东海内陆架泥质沉积记录的全新世快速气候波动

李小艳^①, 翦知湔^②, 石学法^{①*}, 刘升发^①, 曹鹏^①, 乔淑卿^①, 朱志伟^①, 王旭晨^③

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

② 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

③ 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100

* 联系人, E-mail: xfshi@fio.org.cn

2014-03-19 收稿, 2014-07-15 接受, 2015-01-05 网络版发表

国家自然科学基金(41006038)、国家海洋局第一研究所基本科研业务费专项(GY02-2011G23)、海洋公益性行业科研专项(200805063)、我国近海海洋综合调查与评价专项(908-ZC-I-05)和科技基础性工作专项(2008FY220300)资助

摘要 以东海内陆架泥质区中部MZ02孔岩芯沉积物为材料, 挑选底栖有孔虫单种*Ammonia compressiuscula*进行了壳体氧碳稳定同位素和镁钙比值分析, 并结合沉积物粒度、磁化率和地球化学等古环境替代指标, 讨论了MZ02孔沉积记录所反映的若干气候和海洋环境变化, 识别出发生在8.4, 7.2和6.2 ka BP的3次千年事件, 其中最为显著的是发生在8.4 ka BP的降温事件. 本研究揭示的中全新世大暖期内气候波动特征, 与相邻陆地的季风记录、热带太平洋的古海洋记录相一致, 具有百年尺度的太阳活动周期, 其中以200 a周期最为显著, 推测太阳活动可能是研究区全新世快速气候变化的主要原因之一.

关键词

快速气候波动
全新世
东海内陆架
泥质区
古海洋学事件

全新世的快速气候波动一直是全球气候变化研究的热点之一. 近年来, 冰芯、泥炭、孢粉、树木年轮、湖泊沉积物和洞穴碳酸盐沉积、海洋沉积物等作为环境信息的良好载体, 被用于高分辨率的古气候、古环境演变研究^[1-9]. 陆架边缘海作为大陆和大洋的结合部和相互作用带, 对全球海平面波动、构造活动和气候变化等反映极为敏感, 在全球气候环境变化中起着至关重要的作用. 东海介于亚洲大陆和西太平洋之间, 每年接收世界最大河流之一的长江所带来的大量沉积物, 在长江入海口以南及闽浙沿岸的内陆架形成东北至西南向的条带状泥质区, 厚度在0~40 m不等^[10], 主要是来自长江的悬浮体由冬季沿岸流以悬移方式输送而沉积的^[11-13], 是高分辨率海洋环境研究的良好载体.

近年来围绕东海内陆架泥质区沉积物分布、沉积动力和物质来源及古环境演变研究等方面, 取得了丰硕的研究成果^[14-22], 但是古海洋学方面的研究工

作相对较少^[19,20,23,24]. 本文旨在根据有孔虫壳体的氧同位素和镁钙比值特征, 并结合沉积物粒度、磁化率和地球化学等古环境替代指标, 阐述中全新世东海内陆架泥质区沉积记录的气候和海洋环境变化, 并着重讨论中全新世大暖期内的百年尺度气候波动及其可能的驱动因素.

1 材料和方法

MZ02钻孔是国家海洋局第一海洋研究所2009年在执行国家海洋公益性行业科研专项“我国大河三角洲的脆弱性调查及灾害评估技术研究”的过程中取得, 钻孔位置见图1所示(121.89°E, 28.17°N), 水深32 m, 岩芯长35.3 m. 该孔岩芯由一套浅灰色、灰色和灰绿色的黏土质粉砂、砂质粉砂和粉砂构成, 夹薄层的泥质夹层或泥质透镜体. 由下往上分为4层: 第一层35.3~22.3 m, 为灰色黏土质粉砂和粉砂互层, 局部见细砂团块和细砂夹层; 第二层22.3~19.7 m, 为灰色

引用格式: 李小艳, 翦知湔, 石学法, 等. 东海内陆架泥质沉积记录的全新世快速气候波动. 科学通报, 2015, 60: 411-419

Li X Y, Jian Z M, Shi X F, et al. Holocene abrupt climate fluctuations: Sedimentary record from the inner-shelf mud area of the East China Sea (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 411-419, doi: 10.1360/N972014-00069

图1 MZ02 和附近钻孔位置及近岸冬季海洋环流示意图. 流系参照文献[25]绘制. TWC, 台湾暖流; JCC, 江苏沿岸流; ZFCC, 浙闽沿岸流; KC, 黑潮

