

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.02.005

西北冰洋楚科奇海台晚第四纪以来陆源沉积物搬运机制及其古环境意义

黄晓璇, 王汝建, 肖文申, 章陶亮

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要:通过对西北冰洋楚科奇海台的 ARC7-P12 岩心的沉积物颜色旋回、XRF-Ca 和 Mn 元素相对含量, 有孔虫丰度, 粗组分含量, 粒度组成及其端元的综合分析, 并与该地区其他沉积物岩心对比, 将 ARC7-P12 岩心划分为深海氧同位素 (Marine Isotope Stages, MIS) 5 期以来的沉积序列。该岩心的粒度端元分析结果显示, 该岩心峰态中值 2 和 9 μm 组分的端元分别代表由雾状层和底流搬运的沉积物; 峰态中值为 30 以及 110 μm 组分的端元代表海冰以及冰山搬运的沉积物。MIS 5 以来的冰消期和间冰期, 由于海冰和冰山融化以及海域开阔, 沉积物主要由海冰以及冰山搬运, 粗组分含量显著升高。冰期由于海冰覆盖, 冰盖的生长和阻挡, 以及表层洋流减弱, 底流和雾状层搬运相对增强, 细颗粒沉积物增加。

关键词:陆源沉积物; 粒度端元分析; 搬运机制; 西北冰洋; 楚科奇海台

中图分类号: P736.21 文献标识码: A

Transportation mechanism of terrigenous sediment and its paleoenvironmental implications on the Chukchi Plateau, western Arctic Ocean during the late Quaternary

HUANG Xiaoxuan, WANG Rujian, XIAO Wenshen, ZHANG Taoliang

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: A comprehensive analysis of sediment color cycle, XRF-Ca and Mn content, foraminiferal abundance, coarse fraction content, grain size and end-member modeling analysis have been carried out for the core ARC7-P12 collected from the Chukchi Plateau, Western Arctic Ocean. Stratigraphic correlation indicates that the core ARC7-P12 is deposited in the time from MIS (Marine Isotope Stage) 5 to 1. Grain size end-member analysis suggests that the particle modal values of 2 μm and 9 μm represent the nepheloid and deep current transportation respectively, while the particle modal values of 30 μm and the 110 μm represent sea ice and iceberg transportation respectively. Since MIS 5, the interglacial and deglaciation periods was characterized by increase in coarse fraction due to the collapse of ice shelf and the expansion of open sea. Sea ice and iceberg were melted, leading to ice-rafted detritus deposition. During the glacial periods, however, due to the growth of the sea ice cover and ice sheet as well as the weakening of the surface currents, the transportation of deep current and nepheloid was relatively enhanced, and as the results, fine-grained sediment increased.

Key words: terrigenous sediment; end-member analysis; transportation mechanism; western Arctic Ocean; Chukchi Plateau

全球气候变化在北极地区存在着明显的放大作用^[1-4]。北极的气候变化影响着人类和其他生态系统, 进而通过多种气候反馈机制影响全球气候变化^[4,5]。由于冰期与间冰期气候变化显著, 不同时期由冰盖崩裂和崩塌的冰山以融冰水事件显著影响着北冰洋的沉积物搬运机制^[6,7], 从而导致北冰洋不同地区深海沉积物组成的差异。同时, 北冰洋水

体与不同来源的水团之间复杂的相互作用也是影响全球气候变化的重要驱动力之一^[8-10]。北冰洋常年被冰雪覆盖, 是一个被陆地环绕的封闭型大洋, 仅通过白令海峡和巴伦支海、弗拉姆海峡与太平洋和大西洋沟通, 同时有一部分终年被海冰所覆盖^[8,9], 由于北冰洋拥有全球最为广阔的浅水陆架, 因此其在海洋学方面具有很多的独特性, 能够为我们了解全

资助项目:国家自然科学基金项目“重建晚第四纪冰期-间冰期西北冰洋筏冰运输和表层洋流演变历史”(41776187); 南北极专项“2017 年北极海域海洋地质考察”(CHINARE2017-03-02)

作者简介:黄晓璇(1992—), 女, 硕士生, 主要从事海洋地质学及古环境研究, E-mail: xyq044266@163.com

通讯作者:王汝建(1959—), 男, 教授, 主要从事极地古海洋与古气候学研究, E-mail: rjwang@tongji.edu.cn

收稿日期:2018-01-26; **改回日期:**2018-03-18. 文凤英编辑

球气候变化和物质循环提供有利信息。

北冰洋深海沉积物中的冰筏碎屑 (Ice-rafted Detritus-IRD) 是指通过海冰、大冰山和冰川等搬运方式输入海洋,并沉积到海底的陆源碎屑物质,其含量信息能够反映冰期与间冰期旋回中北冰洋周围冰盖的变化历史以及表层洋流的搬运机制^[9-12],因此可以通过 IRD 的含量变化来反映北冰洋沉积环境变化等信息。而不同粒级的粒度组成特征可以记录沉积物的来源、沉积过程等环境演化信息,通过对粒度的端元模拟分析还可以示踪冰山、海冰、洋流、雾状层等不同的搬运模式所带来的沉积物。这些信息对于研究北冰洋地区的沉积模式具有重大意义。

现代北冰洋的表层环流由加拿大海盆顺时针流动的波弗特环流和欧亚海盆的穿极漂流组成,它们控制着海冰和冰山的搬运作用,进而影响了沉积物的输入(图 1)。在北冰洋西部,现代沉积物分布受

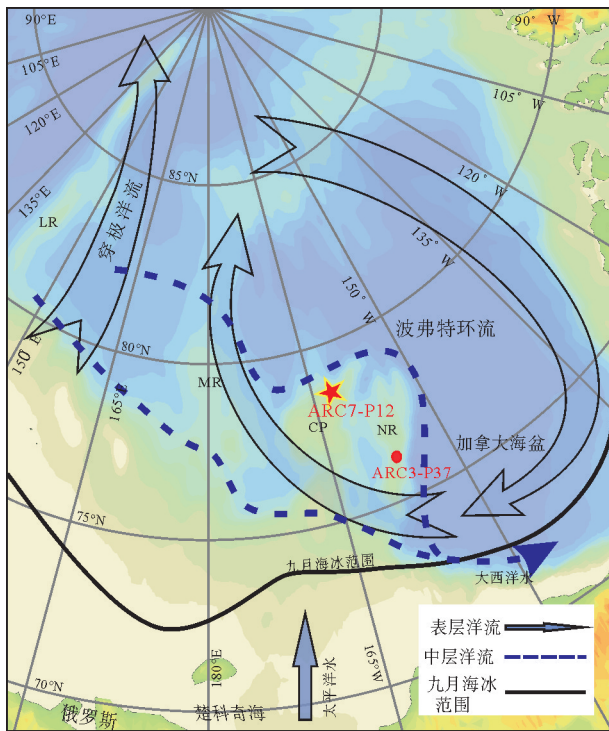


图 1 北冰洋西部现代洋流情况以及楚科奇边缘地区相关站点的位置 (Table 1) 以及 9 月海冰的范围^[26] 其中粗箭头表示表层洋流,蓝色虚线表示大西洋中层水;图中 CP: 楚科奇海台;NR: 北风脊;MR: 门捷列夫脊;LR: 罗蒙诺索夫脊
Fig.1 Map of oceanographic setting showing the location of related cores in the Chukchi Borderland, western Arctic Ocean and the boundary of September sea ice^[26] Blue arrows show surface currents, and the blue dotted lines show the Atlantic intermediate water; In this figure, CP: Chukchi Plateau; NR: Northwind Ridge; MR: Mendeleev Ridge; LR: Lomonosov Ridge

