

末次冰消期以来北极东北陆架 对快速气候变化的响应

石学法^{1,2}, 董江¹, 胡利民^{2,3}, 冯晗¹, 姚政权^{1,2}, 乔淑卿^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061;
3. 中国海洋大学 海洋地球科学学院海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 北极快速气候变化越来越深刻影响着北极地区以及全球的环境变化, 已成为当今地球科学研究的重大前沿科学问题。北极东北陆架作为世界上最宽广平坦的陆架, 既是北冰洋季节性海冰形成的主要源区, 又是现代海冰变化最强烈的区域, 对气候变化敏感, 响应强烈, 属于环境脆弱地区。通过全面分析近年来国际上在末次冰消期以来快速气候变化背景下北极东北陆架环境响应的研究进展和存在的主要问题, 阐述了沉积物“源—汇”过程、海冰演化历史、碳循环以及快速气候变化事件等方面取得的研究成果, 发现东北陆架地区沉积物和有机碳来源复杂, 时空变化强烈, 气候和环境变化过程与海冰演化息息相关。未来的研究应加强现代过程的长期连续观测, 重视地质记录中气候环境演变信号的精确解译, 深化数值模拟技术和大数据的挖掘与使用, 开展不同时间尺度北极快速气候变化及其驱动机制研究, 并加强北极快速气候变化对中纬度地区特别是对东亚以及我国环境变化影响的研究。

关键词: 快速气候变化; 海冰变化; “源—汇”过程; 碳循环; 末次冰消期; 北极东北陆架

中图分类号: P736.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)04-0640-20

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220603001

引用格式: 石学法, 董江, 胡利民, 等. 末次冰消期以来北极东北陆架对快速气候变化的响应[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4): 640-659. SHI X F, DONG J, HU L M, et al. Response of the northeastern Arctic Shelf to rapid climate changes since the Last Deglaciation[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(4): 640-659.

北冰洋常年被海冰覆盖且连通“三大洲”和“两大洋”, 是全球冷热循环中的重要冷源。北冰洋不仅对气候变化响应非常敏感, 还通过影响大西洋经向环流和热输运而成为全球气候变化的放大器和驱动器^[1-2]。作为近百年来全球增暖最显著的区域, 北极正以 2 倍于全球平均速率的速度快速升温, 经历着快速的气候变化^[3-6]。近几十年来, 北冰洋夏季海冰覆盖面积急剧下降, 影响着海气之间的热量交换, 并导致周边陆地植被群落结构发生显著变化, 同时还伴随着出现了海底甲烷释放、淡水输入增加、盐度下降和海洋酸化加剧等现象^[7-12]。北冰洋海冰的快速减少降低了地表反照率, 增加了太阳辐射吸收, 显著提高了初级生产力, 这与陆地升温、冻土退化及植被的改变密切相关^[13]; 另一方面, 植被的群落结构变化及其对地表辐射平衡的改变也对气候变化有直接的贡献, 并影响着北极地区生物地球化学过程^[11,14-15]。近年来的研究表明, 与北极地区植被吸收的碳相比, 目前每年北极地区向地球大气中释放出更多的碳。例如, 2003—2017 年, 北极多年冻土地区释放出约 17 亿 t 的碳, 而同期全球植被平均吸收了 10 亿 t 碳^[16]。这些变化将加剧高纬气候

收稿日期: 2022-06-03

资助项目: 国家自然科学基金项目——末次冰消期以来北极东西伯利亚陆架对快速气候变化的响应(42130412)和全新世北极东西伯利亚海冰演化及其控制机制的研究(42006199); 山东省自然科学基金项目——全新世北极东西伯利亚海季节性海冰演化历史半定量/定量重建的研究(ZR2020QD110); 山东省泰山学者攀登计划项目(20181216)

作者简介: 石学法(1965—), 男, 研究员, 博士, 博导, 主要从事海洋沉积和海底成矿作用方面研究. E-mail: xfshi@fio.org.cn

(高峻 编辑)

的放大效应, 对全球气候变暖具有正反馈^[15,17-18]。此外, 在全球变暖背景下北极快速变化所引起的一系列大气、冰雪、海洋、陆地等多圈层相互作用的改变, 对北极地区环境以及包括我国在内的中高纬度地区的气候环境有直接的影响。如北极地区春季海冰面积的变化与中国东部和南方地区的异常天气联系密切^[19], 而北极地区变暖也可能是导致中国冬季雾霾频发的重要原因之一^[20]。

北极快速气候变化及其环境效应已经成为当前地球科学研究的前沿和热点问题^[21-22]。不过, 受限于对海冰、海流、温度、入海径流、有机碳等要素直接观测资料的时间尺度, 人们难于从仅有的短短几十年的器测资料中深入认识北极地区快速变化的过程、机理及环境效应, 从而限制了对北极地区快速变化机制的认知及对未来发展趋势的预测。因而从更长时间尺度上开展研究, 特别是将不同时间尺度的沉积记录与数值模拟相结合, 才有可能深入认识北极地区快速气候变化的归因和驱动机制。

北冰洋最显著的地质特征是发育有世界上最宽广平坦的浅水陆架, 约占世界陆架面积的 25%, 约占整个北冰洋面积的 40%^[23]。北极陆架主要分布在北冰洋东部区域($0^{\circ}\sim 180^{\circ}$, 水深 $<100\text{ m}$), 简称“东北陆架”(图 1), 是现今北冰洋海冰变化最明显的区域^[24-26]。而且北极东北陆架还是“冰上丝绸之路”航道的核心区域, 对于未来国际航运和海上贸易具有重要的意义。末次冰消期以来, 伴随着海平面的快速上升, 冰期时暴露出的大陆架被快速淹没^[27-28], 经历了自末次盛冰期以来的最大波动, 沉积环境、物质供给量及其“源—汇”格局、冰盖、海洋环流、海冰和碳循环等都发生了很大变化^[29-31]。随着陆架被淹没, 海洋环流和海冰逐渐成为沉积作用及生物地球化学过程的重要控制因素^[32], 但不同时期、不同地区海冰的演化并不一致^[33,34-36]。另一方面, 太平洋入流水和多条世界性大河向该区输入了大量的淡水和沉积物, 使其陆海相互作用强烈, 沉积速率相对较高^[32,37]。由于北极东北陆架联通陆地—河流—海洋—海冰等关键过程, 其沉积对气候演变的记录能够在百年—千年尺度甚至更长时间尺度上捕捉到现代气候的发展轨迹和特点, 成为过去气候环境变化的敏感“记录者”, 因而成为北极地区古气候古环境变化研究的最优势地区之一^[29]。近几十年以来, 国际上对该区域进行了多次科学考察和研究工作, 取得了阶段性的研究进展。

从长时间尺度来看, 综合大洋钻探计划(International Ocean Discovery Program, IODP)302 航次在罗蒙诺索夫海岭获取的钻孔岩芯沉积记录表明, 始新世北冰洋的海表温度峰值约为 26.5°C , 远高于现今北冰洋夏季海表温度, 之后海表温度呈现出阶梯式下降的趋势^[38]。从百年—千年时间尺度来看, 末次冰消期以来在全球整体变暖背景下, 不同地区的气候都表现出快速变化的显著特征, 如温度回升不稳定、呈波动式变化^[39], 主要表现为经历了一系列百年—千年尺度的气候快速变化事件。在北极地区, 全新世大暖期时北极陆架海冰覆盖呈现千年尺度的相对低值^[33,40-42], 尽管变暖的驱动机制可能不同, 但这种地质历史暖期的海冰衰退与当前气候变暖情景下北极地区快速变化的情景具有一定相似性。现代观测资料还表明, 受辐射强迫变化的影响, 近百年来北极地区夏季海冰的减退与区域温度上升及植被变化存在密切的关系^[43]。这说明从末次冰消期以来, 北冰洋一直存在着快速气候变化的情况, 并且气候变化的非线性和快速变化表现得尤为明显^[44-45], 相关机制的解析和对比研究可为解释不同气候背景下的北极地区快速变化提供依据, 并可增强对北冰洋现代海冰快速融化及环境变化原因机制的认知, 同时为预测北极地区气候快速变化的发展趋势及评估全球气候变化提供宏观背景。

迄今为止, 虽然国内外科学界十分重视北极地区气候环境快速变化的研究, 但现有研究主要集中在北冰洋的深水大洋区及基于年际/年代际的现有观测资料, 而对于地位极其重要、快速变化极其显著、沉积记录发育良好的具有宽广面积的北极东北陆架的研究则相对薄弱, 我国组织的历次北极科学考察也几乎未涉及这一区域。我们通过聚焦北极东北陆架的研究成果, 旨在总结北极地区末次冰消期以来快速气候变化背景下陆架环境变化研究进展, 阐述沉积物“源—汇”过程、海冰变化、碳循环和快速气候变化事件等方面的研究成果, 并指出了目前研究中存在的若干问题, 展望了未来的研究方向, 以深化对北极气候和环境演化过程及其机制的研究, 为评估和预测变暖背景下的北极气候环境演化格局提供依据。

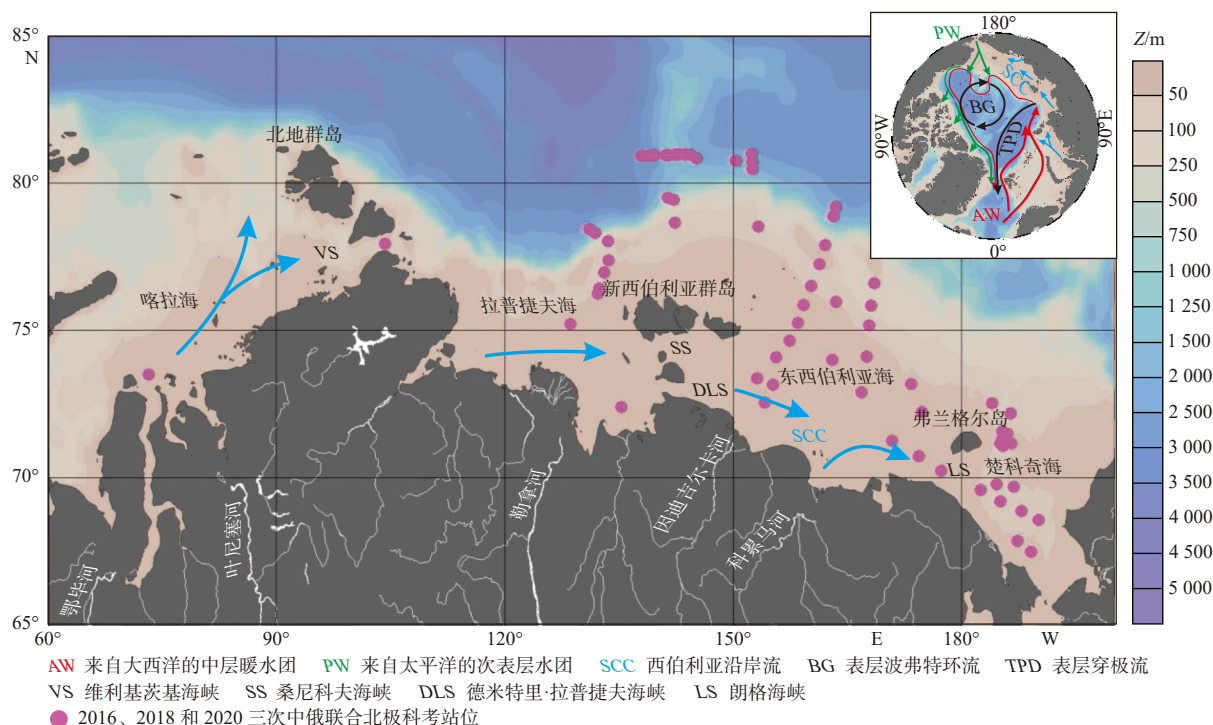


图 1 北极东北陆架区域地理概况图(海流流向修改自文献[46-47])

