

文章编号: 1000-0550(2011)02-0321-07

近 2 ka 以来东海内陆架泥质区高分辨率的生物硅记录及其古生产力意义^①

刘升发^{1 2} 石学法^{1 2} 刘焱光^{1 2} 翟 滨³ 吴永华^{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. 国土资源部青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071)

摘 要 通过对位于东海内陆架泥质区中部的 MZ02 孔进行粒度分析和生物硅分析, AMS¹⁴C 测年, 获得了粒度和生物硅随时间变化的高分辨率曲线。结果表明, 近 2 ka 以来研究区沉积环境稳定, 以沿岸流控制的浅海沉积为主; 沉积物中生物硅含量 < 1.5%, 属于低含量海区, 主要受低硅质骨骼供给量、高溶解作用以及陆源物质冲淡作用的影响。生物硅含量及其堆积速率与中国东部温度曲线对比显示, 近 2 ka 以来生物硅含量及其堆积速率在相对高温期明显增加, 而在相对低温期降低, 反映了表层生产力对气候变化的响应, 其高值期可能是由于相对高温期夏季风的加强导致了上升流的增强和营养物质供给的增加。另外, MZ02 孔生物硅含量及其堆积速率与格陵兰冰芯和红原泥炭同位素对应性较好, 揭示了古生产力和古气候变化的区域性以至全球性联系。

关键词 生物硅 古生产力 古气候 2ka 以来 泥质区 东海内陆架

第一作者简介 刘升发 男 1979 年出生 博士后 海洋沉积学 E-mail: liushengfa@fio.org.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

生物硅(BSi)指化学方法测定的无定形硅的含量, 又称蛋白石, 主要由硅藻、放射虫、硅鞭毛虫和海绵骨针组成, 沉积物中生物硅主要来源于上层水体中的硅质生物死亡后的骨骼沉积^[1-2], 其含量与表层水体中的生物繁盛程度密切相关, 它的时空分布可用于反映古生产力的变化过程^[3-7]。在古海洋学及全球生源要素的循环研究中, 生物硅的测定也是不可或缺的部分^[2, 8-11]。根据沉积物中生物硅的含量可以计算出其堆积速率, 而生物硅堆积速率与样品的古水深无相关性, 且可以直接反映不同历史时期表层生产力的波动, 由于生产力的高低与表层海水营养物质的供应变化密切相关, 故而可以将生物硅沉积记录与导致环境变化的古气候和古海洋过程联系起来^[12-14]。

陆架泥质沉积体主要是全新世中晚期高海面以来逐步发展形成的^[15], 它沉积速率高、沉积体连续性好、记录的环境信息丰富, 是研究全球变化的区域性响应最佳区域之一。东海内陆架泥质区位于闽浙沿岸一带, 呈东北—西南向条带状分布, 厚度在 0~40 m 不等^[15](图 1), 该区海陆相互作用强烈, 气候主要受东亚季风控制^[16]。目前对东海区域生物硅及其环

境意义的研究大多集中在表层沉积物^[2], 而对较长时间尺度的研究涉及较少, 本文通过对东海内陆架泥质区中部的 MZ02 孔(图 1)沉积物中生物硅含量和堆积速率的研究, 探讨研究区近 2 ka 以来表层海水生产力的变化及其对古气候演化的响应。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究所用 MZ02 孔沉积柱样, 系国家海洋局第一海洋研究所 2007 年执行“我国近海海洋综合调查与评价专项”课题过程中在东海内陆架泥质区用重力取样器获得, 样长 2.78 m。该孔位于泥质区中部(121°30.47'E 27°38.20'N)(图 1), 水深 37 m。对柱样进行磁化率测试后从中间剖开, 进行颜色反射率测定和详细描述后 2 cm 等间隔取样, 共分析了 139 个粒度和生物硅(BSi)样品。

1.2 粒度分析

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

^①我国近海海洋综合调查与评价专项(编号: 908-ZC-4-05 和 908-02-02-05); 海洋公益性行业专项(编号: 200805063); 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40431002)资助。

收稿日期: 2010-01-18; 收修改稿日期: 2010-04-13

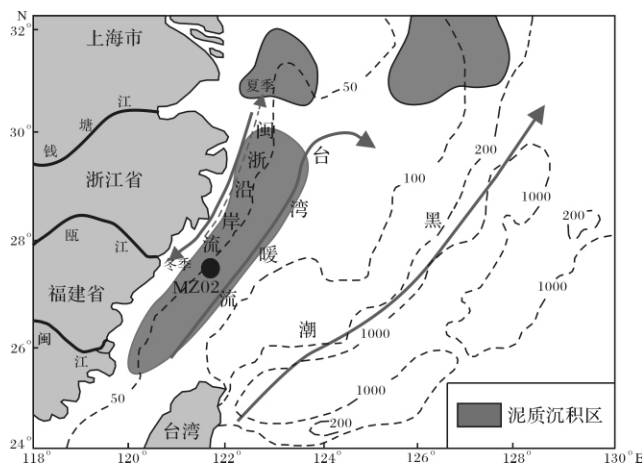


图1 MZ02孔站位图和区域海流(重绘自文献[17~19])