Figure 1 Location of the studied sediment core MZ02 and regional circulation pattern in the East China Sea (modified after Ref. [25]). TWC, Taiwan Warm Current; JCC, Jiangsu Coastal Current; ZFCC, ZheJiang-Fujian Coastal Current; KC, Kuroshio Current

砂质粉砂和粉砂为主体, 偶夹黏土质粉砂薄层; 第三层19.7~10 m, 为浅灰-灰绿色黏土质粉砂为主, 中间偶夹薄层粉砂, 局部见透镜状或团块状的粉砂或泥质透镜体; 第四层10~0 m, 为灰色或浅灰色粉砂和黏土质粉砂互层, 但黏土质粉砂占优势. 该孔岩性特征显示无明显的浊流沉积现象, 可以用作高分辨率古海洋研究的材料.

粒度分析取适量样品置于烧杯中, 加入15 mL 30%的双氧水浸泡24 h, 去除有机质, 然后加入5 mL 3 mol/L的稀盐酸浸泡24 h去除沉积物中的钙质胶结物及生物贝壳, 其后将样品进行反复离心、洗盐直至溶液呈中性, 经超声波振荡分散后上机测试. 所用仪器为英国Malvern公司生产的Master Sizer 2000型激光粒度仪, 测量范围为0.02~2000 μm , 粒径分辨率为

0.01 Φ , 重复测量的相对误差<3%. 分析工作在海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室测试中心进行. 本次研究的粒度分析样品388个(取样间距为8 cm), 平均时间分辨率约为40 a.

氧碳同位素分析选取底栖有孔虫单种*Ammonia compressiuscula*. 从壳径大于154 μm 的粒级中挑选保存好的(清洁、完整、无溶解)、大小均匀的壳体8枚; 在显微镜下以解剖针将壳体破碎后置于无水酒精中, 用震荡频率40 kHz超声波反复清洗数秒钟, 倒去浊液后, 将有孔虫样品放在55~60℃的烘箱中干燥; 然后放入碳酸盐自动制备装置(Kiel III)的样品瓶中, 在70℃温度下经磷酸溶解后释放出 CO_2 , 用Finnigan-MAT252稳定同位素质谱仪在同济大学海洋地质国家重点实验室测定 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[26]. 氧碳同位素

的分析精度采用中国国家标准样GBW04405检测,并通过国际标样NBS19与PDB标准相衔接。本次研究的氧碳同位素分析精度分别为0.07‰和0.04‰,共223个样品,平均时间分辨率约40 a。

镁钙比值分析同样选取底栖有孔虫 *A. compressuscula*。从120个样品中每样挑选14枚左右干净完整的有孔虫壳体,进行一系列复杂的样品前处理,具体方法参见文献[27,28]。然后采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-AES)在同济大学海洋地质国家重点实验室测定Mg/Ca比值。

沉积物中无机化学元素的相对含量采用瑞典COX公司生产的ITRAX岩芯扫描仪进行测试。测试所用的半管岩芯要求表面平整,测试间距设定为1 cm,分析工作在国家海洋局海洋沉积与环境地质实验室完成。

AMS¹⁴C年龄测定选取底栖混合种有孔虫或底栖单种有孔虫,挑样工作在国家海洋局第一海洋研究所进行,测试工作在美国Woods Hole海洋研究所AMS年代测试中心完成。原始测年数据利用CALIB 6.10软件进行日历年龄校正。

2 年代框架和沉积速率

MZ02孔的年代框架由表1中的14个有效年龄数据来确定。MZ02孔35.3 m长的岩芯是12.5 ka BP以来的沉积。整个岩芯沉积速率非常高,平均达278 cm/ka,

