

MIS 6 期以来西菲律宾海表层营养物质水平演化及其控制因素：浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 的 Cd/Ca 证据

郭景腾^{1,2}, 李铁刚^{3,4}, 熊志方^{3,4}, 仇晓华⁵, 秦秉斌³, 常凤鸣^{1,4}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 4. 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, 山东 青岛 266237; 5. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250014)

摘要：通过西菲律宾海 MD06-3052 孔浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 的 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ [$n(\text{Cd})$ 和 $n(\text{Ca})$ 分别指示 Cd 元素和 Ca 元素的物质的量] 变化研究及其与陆源物质输入、海水结构以及海洋初级生产力等重建结果对比, 从营养物质来源和利用两方面, 探究了 MIS 6 期以来该区域表层营养物质水平演化及其控制因素, 从而为热带西太平洋生物泵作用和营养物质循环提供新思路和新证据。MIS 6 期以及 MIS 2—3 期研究区吕宋岛来源的陆源物质输入增多, 导致了研究区 MIS 6 晚期、MIS 3 早期和 MIS 2 期浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 的升高。而在 MIS 3 晚期, 尽管陆源物质输入量大、次表层营养物质上涌, 但初级生产力对于营养物质的利用量大于前两者营养物质输入量之和, 最终形成研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 在 MIS 3 晚期呈现逐渐降低的趋势。海平面的迅速升高导致营养物质来源短期不足引起 MIS 6/5 冰消期浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 呈现低值。而 MIS 5e 期研究区陆源物质输入的增多, 又促使浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 出现高值。此外, MIS 4—5d 期, 陆源物质输入较低、次表层营养物质仍受到阻碍, 但研究区初级生产力在 MIS 4—5d 期则逐渐升高, 致使研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 呈现下降趋势。研究结果反映不同时期浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 的受控因素不同, 需要对其从营养物质来源和利用两方面因素加以考虑, 才能获得更为准确的研究结果。总之, 本文对西菲律宾海浮游有孔虫 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 指标的探究, 不仅为该指标在热带西太平洋区域的古海洋学研究打下了基础, 还为该指标在其他海域更为准确的探究提供了新的思路。

关键词：浮游有孔虫; $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ [$n(\text{Cd})$ 和 $n(\text{Ca})$ 分别指示 Cd 元素和 Ca 元素的物质的量]; 营养物质; 陆源物质; 初级生产力

中图分类号: P67 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)09-0081-07
DOI: 10.11759/hyxx20180319002

南极冰芯^[1-2]和格陵兰冰芯^[3-4]的研究记录表明, 晚第四纪气候变化与大气 $p\text{CO}_2$ 息息相关, 而海洋生物泵作用在控制大气 CO_2 含量上发挥关键性作用^[5-7], 因此, 关于海洋表层初级生产力演变的研究是古海洋学研究重点^[8-10]。为了重建海水古生产力演变, 诸如颗石藻相对丰度^[11]、底栖有孔虫堆积速率^[12]、底栖有孔虫属种组合^[13]以及浮游有孔虫碳同位素^[14-15]等古生产力指标应运而生。由于海洋生产力受营养物质水平的强烈影响, 浮游有孔虫 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ [$n(\text{Cd})$ 和 $n(\text{Ca})$ 分别指示 Cd 元素和 Ca 元素的物质的量] 等古海洋学指标则可以揭示表层海水营养物质水平或营养物质利用效率^[16-17], 为生物泵的运行提供了新的见解, 也为海水在不同时间尺度上的物理循环变

化提供了理论依据^[18], 因此浮游有孔虫 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 作为一种重建古营养物质浓度的指标, 近年来得到

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-04-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230959, 41830539); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2016ASKJ13); 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金项目(QNLM2016ORP0205); 全球变化与海气相互作用专项项目(GASI-GEOGE-04)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41230959, No. 41830539; Scientific and Technological Innovation Project of Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, No. 2016ASKJ13; Open Fund of Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, No. QNLM2016ORP0205; National Special Project for Global Change and Air-Sea Interaction, No. GASI-GEOGE-04]

