

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018092101

渤海沉积记录的末次冰期千年尺度古环境与古气候变化

方文丽^{1,2}, 姚政权^{2,3}, 石学法^{2,3}, 葛晨东¹, 乔淑卿^{2,3}, 李小艳^{2,3}, 董智^{1,2}, 王颖^{1,2}

1. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210023

2. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061

摘要:末次冰期千年尺度古气候变化事件在全球大部分载体中均有不同程度的记录,但在海岸带—陆架区的沉积记录中该事件还未见有报道。对取自渤海的BH08孔上部26m的岩芯进行了高分辨率粒度测试与分析,结合AMS ¹⁴C测年结果和微体古生物特征,探讨了研究区末次冰期以来古环境和古气候变化。运用粒级-标准偏差法对粒度数据进行研究,发现BH08孔敏感组分(88.4~148.7μm)的变化记录了末次冰期D-O(Dansgaard-Oeschger)旋回冷暖事件:在暖期时敏感粒级粗组分(88.4~148.7μm)的含量低,而在冷期时含量高,且可以与反映东亚夏季风的指标对应。在暖期时,强盛的夏季风带来丰富的降水,增加的径流可以将粗粒沉积物搬运至更远的下游区,且暖湿气候有利于植被的发育,使得流域内粗粒沉积物减少;而在冷期呈现相反的变化趋势。我们推测,在末次冰期低海面的背景下,格陵兰和北大西洋等高纬地区气候变化导致大气环流和/或洋流系统发生改变,从而对东亚夏季风降水的调控造成河流输入物质的变化可能是造成BH08岩芯敏感组分变化的主要原因。

关键词:末次冰期;粒度;东亚夏季风;D-O旋回;渤海

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

Millennial-scale paleoenvironment and paleoclimate changes recorded in the Bohai Sea sediments during the last glacial period

FANG Wenli^{1,2}, YAO Zhengquan^{2,3}, SHI Xuefa^{2,3}, GE Chendong¹, QIAO Shuqing^{2,3}, LI Xiaoyan^{2,3}, DONG Zhi^{1,2}, WANG Ying^{1,2}

1. Ministry of Education Key Laboratory of Coastal and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. The First Institute of Oceanography, Ministry of Resources, Qingdao 266061, China

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

Abstract: The millennial-scale paleoclimatic change during the last glacial stage has been recorded in various achieves worldwide, but nothing has been heard from the sedimentary records in a coastal zone. In order to dig out the sedimentary records from the coastal region, we carried out high-resolution grain-size analysis for the upper 26m of the core BH08 collected from the Bohai Sea, together with AMS ¹⁴C dating and microfossils studies. Based upon them, the paleoenvironment and paleoclimate changes of the study area since the last glacial stage are discussed. Grain-size data is treated with the grain size and standard deviation method. It is found that the sensitive component (88.4~148.7μm) of the core BH08 sediments well recorded the D-O (Dansgaard-Oeschger) cycle of the last glacial stage: the content of the sensitive component (88.4~148.7μm) was low in warm periods, but high in cold periods. The cyclicities of sensitive component are also corresponding to the index reflecting the East Asian summer monsoon. During the warm periods, strong summer monsoon would bring in abundant precipitation, and the increased runoff might transport the coarse-grained sediments to the distant downstream areas. In addition, warm and humid climate is conducive to the development of vegetation, resulting in the reduction of coarse-

资助项目:青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划项目“深海地质过程与资源环境效应”(2016ASKJ13);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“海洋一所束星北青年学者基金”(2018S01)

作者简介:方文丽(1995—),女,硕士生,主要从事海洋沉积方面研究,E-mail:18362979806@163.com

通讯作者:石学法(1965—),男,研究员,博士,博士生导师,主要从事海洋沉积学与海底成矿作用方面研究,E-mail:xfshi@fio.org.cn;

葛晨东(1966—),女,教授,博士,主要从事海洋生物地球化学方向研究,E-mail:gcd@nju.edu.cn

收稿日期:2018-09-21;**改回日期:**2019-01-23. 文凤英编辑

grained sediments in the drainage basin, and vice versa. It is speculated that in the last glacial stage, climate in the high latitudes such as Greenland and the North Atlantic might cause changes in atmospheric circulation and/or ocean current systems by the precipitation of the East Asian summer monsoon, and thus control the changes of the input sediments from rivers. It may be the main reason for the change of grain-size in the core BH08.

Key words: the last glacial stage; Grain size; East Asian Summer Monsoon; D-O Cycle; Bohai Sea

海洋^[1, 2]、湖泊^[3]、冰芯^[4]、泥炭^[5]、洞穴碳酸盐^[6]等沉积被广泛应用于高分辨率的古气候、古环境重建。研究发现,末次冰期的气候并不总是持续寒冷的气候^[7]。在 70kaBP 的末次冰期以来,经历了多次气候冷暖交替变化过程,包括时间跨度上千年或几百年的 Heinrich 事件^[8-11]、末次冰期向全新世转换的新仙女木事件^[12]等一系列快速气候变化事件。这些事件在格陵兰冰芯^[13, 14]、北大西洋高纬度地区^[9]以及中国的黄土区^[14]、洞穴碳酸盐沉积^[6]、青藏高原冰芯^[16],以及南极冰芯^[17]等中都有发现。冰芯记录^[4]与深海沉积物^[1]记录等均表明太阳辐射是末次冰期的冰期-间冰期旋回的主要驱动因子。但对于发生在冰阶-间冰阶背景下的千年尺度气候变化的形成机制仍存在着一定的争议,包括认为是受赤道地区热量分布的影响^[18],大洋内部的不稳定的影响等^[19],最为流行的两种说法是冰盖内部动力驱动下的冰山涌进^[20, 21]和受大洋温盐环流的变化控制^[22]。

渤海是我国东部一个半封闭的内海,由辽东湾、渤海湾、莱州湾、中央盆地和渤海海峡 5 部分组成,通过渤海海峡与黄海相通。渤海每年接受黄河、滦河、海河以及辽河携带大量的泥沙入海。作为世界上泥沙含量第一的河流,黄河每年输送 7.8×10^8 t 的沉积物入渤海,占输送到渤海沉积物总量的 93%^[23]。前人对渤海的沉积环境进行了大量的研究^[23-29],主要集中在第四纪海侵—海退、晚更新世以来渤海沉积物分布特征及物源等方面的研究。对黄河三角洲 S3 钻孔(岩芯长 450m)的研究显示,从中更新世开始至今划分出 7 个海相地层^[26];渤海中央 BC-1 钻孔的研究显示,自过去 25 万年以来发生 7 次海侵,分别形成于 MIS1, MIS3, MIS5.1, MIS5.2, MIS5.3, MIS7, MIS9 期间^[27];最近来自渤海中部的研究显示,过去 100 万年以来至少发生数十次海侵,且可以与深海氧同位素很好对比^[23]。已有研究显示渤海泥质区主要是黄河物质向西和向北运移进入渤海湾和渤海中部形成的^[28];还有研究