Fig. 1 Map showing location of the northeastern Arctic Shelf (the currents are modified by references [46-47])

1 北极东北陆架概况

北极陆架总面积约 $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ [23]。分布在北冰洋东部的喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海和楚科奇海的浅水区域(水深 $\leq 100 \text{ m}$) (图 1), 被称为北极东北陆架。在每年的 10 月到次年 6 月, 北极东北陆架完全被海冰覆盖, 是冬季北冰洋海冰的重要补给源区 [29,48-49], 其河流径流输入量几乎为零 [50-51]; 在其他月份, 河流径流量明显增加 [52], 海冰范围明显减少。特别是近十几年来, 受人类活动影响, 9 月该陆架区域几乎无冰, 是现代北冰洋海冰变化最显著的区域之一 [25]。

喀拉海与拉普捷夫海通过北地群岛南部狭窄的维利基茨基海峡(宽度约 50 km , 水深约 200 m) 相连通。喀拉海的平均水深约 110 m , 面积约为 $9.26 \times 10^5 \text{ km}^2$, 其中陆架区域面积约为 $7.7 \times 10^5 \text{ km}^2$, 宽度约为 350 km , 坡度约为 0.0003° (图 1)。喀拉海水团主要受到来自大西洋的中层暖水团(AW)、西伯利亚沿岸流(SCC)和河流径流量的影响 [46,50]。其中, 喀拉海的淡水主要来源于叶尼塞(Yenisey)河和鄂毕(Ob)河输入, 其径流量分别为 $620 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $390 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (表 1)。喀拉海陆架区域表层沉积物类型空间分布不均匀, 总体表现为由岸向海沉积物粒度增大: 叶尼塞河和鄂毕河下游区域沉积物类型以黏土质粉砂为主; 近岸区域沉积物以细粒级的粉砂质黏土和黏土质粉砂为主, 砂含量较高的区域局限在叶尼塞河河口的东北部区域; 在该陆架中部和外部, 沉积物中砂粒级组分含量明显增加, 主要沉积物类型为粉砂质砂和少量的粉砂质黏土 [31]。在喀拉海, 黏土矿物、沉积物磁学性质、有机地球化学和微体古生物等多种指标表明, 河流入海物质主要沉积在河口和三角洲区域, 并在西伯利亚沿岸流的携带下向东北方向输运, 是喀拉海内陆架细粒级沉积物的主要物质来源, 而外陆架沉积物物质多为晚更新世低海平面时期的残留沉积 [31]。

拉普捷夫海位于北地群岛和新西伯利亚群岛之间, 面积约为 $4.98 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1), 被称为北冰洋的“冰工厂” [29]。拉普捷夫海陆架区域面积约为 $4.4 \times 10^5 \text{ km}^2$, 宽度为 $350 \sim 400 \text{ km}$, 其中大部分区域水深 $< 50 \text{ m}$, 在水深 100 m 左右发育陆架坡折。拉普捷夫海冬季海冰发育, 而夏季水动力特征主要受到勒拿(Lena)河径

流量 ($520 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) 的影响, 其温盐混合层厚度为 $5 \sim 10 \text{ m}$, 而潮汐作用极弱, 一般流速 $< 3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 未观测到潮汐作用显著影响该区域海流变化的现象^[23,50]。拉普捷夫海西侧表层沉积物主要来源于西伯利亚沿岸玄武岩风化侵蚀物质和少量河流物质供给, 东侧沉积物主要来自勒拿河等河流物质供给, 多数物质在西伯利亚沿岸流作用下被向东搬运, 少量物质被向北或向西北方向搬运至中外部陆架区域^[53-55]。

表 1 注入北极东北陆架的代表性河流^[50]

Table 1 Typical rivers discharged into the northeastern Arctic shelf^[50]

河 流	流域面积/ 10^3 km^2	全长/km	落差/m	入海口	径流量 /($\text{km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	输沙量/($\text{Mt} \cdot \text{a}^{-1}$)
科累马河	660	2 100	2 600	东西伯利亚海	120	10
因迪吉尔卡河	360	2 000	$< 2 000$	东西伯利亚海	55	11
勒拿河	2 500	4 400	2 500	拉普捷夫海	520	20
叶尼塞河	2 600	4 100	3 500	喀拉海	620	$4.1 (13.0)^*$
鄂毕河	3 000	5 400	3 700	喀拉海	390	16

注: *表示河流上游建造水坝之后的输沙量是 $4.1 \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$, 建造前的输沙量是 $13.0 \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

东西伯利亚海西起新西伯利亚群岛, 向东至弗兰格尔岛, 面积约为 $9.87 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1)。东西伯利亚海陆架区域面积约为 $8.2 \times 10^5 \text{ km}^2$, 宽度为 $480 \sim 850 \text{ km}$, 在水深 100 m 左右发育陆架坡折^[23]。东西伯利亚海陆架西部 (160°E 以西) 水体环境受到河流径流输入和拉普捷夫海水团的直接影响^[23,50,56]。注入东西伯利亚海陆架西部的代表性河流为科累马 (Kolyma) 河和因迪吉尔卡 (Indigirka) 河, 其年平均径流量分别为 120 km^3 和 55 km^3 (表 1)。东西伯利亚海陆架东部 (160°E 以东) 受到太平洋流入水团的显著影响^[46,56]。近岸区域的水体环境还受到寒冷、低盐度和流速流向多变的东向西伯利亚沿岸流的影响^[57]。东西伯利亚海陆架西侧沉积物主要来源于沿岸基岩侵蚀风化和因迪吉尔卡河及勒拿河等河流物质输入^[37]。而在东西伯利亚海陆架东侧和楚科奇海陆架, 表层沉积物主要来源于河流物质供给和太平洋流入水团携带的亚北极地区河流物质的影响^[33,58-59]。楚科奇海位于弗兰格尔岛、阿拉斯加半岛和白令海峡之间, 面积约为 $5.82 \times 10^5 \text{ km}^2$, 平均水深约 77 m (图 1)。楚科奇海陆架水团主要受到太平洋流入水的显著影响^[60-61]。

不同于喀拉海陆架表层沉积物空间分布, 宽广平坦的东西伯利亚海陆架、拉普捷夫海陆架和楚科奇海陆架区域表层沉积物总体表现为由岸向海沉积物粒度变小: 近岸河口以粉砂和砂质粉砂为主, 中外陆架以粉砂和黏土为主^[62-63]。

2 北极东北陆架气候环境快速变化的沉积记录

现代全球变化的一个显著特征是北冰洋正在快速升温, 并由此引发北冰洋环境的快速变化。主要表现在如下 3 个方面: ①陆架沉积物来源、输运和沉积等过程发生明显变化, 河流输入物质增加, 沿岸冻土侵蚀加剧, 海洋环流方向和强度变化频繁^[47,52,63-65]; ②季节性海冰变化明显增强, 夏秋季海冰大范围消融, 冬季海冰变薄, 导致北半球暴风雪等异常气候事件发生频率显著增加^[25,66-67]; ③海冰的快速减退伴随着海底冻土快速融化和甲烷大量释放^[17,68-69]、初级生产力提高和有机质输入及埋藏效率等发生明显的变化^[13,70-71]。这些都改变了地球表层各圈层之间相互作用的进程^[15,72-73]。

2.1 末次冰消期以来沉积环境变化

北极东北陆架对气候变化有敏感响应记录^[29]。该区 80% 以上的海底区域发育冻土, 是对气候变化反应敏感和环境脆弱的地区^[56,74]。陆架是河流输入物质重要的“沉积汇”^[75], 其沉积作用受到河流沉积物供应、海洋环流、波浪、潮汐和区域地貌形态 (如大陆架的宽度) 等的影响^[76-78]。北极东北陆架区域具有相似的共

性,例如都属于宽广平坦的陆架,发育季节性海冰(冬季海冰覆盖而短暂的夏季几乎无冰),夏季波浪潮汐作用弱,沿岸流变化频繁,每年接收大量河流注入的淡水和陆源碎屑物质^[23,25,46,50,52]。在全球变暖背景下,北冰洋接收了大量的沿岸侵蚀物质,其沿岸侵蚀速率最大可达 $10 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,快速的基岩侵蚀向陆架海贡献了大量冰期时形成的冻土老碳^[65,71]。沿岸基岩侵蚀主要受控于热侵蚀和热风化过程,与河流输入热量直接相关,而与海冰发育呈负相关^[79-80],因此现代北极东北陆架沉积作用主要受物源供给和与海冰过程相关的动力环境的综合影响(图2)。拉普捷夫海受河流输入的影响较大,是北冰洋的“海冰工厂”,陆海相互作用非常强烈^[81-82]。东西伯利亚海是北冰洋最为宽浅的陆架,覆盖大面积的永久冻土,其西部受河流影响明显,东部受太平洋入流水影响显著^[33],是北冰洋季节性海冰变化最强烈的区域之一。楚科奇海是北冰洋最大的陆架边缘海之一,被季节性海冰覆盖,同时受太平洋和大西洋水团、北极冰盖以及陆地河流的影响,在北极地区气候变化中扮演着重要的角色,是气候变化研究的重要海域^[83]。

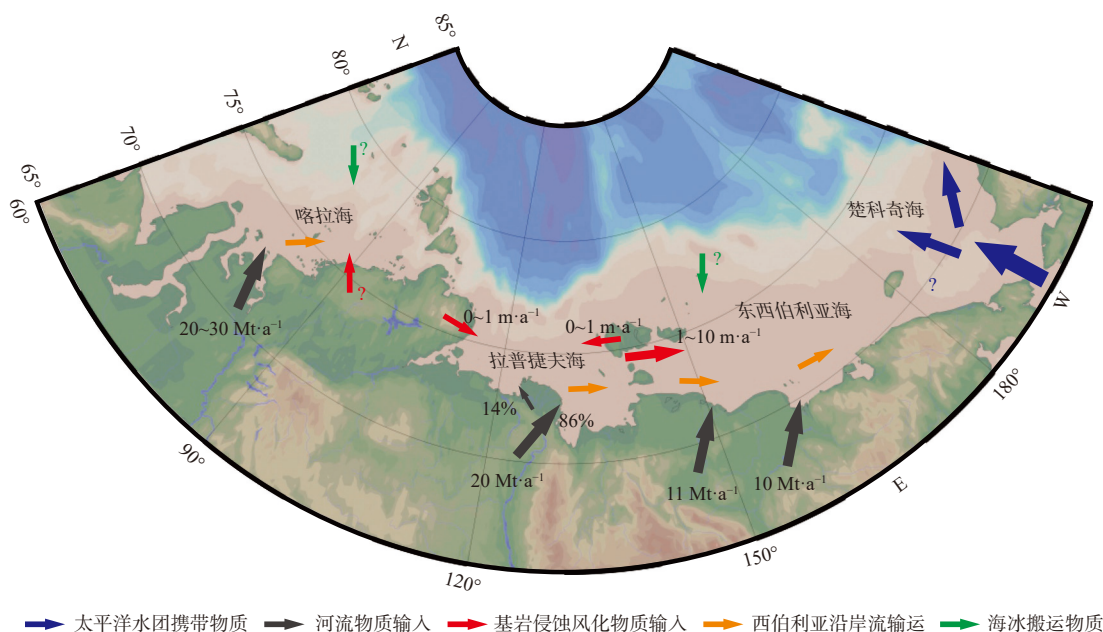


图2 北极东北陆架表层沉积物供给及输运示意图

(河流输沙量数据来自文献^[50,64],沿岸基岩侵蚀风化速率数据来自文献^[65],“?”代表未知的输运速率)

