

研究论文

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

陈志华^{1,2} 陈毅^{1,3} 王汝建⁴ 黄元辉^{1,2} 刘欣德¹ 王磊⁴ 邹建军^{1,2}

(¹国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; ²海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;

³中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; ⁴同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要 通过对白令海盆中部 BR02 岩芯高分辨率的颜色、粒度和元素地球化学地层的研究发现:(1) 该岩芯较为完整地记录了末次盛冰期结束以来(约 16.3 ka BP)的多期冰筏碎屑事件,包括 H1、OD、YD 和北方 2 期,其中以 H1 和 YD 最为显著,反映了末次冰消期以来该地区海冰/冰山以及区域性冰川的消长变化;(2) BR02 岩芯上部 17—25 cm 段出现富 Mn、富 Ba 的氧化型沉积,说明在全新世高海面时期,白令海与北太平洋、北冰洋之间的水体交换达到极点,白令海环流加强,海盆底层水含氧状况明显改善,并引发海洋生产力增加;(3) CaO、Na₂O、Sr、Zr 及 Na₂O/K₂O 比值的分布说明,海盆冰筏碎屑主要来自富碳酸盐的育空河流域,其次为阿拉斯加半岛和阿留申群岛等火山岩区;岩芯上部 Na₂O/K₂O 比值的递增暗示 10 ka BP 以来与火山物质输运有关的北太平洋入流(阿拉斯加流)可能增加。

关键词 白令海盆 末次冰消期 冰筏碎屑事件 底层水富氧事件 古海流

doi:10.13679/j.jdyj.2014.1.017

0 引言

白令海位于太平洋的最北端,面积为 $2.29 \times 10^6 \text{ km}^2$,是全球第三大边缘海,也是一个环境、气候条件特殊的亚北极海洋。由于其与北冰洋的物质和能量交换、高生产力以及在北太平洋中层水形成中的作用等使其成为全球变化研究的重点区域,以及了解现在和过去北极变化的关键地区之一。

白令海北浅南深,主要由两部分组成。白令海北部或东北部为浅水陆架,通过白令海峡(平均深度为 45 m)与北冰洋相通,晚第四纪冰期-间冰期海峡的周期性开合对全球大洋温盐循环和气候变化具有重要影响^[1];白令海南部或西南部为深水海盆(包括科曼多尔海盆、巴韦尔斯海盆和阿留申海

盆),以阿留申群岛为界与北太平洋分开,又通过群岛之间的水道彼此沟通。海区地处副极地气候带,大部分陆架区现代海冰覆盖时间少于 3 个月,北部的阿纳德尔湾和白令海峡等地可持续 6 个月,3 月份海冰扩张的最大范围可达陆坡区^[2](图 1),而晚第四纪冰期则可能是大面积冰封,不过,目前对此争议较大^[3-4]。白令海水团分上层水、中层水和深层水^[5-6];海盆区表层环流表现为气旋涡流,南部为阿拉斯加流(AS),北部为白令海陆坡流(BSC),西部为堪察加流(KS);水团和海流的发育与北太平洋-白令海-北冰洋之间的水体交换关系密切,是全球大洋温盐循环的关键环节^[7]。

由于白令海位于亚北极海域,碳酸盐补偿深度浅,海底沉积物中普遍缺乏钙质生物壳体,长期以来古海洋学的研究甚少^[9-11]。只是在近十多年来,随

[收稿日期] 2013 年 7 月收到来稿,2013 年 10 月收到修改稿

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40176136、41106166)和南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2012-01-02、CHINARE 2013-01-02、CHINARE2013-04-01、CHINARE2013-03-02)资助

[作者简介] 陈志华,男,1970 年生,博士,研究员,主要从事海洋地质学研究。E-mail: chenizia@fio.org.cn

着北极研究的逐渐深入,古海洋学方面的研究才有了长足的发展,国内外众多学者从硅藻、放射虫、有孔虫以及地球化学等角度来探讨海区的古环境和古气候问题,包括晚第四纪海冰扩张与消退、古生产力、表层环流与水团结构等,但这些记录多局限于北部陆坡区以及希尔绍夫脊(Shirshov Ridge)和鲍尔斯脊(Bowers Ridge)等^[12-25]海脊上,有关深水海盆区的记录较少且较粗略。本文基于对白令海盆 BR02 岩芯高分辨率的颜色反射率、粒度和元素地层学研究以及精细的年代地层对比,综合探讨了末次盛冰期结束以来该海盆的冰川与底层水演化记录。

1 材料和方法

本文的研究材料来源于 2008 年中国第三次北极科学考察在白令海盆中部获取的 BR02 岩芯。岩芯取样位置见图 1,取样点坐标为 174°38.740'E、56°57.874'N,水深为 3 805 m。岩芯原长 194 cm,各学科综合分析数据统一至 191 cm。岩芯分析包括 AMS ¹⁴C 测年、颜色反射率测量、粒度分析、XRF 及 ICP-AES 元素分析等。

岩芯的 AMS ¹⁴C 测年以酸不溶有机碳和有孔虫

为材料,测试分析在美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)和 Beta 实验室完成;数据校正采取 Fairbanks0107 方法^[26],所用碳储库年龄从网上查得为 467 a^[27]。沉积物的颜色反射率通过 MinoltaCM-2002 手持式光谱光度计获得,以 L*、a*、b* 色空间参数表示。粒度分析通过 Mastersizer2000 型激光粒度分析仪获取,样品上机测试前经过去除有机质、碳酸钙、生物硅、洗盐等步骤。岩芯剖开后,在同济大学海洋地质国家重点实验室整体进行了 XRF 元素扫描,扫描间距为 1 cm,获取数据 191 组;同时,以 2 cm 为取样间距,4 cm 为分析间距,在国家海洋局第一海洋研究所海洋沉积与环境地质国家重点实验室对 48 个样品进行了常微量元素的 ICP-AES 分析。为了将高分辨率的元素扫描数据用元素含量直观地表示出来,本文对上述两种方法获得的元素数据进行了对接;文中 Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、K₂O、MnO、Sr、Ba、Zr 数据为换算含量,即先分别求出岩芯各元素 XRF 扫描峰面积的平均值和 ICP-AES 测量平均值,得到两者之间的换算比例,然后将 XRF 扫描元素结果转换成元素的表征含量;仅 MgO、Na₂O、Li 数据为 ICP-AES 实测含量,Si/Al 比值为 XRF 的扫描峰面积之比。

