

白令海北部陆坡 100 ka 来的古海洋学 记录及海冰的扩张历史

王汝建¹, 李霞¹, 肖文申¹, 陈荣华²

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

2. 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江杭州 310012

摘要: 白令海北部陆坡 B2—9 柱状样中生源组分的研究显示, 自 MIS 5. 3 期以来表层生产力指标的粗组分和蛋白石含量呈阶梯状增加, 反映表层生产力阶段式的增长。全新世表层生产力达到最高, 并且 MIS 3. 2~2 期高, 比 MIS 5. 3~3. 3 期最低。高有机碳含量对应于高 C/N 比值, 显示有机碳混合来源, 不能作为表层生产力的指标。MIS 5. 1, 3. 3~3. 2 期和全新世高的有机碳含量和 C/N 比值反映间冰期陆源有机物质输入量的增加。MIS 5. 3 期至中全新世, 不断增加的陆源砂级和粉砂级颗粒组分说明随着气候的逐渐变冷, 陆架海冰在不断扩张。伐冰碎屑和碳屑颗粒冰期、间冰段和末次冰消期升高, 而间冰期降低, 反映冰期白令海陆架海冰扩张和间冰期海冰消融的过程。冰期海冰扩张与北美大陆气候的相互关联, 揭示了晚第四纪冰期旋回中白令海海冰扩张及其对全球气候变化的响应。

关键词: 表层生产力; 伐冰碎屑; 海冰扩张; 晚第四纪; 白令海。

中图分类号: P53

文章编号: 1000—2383(2005)05—0550—09

收稿日期: 2005—05—17

Paleoceanographic Records and Sea Ice Extension History of the Northern Bering Sea Slope over the Last 100 ka

WANG Ru-jian¹, LI Xia¹, XIAO Wen-shen¹, CHEN Rong-hua²

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

2. Key Laboratory of Submarine Geoscience, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

Abstract: Quantitative analytic results of biogenic components in core B2-9 from the northern Bering Sea slope indicate that coarse fraction and opal content, serving as proxies of surface productivity, have increased stepwise since the MIS 5. 3, reflecting periodic enhancement in surface productivity. Surface productivity attained its highest level during the Holocene, followed by MIS 3. 2 to 2. MIS 5. 3 to 3. 3 showed the lowest level. High TOC content, together with a high C/N ratio, shows that TOC was deposited from mixed sources and therefore can not be used as a proxy of surface productivity. But high TOC and C/N ratio during MIS 5. 1, 3. 3 to 3. 2 and the Holocene reflect that the terrigenous organic matter input increased during interglacial periods. Increases in fine- and silt-grained terrigenous components from MIS 5. 3 to the Middle Holocene imply that sea ice on the Bering Sea slope extended continuously in a cooling climate. Ice rafted (>0.154 mm quartz and lithic grains) and charcoal detritus increased during glacial, interstadial and the last deglaciation periods, and decreased during interglacial periods, suggesting that sea ice volume on the slope extended and melted, respectively, during glacial and interglacial periods. The extension of sea ice during glacial periods was linked with the climate over North American continent, revealing the responses of sea ice extension in the Bering Sea to global climate change during Late Quaternary glacial and interglacial cycles.

Key words: surface productivity; ice-rafterd detritus; sea ice extension history; Late Quaternary; Bering Sea.

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G200078500);国家自然科学基金项目(Nos. 40321603, 40276020, 40176015);高等学校全国优秀博士学位论文作者专项项目(No. 200126);高等学校博士学科点专项科研基金项目(No. 20040247028)。

作者简介:王汝建(1959—),男,教授,主要从事太平洋和北极的新生代古海洋与古环境研究。E-mail: rjwangk@online.sh.cn

白令海位于北太平洋的亚极区,由于其季节性的海冰形成在相对低的纬度,因此在影响地球气候系统演化过程中起着相当重要的作用(Takahashi, 1999)。白令海还是大气二氧化碳的汇,这是由于白令海高生产力的表层水具有吸收大气 CO₂ 的潜力,其强大而有效的生物泵使其对全球碳循环起着非常重要的作用。白令海不但是重要的渔场,而且是控制 CO₂ 等温室效应气体海—气交换通量的关键水体(陈立奇等,2003)。这主要是源于此海区非常有效的生物泵的作用。10 年测量的颗粒通量资料显示,有机碳/无机碳的比率总是大于 1,说明白令海在全球碳循环过程中扮演着十分重要的角色(Takahashi et al., 2002)。同时,白令海又位于太平洋与北冰洋之间,在水循环、热量和盐度平衡,以及不同化学特征方面起着重要的作用。白令海与太平洋和北冰洋之间的水团交换过程对于理解物质和热量平衡及气候变化具有十分重要的意义。而白令海沉积物记录的古海洋学变化的研究可以提供与米兰柯维奇轨道周期相关的北半球冰盖演化及高频率的 Heinrich 和 D/O (Dansgaard/Oeschger) 事件 (Takahashi, 1999),因而成为国际古海洋与古气候学研究的热点之一。本文通过白令海北部陆坡 B2—9 柱状样的详细研究,探讨白令海过去 100 ka 以来的古海洋学变化和海冰的扩张历史。