最高为1553 cm/ka。

3 全新世千年尺度的气候事件

对全新世千年尺度气候事件的认识是从北大西洋的研究开始的。北大西洋VM28-14和VM29-191孔的冰筏碎屑沉积记录清晰地显示,全新世以来发生了8次冰川碎屑显著增多的事件,代表了短期气候的变冷,且具有约1500 a的周期^[29]。后来的诸多研究^[8,30-34]证实这些变冷事件不仅在北大西洋普遍存在,而且具有全球性。如,南海北部17940站位表层海水盐度变化同样记录了7次东亚季风的减弱期^[5]; Jian等人^[6]利用冲绳海槽南、北两站位之间浮游有孔虫群落以及表层和次表层种的壳体氧碳同位素等指标的差值,识别出全新世以来黑潮相对减弱或黑潮主流轴振荡的6次事件等。陆地上中国南部董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化记录了8次东亚季风减弱期,其中6次在时间上与北大西洋快速变冷事件相一致^[8]。这些变冷事件的降温幅度和波动频率不尽相同,由于研究材料和地区的不同,这些事件发生的时间也并不完全一致。在东海内陆架泥质沉积物中,同样记录着全新世千年尺度的气候变化事件。对MZ02孔沉积物的沉积特征研究表明,孔深10~20 m即5~8 ka BP为一套岩性均一的黏土质粉砂沉积,有孔虫丰度是全岩芯中最高的层段,而且测年结果也没有任何倒转现象,可以判断沉积过程中没有沉积间断,所以这段岩芯

表1 MZ02岩芯AMS¹⁴C测年年代结果数据及沉积速率

Table 1 Accelerator mass spectrometry(AMS)¹⁴C dating and sedimentation rate of core MZ02

深度(cm)	¹⁴ C年龄(a BP)	日历年龄(2 σ)(a BP)	层位(m)	沉积速率(cm/ka)
63	2060±45	1486(1351~1620)	0~0.63	42
123	2430±25	1923(1823~2026)	0.63~1.23	137
319	2990±35	2637(2484~2736)	1.23~3.19	275
1141	5550±35	5804(5691~5905)	3.19~11.41	260
1571	6580±35	6953(6830~7112)	11.41~15.71	374
1841	7420±35	7761(7657~7867)	15.71~18.41	334
1965	7800±35	8139(8017~8266)	18.41~19.65	328
2067	8100±40	8439(8347~8544)	19.65~20.67	340
2239	9830±40	10565(10480~10678)	19.65~22.39	81
2475	9960±45	10717(10566~10945)	22.39~24.75	1553
2691	10200±50	11102(10820~10830)	24.75~26.91	561
2859	10400±65	11270(11137~11433)	26.91~28.59	1000
3101	10750±50	11941(11693~12123)	28.59~31.01	361
3401	11100±45	12486(12361~12627)	31.01~34.01	550

的沉积物是内陆架高分辨率古环境研究的理想材料. 对这一段沉积物共取样93个样品进行了各类分析, 样品平均时间分辨率为40年/样. 图2对比了MZ02孔中底栖有孔虫氧同位素、镁钙比值、沉积物的平均粒径、磁化率等在5.4~8.5 ka BP的变化, 并与格陵兰GISP2冰芯和董哥洞石笋的氧同位素记录进行对比. 图中黑色阴影标识的是识别出的分别发生在8.4, 7.2和6.2 ka BP的3次千年尺度事件, 其中8.4 ka BP变冷事件最为明显, 这次事件可能就是“8.2 ka BP事件”在东海内陆架泥质区的响应. 8.2 ka BP事件是全新世以来遭受的最强的一次变冷事件, 也曾有人称为新“新

仙女木事件”或“8 ka BP事件”^[35]. 早在20世纪90年代中期^[36]或者更早^[37], 就已经有人注意到8.0 ka BP前后在北大西洋地区发生短时间的冷干气候, 后来在北半球各地相继发现了早全新世的这次气候突变事件, 从而引起学术界的高度重视和深入研究^[6,8,38,39].

一般来说, 底栖有孔虫*A. compressiuscula*壳体的Mg/Ca低值代表海水温度降低, 指示冬季风加强, 反之指示海水温度升高、夏季风加强, 而其壳体的氧同位素低值则代表海水温度升高或海水盐度降低. 近岸陆架海域的底栖有孔虫氧同位素和镁钙比值受局地温盐的影响, 对数据的解释比深海有孔虫壳体复

图2 东海内陆架泥质区 MZ02 孔记录的中全新世气候波动事件. (a) 底栖有孔虫 Mg/Ca 比值曲线; (b) 底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值曲线; (c) 沉积物平均粒径曲线; (d) 沉积物磁化率变化曲线(细)及 5 点滑动平均值曲线(粗); (e) GISP2 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 值曲线(细)及 5 点滑动平均值曲线(粗)^[9]; (f) 董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值曲线(细)及 5 点滑动平均值曲线(粗)^[8]; 深灰色条带表示 3 次千年尺度变冷事件, 浅灰色条带表示百年尺度气候波动