作者简介: 郭景腾(1989-), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事于古海洋与古环境研究, E-mail: guojt625@163.com; 李铁刚, 通信作者, E-mail: tgli@fio.org.cn

更多的关注^[19, 20]。

有孔虫壳体 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 应用古海洋学始于 20 世纪 80 年代^[21]。早期的研究主要集中于底栖有孔虫 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 揭示过去深层水环流模式^[22-23]。在此期间, 室内培养实验探究了浮游有孔虫对海水中 Cd 的吸收^[24]。基于表层海水颗粒形成过程中 Cd 相对于 P 以恒定分馏系数($\alpha_{\text{Cd}/\text{P}}=2$)的优先吸收, 以及 $n(\text{Cd})/n(\text{P})$ 和 P 分布的垂向和纬向相关性, 有孔虫壳体 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 可作为海水营养物质浓度的替代性指标^[16-17]。而浮游有孔虫 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 又被证明与海水中 PO_4^{3-} 的分布一致^[25], 并用于探究表层海水营养物质水平的重建^[16, 19]。

作为地球气候的热引擎以及地球水文循环的水汽来源, 热带西太平洋在调节全球气候中发挥重要作用^[26]。晚更新世以来低纬生物泵作用的研究也表明, 该区域生物生产力在调节大气 $p\text{CO}_2$ 上具有关键作用^[7]。为了揭示热带西太平洋生物泵作用演变以及影响生物泵作用的模式或可能机制, 已有学者利用有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$ 、颗石藻相对丰度以及底栖有孔虫丰度等古海洋学指标对该区域进行了古生产力以及上层水体结构演变的相关研究^[5, 10-11, 27]。然

而, 这些研究成果较少涉及浮游有孔虫 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 指标对于古营养物质浓度的指示。为给生物泵作用机制提供新思路以及给营养物质循环提供新证据, 本研究选取了西菲律宾海 MD06-3052 孔, 测定了该孔浮游有孔虫 *G. ruber* 的 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$, 通过该指标对于古营养物质浓度的指示, 进而探究了 MIS 6 期以来该区域表层营养物质水平演化。研究结合 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 与陆源物质输入、海水结构以及海洋初级生产力等重建结果^[5, 27-28], 从营养物质来源(陆源物质输入、次表层营养物质上涌和成层化)和利用(初级生产力)两方面, 探究影响 MIS 6 期以来西菲律宾海表层营养物质水平演化的控制因素。

1 材料与方 法

西菲律宾海 MD06-3052 岩芯(14°48.6042'N, 123°29.3983'E, 柱长 19.48 m, 水深 732 m), 是由法国极地研究所“Marion Dufresne”科考船于 2006 年执行中法国际合作航次 IMAGES155 航次时使用 Calypso 活塞式取样器在西菲律宾海吕宋岛外比科尔陆架上取得。该站位位于西太暖池北部边缘、北赤道流向南北分支附近(图 1)。