1 材料和研究方法

本次研究的 B2—9 柱状样是 1999 年中国首次北极科学考察,在白令海用重力活塞取样器钻取的(中国首次北极科学考察队,2000)。该钻孔位于 59°17'32"N, 178°41'50"W 的白令海北部陆坡区(图 1),水深 2 200 m,柱状样长度 231 cm。柱状样的岩性单一,为一套深灰色的硅质生物软泥。样品的取样间隔为 1 cm,共取得 230 个样品。这些样品被分别进行了相关的分析,包括放射虫地层学分析(王汝建和陈荣华,2004,2005)、生源蛋白石(Mortlock et al., 1989)和有机碳含量(意大利 EA1110 型有机元素分析仪,Stax and Stein, 1993)分析以及取 0.15~0.2 g 样品做粒度分析(Coulter 全自动激光粒度分析仪)。同时,约 10 g 样品还被冲洗后筛出 >0.154 mm 的部分,被统称为粗组分(Bassinot et al., 1994),其主要成份为硅质微体化石(硅藻、放射虫和海绵骨针),其次为石英、岩屑和碳屑颗粒以

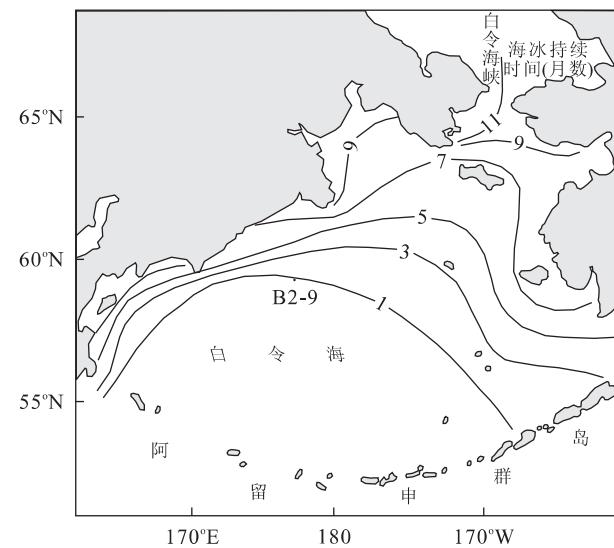


图 1 白令海北部陆坡 B2—9 柱状样的位置与现代海冰分布范围和持续时间(根据 Takahashi, 1999 重绘)

Fig. 1 Location of core B2-9 and modern distribution pattern and duration of the sea ice in the northern Beaufort Sea

及钙质微体化石。其中的石英、岩屑颗粒根据其来源被称为伐冰碎屑(ice-rafted detritus)(Nechaev et al., 1994; Gorbarenko, 1996)。而碳屑颗粒来源于周围陆地上植被天然火灾发生后经河流、冰川与风力的搬运(Joly and Adams, 2002; Wang et al., 2003)。在光学显微镜下分别对粗组分中的石英、岩屑、碳屑颗粒和钙质微体化石的丰度进行统计以及有孔虫的鉴定,并拍摄碳屑颗粒的电子扫描显微镜照片和进行能谱分析。

2 地层学与年代框架

世界高纬度大洋沉积物中放射虫 *C. davisianna* 百分含量的研究发现,它与氧同位素记录有很好的对应关系,可以作为地层学工具来划分地层(Morley and Hays, 1979, 1983; Morley, 1986; Abellmann and Gersonde, 1988; Bjørklund and Ciesielski, 1994; Ciesielski and Bjørklund, 1995; Morley et al., 1995; Morley and Heusser, 1997; Brathauer et al., 2001)。通过分析白令海 B2—9 柱状样中具有地层学和古海洋学意义的放射虫 *C. davisianna* 的百分含量,并将其曲线与 SPECMAP 氧同位素记录(Martinson et al., 1987)进行对比,从而识别出 B2—9 柱状样中分别与氧同位素事件 2.0, 3.1, 3.3, 4.0,

5.1 和 5.3 对应的 *C. davisiana* 事件 b, c₁, c₂, d, e₁ 和 e₂. 进一步将 *C. davisiana* 含量曲线与 SPECMAP 氧同位素记录进行调谐, 建立了这个柱状样的深度—年龄框架(王汝建和陈荣华, 2005), 为下一步的古气候与古海洋学研究提供了地层学基础.

3 结果

3.1 生源组分的变化

白令海 B2—9 柱状样中粗组分含量、蛋白石和有机碳含量、C/N 比值以及底栖有孔虫丰度变化曲线与氧同位素记录和 *C. davisiana* 含量的对比显示(图 2), 过去 100 ka 以来, 粗组分含量的变化呈阶梯式的增加, 其变化范围在 5.8%~17.8% 之间. 氧同位素 1 期(MIS 1)、MIS 2~3.2 和 MIS 3.3~5.3 期之间的平均百分含量分别为 11.5%、10.5% 和 8.2%. 蛋白石含量的变化大体上与粗组分的变化近似, 其变化范围在 8.5%~25% 之间. MIS 1、MIS 2~3.2 和 MIS 3.3~5.3 期之间的平均百分含量分别为 17.7%、14.3% 和 13.2%. 有机碳含量的变化明显呈现出冰期低、间冰期高的特点, 即 MIS 1、3.3、5.1 和 5.3 期增加, MIS 2、4 和 5.2 期降低. 但是, MIS 3.2 期略有增加, 而 MIS 3.1 期反而下降, 原因有待查明. C/N 比值与有机碳含量的变化趋势几乎完全一致. C/N 比值是指沉积物中有机碳含量

与氮含量的比值, 可以反映出沉积物中有机碳的来源. 通常认为白令海沉积物中的 C/N 平均比值为 6~7, 属典型海洋来源的有机碳; 如果沉积物中的 C/N 比值超过 20, 被认为属典型陆地来源的有机碳(Brigham-Grette and Lundein, 2003). B2—9 柱状样中的 C/N 比值的变化范围在 3.5~43.7 之间, 大多数介于(6~7)~20 之间, 平均为 13.2, 属混合来源的有机碳. 只有 MIS 1、3.3 和 5.1 期 C/N 比值大于 20, 反映有机碳主要来源于陆地. B2—9 柱状样中的有孔虫主要为底栖有孔虫, 浮游有孔虫缺失. 主要种类为 *Uvigerina peregrina*, *Virgulina subdepressa*, *Elphidium excavatum* 和 *Globobulimina affins*. 从底栖有孔虫的丰度变化(图 2)可以看出, 它们分别在 MIS 5.3 和 5.1 期出现 2 个高峰, 最高达 113 枚/g. 而在其他时期, 丰度很低, 甚至降至零.