Figure 2 Climatic fluctuation events identified in the core MZ02 of the inner shelf of the East China Sea (ECS) during the middle Holocene. (a) Mg/Ca ratio curve of benthic foraminifera of core MZ02; (b) $\delta^{18}\text{O}$ value curve of benthic foraminifera of MZ02; (c) mean grain size curve; (d) magnetic susceptibility curve (fine) and 5 points moving average curve (coarse); (e) $\delta^{18}\text{O}$ value curve (fine) and 5 points moving average curve (coarse) of ice core GISP2^[9]; (f) $\delta^{18}\text{O}$ value curve (fine) and 5 points moving average curve (coarse) of stalagmite in Dongge Cave of China^[8]. Dark grey bands represent 3 millennial scale cold events, light grey bands represent centennial scale climate fluctuations

杂得多, 如何区分温度和盐度的影响目前也没有定论. 本研究认为在近岸陆架海域底栖有孔虫壳体的氧同位素变化主要受海水盐度的影响, 而镁钙比值的变化与海水温度变化关系更显著, 从图2看出, Mg/Ca比值指示的低温事件要比氧同位素明显. 在8.4 ka BP时, MZ02孔的沉积物平均粒径变大, 粒度变粗, 且磁化率参数也变大, 反映的是水动力变强的氧化沉积环境. 此时, 底栖有孔虫群落分析表明, 这一时期滨岸浅水种的丰度低, 深水种丰度逐渐升高, 海平面处在快速上升过程, 水动力条件也特别强, 但是暖水种有孔虫的数量并不多^[19,24]. 因此, 这一时期底栖有孔虫镁钙比值和氧同位素值都变轻, 在很大程度上反映了“8.2 ka BP事件”在研究区的主要响应是冬季风增强, 从而带来更强的沿岸流.

4 中全新世百年尺度的快速气候波动

随着全新世古气候研究的深入, 大量高分辨率古气候记录表明全新世气候变化远不如以前想象的那么稳定, 而是存在一系列十年至数百年尺度的快

速波动, 同时还有大幅度气候突变事件的存在^[8,29,30]. 即使在全新世大暖期的气候适宜期内, 不仅存在千年尺度的气候事件, 其间还叠加着多次小幅度的气候波动. 如图2所示, 灰色阴影标识出来的事件是相对温度降低的冷事件; 对应时期的沉积物粒度变粗, 表明水动力在低温事件时比较强; 底栖有孔虫氧同位素值偏重, 表明海水盐度升高、淡水输入减少; 同一时期, 董哥洞石笋记录的氧同位素也偏重, 表明季风降雨减弱. 因此, 推测MZ02孔的底栖有孔虫氧同位素值偏重是季风降雨减少造成的.

选取岩芯扫描获得的物性参数磁化率、Ba/Ti和Al/Ti比值曲线, 与时间分辨率相当的贵州董哥洞石笋记录来进行海陆古环境记录进行对比(图3). 前人研究表明, 陆架边缘海洋沉积物中的Ti元素通常都来自陆源碎屑, 且化学性质比较稳定, 因而, 较高的Al/Ti比值对应暖湿气候, 较低值则对应冷干的气候环境^[40,41], 可以用来指示气候的冷暖干湿变化. 另外, 生源元素Ba与陆源元素Ti之间的比值(Ba/Ti)也可以指示表层海洋生产力的变化. 从图3中可以看出,

图3 全新世气候波动事件的高分辨率海陆记录对比. (a) 沉积物磁化率曲线(细)及5点滑动平均值曲线(粗); (b) 沉积物 Ba/Ti 比值曲线(细)及5点滑动平均值曲线(粗); (c) 沉积物 Al/Ti 比值曲线(细)及5点滑动平均值曲线(粗); (d) 中国大陆董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值曲线(细)及5点滑动平均值曲线(粗)^[8]; 深灰色条带表示3次千年尺度变冷事件, 浅灰色条带表示百年尺度气候波动

Figure 3 High resolution record comparison between ocean and land on climatic fluctuation events in middle Holocene. (a) The magnetic susceptibility curve (fine) and 5 points moving average curve (coarse); (b) Ba/Ti ratio curve (fine) and 5 points moving average curve (coarse); (c) Al/Ti ratio curve (fine) and 5 points moving average curve (coarse); (d) $\delta^{18}\text{O}$ value curve (fine) and 5 points moving average curve (coarse) of stalagmite in Dongge Cave of China^[8]. Dark grey bands represent 3 millennial scale cold events, light grey bands represent centennial scale climate fluctuations