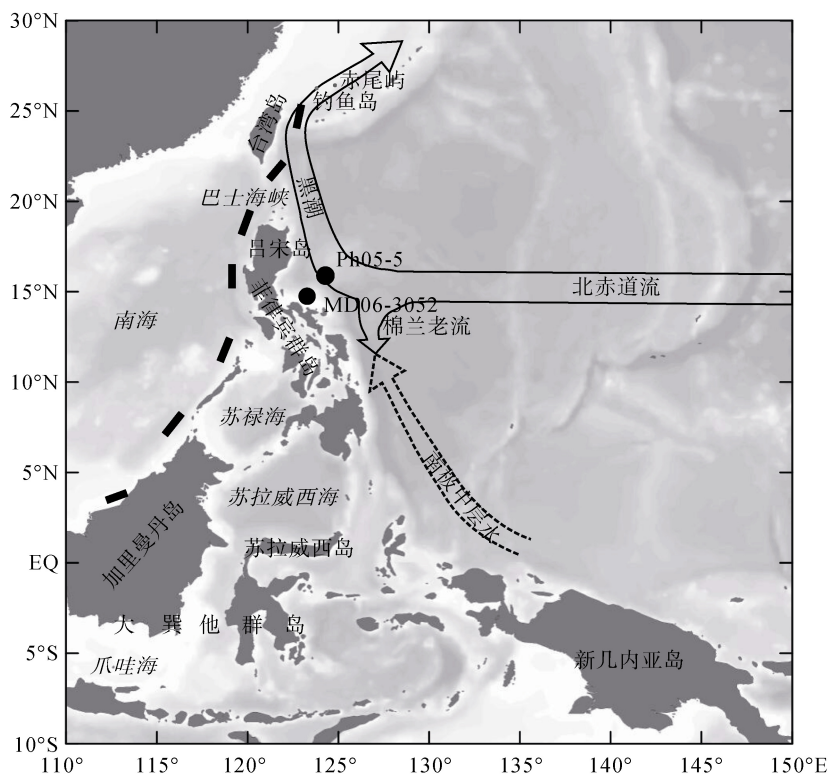


图 1 西菲律宾海 MD06-3052 孔站位

Fig. 1 Location of Core MD06-3052 in the West Philippine Sea

注: Ph05-5^[5]代表的是对比站位; 底图由在线制图软件 ODV(Ocean Data View, <http://www.odv.awi.de>)完成
Core Ph05-5^[5] shown for discussion; Map provided by the online software ODV (Ocean Date View, <http://www.odv.awi.de>)

研究以 8 cm 为间隔选取 MD06-3052 孔中 230 个样品进行浮游有孔虫 *G. ruber* 的 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 分析。前期样品的选择和有孔虫挑选在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室中进行, 后期样品的清洗和测试在同济大学海洋地质国家重点实验室中完成。每个样品取 10 g 原样, 50°C 下烘干, 清水浸泡 1~2 d 后, 将样品过 63 μm 铜筛, 样品烘干后用于有孔虫挑选。为了降低有孔虫生长速率或个体发育对壳体地球化学的影响^[29-30], 在显微镜下挑选时, 浮游有孔虫 *G. ruber* 的壳体粒径限定为 250~300 μm 。根据测试需求, 每组浮游有孔虫样品 20~40 枚(0.3~0.6 mg)。

有孔虫壳体清洗参考“Cd 清洗方法”, 具有还原步骤^[29, 31]。利用玻璃板压开有孔虫壳体房室后, 甲醇清洗去黏土、联氨溶液清洗去除金属氧化物、氢氧化钠清除有机质, 显微镜下剔除杂质。然后将壳体碎片样品转移至新离心管并用超纯水清洗, 最后过弱酸淋滤后以备上机测试, 上机测试前, 使用 0.15 mol/L 的硝酸充分溶解样品。测试仪器为 VG-X7 型电杆耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)。测试过程中, 每 3 个样品插入 1 个标准样品以检验测试结果的可靠性。基于 125 个标准样品的重复测量, 结果显示 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 的测试精度(2σ)为 1.88%。此外, 为了监测样品的清洗效率, 本研究还探究了浮游有孔虫 *G. ruber* 的 $n(\text{Mn})/n(\text{Ca})$ ^[32]。由图 2 所示, 浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 与 $n(\text{Mn})/n(\text{Ca})$ 未呈现明显的相关性(相关系数 $R=0.3$), 表明外界污染对本次测试结果的影响可忽略不计。

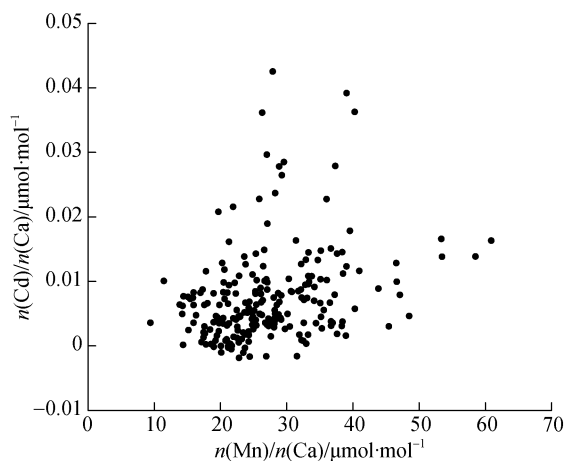


图 2 MD06-3052 孔浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 与 $n(\text{Mn})/n(\text{Ca})$ 的对比