Fig. 2 Schematic diagram of the surface sediment supply and transport on the northeastern Arctic shelf (the data on river sediment flux are from references ^[50,64], the data on coastal erosion rate are from reference ^[65], the “?” indicates unknown transport rate)

末次冰消期以来,在大气 CO_2 含量迅速回升、气候整体变暖的背景下,北半球高纬地区冰盖在全新世中期达到现代水平,伴随着海平面上升约 120 m,冰期时暴露出的大陆架重新被快速淹没^[84-85]。这期间北极东北陆架环境经历了自末次盛冰期(Last Glacial Maximum, LGM)以来的最大波动,沉积环境、物质“源—汇”格局、冰盖、海洋环流、海冰和碳循环等都发生了较大变化^[28,30]。在 $18.0 \sim 14.7 \text{ ka}$,较低的海平面使得裸露的陆架主要被东西伯利亚河流的古河道覆盖,但此时河流入海流量较少^[42];在 Bølling/Allerød 暖期($14.7 \sim 12.9 \text{ ka}$),降水的增多使得河流入海流量增大,新仙女木早期($12.9 \sim 11.7 \text{ ka}$)发生了一次大规模淡水注入事件^[86],这可能与勒拿河上游冰川堰塞湖的崩溃有关^[87],大量的河流入海物质在低海平面条件下沉积在中外陆架区域;在早中全新世($11.7 \sim 8.0 \text{ ka}$),随着海平面的升高,沿岸流侵蚀加剧,使得陆架的沉积速率较高^[32],而此时河流入海流量却呈现较低水平^[86];在中全新世以来海平面相对稳定时期($8.0 \sim 0 \text{ ka}$),受到海冰发育状况、沿岸流和河流入海物质供给量的调控,陆源碎屑物质主要沉积在河口及其邻近陆架区域^[29,31,42,88]。总体而言,从末次冰消期向全新世过渡期间,该区沉积环境经历了由河流输入和海平面控制向

全新世海冰过程和水团作用控制的转变。随着陆架被淹没, 海洋环流和海冰逐渐成为沉积作用及生物地球化学过程的控制因素^[32,89-90]。

末次冰消期以来是东北陆架沉积的关键时期, 海面上升过程中的海岸侵蚀、陆源河流的输入和太平洋水团的侵入对陆架沉积物“源—汇”格局具有重要影响^[31-32,37]。13.0~11.0 ka, 喀拉海水团通过淹没的维利基茨基海峡将高含量蒙皂石和辉石的物质输送至拉普捷夫海西部, 而东拉普捷夫海在全新世才出现蒙皂石和辉石含量增多的趋势, 这可能与全新世拉普捷夫海入海河流流量增多和海平面上升导致的海岸侵蚀加剧有关^[91]。在大约 11.0 ka, 海平面为目前 -60 m 左右, 楚科奇海沉积物地球化学和矿物学物源示踪研究表明, 太平洋水开始穿过白令海峡并对东西伯利亚陆架产生重要影响^[28,92]。然而早全新世(11.0~8.0 ka)来自白令海的贡献相比波弗特环流携带的北美物质偏少^[93], 直至中全新世(7.2~2.0 ka)白令海物质开始在楚科奇海陆架沉积物中占主导地位^[33,94-95]。以上这些复杂因素共同导致了陆架沉积速率呈现显著的时空差异。地震剖面和多根岩芯的沉积学研究表明, 全新世喀拉海年平均沉积通量约为 $1.94 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中大约有 $1.2 \times 10^7 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 的河流入海物质在陆架沉积, 使其沉积速率高达 $50 \sim 100 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$ ^[31-32]。拉普捷夫海年平均沉积通量约为 $0.67 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 西侧由于相对缺少河流物质供给, 全新世沉积速率极低($< 10 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$); 在河流入海物质的影响下, 陆架东侧全新世沉积速率可达约 $50 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$ ^[32]。东西伯利亚海年平均沉积通量约为 $1.09 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 另外基于 2016—2020 年中俄北极联合科学考察航次所获取的岩芯分析结果, 全新世东西伯利亚海陆架沉积速率约为 $50 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (图 3), 与多根短柱状岩芯²¹⁰Pb 测年结果^[70-71]基本一致, 表明全新世北极东北陆架沉积格局的空间差异性受水动力环境的影响较小, 而可能主要受到陆源物质供给量的影响。在楚科奇海陆架, 年平均沉积通量约为 $0.19 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 全新世沉积速率明显升高($70 \sim 90 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$, 图 3), 这与已有的研究结果^[33,94]一致。截至目前, 对东北陆架的沉积物“源—汇”过程研究主要局限于拉普捷夫海和楚科奇海, 且存在物源指标单一, 缺乏内陆架物源记录等问题。因此, 今后需利用多指标手段针对东北陆架空间上更多的沉积岩芯开展沉积物“源—汇”过程研究。

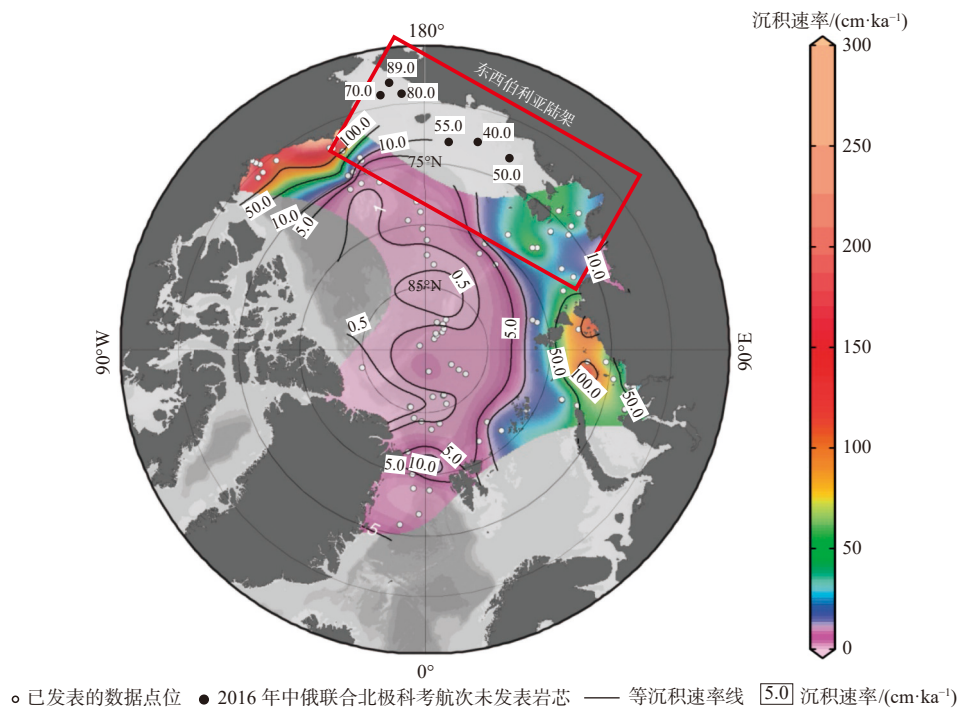


图 3 全新世北冰洋沉积速率分布(修改自文献^[32])

Fig. 3 Holocene distribution of sedimentation rate in the Arctic Ocean (modified from reference^[32])

2.2 不同时间尺度海冰演化历史重建

海冰覆盖是北冰洋及其邻近陆架海域表层最显著的特征。北极东北陆架作为连接太平洋和北冰洋的主要区域,季节性海冰覆盖程度高且季节间海冰边缘迁移距离较远^[25-26,66]。该区近 10 a 来海冰消退面积要远远高于北冰洋其他地区^[96]。东北陆架不仅是西伯利亚陆源物质的主要沉积区,同时也是现代气候条件下北冰洋海冰重要的生成地和输送源区,并与背景气候紧密相关^[48],该区域对快速气候变化具有高敏感度的响应^[29]。目前对现代海冰的定量评估多基于卫星遥感、船基观测和固定站位的现场观测数据和资料^[6,97]。基于观测资料、数值模拟和理论研究,发现近百年来北冰洋及其邻近区域海冰演变的影响因素主要包括冰雪反射率、植被、河流流域降水及其入海淡水通量、温盐环流强度、大气温室气体浓度及其环流模式等^[4,33,98]。然而,近百年来全球变化受到人类活动的显著影响,利用有限的观测数据很难进一步探讨千年及更长时间尺度北冰洋海冰演化的控制机制,也无法区分自然因素和人为因素对海冰发育的影响^[25]。因此,重建地质历史时期北冰洋及其邻近区域海冰的演化历史可为预测和评估北极地区气候环境变化提供更全面的科学依据^[99]。

重建海冰演化历史的方法主要分海冰指标示踪^[100]和数值模拟两大类方法^[41],其中海冰示踪指标主要包括碎屑矿物等无机指标^[35,101-102]、IP₂₅(C₂₅型高支链类异戊二烯烃)等有机地球化学指标^[103-105]、沟鞭藻囊孢与有孔虫生物壳体等古海洋指标^[34,106]和海岸浮木^[107]以及植被等陆地和冰心记录等间接指标^[35]。目前对全新世特定时期(如 6.0 ka)北冰洋季节性海冰的数值模拟已比较成熟^[41],然而在不同因子胁迫下,数值模拟结果展示出不同的海冰演化趋势^[4,108]。因此全新世北冰洋海冰长期且连续的瞬态模型模拟需要地质记录的校正,即海冰示踪是研究末次冰消期以来北冰洋海冰演化的关键指标。另外,重建末次冰消期以来海冰演化历史所需岩芯样品位置的选取也至关重要。北冰洋东部外陆架岩芯末次冰消期的沉积速率较高,而其全新世时期沉积速率较低^[42,88],导致该陆架区域重建全新世百年—千年时间尺度海冰演化历史的工作进展相对困难^[32]。虽然北极东北内陆架全新世沉积速率较高,但岩芯沉积物受到河流冲淡水的显著影响,表现为生物生产力极低且淡水属种众多,导致与海冰相关的硅藻和介形虫含量极少,几乎不含有孔虫^[100,109-110]。考虑到单一指标的受控因素较多,无法精准和全面反映北冰洋海冰演化,因此北极东北陆架多时空尺度和多指标的综合分析是重建末次冰消期以来海冰演化的必要条件。

北极东北陆架是北冰洋季节性海冰的最主要形成源地之一^[48,81-82]。近年来,许多学者利用多种沉积记录重建了末次冰消期以来北极东北陆架及其邻近区域海冰演化历史,但研究程度存在明显的时空的不均衡(图 4)。末次冰消期(18.0~8.0 ka),北极东北陆架及其邻近区域海冰演化历史以海冰快速变化为特征。拉普捷夫海 IP₂₅和浮游植物生物标志物数据表明,17.2~15.5 ka 拉普捷夫海被永久性海冰覆盖,而末次冰消期季节性海冰在 Bolling/Allerød 暖期(14.5~13.0 ka)出现最小值,在 Younger Dryas 时期(12.9~11.6 ka)出现最大值,在 11.6~8.0 ka 时期,海冰呈现上升趋势^[42,88]。虽然 Younger Dryas 时期高海冰覆盖也在喀拉海陆架有机地球化学记录中被发现,但是在早全新世(10.0~8.0 ka)时期出现海冰覆盖的低值^[111]。相对于末次冰消期,中全新世以来海平面相对稳定时期北极东北陆架海冰演化的研究相对较多,主要集中在楚科奇海及其邻近海域,但根据不同指标重建的全新世海冰演化趋势的结果相差较大(图 4)。例如,楚科奇海岩芯沉积物中沟鞭藻囊孢和有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[36]及其西北部陆坡岩芯沉积物中的 IP₂₅等指标^[112]均表明,受北大西洋中层水等海洋环流的影响,研究区海冰在早中全新世非常发育,而在晚全新世海冰密集度明显降低。这一演化趋势与格陵兰岛附近海域海冰演化趋势^[107,113-114]呈现出此消彼长的“跷跷板”演化模式,表明全新世东西北冰洋海冰演化的驱动因素很可能不一致。然而,与之相反的早全新世以来由弱到强的海冰演化趋势在喀拉海陆架^[111]、拉普捷夫海陆坡(全新世沉积记录受到沉积间断的影响)^[42,88]和楚科奇海及其邻近海域^[33,115]岩芯的有机地球化学沉积记录中否定了北冰洋东西两侧全新世海冰呈现“跷跷板”演化模式的假设。喀拉海内陆架岩芯有机地球化学数据表明,全新世海冰演化总体呈现高(8.0~4.5 ka)—低(4.5~3.0 ka)—高(3.0~0 ka)的演化模式,并呈现出 450 a 和 950 a 的短周期性快速波动,响应频繁变化的北极地区或北大西洋气候振荡^[116]。