图4 MZ02孔氧同位素值和Mg/Ca比值频谱分析结果

Figure 4 Spectral analysis of oxygen isotopes and Mg/Ca ratio of benthic foraminifera in core MZ02

3条黑色垂向阴影标识的是前面已经提到过的千年尺度变冷事件,灰色阴影标识的则是期间存在的多次快速变冷事件.总的来说,东海内陆架泥质区沉积物中Al/Ti比值、Ba/Ti比值与董哥洞石笋记录有较好的对应性:Al/Ti比值低的气候干冷时期,基本上对应石笋氧同位素的重值,也就是说海洋记录指示的气候干冷时期,对应陆地石笋记录的夏季风减弱、季风降雨减少的时期,即陆地的干冷气候时期.由于气候干冷时期,降水减少,河流带来的营养元素减少,因此,表层生产力也就降低、Ba/Ti比值相应出现低值.由此可以说明,东海内陆架泥质区海洋沉积记录的中全新世大暖期内的快速变冷事件和中国大陆董哥洞石笋记录的气候信息基本一致.

采用REDFIT38软件对MZ02孔底栖有孔虫氧同位素数据和Mg/Ca比值数据作频谱分析,结果表明存在明显的180~260 a周期(图4),与太阳黑子活动的Suess周期相对应.频谱图上出现的76~83 a周期与太阳活动的Gleisberge周期相对应.在前人的研究中,也发现过这种百年尺度的周期,如南海北部陆坡沉积物中84~102 a的夏季风周期^[5],PC6孔粒径序列反映的71~113和140~283 a的周期^[15],EC2005孔黏土矿

物参数反映的208 a周期^[17]等等.因此,本次研究进一步证明,全新世千百年尺度的快速气候波动确实存在,且以200 a左右的太阳活动周期最为显著(图4).

5 结论

本次研究结合底栖有孔虫壳体化学和沉积学的研究方法,分析了东海内陆架泥质区全新世以来的古环境演化,重点对中新世以来的沉积记录进行了样品间隔约40 a的高分辨率分析,并与极地冰芯和陆地洞穴石笋的古气候记录进行了比较,获得如下认识:

(1) 在全球范围内发生的“8.2 ka BP”变冷事件在东海内陆架泥质沉积物中也有明显记录,且主要反映在冬季风增强、导致沿岸流加强;

(2) 中全新世大暖期内存在着多次百年或十年尺度的小幅气候波动,且与陆地石笋和相邻海洋沉积记录具有很好的对应性;

(3) 全新世大暖期内的快速气候波动事件以200 a左右的周期为主,推测这种百年尺度的快速气候波动可能与太阳活动引起辐射量的变化有关.至于这种快速气候波动的驱动机制还有待于进一步研究.

致谢 上海石油局第一海洋调查大队“勘407”船全体船员协助海上取样工作,在美国Woods Hole海洋研究所AMS¹⁴C实验室进行了年龄测试,同济大学成鑫荣、乔培军老师在实验过程中给予大力帮助,赵泉鸿老师在写作过程中给予耐心指导,在此一并表示感谢.