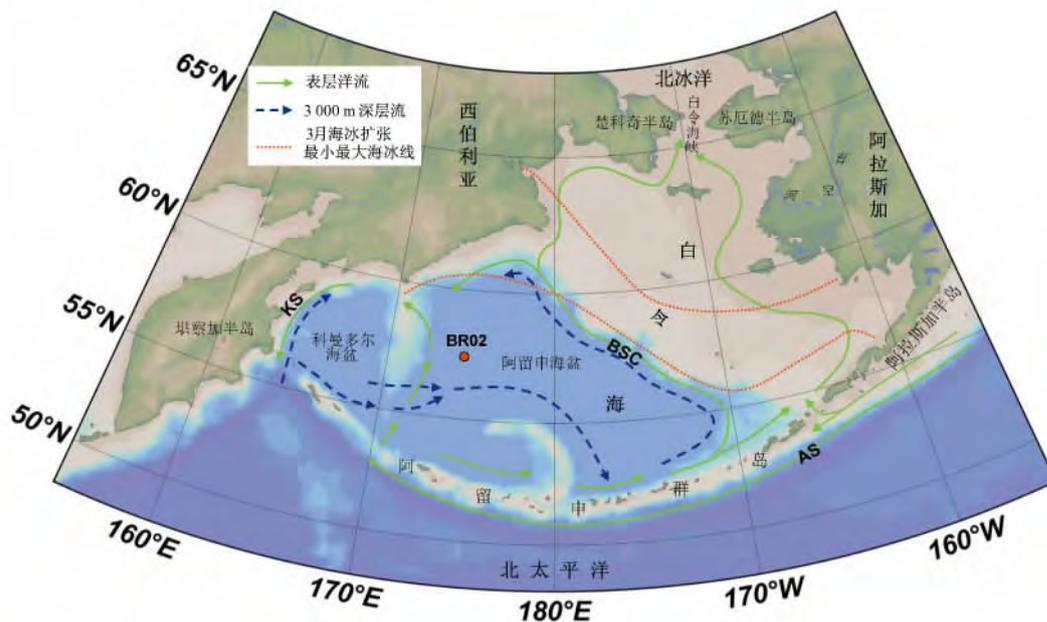


图 1 研究区水深、环流及岩芯取样位置。AS—阿拉斯加流;BSC—白令海陆坡流;KS—堪察加流
Fig. 1. Water depths, circulation and coring site in the study area

2 结果

2.1 岩芯地层特征与年代框架

岩芯岩性地层自上而下划分为 5 个大层,13 个小层(图 2)。结合岩芯的 5 个 AMS ¹⁴C 测年数据(表 1)、岩芯颜色反射率和粒度变化曲线以及与北格陵兰冰芯(NGRIP)氧同位素曲线^[28]和白令海东部海域的年平均气温变化曲线^[29]的对比,综合确定岩芯的年代框架(图 2、表 2)。各层段基本特征简述如下:

第一层:0—45.5 cm,总体为浅绿色黏土质粉砂,以粉砂为主,黏土次之,砂含量小于 5%。中部 17—25cm 段呈灰色-褐灰色,粉砂含量略有增加,

分选较好,沉积物颜色反射率参数 L*、a*、b* 均显著增大,沉积物显褐色调,氧化性明显,其中的硅藻含量也较高。从综合地层年代框架来看,该层总体属于全新世冰后期沉积,对应年龄为 3.9—10 ka BP,可分为 3 个小层:(1) 0—17 cm 为全新世亚北方期沉积,对应年龄为 3.9—6.0 ka BP;(2) 17—25 cm 为全新世高海面期氧化型沉积,对应年龄为 6.0—7.0 ka BP;(3) 25—45.5 cm 为全新世大暖期(Holocene Thermal Maximum)沉积,对应年龄为 7.0—10.0 ka BP。全新世大暖期在中高纬度地区记录明显,但各地出现时间不一^[30],从白令海东部海区年平均气温变化曲线^[29]来看,尽管该地区年平均气温在 12 ka BP 左右就已接近现在的水平,但气温的最高值大体出现在 10—7 ka BP 之间(图 2)。

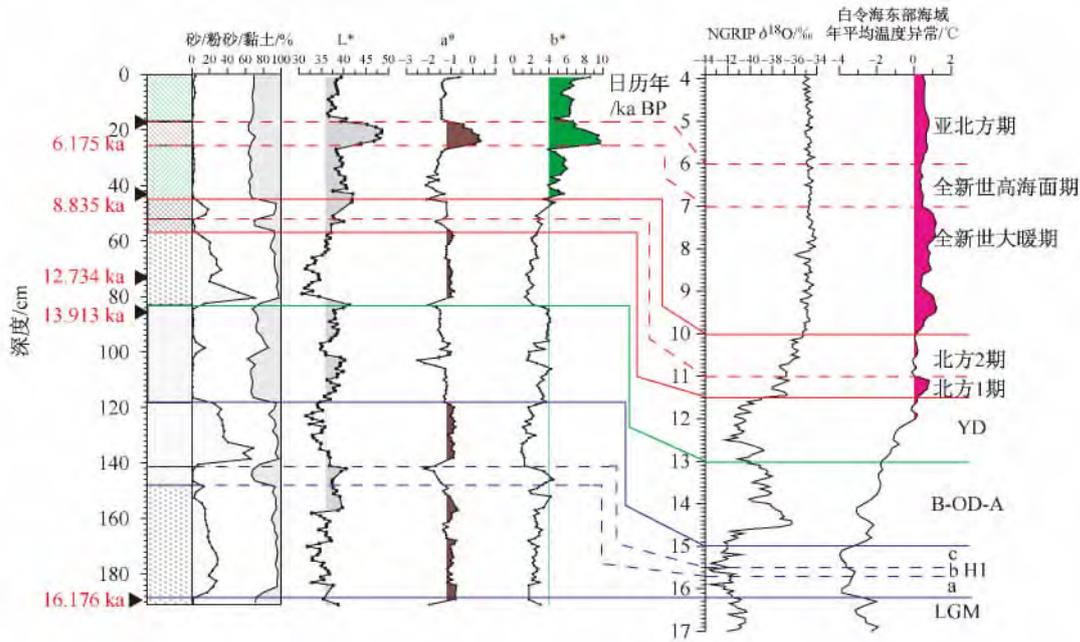


图 2 BR02 岩芯岩性地层及年代框架. 图右侧为北格陵兰冰芯(NGRIP)氧同位素曲线^[28]和白令海东部海域的年平均气温变化曲线^[29]. YD—新仙女木冰阶(Younger Dryas Stadial), B-OD-A—Bölling 间冰阶(Bölling Interstadial, B)、中仙女木冰阶(Older Dryas Stadial, OD)和 Allerød 间冰阶(Allerød Interstadial, A)旋回, H1 为 Heinrich 1 期(Heinrich event 1), LGM 为末次盛冰期(Last Glacial Maximum)

Fig. 2. Lithologic stratigraphy and age model of Core BR02

表 1 BR02 岩芯 AMS ¹⁴C 测年数据与年龄校正
Table 1. AMS ¹⁴C and calibrated ages of Core BR02

岩芯深度/cm	测年材料	AMS ¹⁴ C 年龄/a	当地碳库年龄/a	日历年/a(1950 年以前)	备注
16—18	有机碳	5 890 ± 30	467	6 175 ± 45	Beta 实验室
42—44	有机碳	8 490 ± 40	467	8 835 ± 110	伍兹霍尔海洋研究所
72—74	有孔虫	11 350 ± 50	467	12 734 ± 50	Beta 实验室
84—86	有机碳	12 650 ± 60	467	13 913 ± 73	伍兹霍尔海洋研究所
190—191	有机碳	14 410 ± 60	467	16 176 ± 134	Beta 实验室

第二大层: 45.5—57 cm, 该层上部为深灰色粉砂或砂质粉砂, 下部为灰色黏土质粉砂, 属全新世早期北方期过渡沉积, 可分为 2 个小层: (1) 45.5—52 cm 段沉积物含 10%—20% 的砂, 对应年龄为 10.0—11.0 ka BP, 属北方 2 期冰-海混合沉积; (2) 52—57 cm 段沉积物基本不含砂, 对应年龄为 11.0—11.5 ka BP, 属北方 1 期正常深海沉积。

第三大层: 57—83 cm, 为黑色粉砂质砂或粉砂, 对应年龄为 11.5—13.0 ka BP, 属冰消期新仙女木冷期 (Younger Dryas Stadial, YD) 富冰筏碎屑沉积; 沉积物以粉砂为主, 含 10%—70% 的砂, 砂的平均含量达 29%。新仙女木冷期在白令海^[31]和阿拉斯加^[32]等地均有记录, 是该地区冰川扩张并崩解入海的一个重要时期。

