIS1早期出现高值;支链甘油二烷基甘油四醚酯(brGDGT)与奇古菌醇(Crenarchaeol)的比例 BIT 介于0.62~0.93,平均值为0.74,在MIS1早期出现了最高值,其与 $\delta^{13}C$ 之间存在较弱的相关性($R^2=0.414$)(表1和图3)。

4 讨论

4.1 冰期-间冰期旋回中有机碳的差异埋藏

晚第四纪北冰洋中心的平均沉积速率仅为0.2~0.7 cm/ka,MIS2期的沉积速率甚至接近于零,因此北冰洋被认为对全球深海碳埋藏或碳封存的贡献非常小(Polyak *et al.*, 2009; Cartapanis *et al.*, 2016)。然而,楚克奇陆架边缘的沉速率比北冰洋中心至少高出一个数量级,最高超过了30 cm/ka,而且冰期-间冰期旋回显著,冰期的沉积速率更加突出(图2; Polyak *et al.*, 2009; Schreck *et al.*, 2018)。在M04孔中,冰期不仅沉积速率高,沉积物中总有有机碳同样呈现出高含量,并没有因为大量陆源碎屑的输入而被稀释,说明被埋藏的有机碳与陆源碎屑具有相同的来源(图2; Ye *et al.*, 2020)。混合模型的计算结果也支持这一推论,冰期被埋藏的有机碳以陆源输入为主;而且生物标志物指标 BIT 远高于0.37,且与 $\delta^{13}C$ 之间存在较弱的线性关系,也指示了末次冰期陆源有机碳大量输入的事实(图2和表1; Sparkes *et al.*, 2015)。意外的是,MIS1早期 BIT 和 $\Sigma T/\Sigma M$ 的平均值都要高于MIS2期,即在间冰期气候条件下M04孔埋藏陆源有机碳的效率要高于冰期气候条件(表1; 高超等, 2018)。有机碳埋藏速

率的变化有效地指示了全球变暖背景下冰盖消融对陆源物质运输的影响。受测年数据的限制,虽然在MIS1早期并没有识别出高速沉积,但生物标志物和混合模型计算的结果基本一致,均指示此时出现了陆源输入的峰值(图2和表1)。Stein *et al.* (2001)的研究表明,更显著的峰值出现在西伯利亚的西部陆架边缘,被认为是海平面快速上升并侵蚀海岸带的结果。MIS1晚期的情况恰好相反,海平面上升到一定幅度后,海岸线快速后撤,宽广的陆架阻挡了陆源有机碳直接输入深海盆地,楚克奇陆架边缘及M04孔陆源有机碳的埋藏速率势必降低,而海相有机碳的埋藏速率随着初级生产力的勃发而显著增加(图2; Martens *et al.*, 2019)。然而,类似的变化趋势并没有出现在另一个间冰期(MIS3)的沉积物中,说明海平面变化和初级生产力并不是引起有机碳差异埋藏的全部因素。另外可能的原因是MIS4向MIS3的过渡阶段海平面增高幅度要明显小于MIS2向MIS1的过渡阶段(图4),故后者对海岸带的侵蚀范围及强度要比前者更大。

在楚克奇陆架周边表层沉积物中,不同来源有机碳的空间分布差异明显(Schwab *et al.*, 2021)。虽然陆源和海相有机碳都被大量输入深海,但随着离岸距离的增加,楚克奇陆架边缘陆源有机碳在碳埋藏中逐渐占据主导,这有别于北冰洋其他陆架区陆源有机碳随离岸(河口)距离增加而减少的模式(Sparkes *et al.*, 2015)。从深海盆地陆源有机碳含量的变化趋势可知,波弗特环流有助于北极加拿大陆源有机碳的远距离输运、并进入楚克奇陆架边缘(Schwab *et al.*, 2021)。即便如此,在M04孔所在区域的表层沉积物中,海相有机碳的埋藏量仍然超过了陆源有机碳,只不过这种相对优势消失在了10 cm以深沉积物中(图2)。如图3所示,沉积物中有机碳含量的变化率与 $\delta^{13}C$ 密切相关。由于有机碳被埋藏后其含量的减少总体上由降解作用决定,沉积物中单位有机碳含量变化所对应的 $\delta^{13}C$ (斜率)指示的是有机碳的降解作用(Aller *et al.*, 2008; Pirtle-Levy *et al.*, 2009)。深海盆地表层沉积物中,净碳同位素约为-21.4‰,而M04孔剖面中净碳同位素约为-25.9‰。考虑到研究区陆源和海相有机碳各自的端元组成(分别为-26.6‰和-17.5‰)以及海相有机碳比陆源有机碳更易降解的特性,净碳同位素的变化表明,海相有机碳被埋藏后在浅表层就已经被大量降解,在10 cm以深沉积物中因降解作用而