3.2 非生源组分的变化

白令海 B2—9 柱状样的粒度分析结果与氧同位素记录和 *C. davisiana* 含量的对比显示(图 3), 自 MIS 5.3 至 MIS 3.1 期粒度中值(Median)逐渐增加, 至 MIS 3.1 期达到高峰, 末次盛冰期(LGM)略微下降. 进入 MIS 1 期粒度中值波动较大, 早 MIS 1 期粒度中值略微下降, 中 MIS 1 期达到最高值, 随后又大幅下降, 晚 MIS 1 期又有所回升. 按粒径大小划分的 4 种粒级的百分含量变化显示, 粒径 >63 μm 的砂级颗粒平均含量为 10.4%, 其变化趋

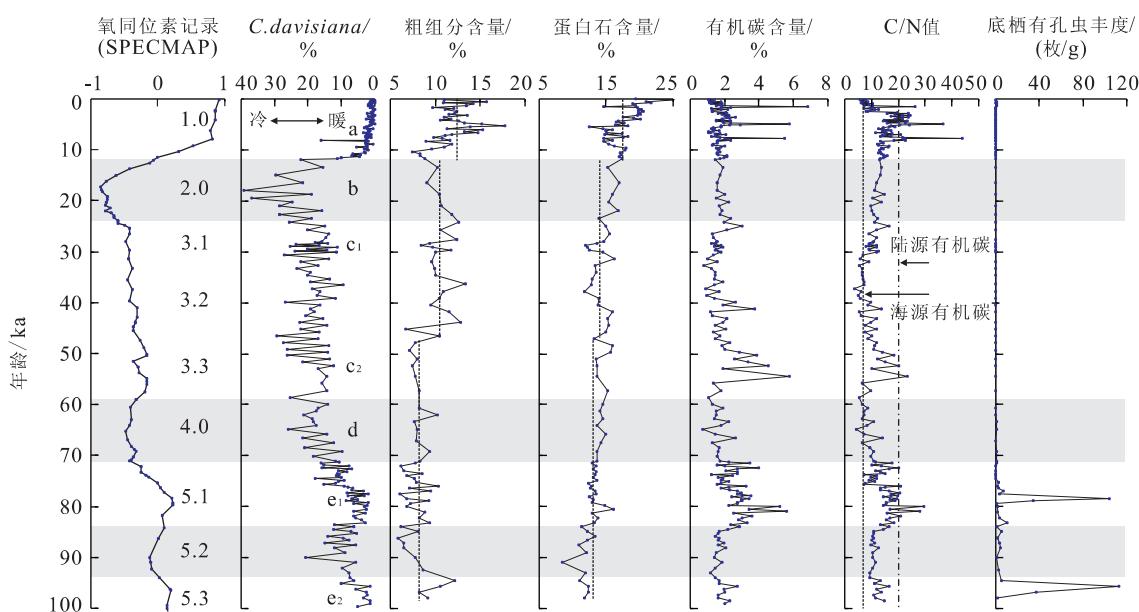


图 2 白令海 B2—9 柱状样中生源物质组分的变化

Fig. 2 Changes of biogenic components in core B2-9 of the northern Bering Sea

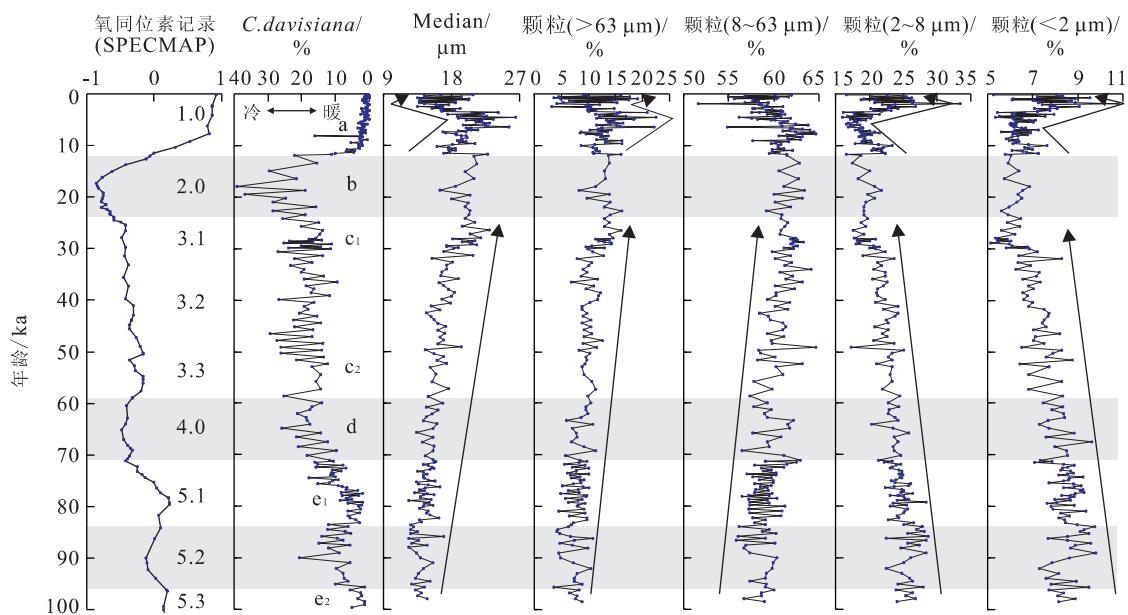


图3 白令海 B2-9 柱状样颗粒中值粒径和不同粒径颗粒含量的变化

Fig. 3 Changes of median grain values and different grain contents in core B2-9 of the northern Bering Sea