第四大层: 83—118 cm, 总体为灰色黏土质粉砂, 局部粒度较粗, 属冰消期 B/A 间冰阶夹中仙女木旋回沉积 (Bölling-Older Dryas-Allerød, B-OD-A), 可分为 3 个小层: (1) 83—96 cm 为灰色黏土质粉砂, 砂含量小于 5%, 对应年龄为 13.0—14.0 ka BP, 属 Allerød 间冰阶 (Allerød Interstadial, A) 正常深海沉积; (2) 96—101 cm 为黑色含砂质粉砂或粉砂, 砂含量在 5%—15% 之间, 对应年龄为 14.0—14.3 ka BP, 属中仙女木冰阶 (Older Dryas Stadial, OD) 冰-海混合型沉积; (3) 101—118 cm 为灰色黏土质粉砂, 砂含量极少, 对应年龄为 14.3—15.0 ka BP, 属 Bölling 间冰阶 (Bölling Interstadial, B) 正常深海沉积。

第五大层: 118—191 cm, 该层以 Heinrich 1 (H1) 期富冰筏碎屑沉积为主, 底部 188—191 cm 大致对应于末次盛冰期 (Last Glacial Maximum) 的结束。H1 期沉积不均匀, 自下而上可分为 a、b、c 层: (1) 188—148 cm 为黑色砂质粉砂, 砂含量为 2.3%—29.3%, 平均值达 18.3%, 对应年龄为 16.2—15.7 ka BP, 为早期富冰筏碎屑快速沉积层; (2) 148—141 cm 为灰色黏土质粉砂, 砂含量小于 5%, 对应年龄为 15.7—15.5 ka BP, 为中期正常深海沉积, 从白令海东部海区的年平均气温变化曲线^[29]来看, 该时段温度大约升高 0.6℃—0.8℃^[29], 类似特征在 NGRIP 氧同位素曲线上亦有所反映 (图 2); (3) 141—118 cm 为黑色砂质粉砂, 其中砂的含量范围为 25%—68%, 平均值达 41.8%, 对应年龄为 15.0—15.5 ka BP, 为晚期富冰筏碎屑沉积。岩

芯底部 188—191 cm 为灰色粉砂或黏土质粉砂, 年龄在 16.2 ka BP 左右, 推断为末次盛冰期结束后的一个小暖期; 据白令海东部海域的年平均气温变化曲线, 16.2—20 ka BP 为一段相对温暖的时期, 其时年平均气温比现在约低 1.7℃—3℃^[29], 较 H1 期温度略高。

从综合地层年代来看, BR02 岩芯顶部年龄在 3.9 ka BP 左右, 底部年龄在 16.3 ka BP 左右, 岩芯平均沉积速率为 15.4 cm·ka⁻¹ 左右, 期间记录了多期冷暖变化和多次冰筏碎屑事件。总体来说, 冰筏碎屑事件期间的沉积速率要高于暖期和冰后期正常深海沉积速率 (表 2)。

表 2 BR02 岩芯各层段年龄与沉积速率估算
Table 2. The calculated ages and sedimentation rates for main sections in Core BR02

岩芯深度/cm	持续时间/(ka BP)	沉积速率/(cm·ka ⁻¹)	沉积期
0—17	3.9—6.0	8.10	全新世亚北方期正常深海沉积
17—25	6.0—7.0	8.00	全新世高海面期氧化沉积
25—45.5	7.0—10.0	6.83	全新世大暖期正常深海沉积
45.5—52	10.0—11.0	6.50	全新世北方 2 期冰-海混合沉积
52—57	11.0—11.5	10.00	全新世北方 1 期正常深海沉积
57—83	11.5—13.0	17.33	新仙女木期富冰筏碎屑沉积
83—118	13.0—15.0	17.50	Bölling-Older Dryas-Allerød 深海沉积
118—188	15.0—16.2	58.33	H1 期富冰筏碎屑沉积
188—191	16.2—16.3	30.00	末次盛冰期末小暖期正常深海沉积

2.2 沉积物的粒度特征

岩芯沉积物的粒度组成及特征参数随年龄的变化曲线见图 3。砂的含量范围为 2.33%—36.82%, 平均值为 18.49%; 粉砂的含量范围为 27.07%—91.92%, 平均值为 67.55%; 黏土的含量范围为 0.37%—70.28%, 平均值为 13.95%。沉积物以粉砂为主, 砂次之, 黏土最少, 砂的成层出现使之明显有别于一般深海黏土沉积, 反映出高纬度地区海冰-冰山对沉积物搬运的特殊贡献。如图 3 所示, 岩芯沉积物中砂的峰值主要出现在 16.2—15 ka BP (H1)、13—11.5 ka BP (YD) 和 11—10 ka BP (北方 2 期) 等时段, 大体与北大西洋冰筏碎屑事件和全球性的冷事件^[28]相对应, 说明区域性冰川扩张或水温

下降等是白令海盆冰筏碎屑记录的重要前提。除个别层位受砂的稀释作用影响外,粉砂含量的变化与砂的变化大体一致,由于冰筏碎屑通常粗细混杂,砂和粉砂在一定程度上表现出同源性。黏土含量的变化与砂正好相反(图 3),它们在 10—4 ka BP(全新世大暖期、高海面期和亚北方期)、13.0—15.0 BP(B/A)等时段沉积物中含量高,其时砂的含量均小于 5%,说明当时的白令海盆很少受海冰和冰山的影响,其环境与现在基本相似。

除砂、粉砂和黏土组分外,沉积物平均粒径和偏态系数的变化亦较为明显。如图 3 所示,岩芯沉积物平均粒径的变化范围为 3.79—7.57 Φ (5.52—72.14 μm),平均值为 6.12 Φ (19.89 μm);平均粒径在 10—4 ka BP(全新世大暖期、高海面期和亚北方期)、13.0—15.0 BP(B/A)等时段基本处于同一水平,在 7 Φ 左右变化,仅在 14.0—14.3 ka BP(OD)出现了短暂的粗化(图 3)。与平均粒径不同的是,沉积物偏态系数 Ku 除了在各冰筏碎屑沉积层较大

外,在全新世大暖期和亚北方期也有明显的正偏效应,唯独全新世高海面期氧化沉积物(7.0—6.0 ka BP)的偏态系数较小,暗示该时期白令海盆沉积物搬运方式单一,冰筏搬运可能完全中止。

如图 3 所示,采用不同的粒度组分来指示冰筏碎屑,其结果差异较大。如用北极地区冰筏碎屑的经典指示粒度 >150 μm 来反映本岩芯冰筏碎屑的变化情况,结果发现 >150 μm 粒度基本上局限在 H1 c 段(15.5—15 ka BP)和 YD 期(13—11.5 ka BP),即使在砂含量很高的 H1 a 段(16.2—15.7 ka BP)也可以忽略不计,说明不同海区海洋环境及周边陆地冰川环境不同,冰筏碎屑的特征粒度会发生变化。由于 BR02 岩芯位处白令海盆的中部,海域气温和水温南高北低,冰山的大小和负载能力会随着离岸距离的增大而减小,来自北部的冰山只有足够大才能维持自身的存在,并将粗颗粒碎屑物质带往离岸较远的深水盆地沉积下来。