到波弗特环流的控制,因此其主要来源于加拿大北极群岛以及波弗特海沿岸^[12-14]。但在地质历史时期,波弗特环流的方向和强度也会改变^[15,16]。冰期由于气候寒冷,冰盖面积增大,海平面下降,波弗特环流明显减弱^[7,17-19],其携带的陆源粗颗粒沉积物难以到达楚科奇海台。间冰期或冰消期时,气候转暖,冰盖崩裂,加强的波弗特环流将冰山和大冰块携带的 IRD 搬运至研究区^[11,17,20-22]。

楚科奇海及其边缘地区位于北冰洋的西部,东与加拿大海盆相邻,西部为门捷列夫海脊,由于同时受到通过白令海峡进入的太平洋水以及波弗特环流的影响,因此能较好地反映楚科奇边缘地区沉积物的搬运机制及沉积过程,从而对于重建该地区的环境变化有重要意义^[12-14,17]。该地区沉积物主要受到底流、表层洋流、海冰和冰山搬运方式的控制,仅依据普通的粒度参数如砂、粉砂、黏土组分的含量等,难以完整揭示该区域的沉积模式。为了更好地解释这些过程,可以利用多元统计分析的方法,包括主成分分析、敏感组分分析以及端元组分分析等,其中,根据端元组分分布的不同,分析冰期-间冰期沉积物搬运过程及沉积特征^[23-25]。

本文通过对中国第 7 次北极考察在西北冰洋楚科奇海台钻取的 ARC7-P12 岩心中的 IRD 以及粒度端元分析,探讨该区域 MIS 5 期以来陆源沉积物组分的变化以及不同沉积物的搬运机制,重建研究区的古环境变化。

1 材料与方法

1.1 材料来源

本文研究材料来源于中国第 7 次北极科学考察在西北冰洋楚科奇海台取得的重力柱状样 ARC7-P12,该岩心位于 $78^{\circ}17'14''N$ 、 $162^{\circ}41'15''W$,水深 580 m (图 1,表 1)。ARC7-P12 岩心总长 258 cm,对该岩心按 2 cm 间隔取样,共获得 129 个样品。根据岩心图(图 2)以及与比色卡对比可以发现该岩心沉积物岩性特征随深度自上而下呈现出棕色、橄榄灰色和灰色粉砂质黏土的沉积旋回变化。

表 1 本文中研究岩心的信息

Table 1 Core information in this study

岩心	纬度	经度	水深/m	参考文献
ARC7-P12	$78^{\circ}17'14''N$	$162^{\circ}41'15''W$	580	本文
ARC3-P37	$76^{\circ}59'55''N$	$156^{\circ}0'55''W$	2267	[20]

1.2 研究方法

对 ARC7-P12 岩心所作的分析包括 XRF 元素相对含量扫描;粗组分含量分析($>63\mu\text{m}$, $>154\mu\text{m}$, $>250\mu\text{m}$);浮游及底栖有孔虫丰度统计;浮游有孔虫 *Neogloboquadrina pachyderma* (sin.) (Nps) 的 AMS ^{14}C 测年;粒度组分测定及端元分析。

XRF 元素相对含量扫描:使用 AVAATECH 公司制造的 XRF Core-Scanner 元素扫描分析仪对沉积物进行元素相对含量无损扫描测试,分辨率为 1cm,测得从 Al 至 U 元素的相对含量,数据单位为 counts/30 seconds。

粗组分含量分析:首先取 10g 左右经烘箱 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干的样品用水泡开,使用孔径为 $63\mu\text{m}$ 的筛子冲洗,收集筛好后的屑样,烘干后对 $>63\mu\text{m}$ 的屑样依次用 154 和 $250\mu\text{m}$ 的筛子干筛获得 $>154\mu\text{m}$ 和 $>250\mu\text{m}$ 的组分,分别称重并计算其百分含量,由于该岩心中有孔虫等生源组分含量较少,因此该粗组分含量可以看作 IRD 含量,其中,以 $>63\mu\text{m}$ 的含量近似为砂组分 IRD 的含量。

浮游和底栖有孔虫丰度统计:在显微镜下鉴定统计 $>154\mu\text{m}$ 的浮游和底栖有孔虫个体数量并计算其丰度。

AMS ^{14}C 测年:包括 5 个浮游有孔虫 Nps 的测年,在有孔虫丰度较高的 5 个层位挑选出壳径 $>154\mu\text{m}$ 的 Nps 个体质量 8mg 左右进行 AMS ^{14}C 测年。

粒度分析:称取 0.15g 的烘干样品,加 1mol/L 的盐酸 10mL,去除碳酸钙;再加入 10mL 30% 的过氧化氢溶液,水浴加热去除有机质;再加入 0.5g 左右的 NaOH 固体,水浴加热去除生物硅,最后加入 0.05mol/L 分散剂六偏磷酸钠溶液,煮沸 1min,在 Coulter 全自动激光粒度分析仪上进行测试,该粒度仪的测量范围为 $0.375\sim 2000\mu\text{m}$,对同一样品平均粒径的重复性测试偏差 $\leq 1\%$,最终得到沉积物组分砂、粉砂、黏土百分含量以及沉积物平均粒径、中值粒径。

粒度端元模拟分析:将激光粒度仪测出的粒度组分分布进行端元分析,通过端元分析结果,根据复相关系数提取出合适的端元数目。不同端元可能代表不同沉积物搬运机制以及这些不同机制所影响的沉积物粒度特征^[23,27,28]。

除了 AMS ^{14}C 测年是在 University of California Irvine 完成外,其他的分析测试工作均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。

2 结果

2.1 地层年代框架

北冰洋地区由于受到海冰覆盖,有孔虫壳体的氧碳同位素信息会因为海冰的形成、冰盖的发育和冰融水注入而改变^[29-31],同时,北冰洋地区寒冷的气候不利于有孔虫的生长,导致某些层位有孔虫记录缺失^[9]。因此,被广泛用于低纬度地区地层划分和对比的有孔虫氧同位素纪录在北冰洋并不适用^[32]。通过对北冰洋的研究发现,柱状样沉积物的颜色旋回以及 Mn 和 Ca 元素含量可以为年龄控制提供可靠的资料,可以结合这两个指标以及有孔虫丰度和 AMS ^{14}C 测年来建立年代框架^[33-36]。北冰洋沉积物中可以看到明显的褐色和灰色/黄色的颜色旋回变化,其中,褐色的层位代表的是间冰期(段),对应于高的 Mn 元素含量;而灰色/黄色的层位代表的是冰期(段),几乎没有微体化石保存下来,可能在其顶部或底部出现有明显的 IRD 事件^[10,36,37]。

西北冰洋褐色层对比研究表明^[10,20,37],褐色层 B1 出现于 MIS 1,褐色层 B2a 及 B2b 出现于 MIS3 期,在 B2a 及 B2b 之间常常出现一个 Ca 的高峰,对应于 MIS3 期的 W3 层^[33,36-40],对于褐色层 B3 的年代划分仍有争议,其出现时间为 MIS 4 或者 MIS 5 顶部^[37,38]。

本文对 ARC7-P12 岩心地层年代框架的建立综合了 AMS ^{14}C 测年,柱状样沉积物的颜色旋回以及 Mn 和 Ca 元素相对含量,有孔虫丰度与生物地层学等多种指标,并与取自北风脊的 ARC3-P37 岩心的年代地层框架进行对比。

本文对 ARC7-P12 岩心挑选了 5 个层位的浮游有孔虫 Nps 壳体进行 AMS ^{14}C 测年(表 2),并对 ^{14}C 年龄进行日历年计算^[41,42],用的碳储库年龄分别为全新世 790 年和冰期 1400 年^[43]。

