

DOI: 10. 3724/SP. J. 1140. 2015. 03049

西北冰洋 Chukchi Borderland 晚第四纪 冰筏碎屑记录及其古气候意义

章陶亮, 王汝建, 肖文申, 段肖, 胡正莹, 梅静

(同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:西北冰洋楚科奇边缘地区沉积模式复杂, 冰期-间冰期旋回影响着周围北美冰盖和欧亚冰盖的发育以及波弗特环流的位置与强弱, 对于该地区的沉积物来源有很大影响。通过对采自西北冰洋楚科奇边缘地区的 ARC4-BN03、ARC3-P37 和 ARC4-MOR02 岩心的多指标分析以及与邻近 6 个岩心的对比, 发现在 MIS 5 以来, 北风脊地区可以识别出多次 IRD 事件, 其中都有加拿大北极群岛的贡献。在 MIS 3, 楚科奇海台和楚科奇深海平原较北风脊沉积速率更高, 其 IRD 事件除了加拿大北极群岛的贡献, 也可能有来源于欧亚大陆的输入。在 MIS 2, 楚科奇海台和楚科奇深海平原的沉积速率急剧降低甚至中止, 其 IRD 事件主要来源于欧亚大陆和东北冰洋边缘海, 而北风脊地区 IRD 事件仍来源于加拿大北极群岛。这可能是由于冰期楚科奇海台和楚科奇深海平原可能受到一个冰盖的覆盖, 阻止了北美地区沉积物的输入; 而此时北风脊地区正处于这个冰盖的边缘, 未被完全覆盖。在间冰期, 该冰盖消亡, 整个楚科奇边缘地区的 IRD 事件都有加拿大北极群岛的贡献。

关键词:冰筏碎屑事件; 晚第四纪; 北极冰盖; 西北冰洋; 楚科奇海台; 北风脊

中图分类号: P736. 2

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2015)03-0049-12

北极地区作为全球系统的一部分, 是全球气候变化的驱动器和响应器之一^[1-2], 对于全球气候变化更为敏感^[3], 尤其是近十年来, 北极地区大气温度升高的速率是低纬地区气温升高速率的近两倍^[4-5], 将对未来全球气候变化产生重要影响。为了更好地理解现代北极的气候变化, 古环境研究有助于我们了解北极地区长期气候变化方式, 并根据地质历史时期与现在相似的气候条件(如第四纪间冰期)制作长期气候变化的模型^[6-7]。

楚科奇边缘(Chukchi Borderland, CB)地区位于北冰洋西部, 包括楚科奇海台和北风脊, 是太平洋水进入北冰洋的必经通道^[8], 能较好地反映北冰洋西部的沉积环境, 以及冰期-间冰期旋回中白令海的开闭对于该地区沉积过程的影响。西北冰洋沉积物地层学研究发现, 由于缺乏连续的钙质生物沉积, 深

海沉积物的有孔虫丰度^[9], Ca 和 Mn 元素相对含量可以作为北冰洋地层划分的依据^[6, 10-14]。同时, 沉积物中的冰筏碎屑(Ice-Rafted Detritus, IRD)也是北冰洋沉积物中的常见组分, 从陆地冰川分离出来进入海洋的冰山和大冰块会携带、搬运并卸载陆源碎屑到海洋沉积物中^[15-18]。北冰洋的 IRD 组分不仅指示了这些陆源碎屑沉积物的来源, 还能反映冰期-间冰期旋回中北冰洋周围冰盖、冰山以及洋流的变化历史^[19-21], 例如冰期的 IRD 事件与北美劳伦泰德(Laurentide)冰盖和伊努伊特(Innuitian)冰盖的崩裂时间一致^[22]。过去对于北极冰盖的研究认为, 末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM)欧亚冰盖终止于拉普捷夫(Laptev)海的边缘, 楚科奇海和东西伯利亚海的大部分地区被认为没有冰盖^[23-25]。然而, 最新的地球物理和海底地形与地貌形态的研究表明, 东西伯利亚海至楚科奇海西部在冰期存在一个单独的冰盖^[26-27](图 1), 该冰盖厚达 1 千米, 对反照率、海洋和大气环流产生重要影响。本文试图通过分析 2003、2008 和 2010 年中国第 2~4 次北极科学考察在西北冰洋楚科奇海和北风脊钻取的 6 个岩心沉积物, 并结合国外在邻近区域的冰筏碎屑研究成果, 研究楚科奇海和北风脊晚第四纪以来的 IRD 事件以及其指示的晚第四纪北极冰盖和气候的演化。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41030859); 国家自然科学基金中俄合作与交流项目(41211120173); 南北极环境综合考察与评估专项项目(CHINARE2015-03-02); 国家海洋局极地考察办公室对外合作支持项目(IC201105); 中国地质调查局地质调查工作项目(水 [2015]02-013-012)

作者简介:章陶亮(1989—), 男, 博士生, 主要从事海洋地质学及古环境研究, E-mail: ztl1989@hotmail.com

通讯作者:王汝建(1959—), 男, 教授, 主要从事海洋地质学、古海洋学与古气候学研究, E-mail: rjwang@tongji.edu.cn

收稿日期: 2015-04-10; **改回日期:** 2014-04-30. 周立君编辑

1 现代海洋环境

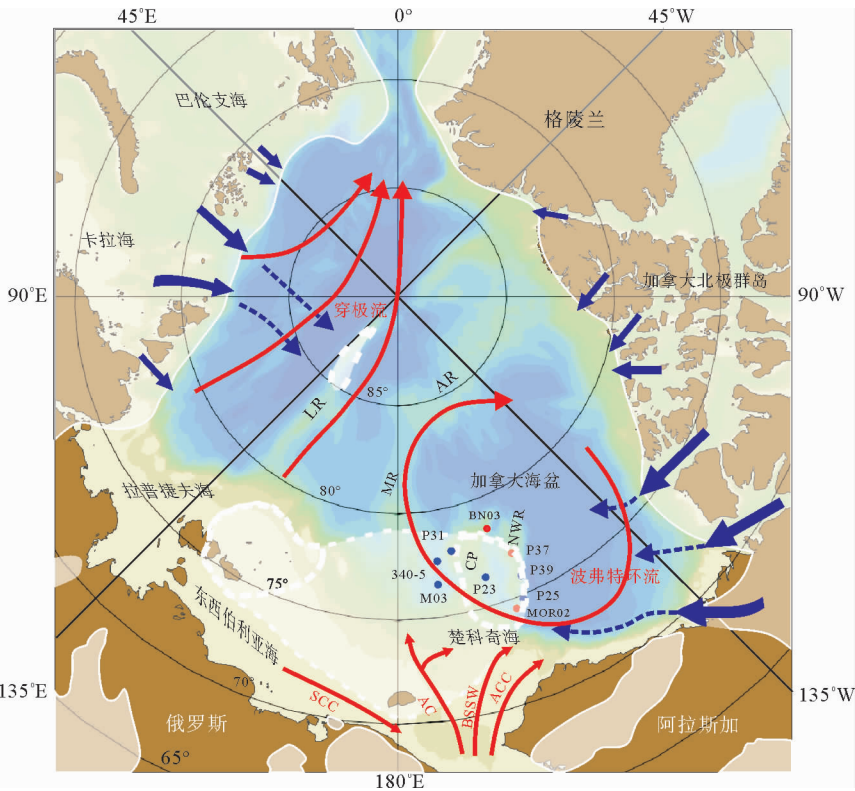
北冰洋接受了来源于欧亚大陆和北美大陆大量的淡水注入,约占全球入海径流总量的 10%^[28-30],是冰期冰架和海冰的主要来源。其表层环流主要由波弗特环流(Beaufort Gyre)和穿极流(Transpolar drift)组成,前者以加拿大海盆为中心顺时针流动,将来自北冰洋周缘陆地的沉积物搬运到美亚海盆,甚至欧亚海盆;而后者从俄罗斯北极的边缘海陆架穿越北极点,沿格陵兰岛东侧流向北大西洋(图 1),并将沉积物输送到欧亚海盆和北大西洋^[31]。西北冰洋楚科奇边缘地区常年被海冰覆盖^[32],并受到波弗特环流控制,是北冰洋与太平洋进行能量与物质交换的区域^[33],通过很浅的白令海峡(约 50 m)与