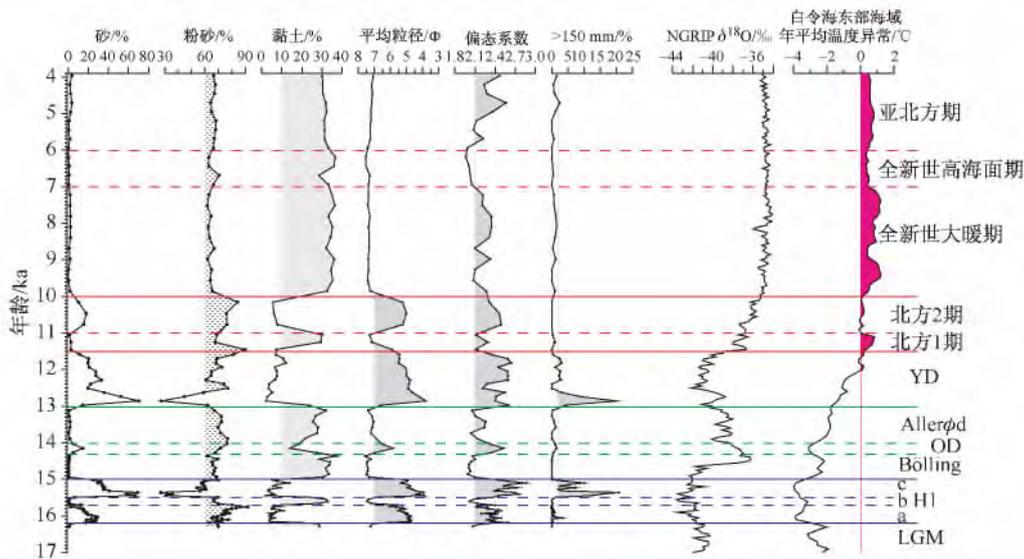


图 3 BR02 岩芯粒度组成及特征粒度参数的变化。图右侧为 NGRIP 氧同位素曲线^[28]和白令海东部海域的年平均气温变化曲线^[29],有关字母代表的含义同图 2

Fig. 3. Grain size compositions and characteristic parameters of Core BR02

2.3 元素地球化学特征

典型常量元素(氧化物)和微量元素随年龄的变化曲线见图 4、图 5,大体可分为 4 组:

第一组:包括 Fe₂O₃、MgO 和微量元素 Li 等,它们的含量变化与黏土、沉积物平均粒径等的变化相似,在 10—4 ka BP、11.5—11 ka BP 和 15.0—13.0

ka BP 等时段富黏土型正常深海沉积物中含量较高,在 16.2—15 ka BP(H1)、13—11.5 ka BP(YD)和 11—10 ka BP(北方 2 期)等时段富砂、富冰筏碎屑沉积物中含量较低。

第二组:包括 CaO 及微量元素 Sr、Zr 等,其含量变化与砂的含量变化基本一致,在 16.2—15 ka BP

(H1)、13—11.5 ka BP(YD)和 11—10 ka BP(北方 2 期)等时段的富砂沉积物中含量高,唯一的例外是在 7.6—7.4 ka BP 附近有一个小峰。Ca、Sr 的同步富集通常与碳酸盐有关,包括海洋生物成因碳酸盐和陆源碎屑成因碳酸盐,从它们的富集层位来看,应以冰筏碎屑成因的陆源碳酸盐为主,并可能来自富碳酸盐的育空河流域。该流域沉积物中碳酸盐含量可达 15%—20%^[33]。Zr 为高场强元素,在海洋沉积物中易为黏土矿物、铁锰氧化物-氢氧化物等吸附,也常以锆石等重矿物形式富集于粗碎屑沉积物中^[34]。Zr 在 BR02 岩芯沉积物中的选择性富集说明粗颗粒冰筏碎屑对 Zr 的分布起主导作用。

第三组:包括 Al_2O_3 、 K_2O 及一些黏土吸附性元素(本文未列出),它们的含量变化介于上述两组元素之间,既偏向于在富黏土沉积物中富集,亦与海洋生源组分的稀释作用以及冰筏碎屑的物质组成等有关,它们在 7—4 ka BP 段沉积物中含量较低,在 11.5—11 ka BP、15.0—13.0 ka BP 等时段的富黏土和粉砂沉积物中含量较高。

第四组:包括 MnO 和微量元素 Ba,其显著特征是在全新世氧化型沉积物中(6.0—7.0 ka BP)含量特别高。Mn 为典型的变价过渡金属元素,在底层海水、沉积物、孔隙水之间的循环很大程度上受控于海底的氧化还原条件,并趋向于在氧化型沉积物中富集^[35]。海洋沉积物中 Ba 的异常通常与海洋生产力

有关,沉积物中的过剩 Ba 或重晶石被视为海洋生产力的替代指标和指示矿物^[36];在高纬度地区,重晶石的形成与硅藻的生长有着密切的关系,多出现在富含有机质和硅质生物壳体的沉积物中,重晶石内部也常常含有少量的有机质或生物碎片^[37]。从 BR02 岩芯中 MnO、Ba 富集的一致性来看,7.0—6.0 ka BP 在白令海盆应该是一个海洋生产力高、底层水富氧的特殊时段。

除上述元素外,如图 4、图 5 所示,岩芯沉积物中 Na_2O 及 Na_2O/K_2O 比值的变化比较特殊。 Na_2O 在岩芯下部 16.2—15 ka BP 段沉积物中含量较高,在上部 11.5—4 ka BP 段沉积物中有向上递增的趋势;与 Na_2O 相比, Na_2O/K_2O 比值在 10 ka BP 以前沉积物中的旋回变化明显,其高值区间与富砂的冰筏碎屑层基本一致。Na 是典型的亲石性元素,在海洋沉积物中 Na 的分布受长石、蒙皂石、辉石等火山成因矿物影响,并趋向于在化学风化作用较弱的沉积物中富集^[34]。白令海位于太平洋板块、欧亚板块和北美板块的结合部,其周边的阿留申群岛、阿拉斯加半岛、堪察加半岛等地火山岩和现代火山活动分布十分普遍。从 BR02 岩芯 CaO、 Na_2O 、 K_2O 、Sr、Zr 以及 Na_2O/K_2O 比值的分布综合来看,火山源物质可能对冰消期富冰筏碎屑沉积和冰后期正常深海沉积均有影响,但对后者的影响更为明显。16.3—10 ka BP 段沉积物中 Na_2O/K_2O 比值的旋回变化一

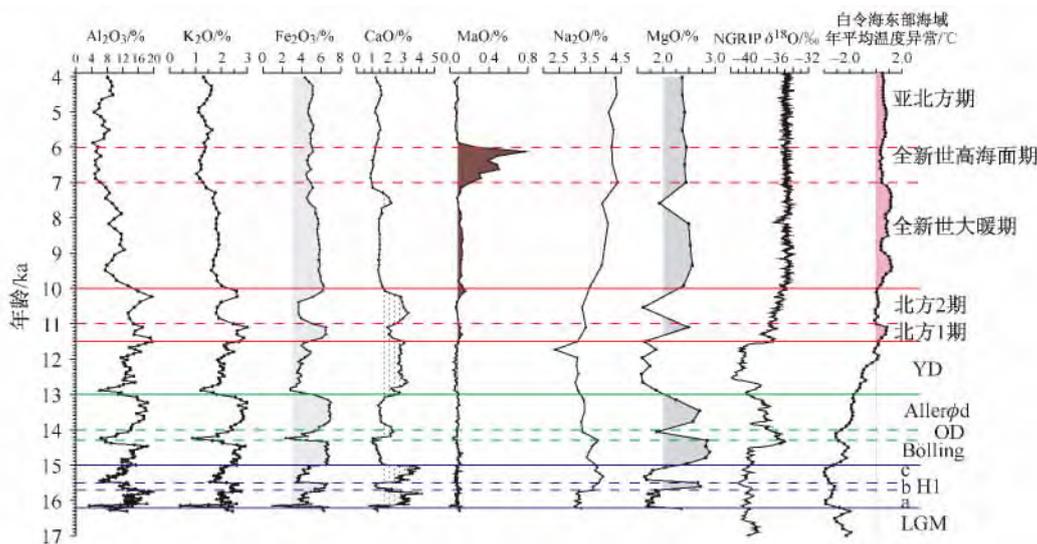


图 4 BR02 岩芯沉积物中常量元素含量变化。图右侧为 NGRIP 氧同位素曲线^[28]和白令海东部海域的年平均气温变化曲线^[29],有关字母代表的含义同图 2