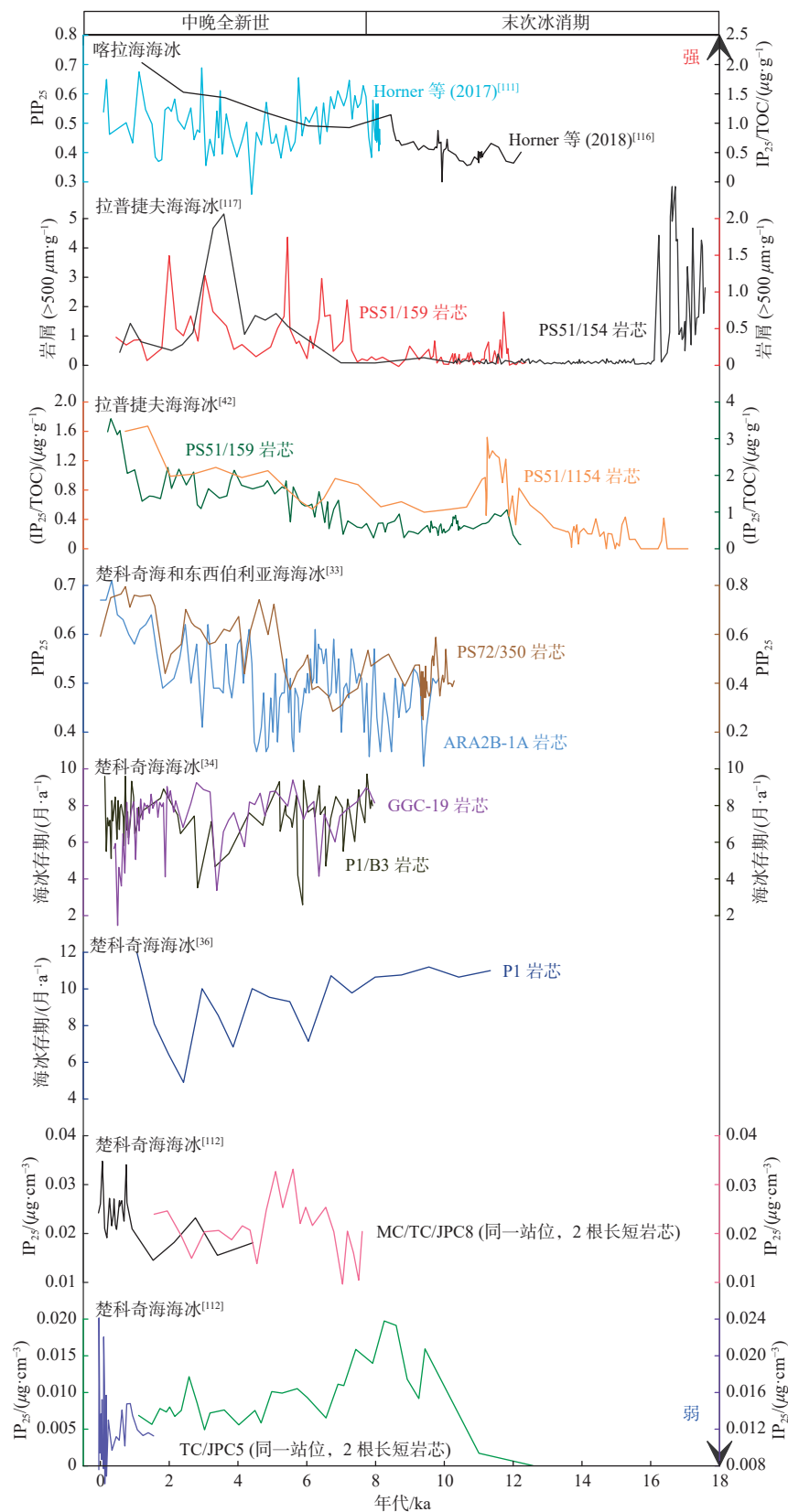


图 4 末次冰消期以来北极东北陆架及其邻近区域海冰演化历史

Fig. 4 Sea ice evolution in the northeastern Arctic shelf and the adjacent regions since the last deglaciation

此外, 根据拉普捷夫海西部岩芯沉积物中的冰筏碎屑记录^[117]、楚科奇海北部岩芯沉积物中有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 数据、介形虫 Mg/Ca 比值以及甲藻囊泡等替代指标定量重建的 8.0 ka 以来海冰和底层海水温度的结果^[34], 发现海冰呈现百年—千年时间尺度上频繁的震荡而未发现明显轨道时间尺度上的变化, 这可能与北大西洋暖水团的温度和强度有密切关系。对于上述海冰演化历史研究结果存在的不确定性, 需要对更多沉积连续且空间分布广泛的岩芯沉积记录进行综合研究, 并结合数值模拟以探讨末次冰消期以来北冰洋东部海冰是区域性还是更广泛的系统性演化, 以此来揭示其主控因素。这对于认识过去和未来不同气候背景下北极地区气候演变和海冰变化具有重要意义^[118]。例如, 基于“海洋-海冰”耦合数值模式, Dyck 等研究了早全新世海洋和大气相互作用过程对海冰变化的影响, 发现在距今 8 ka 左右, 东西伯利亚海和拉普捷夫海海冰厚度小于现在的状态, 但在波弗特海和加拿大北极群岛的海冰厚度则变化不大, 这说明海冰过程主要跟大气驱动有关^[41]。

2.3 碳循环对快速气候变化的响应

作为占世界陆架面积 25% 的全球最大的陆架, 北极陆架虽然面积只占海洋的 2.5%, 但其沉积有机碳埋藏量却约占全球海洋的 11%^[119]。不同于中低纬度大河三角洲及其毗邻陆架, 北极陆架周边不仅有世界级大河的输入, 而且还发育有广袤的冻土层和季节性的海冰, 使得其沉积有机碳源—汇过程独具特色^[120](图 5), 主要表现: ①海洋自生源有机碳输出受季节性海冰过程相关的“生物泵”作用的显著影响^[121]; ②北极地区冻土碳(old permafrost carbon, PF/C)占全球土壤有机碳的 50%^[122]; 陆源不同类型有机碳的输入不仅受径流的影响, 而且流域/海岸侵蚀排放(如冻土老碳)也有重要贡献^[71,123]; ③入海沉积有机碳的输运和沉积过程不仅受径流、环流和侵蚀作用的影响, 而且受制于海冰搬运作用^[124]; ④海冰变化和不同类型陆源碳(如土壤碳、冻土碳)输入的区域性差异导致近海陆架沉积有机碳源—汇过程呈现出高度的时、空差异^[71,123]。例如, 来自土壤上层的有机碳(年龄: 10^3 a)、深层多年冻土碳与沿岸的苔原富冰冻土碳(年龄: 10^4 a)^[71,123]和化石源古老有机质^[125]以及来自浮游生物的有机碳^[126]在北冰洋周边不同陆架区沉积物中的分布和埋藏记录具有显著的差异。特别是在全球变暖和北极放大效应下, 近几十年来海冰快速消退, 海水层化增强、径流输入增加、混合和环流变化加剧, 改变了海洋“物理泵”、“生物泵”和“微型生物碳泵”作用的强度和方式, 对北极地区碳的源—汇效应产生了深刻影响^[72-73]; 也势必导致受海冰和冻土碳输入制约下的近海沉积有机碳源—汇过程区域性差异更加明显^[71,73,127]。如北冰洋陆源有机物质的矿化、运输和分布情况受到气候变化的制约^[128], 而海源有机物质的产生则受到海冰、光照等因素的控制, 在营养盐上升流的海冰边缘区域生产力比较高^[13,129]。因此, 北极陆架沉积物中的有机碳是多种物源信号的复杂“集合体”。

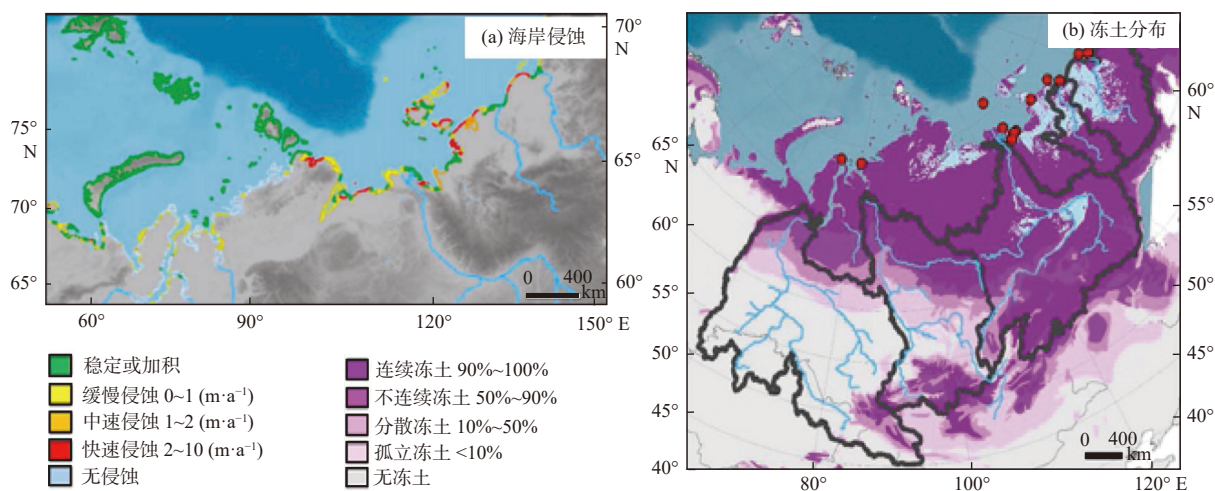


图 5 东西伯利亚海岸侵蚀和冻土分布 (修改自文献 [120])

Fig. 5 Coastal erosion and permafrost coverage of East Siberia (modified from reference [120])