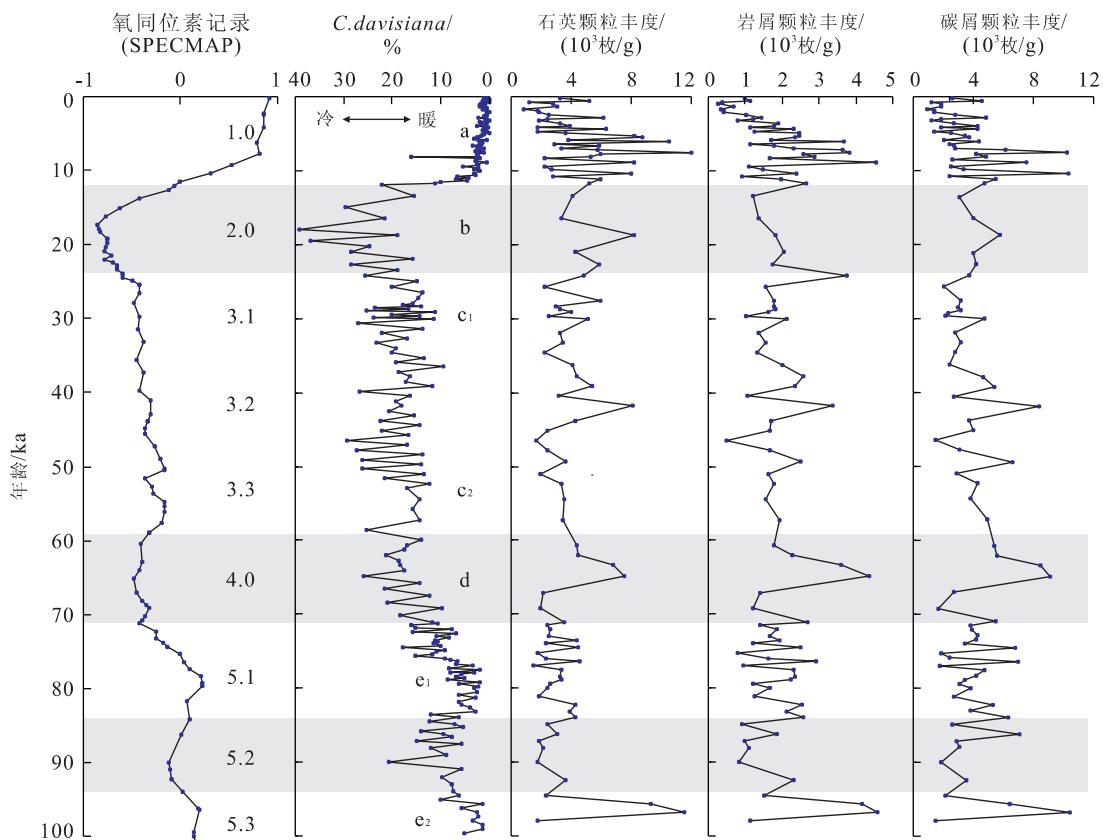


图4 白令海 B2-9 柱状样中石英和岩屑以及碳屑颗粒丰度的变化

Fig. 4 Changes of abundance in quartz and lithic (ice-raftered detritus) and charcoal grains in core B2-9 of the northern Bering Sea

势几乎与粒度中值的变化一致。粒径在 8~63 μm 之间的粉砂级颗粒平均含量为 60%，其总体变化趋势

也近似于粒度中值的变化,唯有不同的是其在 MIS 1 期的最高峰略超前于粒度中值和粒径 $>63 \mu\text{m}$ 的砂级颗粒,说明粒度中值的变化反映了约 70% 的颗粒组分的变化。粒径在 2~8 μm 之间和 $<2 \mu\text{m}$ 的粘土级颗粒平均含量分别为 22.2% 和 7.4%, 占总颗粒组分的 29.6%, 其变化趋势与前 3 者完全相反。它们自 MIS 5.3 至 MIS 3.1 期逐渐下降, 末次盛冰期(LGM) 略微上升, 进入 MIS 1 期波动较大, 变化趋势与前三者正好相反。

白令海 B2-9 柱状样中石英和岩屑颗粒丰度变化曲线与氧同位素记录和 *C. davisiana* 含量变化对比显示(图 4), 石英和岩屑的丰度变化趋势几乎同步, 变化范围分别为 (793~11 974) 枚/g 和 (282~4 571) 枚/g, 并总体上呈现冰期、冰消期和间冰段高, 而间冰期低的趋势。自 MIS 5.3 期以来, MIS 4, 3.2 和 2 期, 石英和岩屑颗粒丰度都不同程度地增加, 但是, MIS 5.3 期石英和岩屑颗粒丰度也同步增加, 具体原因有待查明。而与之相反的是 MIS 5.2, 5.1, 3.3 和 3.1 期, 石英和岩屑颗粒丰度都降低。末次冰消期, 属气候由冷至暖的转折期, 石英和岩屑颗粒的丰度都明显增大, 并且都达到其最高值, 但晚 MIS 1 期它们都下降至最低值。