Fig. 4. Vertical distributions of major elements in Core BR02

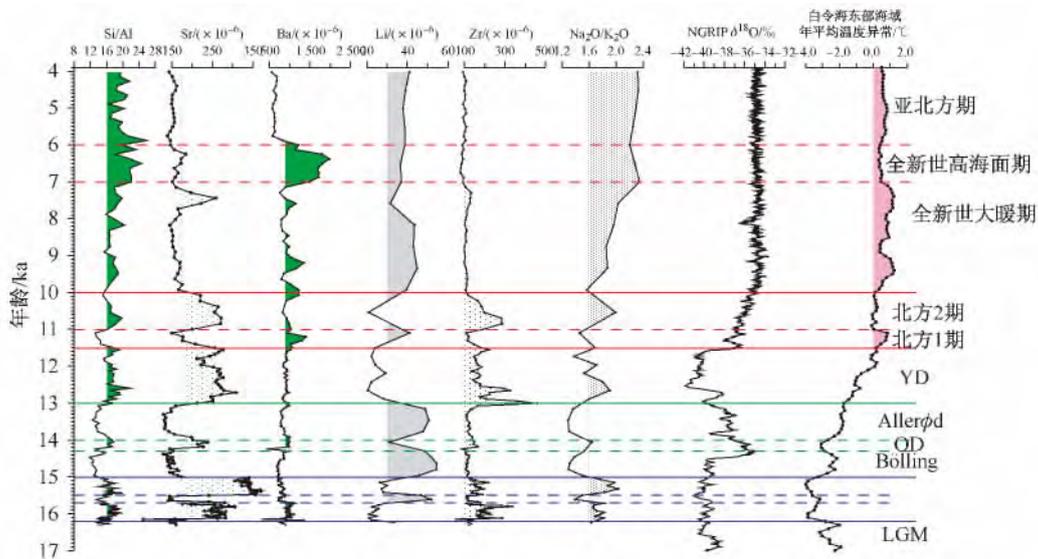


图 5 BR02 岩芯沉积物中微量元素及特征元素比值的分布. 图右侧为 NGRIP 氧同位素曲线^[28]和白令海东部海域的年平均气温变化曲线^[29],有关字母代表的含义同图 2

Fig. 5. Vertical distributions of minor elements and characteristic ratios in Core BR02

方面反映了冰筏碎屑沉积物风化程度较弱,另一方面也说明它们可能含有较多的火山物质,如来自阿留申群岛甚至堪察加半岛等火山岩区。10 ka BP 以来 Na₂O/K₂O 比值的逐渐增大则暗示该时期火山物质的影响增大,是受该地区火山喷发活动影响还是沉积物搬运动力发生了改变?从岩芯沉积物特征来看,应该更偏向于后者。随着冰后期海平面的上升,自北太平洋进入白令海的入流增加,入流(阿拉斯加流)绕阿留申群岛流动,携带来的火山物质也会增加。

3 讨论

3.1 末次冰消期以来白令海盆冰筏碎屑事件与海冰/冰山状况

白令海地处副极地气候带,西伯利亚和阿拉斯加两大干冷气候区之间,该地区晚第四纪冰川历史记录十分有限,并存在很大争议,特别是有关堪察加地区和西伯利亚东北部地区的冰川以及低海面时期白令海出露区的记录知之甚少^[3-4]。比较流行的观点认为,晚更新世冰期(晚威斯康星冰期),包括白令海峡在内的白令海东北部陆架几乎全部暴露成陆地,气候干冷,大陆冰川主要局限在阿拉斯加和西伯利亚东北部山区,但没有足够证据表明当时的白令

海陆架也被冰川覆盖^[4, 38-39]。另一类观点认为,晚威斯康星冰期白令海周边地区曾形成巨厚的东西伯利亚冰盖和白令海洋冰盖;其中,白令海洋冰盖以楚科奇海、白令海和波弗特海陆架为基底,从北部跨越楚科奇半岛(Chukchi Peninsula)和苏厄德半岛(Seward Peninsula)穿过白令海峡进入白令海,然后与阿留申-司令脊(Aleutian-Commander Ridge)支撑的厚层漂浮冰架相连^[3, 40]。

与西岸的西伯利亚相比,白令海东岸的阿拉斯加地区晚更新世及全新世的冰川历史相对较为清晰。该地区现代山岳冰川发育,覆盖面积达 75 000 km²,是北美现存最大的山岳冰川^[41];而在末次盛冰期,冰盖面积大约是现在的 10 倍,且冰川多扩展到海拔较低的沿海地区^[42]。从阿拉斯加海岸山脉向南、横跨育空和加拿大不列颠哥伦比亚省的大部分区域,众多冰帽和山麓冰川拼接起来,构成巨大的科迪勒拿冰盖(Cordilleran Ice Sheet)的西北部延伸体,一些地方冰盖最大时厚度超过 2 km^[43]。尽管各地记录不一,末次冰期最盛期大致出现在 25—22 ka BP^[44];在 23 ka BP 左右,曾发生了较大的跨陆架冰进事件,冰川从山谷流下,进入陆架,在一些地方聚合形成大的跨陆架冰川集合体,但并未形成海洋冰盖;一个例外是在阿拉斯加半岛的西南部,冰平衡线接近海平面,使得源于山峰的冰川能够覆盖较窄的

陆架^[45]。

在阿拉斯加中部的鱼湖谷 (Fish Lake valley) 等地,末次盛冰期初始冰碛物大致形成于 22.4 ka BP 前后,意味着该地区末次盛冰期的结束大致与中纬度地区同步^[32]。依据孢粉重建的古气温曲线表明,白令海东部海域末次盛冰期最冷气候大致出现在 23—20 ka BP 之间,其时年平均气温比现在低 2℃—4℃,7 月份平均温度比现在低 4℃左右,1 月份平均气温比现在低 2℃左右;随后的 20—16.2 ka BP 是一个相对暖期,年平均气温较现在低 1.7℃—3℃^[29],大致对应于白令海盆 BR02 岩芯的底部沉积记录,其沉积物较细,砂含量小于 5%,说明当时的白令海盆中部已很少有冰山,基本为开阔水域。从阿拉斯加地区的冰川记录来看,该时期冰盖有进有退,比较复杂^[46]。

从 BR02 岩芯沉积物记录来看,16.2—15.0 ka BP 的 H1 期是该地区海冰扩张、冰筏碎屑沉积的一个重要时期。该时期沉积速率大,沉积物中砂含量高,>150 μm 粗碎屑组分含量高。类似的冰筏碎屑沉积与海冰扩张现象在鄂霍次克海和北太平洋等地均有发现,不过在时间上的界定稍有差别,如在鄂霍次克海的发生时间为 16.5—15.3 ka BP^[47],在北太平洋的发生时间为 19—15 ka BP^[23]。从白令海北部陆坡和南部的 Bowers 海脊等地的放射虫、有孔虫等记录来看,H1 期的表现似乎不太一致^[16,24],但该时期总体为冷期^[16,24,28];寒冷气候为白令海海冰扩张、周边陆地冰川扩张与崩解入海、冰山的远距离搬运等创造了条件。从 BR02 岩芯沉积物记录以及白令海东部海域的年平均气温变化曲线^[29]来看(图 3),即使在 H1 期,白令海气候亦存在明显波动,早期(16.2—15.7 ka BP)和晚期(15.5—15 ka BP)相对较冷,推测白令海盆中央常年有较多的海冰和冰山;中期(15.7—15.5 ka BP)则较为暖和,年平均气温要高 0.6℃—0.8℃^[29],海冰和冰山急剧减少,与现代开阔的边缘海沉积环境相似。