分析和评估北冰洋边缘海沉积有机碳库的源—汇格局, 需要区分其中海源/陆源不同端元(如浮游植物、现代土壤、老碳)的贡献。如利用烷烃和木质素等标志物指示不同陆源有机碳的组成和陆架搬运及降解保存情况^[123,128]; 利用四醚膜脂化合物 GDGTs 指示海源和陆源土壤有机碳在陆架上的分布特征及相对贡献^[126]; 利用烷烃、脂肪酸和木质素等单体分子碳同位素组成(^{13}C 、 ^{14}C)区分陆源土壤和永久冻土来源的不同年龄的有机质以及评估这些组分在陆架搬运的时间^[130]。此外, 一些生物标志物也被用于指示海源有机碳与水温 and 群落结构之间的关系^[131]。总体来看, 这些指标可有效区分不同类型陆源有机碳的输入、搬运及降解^[71]。另一方面, 在全球变暖背景下, 北极陆架沉积物中的海源有机质的输入和埋藏与海冰相关的“生物泵”过程密切相关^[132]。然而, 由于缺乏长时间序列的海冰观测资料, 很难从长时间序列建立海冰变化与沉积有机碳埋藏之间的联系。近年来, 一种新的海冰硅藻指示物—— C_{25} 支链烯烃标志物(IP_{25})被提出可用于古海冰重建^[103,133]。但是, 在应用上述指标重建古海冰时还应考虑不同的流域气候条件(径流输入、源岩特征和冻土)对近海颗粒有机碳总有机质的输入和性质的影响^[120]。如相比亚欧陆架西部地区的鄂毕河和叶尼塞河, 东部地区的勒拿河、因迪吉尔卡河和科累马河流域气候偏干旱、广泛发育连续的冻土沉积, 使其输入的陆源颗粒有机碳的年龄更老而降解程度较小^[134]。

在全球气候快速变化背景下, 北极陆架不同海区对不同气候因素的响应可能各不相同, 这直接影响着不同时间尺度有机碳的沉积埋藏过程。近几十年来北极地区的快速变化主要表现为夏季海冰覆盖面积减退、海水温度升高、径流加大, 冻土退化和初级生产力提高等^[13,52,66,135]。这些因素通过对浮游植物群落结构和生产力的影响, 改变着海源有机碳的输入和埋藏, 也同时显著改变着陆源有机碳的输入和组成, 对有机碳埋藏及保存降解都带来直接的影响^[136]。随着全球变暖、海冰消退, 该区碳的源—汇过程及环境效应正发生着改变。海冰融化加剧、陆源有机质和营养盐输入增加, 促进“生物泵”运转, 改变了海洋浮游植物生产力和群落结构^[136]; 径流输入以及永久冻土融化导致陆源有机质输入与埋藏显著变化^[127], 这些都改变着原有沉积有机碳库的构成, 对陆架碳的源—汇格局有重要影响^[18,73]。研究显示, 与海冰消融相关的初级生产量可高达 60% 以上^[13]; 海冰的提前融化可引起浮游植物(如冰藻)的勃发, 提高了沉积碳输出通量^[13,132], 并改变海洋浮游植物群落结构和有机碳的来源^[136-137]。作为全球高生产力的海区, 楚科奇海具有很高的有机碳埋藏保存效率, 同时也是北冰洋海冰变化最为显著的地区之一^[138], 近几十年来海冰融化使得该区有机碳循环正发生着变化^[139]。

冻土退化日益加剧不仅引起甲烷等温室气体直接排放, 而且会导致封存其中的陆源有机碳加速释放, 并被微生物利用而快速进入现代碳循环过程^[140]。不同的周边流域环境导致陆源有机碳输出类型多样, 比如河流主要影响表层土壤有机碳(相对年轻)输出, 而冻土老碳的释放则主要与冻土发育状态、水文条件和热喀斯特侵蚀作用有关^[123]。在此背景下, 通过河流或海岸侵蚀释放的陆源有机碳通量将不断升高, 组成也显著变化^[123,131]。而受控于区域水文循环过程, 俄罗斯北极陆架由河流和海岸侵蚀向海输送了大量的冻土老碳^[131]。综上所述, 这些近期变化不仅会影响北极地区有机碳库的平衡和稳定, 也对未来气候变化的影响带来一定的不确定性^[18]。

末次冰消期以来, 随全球升温而导致的海冰快速消融的现象与现今类似, 但是有关快速气候变化对北极东西伯利亚陆架碳循环的影响的研究仅仅局限在个例。冰期过程形成的冻土沉积碳(yedoma)具有较高活性, 将在较短的时期(百年内)以 CO_2 形式快速重新参与碳循环, 这对全球变暖的进程起到显著促进作用^[140-141]; 但从更长时间尺度看, 这些陆源沉积有机碳的迁移和再埋藏或成为全新世以来大气 CO_2 的重要汇^[125]。相比于陆地苔原冻土, 海底冻土更加敏感和脆弱, 现今已有分别超过 80% 和 50% 的东西伯利亚海的底层和表层水体甲烷处于过饱和状态, 其融化将导致海底甲烷大量泄漏并直接释放到大气中^[17,68], 在地质历史时期, 这类海底甲烷的释放可能与快速气候环境变化有密切关系^[142], 但尚需进一步研究证实。可见, 这些碳的生物地球化学过程及其与气候环境的作用机制对北极地区变暖及其未来状态发展具有不可忽视的影响。Keskitalo 等针对全新世以来冻土沉积碳的输入和埋藏研究发现, 在西伯利亚陆架早全新世(9.5~8.2 ka B.P.)

陆源冻土沉积碳的输入显著高于其他时期,推测这可能跟全新世早期气候变暖和海平面上升有密切关系,而海岸侵蚀作用对此起了重要作用^[143]。Stein 等则通过浮游植物生物标志物记录结合矿物指标记录定性总结该区域全新世初级生产力的变化及其对海冰变化的响应^[33]。

总之,末次冰消期以来东北陆架在快速气候变化中碳的生物地球化学过程的响应机制还不清楚,有待深入研究。如何在陆架定量估算长时间尺度不同来源有机碳贡献并确定其与海冰和沉积环境的关系?地质历史时期海底甲烷释放与古气候环境的作用机制如何?这些问题的解决将会大大促进对地质历史上气候快速变化时期北冰洋碳汇作用的认识。

2.4 快速气候变化事件与陆架环境响应

自 20 世纪 80—90 年代开始,国内外研究人员对末次冰消期以来百年—千年尺度的气候快速变化给予了很大关注^[144-147]。研究者逐渐认识到末次冰期气候系统非常不稳定且具有全球性^[148],而且进入全新世这类快速波动同样存在^[149]。在末次冰消期全球变暖的背景下,气候表现为快速变化的显著特征,温度回升不稳定、呈波动式变化,主要表现为经历了一系列百年—千年尺度的气候快速变化事件,如 Bølling/Allerød 暖期、Heinrich 1 和 Younger Dryas 时期快速变冷、全新世大暖期(Holocene Thermal Maximum)、8.2 ka 冷期、中世纪暖期等不同时间尺度、波动式的气候冷暖突变事件。这些高频、不稳定的气候冷暖快速变化过程在冰芯和世界其他地区沉积物中都有过明显表现和响应^[150-153]。一般认为末次冰消期气候波动是地球气候系统内部相互作用的结果,但机制尚不清楚,不同地区的记录响应与北半球高纬地区气候变化的关系仍不太明确^[39,154]。

作为全球最宽广的陆架,北极陆架的巨厚沉积物比周围的深海盆地具有更高的沉积速率(全新世沉积速率为 $10\sim 300\text{ cm}\cdot\text{ka}^{-1}$ ^[32]),因而记录了海平面上升以来高分辨率的气候环境变化信息,而陆架沉积速率存在显著的时空差异。末次冰消期以来,海冰逐渐成为联系陆地—海洋—大气—生物圈相互作用的关键因素^[32]。关于陆架对快速气候变化的响应,目前认为冰后期主要存在 2 种模式:一种是受太阳辐射、海平面和气候冷暖变化影响的千年尺度变化,另一种则是中晚全新世后出现的百年尺度高频变异^[33,42,145,149]。后者这类独立于千年尺度的海冰短期快速振荡波动(约 200 a)在高海面以来变得更加明显,这可能与太阳活动和水团作用有关^[33,155-156],对沉积物质输运也有直接影响^[33],但这些变化在末次冰消期海平面快速上升时期是如何响应的尚不清楚。从末次冰消期到全新世以来,高纬地区气候快速变化和非线性控制机制受到较多关注,例如研究发现北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)会影响北大西洋经向环流从低纬向北极地区的热量输运,进而对北极以及亚北极地区造成显著影响^[45];而北半球“大气桥”会对高纬海区的表层温度造成区域异质性,在时间尺度上表现为非线性以及突变性特征^[44-45]。同时,北极陆架环境变化也会反过来对末次冰消期以来的快速气候变化产生影响。如全新世东西伯利亚陆架的逐渐淹没会通过海—陆作用减弱极地涡旋,并经过一系列负反馈作用减少北极海冰向北大西洋的输出,从而减弱大西洋经向环流,导致北欧变冷^[157]。东西伯利亚陆架的淹没和陆源淡水的注入使北极海冰面积的扩大,导致地表反射率增大,这一过程可能放大了中全新世以来北大西洋的降温幅度^[158]。

迄今为止,我国在北极东北陆架气候环境快速变化的记录方面只开展了少许工作。部分学者基于我国历次北极科学考察对楚科奇海陆架边缘地区的沉积记录及其晚第四纪以来古气候古海洋的意义开展了研究^[159-162],主要涉及楚科奇海陆坡海盆沉积环境、冰筏碎屑、冰期/间冰期的大西洋水团的影响、海冰过程及生产力和有机碳保存等方面,对于其他陆架沉积记录研究则还基本未涉及。

3 问题与展望

3.1 主要问题

尽管迄今已开展了许多围绕北极东北陆架的快速变化研究工作,但研究程度仍非常薄弱。主要存在

4 个问题。

1)尚未对东北陆架末次冰消期以来的快速气候变化和环境效应开展系统的研究。东北陆架区不同海区的沉积环境、物质输入和古气候古环境演化具有显著的区域差异,但已有研究非常有限。东西伯利亚海是北极陆架面积最大的海区,拉普捷夫海是海冰生产源区(“海冰工厂”)和受陆源输入影响强烈的海域,楚科奇海则是连接北太平洋和北冰洋的主要通道,这3个相互连接的地区是北极地区对全球变化响应最敏感的区域,其各自环境变化的控制因素又不尽相同,需要进一步深入研究。

2)尚未从指标观测记录和数值模拟相结合的角度研究末次冰消期以来的北极东北陆架海冰快速变化的驱动机制。受限于研究条件,前期的研究很少利用观测记录与数值模拟相结合的方式揭示海冰快速退化的归因,从而限制了对海冰变化过程中的自然变化与人类影响相对贡献的区分。据沉积记录反演的海冰退化过程既可以对应于海冰密集度减少,又可以理解为海冰覆盖时间缩短;而这对揭示海洋沉积环境、物源输运起着决定性的作用。因此,在涉及“气候控制机制”理解上存在不确定性,需要与数值模拟结合起来才能揭示出明确的原因。

3)缺乏将沉积作用、动力环境和海冰过程等边界条件与海区生物地球化学过程及生态系统演变进行联系和衔接。冰消期以来北极陆架的沉积环境及其与周边海洋、陆地的相互作用从过去到现在都在发生复杂的变化,但前期对这些的研究方法相对单一,缺乏多学科交叉研究。例如,目前仍然不清楚海岸侵蚀作用对于陆源输入和初级生产力等过程的影响程度,尤其是在末次冰消期海面快速上升的阶段;而陆架沉积环境、海洋环流、海冰过程等与生物地球过程(如生产力、甲烷释放)之间的作用机制如何?目前这些问题也都没有答案。

4)缺乏对比研究较长时间尺度气候快速变化及其环境效应。当前的海冰退化是近千年来最为严重的一次,但目前仍然不清楚这种情况在末次冰消期以来气候快速变化(尤其暖期)背景下是如何表现及影响的。末次冰消期海平面上升以来北极陆架沉积环境、海冰、海洋过程及相关生物地球化学过程可能存在不同时间尺度(百年—千年)的演化特征和响应模式,而要认识快速气候变化下的不同情景模式与环境效应,需要立足于更长的地质历史背景,从古今结合的视角,综合对比研究陆架气候环境演化的历史及控制因素。