3.3 碳屑颗粒丰度的变化

白令海 B2-9 柱状样中碳屑颗粒丰度统计结

果与氧同位素记录和 *C. davisiana* 含量变化的对比显示(图 4), MIS 5.3 期以来, 碳屑颗粒丰度表现出高频率的变化, 其丰度变化范围为 (280~4 571) 枚/g。碳屑颗粒丰度与石英和岩屑的丰度变化趋势几乎同步, 总体上也呈现冰期、冰消期和间冰段高, 而间冰期低的趋势。自 MIS 5.3 期以来, MIS 4, 3.2 和 2 期, 碳屑颗粒丰度都不同程度地增加, 但是 MIS 5.3 期碳屑颗粒丰度也同步增加。而与之相反的是 MIS 5.2, 5.1, 3.3 和 3.1 期, 碳屑颗粒丰度都降低。末次冰消期, 气候由冷转暖, 碳屑颗粒的丰度明显增加, 并且都达到其最高值, 但晚 MIS 1 期下降至最低值。为了检验碳屑颗粒丰度统计的准确性, 将部分碳屑颗粒置于电子扫描显微镜下观察、拍照, 并进行能谱分析(图 5)。扫描电镜照片上碳屑颗粒的微细结构说明它们主要来源于陆地植被。碳屑颗粒的能谱分析结果证实, 其化学成分中碳的含量最高。

4 讨论

4.1 表层生产力的变化

由于沉积物中硅藻和放射虫的数量多少可以反映表层水初级生产力的变化(Takahashi *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003), 因此, 以硅藻和放射虫

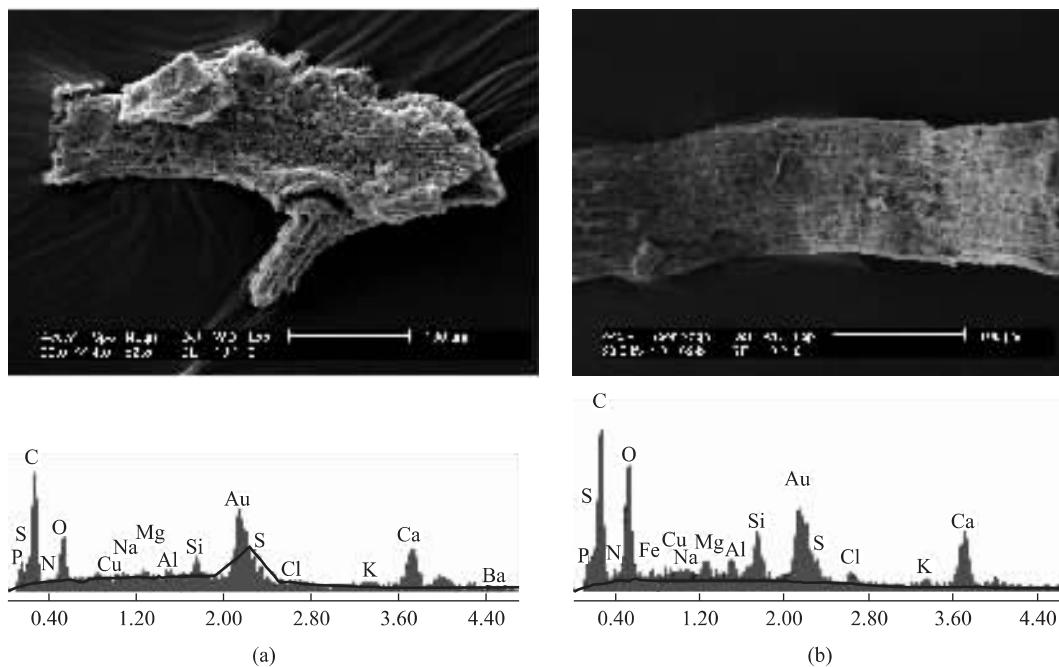


图 5 白令海 B2-9 柱状样中碳屑颗粒扫描电镜照片及其能谱分析结果

Fig. 5 SEM photographs of charcoal grains and their chemical components in core B2-9 of the northern Bering Sea

为主的粗组分可以粗略地作为表层水初级生产力的指标(李霞等,2004). 粗组分和蛋白石含量的变化显示(图 2),全新世以来它们的平均含量较 MIS 5.3~2 期高,揭示了白令海北部全新世以来表层生产力逐渐增加的趋势,晚全新世,表层生产力达到最高. 而 MIS 3.2~3.1 期,粗组分和蛋白石含量较 MIS 3.3 和 MIS 5.2~4 期为高,反映了 MIS 3 期和全新世早、中期随着气候回暖,海冰和陆地冰川消融,融冰水注入,导致表面生产力的升高. 但由于海水分层及垂直混合率在不同时期的差异,海水底层营养在不同时期差别大,反映表层生产力的底栖有孔虫丰度相应地在不同时期出现较大差异. 这可能与该海区表层初级生产力及碳酸钙溶跃面的变化有关. MIS 4~2 期该地区一年大多数月份被海冰覆盖,由于海水分层,垂直混合率差,表层营养无法传输到底层海水(Nakatsuka *et al.*, 1995),导致底层海水营养较低,造成底栖有孔虫稀少. MIS 2 期,白令海碳酸钙溶跃面为 2 000 m 左右(陈荣华等,2001; 孟翊等,2001),而 B2-9 柱状样所在深度恰好处于溶跃面附近,底栖有孔虫壳体溶解强烈,导致底栖有孔虫丰度的降低. 只有在 MIS 5.3 和 5.1 期,底栖有孔虫丰度才有所增加,而全新世有孔虫稀少可能与繁盛硅质生物的抑制作用和碳酸钙的溶解作用有关.