Fig. 1 Location of core MZ02 and local currents
(modified from References [17~19])

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 $0.02 \sim 2\,000 \mu\text{m}$, 粒径分辨率为 0.01ϕ , 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。

1.3 生物硅分析

将样品烘干 (50°C) 后研磨至 200 目,称取 $130 \sim 140 \text{ mg}$ 样品于 50 mL 聚丙烯离心管中,用 H_2O_2 (10%)、盐酸 ($1:9$) 去除碳酸盐和有机质,然后干燥 (60°C) 12 h 以上。向经过预处理的样品中加入 40.0 mL Na_2CO_3 (2 mol/L) 封盖,振荡混匀后,放入 85°C 恒温水浴。此后每隔 1 h 取出,离心后取 0.125 mL 上层清液,连续提取 8 h ,分光光度法测定提取液中的硅。根据提取液中 Si 含量随时间变化曲线的反向延线与纵坐标的交点值确定样品中生物硅的含量^[5,20]。对于低含量生物硅样品,该方法相对于国际互校样值的标准偏差为 2.16% ^[2],本文重复测试样品的相对误差 $< 5\%$ 。测试工作在中国海洋大学海洋地质实验室进行,生物硅堆积速率按照下面公式计算。

堆积速率 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$) = 百分含量 \times 沉积速率 ($\text{cm} \cdot \text{ka}^{-1}$) \times 干样密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

1.4 年代分析

AMS¹⁴C 年代测试样品根据现场磁化率测试结果及现场岩性变化选取 2 个层位,每层厚 2 cm ,选取底栖混合种有孔虫 15 mg ,测试工作在美国 Woods Hole 海洋研究所 AMS¹⁴C 年代测试中心完成,原始测年数据利用 CALIB5.10 软件进行日历年龄校正^[21], ΔR 值取东海陆架平均值 (121 ± 25) a^[22]。

2 结果与讨论

2.1 年代地层

MZ02 孔 AMS¹⁴C 测年数据如表 1 所示, 100 cm 以上部分平均沉积速率为 0.13 cm/a ; $258 \sim 102 \text{ cm}$ 之间部分的平均沉积速率为 0.21 cm/a ,整个岩芯沉积速率较为稳定。岩性分析结果表明 MZ02 孔并没有出现风暴潮等极端事件搅动而再次沉积的层序,因此对 260 cm 以下年龄依据上部层序平均沉积速率进行外插获得,其余年代依据线性内插获得。本文取样间隔 2 cm ,这样 MZ02 孔就提供了 1585 a BP 以来平均分辨率达 11 a 的高分辨率的海洋沉积记录。

2.2 岩性和沉积环境

MZ02 孔岩性较为均一,以黄褐色、青灰色粘土质粉砂为主,局部夹薄层粉砂,偶见贝壳碎屑和有孔虫。粒度测试结果表明,粉砂含量最高,平均值为 68.60% ;其次为粘土,平均值为 31.08% ;砂组含量最低,平均含量仅有 0.32% 。

垂向分布上 3 类组分及 4 个粒度参数波动较小(图 2),粉砂组分和粘土组分大致以 $1\,100 \text{ a BP}$ 和 750 a BP 为分界线,将整个柱样分为三层,底层和顶层粒度组成变化较小,而中层粒级有逐渐变细的趋势。平均粒径、分选系数、偏态和峰态的垂向分布也基本与粉砂和粘土组分的变化趋势相对应,表明该区沉积作用主要受细颗粒沉积物的控制。对于东海内陆架泥质区的沉积环境,已有研究表明全新世中晚期以来海平面变化只有约 $3 \sim 4 \text{ m}$ ^[23],其对应的沉积动力条件于沉积环境与现今基本一致,即海侵结束后高海平面以来主要受闽浙沿岸流控制的浅海沉积,而风暴潮等极端事件只对局部区域的沉积作用有短暂的影响^[15,24~27]。MZ02 孔岩性和粒度特征表明,近 2 ka

表 1 MZ02 孔 AMS¹⁴C 年代数据
Table 1 AMS¹⁴C dating of Core MZ02

深度/cm	实验室编号	测试材料	AMS ¹⁴ C 年龄/a BP	日历年龄/a BP
100~102	OS-69404	混合种底栖有孔虫	1330 ± 25	741
258~260	OS-69289	混合种底栖有孔虫	2060 ± 30	1477