ARC7-P12 岩心共有 7 个褐色层,顶部 0~13 cm 为 B1,对应于有孔虫丰度的高峰;其中 Nps 的 AMS ^{14}C 测年显示(表 2),0~10cm 属于海洋同位素 1 期(Marine Isotope Stage-MIS)的沉积序列。ARC7-P12 岩心深度 15~58cm 的有孔虫丰度、Ca 和 Mn 的含量都较低,深度 60~62cm 的 AMS ^{14}C 日历校正年龄为 38.0 ka,属于 MIS 3(表 2)。深度 67~71 cm 为褐色层 B2a,77~84cm 为褐色层 B2b,对应于有孔虫丰度的高峰。其中深度 68~70 cm 的 Nps 壳体日历校正年龄为 47.0ka(表 2),属于 MIS3

期的沉积序列。ARC7-P12 岩心在 B2a 和 B2b 之间的 71~76cm 出现了 Ca 含量的最大值, Mn 含量和有孔虫丰度降低, 对应于该地区的 W3 层^[37]。

结合西北冰洋有孔虫的生物地层研究发现, 底栖有孔虫 *Bulimina aculeata* 丰度高峰位于 MIS5.1 期^[44], 在 ARC7-P12 岩心的褐色层 B3-B6 都出现了 *B. aculeata*。因此, 可以判断 ARC7-P12 岩心的褐色层 B3(151~169cm)属于 MIS 5.1 期。

通过与北风脊 ARC3-P37 岩心^[20]的地层对比发现, ARC7-P12 岩心的 7 个褐色层(B1—B6)能够与 ARC3-P37 岩心的 7 个褐色层 B1—B7 对应(图 2), 二者的有孔虫丰度也对应较好, 其高峰都出现于褐色层中。ARC7-P12 的褐色层 B1 对应于 ARC3-P37 岩心 B1 层(0~10cm)。褐色层 B2a 和 B2b 分

别对应于 ARC3-P37 岩心 B2a(104~114cm)及 B2b(118~132cm)层。褐色层 B3 对应于 ARC3-P37 岩心的褐色层 B3(156~174cm)。同时, ARC3-P37 岩心的褐色层 B3—B4 中同样出现了 *B. aculeata*, 验证了 ARC7-P12 岩心的褐色层 B3 的年龄。此后 ARC6-P12 岩心中的褐色层 B4—B6 分别与 ARC3-P37 岩心相对应(图 2)。

通过该岩心 AMS ¹⁴C 测年结果以及沉积物颜色变化, Ca 和 Mn 含量变化以及有孔虫丰度等数据, 结合区域对比, 初步建立了 ARC7-P12 的地层年代框架, 该岩心底部为 MIS 5, 深度 0~24cm 为 MIS 1; 深度 24~47cm 可能为 MIS 2; 深度 47~100cm 为 MIS 3; 深度 100~141cm 为 MIS 4; 深度 141~258cm 为 MIS 5(图 2)。

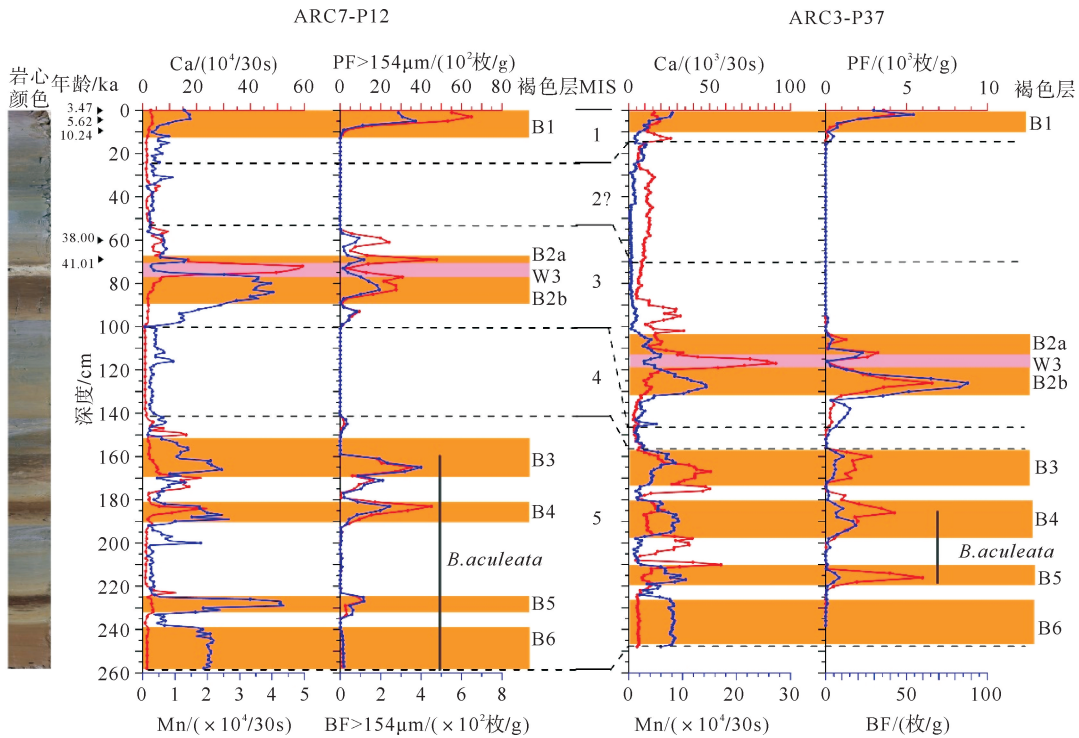


图 2 楚科奇海台 ARC7-P12 岩心沉积物的褐色层、XRF-Ca、Mn 元素相对含量、浮游(PF)和底栖(BF)有孔虫丰度、AMS ¹⁴C 测年结果与北风脊地区 ARC3-P37 岩心地层对比^[20]

Fig. 2 Regional correlation of core ARC7-P12 from the Chukchi Plateau and core ARC3-P37^[20] from the Northwind Ridge by their brown units, XRF-Ca and Mn content, foraminiferal abundance(PF and BF) and AMS ¹⁴C age results

表 2 楚科奇海台 ARC7-P12 的 Nps-AMS ¹⁴C 测年数据的校正

Table 2 Calibration of Nps-AMS¹⁴C dating of Core ARC7-P12

样品编号	深度/cm	AMS ¹⁴ C 年龄/aBP	碳储库校正后年龄/aBP	日历年龄/cal.aBP ^[41,42]
UCIT35857	0~2	4050±15	3260±15	3467±15
UCIT35858	4~6	5735±20	4945±20	5621±7
UCIT35859	8~10	9885±25	9095±25	10238±9
UCIT35860	60~62	35010±340	33610±340	38004±503
UCIT35861	68~70	45140±1190	43740±1190	47015±1215

2.2 ARC7-P12 的 IRD 含量变化

ARC7-P12 岩心的 IRD 组分含量中, $>63\mu\text{m}$ 变化范围为 $0.03\% \sim 32.64\%$, 平均值为 5.65% ; $>154\mu\text{m}$ 组分的变化范围为 $0.01\% \sim 27.36\%$, 平均值为 2.71% ; $>250\mu\text{m}$ 组分的变化范围为 $0.01\% \sim 25.04\%$, 平均值为 1.71% 。这 3 个组分的变化趋势基本一致(图 3), 出现了 7 次 IRD 含量大于 10% ($>63\mu\text{m}$) 的层位, 分别出现于 MIS 2 末期(深度 $27 \sim 36\text{cm}$, 判断此处为末次冰消期)、MIS 3 以及 MIS 5, 其他层位 IRD 含量较低。其中在 MIS 3 期的 W3 层, IRD 含量出现最高值; 同时, 在 MIS 3、MIS 5 晚期、MIS 5 的褐色层 B3 和 B4 之间的 IRD 高峰对应于较高的 Ca 元素的相对含量以及较低的有孔虫含量; 在 MIS 5 的褐色层 B4 和 B5 的 IRD 高峰对应于低的 Ca 元素的相对含量。在 MIS 4 和 MIS 2 的粗组分含量几乎为零。