H1 冷期以后,白令海地区气温明显回升,进入了一个长约 2 ka 的 B/A 间冰阶暖期(15—13 ka BP)期间夹杂一小段长约 300 a 的气温回落,即出现短暂的中仙女木冰阶(14.3—14.0 ka BP)。从 BR02 岩芯记录来看,Bölling 间冰阶大约出现在 15.0—14.3 ka BP,Allerød 间冰阶大约出现 14.0—13.0 ka BP,两者均属于正常深海沉积,砂含量 <

5%;但期间的 14.3—14.0 ka BP 出现了一小段的富砂沉积,推断为中仙女木冰阶冰-海混合型沉积。类似事件在白令海北部陆坡亦有记录,王汝建等^[16]依据放射虫 *Cycladophora davisiana* 记录将 B/A 暖期的起点定在 14.6 ka BP,末点定在 12.8 ka BP,14.5 ka BP 左右的低值区间界定为 D/O1 事件。从总体来看,白令海区 Bölling 间冰阶-中仙女木冰阶-Allerød 间冰阶的发生时间均略早于北格陵兰冰芯记录。

B/A 暖期以后,北半球气候出现了一次显著的降温事件,即新仙女木冷期,其发生时间大致在 12.9—11.5 ka BP,新仙女木冷期的形成被认为与劳伦冰盖的大规模解体融化有关。从 BR02 岩芯记录来看,新仙女木冷期大致出现在 13.0—11.5 ka BP,该时期沉积物以粉砂为主,含 10%—70% 的砂,砂的平均含量达 29%,>150 μm 的粒级组分在前期达到 20%,可见新仙女木冷期在白令海盆区是继 H1 以后的又一个海冰、冰山的重要发育期,尽管从白令海东部海区年平均气温变化曲线来看,该地区新仙女木期降温幅度不大^[29]。在白令海北部陆坡等地,新仙女木期表现为沉积物中冰筏碎屑含量高、碳酸盐含量低,底栖有孔虫碳/氧同位素偏重,是一个明显的冷期^[31];而在阿拉斯加地区,新仙女木期冰川以扩张或静态为主^[32,46];海陆环境的变冷,局部冰川扩张和海冰扩张,是白令海盆冰筏碎屑事件的主要成因。

新仙女木事件后,北极地区进入了一段数千年的、相对现今还要温暖、潮湿的阶段。高纬度地区夏季日照强度在全新世初期达到鼎盛点(10.9 ka BP),大约比现今辐射强度高出 8%^[29]。虽然北极大部分地区都经历了该暖期,但各个地区暖期的发生出现了穿时性,这可能是由于冰层覆盖状况以及表层海水温度的地域性差异造成的。Kaufman 等^[30]收集了北极西部地区 140 个全新世大暖期的站位资料,发现各地区全新世大暖期出现时间也存在着明显的地域差异,如阿拉斯加和加拿大西北区域出现在 11—9 ka BP,而加拿大东北部则晚了 4 ka。从孢粉重建的古气温曲线来看,尽管白令海东部海域年平均气温在 12 ka BP 左右就已接近现在的水平,但气温的最高值大体出现在 10—7 ka BP 之间(图 2)^[29]。从 BR02 岩芯记录来看,在新仙女木事件之后、全新世大暖期到来之前,白令海还经历

了一个短暂的升温期和低温期,即北方 1 期和北方 2 期;其中北方 1 期为正常深海沉积,对应年龄为 11.0—11.5 ka BP;北方 2 期为冰-海混合沉积,沉积物中含 10%—20% 的砂,对应年龄为 10.0—11.0 ka BP。尽管 11.5 ka BP 新仙女木冷期结束,全新世开始,但北美和亚欧大陆的一些大冰盖在其后还持续了数千年后,其中的劳伦冰盖直到大约 7 ka BP 才消失。作为北美冰盖的一部分和科迪勒拿冰盖的西北部延伸体,阿拉斯加地区局部冰川扩张和退缩贯穿整个全新世,尽管在阿拉斯加及其海岸地区,迄今发现的早到中全新世冰川扩张记录较少,而晚全新世的扩张记录相对较多。

3.2 元素地球化学地层的古海洋学指示意义

白令海是一个局部季节性海冰发育、海水层化明显、海洋生产力很高的半封闭式亚北极边缘海,晚第四纪该地区古海洋学的变化与海面波动、北太平洋-白令海-北冰洋之间的水体交换等密不可分,并通过海水-沉积物界面的某些生物地球化学过程记录下来。早在 1982 年,Gardner 等^[48]研究发现,在白令海深水海盆区特别是阿留申海盆的中部和南部,广泛分布着一层氧化型沉积物,它们以褐色硅藻软泥夹绿灰色-橄榄色硅藻软泥为主,富 Mn、Ba、Co、Mo、Ni,贫 Fe、C;该层厚约 8—10 cm,大致出现在海水-沉积物界面以下 0—8 cm,形成年代在 6 ka BP 左右,大体与白令海盆中部 BR02 岩芯 17—25 cm 氧化层相对应,后者的形成时间大致在 6.0—7.0 ka BP。如何解释该氧化型沉积层的形成?显然不能用简单的海水-沉积物界面过程来解释,因为该氧化层位处界面以下一定深度。于是,Gardner 等^[48]在考量北太平洋底层水对流加强导致富氧、海冰形成导致底层水充氧、以及冰融水透镜体的出现导致海洋生产力降低三种生物地球化学模式后,最终提出了冬季海冰形成导致底层水充氧、(春夏季)海冰融化形成低生产力淡水透镜体的观点。该观点面临两个方面的挑战:第一,在全新世中后期海冰为什么大面积出现在白令海盆的中部和南部,而在北部陆坡区却没有出现?因为陆坡区在末次冰消期以来发生了底层水缺氧事件^[19, 21, 25]。第二,该氧化型沉积富硅藻而贫有机质并不代表当时的海洋生产力低。针对这些疑问,作者提出了“白令海盆中部特殊氧化层是全新世高海面期沉积产物”的观点。