探讨过渤海西部晚更新世以来的化学组成分布与物源关系^[29]。对于末次冰期以来千年尺度快速气候变化事件在渤海地区尚未见有报道。由于黄河等渤海周边河流向渤海输入大量物质,河口沉积速率较高,可能记录了高分辨率古环境古气候变化的信息。因此,本研究尝试采用高分辨的粒度数据探讨渤海沉积记录揭示的沉积环境变化及其与千年尺度气候变化事件的联系。

1 材料与方法

选取在渤海中南部获取的 BH08 孔岩芯(图 1, 38.28°N、119.99°E)为研究材料,水深约 25m,柱长 212.4m,岩芯采取率为 86%。本文主要对岩芯上部 26m 进行研究,采用 AMS ¹⁴C 方法测定地层年代,结合粒度测试分析资料,重建了研究区末次冰期以来高分辨率古环境与古气候变化历史。

对岩芯上部 26m 以 2~5cm 为间隔进行粒度测试,共获得粒度测试数据 835 个。沉积物粒度测试所用仪器为 Malvern 2000 型激光粒度仪,测试方法见文献^[30],具体步骤是取适量沉积物样品放入小烧杯中,加入 15mL 15% 的 H₂O₂ 静置 12h 以上以去除有机质,再加入 5mL 10% 的稀盐酸静置 12h 以上去除碳酸盐,待反应不再产生气泡,再用去离子水清洗至中性,超声震荡分散后上机测试,测量范围为 0.02~2000μm,粒级分辨率为 0.01Φ。

AMS ¹⁴C 测年方法如下:取足够量的样品,用纯净水浸泡 1 至 2 天,样品完全分散后用孔径为 0.063mm 的网筛进行冲洗,洗净后的样品进行低温烘干,在镜下挑选混合有孔虫样品进行 AMS ¹⁴C 测年;测年工作在美国 Beta 放射性碳测年实验室完成;利用 Calib 7.0.2 软件,根据海洋曲线 Marine13 做了包括海洋贮存库效应在内的进一步校正^[31],海洋地区性贮存库值选用 $\Delta R = (-178 \pm 50)a$ ^[32],共测得 AMS ¹⁴C 年龄 5 个(表 1)。

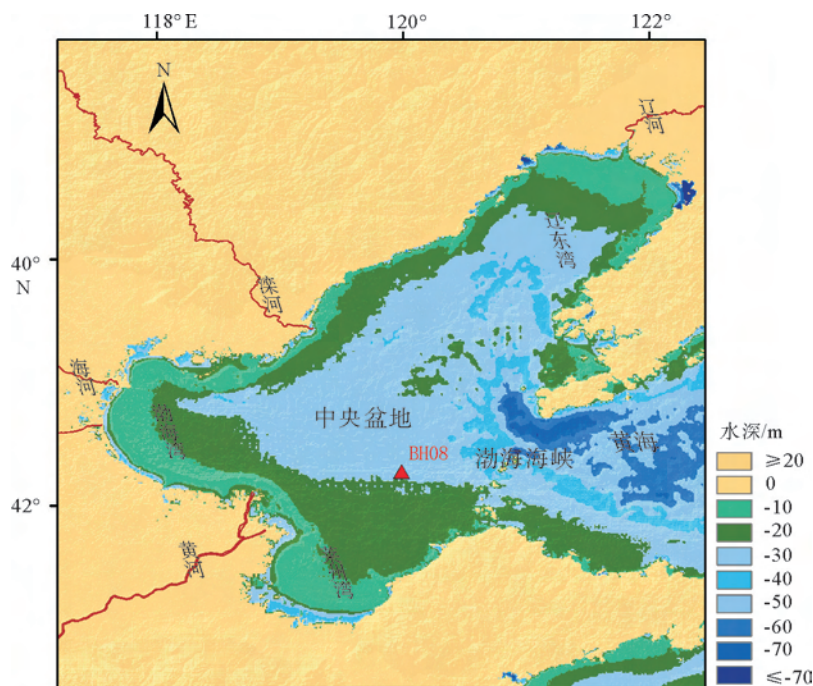


图 1 研究区和 BH08 钻孔位置图

Fig.1 Map of study area and location of core BH08

2 结果

2.1 年代框架的建立

BH08 岩芯的年代框架部分引自文献 [33, 34], 包括 6 个以有孔虫为材料和 3 个以贝壳为材料的 AMS ^{14}C 测年数据, 为了建立更高分辨率的年代框架, 在本次研究中, 新增加了 5 个有孔虫 AMS ^{14}C

年龄, 除位于钻孔 5.46m 的数据与其他数据存在颠倒外, 其他 4 个数据与所建立的年代框架一致。除了 AMS ^{14}C 测年, 我们还在钻孔 15.79m 处获得了一个光释光 (Optically Stimulated Luminescence, OSL) 测年数据, 结果显示年代为 52kaBP (姚政权等未发表数据)。此外, 据文献 [33] 对该孔进行轨道调谐的结果, 钻孔 45.49m 处的年代为 140kaBP。最终年代框架的建立采用内插和外推法获得, 并得到钻孔的平均沉积速率为 30.78cm/ka。

表 1 BH08 孔年代控制点

Table 1 Age control points of core BH08

	深度/m	样品类型	^{14}C 年龄/aBP	距今日历年龄/cal.aBP	沉积速率/(cm · ka ⁻¹)
1	0.18*	贝壳	600±20	498~300	45.11
2	0.66	混合底栖有孔虫	2190±30	2145~1846	30.07
3	0.96	混合底栖有孔虫	2740±30	2818~2495	45.39
4	1.37	混合底栖有孔虫	5520±30	6252~5957	11.89
5	2.25	混合底栖有孔虫	7290±30	8054~7790	48.42
6	3.47*	贝壳	8490±40	9470~8153	137.16
7	4.09*	混合底栖有孔虫	9010±35	10165~9762	53.82
8	5.46	混合底栖有孔虫	7930±30	8756~8415	—
9	8.17*	贝壳	9020±40	10175~9769	—
10	15.79#	OSL	—	52500	27.51
11	45.49**	控制点	—	140000	33.94

注: * 引自文献 [33, 34], ** 引自文献 [33], # 引自姚政权等未发表数据。

2.2 BH08 钻孔揭示的末次冰期以来沉积环境变化

通过对 BH08 孔的颜色、粒度和微体古生物等分析,结合 AMS ^{14}C 测年结果及前人对邻近钻孔的研究,将末次冰期以来的沉积物划分为 6 段(自上而下依次为 S1—S6),分别为浅海相、河口湾相、河流相、滨海沼泽相、河流相以及浅海沉积相。BH08 岩芯的颜色反射率 a^* 值的大小表示沉积物在红色(高值)与绿色(低值)之间的变化程度, a^* 低值反映了间冰期高海平面背景下呈还原的滨—浅海沉积环境, a^* 高值则指示了冰期低海面时期研究区以洪泛平原沉积为主^[33]。因此,钻孔沉积物 a^* 值可与反映冰期—间冰期变化的深海氧同位素曲线 LR04 $\delta^{18}\text{O}$ 进行对比来辅助确定沉积环境的大致时代。