太平洋相连。受楚科奇海海底地形影响,太平洋水进入楚科奇边缘地区后分为三支进入北冰洋,由东向西依次为:阿纳德流、白令海陆架水和阿拉斯加沿岸流^[34]。同时,西伯利亚沿岸流从东拉普捷夫海(Laptev Sea)流至东西伯利亚海,最后到达楚科奇海边缘地区,向该地区输入来自欧亚大陆的陆源物质^[35-36]。

2 材料与方法

2.1 材料来源

本次研究的材料来源于中国第三(2008)和第四次(2010)北极科学考察在西北冰洋楚科奇海台和北风脊取得的 ARC4-BN03、ARC3-P37(段肖等,本专



图中红色实线表示表层洋流,白色实线表示过去认为的冰期大陆冰盖的范围^[40],白色粗虚线表示北冰洋海洋冰盖范围,白色点线表示冰期北冰洋海洋冰盖的范围^[26],蓝色箭头表示冰流方向。红色点表示本文研究站位,蓝色点为引用站位,其信息可见表 1。图中 CP:楚科奇海台;NWR:北风脊;MR:门捷列夫脊;LR:罗蒙索诺夫脊;AR:阿尔法脊;AC:阿纳德流;BSSW:白令海陆架水;ACC:阿拉斯加沿岸流;SCC:西伯利亚沿岸流。

Red full lines show surface currents, white full lines show continental ice sheet^[40], thick white dotted lines show marine ice sheets, white dotted lines show east Siberia ice sheet^[26]. Blue arrows show ice flow directions. Red points show studied sites in this paper, and blue points show the reference sites, of which the information is shown in Table 1. CP: Chukchi Plateau;NWR: North Wind Ridge;MR: Mendeleev Ridge;LR: Lomonosov Ridge;AR: Alpha Ridge;AC: Anadry Current;BSSW: Bering Sea Shelf Water;ACC: Alaska Coastal Current;SCC: Siberian Coastal Current

图 1 西北冰洋楚科奇海台和北风脊相关站位的位置以及表层洋流分布

Fig. 1 Map of oceanographic settings showing the location of related cores on Chukchi Plateau and Northwind Ridge

辑)和 ARC4-MOR02 岩心沉积物,以及国内外研究者对于楚科奇海台和北风脊相关岩心的研究数据(表 1,图 1)。其中,位于楚科奇海台的 ARC4-BN03 岩心长度为 145 cm,位于北风脊的 ARC3-P37 和 ARC4-MOR02 岩心长度分别为 246 和 218 cm,3 个岩心均以 2 cm 间隔取样,总计共获得 301 个样品。其余岩心 ARC2-M03、ARC3-P23、ARC3-P31、P1-92-AR-P25 和 P1-92-AR-P39 的数据分别来自于 Wang 等、章陶亮等、梅静等、Yurco 等和 Cronin 等^[21,37-39]。

2.2 方法

本文中对楚科奇海台和北风脊的 BN03、P37 和 MOR02 等 3 个岩心沉积物所作的分析包括:XRF 元素相对含量扫描、IRD 含量测定、浮游和底栖有孔虫丰度统计以及浮游有孔虫 *Neoglobobadrina pachyderma* (sin.)(Nps)的 AMS¹⁴C 测年。

XRF 元素相对含量扫描:柱状样剖开后,切割成 1 m 左右一段,将表面刮平整,将专业测试薄膜覆在表面上。使用荷兰 AVAATECH 公司制造的 XRF Core-Scanner 元素扫描分析仪对柱状样进行元素相对含量无损扫描测试,分辨率为 1 cm,测得从 Al 至 U 元素的相对含量,数据单位为 counts/30 s。

冰筏碎屑含量测定以及浮游和底栖有孔虫丰度统计:取 10~15 g 干样经过水泡开,使用孔径为 63 μm 的筛子冲洗,收集筛子里的屑样,烘干后称重。再将> 63 μm 的屑样依次用 150 和 250 μm 筛子干筛,依次称重,由此分别得到>63 μm、>150 μm 和>250 μm 的 IRD 含量。有孔虫的丰度统计是在显微镜下鉴定,并统计>150 μm 的浮游和底栖有孔虫

个体数量,然后计算其丰度。
AMS ¹⁴C 测年:分别在有孔虫丰度较高的样品中,挑出壳径大小 150~250 μm 的 Nps 个体 10 mg 左右进行 AMS ¹⁴C 测年。
XRF 元素扫描、IRD 含量测定和有孔虫丰度统计在同济大学海洋地质国家重点实验室完成,AMS ¹⁴C 测年是在美国 Radiocarbon Laboratory of Earth System Science Department, University of California Irvine 实验室完成。

3 结果

3.1 地层年代框架

地层年代框架的建立是古海洋学研究的基础。北冰洋深海沉积物的地层划分要比其他中低纬度海区困难得多。由于北冰洋的低温冰海环境使生物生产力低下,同时碳酸盐补偿深度变浅,溶解作用导致有孔虫保存较差,广泛运用于中低纬地区的地层划分和对比的有孔虫氧同位素记录在北冰洋地区受到限制^[41]。因此,本文研究的岩心沉积物进行地层划分采用浮游有孔虫 Nps 的 AMS ¹⁴C 测年(表 2),并结合多指标的区域性地层对比的方法,包括沉积物褐色层,浮游和底栖有孔虫丰度^[7,9]和 IRD 含量^[13,22]等。由于不同的研究者使用不同粒径大小的 IRD 含量来指示 IRD 事件,为了统一楚科奇边缘地区不同岩心中的 IRD 事件的衡量标准,在本文中将 IRD(>1 mm)含量超过 2%,或是 IRD(>250 μm)和 IRD(>150 μm)含量超过 5%,或是 IRD(>63 μm)含量超过 10%的层位作为一个 IRD 事件。

表 1 研究的岩心及其信息汇总
Table 1 Information of cores studied in this paper

岩心编号	缩写	海域	纬度/°N	经度/°W	水深/m	柱长/cm	来源
ARC2-M03	M03	楚科奇深海平原	76.54	171.93	2 300	348	文献[21]
PS72-340-5	340-5	楚科奇深海平原	77.61	171.48	2 349	350	文献[13]
ARC3-P23	P23	楚科奇海台	76.38	162.49	2 086	294	文献[37]
ARC3-P31	P31	楚科奇海台	78.00	168.01	435	60	文献[38]
ARC4-BN03	BN03	楚科奇海台	78.50	158.90	3 044	145	本文
ARC4-MOR02	MOR02	北风脊	74.55	158.99	1 174	218	本文
ARC3-P37	P37	北风脊	77.00	156.01	2 267	240	段肖等,本专輯
P1-92-AR-P25	P25	北风脊	74.82	157.37	1 625	542	文献[39]
P1-92-AR-P39	P39	北风脊	75.84	156.03	1 470	150	文献[9]

表 2 楚科奇海台与北风脊 BN03 和 MOR02 岩心 Nps-AMS ¹⁴C 测年数据的校正

Table 2 Calibration of Nps-AMS ¹⁴C dating data of core BN03 and MOR02

样品编号	深度/cm	AMS ¹⁴ C 年龄/aBP	碳储库校正年龄 /aBP ^[42]	日历年龄 /cal. aBP ^[43-44]
UCIT27337	BN03/0~2	5 450±15	4 750±15	5 524±35
UCIT27340	BN03/12~14	5 860±20	5 160±20	5 938±30
UCIT27341	BN03/30~32	40 310±640	38 910±640	42 794±453
UCIT27343	BN03/40~42	44 910±1 130	43 510±1 130	46 782±1 150
UCIT27354	MOR02/138~140	41 320±730	39 920±730	43 592±606
UCIT27355	MOR02/152~154	44 350±1 060	42 950±1 060	46 220±1 039