参考文献

- 1 Shi Y F, Yao T D, Yang B. Decadal climatic variations recorded in Guliya ice core and comparison with the historical documentary data from East China during the last 2000 years. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1999, 42: 92–100 [施雅风, 姚檀栋, 杨保. 近 2000 a 古里雅冰芯 10 a 尺度的气候变化及其与中国东部文献记录的比较. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1999, 29: 79–86]
- 2 Hong Y T, Jiang H B, Hong B, et al. Climate fluctuation and solar change about 5000 a (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1998, 28: 492–497 [洪业汤, 姜洪波, 洪冰, 等. 近 5000 a 气候波动与太阳变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 492–497]
- 3 Feng X H, Cui H T, Tang K L, et al. Tree-ring δD as indicator of Asian monsoon intensity. *Quat Res*, 1999, 51: 262–266
- 4 Liu D S, Liu J Q, Lü H Y. Progress in high-resolution paleoenvironment research from Maar Lake (in Chinese). *Quat Sci*, 1998, 4: 289–296 [刘东生, 刘嘉麒, 吕厚远. 玛珥湖高分辨率古环境研究的新进展. *第四纪研究*, 1998, 4: 289–296]
- 5 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. *Mar Geol*, 1999, 156: 245–284
- 6 Jian Z M, Wang P X, Saito Y, et al. Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 184: 305–319
- 7 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, 294: 2345–2348
- 8 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854–857
- 9 Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}O$ climate record of the past 16500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quat Res*, 1995, 44: 341–354
- 10 Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. *Geomorphology*, 2007, 85: 208–224
- 11 Xiao S B, Li A C. A study on environmentally sensitive grain-size population in inner shelf of the East China Sea (in Chinese). *Acta Sediment Sin*, 2005, 23: 27–34 [肖尚斌, 李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分. *沉积学报*, 2005, 23: 27–34]
- 12 Xiao S B, Li A C, Liu J P, et al. Coherence between solar activity and the East China Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 2006, 237: 293–304
- 13 Liu J P, Li A C, Xu K H. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea. *Cont Shelf Res*, 2006, 26: 2141–2156
- 14 Xiao S B, Li A C, Jiang F Q, et al. Geochemical characteristics of recent 2 ka mud on the inner shelf of the East China Sea (in Chinese). *Acta Geochim Sin*, 2005, 34: 595–604 [肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近 2 ka 来东海内陆架泥质沉积物地球化学特征. *地球化学*, 2005, 34: 595–604]
- 15 Xiao S B, Li A C, Chen M H, et al. Recent 8 ka mud records of the East Asian Winter Monsoon from the inner shelf of the East China Sea (in Chinese). *Earth Sci-J Chinese Univ Geosci*, 2005, 30: 574–581 [肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 等. 近 8 ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录. *地球科学*, 2005, 30: 574–581]
- 16 Zheng Y, Kissel C, Zheng H B, et al. Sedimentation on the inner shelf of the East China Sea: Magnetic properties, diagenesis and paleoenvironmental implications. *Mar Geol*, 2010, 268: 34–42
- 17 Xu F J, Li A C, Xiao S B, et al. Paleoenvironmental evolution in the inner shelf of the East China Sea since the last deglaciation (in Chinese). *Acta Sediment Sin*, 2009, 27: 118–127 [徐方建, 李安春, 肖尚斌, 等. 末次冰期以来东海内陆架古环境演化. *沉积学报*, 2009, 27: 118–127]
- 18 Liu S F, Shi X F, Liu Y G, 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. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 2306–2314 [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. *科学通报*, 2010, 55: 1387–1396]
- 19 Zhao Q H, Jian Z M, Zhang Z X, et al. Holocene paleoenvironmental changes of the inner-shelf mud area of the East China Sea: Evidence from foraminifera faunas (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2009, 29: 75–82 [赵泉鸿, 翦知湣, 张在秀, 等. 东海内陆架泥质沉积区全新世古环境变迁: 有孔虫证据. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29: 75–82]
- 20 Zhang Z X, Zhao Q H, Chen R H, et al. Foraminiferal Mg/Ca and $\delta^{18}O$ records in the mud area of the East China Sea during the last 8000 years and their paleoenvironmental implications (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2010, 30: 79–86 [张在秀, 赵泉鸿, 陈荣华, 等. 东海泥质沉积区 8 千年来的有孔虫 Mg/Ca 和 $\delta^{18}O$ 记录及其古环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30: 79–86]
- 21 Shi X F, Liu S F, Qiao S Q, et al. Depositional features and paleoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe coastal mud area, East China Sea (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2010, 30: 19–30 [石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30: 19–30]