3.2 展 望

1)发起大型国际合作计划。北极快速气候变化及其环境效应受到众多因素的影响,北极东北陆架的环境变化又与北冰洋的整体变化密切相关。而北极东北陆架地域上主要位于北极各国的管辖海域,涉及众多学科协作研究,因此亟需发起一个以北极陆架快速气候变化为主题的大型国际合作计划开展综合研究。

2)实现大数据驱动的北极陆架快速气候和环境变化研究。大数据正在成为地球科学研究的一种新思路和新方法,其实质是对海量有效数据进行挖掘、进而深入分析和寻求解决问题。北极陆架研究涉及领域多、数据量巨大且类型多样,可以通过广泛的国际合作建立海量数据库,实现大数据的挖掘和应用,进一步研究北极陆架快速气候变化的内在机理。

3)运用现代观测—地质记录—数值模拟有机结合、多学科多手段交叉的思路开展研究。数值模拟已成为深入理解北极快速气候变化内在机制和预测未来北极气候发展趋势的重要手段,其准确性一方面依赖于气候模式本身的设计特征,另一方面也有赖于边界条件的选取。现代观测可以获得北极近几十年的大气环流、海洋环流、海洋环境和海冰变化等信息,为数值模拟提供高分辨率的边界条件;而地质记录则可以将北极气候变化信息追溯至百年—千年甚至更长时间尺度。将现代观测和地质记录与数值模拟相结合,可以更加全面地在更高的时空分辨率和更长的时间尺度了解北极快速气候变化的驱动机制,并为预测未来北极快速气候变化提供重要的手段和方法支撑。

4)开展不同时间尺度北极快速气候变化及其驱动机制研究。受全球变暖的影响,北极地区的近地表气温以超过全球平均两倍以上速度快速上升。由于北极快速气候变化引起的一系列大气、冰雪、海洋、陆

地、植被等多圈层相互作用间的平衡发生改变,成为全球气候变化的放大器和驱动器。北极快速增温是理解北极快速气候变化的核心,但是目前对于北极地区快速升温的驱动机制仍无定论,不同研究结论之间存在很大的分歧,选择不受人类活动干扰、可作为“现代气候相似型”的地质历史时期典型暖期开展北极快速气候变化研究,有助于深入理解北极快速气候变化的特征及驱动机制。

5)加强北极快速气候变化与东亚及我国环境变化的关系研究。北极是影响东亚天气和气候的关键区域之一。随着持续的北极快速增暖和北极海冰快速减少,造成包括我国在内的东亚地区冬季气候变率以及极端严寒事件的发生概率上升,对我国洪涝、干旱灾害频次和强度的增加和冬季雾霾频发有重要影响。因此,未来要加强不同时间尺度北极快速气候变化机制及其与东亚地区气候的联系研究,为预测未来全球变暖背景下北极及中纬度东亚地区气候的发展趋势提供重要科学依据。同时,随着全球变暖和北极升温加剧,“冰上丝绸之路”和北极航道终年开通的可能性受到越来越多的关注,而北极航道的开通将在很大程度上改变世界贸易格局,因而需要加强北极快速气候变化对“冰上丝绸之路”影响的研究。

参考文献 (References):

- [1] CAVALIERI D J, GLOERSEN P, PARKINSON C L, et al. Observed hemispheric asymmetry in global sea ice changes[J]. *Science*, 1997, 278: 1104-1106.
- [2] SHINDELL D, FALUVEGI G. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(4): 294-300.
- [3] WALSH J E. Intensified warming of the Arctic: causes and impacts on middle latitudes[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 117: 52-63.
- [4] MILLER G H, ALLEY R B, BRIGHAM-GRETTE J, et al. Arctic amplification: can the past constrain the future?[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(15/16): 1779-1790.
- [5] HOLLAND M M, BITZ C M. Polar amplification of climate change in coupled models[J]. *Climate Dynamics*, 2003, 21: 221-232.
- [6] SHU Q, WANG Q, ARTHUN M, et al. Arctic Ocean Amplification in a warming climate in CMIP6 models[J]. *Science Advances*, 2022, 8(30): eabn9755.
- [7] CHRISTENSEN T R, JOHANSSON T, ÅKERMAN J, et al. Thawing sub-arctic permafrost: effects on vegetation and methane emissions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L04501.
- [8] DONG J, SHI X, GONG X, et al. Enhanced Arctic sea ice melting controlled by larger heat discharge of mid-Holocene rivers[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5368.
- [9] HAYS G C, RICHARDSON A J, ROBINSON C. Climate change and marine plankton[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(6): 337-344.
- [10] SERREZE M C, HOLLAND M M, STROEVE J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover[J]. *Science*, 2007, 315(5818): 1533-1536.
- [11] PEARSON R G, PHILLIPS S J, LORANTY M M, et al. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(7): 673-677.
- [12] 祁第, 陈立奇. 北冰洋酸化指标——海水文石饱和度变异的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 569-576. QI D, CHEN L Q. Review on researches of aragonite saturation state in the Arctic Ocean: a key parameter of Arctic Ocean acidification[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 569-576.
- [13] ARRIGO K R, PEROVICH D K, PICKART R S, et al. Massive phytoplankton blooms under Arctic sea ice[J]. *Science*, 2012, 336(6087): 1408.
- [14] WEBBER P J, TWEEDIE C E, TUCKER C J, et al. Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea ice decline[J]. *Earth Interactions*, 2010, 14(8): 1-20.
- [15] SWANN A L, FUNG I Y, LEVIS S, et al. Changes in Arctic vegetation amplify high-latitude warming through the greenhouse effect[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(4): 1295-1300.
- [16] NANATI S M, WATTS J D, ROGERS B M, et al. Large loss of CO₂ in winter observed across the northern permafrost region[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 852-857.
- [17] SHAKHOVA N, SEMILETOV I, SALYUK A, et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf[J]. *Science*, 2010, 327(5970): 1246-1250.

- [18] CHEN J F, BAI Y C, JIN H Y, et al. Carbon sink mechanism and processes in the Arctic Ocean under Arctic rapid change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(35): 3406-3416.
- [19] LI Y, LEUNG L R. Potential impacts of the Arctic on interannual and interdecadal summer precipitation over China[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(3): 899-917.
- [20] CHEN H, WANG H. Haze Days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(12): 5895-5909.
- [21] NOTZ D, STROEVE J. Observed Arctic sea-ice loss directly follows anthropogenic CO₂ emission[J]. *Science*, 2016, 354(6313): 747-750.
- [22] DING Q, SCHWEIGER A, L'HEUREUX M, et al. Fingerprints of internal drivers of Arctic sea ice loss in observations and model simulations[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 28-33.
- [23] WILLIAMS W J, CARMACK E C. The 'interior' shelves of the Arctic Ocean: physical oceanographic setting, climatology and effects of sea-ice retreat on cross-shelf exchange[J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 139: 24-41.
- [24] MASLANIK J, STROEVE J, FOWLER C, et al. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L13502.
- [25] COMISO J C, PARKINSON C L, GERSTEN R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L01703.
- [26] KINNARD C, ZDANOWICZ C M, KOERNER R M, et al. A changing Arctic seasonal ice zone: observations from 1870–2003 and possible oceanographic consequences[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): L2507.
- [27] JAKOBSSON M, ANDREASSEN K, BJARNADÓTTIR L R, et al. Arctic Ocean glacial history[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 92: 40-67.
- [28] CRONIN T M, O'REGAN M, PEARCE C, et al. Deglacial sea level history of the East Siberian Sea and Chukchi Sea margins[J]. *Climate of the Past*, 2017, 13(9): 1097-1110.
- [29] BAUCH H A, KASSENS H. Arctic Siberian shelf environments—an introduction[J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 48(1/2/3): 1-8.
- [30] BAUCH H A, MUELLER-LUPP T, TALDENKOVA E, et al. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin[J]. *Global and Planetary Change*, 2001, 31(1/2/3/4): 125-139.
- [31] STEIN R, DITTMERS K, FAHL K, et al. Arctic (palaeo) river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(11/12/13): 1485-1511.
- [32] WEGNER C, BENNETT K E, DE VERNAL A, et al. Variability in transport of terrigenous material on the shelves and the deep Arctic Ocean during the Holocene[J]. *Polar Research*, 2015, 34(1): 24964.
- [33] STEIN R, FAHL K, SCHADE I, et al. Holocene variability in sea ice cover, primary production, and Pacific-Water inflow and climate change in the Chukchi and East Siberian Seas (Arctic Ocean)[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2017, 32(3): 362-379.
- [34] FARMER J R, CRONIN T M, DE VERNAL A, et al. Western Arctic Ocean temperature variability during the last 8000 years[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L24602.
- [35] POLYAK L, ALLEY R B, ANDREWS J T, et al. History of sea ice in the Arctic[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(15): 1757-1778.
- [36] DE VERNAL A, HILLAIRES-MARCEL C, DARBY D A. Variability of sea ice cover in the Chukchi Sea (western Arctic Ocean) during the Holocene[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20: PA4018.
- [37] ASTAKHOV A S, SATTAROVA V V, SHI X F, et al. Distribution and sources of rare earth elements in sediments of the Chukchi and East Siberian Seas[J]. *Polar Science*, 2019, 20: 148-159.
- [38] O'REGAN M, WILLIAMS C J, FREY K E, et al. A synthesis of the long-term paleoclimatic evolution of the Arctic[J]. *Oceanography*, 2011, 24(3): 66-80.
- [39] CLARK P U, SHAKUN J D, BAKER P A, et al. Global climate evolution during the last deglaciation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(19): E1134-E1142.
- [40] JAKOBSSON M, LONG A, INGÓLFSSON Ó, et al. New insights on Arctic Quaternary climate variability from palaeo-records and numerical modelling[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(25/26): 3349-3358.
- [41] DYCK S, TREMBLAY L B, DE VERNAL A. Arctic sea-ice cover from the early Holocene: the role of atmospheric circulation patterns[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(25-26): 3457-3467.
- [42] HORNER T, STEIN R, FAHL K. Post-glacial variability of sea ice cover, river run-off and biological production in the western Laptev Sea (Arctic Ocean)—a high-resolution biomarker study[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 143: 133-149.
- [43] DUTRIEUX L P, BARTHOLOMEUS H, HEROLD M, et al. Relationships between declining summer sea ice, increasing temperatures and changing vegetation in the Siberian Arctic tundra from MODIS time series (2000–11)[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 044028.