3.1.1 楚科奇海台 BN03 岩心的地层年代框架

楚科奇海台 BN03 岩心的浮游有孔虫丰度变化显示,在深度 0~4、30~38、40~66 和 88~98 cm 处出现高峰,这些层位平均浮游有孔虫丰度分别为 6 412、1 608、3 874.28 和 1 656 枚/g。其余层位的浮游有孔虫丰度较低,平均丰度为 60 枚/g。浮游有孔虫丰度变化形式与底栖有孔虫丰度基本一致(图 2)。

该岩心 IRD(>1 mm)含量的变化范围是 0~56.5%,平均值为 5.6%。IRD 高峰出现于深度 12~14、26~34、40~42、92~96、108~118 和 142~145 cm,其余深度 IRD(>1 mm)含量较少。IRD(>154

μm)含量变化范围是 0.07%~58.7%,平均值为 10.3%,其变化形式与 IRD(>1 mm)含量基本一致(图 3)。

楚科奇海台 BN03 岩心沉积物中 Nps 的 AMS ¹⁴C 测年结果显示,沉积物顶部深度 0~2 cm 的年龄为 5.5 ka,深度 12~14 cm 的年龄为 5.9 ka,深度 30~32 cm 的年龄为 43.2 ka,深度 40~42 cm 的年龄为 46.7 ka(表 2)。为了建立 BN03 岩心的地层年代框架,我们将 BN03 岩心与附近的 M03^[21]、P23^[37]、P31^[38]、340-5 岩心^[13,45]的褐色层,有孔虫丰度,IRD 含量以及沉积物岩性特征进行对比。BN03 岩心深度 0~22、29~65、92~105 cm 和 136~142 cm

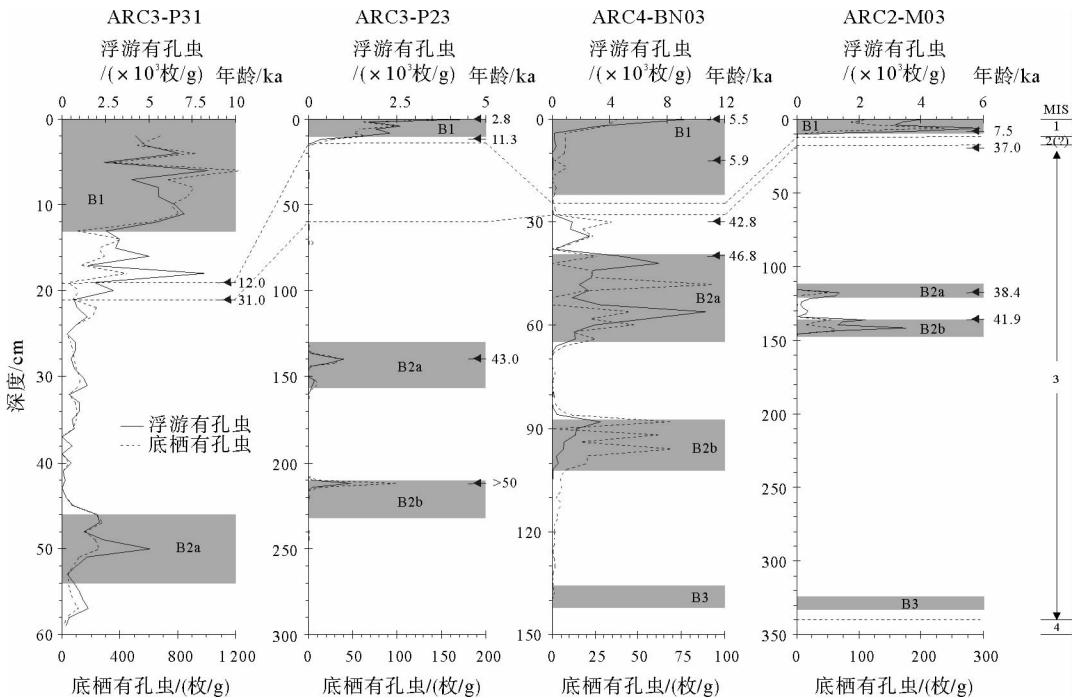


图 2 楚科奇海台 BN03 岩心沉积物褐色层、有孔虫丰度、AMS ¹⁴C 测年结果与该地区的 P23^[37]、P31^[38] 和 M03^[21] 的地层对比

Fig. 2 Regional correlation of cores BN03, P23^[37], P31^[38] from the Chukchi Plateau and core M03^[21] from the Chukchi Abyssal Plain by their brown units, foraminiferal abundance and AMS ¹⁴C results

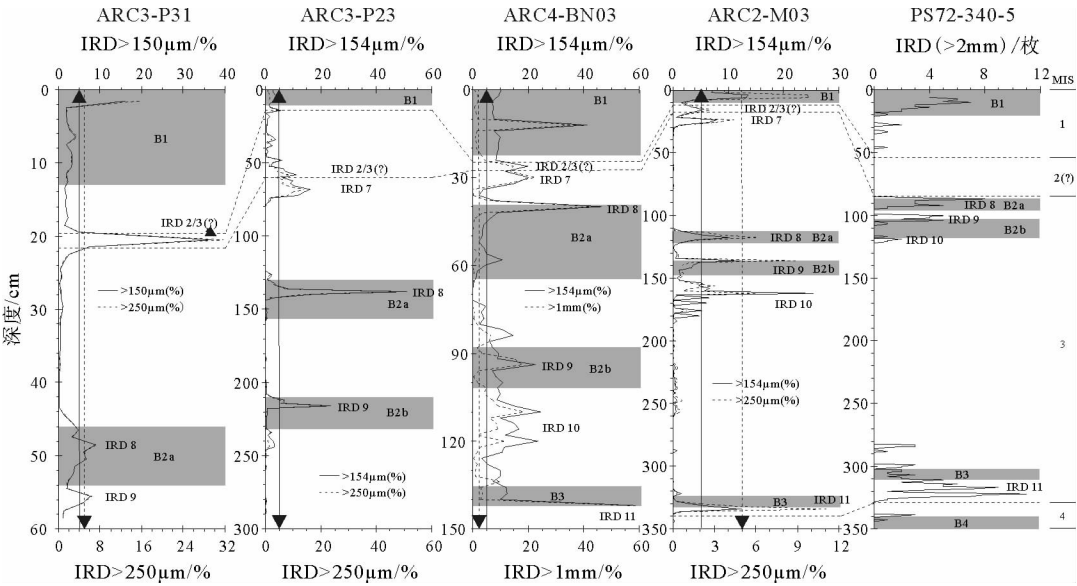


图 3 楚科奇海台 BN03 岩心的 IRD 含量与该地区的 P23^[37]、P31^[38]、M03^[21] 和 340-5 岩心^[13] 的 IRD 含量对比
Fig. 3 Regional correlation of cores BN03、P23^[37]、P31^[38] from the Chukchi Plateau and cores M03^[21] and 340-5^[13] from the Chukchi Abyssal Plain by their brown units and IRD content variations.
Vertical lines denote the reference lines for IRD events

皆为褐色层,根据地层对比以及 BN03 岩心褐色层中浮游有孔虫 Nps 的 AMS ¹⁴C 测年结果,这 4 个褐色层分别对应于邻近岩心中的褐色层 B1、B2a、B2b 和 B3(图 2)。以 IRD(>1 mm)含量 2%为界,BN03 岩心可以识别出 6 个明显的 IRD 事件:其中深度 25~28 cm 的 IRD 事件对应于 P23 和 M03 岩心中的 IRD 2/3(?)事件;深度 29~34、40~42、92~96、106~126 和 144~145 cm,分别对应于 P23 和 M03 岩心中的 IRD 7—11 事件(图 3)。