2.3 ARC7-P12 的粒度组分变化

ARC7-P12 岩心中沉积物的平均粒径为 $3.37 \sim 41.98\mu\text{m}$, 平均值为 $9.64\mu\text{m}$, 高峰出现于 MIS 2 末期、MIS 3 以及 MIS 5, 其中深度褐色层 B3 之上出现最高峰。中值粒径的变化趋势和高峰与平均粒径几乎完全一致(图 3)。

ARC7-P12 岩心沉积物粒度组分中砂的百分含量为 $0 \sim 23.21\%$, 平均值为 2.59% 。MIS 5 期以来砂含量共出现过 5 次高峰, 分别出现在褐色层 B4、褐色层 B3 以及 B3 之上、褐色层 B2(包括 B2a、B2b 以及它们之间的 W3 层)以及褐色层 B1 之下, 其余层位砂含量都极低。粉砂的百分含量变化范围为 $25.74\% \sim 68.96\%$, 平均值为 43.79% , 粉砂的百分含量在 MIS 5 期较高, 到了 MIS 4 以及 MIS 2 明显减小。黏土的含量变化范围为 $28.53\% \sim 74.30\%$, 平均值为 53.62% 。自 MIS 5 以来, 粉砂含量变化与黏土含量变化呈显著负相关(图 3)。

2.4 ARC7-P12 粒度端元分析结果

ARC7-P12 岩心的沉积物粒度总体频率分布如图 4a 所示, 最大值分布曲线上有 3 个峰, 其中粒径较细的两个是独立的峰, 粒径最粗的峰由两个小峰组成。Wentje 的端元分析模型中用复相关系数 r^2 来表示理论模型和实际实测数据的拟合程度^[25], 当 r^2 越接近 1 时说明二者的拟合程度越好。图 4b 表示随着端元数目的增加, 复相关系数平均值的变化, 当端元数目为 2 时, r^2 达到 0.9, 之后随着端元数目的增加, r^2 越来越接近 1。为了更合理地解释我们的端元数据, 首先假设选择端元数目为 2、3、4、5, 观

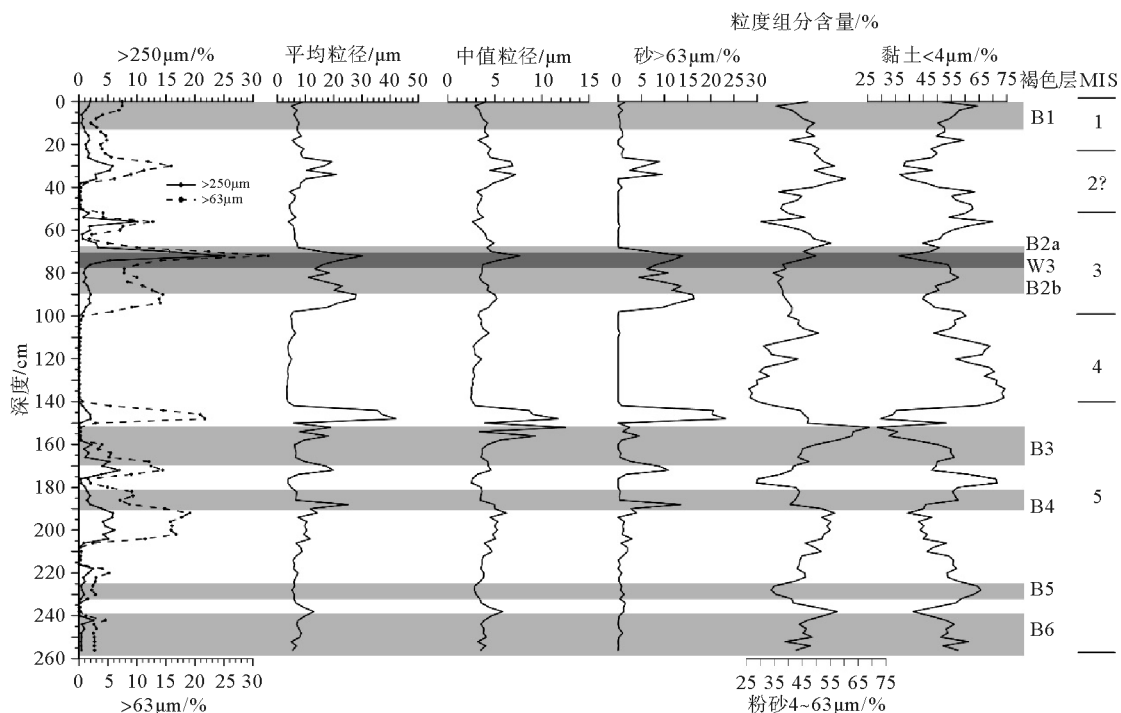


图 3 楚科奇海台 ARC7-P12 岩心 IRD 含量和粒度组分含量变化

Fig.3 IRD content and grain size variations of Core ARC7-P12 on the Chukchi Plateau

察其复相关系数随粒径的变化(图 4c),可以看出,虽然端元数目(End Member Number, EMN)为 2 或 3 时, r^2 的平均值都接近于 1,但是其复相关系数随粒径的变化相当大,2 端元在 $8\ \mu\text{m}$ 处出现最小粒级,3 端元在 7 和 $35\ \mu\text{m}$ 出现了较小粒级,说明二者的拟合结果并不符合要求。而端元数目为 4 和 5 时, r^2 的平均值在 0.99 左右,除两端的 r^2 值较小外,其 r^2 随粒级的变化小,同时端元数目为 5 时,平均复相关系数的增加与两端较粗和较细粒级的复相

关系数增加有关,主体粒级的复相关系数变化较小。因此,本研究中最合适的端元数目应为 4 个端元(End member, EM)。

根据岩心粒度数据的模拟,4 端元的粒径频率分布如图 4d 所示,端元(EM1)的粒径范围为 $40\sim 260\ \mu\text{m}$,峰态中值为 $110\ \mu\text{m}$ 。端元 2(EM2)的粒径范围为 $8\sim 70\ \mu\text{m}$,峰态中值为 $30\ \mu\text{m}$ 。端元 3(EM3)的粒径范围为 $2\sim 26\ \mu\text{m}$,峰态中值为 $9\ \mu\text{m}$ 。端元 4(EM4)的粒径范围为 $0.5\sim 6\ \mu\text{m}$ 和 $22\sim 44\ \mu\text{m}$,前者的峰比后者宽,峰态中值分别为 2 和 $31\ \mu\text{m}$,我们认为 $31\ \mu\text{m}$ 的小峰是由于统计噪音的失真(次峰累计值低于 1.5%),EM4 的峰态中值应为 $2\ \mu\text{m}$ 。

ARC7-P12 岩心粒度的 4 个端元组分的含量变化趋势如图 5 所示,EM1 的平均值为 6.78%, MIS 5 期以来,EM1 除 5 个高峰外,其含量几乎都为零;EM2 含量的平均值为 14.76%,其中在褐色层 B5

表 3 楚科奇海台 ARC7-P12 岩心粒度端元分析结果
Table 3 Results of End-member analysis of Core ARC7-P12 on the Chukchi Plateau

变量	端元 1 (EM1)	端元 2 (EM2)	端元 3 (EM3)	端元 4 (EM4)
分布范围/ μm	40~260	8~70	2~26	0.5~6
峰态中值/ μm	110	30	9	2
平均含量/%	6.78	14.76	35.93	42.52