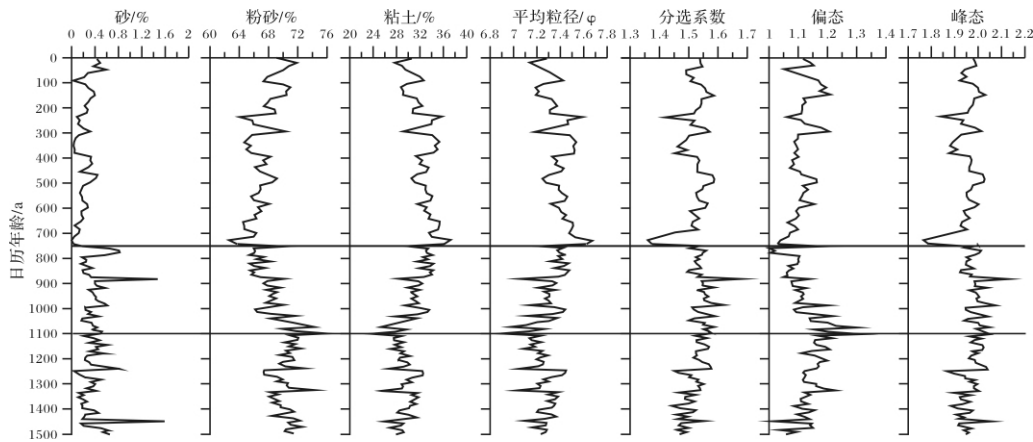


图 2 MZ02 孔粒度参数垂向分布图

Fig. 2 Vertical distribution of grain size parameters of Core MZ02

以来该区沉积物组成稳定,主要以细颗粒组分为主,砂组分最高的层位不超过 2%,且沉积序列的连续性好,未发现沉积间断和扰动层,指示了研究区处于低能沉积环境,基本受控于闽浙沿岸流。

2.3 生物硅含量及其控制因素

MZ02 孔沉积物中生物硅含量如图 3 所示,整个柱样生物硅含量分布在 0.62% ~ 1.54%,平均值为 1.04%,与远洋硅质沉积的生物硅高达 50% 以上的含量相比,研究区属于低含量海区。影响沉积物中生物硅含量的最主要的因素为硅质骨骼供给量和溶解作用^[28]。生物生命活动从水体中萃取溶解态的 SiO_2 而形成硅质骨骼,生物循环对其有决定性的影响。东海内陆架泥质区位于闽浙沿岸一带,其沉积物主要来自中国大陆及台湾岛的诸多入海河流运输的陆源物质^[25, 29, 30],而陆源碎屑沉积物提供的非晶质 SiO_2 含量极低^[28],故其在水体中处于不饱和状态,从而导致研究区硅质骨骼的供给量也极低。影响沉积物中生物硅含量的另一重要因素是海水对硅质骨骼的溶解作用。生物生长从水体中萃取溶解态 SiO_2 使其在体内积累,而绝大部分硅质生物在死后立即溶解,尤其在表层水体中溶解作用更加明显,这两个过程控制着底层沉积物中生物硅的含量^[28]。估计生物生命活动每年从水体中摄取溶解态的 SiO_2 的量为 2.50×10^{10} t/a,其中有 97% 的生物 SiO_2 在沉降过程中又溶解而发生再循环,只有 3% 的硅质骨骼能进入沉积物中^[28]。另外,根据上文研究区沉积环境分析,东海内陆架泥质区自全新世中晚期形成以来沉积环境稳定,主要为闽浙沿岸流控制下浅海沉积,海平面波动很小^[23],MZ02 孔水深基本稳定在 50 m 以内,较浅的水

深可以加大硅质生物的溶解度,而连续、快速沉积的细颗粒陆源物质也将对生物硅的保存造成冲淡作用,进一步导致沉积物中生物硅总体含量的降低。因此,受低硅质骨骼供给量、高溶解作用以及陆源物质冲淡作用的综合影响,MZ02 孔沉积物中生物硅含量较低。

在研究区及其周边海域,最早见 Lisitzin 于 1967 年对东中国海生物硅进行调查,含量近似为 1%^[31];赵颖翡于 2005 年对黄东海状沉积物中生物硅含量进行了研究,结果表明生物硅含量总体不高,基本上低于 1%^[2]。相比较下,本研究 MZ02 孔沉积物中生物硅含量略高,最大含量可达到 1.54%,这种差异可能主要由所研究站位位置的不同所致。现代海洋学研究认为,MZ02 孔位与东海内陆架上升流中心较为接近^[32],另外东海内陆架泥质区夏季水体温盐及悬浮体浓度测试也表明该孔位周边具有明显的高温高盐及高悬浮体浓度水体抬升现象,可能主要由变性后的台湾暖流所致^[33]。各种营养元素随着上升流的运动而得到充分补充,生物量大,硅藻等硅质生物繁殖茂盛,导致该区生物硅含量及其堆积速率高于东海其它区域。