根据 Nps 的 AMS ¹⁴C 测年结果以及该区域地层的对比,BN03 岩心深度 0~25 cm 为氧同位素(MIS)1 期;深度 25~28 cm 为 MIS 2;深度 28~145 cm 的沉积物,其年龄大于 42.8 ka,褐色层 B2a、B2b 和 B3 以及 IRD 8~11 事件与邻近的 P23 岩心和 M03 岩心有较好的对应关系^[21,38],为 MIS 3 的沉积(图 2)。

3.1.2 北风脊 MOR02 岩心的地层年代框架

北风脊 MOR02 岩心的浮游有孔虫丰度变化显示(图 4),有孔虫丰度仅在深度 132~142 cm 和 150~162 cm 处出现高峰,这两个层位平均浮游有孔虫丰度分别为 1 241 和 1 230 枚/g。其余层位的浮游有孔虫几乎缺失,其平均丰度为 1 枚/g。浮游有孔虫丰度变化形式与底栖有孔虫丰度完全一致。

该岩心 IRD(>1 mm)含量的变化范围是 0~10.5%,平均值为 0.98%。高峰出现在深度 42~

44、68~74、124~140 和 150~162 cm。其余深度 IRD(>1 mm)含量较少。IRD(>154 μm)含量变化范围是 0.04%~17.7%,平均值为 3.7%,其变化形式与 IRD(>1 mm)含量基本一致(图 5)。

MOR02 岩心沉积物中 Nps 的 AMS ¹⁴C 测年结果显示,沉积物深度 138~140 cm 的年龄为 43.9 ka,深度 152~154 cm 的年龄为 46.1 ka(表 2)。为了建立 MOR02 岩心的地层年代框架,我们将 MOR02 岩心与北风脊的 P37、P39 和 P25 岩心^[7,9,39]的有孔虫丰度和 IRD 事件进行对比(图 4、图 5)。由于该岩心顶部沉积物有孔虫缺失,缺乏 AMS ¹⁴C 测年数据,因此,通过 MOR02 岩心与北风脊其他岩心的 IRD 事件对比,以及北风脊区域沉积速率建立地层年代框架。北风脊地区沉积速率的研究表明,除少数站位以外,一般沉积速率较高,为 1.5~3.1 cm/ka^[13,39]。根据 MOR02 岩心的 IRD 含量,以 IRD(>1 mm)含量 2%为界,可以识别出 5 个明显的 IRD 事件,分别为 IRD 2/3(?)、IRD 6—10 事件。其中深度 42~44 cm 的 IRD 2/3(?)事件出现在 MIS 2;深度依次为 62~74、80~86、124~140 和 150~160 cm 的 IRD 6—9 事件出现在 MIS 3^[22]。因此,推测 MOR02 岩心可以分为 MIS 3—MIS 1 的沉积序列,其中深度 0~20 cm 为 MIS 1,深度 20~52 cm 为 MIS 2,深度 52~218 cm 为 MIS 3(图 4)。

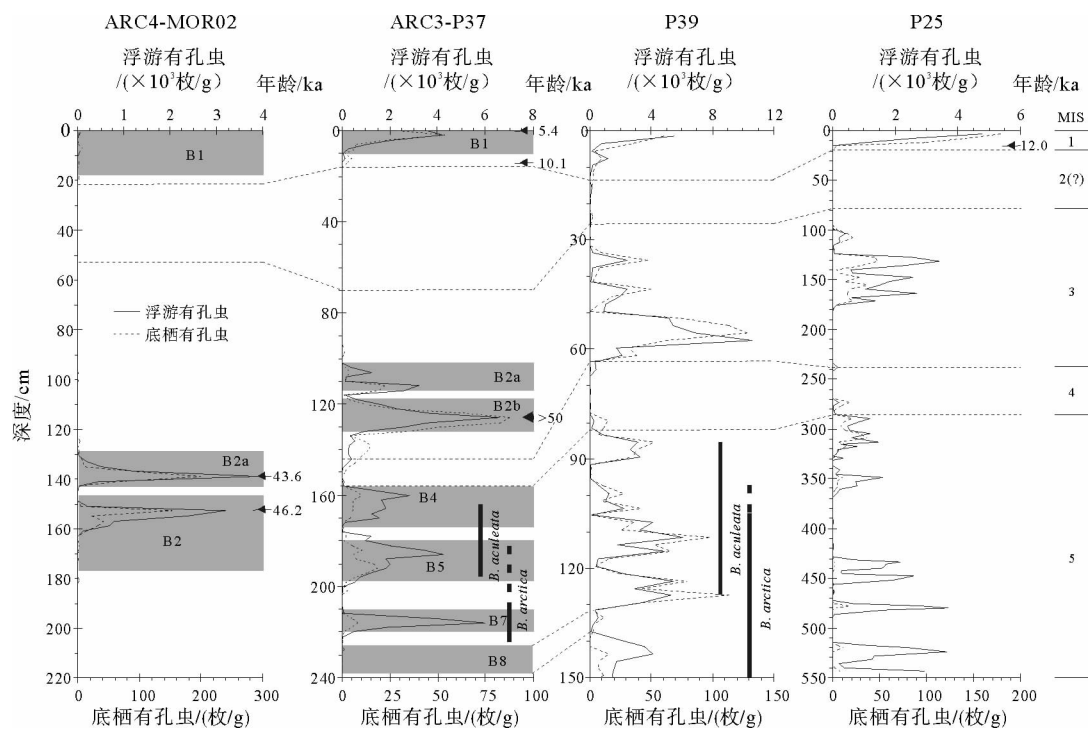


图 4 北风脊 MOR02 和 P37 岩心有孔虫丰度、AMS ¹⁴C 测年结果与 P39^[9] 和 P25^[39] 岩心的对比

Fig. 4 Regional correlation of Northwind Ridge cores MOR02, P37, P39^[9] and P25^[39] by their brown units, foraminiferal abundance and AMS ¹⁴C results. The occurrence of foraminifera biostratigraphic markers *B. aculeata* for MIS 5.1 and *B. arctica* for MIS 5.5 are indicated.

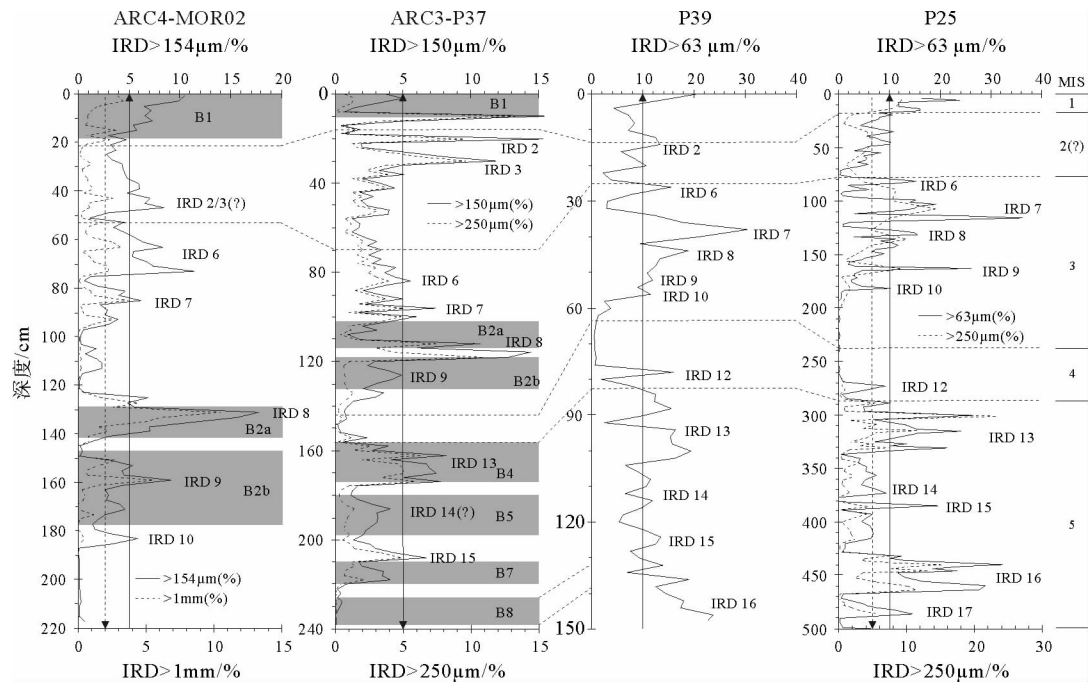


图 5 北风脊 MOR02 和 P37 岩心 IRD 含量以及 IRD 事件与 P39^[9] 和 P25^[39] 岩心的对比

Fig. 5 Regional correlation of Northwind Ridge cores MOR02, P37, P39^[9] and P25^[39] by their brown units and IRD content variations. Vertical lines denote the reference lines for IRD events.