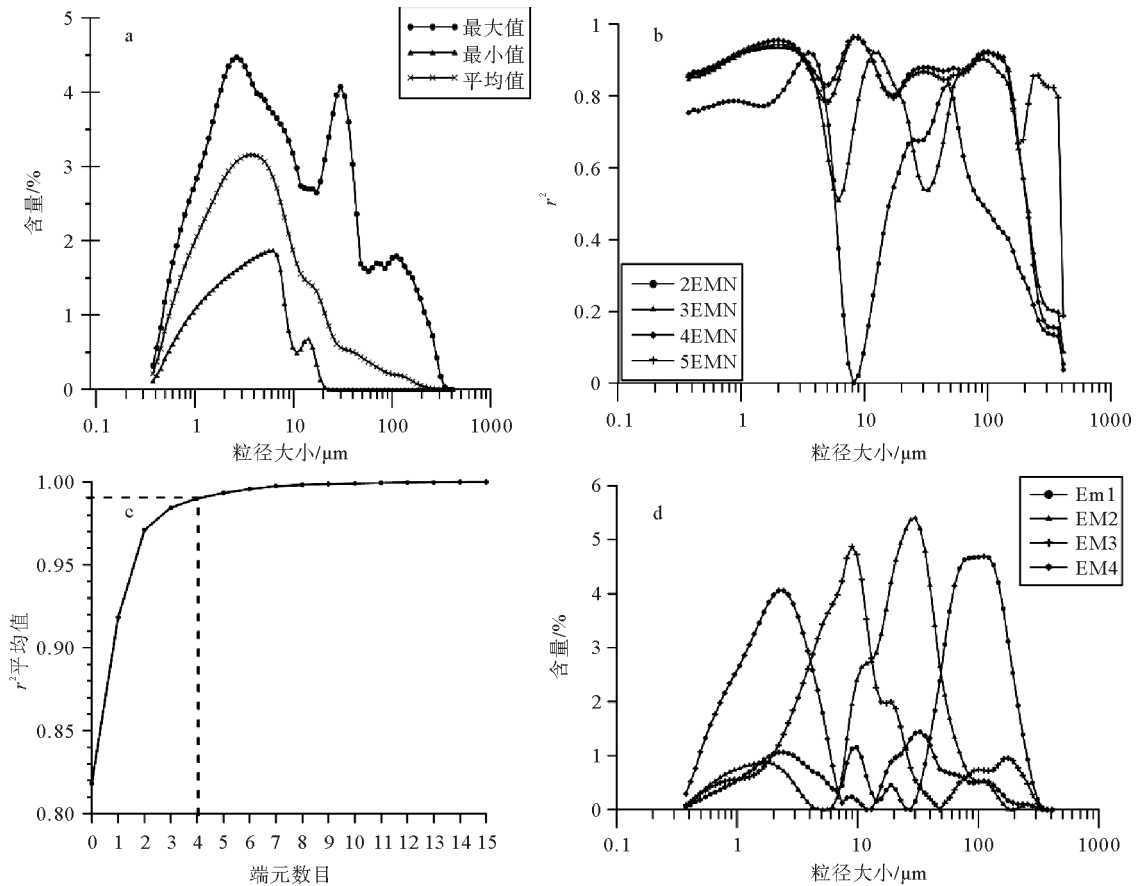


图 4 西北冰洋 ARC7-P12 岩心的粒度端元分析结果

(a) 总体粒度频率分布曲线;(b) 不同端元数目的各粒级复相关系数;(c) 复相关系数平均值;(d) 四端元粒度频率分布

Fig.4 End member modeling analysis results of the grain size distribution from Core ARC7-P12

(a) Total grain size frequencies; (b) Compound correlation coefficients of grain size fractions of different end member numbers;

(c) Average of compound correlation coefficients; (d) Frequencies of four end-members

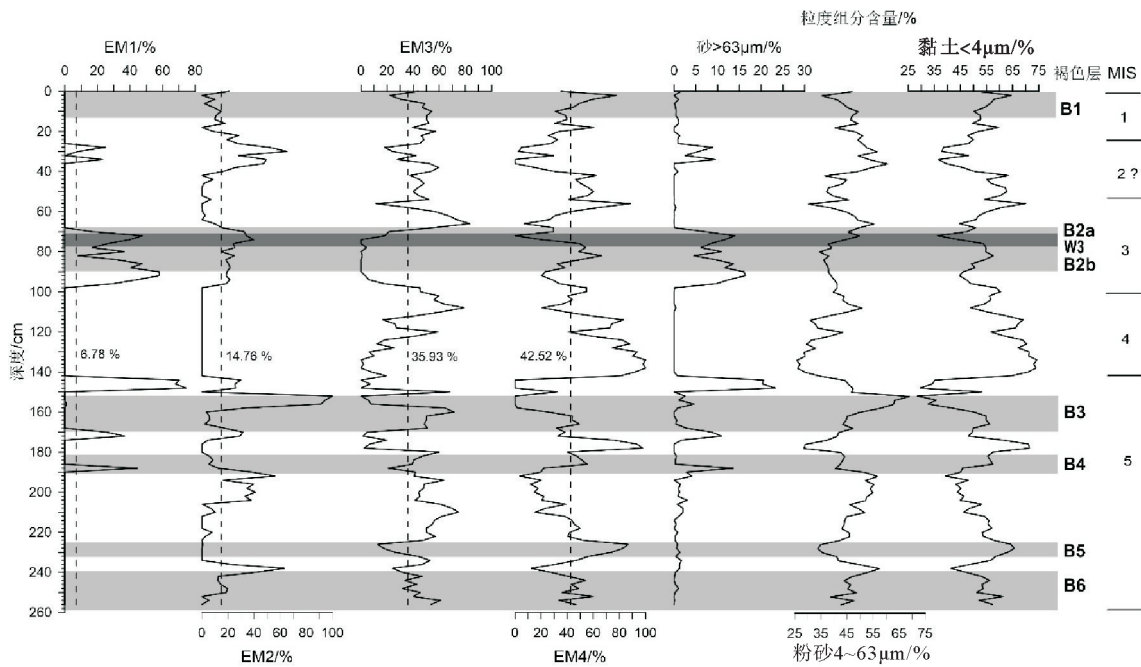


图5 西北冰洋 ARC7-P12 各端元组分含量变化特征与粒度变化对比(图中虚线表示各组分平均值)

Fig.5 Relative abundances of four end-members and grain size composition of Core ARC7-P12

Dash lines in each figure show the average value

与 B6 之间、B4 与 B5 之间都有高值；在褐色层 B3 出现了两个高峰；B3 之上、褐色层 B2 (包括 B2a、B2b 以及它们之间的 W3 层)，B1 之下也出现高值，其余均低于平均值，其含量变化趋势与 EM1 相似。EM3 含量平均值为 35.93%，在 B1 至 B2 顶部 EM3 的含量基本围绕平均值波动。EM4 含量的平均值为 42.52%，在褐色层 B3 之上两次达到最大值 1，说明此时只有 EM4 所代表的粒级的沉积物。

3 讨论

3.1 IRD 含量变化的环境意义

对北冰洋深海沉积物中 IRD 的研究认为， $>250\mu\text{m}$ 的粗颗粒物主要是来自于冰山和大冰块搬运，而 $<250\mu\text{m}$ 的颗粒物是海冰搬运的^[10,17,45]。从 ARC7-P12 岩心 MIS 5 以来的 IRD 含量变化可以看出，较粗的 IRD ($>250\mu\text{m}$) 含量出现在 MIS 2 晚期的末次冰消期，MIS 3 和 MIS 5 含量最高，平均粒径、中值粒径与砂组分 ($>63\mu\text{m}$) 百分含量的高值也出现在这些时期 (图 3)，反映可能随着气候变暖，北冰洋冰盖的崩裂以及表层波弗特环流的增强导致携带 IRD 的冰山和大冰块能够被搬运到此处并沉积下来 (图 3)。其中，MIS 3 和 MIS 5 的 IRD 高峰对应于较高的 Ca 元素相对含量