- [44] MAX L, RIETHDORF J R, TIEDEMANN R, et al. Sea surface temperature variability and sea-ice extent in the subarctic northwest Pacific during the past 15, 000 years[J]. *Paleoceanography*, 2012, 27: PA3213.
- [45] PERSOIU A, ONAC B P, WYNN J G, et al. Holocene winter climate variability in Central and Eastern Europe[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1196.
- [46] BESZCZYNSKA-MÖLLER A, WOODGATE R A, LEE C M, et al. A synthesis of exchanges through the main oceanic gateways to the Arctic ocean[J]. *Oceanography*, 2011, 24(3): 82-99.
- [47] WEINGARTNER T J, DANIELSON S, SASAKI Y, et al. The Siberian Coastal Current: a wind- and buoyancy-forced Arctic coastal current[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 1999, 104(C12): 29697-29713.
- [48] KRUMPEN T, JANOUT M, HODGES K I, et al. Variability and trends in Laptev Sea ice outflow between 1992–2011[J]. *The Cryosphere*, 2013, 7(1): 349-363.
- [49] DARBY D A. Sources of sediment found in sea ice from the western Arctic Ocean, new insights into processes of entrainment and drift patterns[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2003, 108(C8): 3257.
- [50] MILLIMAN J D, FARNSWORTH K L. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [51] LAMMERS R B, PUNDSACK J W, SHIKLOMANOV A I. Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass[J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2007, 112: G04S59.
- [52] PETERSON B J, HOLMES R M, MCCLELLAND J W, et al. Increasing river discharge to the Arctic Ocean[J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2171-2173.
- [53] VISCOSI-SHIRLEY C, PISIAS N, MAMMONE K. Sediment source strength, transport pathways and accumulation patterns on the Siberian–Arctic's Chukchi and Laptev shelves[J]. *Continental Shelf Research*, 2003, 23(11/12/13): 1201-1225.
- [54] VISCOSI-SHIRLEY C, MAMMONE K, PISIAS N, et al. Clay mineralogy and multi-element chemistry of surface sediments on the Siberian–Arctic shelf: implications for sediment provenance and grain size sorting[J]. *Continental Shelf Research*, 2003, 23(11/12/13): 1175-1200.
- [55] DETHLEFF D, RACHOLD V, TINTELNOT M, et al. Sea-ice transport of riverine particles from the Laptev Sea to Fram Strait based on clay mineral studies[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 89(3): 496-502.
- [56] SEMILETOV I, DUDAREV O, LUCHIN V, et al. The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(10): L10614.
- [57] WEINGARTNER T J, CAVALIERI D J, AAGAARD K, et al. Circulation, dense water formation, and outflow on the northeast Chukchi Shelf[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 1998, 103(C4): 7647-7661.
- [58] 董林森, 石学法, 刘焱光, 等. 北冰洋西部表层沉积物矿物学特征及其物质来源[J]. *极地研究*, 2014, 26(1): 58-70. DONG L S, SHI X F, LIU Y G, et al. Minerals in surface sediments in the western Arctic Ocean and their sources[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(1): 58-70.
- [59] 董林森, 刘焱光, 石学法, 等. 西北冰洋表层沉积物黏土矿物分布特征及物质来源[J]. *海洋学报*, 2014, 36(4): 22-32. DONG L S, LIU Y G, SHI X F, et al. Distributions and sources of clay minerals in the surface sediments of the western Arctic Ocean[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(4): 22-32.
- [60] STEELE M, MORISON J, ERMOLD W, et al. Circulation of summer Pacific halocline water in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2004, 109: C02027.
- [61] WOODGATE R A. Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year-round Bering Strait mooring data[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 160: 124-154.
- [62] DUDAREV O V, SEMILETOV I P, CHARKIN A N, et al. Deposition settings on the continental shelf of the East Siberian Sea[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2006, 409(2): 1000-1005.
- [63] 李秋玲, 乔淑卿, 石学法, 等. 北极东西伯利亚陆架沉积物物源: 来自黏土矿物和化学元素的证据[J]. *海洋学报*, 2021, 43(3): 76-89. LI Q L, QIAO S Q, SHI X F, et al. Sediment provenance of the East Siberian Arctic Shelf: evidence from clay minerals and chemical elements[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(3): 76-89.
- [64] RUDENKO O, TALDENKOVA E, OVSEPYAN Y, et al. A multiproxy-based reconstruction of the mid- to late Holocene paleoenvironment in the Laptev Sea off the Lena River Delta (Siberian Arctic)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 540: 109502.
- [65] LANTUIT H, OVERDUIN P P, COUTURE N, et al. The Arctic coastal dynamics database: a new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines[J]. *Estuaries and Coasts*, 2012, 35(2): 383-400.
- [66] STROEVE J, HOLLAND M M, MEIER W, et al. Arctic sea ice decline: faster than forecast[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L09501.
- [67] LIU J, CURRY J A, WANG H, et al. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(12): 4693-4698.

- ences, 2012, 109(11): 4074-4079.
- [68] THORNTON B F, GEIBEL M C, CRILL P M, et al. Methane fluxes from the sea to the atmosphere across the Siberian shelf seas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(11): 5869-5877.
- [69] SHAKHOVA N, SEMILETOV I, GUSTAFSSON O, et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15872.
- [70] BRÖDER L, TESI T, ANDERSSON A, et al. Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea[J]. *Organic Geochemistry*, 2016, 91: 16-30.
- [71] VONK J E, SÁNCHEZ-GARCÍA L, VAN DONGEN B E, et al. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia[J]. *Nature*, 2012, 489(7414): 137-140.
- [72] 高众勇, 陈立奇. 全球变化中的北极碳汇: 现状与未来[J]. *地球科学进展*, 2007(8): 857-865. GAO Z Y, CHEN L Q. Arctic carbon sink in global change: present and future[J]. *Advances in Earth Science*, 2007(8): 857-865.
- [73] 陈建芳, 张海生, 金海燕, 等. 北极陆架沉积碳埋藏及其在全球碳循环中的作用[J]. *极地研究*, 2004, 16(3): 193-201. CHEN J F, ZHANG H S, JIN H Y, et al. Accumulation of sedimentary organic carbon in the Arctic shelves and its significance on global carbon budget[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16(3): 193-201.
- [74] SEMILETOV I P, SHAKHOVA N E, SERGIENKO V I, et al. On carbon transport and fate in the East Siberian Arctic land-shelf-atmosphere system[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1): 15201.
- [75] ALLEN P A. From landscapes into geological history[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 274-276.
- [76] DONG J, LI A, LIU X, et al. Holocene climate modulates mud supply, transport, and sedimentation on the East China Sea shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125(10): e2020JF005731.
- [77] HANEUTH T J J, LANTZSCH H, NIZOU J. Mud depocenters on continental shelves—appearance, initiation times, and growth dynamics[J]. *Geo-Marine Letters*, 2015, 35(6): 487-503.
- [78] WALSH J P, NITTROUER C A. Understanding fine-grained river-sediment dispersal on continental margins[J]. *Marine Geology*, 2009, 263(1/2/3/4): 34-45.
- [79] GÜNTHER F, OVERDUIN P P, YAKSHINA I A, et al. Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to Arctic summer warming and sea ice reduction[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(1): 151-178.
- [80] OVEREEM I, ANDERSON R S, WOBUS C W, et al. Sea ice loss enhances wave action at the Arctic coast[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L17503.
- [81] DARBY D A, MYERS W B, JAKOBSSON M, et al. Modern dirty sea ice characteristics and sources: the role of anchor ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116: C09008.
- [82] NÜRNBERG D, WOLLENBURG I, DETHLEFF D, et al. Sediments in Arctic sea ice: implications for entrainment, transport and release[J]. *Marine Geology*, 1994, 119(3/4): 185-214.
- [83] MORITZ R E, BITZ C M, STEIG E J. Dynamics of recent climate change in the Arctic[J]. *Science*, 2002, 297(5586): 1497-1502.
- [84] LAMBECK K, ROUBY H, PURCELL A, et al. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(43): 15296-15303.
- [85] LAMBECK K, CHAPPELL J. Sea level change through the Last Glacial Cycle[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 679-686.
- [86] SPIELHAGEN R F, ERLKENKEUSER H, SIEGERT C. History of freshwater runoff across the Laptev Sea (Arctic) during the last deglaciation[J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 48(1/2/3): 187-207.
- [87] MARGOLD M, JANSSON K N, STROEVEN A P, et al. Glacial Lake Vitim, a 3000-km³ outburst flood from Siberia to the Arctic Ocean[J]. *Quaternary Research*, 2011, 76(3): 393-396.
- [88] FAHL K, STEIN R. Modern seasonal variability and deglacial/Holocene change of central Arctic Ocean sea-ice cover: new insights from biomarker proxy records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 351/352: 123-133.
- [89] LI L, WANG X, REN Y, et al. Enrichment of trace metals (V, Cu, Co, Ni, and Mo) in Arctic sediments—from Siberian Arctic shelves to the basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126: e2020JC016960.
- [90] LI L, LIU Y, WANG X, et al. Early diagenesis and accumulation of redox-sensitive elements in East Siberian Arctic Shelves[J]. *Marine Geology*, 2020, 429: 106309.
- [91] MÜLLER C, STEIN R. Variability of fluvial sediment supply to the Laptev Sea continental margin during Late Weichselian to Holocene times: implications from clay-mineral records[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 89(3): 592-60.
- [92] CARLSON A E, CLARK P U. Ice sheet sources of sea level rise and freshwater discharge during the last deglaciation[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50: RG4007.
- [93] DESCHAMPS C, MONTERO-SERRANO J, ST-ONGE G. Sediment provenance changes in the western Arctic Ocean in response to ice raft-

- ing, sea level, and oceanic circulation variations since the last deglaciation[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(7): 2147-2165.
- [94] ORTIZ J D, POLYAK L, GREBMEIER J M, et al. Provenance of Holocene sediment on the Chukchi-Alaskan margin based on combined diffuse spectral reflectance and quantitative X-Ray diffraction analysis[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 68(1): 73-84.
- [95] YAMAMOTO M, NAM S I, POLYAK L, et al. Holocene dynamics in the Bering Strait inflow to the Arctic and the Beaufort Gyre circulation based on sedimentary records from the Chukchi Sea[J]. *Climate of the Past*, 2017, 13(9): 1111-1127.
- [96] CAVALIERI D J, PARKINSON C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 881-889.
- [97] PARK H, WATANABE E, KIM Y, et al. Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea ice decline and oceanic and atmospheric warming[J]. *Science Advances*, 2020, 6(45): e4699.
- [98] OLONSHECK D, MAURITSEN T, NOTZ D. Arctic sea-ice variability is primarily driven by atmospheric temperature fluctuations[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(6): 430-434.
- [99] KINNARD C, ZDANOWICZ C M, FISHER D A, et al. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1, 450 years[J]. *Nature*, 2011, 479(7374): 509-512.
- [100] DE VERNAL A, GERSONDE R, GOOSSE H, et al. Sea ice in the paleoclimate system: the challenge of reconstructing sea ice from proxies—an introduction[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 79: 1-8.
- [101] WANG R, XIAO W, MÄRZ C, et al. Late Quaternary paleoenvironmental changes revealed by multi-proxy records from the Chukchi Abyssal Plain, western Arctic Ocean[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 108: 100-118.
- [102] 陈志华, 陈毅, 王汝建, 等. 末次冰消期以来白令海盆的冰筏碎屑事件与古海洋学演变记录[J]. 极地研究, 2014, 26(1): 17-28. CHEN Z H, CHEN Y, WANG R J, et al. Ice-rafted detritus events and paleoceanographic records in the Bering basin since the last deglaciation[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(1): 17-28.
- [103] BROWN T A, BELT S T, TATAREK A, et al. Source identification of the Arctic sea ice proxy IP₂₅[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 4197.
- [104] MÜLLER J, WAGNER A, FAHL K, et al. Towards quantitative sea ice reconstructions in the northern North Atlantic: a combined biomarker and numerical modelling approach[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 306(3/4): 137-148.
- [105] WANG K J, HUANG Y, MAJANEVA M, et al. Group 21 Isochrysidales produce characteristic alkenones reflecting sea ice distribution[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 15.
- [106] DE VERNAL A, HILLAIRE-MARCEL C, ROCHON A, et al. Dinocyst-based reconstructions of sea ice cover concentration during the Holocene in the Arctic Ocean, the northern North Atlantic Ocean and its adjacent seas[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 79: 111-121.
- [107] FUNDER S, GOOSSE H, JEPSEN H, et al. A 10, 000-year record of Arctic Ocean sea-ice variability—view from the beach[J]. *Science*, 2011, 333(6043): 747-750.
- [108] MASSONNET F, FICHEFET T, GOOSSE H, et al. Constraining projections of summer Arctic sea ice[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(6): 1383-1394.
- [109] BAUCH H A, POLYAKOVA Y I. Diatom-inferred salinity records from the Arctic Siberian Margin: implications for fluvial runoff patterns during the Holocene[J]. *Paleoceanography*, 2003, 18: 1027.
- [110] XIAO X, FAHL K, MÜLLER J, et al. Sea-ice distribution in the modern Arctic Ocean: biomarker records from trans-Arctic Ocean surface sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 155: 16-29.
- [111] HÖRNER T, STEIN R, FAHL K. Paleo-sea ice distribution and polynya variability on the Kara Sea shelf during the last 12 ka[J]. *arktos*, 2018, 4(1): 1-16.
- [112] POLYAK L, BELT S T, CABEDO-SANZ P, et al. Holocene sea-ice conditions and circulation at the Chukchi-Alaskan margin, Arctic Ocean, inferred from biomarker proxies[J]. *The Holocene*, 2016, 26(11): 1810-1821.
- [113] SYRING N, STEIN R, FAHL K, et al. Holocene changes in sea-ice cover and polynya formation along the eastern North Greenland shelf: new insights from biomarker records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 231: 106173.
- [114] VARE L L, MASSÉ G, GREGORY T R, et al. Sea ice variations in the central Canadian Arctic Archipelago during the Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(13/14): 1354-1366.
- [115] RUAN J, HUANG Y, SHI X, et al. Holocene variability in sea surface temperature and sea ice extent in the northern Bering Sea: a multiple biomarker study[J]. *Organic Geochemistry*, 2017, 113: 1-9.
- [116] HÖRNER T, STEIN R, FAHL K. Evidence for Holocene centennial variability in sea ice cover based on IP₂₅ biomarker reconstruction in the southern Kara Sea (Arctic Ocean)[J]. *Geo-Marine Letters*, 2017, 37(5): 515-526.
- [117] TALDENKOVA E, BAUCH H A, GOTTSCHALK J, et al. History of ice-rafting and water mass evolution at the northern Siberian continental margin (Laptev Sea) during Late Glacial and Holocene times[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(27/28): 3919-3935.