S1(0~4.13m):该段沉积以深灰色砂质粉砂为主,且含较多贝类碎屑,平均粒径为 5~7 Φ 。结合前人对该钻孔做的微体古生物数据进行分析^[35],该阶段的有孔虫丰度较高,有孔虫群落以浅海类为主;介形虫以广盐类为主,海相介形虫丰度较高,陆相介形虫丰度偏低,指示了海洋环境,认为该阶段为陆架沉积,年代为约 10kaBP 以来,为全新世高海面沉积。

S2(4.13~6.07m):该段沉积物呈灰褐色,以砂质粉砂和粉砂质砂为主,平均粒径为 4~8 Φ 。整个阶段砂平均含量为 29.2%(最高值达到 71.9%,最低值为 0.6%);粉砂平均含量为 56.2%(高值达到 85.1%,最低值为 21.6%);黏土平均含量为 14.6%(高值达到 26.4%,最低值为 4.4%)(图 2b)。根据微体古生物的分析结果^[35],5.49m(约 14.5kaBP)处有孔虫和海相介形虫丰度较高,整个阶段介形虫以半咸水类和陆相介形虫为主,且有孔虫和海相介形虫含量逐渐增多。推测当时的气候逐渐转暖,为河口湾沉积环境。根据 AMS ^{14}C 测年结果,该段沉积对应年龄范围为约 17~10kaBP,属末次冰消期沉积。

S3(6.07~12.11m):该段沉积物以黄褐色砂为主,含少量粉砂和黏土。该段沉积物粒度在几个沉积层中最粗,但期间发生了几次较明显的粒度变细的一个阶段。该阶段的平均粒径为 3~6 Φ ,平均值为 3.98 Φ 。本段砂的平均含量为 71.9%,粉砂含量为 23.5%,黏土平均含量为 5.4%。沉积物样品中仅 8.7~8.13m 处的两个样品有孔虫出现,整个阶段陆相介形虫含量较高^[35],推断该时期为河流相沉积,但因距离海岸较近,受到风暴或潮汐的影响而存在有孔虫和海相介形虫。依据建立的年代框架,该段沉积对应年龄范围为约 39~17kaBP,形成于

MIS2 时期(图 2)。

S4(12.11~18.0m):该段岩芯主要以黄褐色砂质粉砂为主,平均粒径为 4.7~8.0 Φ 。12.11~13.5m 段的平均粒径偏小,呈现出逐渐增大的趋势,此阶段粒级相对集中,粉砂含量最多,平均含量为 61.5%,砂平均含量为 22.0%,黏土平均含量为 16.3%。13.5~14.6m 段平均粒径偏大,砂含量平均值为 46.5%,粉砂平均值为 43.4%,黏土含量最小只有 10.0%,该段的砂含量呈现缓慢增加趋势,粉砂呈现出与之存在较好的负相关关系,黏土含量趋于稳定。14.6~18.0m 段沉积物平均粒径呈逐渐减小的趋势,黏土和粉砂含量都表现为连续增加趋势且呈正相关关系,砂含量呈现出连续降低趋势且与黏土、粉砂呈负相关关系。该段沉积只在 14.5~15.5m 处有孔虫和陆相介形虫丰度较高且以广盐类为主,其他段有孔虫含量少,介形类群落特征以广盐类最为丰富,含少量的浅海类和半咸水类,陆相介形虫含量较丰富^[35]。推测该段沉积环境为滨海沼泽相,依据钻孔 15.79m 处的 OSL 年代(52ka BP)及对 BH08 孔天文调谐^[33]结果,该段沉积对应年龄范围约为 59~39kaBP,因此该阶段沉积是 MIS3 时期的沉积(图 2)。

S5(18.0~23.29m):该段沉积物呈红褐色,有铁锈晕染,岩芯沉积物主要以粉砂为主。平均粒径为 6~8 Φ ,平均粒径相对较细,砂平均含量为 11.1%,粉砂量平均值为 68.9%,粉砂的平均含量在整个沉积层中最多,黏土含量平均值为 19.9%且黏土含量的变化较大,大部分为 10%~30%。根据 BH08 岩性的微体古生物的鉴定结果^[35],该阶段的 20.1~21.3m(约 68.7~65.2kaBP)处陆相介形虫丰度稍高;17.95~20.1m(约 65.2~58.8kaBP)和 21.3~23.29m(约 74.6~68.7kaBP)处有孔虫和介形类群落以广盐类为主,半咸水类次之,浅海类最少,并见少量陆相介形虫。根据上述特征,推断该阶段为河流沉积环境,时代大致对应 MIS4 期^[33](图 2)。

S6(23.29~40m):该段沉积物呈灰色,23.29~35.65m 以黏土质粉砂为主,35.65~40m 以砂质粉砂为主。平均粒径为 4~7 Φ 。23.29~35.65m 段的平均粒径较小,砂含量最少,平均含量为 5.9%,粉砂含量最多,平均含量为 67.2%,黏土平均含量为 27.0%。35.65~40.0m 平均粒径较大,砂含量增多,平均含量为 29.9%,粉砂平均含量为 57.1%,黏土含量最少,平均含量为 13.1%。该段沉积物 23.29~27.69m 以非海相淡水介形类为主,含有少