- 22 Xu K H, Li A C, Liu J P, et al. Provenance, structure, and formation of the mud wedge along inner continental shelf of the East China Sea: A synthesis of the Yangze dispersal system. *Mar Geol*, 2012: 176–191
- 23 Li G X, Sun X Y, Liu Y, et al. Sea surface temperature record from the north of the East China Sea since Late Holocene. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 4507–4513 [李广雪, 孙晓燕, 刘勇, 等. 中国东海北部晚全新世表层海水温度变化. *科学通报*, 2009, 54: 3374–3379]
- 24 Li X Y, Jian Z M, Shi X F et al. Foraminifera in core MZ02 from the mud area on the inner shelf of the East China Sea and their paleoenvironmental significance during the Holocene (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2012, 32: 61–71 [李小艳, 翦知潜, 石学法, 等. 全新世东海内陆架泥质区有孔虫特征及其古环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32: 61–71]
- 25 Su J L, Yuan Y L. *Chinese Coastal Hydrology* (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2005 [苏纪兰, 袁业立. *中国近海水文*. 北京: 海洋出版社, 2005]
- 26 Cheng X R, Wang P X, Huang B Q, et al. Carbon isotopic record of foraminifers in surface sediments from the South China Sea and its significance. *Chin Sci Bull*, 2005, 50: 162–166 [成鑫荣, 汪品先, 黄宝琦, 等. 南海表层沉积中有孔虫壳体的碳同位素研究及其意义. *科学通报*, 2005, 50: 48–52]
- 27 Lea D W, Pak D K, Spero H J. Climate impact of late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science*, 2000, 289: 1719–1725
- 28 Jian Z M, Wang B S, Qiao P J. Late quaternary changes of sea surface temperature in the southern South China Sea and their comparison with the paleoclimatic records of polar ice cores (in Chinese). *Quat Sci*, 2008, 28: 391–398 [翦知潜, 王博士, 乔培军. 南海南部晚第四纪表层海水温度的变化及其与极地冰芯古气候记录的比较. *第四纪研究*, 2008, 28: 391–398]
- 29 Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, 278: 1257–1266
- 30 Bianchi G G, McCave I N. Holocene periodicity in North Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland. *Nature*, 1999, 397: 515–517
- 31 Moros M, Emeis K C, Risebrobakken B, et al. Sea surface temperatures and ice rafting in the Holocene North Atlantic: Climate influences on northern Europe and Greenland. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 2113–2126
- 32 Moros M, Andrews J T, Eberl D D, et al. Holocene history of drift ice in the northern Atlantic: Evidence for different spatial and temporal modes. *Paleoceanography*, 2006, 21: PA 1029/2005 PA001214
- 33 Duplessy J C, Ivanova E, Murdmaa I, et al. Holocene paleoceanography of northern Barents Sea and variations of the northward heat transport by the Atlantic Ocean. *Boreas*, 2001, 30: 2–16
- 34 Mayewski P A, Rohling E E, Stager J C, et al. Holocene climate variability. *Quat Res*, 2004, 62: 243–255
- 35 Alley R B, Agustsdottir A M. The 8 ka event: Cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change. *Quat Sci Rev*, 2005, 24: 1123–1149
- 36 O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D, et al. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. *Science*, 1995, 270: 1962–1964
- 37 Denton G H, Karlin W. Holocene climatic variations their pattern and possible cause. *Quat Res*, 1973, 3: 155–174
- 38 Alley R B, Mayewski P A, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago. *Geology*, 1997, 25: 483–486
- 39 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of the past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993, 364: 218–220
- 40 Wei G J, Liu Y, Li X H, et al. High-resolution elemental records from the South China Sea and their paleoproductivity implications. *Paleoceanography*, 2003, 18: 1054–1065
- 41 Wei G J, Li X H, Liu Y, et al. Geochemical record of chemical weathering and monsoon climate change since the early Miocene in the South China Sea. *Paleoceanography*, 2006, 21: PA4214, doi: 10.1029/2006PA001300

Holocene abrupt climate fluctuations: Sedimentary record from the inner-shelf mud area of the East China Sea

LI XiaoYan¹, JIAN ZhiMin², SHI XueFa¹, LIU ShengFa¹, CAO Peng¹, QIAO ShuQing¹, ZHU ZhiWei¹ & WANG XuChen³

¹ Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;

² National Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

³ College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Sediment core MZ02 from the inner-shelf mud area of the East China Sea was studied to address paleoclimate and marine environment change during the Holocene epoch. This core was analyzed for accelerator mass spectrometry (AMS) ¹⁴C dating, grain size, magnetic susceptibility, geochemical index (Al/Ti, Ba/Ti), oxygen isotope, and Mg/Ca ratio of benthic foraminifera. Three significant climate change events were identified, which occurred at 8.4, 7.2 and 6.2 ka BP, respectively. The sediments are characteristic of the period, with coarse grain size and smaller Mg/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ values. The study revealed that the characteristics of abrupt climate fluctuation were consistent with monsoon and paleoceanographic records of the adjacent land and tropical Pacific. There are century solar cycles in the sedimentary record. The 200-year cycle is the most significant, suggesting that solar activity was the major cause of rapid climate change in the research area during the Holocene.

abrupt climate fluctuations, Holocene, inner shelf of the East China Sea, mud area, paleoceanography events

doi: 10.1360/N972014-00069