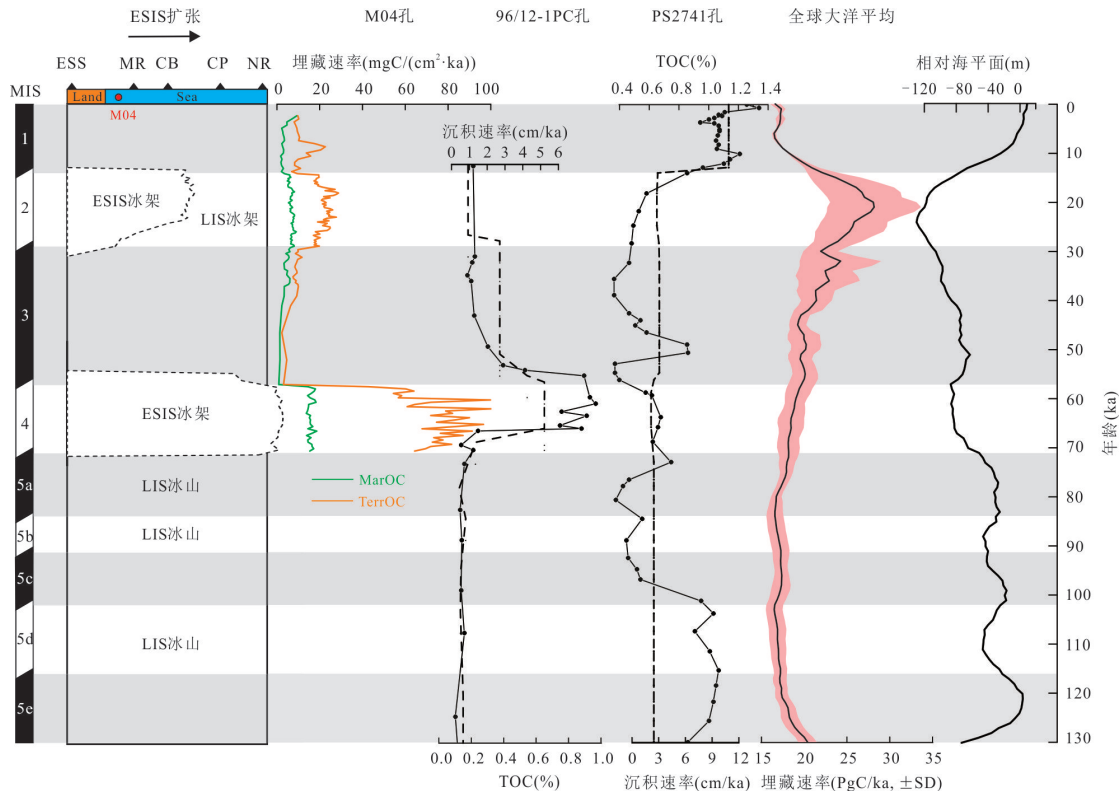


图 4 晚更新世北冰洋有机碳的差异埋藏

Fig.4 Differential burial of organic carbon in the Arctic Ocean during the Late Pleistocene