海洋沉积物中的有机碳含量的高低通常被用来作为表层生产力的指标(Stax *et al.*, 1993). 由于不同海区沉积物中有机碳的来源不同,因此有机碳含量所反映的古环境信息也不同. 远离陆地的开阔海或大洋,其沉积物中的有机碳含量的高低基本上可以反映表层生产力的变化(Sarnthein and Winn, 1988). 但是,边缘海沉积物中的有机碳来源复杂,既有来自海洋生物的有机碳,又有周围陆地输入的有机碳,因此,有机碳含量所反映的古环境信息就需要用 C/N 比值来加以识别. 白令海 B2-9 柱状样中有机碳含量在 MIS 5.1, 3.3~3.2 期和全新世明显增加,而在 MIS 5.2, 4, 3.1 和 2 期降低,显示出间冰期高和冰期低的特点,与粗组分和蛋白石含量的变化趋势完全不一致. C/N 比值的变化显示,多数比值介于(6~7)~20 之间,平均值为 13.2. C/N 平均比值 6~7 属典型海洋来源有机碳,而 C/N 比值超过 20 属典型陆地来源有机碳(Brigham-Grette and Lundein, 2003). 显然,B2-9 柱状样中的有机碳属混合来源,不能用来指示表层生产力的变化. 但是,有机碳含量和 C/N 比值结合起来可以用来指示陆

源有机物质输入量的变化. C/N 比值大于 20 的 MIS 5.1, 3.3 和中全新世,反映了气候转暖,大陆冰川消融,融冰水注入,陆源有机物质的大量输入,导致有机碳含量和 C/N 比值的同步增加.

4.2 海冰的扩张历史

Nechaev *et al.* (1994) 研究认为,晚更新世白令海沉积物以伐冰碎屑(ice-rafterd detritus) 沉积为主. 冰川主要发育在白令海东缘的北美山地,并有部分向较低的陆架延伸,其中就有大量的石英和岩屑颗粒被冰川固结起来并随着冰舌前进运移至地势低平的白令海陆架. 气候冷暖转换时,会在白令海陆架边缘产生大量流动冰川,向白令海的方向推进并垮塌成为海冰,于是携带大量伐冰碎屑的筏冰不断融化,而伐冰碎屑沉入海底堆积下来(Gorbarenko, 1996). 因此,B2-9 柱状样中粒度中值和颗粒组分及粒径>0.154 mm 的石英和岩屑颗粒丰度可以用来指示海冰的扩张历史与气候的冷暖变化. 由图 3 可以看出,自 MIS 5.3 期至中全新世,粘土级(2~8 μm 和 <2 μm) 的颗粒含量逐渐降低,与此相反,粉砂级(8~63 μm) 和砂级(>63 μm) 的颗粒含量以及粒度中值却逐渐增加,并在早—中全新世达到最高峰,说明随着气候的逐渐变冷,筏冰搬运的陆源砂级和粉砂级颗粒组分在不断增加,而粘土级颗粒组分在不断减少,反映海冰的不断扩张. 末次冰消期至早全新世高的石英和岩屑颗粒丰度(图 4) 说明末次冰消期的气候变暖幅度较其他时期大,导致海冰的快速融化和大量伐冰碎屑的卸载. MIS 4, 3.2 和 2 期,石英和岩屑颗粒丰度都不同程度地增加,而 MIS 5.2, 5.1, 3.3 和 3.1 期,石英和岩屑颗粒丰度降低,说明冰期、间冰段和末次冰消期白令海陆架的冰量增大,从而产生大量筏冰,因此伐冰碎屑也增加,反映了冰期海冰的扩张. 与此相反,间冰期陆地冰量和海冰减少,产生的筏冰量也较少,伐冰碎屑丰度降低. 但 MIS 5.3 晚期,石英和岩屑颗粒丰度异常增加,具体原因有待进一步查明.

碳屑颗粒作为火灾的替代性指标,反映了陆地发生天然火灾的概率和植被发育及气候的变化(Verardo and Rudiman, 1996; Piperno, 1997). 晚第四纪冰期旋回中,白令海陆架大部分及北美大陆被冰雪覆盖,在未被冰雪覆盖的部分广泛发育苔原植被(Hopkins, 1972; Cwynar and Ritchie, 1980). 现代阿拉斯加内陆冬季频繁的天然火灾证实,这种植被代表一种较为干冷的气候环境,有利于天然火

灾的频繁发生(Joly and Adams, 2002). MIS 5.3~2 期和末次冰消期碳屑颗粒丰度明显高于全新世, 说明此时气候较全新世干冷, 天然火灾发生的概率较大. 一般而言, 气候干冷或干暖, 发生天然火灾的概率较大, 沉积物中碳屑颗粒丰度较高. 碳屑颗粒丰度在 MIS 5.3~5.1 期较高, 可能与碳屑源地可供燃烧的生物量及搬运方式有关. 这个时期可能植被发育较广泛, 可供燃烧的生物量丰富, 一旦发生火灾, 产生的碳屑总量大. 冰期碳屑颗粒主要通过冰川固结搬运和风力搬运方式, 而间冰期它们主要通过河流搬运到白令海. 由图 4 中碳屑颗粒与石英和岩屑颗粒丰度的变化可以看出, MIS 5.3~2 期和末次冰消期三者几乎同步变化, 说明伐冰碎屑和碳屑颗粒丰度的变化密切相关, 反映冰期白令海的海冰扩张与北美阿拉斯加内陆气候变化的相互关联, 揭示了晚第四纪冰期旋回中白令海的海冰扩张及其对全球气候变化的响应.

5 结论

白令海北部陆坡 B2—9 柱状样中生源组分的研究显示, 作为表层生产力指标的粗组分和蛋白石含量自 MIS 5.3 期以来呈阶梯状增加, 反映表层生产力阶段式的增长, 即全新世的表层生产力较 MIS 3.2~2 期高, 而 MIS 3.2~2 期的表层生产力又较 MIS 5.3~3.3 期高. 由于 B2—9 柱状样中高的有机碳含量对应于高的 C/N 比值, 显示有机碳混合来源, 不能作为表层生产力的指标, 但 MIS 5.1, 3.3~3.2 期和全新世高的有机碳含量和 C/N 比值反映了间冰期陆源有机物质输量的增加. 而 MIS 4 期以来较低的底栖有孔虫丰度可能与海水分层、垂直混合率差以及强的碳酸钙溶解作用有关.