3.2 楚科奇海台的 IRD 事件

根据楚科奇海台 BN03、P23^[37] 和 P31^[38] 岩心与楚科奇深海平原 M03^[21] 和 340-5 岩心^[13,45] 沉积物的地层与 IRD 含量对比(图 3),BN03 岩心可以识别出 6 个 IRD 事件,其中 IRD 2/3(?)事件出现于 MIS 2,IRD 7—11 事件出现于 MIS 3;其中 IRD 8,IRD 9 和 IRD 11 事件分别出现在 MIS 3 的褐色层 B2a、B2b 和 B3 中。P31 岩心的 IRD 8 事件和 IRD 9 事件出现在 MIS 3,IRD 2/3(?)事件出现在 MIS 2。P23 岩心可以识别出 4 个 IRD 事件:其中 IRD 7—9 事件出现在 MIS 3,IRD 2/3(?)事件出现在 MIS 2;IRD 2/3(?)事件与 IRD 7 事件之间可能存在沉积间断^[37],这是由于该地区末次冰盛期较厚的冰层覆盖,使得该地区 IRD 4—6 事件缺失;IRD 8 和 IRD 9 事件出现在 MIS 3 的两个褐色层 B2a 和 B2b 中。M03 岩心可以识别出 6 个 IRD 事件:其中 IRD 11 事件出现于 MIS 3 的褐色层 B3 中,对应于 BN03 岩心的 IRD 11 事件;IRD 2/3(?)事件,IRD 7—10 事件与 BN03 和 P23 岩心的 IRD 事件对应(图 3)。根据 340—5 岩心大于 2 mm 的 IRD 统计结果,可以识别出 4 个 IRD 事件,全部出现于 MIS 3:分别是位于 MIS 3 的两个褐色层 B2a 和 B2b 中的 IRD 8—10 事件,以及出现在褐色层 B3 中的 IRD 11 事件。

对比楚科奇海台和楚科奇深海平原 5 个岩心沉积物的岩性以及 IRD 事件(图 3),在 MIS 3,发现在岩心 BN03、M03 和 340-5 的褐色层 B3 中,出现较高的 IRD 含量,对应于 IRD 11 事件,该事件可能出现在 MIS 3 早期。除了 P31 岩心较短未发现两个褐色层,其他 4 个岩心均在两个褐色层 B2a 和 B2b 中出现较高的 IRD 含量,分别对应于 IRD 8 和 IRD 9 事件;另外,BN03、M03 和 340-5 岩心的 IRD 10 事件出现于 MIS 3 褐色层 B2b 下部。在 MIS 2,岩心 BN03、P31、P23 和 M03 出现较高的 IRD 含量,对应于 IRD 2/3(?)事件。IRD 2/3(?)事件与 IRD 7 事件之间可能存在沉积间断。

3.3 北风脊的 IRD 事件

根据北风脊 MOR02、P37、P25^[7,39] 和 P39 岩心^[7,9] 这 4 个岩心沉积物的地层划分与 IRD 含量对比(图 5),MOR02 岩心可以识别出 6 个 IRD 事件:IRD 6—10 事件出现于 MIS 3,其中 IRD 8 和 IRD 9 事件出现于 MIS 3 的褐色层 B2a 和 B2b 中;IRD 2/3(?)事件出现于 MIS 2,并且与 IRD 6 事件之间可能存在沉积间断。北风脊 MOR02 岩心的 IRD

2/3(?)和 IRD 7—10 事件对应于楚科奇海岩心的 IRD 事件(图 3)。P37 和 P39 岩心的 IRD 事件相似,其中 IRD 13—15 事件出现在 MIS 5(图 5);IRD 6—10 事件出现于 MIS 3;在 MIS 2,P37 岩心可以识别出 IRD 2 和 IRD 3 事件,而 P39 岩心只能识别出一个 IRD 2/3(?)事件。以 IRD($>250\ \mu\text{m}$)含量 5%为界,P25 岩心可以识别出 11 个 IRD 事件,其中 IRD 13—17 事件出现于 MIS 5;IRD 12 事件出现于 MIS 4;IRD 6—10 事件出现于 MIS 3,其中 IRD 8—9 事件出现于褐色层 B2 中;MIS 2 的 IRD 事件在 P25 岩心中不明显(图 5)。

对比北风脊 4 个岩心沉积物的 IRD 事件(图 5),其中 IRD 13—17 事件出现于 MIS 5,IRD 12 事件出现于 MIS 4,IRD 6—10 事件出现于 MIS 3,IRD 2 和 IRD 3 事件出现于 MIS 2。北风脊沉积物的 IRD 事件与楚科奇海地区有着较好的对应关系。

4 讨论

4.1 楚科奇海台和北风脊地区的 IRD 事件及其来源

现代西北冰洋楚科奇海台和北风脊地区主要受波弗特环流控制,沉积物中的 IRD 来源于加拿大北极群岛和波弗特海沿岸,随波弗特环流搬运至西北冰洋各地^[15]。冰期北冰洋的沉积环境与现代不同,海平面显著降低,冰盖面积增大,北美冰盖向加拿大海盆延伸,导致波弗特环流减弱^[46-47]。根据楚科奇海表层沉积物中黏土矿物源区的研究,楚科奇海台的黏土矿物来源为欧亚陆架和加拿大北极群岛周边海域的海冰沉积和大西洋水体的搬运以及加拿大马更些河的河流注入,西拉普捷夫海和喀拉海的黏土矿物可以通过大西洋中层水进入楚科奇海台^[36,48]。加拿大北极群岛的班克斯岛和马更些河为北风脊沉积物的主要来源^[36]。北冰洋 IRD 搬运方式的研究表明,虽然海冰、大冰块和冰山都能携带或搬运 IRD,但其搬运能力不同,海冰主要携带的是细砂级以下($<250\ \mu\text{m}$)的 IRD,而较粗的 IRD($>250\ \mu\text{m}$)主要是通过大冰块以及冰山搬运进入沉积区^[15,22]。

楚科奇海和北风脊的 9 个岩心沉积物中,只有北风脊的 P25、P37 和 P39 岩心沉积物的底部年龄可达 MIS 5^[9,39],其他岩心的底部年龄为 MIS 3 或 MIS 4(图 4、图 5)。P25 岩心的 IRD 17 事件对应于较高的 Ca 元素相对含量;对比这 3 个岩心在 MIS 5 的 IRD 13—17 事件,P37 和 P39 岩心的 IRD 13—15 事件对应于较高的 Ca 元素相对含量(图 6);P25 岩心 MIS 5

的 IRD 13—17 事件也对应于 Ca 元素高峰^[9,39],表明了当时北风脊地区碎屑碳酸岩含量的增加。北冰洋沉积物中碎屑组分的研究表明,碎屑碳酸岩主要来源于加拿大北极群岛分布广泛的古生代碳酸岩露头^[49-51],它们通过加拿大北极群岛的麦克卢尔等海峡冰流被输送到波弗特海,夹带在大冰块和冰山里,被波弗特环流搬运至楚科奇海和北风脊的沉积物中^[21,52]。因此,北风脊地区 MIS 5 的 IRD 事件来源于加拿大北极群岛的古生代碳酸岩露头。