东西伯利亚冰盖的扩张期次引自 Ye *et al.* (2022); 96/12-1PC 孔有机碳数据引自 Löwemark *et al.* (2014); PS2741 孔有机碳数据引自 Stein *et al.* (2001); 全球大洋平均有机碳埋藏速率引自 Cartapanis *et al.* (2016); 海平面变化数据引自 Spratt and Lisiecki (2016)

减少的有机碳主要来自陆源(图 2; Martens *et al.*, 2019). 因此, 即使有比冰期更高的初级生产力, 经过长期降解后, MIS3 期的沉积记录中并未出现海相有机碳的埋藏峰值. 至于陆源有机碳, 已经在土壤中发生过降解, 特别是冻土中的老碳(年龄约为 23 ka), 少量来自近代的新碳也在近岸带被降解, 能输入陆架边缘以及深海盆地的陆源有机碳大部分是不易降解的长链烷烃(Bröder *et al.*, 2018).

4.2 冰盖对有机碳埋藏的驱动作用

M04 孔有机碳的高速埋藏主要发生在冰期, 且以陆源有机碳为主, 单纯的气候变化很难解释这一现象. 在降雨量锐减、河流流量减少、冰冻期延长、冻土带更加稳定和热侵蚀减弱的环境中, 河流和海岸带侵蚀不太可能大幅度增强陆源有机碳和无机碎屑的向海运输(Hill *et al.*, 2007; Vonk *et al.*, 2010; Olefeldt *et al.*, 2016). 除了河流和海岸带侵蚀, 海冰也是影响陆源有机碳向深海运输的重要载体, 特别是底冰, 其中的有机碳含量最高可达 5.74% (Nürnberg *et al.*, 1994; Polyak *et al.*, 2009). 西伯利亚一侧的边缘海被认为是北冰洋海冰的主

要产区, 而加拿大北极多岛海和波弗特陆架的开放水域比较窄, 生产的海冰以底冰为主(Stein and Macdonald, 2004; Darby *et al.*, 2009). 表层沉积物中陆源有机碳的空间分布以及 M04 孔中冰筏碎屑(IRD)和 Ca 元素含量均表明, 在间冰期气候条件下加拿大北极多岛海和波弗特陆架确实有大量陆源有机碳输入(图 2; Schwab *et al.*, 2021). 然而, 在冰期浅水陆架大部分出露海面的前提下, M04 孔 MIS2 和 MIS4 期沉积物中几乎不含冰筏碎屑, 指示物源的 Ca 元素也跌回了本底值, 这排除了任何方向海冰或冰山输入陆源有机碳的可能性(图 2; Ye *et al.*, 2020). 值得注意的是, 冰期海相有机碳的埋藏速率也表现出了一定程度的升高, 而且 MIS2 期 CPI 和 OEP 指标均要稍高于 MIS1 期, 表明冰期埋藏的陆源有机碳具有较低的成熟度. 即使笔者在混合模型中将冰期海相端元($\delta^{13}\text{C}$)提高 1.5‰, 以此来消除初级生产力组分变化引起的误差, 冰期海相有机碳埋藏速率的高值仍然存在. 依据“大冰架”假说, 随着海平面下降, 现代生产力勃发的陆架在冰期大部分出露海面, 且整个北冰洋都可能被巨厚的冰架所

覆盖 (Jakobsson *et al.*, 2016). 即使有冰间湖 (Polynya) 的存在, 海相初级生产力诱发的有机碳埋藏速率也不可能超过间冰期 (Stein *et al.*, 2017). 低海平面迫使的岸线迁移, 缩短了陆源有机碳的入海距离, 确实可以增强楚克奇陆架边缘陆源有机碳的埋藏速率, 但如果要同时增强海相有机碳的埋藏速率, 就不得不考虑楚克奇陆架上相对含量超过 70% 的海相有机碳的二次搬运 (Martens *et al.*, 2019; Schwab *et al.*, 2021).