(图 3)，表明此时该地区来源于加拿大北极群岛的碎屑碳酸岩含量增加^[46]。在冰期 (MIS2, MIS4)，低的 IRD 含量对应于较高的黏土组分含量^[38]，这是由于冰盖延伸造成的冰封环境和波弗特环流的减弱，导致粗的 IRD 无法搬运至研究区，较粗的沉积物很难被搬运并沉积下来。而在冰盖覆盖的环境中，由底流搬运的黏土级沉积物受到表层环流变化的影响相对较小^[28]，因此黏土组分相对含量增加。

3.2 粒度端元的环境指示意义

粒度端元分析显示 (图 4)，EM1 和 EM2 的粒径较大，EM3 和 EM4 的粒径较小。EM1 和 EM2 与 IRD 含量的变化趋势基本相同，EM2 的粒径范围为 $8\sim70\mu\text{m}$ ，主要是由粉砂组成；EM1 的粒径范围为 $40\sim260\mu\text{m}$ ，主要由砂组成。因此，EM1 和 EM2 可能分别指示冰山和海冰的搬运。Prins 等对北大西洋沉积物粒度分布的端元分析结果对比发现，4 个不同的端元 PEM1—4 对应于 3 个主要的搬运机制，分别是冰山、海冰和底流。其中，PEM1 和 PEM2 的最大峰态值大约为 250 和 $25\mu\text{m}$ ，被认为分别来自于冰山及海冰搬运的沉积物^[28,47]。与 Prins 等人的结果对比发现^[28]，ARC7-P12 中两个端元 EM1 和 EM2 与 Prins 的两个粗组分端元粒径范围较接近^[28]，可能分别代表冰山和海冰搬运的沉积物。因此，ARC7-P12 中 EM1 和 EM2 分别指示冰

山和海冰搬运的沉积物。EM1 和 EM2 的含量越高,代表由冰山和海冰搬运到研究区的沉积物越多。

对于粒径较小的沉积物,Prins 等人的端元分析结果认为^[28],端元 PEM3 和 PEM4 分别代表能量较低的深海底流以及雾状层搬运的沉积物。ARC7-P12 端元分析中的 EM3 和 EM4 峰态值分别为 9 和 2 μm ,与 Prins 等人的端元 PEM3(峰态值 8 μm)和 PEM4(峰态值 2 μm)几乎完全一致^[28]。因此,由细粒沉积物组成的端元 EM3 及 EM4 分别代表能量较低的底流以及雾状层搬运的沉积物^[28,48]。端元 EM3 和 EM4 含量越高说明波弗特环流的作用越小,由底流和雾状层带来的沉积物越多。

3.3 沉积物不同搬运机制所指示的环境意义

由于粒度端元分析所得到的不同端元指示了不同的沉积物搬运机制,进而反映了不同的环境特征。通过对 ARC7-P12 岩心粒度不同端元的环境指示意义进行分析可以发现,MIS 5 期以来,不同的端元组分随着冰期-间冰期旋回而变化(图 6),分析端元组分的变化特征有助于我们重建当时的沉积环境和沉积过程。

在 MIS 5 期,ARC7-P12 粒度端元的冰山指标(EM1)除 3 个高峰外均为零,3 个高峰与同时期 IRD($>250\mu\text{m}$)含量高峰对应,说明当时存在冰山

搬运的沉积物输入,这些高峰同时也对应于 Ca 元素的高峰,指示了高的碳酸岩含量,说明这些碎屑碳酸岩主要来源于加拿大北极群岛的古生代碳酸岩露头,被冰山及大冰块所携带,这些携带碳酸岩碎屑的冰山和大冰块被波弗特环流搬运到楚科奇海台沉积下来^[22,49]。海冰端元(由海冰搬运的沉积物,EM2)的峰值基本可以与粉砂 4~63 μm 含量的峰值对应,沉积物是以粉砂为主(图 5)。这是由于从间冰期到冰期过渡的过程中,气候慢慢变冷,海冰逐渐开始形成,但此时冰山还未大量生成,因此该时期沉积物主要以海冰搬运为主。

在冰期 MIS 4 以及 MIS 2 中(图 6),几乎没有粗颗粒 IRD 沉积,而指示底流和雾状层搬运的指标(EM3 和 EM4)明显增加,沉积物以细粉砂和黏土组分为主,这两个时期的沉积物主要的搬运动力都是底流和雾状层搬运,说明在 MIS 4 和 MIS 2 期,表层波弗特环流发生改变^[16,17],粗颗粒沉积物难以被搬运到研究区。相反,能量较低的底流和雾状层受到的影响很小,因此能够继续搬运细颗粒沉积物^[35],导致沉积物中的 EM3 和 EM4 含量显著增加。

与冰期的情况不同,在 MIS 3,气候转暖,冰盖的崩塌以及表层洋流的增强,使得冰山和大冰块携带、搬运并卸载陆源碎屑到楚科奇海台的沉积物中^[10,12,17,22,33,38,49]。因此,指示粗组分(端元 EM1

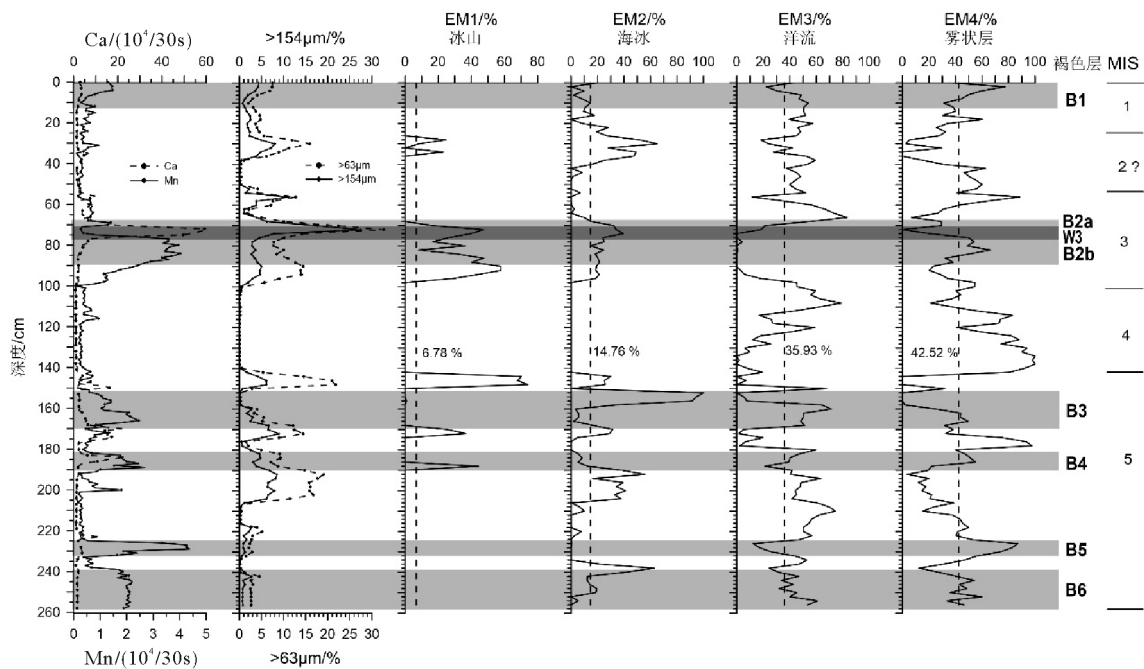


图 6 西北冰洋 ARC7-P12 岩心粒度端元环境指标(图中虚线表示各组分平均值)

Fig.6 Proxies of end-members data of Core ARC7-P12, compared with IRD contents and Ca/Mn variations