MIS 5.3 期至中全新世, 筏冰搬运的陆源砂级和粉砂级颗粒组分的不断增加, 而粘土级颗粒组分的不断减少, 总体上说明随着气候逐渐变冷, 白令海陆架海冰不断扩张. 与此同时, 伐冰碎屑和碳屑颗粒丰度同步变化, 并在冰期、间冰段和末次冰消期升高, 间冰期降低, 反映了冰期白令海陆架冰量的增加, 海冰的扩张和间冰期气候转暖所导致的冰量降低、海冰消融的过程以及冰期白令海海冰扩张与北美阿拉斯加内陆气候变化相互关联, 揭示了晚第四纪冰期旋回中白令海的海冰扩张及其对全球气候变化的响应.

致谢:此项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“中国首次北极考察项目(简称 CHINARE—1999)”的一部分, 参加此项工作的单位是中国极地研究中心、国家海洋局第一研究所、国家海洋局第二研究所等. 参加首次北极科学考察地质组和物理海洋组的成员包括李秀珠、程振波、高爱国、李亮、郑风武、赵进平、高郭平、矫玉田、吉国、罗宇忠等, 在此一并致谢.

References

- Abelmann, A., Gersonde, R., 1988. *Cycladophora davisiana* stratigraphy in Plio-Pleistocene cores from the Antarctic Ocean (Atlantic sector). *Micropaleontology*, 34(3): 268—276.
- Bassinot, F. C., Beaufort, L., Vincent, E., et al., 1994. Coarse fraction fluctuations in pelagic carbonate sediments from the tropic Indian Ocean: A 1 500-kyr record of carbonate dissolution. *Paleoceanography*, 9(4): 579—600.
- Brigham-Grette, J., Lundein, Z., 2003. A paleoenvironmental look at sea ice extent during earlier warm periods. Unpublished data.
- Bjørklund, K. R., Ciesielski, P. F., 1994. Ecology, morphology, stratigraphy and the paleoceanographic significance of *Cycladophora davisiana davisiana*. Part I : Ecology and morphology. *Mar. Micropaleontol.*, 24: 71—88.
- Brathauer, U., Abelmann, A., Gersonde, R., et al., 2001. Calibration of *Cycladophora davisiana* events versus oxygen isotope stratigraphy in the subantarctic Atlantic Ocean—A stratigraphic tool for carbonate-poor Quaternary sediments. *Mar. Geol.*, 175: 167—181.
- Chen, L. Q., Gao, Z. Y., Wang, W. Q., et al., 2003. Distribution characteristic of P_{CO_2} in the Bering Sea basin and its influence to the Arctic carbon sink. *Science in China (Series D)*, 33(8): 781—790 (in Chinese).
- Chen, R. H., Meng, Y., Hua, Y., et al., 2001. Calcareous and siliceous microorganisms in surface sediments of Chukchi and Bering Seas. *Mar. Geol. Quat. Geol.*, 21(4): 25—30 (in Chinese with English abstract).
- Ciesielski, P. F., Bjørklund, K. R., 1995. Ecology, morphology, stratigraphy, and the paleoceanographic significance of *Cycladophora davisiana*. Part II : Stratigraphy in the North Atlantic (DSDP Site 609) and Labrador Sea (ODP Site 646 B). *Mar. Micropaleontol.*, 25: 67—86.
- Cwynar, L. C., Ritchie, J. C., 1980. Arctic steppe-trundra: A Yukon perspective. *Science*, 208: 1375—1377.