量半咸水类和广盐类有孔虫,28.0~31.09m 有孔虫含量几乎为 0;31.09~40m 有孔虫和介形虫在数

量和种属上均以广盐类为主^[35],推测该段沉积环境为形成于 MIS5 时期的浅海沉积^[33]。

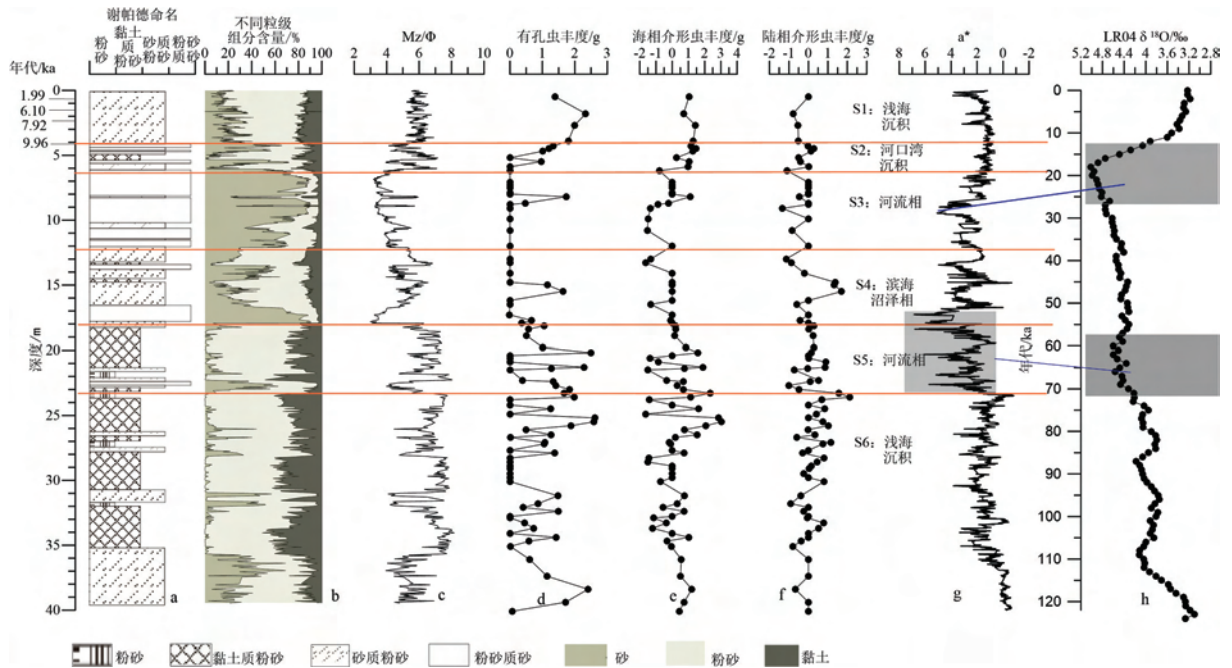


图 2 BH08 岩性(a, b)、粒度(c)、颜色反射率 a* (g)以及有孔虫与介形虫含量^[35](d, e, f)随深度的变化及其与深海氧同位素 LR04 $\delta^{18}O$ ^[36](h)的对应关系

g 与 h 之间的蓝色连接线表示 BH08 的 a* 指示的变化与 LR04 $\delta^{18}O$ 的曲线变化的年代对应关系,水平红线代表沉积环境划界限

Fig.2 Lithology (a, b), grain size (c), color reflectance a* (g), and content of foraminifera and ostracoda^[35](d, e, f) of core BH08 changes with depth and correlation to the deep-sea oxygen isotope LR04 $\delta^{18}O$ ^[36](h)

The blue connecting lines between g and h indicate the age-correlation between the change in a* and the curve LR04 $\delta^{18}O$. Horizontal red lines denote the boundary of sedimentary environments

2.3 粒级-标准偏差分析

渤海沉积特征受到河流输入、海洋动力与环流等诸多因素的控制^[37]。在利用粒度数据进行沉积环境研究时,可以通过子体粒度组分的分离和环境敏感组分的提取,从复杂的粒度数据中分离出有效的粒度特征组分,研究沉积环境的不同组分构成及其各组分所指示的沉积学含义^[38]。粒级-标准偏差法最先是 by Boulay 等^[39]提出,对 ODP1144 站位提取出了两个敏感粒级组分;这种方法逐渐被越来越多学者所应用,近年来利用边缘海沉积物的敏感粒级重建古气候、古环境已经取得了一系列成果^[38-42]。粒级-标准偏差法变化曲线主要反映不同样品的粒度含量在各粒级范围内的差异,高的标准偏差值反映了不同样品的粒度含量在该粒径范围内的差异较大,低的标准偏差值反映了不同样品的粒度含量在

该粒径范围内的差异较小^[40]。

本文对 835 个沉积物粒度数据进行了粒级-标准偏差法分析,曲线呈现出“弱三峰特征”(图 3),说明 BH08 孔沉积物中存在 3 个对环境敏感的粒度组分,峰值分别约为 6.02、34.08 和 125 μm (图 3a)。敏感组分峰值 6.57、34.08 和 125 μm 所对应的粒径范围分别为 4.65~7.81、26.28~44.20 和 88.4~148.7 μm (图 3b)。BH08 孔沉积物平均粒径与 88.4~148.7 μm 含量及其平均粒径的变化几乎完全一致(图 4a, d),而与 4.65~7.81、26.28~44.20 μm 含量及其平均粒径变化相反(图 4b, c, d),表明沉积物的粒径变化实际上主要受粗粒度组分 88.4~148.7 μm 的含量变化控制。对于细粒组分,4.65~7.81 μm 组分含量变化非常小且 4.65~7.81 μm 组分平均粒径几乎不变(图 4c, g)。