在 MIS 4,P39 和 P25 岩心的 IRD 12 事件均对应于较高的 Ca 元素相对含量^[9,39],指示了该 IRD 事件也来源于加拿大北极群岛。

在 MIS 3,BN03 岩心的 IRD 8—10 事件对应于较高的 Ca 元素相对含量(图 6),IRD 7 事件由于缺乏对应的 XRF 数据难以判断元素相对含量;P23、MOR02 和 P37 岩心的 IRD 7—9 事件均对应于 Ca 元素相对含量的高峰(图 6)。M03 岩心的 IRD 7—9 事件以及 P39 和 P25 岩心 MIS 3 的 IRD 6—9 事件也对应于较高的 Ca 元素相对含量^[9,21,39],即碎屑碳酸岩含量的增加。与 MIS 5 的楚科奇边缘地区的 IRD 事件相似,MIS 3 该地区的 IRD 事件来源于加拿大北极群岛的古生代碳酸岩露头,但根据 Wang 等对于 M03 岩心 MIS 3 的 IRD 事件的研究,

除了来源于加拿大北极群岛外,欧亚大陆和东北冰洋边缘海对其 MIS 3 的 IRD 事件也有贡献^[21]。IRD 8 事件与 IRD 9 事件出现于 MIS 3 的褐色层中,对应于较高的有孔虫丰度(图 2、图 4),表明研究区发生了融冰水事件^[21,37],此时研究区为间冰段,具有高生产力和开放的海区环境,使得 IRD 事件中有孔虫的丰度较高。

根据 Darby 和 Zimmerman 的研究,在 MIS 2,IRD 2 和 IRD 3 事件的年龄分别为 13~15 ka 和 16~17.5 ka。楚科奇海台和北风脊出现了 IRD 2/3(?)事件,其中,北风脊地区的 MOR02 岩心的 IRD 2/3(?)事件对应于较高的 Ca 元素相对含量(图 6),并且 P39 岩心的 IRD 2/3(?)事件同样对应较高的 Ca 元素相对含量^[9],表明北风脊地区 MIS 2 的 IRD 2/3(?)事件来源于加拿大北极群岛的古生代碳酸岩露头。这与加拿大北极群岛的班克斯岛和马更些河为北风脊沉积物的主要来源^[36]的结果一致。另外,Yurco 等对于北风脊 P25 的黏土矿物研究发现,冰期该岩心的沉积物主要来源于北美的劳伦泰德冰盖。楚科奇海台的 P23 和 BN03 岩心沉积物 MIS 2 的 IRD 2/3(?)事件对应的 Ca 元素相对含量较低(图 6),M03 岩心 IRD 2/3(?)事件也对应于较低的 Ca 元素相对含量和 CaCO₃ 含量^[21],指示了一个与

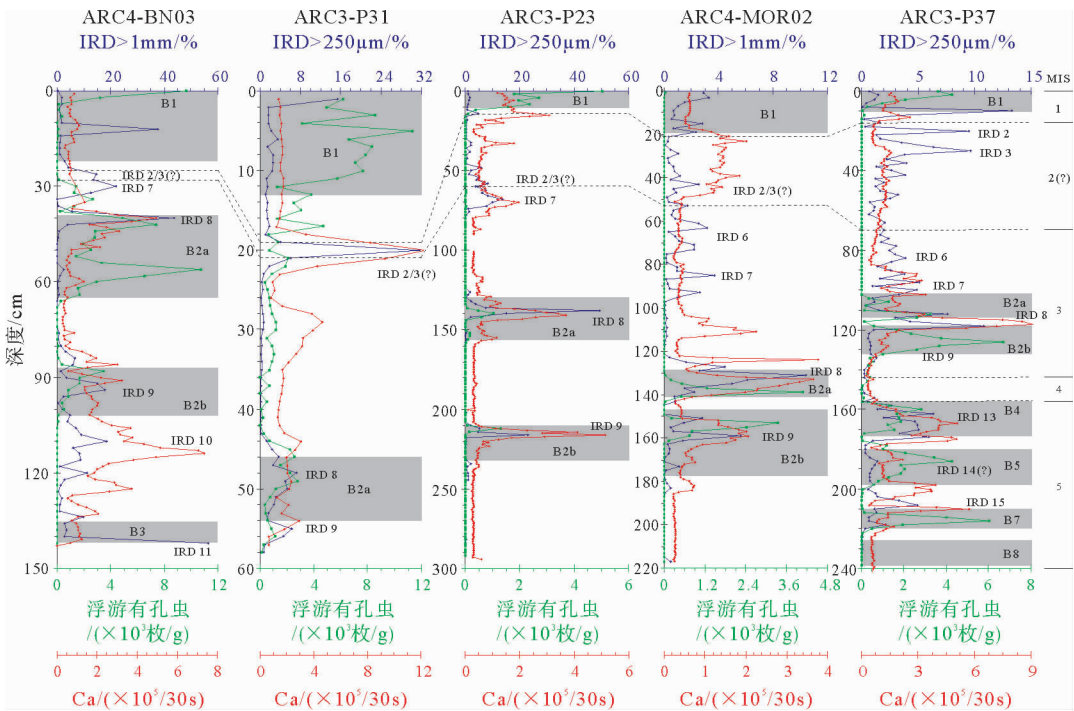


图 6 楚科奇海台的 BN03、P31^[38] 和 P23^[37] 岩心与北风脊 MOR02 和 P37 岩心 IRD 事件与 Ca 元素相对含量和浮游有孔虫丰度的对比

Fig. 6 Regional correlation of Chukchi Plateau cores BN03, P31^[38], P23^[37] and Northwind Ridge cores MOR02 and P37^[13] by their brown units and IRD contents. Vertical lines denote the reference lines for IRD events.

北风脊不同 IRD 的来源。同时,楚科奇海的 P23 岩心和 M03 岩心的 IRD 2/3(?)事件对应较高的石英含量^[21,37],推测楚科奇海 IRD 2/3(?)事件中的沉积物可能来源于欧亚大陆和东北冰洋边缘海,其最显著的特征是石英含量较高^[13,53]。楚科奇海台 P31 的 IRD 2/3(?)事件对应于较高的 Ca 元素相对含量,由于 P31 岩心水深较浅,仅为 435 m(表 1),在 MIS 2 被厚达 1 km 的冰盖完全覆盖至海底,因此无法接受来自于欧亚大陆沉积,在 MIS 2 沉积几乎完全间断,与 M03 岩心和 P23 岩心有着不同的沉积模式^[9,21,26]。

4.2 IRD 事件指示的北极冰盖演化

北冰洋东部的冰山和 IRD 大部分来源于欧亚冰盖,而北冰洋西部的 IRD 沉积指示了一个更复杂的起源,主要来自于北美冰盖,包括冰消期的几次 IRD 事件^[54]。过去对于北极冰盖的研究认为北极冰盖在 LGM 覆盖了北美洲北部和欧亚大陆北部的大部分地区,其中北美冰盖向加拿大海盆进一步延伸、断裂,厚达 800 m 的冰架直接覆盖楚科奇海台和北风脊地区^[9,40],而欧亚冰盖终止于拉普捷夫海的边缘,但楚科奇海和东西伯利亚地区的大部分地区被认为没有冰盖^[23-25]。但最新的地球物理和海底地形与地貌形态的证据表明,东西伯利亚海在冰期存在一个单独的冰盖^[26-27],其范围覆盖了楚科奇深海平原和楚科奇海台的 4 个岩心 P31、P23、M03 和 340-5,而 BN03 岩心和北风脊的 4 个岩心 MOR02、P37、P39 和 P25 正好处于这个冰盖的边缘(图 1)。