2.4 生物硅指示的古生产力演化过程

生物硅含量及其堆积速率的变化可以作为替代性指标直接反映过去表层水体初级生产力的变化^[12, 36]。MZ02 孔生物硅含量及其堆积速率垂向分布发生不同程度的波动(图 3),最高值可达最低值的 3 倍左右,指示了研究区近 2 ka 以来表层水体初级生产力发生明显的变化。从图 3 可以看出,表层生产力呈现数次高低旋回的演变过程,相对高值期分别发生

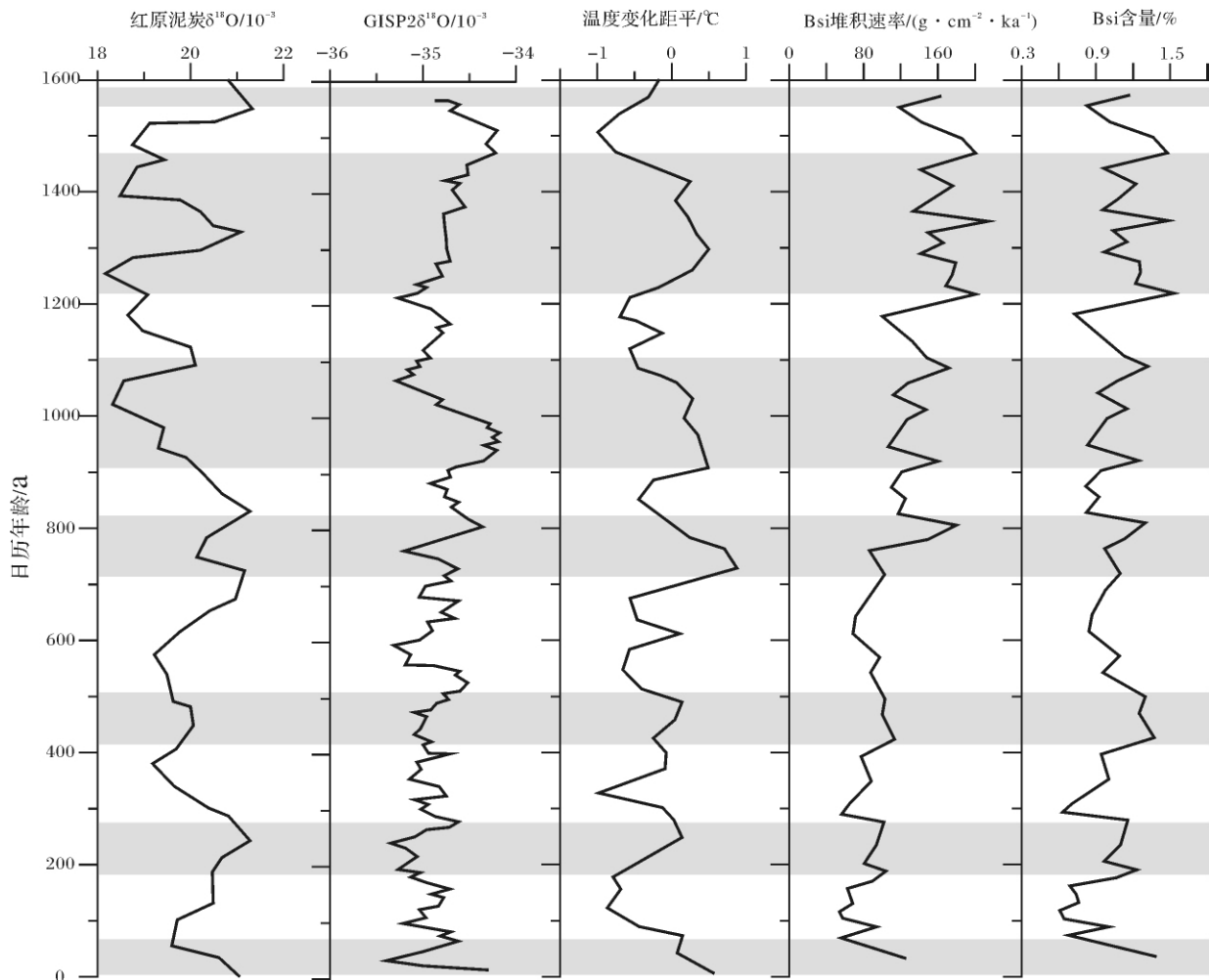


图3 MZ02孔生物硅含量及其堆积速率与其它气候变化序列的对比

(灰色带为生物硅含量及其堆积速率相对高值期; 格陵兰冰芯氧同位素数据引自文献[34] 红原泥炭氧同位素数据引自文献[35])