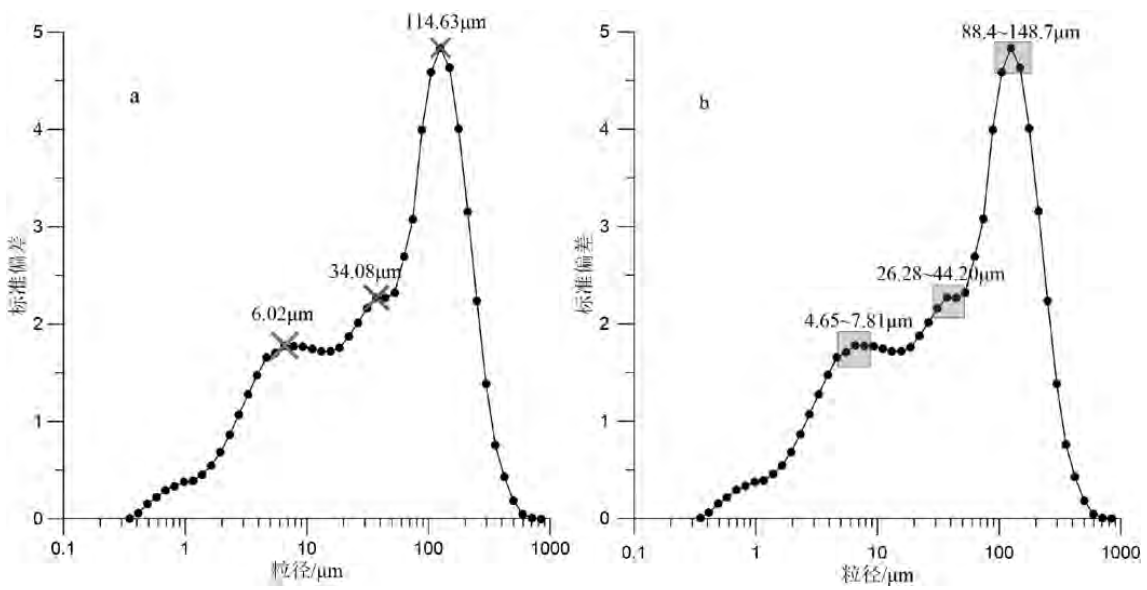


图3 BH08孔标准偏差随粒级的变化曲线

Fig.3 Standard deviation distribution vs grain size of Core BH08

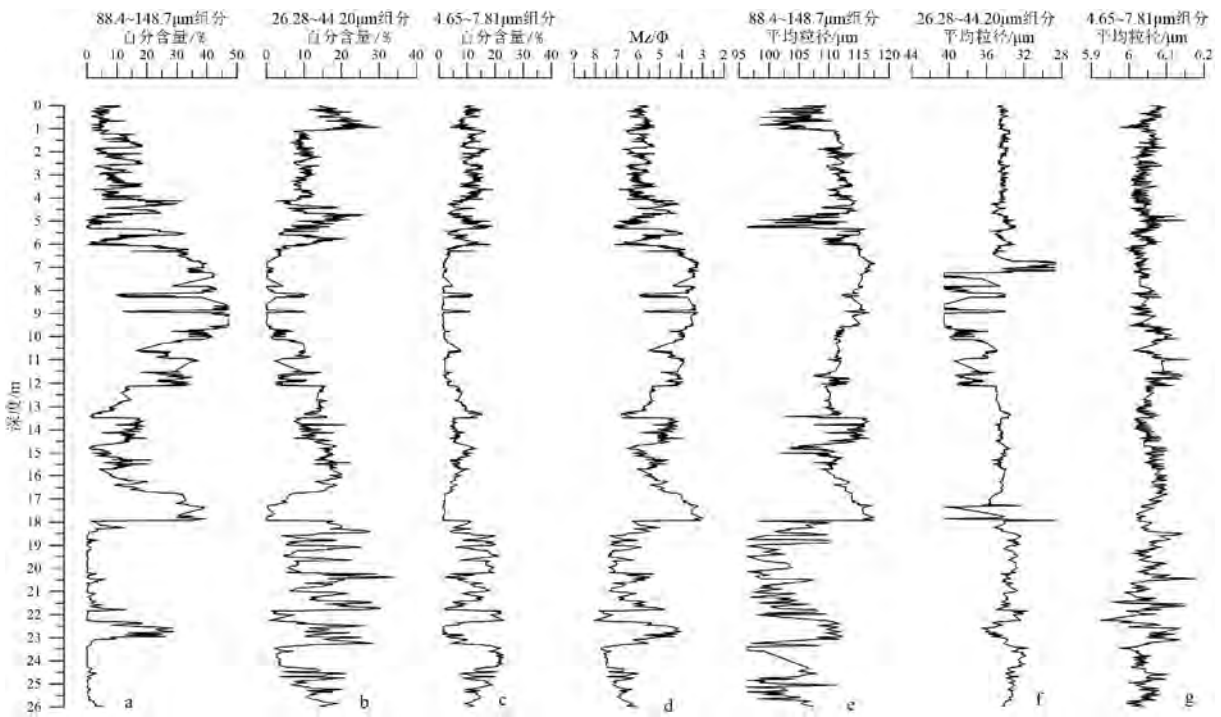


图4 粒度-标准偏差法获得的敏感粒级的不同组分含量及平均粒径

Fig.4 The content of different components and average particle size of sensitive grain grades obtained by Grian size-Standard deviation method

3 BH08 钻孔粒度记录的末次冰期千年尺度气候变化

深海沉积和极地冰芯所揭示的 Heinrich 事件的出现年代随着测年精度的不断提高并经过多次修

正,大部分学者认为末次冰期以来至少存在 6 次 Heinrich 事件(图 5c 中 H1—H6 表示)和 20 个 D-O (Dansgaard-Oeschger) 事件(图 5c 中 1—20 表示)^[8, 10, 13]。BH08 岩芯的粒度参数在千年尺度上呈现的波动变化(图 5)可能反映了末次冰期以来的气候波动。

末次冰期以来, BH08 钻孔粒度变化记录了 15 个较为明显的粗粒组分含量减少(即细粒组分含量增多)事件(图 5b 中蓝色标注)。整体来看, BH08 岩芯粒度表现出 3 个粒度变粗—变细的旋回, 其中粗粒含量减少/细粒组分增多(图 5 中灰色阴影)主要发生在 MIS1, MIS3 和 MIS4—5 时期。因为 MIS1 和 MIS5 阶段是气候温暖湿润的时期, 在该时期 BH08 岩芯中粗粒含量较少(图 5b), 因此我们认为 BH08 粗粒含量减少对应于气候的温暖期。基于上述现象及推理, 我们将 BH08 岩芯记录的粒度变化(88.4~148.7 μm)事件与北极冰芯氧同位素 GRIP2^[13]、葫芦洞氧同位素记录^[6]进行对比, 发现其中的一些明显的粗粒径含量减少事件(图 5b 中 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15)和 GRIP2 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线中相应的变暖事件(图 5c 中 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15)在时间上和表现特征上相似。此

外, 粒度结果也大致可与反映夏季风强度的石笋记录对比^[6]: 即当氧同位素低值时, 气候温暖, 东亚夏季风增强, BH08 岩芯表现出粗粒含量减少; 当石笋氧同位素高值时, 气候变冷, 东亚夏季风减弱, BH08 岩芯表现粗粒含量增加(图 5b, d)。石笋记录的 H 冷事件大部分与 BH08 钻孔记录的粗粒组分增加是对应的。

海洋沉积物的粒度变化可以指示沿海或潮汐过程控制的近海地区的高能环境^[44], 或以河流输入为主的陆上高降水^[45, 46]。末次冰期海平面整体变化不大, 在末次冰期渤海低海平面时(MIS2—4), BH08 岩芯所在区域主要以河口或滨岸沉积环境为主, 研究区沉积物主要受河流控制, 沿岸河流向研究区提供大量的陆源沉积物。已有研究表明, 黄河 880kaBP 已经开始影响黄海和渤海^[34], 黄河以及周边河流每年输送大量的物质入海。