从生物地球化学的角度来看,表层海水中形成

的颗粒有机物是海水和浅表层沉积物中最主要的还原剂,不断加入的颗粒有机物消耗底层水中的氧气,使之向还原状态发展^[35]。在富氧海水中,Mn 很快以 MnO_2 形式沉积下来,并在氧气能够穿透的沉积物表层大量富集;但在氧气穿透面以下沉积物中, MnO_2 成为最重要的二级氧化剂,替代氧气继续氧化分解有机质,而自身则被还原为易溶的 Mn^{2+} 而使沉积物中的 Mn 含量降低。大约在 7 ka BP 左右,全新世大暖期结束,北半球冰盖包括北美的劳伦冰盖和科迪勒拿冰盖等基本上融化殆尽,全球海平面处于最高位,白令海地区海平面可能比现在高,如 Shennan^[49] 发现在阿拉斯加白令冰川地区 9.2—5 ka BP 之间的相对海平面比现在要高很多,甚至达到数米量级。海平面的大幅度上升使得当时白令海与北太平洋、北冰洋之间的水体交换显著增加并达到某种极值状态,大量的太平洋水通过白令海峡进入北冰洋,同时更多的北太平洋水包括富氧的底层水和中层水通过阿留申群岛之间的水道进入白令海盆,使白令海盆环流加强,海水的层化减弱,海盆底层水更新加快,含氧状况明显改善,并支持和引发了海洋生产力的显著增加。BR02 岩芯 17—25 cm 富 Mn 氧化层的形成正是因为高海面时期(6.0—7.0 ka BP)白令海盆中部底层海水极其富氧,生成的 MnO_2 比较多,抵抗被有机质还原分解的能力较强,才最终在沉积物中长期保存下来。沉积物中的有机质和生源 Ba(或重晶石)虽然同为海洋生产力的替代指标,但它们在早期成岩作用中的地球化学行为不同,结果前者多被海水-沉积物中的 O_2 和 MnO_2 等氧化分解,后者则在特殊的氧化环境中被保存下来,从而形成了该时期白令海盆特殊的富 Mn、富 Ba 氧化沉积层。全新世高海面期以后,伴随着全球性的气候变冷和海面回落,白令海环流及与外部海洋之间的水体交换在某种程度上减弱,底层海水中的氧更新不足,难以抵挡有机质的还原,海水-沉积物界面再次转为以缺氧和还原性为主。与此同时,从 BR02 岩芯沉积物中 Na_2O/K_2O 比值的分布来看,伴随着冰后期海平面的上升,与火山物质运输关系密切的北太平洋入流(阿拉斯加流等)可能增加。上述两者均说明冰后期白令海环流和水团结构发生了变化。

4 结论

通过对白令海盆中部 BR02 岩芯高分辨率颜色、粒度和元素地球化学地层的研究,获得如下结论:

(1) 该岩芯较为完整地记录了末次盛冰期结束(16.3 ka BP)以来的多期冰筏碎屑事件,包括 H1、OD、YD 和北方 2 期,其中以 H1 和 YD 最为显著,其发生大体与北大西洋冰筏碎屑事件和全球性的冷事件相一致,反映了末次冰消期以来白令海地区海冰/冰山以及区域性大陆冰川的消长变化。

(2) BR02 岩芯上部 17—25 cm 段出现富 Mn、富 Ba 的氧化型沉积,说明在全新世高海面时期(6.0—7.0 ka BP),海平面的大幅度上升使得白令海与北太平洋、北冰洋之间的水体交换显著增加并达到某种极值状态,大量的太平洋水通过白令海峡进入北冰洋,同时更多的北太平洋水包括富氧的底

层水和中层水通过阿留申群岛之间的水道进入白令海盆,使白令海盆环流加强,海水的层化减弱,海盆底层水更新加快,含氧状况明显改善,并支持和引发海洋生产力的显著增加。

(3) BR02 岩芯中 CaO、Na₂O、Sr、Zr 与 Na₂O/K₂O 比值的分布说明,白令海盆的冰筏碎屑沉积主要来自富碳酸盐的育空河流域,其次为阿拉斯加半岛和阿留申群岛等火山岩区物质;而 10 ka BP 以来 Na₂O/K₂O 比值的明显变大进一步说明随着冰后期海平面的上升,自北太平洋进入白令海的入流量增加,从阿留申群岛地区携带来的火山物质也逐渐增加。

致谢 感谢 2008 年中国第三次北极科学考察队程振波、雷吉江、孙焯忱、张涛、陈吉刚等地质组成员为取得样品付出了艰辛的劳动,感谢审稿专家提出了宝贵、中肯的修改意见。本研究使用的中国第三次北极科学考察采集的样品由中国极地研究中心沉积物库提供。

参考文献

- Shaffer G, Bendtsen J. Role of the Bering Strait in controlling North Atlantic Ocean circulation and climate. *Nature*, 1994, 367(6461): 354—357.
- Danielson S, Curchitser E, Hedstrom K, et al. On ocean and sea ice modes of variability in the Bering Sea. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: C12034, doi:10.1029/2011JC007389.
- Grosswald M G. Late-Weichselian ice sheets in Arctic and Pacific Siberia. *Quaternary International*, 1998, 45-46: 3—18.
- Glushkova O Y. Geomorphological correlation of Late Pleistocene glacial complexes of Western and Eastern Beringia. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(1-3): 405—417.
- 汤毓祥, 焦玉田, 邹娥梅. 白令海和楚科奇海水文特征和水团结构的初步分析. *极地研究*, 2001, 13(1): 57—68.
- 高郭平, 侍茂崇, 赵进平, 等. 1999 年白令海夏季水文特征分析. *海洋学报*, 2002, 24(1): 8—16.
- Clement K, Maslowski J W, Okkonen S. On the processes controlling shelf-basin exchange and outer shelf dynamics in the Bering Sea. *Deep-Sea Research Part II*, 2009, 56, 1351—1362, doi:10.1016/j.dsr2.2008.10.023.
- Takahashi K. The Bering and Okhotsk Seas: modern and past paleoceanographic changes and gateway impact. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1998, 16(1): 49—58.
- Sancetta C. Effect of Pleistocene glaciation upon oceanographic characteristics of the North Pacific Ocean and Bering Sea. *Deep-Sea Research*, 1983, 30(8): 851—869.
- Sancetta C, Robinson S W. Diatom evidence on Wisconsin and Holocene events in the Bering Sea. *Quaternary Research*, 1983, 20(2): 232—245.
- Sancetta C, Heusser L, Labeyrie L, et al. Wisconsin-Holocene paleoenvironment of the Bering Sea: Evidence from diatoms, pollen, oxygen isotopes and clay minerals. *Marine Geology*, 1984, 62(1-2): 55—68.
- Caissie B E, Brigham-Grette J, Lawrence K T, et al. Last Glacial Maximum to Holocene sea surface conditions at Umnak Plateau, Bering Sea, as inferred from diatom, alkenone, and stable isotope records. *Paleoceanography*, 2010, 25: PA1206, doi:10.1029/2008pa001671.
- Katsuki K, Takahashi K. Diatoms as paleoenvironmental proxies for seasonal productivity, sea-ice and surface circulation in the Bering Sea during the late Quaternary. *Deep-Sea Research Part II*, 2005, 52(16-18): 2110—2130.
- Okazaki Y, Takahashi K, Asahi H, et al. Productivity changes in the Bering Sea during the late Quaternary. *Deep-Sea Research Part II*, 2005, 52(16-18): 2150—2162.
- Tanaka S, Takahashi K. Late Quaternary paleoceanographic changes in the Bering Sea and the western subarctic Pacific based on radiolarian assemblages. *Deep-Sea Research Part II*, 2005, 52(16-18): 2131—2149.