Fig. 3 Biogenic silica content and MAR of Core MZ02 and their comparison with other climate series

在~1570 a BP、~1330 a BP、~1000 a BP、~780 a BP、~460 a BP、~230 a BP和~40 a BP。

气候的波动是影响古生产力的重要因素^[7,13,14], 将MZ02孔生物硅含量及其堆积速率与近2 ka以来温度波动曲线^[37]比较(图3), 可以发现两者有较多的相似性, 生物硅含量及其堆积速率较高期多与温度高值期一致, 反映了生物硅作为古生产力指标与古气候的对应性, 研究区温度的升高促进了硅藻、放射虫、硅鞭藻等硅质生物的繁殖、生长, 生物量的增大导致表层水体初级生产力的增强, 反之生产力减弱。

研究区气候属于东亚季风控制区^[16], 冬、夏季风的综合作用导致研究区温度呈现不同程度的冷暖交替状态, 温暖潮湿的夏季风使研究区温度升高, 而寒冷干旱的冬季风则使研究区温度降低, 因此, 东海内陆架泥质区MZ02孔近2 ka以来生物硅含量及其堆

积速率的变化可能反映了由于夏季风的加强而导致的表层生产力的提高。夏季风的增强一方面为硅质生物的生命活动创造了适宜的温度条件, 另一方面夏季风增强造成上升流强度增大, 营养物质伴随之增多将促使表层生产力的升高, 从而导致生物硅堆积速率升高, 另外, 在夏季风增强期, 大量的季风降雨也会导致河流输入的营养物质增多, 致使表层生产力上升。近2 ka以来研究区古生产力大致可以分为两个阶段, 700 a BP之前温度在较高时期持续时间较长, 相应的古生产力总体强度较大; 而700 a BP之后温度相对偏低, 可能主要受小冰期的影响^[38], 该段时期是近2 ka以来的相对寒冷期, 相应的古生产力总体强度较小。

MZ02孔生物硅含量及其堆积速率曲线与格陵兰冰芯^[34]和红原泥炭^[35]氧同位素记录对比发现(图

3) 近 2 ka 以来的 7 次古生产力增强期基本与氧同位素高值期相对应,说明研究区生物硅的富集与大尺度的气候变化过程具有较好的相关性,反映了全球变化的区域性响应。

本研究结果表明生物硅含量及其堆积速率可以作为替代性指标有效的指示古生产力的演变过程,进一步指示古气候的变化。生物硅指示的生产力的这种气候效应在其它海域也有相应的报道,中国周边海区的研究多集中在南海,贾国东等研究了南海南部 17962 柱状样 3 万余年来的生物硅堆积速率,结果表明南沙海区古生产力的升高与一系列变冷事件,如冰期中的 Heinrich 事件、冰消期新仙女木事件、中晚全新世变冷事件等有良好的对应关系^[13];王汝建将 ODP1143 站位第四纪以来的蛋白石含量及其堆积速率与底栖有孔虫氧同位素进行了对比,结果表明 900 ka 以来蛋白石含量及其堆积速率在间冰期明显增加,而冰期降低,反映了间冰期高的表层生产力^[14];李建等研究了南海北部 ODP1144 站蛋白石含量及其堆积速率,反映了第四纪以来冰期时表层生产力增加,间冰期时表层生产力降低^[7];王文远等对我国雷州半岛湖光岩玛珥湖沉积物生物硅含量分析,表明低纬度湖泊沉积生物硅是一个理想的古气候替代指标^[39]。在世界其它地区,王汝建等对北太平洋亚极区的白令海沉积物自 MIS5.3 期以来生源组分指示的表层生产力进行了研究,反映了随着气候回暖,海冰和陆地冰川消融,融冰水注入,导致了表层生产力的升高^[40];Colman 等的研究表明贝加尔(Baikal)湖在过去 500 万年中,由于地球运行轨道阶段性变化,导致日射率的差异,从而引起硅藻生产力变化,认为生物硅在高纬度大陆湖泊区对古气候有较好的指示意义^[41];Xiao 等研究了日本琵琶湖沉积生物硅通量的变化,揭示出高通量的生物硅指示了温暖湿润的气候条件,低通量指示了冷而干燥的气候条件,生物硅在温带中纬度湖泊也可以作为古气候的替代性指标^[42]。由此可见,生物硅含量、堆积速率及其直接反映的古生产力对所处海区的古气候变化具有潜在的指示意义,然而它与古气候的关系较为复杂,如上所述,同一海区古生产力与古气候的关系不尽相同,甚至出现相反的趋势,因此在应用其作为替代指标来追踪过去气候环境变化时必须考虑到多种影响因素,如大尺度季风环流、海平面的波动、陆源物质输入量的变化、流系格局的分布以及风暴潮等极端事件的发生等。