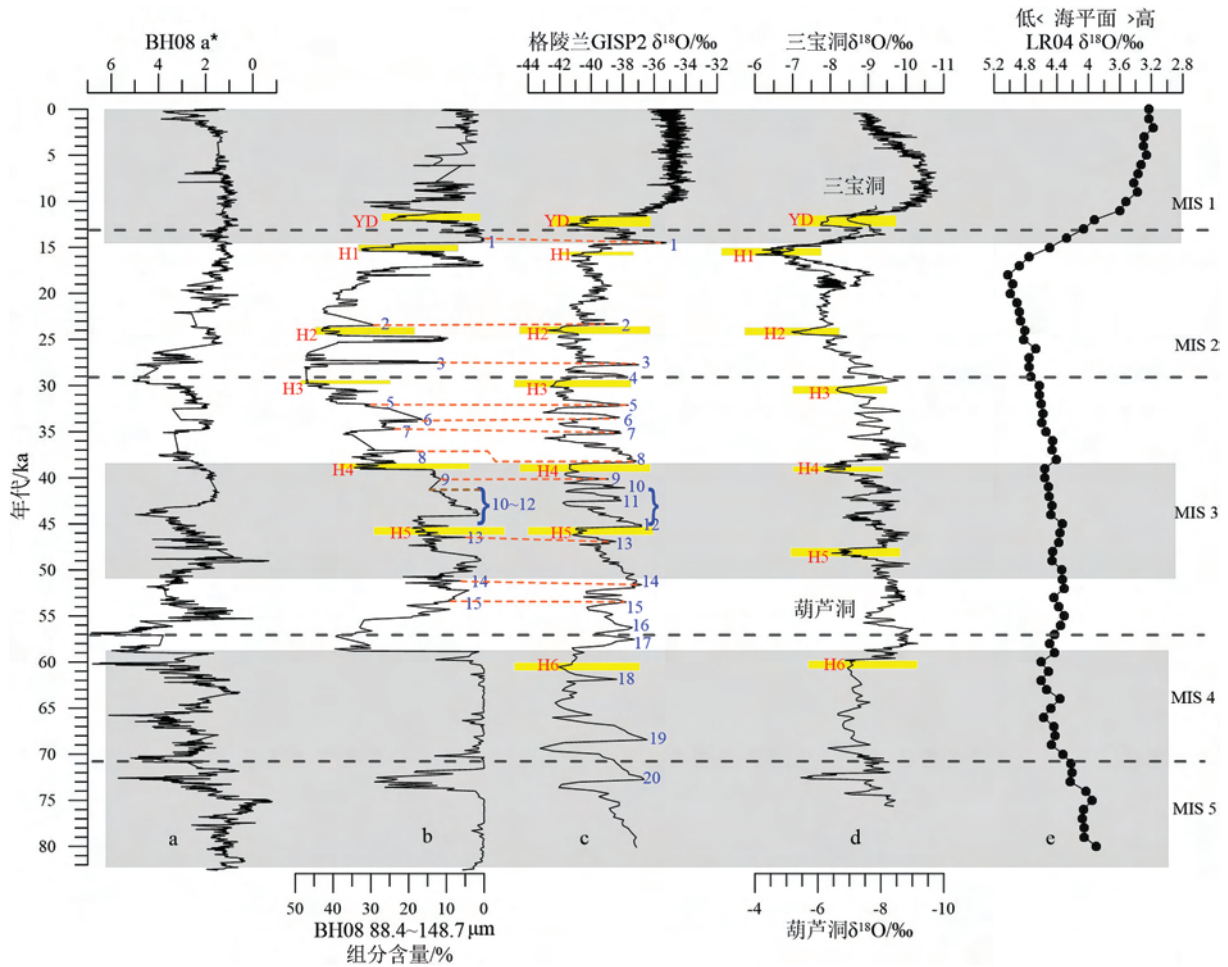


图 5 BH08 岩芯颜色反射率 a* (a)、粒度序列(b)与格陵兰 GISP2 冰芯(c)^[13]、葫芦洞 $\delta^{18}\text{O}$ (d)^[6]、三宝洞 $\delta^{18}\text{O}$ (d)^[43] 以及 LR04 $\delta^{18}\text{O}$ (e)^[36] 反映的海平面变化曲线的对比

图中黄色阴影区表示冷气候 H 事件, 蓝色数字表示暖气候事件

Fig.5 Comparison of a* (a) and grain size sequence(b) between of Core BH08 and Greenland GISP2 ice core (c)^[13], $\delta^{18}\text{O}$ of Hulu cave (d)^[6], $\delta^{18}\text{O}$ of Sanbao cave^[43] and LR04 $\delta^{18}\text{O}$ (e)^[36] reflecting sea level change. The yellow shadow areas indicate cold climatic events (H events), and the blue number indicates warm climatic event

黄土高原、日本海及冲绳海槽等区域均处在东亚季风的控制之下,且已有研究认为在上述这些沉积记录中发现的 D-O 旋回一般与东亚季风的强弱有关^[6, 47-49]。同样位于季风控制之下的 BH08 孔粒度结果与北极冰芯氧同位素及石笋记录在时间上大致可以对比,表明 BH08 钻孔粒度(88.4~148.7 μm)可能记录了 D-O 旋回的冷暖气候变化,且可能与东亚夏季风密切相关。

在暖期时,研究区强盛的夏季风带来丰富的降水^[50],导致河流径流和沉积通量增加,增加的径流可以将粗粒沉积物搬运至更远的下游区^[51, 52],从而造成钻孔位置区域粗粒沉积物显著减少。另一方面,温暖湿润的气候有利于植被的发育和生长,增加了地表植被的覆盖,削弱了区域的机械风化作用^[53],使得流域内粗粒沉积物减少。而在冷期时,冷干的气候不利于植被的发育和生长,增强了区域的机械风化作用^[53],河流侵蚀加剧,河流沉积物供应增加造成河流携带的粗粒物质增多,从而造成研究区粗粒沉积物增加。

自 20 世纪 90 年代初通过对格陵兰地区钻取的两个冰芯(GISP^[54]、GISP2^[14])的研究,发现末次冰期的气候是极不稳定的,Donsgaard 等^[13]指出不仅在末次冰期和末次间冰期,在倒数第二个冰期也存在气候波动,这种变化可能在几十年内发生并且是十分迅速的,这种气候震荡被称为 D-O 旋回^[55],主要表现为千年尺度的气候波动。D-O 旋回的平均周期为 1.5ka^[56]。1988 年 Heinrich 在北大西洋发现深海沉积中存在着陆源浮冰碎屑(IRD)层^[8],随后 Bond 等^[10, 56]在北大西洋其他钻孔也发现类似事件,并命名为 Heinrich 事件或 H 事件,H 事件是冰阶中最冷的阶段。继格陵兰冰芯 D-O 气候旋回和北大西洋 H 事件被发现之后,全球其他地区也陆续发现了这些千年尺度的快速气候变化事件,尤其以高纬度极地冰芯和中低纬度石笋中具有高分辨率、显著变化的氧同位素为代表,另外还包括阿拉伯海的有机碳记录^[57]、东北太平洋 Santa Barbara 盆地沉积物中浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 和群落变化特征^[58]以及中国黄土粒度信号^[47],均记录到 H 事件和 D-O 旋回。位于渤海的 BH08 钻孔也记录了大部分 D-O 旋回(图 5b 中 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15),表明末次冰期千年尺度气候突变事件同样在我国陆架—海岸带区存在,进一步证实了该事件具有普遍性和全球性意义。与此同时,需要值得注意的是, BH08 钻孔粒度参数变化并不与所有千年尺度古气候突变事件(D-O 事件)一一对应,这可能是由于研

究区水深较浅受海平面波动的影响较为强烈,加上河流作用的影响,该区沉积地层可能受到不同程度的侵蚀作用而造成沉积间断所致。另外,较低分辨率的年代框架也可能是造成上述现象的原因之一。虽然对末次冰期千年尺度古气候突变事件的成因有很多种观点,我们认为在末次冰期低海面的背景下,格陵兰和北大西洋等高纬地区气候变化导致大气环流^[47, 48]和/或洋流系统发生改变^[58],从而对东亚夏季风降水的调控造成河流输入物质的变化可能是造成 BH08 岩芯中粒径含量变化的主要原因。