在冰期,楚科奇深海平原和楚科奇海台岩心沉积物在 MIS 2 的沉积速率很低,平均沉积速率仅为 1.11 cm/ka,其中 BN03 和 M03 岩心在 MIS 2 的沉积速率为 0.2 cm/ka(图 2),P31 岩心在 MIS 2 也仅有 0.16 cm/ka 的沉积速率,远低于楚科奇海全新世以来的平均沉积速率^[38,55]。在北风脊地区,4 个岩心在 MIS 2 的平均沉积速率为 2.7 cm/ka,明显高于楚科奇海。楚科奇深海平原和楚科奇海台在 MIS 2 较低的沉积速率可能是由于该地区在 LGM 受到厚厚的冰层覆盖,导致沉积物急剧减少^[13,21,38],这与该地区冰期存在一个冰盖的结果一致^[26-27];而北风脊地区在 LGM 时期处于这个冰盖的边缘,并未被完全覆盖,来自于冰盖边缘和海冰中的沉积物输入增加,导致较高的沉积速率。如前文所述,在 MIS 2 楚科奇海台和北风脊岩心沉积物中出现了 IRD 2/3(?),IRD 2 和 IRD 3 事件(图 3、图 5)。在 LGM 时期,由于楚科奇深海平原和楚科奇海台受

到一个靠近欧亚大陆的冰盖覆盖(图 1),阻断了来自于北美冰盖的沉积物输入,导致了沉积物中的 IRD 事件对应于较少的碎屑碳酸岩和较高的石英颗粒含量,因此,其沉积物可能主要来源于欧亚大陆和东北冰洋边缘海;与楚科奇深海平原和楚科奇海台不同的是,LGM 时期北风脊地区正处于这个冰盖边缘,受到其影响较小,同时,北美冰盖进一步向加拿大海盆延伸、断裂^[26,56],冰山和大冰块携带了较高的碎屑碳酸岩,因此北风脊地区的沉积物主要来源于北美冰盖。

在间冰期,北风脊地区 MIS 5 的 IRD 事件对应于较高的碎屑碳酸钙含量,来源于加拿大北极群岛。在 MIS 3 和 MIS 1,楚科奇海台和北风脊地区的 IRD 主要来源于加拿大北极群岛,它们被加拿大北极群岛的麦克卢尔等海峡冰流输送到波弗特海,夹带在大冰块和冰山里,被波弗特环流搬运至楚科奇海台和北风脊地区^[15,22]。因此,间冰期楚科奇海台和北风脊地区不再受到冰盖覆盖,指示了楚科奇海西部冰盖在间冰期的消亡。

5 结论

(1)通过楚科奇海台 BN03 和北风脊 MOR02 及 P37 岩心沉积物中的浮游有孔虫 Nps-AMS ¹⁴C 的测年结果以及有孔虫丰度、IRD 含量和区域性褐色地层的对比,初步建立了这 2 个岩心的地层年代框架。楚科奇海台 BN03 岩心深度 0~25 cm 为氧同位素(MIS)1 期,深度 25~28 cm 为 MIS 2,深度 28~145 cm 为 MIS 3。北风脊 MOR02 岩心深度 0~20 cm 为 MIS 1,深度 20~52 cm 为 MIS 2,深度 52~218 cm 为 MIS 3。

(2)在北风脊地区 MIS 5 的 IRD 13—17 事件, MIS 4 的 IRD 12 事件, MIS 3 的 IRD 6—10 事件和 MIS 2 的 IRD 2/3(?)事件中,IRD 事件对应于较高的碎屑碳酸岩含量,表明了这些 IRD 事件均来自于加拿大北极群岛的碳酸岩露头,被波弗特环流搬运至北风脊;而在楚科奇海深海平原和楚科奇海台 MIS 3 的 IRD 7—10 事件中,IRD 事件也对应于较高的碎屑碳酸岩含量,表明也来自于加拿大北极群岛的碳酸岩露头,但 MIS 2 的 IRD 2/3(?)对应于较低的碎屑碳酸岩和较高的石英碎屑含量,这些 IRD 可能来源于欧亚大陆和东北冰洋边缘海。

(3)在 MIS 2 楚科奇海深海平原及楚科奇海台较低的沉积速率与来源于欧亚大陆和东北冰洋边缘海较高石英碎屑含量的 IRD 输入表明,楚科奇海深

海平原和楚科奇海台可能受到一个冰盖的覆盖,阻止了北美地区沉积物的输入;而此时北风脊地区正处于这个冰盖的边缘,未被冰盖完全覆盖,因此沉积速率较高,其沉积物来源于北美地区,这与前人近期的欧亚大陆边缘冰盖研究结果一致。在间冰期,该冰盖消亡,楚科奇边缘地区的沉积物主要来源于加拿大北极群岛。

致谢:本实验工作由国家财政部资助,国家海洋局极地办公室组织实施的“中国第三和第四次北极考察项目(简称 CHINARE-2008,2010)”的一部分。参加此项工作的单位有中国极地研究中心、国家海洋局第一研究所、国家海洋局第二研究所、国家海洋局第三研究所、同济大学等。感谢中国第三和第四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] Moritz R E, Bitz C M, Steig E J. Dynamics of Recent Climate Change in the Arctic[J]. *Science*, 2002, 297 (5586): 1497-1502.
- [2] 陈立奇. 北极海洋环境与海气相互作用研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2003. [CHEN Liqi. *Marine Environment and Air-Sea Interaction in the Arctic Region* [M]. Beijing: China Ocean Press, 2003.]
- [3] Serreze M C, Barry R G. Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis [J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 77: 85-96.
- [4] Delworth T L, Knutson T R. Simulation of early 20th century global warming [J]. *Science*, 2000, 287: 2246.
- [5] Knutson T R, Delworth T L, Dixon K W, et al. Assessment of twentieth century regional surface temperature trends using the GFDL CM2 coupled models [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(9): 1624-1651.
- [6] Adler R E, Polyak L, Ortiz 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.
- [7] 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.
- [8] 史久新,赵进平,矫玉田,等. 太平洋入流及其与北冰洋异常变化的联系[J]. *极地研究*, 2004, 16(3): 253-260. [SHI Jiuxin, ZHAO Jinping, JIAO Yutian, et al. Pacific inflow and its links with abnormal variations in the Pacific Ocean[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16(3): 253-260.]
- [9] 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 Review*, 2013, 79: 145-156.
- [10] 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.
- [11] O'Regan M, King J, Backman J, et al. Constraints on the Pleistocene chronology of sediments from the Lomonosov Ridge [J]. *Paleoceanography*, 2008, 23: PA1S19. <http://dx.doi.org/10.1029/2007PA001551>.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Cronin T M, Polyak L, Reed D, et al. A 600-ka Arctic sea-ice record from Mendeleev Ridge based on ostracodes [J]. *Quaternary Science Review*, 2013, 79:157-167.
- [15] 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): 91-115.
- [16] Darby D A, Bischof J F, Spielhagen R F, et al. Arctic ice export events and their potential impact on global climate during the late Pleistocene[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17 (2): <http://dx.doi.org/10.1029/2001PA000639>
- [17] Darby D A, Polyak L, Bauch H A. Past glacial and interglacial conditions in the Arctic Ocean and marginal seas-a review [J]. *Progress in Oceanography*, 2006, 71:129-144.
- [18] Darby D A, Ortiz J, Polyak L, et al. The role of currents and sea ice in both slowly deposited central Arctic and rapidly deposited Chukchi-Alaskan margin sediments [J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 68: 58-72.
- [19] 王汝建,肖文申,李文宝,等. 北冰洋西部楚科奇海盆晚第四纪的冰筏碎屑事件[J]. *科学通报*, 2009, 54(23): 3761-3770. [WANG Rujian, XIAO Wenshen, LI Wenbao, et al. Late Quaternary ice-rafted detritus events in the Chukchi Basin, western Arctic Ocean[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2009, 54 (23): 3761-3770.]
- [20] Stärrz M, Gong Xun, Stein R, et al. Glacial shortcut of Arctic sea-ice transport [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 357-358: 257-267.
- [21] Wang Rujian, Xiao Wenshen, 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.
- [22] 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.
- [23] Ehlers J, Gibbard P L. The extent and chronology of Cenozo-