3 结论

通过对位于东海内陆架泥质区中部的 MZ02 孔沉积物进行 AMS¹⁴C 定年和粒度、生物硅分析,得到以下几点结论:

(1) MZ02 孔沉积物粒度组成以细颗粒的粉砂和粘土为主,粒级组分和粒度参数垂向分布波动较小,反映了近 2 ka 以来研究区沉积环境稳定,以沿岸流控制的浅海沉积为主。

(2) 沉积物中生物硅含量分布在 0.62% ~ 1.54%,平均值为 1.04%,属于低含量海区,主要受低硅质骨骼供给量、边缘海区域的高溶解作用以及陆源物质冲淡作用的综合影响。

(3) 生物硅含量及其堆积速率与中国东部温度曲线对比显示,近 2 ka 以来生物硅含量及其堆积速率在相对高温期明显增加,而在相对低温期降低,反映了表层生产力对气候变化的响应,其高值期可能是由于相对高温期夏季风的加强导致了上升流的增强和营养物质供给的增加。另外,MZ02 孔生物硅含量及其堆积速率与格陵兰冰芯和红原泥炭同位素对应性较好,揭示了古生产力和古气候变化的区域性以至全球性联系。

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;国家海洋局第一海洋研究所朱爱美协助进行粒度分析;中国海洋大学刘明、国家海洋局第一海洋研究所于永贵、张忆协助进行生物硅分析;年代测试由美国 Woods Hole 海洋研究所 AMS¹⁴C 实验室完成。作者谨此一并表示感谢。

参考文献(References)

- 1 刘素美,张经. 沉积物中生物硅分析方法评述[J]. 海洋科学, 2002, 26(2): 23-26 [Liu Sumei, Zhang Jing A study on the measurement of biogenic silica[J]. Marine Sciences, 2002, 26(2): 23-26]
- 2 赵颖翡,刘素美,叶曦雯,等. 黄、东海柱状沉积物中生物硅含量的分析[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(3): 423-428 [Zhao Yingfei, Liu Sumei, Ye Xiwen, et al. The analysis of biogenic silica in the sediments of the East China Sea and the Yellow Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 35(3): 423-428]
- 3 Leinen M, Cwienk D, Ross G R, et al. Distribution of biogenic silica and quartz in recent deep-sea sediment[J]. Geology, 1986, 1: 199-203
- 4 Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments[J]. Deep-sea Research, 1989, 36(9): 1415-1426