Dash lines in each figure show the average value

和 EM2 的沉积物)的含量增加,细颗粒沉积物(端元 EM3 和 EM4)的相对含量逐渐下降。在 MIS 3 端元 EM1 又出现了一个高峰,对应于 IRD 和 Ca 元素的高峰,说明该时期的沉积物也是主要来自于加拿大北极群岛的古生代碳酸盐岩露头。虽然 MIS3 与 MIS5 都对应于高 Ca 峰、高的 IRD 值,但是 MIS3 的 Ca 峰远高于 MIS5,同时在 MIS5 的 B3 和 B5 与 B6 之间以粉砂为主的层位在 MIS3 并没有出现(图 3),这可能是由于两个主要的表层环流(波弗特环流以及穿极流)的位置以及强度在历史上发生变化所导致^[50]。

在末次冰消期,较粗颗粒 IRD 沉积物含量增加,说明在冰消期随着冰盖消融,表层环流又开始增强。在开阔大洋的环境下,较粗组分可以重新被冰山、大冰块以及海冰搬运到研究区,但是该时期 Ca 元素的含量较低,说明楚科奇海台在该时期的 IRD 可能存在着与 MIS 3 和 MIS 5 不同的来源。

4 结论

(1)通过对西北冰洋楚科奇海台 ARC7-P12 岩心沉积物的多项指标分析,结合北风脊 ARC3-P37 的地层对比,建立了 ARC7-P12 岩心的年代地层框架,深度 0~24cm 为深海氧同位素 MIS1 期;深度 24~47cm 为 MIS 2;深度 47~100cm 为 MIS 3;深度 100~141cm 为 MIS 4 期;深度 141~258cm 为 MIS 5。

(2) MIS 5 以来,ARC7-P12 岩心的 IRD (>250 μm)含量在 MIS 2 末期、MIS 3 和 MIS5 含量较高,指示随着气候变暖,冰盖的崩裂以及表层洋流的增强使冰山和大冰块能够被搬运到研究区。在 MIS 5 和 MIS 3 出现的几次 IRD 高峰分别都对应于较高的 Ca 元素的相对含量,因此,这些 IRD 主要来自于加拿大北极群岛的古生代碳酸岩露头。在冰期,由于冰盖扩张造成的冰封环境和波弗特环流的减弱,导致 IRD 急剧减少,因此在 MIS 4 及 MIS 2 的 IRD 含量几乎为零。

(3)楚科奇海台 ARC7-P12 岩心的粒度组分变化说明该岩心的沉积物主要由粉砂和黏土组成,通过粒度端元模拟分析获得了 4 个端元,其峰态中值分别为 110、30、9 和 2 μm ,分别代表着由冰山、海冰、洋流以及底流搬运的沉积物。

(4)在冰期,沉积物以底流搬运为主,这是由于气候寒冷,冰盖扩张以及表层洋流的减弱,粗颗粒沉积物(EM1 及 EM2)难以到达研究区。而底流受到

的影响相对较小,因此冰期以底流(EM3)和雾状层(EM4)搬运为主。间冰期的变化情况较为复杂,MIS 5 和 MIS 3 存在 4 次粗组分的输入增加。其中 MIS 5 只有晚期是海冰搬运占主导,指示了气候向冷过渡的过程中海冰逐渐开始形成,而冰山尚未大量生成,因此沉积物以海冰搬运为主。其余 3 次均以冰山搬运为主,此时气候转暖,冰架崩裂表层洋流增强,冰山和大冰块携带陆源碎屑到楚科奇海台沉积下来。在末次冰消期,高的 IRD 含量峰表明随着冰盖消融,环流又开始增强,从而导致粗组分能够再次被搬运到研究区,但 IRD 来源与 MIS 5 和 MIS 3 不同。

致谢:本实验工作是由国家财政部资助,国家海洋局极地办公室组织实施的“中国第七次北极考察项目(简称 CHINARE-2016)”的一部分。参加此项工作的单位有中国极地研究中心、国家海洋局第一海洋研究所、国家海洋局第二海洋研究所、国家海洋局第三海洋研究所、同济大学等。感谢中国第七次北极科考队的全体科考队员和“雪龙”号全体船员为沉积物样品的采集所付出的艰辛努力。

参考文献 (References)

- [1] Cronin T M, Dwyer G S, Caverly E K, et al. Enhanced arctic amplification began at the mid-brunhes event ~400000 years ago[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 14475.
- [2] 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.
- [3] Moritz R E, Bitz C M, Steig E J. Dynamics of recent climate change in the Arctic[J]. *Science*, 2002, 297(5586): 1497-1502.
- [4] Serreze M C, Barry R G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis [J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 77(1-2): 85-96.
- [5] Stroeve J C, Serreze M C, Holland M M, et al. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis [J]. *Climatic Change*, 2012, 110(3-4): 1005-1027.
- [6] Jakobsson M, Andreassen K, Bjarnadóttir L R, et al. Arctic Ocean glacial history [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 92: 40-67.
- [7] Stein R, Fahl K, Gierz P, et al. Arctic Ocean sea ice cover during the penultimate glacial and the last interglacial [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 373.
- [8] 陈立奇, 赵进平, 卞林根, 等. 影响北极地区迅速变化的一些关键过程研究 [J]. *极地研究*, 2003, 15(4): 283-302. [CHEN Liqi, ZHAO Jinping, BIAN Lin'gen, et al. Study on key processes affecting rapid changes in the Arctic [J]. *Chinese*