在北冰洋中心, 同样是冰期气候条件的 MIS6 期也发生了陆源有机碳的高速埋藏, 而且 MIS6 期与 MIS5 期之间有机碳的成熟度也存在倒置, 被认为与欧亚冰盖 (EAIS) 的侵蚀作用有关, 即富含低成熟度新碳的表层土壤在 MIS6 期被侵蚀殆尽, MIS5 期入海的有机碳反而以次表层冻土中的老碳为主 (Yamamoto *et al.*, 2008). 同样位于北冰洋中心的 96/12-1PC 孔记录表明, 极端高速的有机碳埋藏也出现在 MIS4 期, 而且还伴随着大量源自欧亚冰盖的冰筏碎屑 (图 4; Löwemark *et al.*, 2014). 然而, 更加靠近欧亚冰盖的 PS2741 孔中却没有出现明显的高速沉积, 仅是总有机碳含量略有增加, 这一特征似乎符合全球大洋有机碳埋藏的平均状态 (图 4; Stein *et al.*, 2001). 驱动类似侵蚀作用的冰盖被认为也出现在楚克奇和东西伯利亚一侧, 即东西伯利亚冰盖 (Niessen *et al.*, 2013; Jakobsson *et al.*, 2016). MIS4 期, 东西伯利亚冰盖及其扩展冰架的覆盖范围接近晚更新世以来的最大值, M04 孔所在的楚克奇陆架边缘、南门捷列夫洋脊和大部分楚克奇海台均被稳定的冰架所覆盖, 阻挡了其他海区的海冰和冰山及其携带的有机碳 (Ye *et al.*, 2020). 大量陆源有机碳和少量海相有机碳的最大来源可能是东西伯利亚和楚克奇陆架区上一个间冰期的沉积物, 并且输运方式应该不是富含粗碎屑 (IRD) 的冰山卸载, 而是随冰下排水携带的细粒沉积物一起输入海盆, 这一点得到了陆架上的侵蚀峡谷、陆架边缘的沟槽体系以及礫形沉积体的验证 (Hill *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2021). 东西伯利亚 MIS2 期的情况略有不同, 东西伯利亚冰盖及其扩展冰架显著缩小, 仅覆盖了部分楚克奇陆架边缘和南门捷列夫洋脊, 冰盖的侵蚀作用有所减弱, 有机碳的埋藏速率因此低于 MIS4 期 (图 4; Ye *et al.*, 2022). 据此推测, 东西伯利亚冰盖的扩张和冰下排水系统的输运很可能是

楚克奇陆架边缘有机碳高速堆积的主要控制因素.

5 结论

晚更新世楚克奇陆架边缘 M04 孔有机碳的埋藏特征有别于北冰洋其他海区现有的沉积记录, 在冰期-间冰期旋回中表现出了更加显著的差异性, 冰期的有机碳埋藏速率可以达到间冰期的 10 倍左右. 即使同样是在冰期, MIS4 期的有机碳埋藏速率约是 MIS2 期的 3 倍, 突出了该期北冰洋在全球大洋有机碳埋藏中的特殊性. 除了上部 10 cm, 在冰期-间冰期旋回中有机碳埋藏的主体均是不易降解的陆源有机碳, 海相有机碳受限于初级生产力和降解作用整体上波动幅度很小.

结合楚克奇陆架边缘的地貌特征和沉积环境, 东西伯利亚冰盖的扩张和冰下排水系统的输运很可能是楚克奇陆架边缘轨道尺度上有机碳高速堆积的主要控制因素, 而不是初级生产力、河流流量或海平面升降引起的岸线迁移. MIS4 期, 东西伯利亚冰盖及其扩展冰架覆盖了 M04 孔所在的楚克奇陆架边缘、南门捷列夫洋脊和大部分楚克奇海台, 在阻挡其他海区有机碳输入的同时, 强力的侵蚀作用驱动了陆架沉积物的二次搬运, 并在陆架边缘高速埋藏. MIS2 期, 东西伯利亚冰盖及其扩展冰架显著缩小, 冰盖的侵蚀作用有所减弱, 有机碳埋藏速率随之降低. 总体上, M04 孔的沉积记录为梳理北冰洋有机碳的埋藏特征提供了新的视角, 进一步揭示了高速沉积区有机碳埋藏的驱动机制, 有助于客观评价北冰洋碳埋藏对全球碳封存的推动作用, 但目前仍缺乏北极加拿大一侧长时间序列的沉积记录, 现有的数据仍不足以全面刻画北冰洋碳埋藏与气候转型之间的耦合关系.