4 结论

(1)通过对 BH08 孔的颜色、粒度和微体古生物等分析,结合 AMS ^{14}C 测年结果及前人对邻近钻孔的研究,将末次冰期以来的沉积物自上而下依次划分为 6 段:S1(0~4.13m),深灰色砂质粉砂为主的内陆架中部沉积相,为距今约 10ka 以来的全新世高海面沉积;S2(4.13~6.07m),灰褐色以砂质粉砂和粉砂质砂为主的河口湾相,约为 17~10kaBP 的末次冰消期沉积;S3(6.07~12.11m),以黄褐色砂为主含少量粉砂和黏土的河漫滩沉积相,为 MIS2 期间的沉积;S4(12.11~18m),以黄褐色砂质粉砂为主的滨海沼泽相,为 MIS3 时期的沉积;S5(18~23.29m),为红褐色粉砂为主的河流沼泽相,时代大致对应 MIS4 期;S6(23.29~40m),主要以灰色的黏土质粉砂与砂质粉砂为主,为形成于 MIS5 时期的浅海沉积。

(2)根据粒度-标准偏差曲线提取出 BH08 岩芯的敏感组分 88.4~148.7 μm ,该组分信号记录了 D-O 旋回的冷暖气候变化,且可能代表了东亚夏季风的变化。暖期时,强盛的夏季风带来丰富的降水,增加的径流可以将粗粒沉积物搬运至更远的下游区,且暖湿气候有利于植被的发育,使得流域内粗粒沉积物减少;而在冷期呈现相反的变化。在末次冰期低海面的背景下,格陵兰和北大西洋等高纬地区气候变化导致大气环流和/或洋流系统发生改变,从而对东亚夏季风降水的调控造成河流输入物质的变化可能是造成 BH08 岩芯中粒径含量变化的主要原因。

参考文献 (References)

- [1] Linsley B K. Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over past 150,000 years[J]. Nature,

- 1996, 380: 234-237.
- [2] Wang L J, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High resolution sediment records from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 245-284.
- [3] 牛东风, 李保生, 温小浩, 等. 萨拉乌苏河流域 MGS1 层微量元素记录的全新世千年尺度的气候变化[J]. *地质学报*, 2011, 85(2): 300-308. [NIU Dongfeng, LI Baosheng, WEN Xiaohao, et al. The Holocene ka-scale climate variation indicated by trace elements of the MGS1 segment in the Salawusu River Valley, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(2): 300-308.]
- [4] Lorius C, Jouzel J, Ritz C, et al. A 150,000 year climatic record from Antarctic ice[J]. *Nature*, 1985, 316: 591-596.
- [5] 孙广友, 罗新正, Turner R E, 等. 青藏东北部若尔盖高原全新世泥炭沉积年代学研究[J]. *沉积学报*, 2001, 19(2): 177-181. [SUN Guangyou, LUO Xinzheng, Turner R E, et al. A study on peat deposition chronology of Holocene of Zorge Plateau in the Northeast Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 177-181.]
- [6] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 294: 2345-2348.
- [7] Genty. France Speleothem Stable Isotope Data[M]. National Climatic Data Center, 2003.
- [8] Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130000 years[J]. *Quaternary Research*, 1988, 29(2): 142-152.
- [9] Broecker W, Bond G, Klas M, et al. Origin of the northern Atlantic's Heinrich events[J]. *Climate Dynamics*, 1992, 6(3-4): 265-273.
- [10] Bond G, Heinrich H, Broecker W, et al. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the last glacial period[J]. *Nature*, 1992, 360(6401): 245-249.
- [11] Andrews J T, Tedesco K. Detrital carbonate rich sediments, northwestern Labrador Sea: Implications for ice-sheet dynamics and iceberg rafting (Heinrich) events in the North Atlantic[J]. *Geology*, 1992, 12(20): 1087-1090.
- [12] Berger W H, Burke S, Vincent E. Glacial-Holocene transition: climate pulsations and sporadic shutdown of Nadw Production[M]. Springer Netherlands, 1987.
- [13] Dansgaard W, Johnsen S, Clausen, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250 kyr ice-core record [J]. *Nature*, 1993, 364(6343): 218-220.
- [14] Grootes P M, Stuiver M, White J W C, et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores[J]. *Nature*, 1993, 366(6455): 552-554.
- [15] Sun Y, Clemens S C, Morrill C, et al. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 5(1): 46-49.
- [16] Thompson L G, Yao T D, Davies M E, et al. Tropical climate instability: the last glacial cycle from a Qinghai Tibetan ice core[J]. *Science*, 1997, 276(5320): 1821-1825.
- [17] Bender M, Sowers T, Dickson M L, et al. Climate correlations between Greenland and Antarctica during the past 100,000 years[J]. *Nature*, 1994, 372(6507): 663-666.
- [18] Kennett J P, Cannariato K G, Hendy I L, et al. Methane hydrates in quaternary climate change: the clathrate gun hypothesis[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2002, 83(45): 513-516.
- [19] Sakia K, Peltier W R. A multibasin reduced model of the global thermohaline circulation: paleoceanographic analyses of the origins of ice age climate instability[J]. *Journal Geophysical Research Ocean*, 1996, 101: 22535-22562.
- [20] Broecker, Wallace S. Massive iceberg discharges as triggers for global climate change[J]. *Nature*, 1994, 372: 421-424.
- [21] Bond G C, Lotti R, et al. Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last deglaciation [J]. *Science*, 1995, 273: 1257-1265.
- [22] Lang C, Leuenberger M, Schwander J, et al. Rapid temperature variation in central Greenland 70000 years ago[J]. *Science*, 1999, 286: 934-937.
- [23] Shi X F, Yao Z Q, Liu Q S, et al. Sedimentary architecture of the Bohai Sea China over the last 1 Ma and implications for sea-level changes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 451: 10-21.
- [24] Yao Z Q, Guo Z T, Xiao G Q, et al. Sedimentary history of the Western Bohai coastal plain since the late Pliocene; implications on tectonic, climatic and sea-level changes[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2012, 54(4): 192-202.
- [25] Yan Y Z, Wang H, Li F L, et al. Different depositional processes of boreholes BQ1 and BQ2 in the late Pleistocene on the west coast of Bohai Bay[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26: 321-326.
- [26] 庄振业, 许卫东, 刘东生, 等. 渤海南部 S3 孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(2): 27-35. [ZHUANG Zhenye, XU Weidong, LIU Dongsheng, et al. Division and environmental evolution of late Quaternary marine beds of S3 hole in the Bohai Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 27-35.]
- [27] 秦蕴珊. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [QIN Yunshan. *Geology of Bohai Sea* [M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [28] 秦蕴珊, 李凡. 黄河入海泥沙对渤海和黄海沉积作用的影响[J]. *海洋科学集刊*, 1986, 27: 125-135. [QIN Yunshan, LI Fan. The influence of Yellow River Sediment into the sea on sedimentation in Bohai and Huanghai seas [J]. *Studia Marina Sinica*, 1986, 27: 125-135.]
- [29] 蓝先洪, 李日辉, 陈晓辉, 等. 渤海西部晚更新世以来沉积地球化学研究[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(1): 67-78. [LAN Xianhong, LI Rihui, CHEN Xiaohui, et al. Study of sedimentary geochemistry in the Western Bohai sea since late Pleistocene[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(1): 67-78.]
- [30] Konert M, Vandenberghe J E F. Comparison of laser grain