- Journal of Polar Research, 2003, 15(4): 283-302.]
- [9] 王汝建, 肖文申, 成鑫荣, 等. 北冰洋西部晚第四纪浮游有孔虫氧碳同位素记录的海冰形成速率[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6): 643-651. [WANG Rujian, XIAO Wenshen, CHENG Xinrong, et al. Sea ice formation rates recorded in planktonic foraminiferal oxygen and carbon isotopes in the western Arctic Ocean during the Late Quaternary[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(6): 643-651.]
- [10] Wang R J, Xiao W S, 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.
- [11] Dong L S, Liu Y G, Shi X F, et al. Sedimentary record from the Canada Basin, Arctic Ocean: implications for late to middle Pleistocene glacial history[J]. Climate of the Past, 2017, 13(5): 511-531.
- [12] Phillips R L, Grantz A. Regional variations in provenance and abundance of ice-rafted clasts in Arctic Ocean sediments: implications for the configuration of late Quaternary oceanic and atmospheric circulation in the Arctic[J]. Marine Geology, 2001, 172(1-2): 91-115.
- [13] 高爱国, 王汝建, 陈建芳, 等. 楚科奇海与加拿大海盆表层沉积物表观特征及其环境指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6): 49-55. [GAO Aiguo, WANG Rujian, CHEN Jianfang, et al. The appearance features and environmental indication of surface sediments in Chukchi Sea and Canada Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(6): 49-55.]
- [14] 孙烨忱, 王汝建, 肖文申, 等. 西北冰洋表层沉积物中生源和陆源粗组分及其沉积环境[J]. 海洋学报, 2011, 33(2): 103-114. [SUN Yechen, WANG Rujian, XIAO Wenshen, et al. Biogenic and terrigenous coarse fractions in surface sediments of the western Arctic Ocean and their sedimentary environments[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(2): 103-114.]
- [15] Jakobsson M, Nilsson J, Anderson L, et al. Evidence for an ice shelf covering the central Arctic Ocean during the penultimate glaciation [J]. Nature Communications, 2016, 7: 10365.]
- [16] Stårz M, Gong X, Stein R, et al. Glacial shortcut of Arctic sea-ice transport[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 357-358: 257-267.
- [17] Darby D A, Zimmerman P. Ice-rafted detritus events in the Arctic during the last glacial interval, and the timing of the Innuitian and Laurentide ice sheet calving events[J]. Polar Research, 2008, 27(2): 114-127.
- [18] Polyak L, Curry W B, Darby D A, et al. Contrasting glacial/interglacial regimes in the western Arctic Ocean as exemplified by a sedimentary record from the Mendeleev Ridge[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, 203(1-2): 73-93.
- [19] Polyak L, Edwards M H, Coakley B J, et al. Ice shelves in the Pleistocene Arctic Ocean inferred from glaciogenic deep-sea bedforms[J]. Nature, 2001, 410(6827): 453-457.
- [20] 段肖, 王汝建, 肖文申, 等. 西北冰洋北风脊氧同位素 5 期以来的水体结构变化: 来自有孔虫组合及其氧碳同位素的证据[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(3): 61-71. [DUAN Xiao, WANG Rujian, XIAO Wenshen, et al. Water column structure changes on the Northwind Ridge, western Arctic Ocean since the marine isotope stage 5: evidences from foraminiferal assemblages and their oxygen and carbon isotopes[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(3): 61-71.]
- [21] 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 Jing, WANG Rujian, CHEN Jianfang, et al. Late Quaternary terrigenous deposits from core P31 on the Chukchi plateau of Western Arctic Ocean and their Paleooceanographic and Paleoclimatic implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(3): 77-86.]
- [22] 章陶亮, 王汝建, 肖文申, 等. 西北冰洋 Chukchi Borderland 晚第四纪冰筏碎屑记录及其古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(3): 49-60. [ZHANG Taoliang, WANG Rujian, XIAO Wenshen, et al. Records of ice rafted detritus and their Paleoclimatic implications at Chukchi Borderland, Western Arctic Ocean[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(3): 49-60.]
- [23] Dietze E, Hartmann K, Diekmann B, et al. An end-member algorithm for deciphering modern detrital processes from lake sediments of Lake Donggi Cona, NE Tibetan Plateau, China [J]. Sedimentary Geology, 2012, 243-244: 169-180.
- [24] Wang R, Zhang Y Z, Wünnemann B, et al. Linkages between Quaternary climate change and sedimentary processes in Hala Lake, northern Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 107: 140-150.
- [25] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem[J]. Mathematical Geology, 1997, 29(4): 503-549.
- [26] 梅静, 王汝建, 章陶亮, 等. 西北冰洋楚科奇海台 08P31 孔晚第四纪的古海洋学记录[J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 121-135. [MEI Jing, WANG Rujian, ZHANG Taoliang, et al. Paleooceanographic records of core 08P31 on the Chukchi Plateau, Western Arctic Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(5): 121-135.]
- [27] Holz C, Stuut J W, Henrich R. Terrigenous sedimentation processes along the continental margin off NW Africa: implications from grain - size analysis of seabed sediments[J]. Sedimentology, 2004, 51(5): 1145-1154.
- [28] Prins M A, Bouwer L M, Beets C J, et al. Ocean circulation and iceberg discharge in the glacial North Atlantic: Inferences from unmixing of sediment size distributions[J]. Geology, 2002, 30(6): 555-558.
- [29] Bauch D, Carstens J, Wefer G. Oxygen isotope composition of living *Neogloboquadrina pachyderma* (sin.) in the Arctic Ocean[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 146(1-

- 2): 47-58.
- [30] Smith L M, Miller G H, Otto-Bliesner B, et al. Sensitivity of the northern hemisphere climate system to extreme changes in Holocene Arctic sea ice[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(5-7): 645-658.
- [31] Xiao W S, Wang R J, Polyak L, et al. Stable oxygen and carbon isotopes in planktonic foraminifera *Neogloboquadrina pachyderma* in the Arctic Ocean: An overview of published and new surface-sediment data[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 397-408.
- [32] Backman J, Jakobsson M, Løvlie R, et al. Is the central Arctic Ocean a sediment starved basin? [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(11-13): 1435-1454.
- [33] Adler R E, Polyak L, Ortiz J D, et al. Sediment record from the western Arctic Ocean with an improved Late Quaternary age resolution: HOTRAX core HLY0503-8JPC, Mendeleev Ridge[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 68(1-2): 18-29.
- [34] Jakobsson M, Løvlie R, Al-Hanbali H, et al. Manganese and color cycles in Arctic Ocean sediments constrain Pleistocene chronology[J]. *Geology*, 2000, 28(1): 23-26.
- [35] Löwemark L, O'Regan M, Hanebuth T J J, et al. Late Quaternary spatial and temporal variability in Arctic deep-sea bioturbation and its relation to Mn cycles[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 365-366: 192-208.
- [36] Wang R J, Polyak L, Xiao W S, et al. Late-Middle Quaternary lithostratigraphy and sedimentation patterns on the Alpha Ridge, central Arctic Ocean: Implications for Arctic climate variability on orbital time scales[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 181: 93-108.
- [37] Stein R, Matthiessen J, Niessen F, et al. Towards a better (litho-) stratigraphy and reconstruction of quaternary paleo-environment in the amerasian basin (Arctic Ocean)[J]. *Polarforschung*, 2010, 79(2): 97-121.
- [38] Polyak L, Bischof J, Ortiz J D, et al. Late Quaternary stratigraphy and sedimentation patterns in the western Arctic Ocean[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 68(1-2): 5-17.
- [39] Cronin T M, Deninno L H, Caverly E K, et al. Quaternary ostracoda from the Arctic Ocean: sea ice and ocean circulation variability over orbital timescales [C]//Proceedings of the 17th International Symposium on Ostracoda. Roma, Italy: Societa Siciliana di Scienze Naturali, 2013, 37: 91-92.
- [40] Matthiessen J, Niessen F, Stein R, et al. Pleistocene glacial marine sedimentary environments at the eastern mendeleev ridge, arctic ocean[J]. *Polarforschung*, 2010, 79(2): 123-137.
- [41] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50000 Years cal BP[J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [42] Stuiver M, Reimer P J. Extended ¹⁴C data base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C Age calibration program[J]. *Radiocarbon*, 1993, 35(1): 215-230.
- [43] Hanslik D, Jakobsson M, Backman J, et al. Quaternary Arctic Ocean sea ice variations and radiocarbon reservoir age corrections[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(25-26): 3430-3441.
- [44] Cronin T M, Deninno L H, Polyak L, et al. Quaternary ostracode and foraminiferal biostratigraphy and paleoceanography in the western Arctic Ocean[J]. *Marine Micropaleontology*, 2014, 111: 118-133.
- [45] 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(C9): C09008.
- [46] Polyak L, Best K M, Crawford K A, et al. Quaternary history of sea ice in the western Arctic Ocean based on foraminifera[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 79: 145-156.
- [47] Weltje G J, Prins M A. Genetically meaningful decomposition of grain-size distributions[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202(3): 409-424.
- [48] Hamann Y, Ehrmann W, Schmiedl G, et al. Sedimentation processes in the Eastern Mediterranean Sea during the Late Glacial and Holocene revealed by end-member modelling of the terrigenous fraction in marine sediments[J]. *Marine Geology*, 2008, 248(1-2): 97-114.
- [49] 章陶亮, 王汝建, 陈志华, 等. 西北冰洋楚科奇海台 08P23 孔氧同位素 3 期以来的古海洋与古气候记录[J]. *极地研究*, 2014, 34(1): 46-57. [ZHANG Taoliang, WANG Rujian, CHEN Zhihua, et al. Paleoceanographic and Paleoclimatic records of core 08P23 from the Chukchi Plateau, Western Arctic Ocean, since MIS 3[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 34(1): 46-57.]
- [50] Fagel N, Not C, Gueibe J, et al. Late Quaternary evolution of sediment provenances in the Central Arctic Ocean: mineral assemblage, trace element composition and Nd and Pb isotope fingerprints of detrital fraction from the Northern Mendeleev Ridge[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 92(4): 140-154.