- 5 Lyle M, Murray D W, Finney B P, *et al.* The record of late pleistocene biogenic sedimentation in the Eastern Tropical Pacific Ocean[J]. *Paleoceanography*, 2000, 3 (1): 39-59
- 6 叶曦雯, 刘素美, 张经. 黄海、渤海沉积物中生物硅的测定及存在问题的讨论[J]. *海洋学报*, 2002, 24(1): 129-134 [Ye Xiwen, Liu Sumei, Zhang Jing. Determination of biogenic opal in sediment of the Huanghai and Bohai Sea and questions in the method [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(1): 129-134]
- 7 李建, 王汝建. 南海北部一百万年以来的表层古生产力变化: 来自 ODP1144 站的蛋白石记录[J]. *地质学报*, 2004, 78(2): 228-233 [Li Jian, Wang Rujian. Paleoproductivity variability of the Northern South China Sea during the past 1 Ma: The opal record from ODP site 1144 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 228-233]
- 8 DeMaster D J. The accumulation and cycling of biogenic silica in the Southern Ocean: revisiting the marine silica budget[J]. *Deep-Sea Research II*, 2002, 49: 3155-3167
- 9 叶曦雯, 刘素美, 张经. 生物硅的测定及其生物地球化学意义[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(3): 420-426 [Ye Xiwen, Liu Sumei, Zhang Jing. The determination of biogenic silica and its biogeochemistry significance [J]. *Advance in Earth Science*, 2003, 18(3): 420-426]
- 10 李学刚, 宋金明, 袁华茂, 等. 胶州湾沉积物中高生源硅含量的发现——胶州湾浮游植物生长硅限制的证据[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(6): 572-579 [Li Xuegang, Song Jinming, Yuan Maohua, *et al.* High contents of biogenic silicate in Jiaozhou Bay sediments: evidence of Si-limitation to phytoplankton production [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(6): 572 - 579]
- 11 高磊, 李道季, 余立华, 等. 长江口崇明东滩沉积物中生源硅的地球化学分布特征[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(5): 411-419 [Gao Lei, Li Daoji, Yu Lihua, *et al.* The geochemistry of biogenic silica in sediment of Dongtan intertidal plat in Changjiang (Yangtze) River estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(5): 411-419]
- 12 Ragueneau O, Treguer P, Leynaert A, *et al.* A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in cycle in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy [J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 26: 317-365
- 13 贾国东, 翦知湑, 彭平安, 等. 南海南部 17962 柱状样生物硅沉积记录及其古海洋意义[J]. *地球化学*, 2000, 29(3): 293-296 [Jia Guodong, Jian Zhimin, Peng Pingan *et al.* Biogenic silica records in Core 17962 from southern South China Sea and their relation to paleoceanographical events [J]. *Geochimica*, 2000, 29(3): 293-296]
- 14 王汝建, 李建. 南海 ODP1143 站第四纪高分辨率的蛋白石记录及其古生产力意义[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 74-77 [Wang Rujian, Li Jian. Quaternary high-resolution opal record and its paleoproductivity implication at ODP Site 1143, southern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(4): 363-367]
- 15 Liu J P, Xu K H, Li A C, *et al.* Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2007, 85: 208-224
- 16 Tao J, Chen M T, Xu S Y. A Holocene environmental record from the southern Yangtze River delta, eastern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 230: 204-229
- 17 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 7 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, *et al.* *Geology in the East China Sea* [M]. Beijing: Science Press, 1987: 7]
- 18 胡敦欣, 杨作升. 东海海洋通量关键过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 3-13 [Hu Dunxin, Yang Zuosheng. *Margin Flux in the East China Sea* [M]. Beijing: Ocean Press, 2001: 3-13]
- 19 Su J L. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 1-16
- 20 DeMaster D J. The supply and accumulation of silica in the marine environment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45: 1715-1732
- 21 Stuiver M, Reimer P J, Bard E, *et al.* INTCAL98 Radiocarbon age calibration 24 000-0 cal aBP [J]. *Radiocarbon*, 1998, 40: 1041-1083
- 22 Yoneda M, Uno H, Shibata Y, *et al.* Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2007, 259: 432-437
- 23 Liu J P, Milliman J D, Gao S, *et al.* Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209: 45-67
- 24 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近 2 ka 来东海内陆架的泥质沉积记录及其气候意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(21): 2232-2237 [Xiao Shangbin, Li An'chun, Jiang Fuqing, *et al.* Recent 2000-year geological records of mud in the inner shelf of the East China Sea and their climatic implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 50(5): 466 - 471]
- 25 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近 2ka 闽浙沿岸泥质沉积物物源分析[J]. *沉积学报*, 2005, 23(2): 268-274 [Xiao Shangbin, Li An'chun, Jiang Fuqing, *et al.* Geochemical characteristics of recent 2ka mud on the inner shelf of the East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(2): 268-274]
- 26 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 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2005, 30(5): 573-581 [Xiao Shangbin, Li An'chun, Chen Muehong, *et al.* Recent 8ka mud records of the East Asian Winter Monsoon from the inner shelf of the East China Sea [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(5): 573-581]
- 27 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 [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 237: 293-304.
- 28 王琦, 朱而勤. 海洋沉积学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 225-230 [Wang Qi, Zhu Er'qin. *Marine Sedimentology* [M]. Beijing: Science Press, 1989: 225-230]
- 29 肖尚斌, 李安春, 刘卫国, 等. 闽浙沿岸泥质沉积的物源分析[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(2): 185-191 [Xiao Shangbin, Li