致谢: 衷心感谢中国第 5、6 和 7 次北极科学考察 (CHINARE) 全体参航人员在样品采集过程提供的帮助, 同时感谢匿名审稿专家提出的有益建议!

References

- Aller, R. C., Blair, N. E., Brunskill, G. J., 2008. Early Diagenetic Cycling, Incineration, and Burial of Sedimentary Organic Carbon in the Central Gulf of Papua (Papua New Guinea). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F1): F01S09. <https://doi.org/10.1029/2006jf000689>
- Anthony, K. W., Zimov, S. A., Grosse, G., et al., 2014. A Shift of Thermokarst Lakes from Carbon Sources to

- Sinks during the Holocene Epoch. *Nature*, 511(7510): 452–456. <https://doi.org/10.1038/nature13560>
- Arguez, A., Durre, I., Applequist, S., et al., 2012. NOAA's 1981–2010 U.S. Climate Normals: An Overview. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(11): 1687–1697. <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00197.1>
- Astakhov, A. S., Gusev, E. A., Kolesnik, A. N., et al., 2013. Conditions of the Accumulation of Organic Matter and Metals in the Bottom Sediments of the Chukchi Sea. *Russian Geology and Geophysics*, 54(9): 1056–1070. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.019>
- Astakhov, A. S., Sattarova, V. V., Shi, X., et al., 2019. Distribution and Sources of Rare Earth Elements in Sediments of the Chukchi and East Siberian Seas, *Polar Science*, 20(Part2): 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.05.005>
- Bates, N. R., 2006. Air-Sea CO₂ Fluxes and the Continental Shelf Pump of Carbon in the Chukchi Sea Adjacent to the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C10): C10013. <https://doi.org/10.1029/2005jc003083>
- Belicka, L. L., Harvey, H. R., 2009. The Sequestration of Terrestrial Organic Carbon in Arctic Ocean Sediments: A Comparison of Methods and Implications for Regional Carbon Budgets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(20): 6231–6248. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.07.020>
- Bröder, L., Tesi, T., Andersson, A., et al., 2018. Bound-ing Cross - Shelf Transport Time and Degradation in Siberian - Arctic Land - Ocean Carbon Transfer. *Nature Communications*, 9: 806. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03192-1>
- Cartapanis, O., Bianchi, D., Jaccard, S. L., et al., 2016. Global Pulses of Organic Carbon Burial in Deep - Sea Sediments during Glacial Maxima. *Nature Communications*, 7: 10796. <https://doi.org/10.1038/ncomms10796>
- Coffin, R., Smith, J., Yoza, B., et al., 2017. Spatial Variation in Sediment Organic Carbon Distribution across the Alaskan Beaufort Sea Shelf. *Energies*, 10(9): 1265. <https://doi.org/10.3390/en10091265>
- Corlett, W. B., Pickart, R. S., 2017. The Chukchi Slope Current. *Progress in Oceanography*, 153: 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.04.005>