- 16 王汝建,陈荣华. 白令海晚第四纪的 *Cycladophora davisiana*: 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*, 2005, 35(2): 149—157.
- 17 王汝建,李霞,肖文申,等. 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. *中国地质大学学报*, 2005, 30(5): 550—558.
- 18 何沅澎,王汝建,郑洪波,等. 白令海 DSDP188 站氧同位素 3 期以来的古海洋与古气候记录. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(2): 65—71.
- 19 邹建军,石学法,白亚之,等. 末次冰消期以来白令海古环境及古生产力演化. *中国地质大学学报*, 2012, 37(增刊): 1—11.
- 20 Nakatsuka T, Watanabe K, Handa N, et al. 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*, 1995, 10(6): 1047—1061.
- 21 Cook M S, Keigwin L D, Sancetta C A. The deglacial history of surface and intermediate water of the Bering Sea. *Deep-Sea Research II*, 2005, 52(16-18): 2163—2173.
- 22 Khusid T A, Basov I A, Gorbarenko S A, et al. Benthic foraminifers in Upper Quaternary sediments of the Southern Bering Sea: Distribution and paleoceanographic interpretations. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2006, 14(5): 538—548.
- 23 Gebhardt H, Samthein M, Grootes P M, et al. Paleonutrient and productivity records from the subarctic North Pacific for Pleistocene glacial terminations I to V. *Paleoceanography*, 2008, 23(4): PA4212, doi:10.1029/2007PA001513.
- 24 Gorbarenko S A, Wang P, Wang R, et al. Orbital and suborbital environmental changes in the southern Bering Sea during the last 50 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 286(1-2): 97—106.
- 25 Chekhovskaya M P, Basov I A, Matul A G, et al. Planktonic foraminifers in the southern Bering Sea: Changes in composition and productivity during the Late Pleistocene-Holocene. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2008, 16(3): 328—342.
- 26 Fairbanks R G, Mortlock R A, Chiu T, et al. Marine radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years B. P. based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24: 1781—1796.
- 27 Radiocarbon. *ideo. combia*. [http: edu//marine radiocarbon reservoir. age](http://edu//marine radiocarbon reservoir. age).
- 28 Andersen K K, Azuma N, Barnola J M, et al. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 2004, 431(7005): 147—151.
- 29 Viau A E, Gajewski K, Sawada M C, et al. Low-and high frequency climate variability in Eastern Beringia during the past 25,000 years. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2008, 45(11): 1435—1453.
- 30 Kaufman D S, Agerh T A, Anderson N J, et al. Holocene thermal maximum in the western Arctic. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(5-6): 529—560.
- 31 Rella S F, Tada R, Nagashima K, et al. Abrupt changes of intermediate water properties on the northeastern slope of the Bering Sea during the last glacial and deglacial period. *Paleoceanography*, 2012, 27(3): PA3203, doi: 10.1029/2011PA002205.
- 32 Young N S E, Briner J P, Kaufman D S. Late Pleistocene and Holocene glaciation of the Fish Lake valley, northeastern Alaska. *Journal of Quaternary Science*, 2009, 24(7): 677—689.
- 33 Muhs D R, Budahn J R. Geochemical evidence for the origin of late Quaternary loess in central Alaska. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2006, 43(3): 323—337.
- 34 赵一阳,鄢明才. *中国浅海沉积物地球化学*. 北京: 科学出版社, 1994: 130—150.
- 35 Schulz H D, Azbel M. *Marine Geochemistry*. Berlin: Springer, 2000: 129—167.
- 36 Bishop J K B. The barite-opal-organic carbon association in oceanic particulate matter. *Nature*, 1988, 332(6162): 341—343.
- 37 Robin E, Rabouille C, Martinez G, et al. Direct barite determination using SEM/EDS-ACC system: implication for constraining barium carriers and barite preservation in marine sediments. *Marine Chemistry*, 2003, 82(3-4): 289—306.
- 38 Nechaev V P, Sorochinskaya A V, Tsoy I B, et al. Clastic components in Quaternary sediments of the Northwest Pacific and their paleo-oceanic significance. *Marine Geology*, 1994, 118(1-2): 119—137.
- 39 Ager T A. Late Quaternary vegetation and climate history of the central Bering land bridge from St. Michael Island, western Alaska. *Quaternary Research*, 2003, 60(1): 19—32.
- 40 Hughes B A, Hughes T Y. Transgressions: rethinking Beringian glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 110(3-4): 275—294.
- 41 Molnia B F. Late nineteenth to early twenty-first century behavior of Alaskan glaciers as indicators of changing regional climate. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1-2): 23—56.
- 42 Kaufman D S, Manley W F. Pleistocene Maximum and Late Wisconsin glacier extents across Alaska, USA // Ehlers J, Gibbard P L. *Quaternary Glaciations: Extent and Chronology. Part II: North America*. Amsterdam: Elsevier, 2004: 9—27.
- 43 Hidy A J, Gosse J C, Froese D G, et al. A latest Pliocene age for the earliest and most extensive Cordilleran Ice Sheet in northwestern Canada. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 61: 77—84.

- 44 Zech R , Kull C , Kubik P W , et al. LGM and Late Glacial glacier advances in the Cordillera Real and Cochabamba (Bolivia) deduced from ^{10}Be surface exposure dating. *Climate of the Past Discussions* , 2007 , 3 (3) : 839—869.
- 45 Mann D H , Peteet D M. Extent and timing of the last glacial maximum in southwestern Alaska. *Quaternary Research* , 1994 , 42 (2) : 136—148.
- 46 Briner J P , Kaufman D S. Late Pleistocene mountain glaciation in Alaska: key chronologies. *Journal of Quaternary Science* , 2009 , 23 (6-7) : 659—670.
- 47 Sakamoto T , Ikehara M , Aoki K , et al. Ice-rafted debris (IRD) -based sea-ice expansion events during the past 100 kyrs in the Okhotsk Sea. *Deep-Sea Research , Part II* , 2005 , 52 : 2275—2301.
- 48 Gardner J V , Dean W E , Klise D H , et al. A climate-related oxidizing event in deep-sea sediment from the Bering Sea. *Quaternary Research* , 1982 , 18 (1) : 91—107.
- 49 Shennan I. Late Quaternary sea-level changes and palaeoseismology of the Bering Glacier region , Alaska. *Quaternary Science Reviews* , 2009 , 28 (17-18) : 1762—1773.

ICE-RAFTED DETRITUS EVENTS AND PALEOCEANOGRAPHIC RECORDS IN THE BERING BASIN SINCE THE LAST DEGLACIATION

Chen Zhihua^{1 2} , Chen Yi^{1 3} , Wang Rujian⁴ , Huang Yuanhui^{1 2} ,
Liu Xinde¹ , Wang Lei⁴ , Zou Jianjun^{1 2}

(¹The First Institute of Oceanography , SOA , Qingdao 266061 , China;

²Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology , SOA , Qingdao 266061 , China;

³Institute of Tibetan Plateau , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100085 , China;

⁴State Key Laboratory of Marine Geology , Tongji University , Shanghai 200092 , China)

Abstract

From a high-resolution study of sediment grain size , color reflectance and elemental stratigraphy of core BR02 , which was dredged from the central part of the Bering Basin , we came to the following conclusions. (1) Core BR02 provides perfect records of the ice-rafted detritus (IRD) events that have happened since 16.3 ka BP at the end of the Last Glacial Maximum , including the H1 , OD , YD and Boreal 2 events , of which H1 and YD are the most significant. These IRD events all happened during cold episodes or stadials , and indicate changes in sea ice/icebergs in the sea and local glaciers in the surrounding lands. (2) The interval of Mn- and Ba-rich sediments at 17—25 cm in the upper part of BR02 indicates that water exchange between the North Pacific Ocean , the Bering Sea , and the Arctic Ocean increased to its highest level during the Holocene high-sea-level period , which induced changes in the circulation and seabed redox and an increase in marine productivity in the Bering Basin. (3) The concentrations of CaO , Na₂O , Sr and Zr and the Na₂O/K₂O ratio indicate that the IRD was mainly derived from the Yukon River drainage , and secondarily from the volcanic province that includes the Alaska Peninsula and the Aleutian Islands. Meanwhile , the gradual increase in the Na₂O/K₂O ratio in the upper part of the core indicates that the circulation , especially the influence of the Alaska Current on sediments , has been enhanced since 10 ka BP.

Key words Bering Basin , last deglaciation , ice-rafted detritus events , bottom water redox , past marine circulation