- An' chun , Liu Weiguo , *et al.* Geochemical characteristics of mud on the inner shelf of the East China Sea [J]. *Progress in Natural Science* , 2009 , 19 (2) : 185-191
- 30 Xu K H , Milliman J D , Li A C , *et al.* Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea [J]. *Continental Shelf Research* , 2009 , 29 (18) : 2240-2256
- 31 Listzín A P. Asic relationship in distribution of modern siliceous sediments and their connection with climatic zonation [J]. *International Geology Review* , 1967 , 9 : 631-652
- 32 潘玉萍 , 沙文钰. 闽浙沿岸上升流的数值模拟 [J]. *海洋预报* , 2004 , 21 (2) : 86-95 [Pan Yuping , Sha Wenyu. Numerical study on the coastal upwelling off Fujian and Zhejiang [J]. *Marine Forecasts* , 2004 , 21 (2) : 86-95]
- 33 刘升发 , 石学法 , 刘焱光 , 等. 东海内陆架泥质区夏季悬浮体的分布特征及影响因素分析 [J]. *海洋科学进展* , 2011 , 29 (1) : 37-46 [Liu Shengfa , Shi Xuefa , Liu Yanguang , *et al.* The distribution of suspended matter in the inner continental shelf mud area of the East China Sea in summer and their influential factors [J]. *Advance in Marine Science* , 2011 , 29 (1) : 37-46]
- 34 Stuiver M , Grootes P M , Braziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16 500 years and the role of the sun , ocean and volcanoes [J]. *Quaternary Research* , 1995 , 44 : 341-354
- 35 徐海 , 洪业汤 , 林庆华 , 等. 红原泥炭纤维素氧同位素指示的距今 6 ka 温度变化 [J]. *科学通报* , 2002 , 47 (15) : 1181-1186 [Xu Hai , Hong Yetang , Lin Qinghua , *et al.* Temperature variations in the past 6000 years inferred from $\delta^{18}\text{O}$ of peat cellulose from Hongyuan , China [J]. *Chinese Science Bulletin* , 2002 , 47 (18) : 1578-1584]
- 36 黄永建 , 王成善 , 汪云亮. 古海洋生产力指标研究进展 [J]. *地学前缘* , 2005 , 12 (2) : 163-170 [Huang Yongjian , Wang Chengshan , Wang Yunliang. Progress in the study of proxies of paleocean productivity [J]. *Earth Science Frontiers* , 2005 , 12 (2) : 163-170]
- 37 葛全胜 , 郑景云 , 满志敏 , 等. 过去 2000a 中国东部冬半年温度变化序列重建及初步分析 [J]. *地学前缘* , 2002 , 9 (1) : 169-181 [Ge Quansheng , Zheng Jingyun , Man Zhimin , *et al.* Reconstruction and analysis on the series of winter-half-year temperature changes over the past 2000 years in eastern China [J]. *Earth Science Frontiers* , 2002 , 9 (1) : 169-181]
- 38 王绍武. 小冰期气候的研究 [J]. *第四纪研究* , 1995 , 3 : 202-212 [Wang Shaowu. Studies on climate of the Little Ice Age [J]. *Quaternary Sciences* , 1995 , 3 : 202-212]
- 39 王文远 , 刘嘉麒 , 彭平安. 湖泊沉积物生物硅的测定与应用: 以湖光岩玛珥湖为例 [J]. *地球化学* , 2000 , 29 : 327-330 [Wang Wenyuan , Liu Jiaqi , Peng Ping'an. Determination and application of biogenic silica in lake sediments: An example from Huguangyan maar lake , southen China [J]. *Geochimica* , 2000 , 29 : 327-330]
- 40 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 [J]. *地球科学——中国地质大学学报* , 2005 , 30 (5) : 550-558 [Wang Rujian , Li Xia , Xiao Wenshen *et al.* Paleoceangraphic records and sea ice extension history of the Northern Bering Sea over the last 100 ka [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* , 2005 , 30 (5) : 550-558]
- 41 Colman S M , Peck J A , Karabanov E B. Continental climate response to orbital forcing from biogenic silica records in lake Baikal [J]. *Nature* , 1995 , 378 : 769-771
- 42 Xiao J , Yoshio I , Hisao K. Biogenic silica record in lake Biwa of central Japan over the past 145000 years [J]. *Quaternary Research* , 1997 , 47 : 277-283

High-Resolution Record of Biogenic Silica and Its Paleoproductivity Implication in Mud Area , East China Sea Inner Shelf over the Last 2000 Years BP

LIU Sheng-fa^{1,2} SHI Xue-fa^{1,2} LIU Yan-guang^{1,2} ZHAI Bin³ WU Yong-hua^{1,2}

(1. First Institute of Oceanography , State Oceanic Administration , Qingdao Shandong 266061;

2. Key Lab of Marine Sedimentology and Environmental Geology , State Oceanic Administration , Qingdao Shandong 266061;

3. Qingdao Institute of Marine Geology , Ministry of Land and Resources , Qingdao Shandong 266071)

Abstract High-resolution grain size , biogenic silica and its mass accumulation rate (MAR) records are gained by AMS¹⁴C dating and analyses of grain size and biogenic silica in Core MZ02 from the muddy area on the inner shelf of the East China Sea. The grain size results reflect a low-energy shallow sea shelf depositional environment dominated by the coastal currents. The biogenic silica content in Core MZ02 is less than 1.5% , mainly controlled by the low supply of biogenic silica remains , high silica dissolution and terrigenous matter dilution. Comparing the biogenic silica content and its MAR with the climatic record inferred from the Eastern China mainland , the relatively high biogenic silica and its MAR generally concur with the warm and humid climatic intervals , and vice versa , suggesting the response of the biogenic silica to paleoclimatic variation of Eastern China. The high paleoproductivity indicated by biogenic silica and its MAR was induced by the intensified Asian summer monsoon , which could strengthen the upwelling and increase the supply of nutrition materials. In addition , the biogenic silica and its MAR correlated well with the $\delta^{18}\text{O}$ records of GISP2 ice core and Hongyuan peat , which therefore revealed a regional response of biogenic silica to global climate change.

Key words biogenic silica; paleoproductivity; paleoclimate; 2ka BP; muddy area; inner shelf of the East China Sea