- Cranwell, P. A., Eglinton, G., Robinson, N., 1987. Lipids of Aquatic Organisms as Potential Contributors to Lacustrine Sediments-II. *Organic Geochemistry*, 11(6): 513–527. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(87\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(87)90007-6)
- Danielson, S. L., Eisner, L., Ladd, C., et al., 2017. A Comparison between Late Summer 2012 and 2013 Water Masses, Macronutrients, and Phytoplankton Standing Crops in the Northern Bering and Chukchi Seas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 135: 7–26. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.05.024>
- Darby, D. A., Ortiz, J., Polyak, L., et al., 2009. The Role of Currents and Sea Ice in both Slowly Deposited Central Arctic and Rapidly Deposited Chukchi - Alaskan Margin Sediments. *Global and Planetary Change*, 68(1–2): 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.02.007>
- Ding, J. H., Sun, J. S., Zhang, J. C., et al., 2023. Characteristics and Geological Significance of Biomarker for the Upper Permian Dalong Formation Shale in Southern Anhui Province. *Earth Science*, 48(1): 235–251 (in Chinese with English abstract).
- Gao, C., Yu, X. G., Yang, Y., et al., 2018. Characteristics of Lipid Biomarkers and Their Response to Climate Change in Column Sediments from Bering Sea Shelf. *Earth Science*, 43(11): 4008–4017 (in Chinese with English abstract).
- Goni, M. A., O'Connor, A. E., Kuzyk, Z. Z., et al., 2013. Distribution and Sources of Organic Matter in Surface Marine Sediments across the North American Arctic Margin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(9): 4017–4035. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20286>
- Goni, M. A., Ruttenger, K. C., Eglinton, T. I., 1997. Sources and Contribution of Terrigenous Organic Carbon to Surface Sediments in the Gulf of Mexico. *Nature*, 389(6648): 275–278. <https://doi.org/10.1038/38477>
- Harada, N., 2016. Review: Potential Catastrophic Reduction of Sea Ice in the Western Arctic Ocean: Its Impact on Biogeochemical Cycles and Marine Ecosystems. *Global and Planetary Change*, 136: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.11.005>
- Hill, J. C., Driscoll, N. W., Brigham - Grette, J., et al., 2007. New Evidence for High Discharge to the Chukchi Shelf since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Research*, 68(2): 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2007.04.004>
- Hill, V., Ardyna, M., Lee, S. H., et al., 2018. Decadal Trends in Phytoplankton Production in the Pacific Arctic Region from 1950 to 2012. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 152: 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.12.015>

- Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., et al., 2014. Estimated Stocks of Circumpolar Permafrost Carbon with Quantified Uncertainty Ranges and Identified Data Gaps. *Biogeosciences*, 11(23): 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
- Jakobsson, M., Andreassen, K., Bjarnadóttir, L. R., et al., 2014. Arctic Ocean Glacial History. *Quaternary Science Reviews*, 92: 40–67. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.033>
- Jakobsson, M., Nilsson, J., Anderson, L., et al., 2016. Evidence for an Ice Shelf Covering the Central Arctic Ocean during the Penultimate Glaciation. *Nature Communications*, 7: 10365. <https://doi.org/10.1038/ncomms10365>
- Ji, Z. Q., Jin, H. Y., Stein, R., et al., 2019. Distribution and Sources of Organic Matter in Surface Sediments of the Northern Bering and Chukchi Seas by Using Bulk and Tetraether Proxies. *Journal of Ocean University of China*, 18(3): 563–572. <https://doi.org/10.1007/s11802-019-3869-7>
- Kim, S., Polyak, L., Joe, Y. J., et al., 2021. Seismostratigraphic and Geomorphic Evidence for the Glacial History of the Northwestern Chukchi Margin, Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research (Earth Surface)*, 126(4): e2020JF006030. <https://doi.org/10.1029/2020JF006030>
- Kremer, A., Stein, R., Fahl, K., et al., 2018. Changes in Sea Ice Cover and Ice Sheet Extent at the Yermak Plateau during the Last 160 ka: Reconstructions from Biomarker Records. *Quaternary Science Reviews*, 182: 93–108. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.12.016>
- Li, Z. Y., Zhang, Y. G., Torres, M., et al., 2023. Neogene Burial of Organic Carbon in the Global Ocean. *Nature*, 613(7942): 90–95. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05413-6>
- Löwemark, L., März, C., O' Regan, M., et al., 2014. Arctic Ocean Mn - Stratigraphy: Genesis, Synthesis and Inter-Basin Correlation. *Quaternary Science Reviews*, 92: 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.11.018>
- Martens, J., Wild, B., Muschitiello, F., et al., 2020. Remobilization of Dormant Carbon from Siberian-Arctic Permafrost during Three Past Warming Events. *Science Advances*, 6(42): eabb6546. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb6546>
- Martens, J., Wild, B., Pearce, C., et al., 2019. Remobilization of Old Permafrost Carbon to Chukchi Sea Sediments during the End of the last Deglaciation. *Global Biogeochemical Cycles*, 33(1): 2–14. <https://doi.org/10.1029/2018GB005969>
- Naidu, A. S., Cooper, L. W., Finney, B. P., et al., 2000. Organic Carbon Isotope Ratios ($\delta^{13}\text{C}$) of Arctic Amerasian Continental Shelf Sediments. *International Journal of Earth Sciences*, 89(3): 522–532. <https://doi.org/10.1007/s005310000121>
- Niessen, F., Hong, J. K., Hegewald, A., et al., 2013. Repeated Pleistocene Glaciation of the East Siberian Continental Margin. *Nature Geoscience*, 6: 842–846. <https://doi.org/10.1038/ngeo1904>
- Nürnberg, D., Wollenburg, I., Dethleff, D., et al., 1994. Sediments in Arctic Sea Ice: Implications for Entrainment, Transport and Release. *Marine Geology*, 119(3–4): 185–214. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(94\)90181-3](https://doi.org/10.1016/0025-3227(94)90181-3)
- O' Daly, S. H., Danielson, S. L., Hardy, S. M., et al., 2020. Extraordinary Carbon Fluxes on the Shallow Pacific Arctic Shelf during a Remarkably Warm and Low Sea Ice Period. *Frontiers in Marine Science*, 7: 548931. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.548931>
- Olefeldt, D., Goswami, S., Grosse, G., et al., 2016. Circumpolar Distribution and Carbon Storage of Thermokarst Landscapes. *Nature Communications*, 7: 13043. <https://doi.org/10.1038/ncomms13043>
- Peng, G., Matthews, J. L., Wang, M. Y., et al., 2020. What do Global Climate Models Tell us about Future Arctic Sea Ice Coverage Changes? *Climate*, 8(1): 15. <https://doi.org/10.3390/cli8010015>
- Pirtle-Levy, R., Grebmeier, J. M., Cooper, L. W., et al., 2009. Chlorophyll a in Arctic Sediments Implies Long Persistence of Algal Pigments. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(17): 1326–1338. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.10.022>
- Polyak, L., Bischof, J., Ortiz, J. D., et al., 2009. Late Quaternary Stratigraphy and Sedimentation Patterns in the Western Arctic Ocean. *Global and Planetary Change*, 68(1–2): 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.03.014>
- Schreck, M., Nam, S. I., Polyak, L., et al., 2018. Improved Pleistocene Sediment Stratigraphy and Paleoenvironmental Implications for the Western Arctic Ocean off the East Siberian and Chukchi Margins. *arktos*, 4(1): 1–20. <https://doi.org/10.1007/s41063-018-0057-8>
- Schwab, M. S., Rickli, J. D., MacDonald, R. W., et al., 2021. Detrital Neodymium and (Radio) Carbon as Complementary Sedimentary Bedfellows? The Western Arc-