- icglobal glaciation [J]. *Quat. Internat.*, 2007, 164-165: 6-20.
- [24] Svendsen J I, Alexanderson H, Astakhov V I, et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia[J]. *Quaternary Science Review*, 2004, 23: 1229-1271.
- [25] Stauch G, Gualtieri L. Late Quaternary glaciations in north-eastern Russia [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2008, 23: 545-558.
- [26] Niessen F, Hong J K, Hegewald A, et al. Repeated Pleistocene glaciation of the East Siberian continental margin [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6: 842-846.
- [27] Brigham-Grette. A fresh look at Arctic ice sheets [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6:807-808.
- [28] Opzahl S, Benner R, Amon R M W. Major flux of terrigenous dissolved organic matter through the Arctic Ocean[J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44: 2017-2023.
- [29] Olssen K, Anderson L G. Input and biogeochemical transformation of dissolved carbon in the Siberian shelf seas[J]. *Continental Shelf Research*, 1997, 17: 819-833.
- [30] 隋翠娟,张占海,刘骥平,等. 北极河流径流量变化及影响因素分析[J]. *海洋学报*, 2008, 30(4): 39-47. [SUI Cuijuan, ZHANG Zhanhai, LIU Jiping, et al. Variation of Arctic runoff and its association with climate factors[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(4): 39-47.]
- [31] Jones E P. Circulation in the Arctic Ocean [J]. *Polar Research*, 2001, 20(2): 139-146.
- [32] Thomas D N, Dieckmann G S. *Sea Ice: An Introduction to Its Physics, Chemistry, Biology and Geology* [M]. New York: Wiley-Blackwell, 2003: 112-141.
- [33] 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 and Quaternary Geology*, 2008, 28(6): 49-55.]
- [34] Weingartner T J, Danielson S L, Royer T C. Freshwater variability and predictability in the Alaska Coastal Current [J]. *Deep-Sea Research: Part II. Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(1-2): 169-191.
- [35] 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, 23:1175-1200.
- [36] 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 linsen, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Minerals in surface sediments in the western Arctic Ocean and their sources [J]. *Advances in Polar Research*, 2014, 26(1):58-70.]
- [37] 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, 26(1): 46-57. [ZHANG Taoliang, WANG Rujian, CHEN Zhihua, et al. Paleooceanographic and paleoclimatic records of core 08P23 on Chukchi Plateau, Western Arctic Ocean since MIS 3 [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(1): 46-57.]
- [38] 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 paleoceanographic and paleoclimatic implications[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(3): 77-86.]
- [39] Yurco L N, Ortiz J D, Polyak L, et al. Clay mineral cycles identified by diffuse spectral reflectance in Quaternary sediments from the Northwind Ridge: implications for glacial-interglacial sedimentation patterns in the Arctic Ocean[J]. *Polar Research*, 2010, 29: 176-197.
- [40] Jakobsson M, Nilsson J, O'Regan M, et al. An Arctic Ocean ice shelf during MIS 6 constrained by new geophysical and geological data [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29: 3505-3517.
- [41] 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.
- [42] Coulthard R D, Furze M F A, Pienkowski A J, et al. New marine ΔR values for Arctic Canada[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(4): 419-434.
- [43] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50 000 Years cal BP [J]. *Radiocarbon*, 1993, 55(4):1869-1887.
- [44] Stuiver M and Reimer P J. Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program [J]. *Radiocarbon*, 1993, 35:215-230.
- [45] März C, Stratmann A, Matthiessen J, et al. Manganese-rich brown layers in Arctic Ocean sediments: composition, formation mechanisms, and diagenetic overprint[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75: 7668-7687.
- [46] 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.
- [47] 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: 73-93.
- [48] Vogt C, Knies J. Sediment pathways in the western Barents Sea inferred from clay minerals assemblages in surface sediments[J]. *Norwegian Journal of Geology*, 2009, 89: 41-55.
- [49] Clark D L, Whitman R, Morgan K A, et al. Stratigraphy and glacial-marine sediments of the Amerasian Basin, central Arctic Ocean[J]. *The Geological Society of America*, 1980, 181(1): 1-65.

[50] Darby D A, Naidu A S, Mowatt T C, et al. Sediment composition and sedimentary processes in the Arctic Ocean [C]// In: Herman Y, ed. The Arctic Seas. New York: Springer, 1989; 657-720.

[51] 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, 92:140-154.

[52] Bischof J F, Clark D L, Vincent J S. Origin of ice-rafted debris: Pleistocene paleoceanography in the western Arctic Ocean [J]. Paleoceanography, 1996, 11(6): 743-756.

[53] Spielhagen R F, Baumann K, Erlenkeuser H, et al. Arctic Ocean deep-sea record of northern Eurasian ice sheet history [J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(11-13): 1455-1483.

[54] Löwemark L, Jakobsson M, Mörrh M, et al. Arctic Ocean manganese contents and sediment colour cycles [J]. Polar Research, 2008, 27(2): 105-113.

[55] 刘伟,男,王汝建,陈建芳,等. 西北冰洋阿尔法脊晚第四纪的陆源沉积物记录及其古环境意义[J]. 地球科学进展, 2012, 27(2): 209-217. [LIU Weinan, WANG Rujian, CHEN Jianfang, et al. Late Quaternary terrigenous sedimentation in the Western Arctic Ocean as exemplified by a sedimentary record from the Alpha Ridge [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2012, 27(2): 209-217.]

[56] Dyke A S, Andrews J T, Clark P U, et al. The Laurentide and Innuitian ice sheets during the Last Glacial Maximum [J]. Quaternary Science Review, 2002, 21(1-3): 9-31.

RECORDS OF ICE RAFTED DETRITUS AND THEIR PALEOCLIMATIC IMPLICATIONS AT CHUKCHI BORDERLAND, WESTERN ARCTIC OCEAN

ZHANG Taoliang, WANG Rujian, XIAO Wenshen, DUAN Xiao, HU Zhengying, MEI Jing
(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: The depositional pattern of the Chukchi Borderland is rather complicated. The glacial-interglacial cycles greatly affected the development of the North American and Eurasian ice sheets and the pass way of Beaufort Gyre and its transport capability, and thus affected the origin of sediments in the Western Arctic Ocean. Multi-proxy investigations have been performed on cores of ARC4-BN03, ARC3-P37 and ARC4-MOR02 collected from the Chukchi Borderland, and compared with 6 other adjacent sediment records. Since MIS 5, several IRD events have been recognized in the Northwind Ridge (NR) area, which shows the contribution of Canadian Arctic Archipelago. During MIS 3, the sedimentation rate at the Chukchi Plateau (CP) and Chukchi Abyssal Plain (CAP) was higher than that on Northwind Ridge; besides the Canadian Arctic Archipelago, the IRD events may also had the contribution from Eurasian side. During MIS 2, the sedimentation rates in the CP and CAP collapsed due to the extended ice cap from the East Siberian Sea. The IRD input in these areas may mainly come from Eurasia and East Arctic marginal seas. In comparison, the IRDs at the NR are still originated from the Canadian Arctic Archipelago. The ice cap during glacial period prevented the transportation of North American materials to the CP and CAP. Then the NR region at the edge of the ice cap thus show greater sedimentation. During warm intervals, the IRD events of Chukchi Borderland have the contribution from the Canadian Arctic Archipelago.

Key words: ice rafted detritus; Arctic Ice Sheet; Western Arctic Ocean; Chukchi Plateau; Northwind Ridge; late Quaternary