- [118] BRINER J P, MCKAY N P, AXFORD Y, et al. Holocene climate change in Arctic Canada and Greenland[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 147: 340-364.
- [119] STEIN R, MACDONALD R W. The organic carbon cycle in the Arctic Ocean[M]. Heidelberg, Berlin, Germany: Springer, 2004.
- [120] KARLSSON E, GELTING J, TESI T, et al. Different sources and degradation state of dissolved, particulate, and sedimentary organic matter along the Eurasian Arctic coastal margin[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, 30(6): 898-919.
- [121] 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.
- [122] TARNOCAI C, CANADELL J G, SCHUUR E A G, et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23: GB2023.
- [123] FENG X, 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*, 2013, 110(35): 14168-14173.
- [124] EICKEN H, GRADINGER R, GAYLORD A, et al. Sediment transport by sea ice in the Chukchi and Beaufort Seas: increasing importance due to changing ice conditions?[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(24): 3281-3302.
- [125] HILTON R G, GALY V, GAILLARDET J, et al. Erosion of organic carbon in the Arctic as a geological carbon dioxide sink[J]. *Nature*, 2015, 524(7563): 84-87.
- [126] SPARKES R B, DOĞRUL SELVER A, GUSTAFSSON Ö, et al. Macromolecular composition of terrestrial and marine organic matter in sediments across the East Siberian Arctic Shelf[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(5): 2485-2500.
- [127] MCCLELLAND J W, DÉRY S J, PETERSON B J, et al. A pan-arctic evaluation of changes in river discharge during the latter half of the 20th century[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L06715.
- [128] TESI T, SEMILETOV I, HUGELIUS G, et al. Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land-ocean continuum in East Siberia: insights from biomarkers and carbon isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 133: 235-256.
- [129] HU L, LIU Y, XIAO X, et al. Sedimentary records of bulk organic matter and lipid biomarkers in the Bering Sea: a centennial perspective of sea-ice variability and phytoplankton community[J]. *Marine Geology*, 2020, 429: 106308.
- [130] BRÖDER L, TESI T, ANDERSSON A, et al. Bounding cross-shelf transport time and degradation in Siberian-Arctic land-ocean carbon transfer[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 806.
- [131] TESI T, MUSCHITIELLO F, SMITTENBERG R H, et al. Massive remobilization of permafrost carbon during post-glacial warming[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 13653.
- [132] BOETIUS A, ALBRECHT S, BAKKER K, et al. Export of algal biomass from the melting Arctic sea ice[J]. *Science*, 2013, 339(6126): 1430-1432.
- [133] BELT S T, MÜLLER J. The Arctic sea ice biomarker IP₂₅: a review of current understanding, recommendations for future research and applications in palaeo sea ice reconstructions[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 79: 9-25.
- [134] VAN DONGEN B E, SEMILETOV I, WEIJERS J W H, et al. Contrasting lipid biomarker composition of terrestrial organic matter exported from across the Eurasian Arctic by the five great Russian Arctic rivers[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22: GB1011.
- [135] BRÖDER L, ANDERSSON A, TESI T, et al. Quantifying degradative loss of terrigenous organic carbon in surface sediments across the Laptev and East Siberian Sea[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, 33(1): 85-99.
- [136] WASSMANN P, DUARTE C M, AGUSTÍ S, et al. Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1235-1249.
- [137] 白有成, 陈建芳, 李宏亮, 等. 楚科奇海R12a沉积柱状样500年以来生物标记物记录[J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 768-775. BAI Y C, CHEN J F, LI H L, et al. Biomarker records in sediment core of R12a from the Chukchi Sea during the last 500 years[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 768-775.
- [138] LINDSAY R, SCHWEIGER A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(1): 269-283.
- [139] WANG K, ZHANG H, HAN X, et al. Sources and burial fluxes of sedimentary organic carbon in the northern Bering Sea and the northern Chukchi Sea in response to global warming[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 679: 97-105.
- [140] ZIMOV S A, SCHUUR E A G, CHAPIN F S. Permafrost and the global carbon budget[J]. *Science*, 2006, 312(5780): 1612-1613.
- [141] KOVEN C D, RINGEVAL B, FRIEDLINGSTEIN P, et al. Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(36): 14769-14774.
- [142] KENNETT J P, CANNARIATO K G, HENDY I L, et al. Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials[J]. *Science*, 2000, 288(5463): 128-133.
- [143] KESKITALO K, TESI T, BRÖDER L, et al. Sources and characteristics of terrestrial carbon in Holocene-scale sediments of the East Siberi-

- an Sea[J]. *Climate of the Past*, 2017, 13(9): 1213-1226.
- [144] HEINRICH H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130, 000 years[J]. *Quaternary Research*, 1988, 29(2): 142-152.
- [145] BOND G, SHOWERS W, CHESEBY M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates[J]. *Science*, 1997, 278(5341): 1257-1266.
- [146] DANSGAARD W, JOHNSEN S J, CLAUSEN H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. *Nature*, 1993, 364(6434): 218-220.
- [147] HOLMES J, LOWE J, WOLFF E, et al. Rapid climate change: lessons from the recent geological past[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 79(3/4): 157-162.
- [148] SARNTHEIN M, KENNETT J P, ALLEN J R M, et al. Decadal-to-millennial-scale climate variability—chronology and mechanisms: summary and recommendations[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(10): 1121-1128.
- [149] BOND G, KROMER B, BEER J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene[J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2130-2136.
- [150] 周卫建, 安芷生, PORTER S C, 等. 末次冰消期东亚和挪威海气候事件的对比[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 1997, 27(3): 260-264. ZHOU W J, AN Z S, PORTER S C, et al. Comparison of climate events in East Asia and Norwegian Sea during the last deglacial period[J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 27(3): 260-264.
- [151] STEINHILBER F, ABREU J A, BEER J, et al. 9, 400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(16): 5967-5971.
- [152] STEFFENSEN J P, ANDERSEN K K, BIGLER M, et al. High-resolution Greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years[J]. *Science*, 2008, 321(5889): 680-684.
- [153] VONMOOS M, BEER J, MUSCHELER R. Large variations in Holocene solar activity: constraints from ^{10}Be in the Greenland Ice Core Project ice core[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2006, 111(A10): A10105.
- [154] SUN Y, OPPO D W, XIANG R, et al. Last deglaciation in the Okinawa Trough: subtropical northwest Pacific link to northern hemisphere and tropical climate[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20: PA4005.
- [155] RASPOPOV O M, DERGACHEV V A, ESPER J, et al. The influence of the de Vries (~200-year) solar cycle on climate variations: results from the Central Asian Mountains and their global link[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 259(1): 6-16.
- [156] WIRTH S B, GLUR L, GILLI A, et al. Holocene flood frequency across the Central Alps—solar forcing and evidence for variations in North Atlantic atmospheric circulation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 80: 112-128.
- [157] BLASCHEK M, RENSSEN H. The impact of early Holocene Arctic shelf flooding on climate in an atmosphere–ocean–sea–ice model[J]. *Climate of the Past*, 2013, 9(6): 2651-2667.
- [158] DE VERNAL A, HILLAIRES-MARCEL C, LE DUC C, et al. Natural variability of the Arctic Ocean sea ice during the present interglacial[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(42): 26069-26075.
- [159] WANG R, XIAO W, LI W, et al. Late quaternary ice-rafted detritus events in the Chukchi Basin, western Arctic Ocean[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55: 432-440.
- [160] 梅静, 王汝建, 陈建芳, 等. 西北冰洋楚科奇海台P31孔晚第四纪的陆源沉积物记录及其古海洋与古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(3): 77-86. MEI J, WANG R J, CHEN J F, et al. Late quaternary terrigenous deposits from core P31 on the Chukchi plateau of western Arctic Ocean and their paleoceanographic and paleoclimatic implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(3): 77-86.
- [161] 章伟艳, 于晓果, 刘焱光, 等. 楚科奇海盆M04柱晚更新世以来沉积古环境记录[J]. 海洋学报, 2015, 37(7): 85-96. ZHANG W Y, YU X G, LIU Y G, et al. Paleoenvironmental record of core M04 in the Chukchi Sea Basin during Late Pleistocene[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(7): 85-96.
- [162] CHEN M, KIM J H, LEE Y K, et al. Subsea permafrost as a potential major source of dissolved organic matter to the East Siberian Arctic Shelf[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 777: 146100.

Response of the Northeastern Arctic Shelf to Rapid Climate Changes Since the Last Deglaciation

SHI Xue-fa^{1,2}, DONG Jiang¹, HU Li-min^{2,3}, FENG Han¹, YAO Zheng-quan^{1,2}, QIAO Shu-qing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, FIO, MNR, Qingdao 266061, China;

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China;

3. College of Marine Geosciences, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The rapid climate change in the Arctic has a profound impact on the environmental changes in the Arctic region and the world, and has become a major frontier issue in the Earth science community. The northeastern Arctic shelf, the broadest and flattest continental shelf in the world, is not only the main source area of seasonal sea-ice formation but also the area with the most intense changes in modern sea ice, thus is sensitive to climate change and becomes an environmentally fragile region. Here, we summarize recent studies and their main problems on the environmental response of the northeastern Arctic shelf under the background of rapid climate changes since the last deglacial period, and review new findings from the aspects of sediment "source-to-sink" process, sea-ice change, carbon cycle and rapid climate change events. It was found that the sources of sediments and organic carbon in the northeastern Arctic shelf are complicated, which have intense spatial and temporal variability, and the climatic and environmental changes are closely related to the evolution of sea ice. The future research should strive to launch a large international cooperation project, strengthen long-term continuous observation of modern processes, attach importance to the accurate interpretation of climate and environmental signals in geological records, deepen the use of the numerical simulation technology and big data, carry out research on rapid climate change in the Arctic and its driving mechanisms at different time scales, and strengthen the studies on relationship between rapid climate change in the Arctic and environmental change in the East Asia (China).

Key words: rapid climate change; sea-ice change; "source-to-sink" process; carbon cycle; last deglaciation; northeastern arctic shelf

Received: June 3, 2022