- tic Ocean as a Testbed. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 315: 101–126. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.08.019>
- Semiletov, I., Pipko, I., Gustafsson, Ö., et al., 2016. Acidification of East Siberian Arctic Shelf Waters through Addition of Freshwater and Terrestrial Carbon. *Nature Geoscience*, 9: 361–365. <https://doi.org/10.1038/ngeo2695>
- Sparkes, R. B., Doğrul Selver, A., Bischoff, J., et al., 2015. GDGT Distributions on the East Siberian Arctic Shelf: Implications for Organic Carbon Export, Burial and Degradation. *Biogeosciences*, 12(12): 3753–3768. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3753-2015>
- Spratt, R. M., Lisiecki, L. E., 2016. A Late Pleistocene Sea Level Stack. *Climate of the Past*, 12(4): 1079–1092. <https://doi.org/10.5194/cp-12-1079-2016>
- Stein, R., Boucein, B., Fahl, K., et al., 2001. Accumulation of Particulate Organic Carbon at the Eurasian Continental Margin during Late Quaternary Times: Controlling Mechanisms and Paleoenvironmental Significance. *Global and Planetary Change*, 31(1–4): 87–104. [https://doi.org/10.1016/s0921-8181\(01\)00114-x](https://doi.org/10.1016/s0921-8181(01)00114-x)
- Stein, R., Fahl, K., Gierz, P., et al., 2017. Arctic Ocean Sea Ice Cover during the Penultimate Glacial and the last Interglacial. *Nature Communications*, 8: 373. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00552-1>
- Stein, R., Macdonald, R. W., 2004. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Springer Verlag, Berlin.
- Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., et al., 2011. Descriptive Physical Oceanography: An introduction. Academic Press, New York.
- Viscosi - Shirley, C., Mammone, K., Piasias, N., et al., 2003. Clay Mineralogy and Multi-Element Chemistry of Surface Sediments on the Siberian-Arctic Shelf: Implications for Sediment Provenance and Grain Size Sorting. *Continental Shelf Research*, 23(11–13): 1175–1200. [https://doi.org/10.1016/s0278-4343\(03\)00091-8](https://doi.org/10.1016/s0278-4343(03)00091-8)
- Vonk, J. E., Sánchez-García, L., Semiletov, I., et al., 2010. Molecular and Radiocarbon Constraints on Sources and Degradation of Terrestrial Organic Carbon along the Kolyma Paleoriver Transect, East Siberian Sea. *Biogeosciences*, 7(10): 3153–3166. <https://doi.org/10.5194/bg-7-3153-2010>
- Xiang, Y., Lam, P. J., 2020. Size-Fractionated Compositions of Marine Suspended Particles in the Western Arctic Ocean: Lateral and Vertical Sources. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(8): e2020JC016144. <https://doi.org/10.1029/2020jc016144>
- Yamamoto, M., Okino, T., Sugisaki, S., et al., 2008. Late Pleistocene Changes in Terrestrial Biomarkers in Sediments from the Central Arctic Ocean. *Organic Geochemistry*, 39(6): 754–763. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.04.009>
- Ye, L. M., Yu, X. G., Xu, D., et al., 2022. Late Pleistocene Laurentide - Source Iceberg Outbursts in the Western Arctic Ocean. *Quaternary Science Reviews*, 297: 107836. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107836>
- Ye, L. M., Yu, X. G., Zhang, W. Y., et al., 2020. Ice Sheet Controls on Fine-Grained Deposition at the Southern Mendeleev Ridge since the Penultimate Interglacial. *Acta Oceanologica Sinica*, 39(9): 86–95. <https://doi.org/10.1007/s13131-020-1649-2>
- Yu, X. G., Bian, Y. P., Ruan, X. Y., et al., 2015. Glycerol Dialkyl Glyceroltetraethers and TEX₈₆ Index in Surface Sediments of the Arctic Ocean and the Bering Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35(3): 11–22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Pei, H. Y., Zhao, S. J., et al., 2020. The Impact of Degradation on the Tetraether-Based Proxies during the Sample Storage. *Earth Science*, 45(1): 317–329 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 丁江辉, 孙金声, 张金川, 等, 2023. 皖南地区大隆组页岩生物标志化合物特征及其地质意义. *地球科学*, 48(1): 235–251.
- 高超, 于晓果, 杨义, 等, 2018. 白令海陆架区柱样沉积物脂类分子特征及其气候变化响应. *地球科学*, 43(11): 4008–4017.
- 于晓果, 边叶萍, 阮小燕, 等, 2015. 北冰洋沉积物中四醚脂类来源与 TEX₈₆ 指数初步研究. *海洋地质与第四纪地质*, 35(3): 11–22.
- 张佳皓, 裴宏业, 赵世锦, 等, 2020. 样品保存过程中降解对 GDGTs 环境代用指标的影响. *地球科学*, 45(1): 317–329.