- Gorbarenko, S. A. , 1996. Stable isotope and lithologic evidence of late-glacial and Holocene oceanography of the northwestern Pacific and its marginal seas. *Quat. Res.* , 46:230—250.
- First Chinese National Arctic Research Expedition Team, 2000. Report of the first Chinese national Arctic research expedition. China Ocean Press, Beijing, 1—191 (in Chinese).
- Hopkins, D. M. , 1972. The paleogeography and climatic history of Beringia during late Cenozoic time. *Internord*, 12:12—150.
- Joly, K. , Adams, L. , 2002. Evaluating the impacts of wild-land fires on Caribou in Interior Alaska. *Arctic Res.* , 4: 63—67.
- Li, X. , Wang, R. J. , Chen, R. H. , et al. , 2004. Late Quater- nary paleoceanographic and paleoclimatologic records on the slope of the northern Bering Sea. *Chinese J. Polar Res.* , 16(3): 261—269 (in Chinese with English abstract).
- Martinson, D. G. , Pisias, N. G. , Hays, J. D. , et al. , 1987. Age dating and the orbital theory of the ice ages; Development of a high-resolution 0—300 000-year chronos- tratigraphy. *Quat. Res.* , 27:1—29.
- Meng, Y. , Chen, R. H. , Zheng, Y. L. , 2001. Foraminifera in the surface sediments of the Bering and Chukchi Seas and their sedimentary environment. *Acta Oceanologica Sinica* , 23(6): 83—93 (in Chinese with English abstract).
- Morley, J. J. , Hays, J. D. , 1979. *Cycladophora davisiana* : A stratigraphic tool for Pleistocene North Atlantic and interhemispheric correlation. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 44:383—389.
- Morley, J. J. , Hays, J. D. , 1983. Oceanographic conditions associated with high abundances of the radiolarian *Cycladophora davisiana*. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 66: 63—72.
- Morley, J. J. , 1986. Comparison of the Pleistocene records of the radiolarian *Cycladophora davisiana* at high-latitude sites of the Deep Sea Drilling Project. *Init. Rept. DS-DP* , 94:889—894.
- Morley, J. J. , Tiase, V. L. , Ashby, M. M. , et al. , 1995. A high-resolution stratigraphy for Pleistocene sediments from North Pacific sites 881, 883 and 887 based on abundance variations of the radiolarian *Cycladophora davisiana*. *Proc. ODP, Sci. Results* , 145:133—140.
- Morley, J. J. , Heusser, L. E. , 1997. Role of orbital forcing in East Asian monsoon climates during the last 350 kyr: Evidence from terrestrial and marine climate proxies from core RC14-99. *Paleoceanography* , 12(3): 483—493.
- Mortlock, R. A. , Froelich, P. N. , 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in the pelagic marine sediment. *Deep-Sea Res.* , 36(9):1415—1426.
- Nakatsuka, T. , Watannabe, K. , Handa, N. , et al. , 1995. Glacial to interglacial surface nutrient variations of Bering deep basins recorded by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of sedimentary organic matter. *Paleoceanography* , 10(6):1047—1061.
- Nechaev, V. P. , Sorochinskaya, A. V. , Tsoy, I. B. , et al. , 1994. Clastic component in Quaternary sediment of the northwest Pacific and their paleo-oceanic significance. *Mar. Geol.* , 118:119—137.
- Piperno, R. , 1997. Phytoliths and microscopic charcoal from Leg 155: A vegetational and fire history of the Amazon basin during the last 75 k. Y.. *Proc. ODP, Sci. Results* , 155:411—418.
- Sarnthein, M. , Winn, K. , 1988. Global variations of surface ocean productivity in low and mid latitudes: Influence on CO₂ reservoirs of the deep ocean and atmosphere during the last 21 000 years. *Paleoceanography* , 3(3):361—399.
- Stax, R. , Stein, R. , 1993. Long-term changes in the accumula- tion of organic carbon in Neogene sediments, Ontong Java plateau. *Proc. ODP Sci. Results* , 130:573—579.
- Takahashi, K. , 1999. The Okhotsk and Bering Seas; Critical marginal seas for the land-ocean linkage. In: Yoshiki, K. , Kafayama, H. , eds. , Land-sea link in Asia. Proceedings of an international workshop on sediment transport and storage in coastal sea-ocean system. Tsukuba, Japan, 341—353.
- Takahashi, K. , Fujitani, N. , Yanada, M. , 2002. Long term monitoring of Particle fluxes in the Bering Sea and the central Subarctic Pacific Ocean, 1990—2000. *Progr. Oceanogr.* , 55:95—112.
- Verardo, D. J. , Rudiman, W. F. , 1996. Late Pleistocene charcoal in tropical Atlantic deep-sea sediments: Climate and geochemical significance. *Geology* , 24 (9): 855 —857.
- Wang, R. J. , Chen, R. H. , 2004. Variations of siliceous microorganisms in surface sediments of the Bering Sea and their environmental control factors. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* , 29(6):685—690 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J. , Chen, R. H. , 2005. *Cycladophora davisiana* (radiolarian) in the Bering Sea during the Late Quater-

- nary: A stratigraphic tool and proxy of the glacial Subarctic Pacific Intermediate Water. *Science in China (Ser. D)*, 35(2): 149—157 (in Chinese).
- Wang, R., Clemens, S., Huang, B., et al., 2003. Late Quaternary paleoceanographic changes in the northern South China Sea (ODP Site 1146): Radiolarian evidence. *J. Quat. Sci.*, 18(8): 745—756.
- 附中文参考文献**
- 陈立奇,高众勇,王伟强,等,2003.白令海盆 P_{CO_2} 分布特征及其对北极碳汇的影响.中国科学(D辑),33(8): 781—790.
- 陈荣华,孟翊,华棣,等,2001.楚科奇海与白令海表层沉积中的钙质和硅质微体化石研究.海洋地质与第四纪地质,
- 李霞,王汝建,陈荣华,等,2004.白令海北部陆坡晚第四纪的古海洋与古气候学记录.极地研究,16(3): 261—269.
- 孟翊,陈荣华,郑玉龙,2001.白令海与楚科奇海表层沉积物中的孔虫及其沉积环境.海洋学报,23(6): 83—93.
- 王汝建,陈荣华,2004.白令海表层沉积物中硅质生物的变化及其环境控制因素.地球科学——中国地质大学学报,29(6): 685—690.
- 王汝建,陈荣华,2005.白令海晚第四纪的 *Cycladophora davisi*:一个地层学工具和冰期亚北极太平洋中层水的替代物.中国科学(D辑),35(2): 149—157.
- 中国首次北极科学考察队,2000.中国首次北极科学考察报告.北京:海洋出版社,1—191.

《地球科学——中国地质大学学报》 2005 年 第 30 卷 第 6 期 要目预告

- 高精度质谱计在同位素地球化学的应用前景 陈福坤等
 大别造山带天柱山中生代中酸性岩成因的 REE 配分定量模拟 徐小军等
 北淮阳新开岭地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成 吴元保等
 鲁西中、新生代镁铁质岩浆作用与地幔化学演化 邱检生等
 大别山双河超高压榴辉岩中的水:微区红外光谱分析 盛英明等
 新疆阿尔泰山南缘玛音鄂博断裂南侧变质基性岩的发现及其地质意义 周刚等
 从 Pb 同位素组成看桐柏—大别造山带高压变质岩系 张利等
 威海地区超高压变质花岗片麻岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究 唐俊等
 辽西晚古生代长茂营子辉绿岩墙群的地球化学特征 李伍平
 江西九岭花岗岩类复式岩基锆石 SHRIMP U-Pb 年代学 钟玉芳等