- size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction [J]. *Sedimentology*, 1997, 44(3): 523-535.
- [31] Bard E. Geochemical and geophysical implications of the radiocarbon calibration[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(12): 2025-2038.
- [32] Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. *Radiocarbon*, 2002, 44(1): 167-180.
- [33] Yao Z Q, Shi X F, Liu Q S, et al. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: Implications for glacial-interglacial sedimentation[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2014, 393(393): 90-101.
- [34] Yao Z Q, Shi X F, Qiao S Q, et al. Persistent effects of the Yellow River on the Chinese marginal seas began at least ~ 880ka ago[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2827.
- [35] 李小艳, 赵泉鸿, 姚政权, 等. 渤海百万年以来的海侵记录: BH08 孔有孔虫和介形类证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 93-108. [LI Xiaoyan, ZHAO Quanhong, YAO Zhengquan, et al. Transgressive records of last million years in the Bohai Sea, China: evidence from foraminifera and ostracoda of core BH08[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 93-108.]
- [36] Lisiecki E, Raymo E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20: 1-17.
- [37] 王中波, 李日辉, 张志琦, 等. 渤海及邻近海区表层沉积物粒度组成及沉积分区[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(6): 101-109. [WANG Zhongbo, LI Rihui, ZHANG Zhixun, et al. Grain size composition and distribution pattern of seafloor sediments in Bohai Bay and adjacent areas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(6): 101-109.]
- [38] 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 中全新世以来东亚冬季风的东海内陆架泥质沉积记录[J]. *科学通报*, 2010, 55: 1387-1396. [LIU Shengfa, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Records of the East Asian winter monsoon from the mud area on the inner shelf of the East China Sea since the mid-Holocene[J]. *Science Bulletin*, 2010, 55: 1387-1396.]
- [39] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment on the South China Sea (ODP Site 1144)[M]. In: Prell W L, Wang P, Blum P, et al, eds. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 2003, 184: 1-21.
- [40] 向荣, 杨作升, Y. Saito, 等. 济州岛西南泥质区近 2300a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2006, 36(7): 654-662. [XIANG Rong, YANG Zusheng, Satio Y, et al. Variation of East Asia winter monsoon according grain-size component records in the mud area southwest off Cheju island for 2300 year recently[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2006, 36(7): 654-662.]
- [41] 涂路遥, 周鑫, 刘毅, 等. 近海泥质沉积物敏感粒径作为冬季风强度指标的再研究: 与器测数据的对比[J]. *第四纪研究*, 2015, 35: 1393-1401. [TU Luyao, ZHOU Xin, LIU Yi, et al. Re-analysis of sensitive grain size of coastal muddy sediments as proxy of winter monsoon strength: Comparison with instrumental data[J]. *Quaternary Science*, 2015, 35: 1393-1401.]
- [42] 徐方建, 李安春, 万世明, 等. 东海内陆架泥质区中全新世环境敏感粒度组分的地质意义[J]. *海洋学报*, 2009, 31(3): 95-102. [XU Fangjian, LI Anchun, WANG Shiming, et al. The geological significance of environmental sensitive grain-size populations in the mud wedge of the East China Sea during the mid-Holocene[J]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(3): 95-102.]
- [43] Wang Y, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial and orbital scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years[J]. *Nature*, 2008, 451: 1090-1093.
- [44] Zhang Z L, Liu E F, Zhang Y, et al. Environmental evolution in the saltwater intrusion area south of Laizhou Bay since late Pleistocene[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18: 37-56.
- [45] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Sedimentary responses to the Pleistocene climatic variations recorded in the South China Sea[J]. *Quaternary Research*, 2007, 68: 162-172.
- [46] Liu Z, Christophe C, Alain T, et al. Late Quaternary climatic control on erosion and weathering in the eastern Tibetan Plateau and the Mekong Basin[J]. *Quaternary Research*, 2005, 63(3): 316-328.
- [47] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation[J]. *Nature*, 1995, 375(6529): 305-308.
- [48] Tada R, Irino T, Koizumi I, et al. Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales recorded in late Quaternary sediments of the Japan Sea[J]. *Paleoceanography*, 1999, 14(2): 236-247.
- [49] Li T G, Liu Z X, Michael A H, et al. Heinrich event imprints in the Okinawa Trough: evidence from oxygen isotope and planktonic foraminifera[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2001, 176(1): 133-146.
- [50] 刘长征, 王会军, 姜大腾等. 东亚季风区夏季风强度和降水的配置关系[J]. *大气科学*, 2004, 28(5): 700-712. [LIU Changzheng, WANG Huijun, JIANG Dabang, et al. The configurable relationships between summer monsoon and precipitation over East Asia[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(5): 700-712.]
- [51] 姚菁. 渤海南岸 LZ908 孔海陆交互相地层气候代用指标及沉积环境研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2014. [YAO Jing. Climatic indicators and sedimentary environment studies inferred from transgressive and regressive sediment of core LZ908, south Bohai Sea[D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences (institute of oceanography), 2014.]
- [52] Yi L, Yu H J, Ortiz J D, et al. Late quaternary linkage of sedimentary records to three astronomical rhythms and the Asian monsoon, inferred from a coastal borehole in the south Bohai Sea, China [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology*

- Palaeoecology, 2012, 329-330(3): 101-117.
- [53] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(3):204-210. [SUN Hongyu, WANG Changyao, NIU Zheng, et al. Analysis of the vegetation cover change and relationship between NDVI and environment factors by using NOAA time series data[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(3):204-210.]
- [54] Anklin M, Barnola J M, Beer J, et al. Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core[J]. Nature, 1993, 364(6434): 203-207.
- [55] Dansgaard W, Oeschger H. In the Environmental Record in Glaciers and Ice Sheets [M]. Chichester: Wiley, 1989: 287-318.
- [56] Bond G C, Showers W, Elliot M, et al. The North Atlantic's 1-2 kyr climate rhythm: relation to Heinrich events, Dansgaard Oeschger cycles and the Little Ice Age[J]. Geophysical Monograph, 1999, 112: 35-58.
- [57] Schulz H, Rad U V, Erlenkeuser H, et al. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110000 years[J]. Nature, 1998, 393: 54-57.
- [58] Behl R, Kennett J. Brief interstadial events in the Santa Barbara basin, NE Pacific, during the past 60 kyr[J]. Nature, 1996, 379: 243-246.