Fig. 2 Correlation between $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ and $n(\text{Mn})/n(\text{Ca})$ of *G. ruber* shell after cleaning in Core MD06-3052

2 结果

西非律宾海 MD06-3052 孔的年龄模型根据 Qiu 等^[33]研究成果, 该孔底部年龄为 155 ka, 平均沉积速率为 12.5 cm/ka, 其所测该孔浮游有孔虫 *G. ruber* 氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)曲线具有明显的冰期-间冰期变化趋势(图 3a)。MD06-3052 孔 MIS 6 期以来浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 波动范围在 0~0.043 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 、变化趋势明显(图 3b)。 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 在 MIS 2 期、MIS 5e 期以及 MIS 6 晚期均呈现高值, MIS 6/5 冰消期呈现明显低值, MIS 4 期出现最小值。与氧同位素曲线相似, $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 曲线在 MIS 6 期也呈现上升趋势, 但 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 在 MIS 6 晚期呈现明显高值。与氧同位素曲线在 MIS 6/5 冰消期下降趋势不同的是, $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 曲线在该时期出现谷值。MIS 5e 期至 MIS 4 期, 浮游有孔虫 *G. ruber* 的氧同位素曲线与 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 曲线呈现明显相反的趋势, 且在 MIS 5e 期和 MIS 4 期均出现极值。随后, 在 MIS 3 期, 氧同位素曲线与 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 曲线呈现先上升后下降的同步趋势, 但氧同位素曲线的变化趋势相对 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 曲线更明显。尽管在 MIS 2 期两者均呈现峰值, 但在全新世两者又呈现出相反的变化趋势。

3 讨论

大气 $p\text{CO}_2$ 在晚第四纪具有明显的冰期间冰期变化^[2], 其变化趋势受到包括生物泵作用在内的很多因素影响^[5-6, 19, 34]。古营养物质浓度重建可为探究生物泵作用和营养物质循环提供新证据。浮游有孔虫壳体 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 可以用来重建过去表层海水营养物质水平, 具体来说, 浮游有孔虫 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 越高(或越低), 即表明该时期表层海水营养物质浓度越高(或越低)^[16-17, 35]。另外, 表层海水营养物质浓度的演化可能会受到诸如陆源物质输入^[36-37]、海水结构^[5](次表层海水上涌或海水成层化)以及初级生产力^[11, 27]等因素影响。

Sr-Nd 同位素数据表明, MIS 6 期以来 MD06-3052 孔所在区域陆源物质的主要来源为吕宋岛($\approx 68\% \sim 100\%$), 亚洲风尘贡献较少($\approx 0\% \sim 32\%$)^[28], 这与第四纪中晚期吕宋岛是西非律宾海的重要物源区结论一致^[38-39]。因此, MD06-3052 孔沉积物陆源物质堆积速率(MAR)和 $\omega(\text{Ti})/\omega(\text{Ca})$ [$\omega(\text{Ti})$ 和 $\omega(\text{Ca})$ 分别指示的是 Ti 元素和生物成因的 Ca 元素所占的质量分数]的高值表明 MIS 6 期以及 MIS 2—3 期研究区吕宋岛来源

的河流陆源物质输入增多(图 3c 和 d)^[28], 即表示该时期研究区陆源营养物质输入增高。

研究区温跃层深度(DOT)在 MIS 6 晚期相对于中期变深且达到稳定(图 3e), 表明 MIS 6 晚期研究区上层水体混合作用减弱, 次表层营养物质上涌相对 MIS 6 中期受到阻碍, 该时期研究区初级生产力也逐渐降低(图 3f)。由此推断, MIS 6 晚期研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 呈现明显峰值可能是由吕宋岛来源的陆源物质输入导致。

研究区 DOT 在 MIS 3 早期比较稳定, 而在 MIS 3 晚期则明显变浅(图 3e), 即表明 MIS 3 晚期研究区上层水体混合作用较强, 次表层营养物质可上涌至表层。与此同时, 研究区初级生产力在 MIS 3 期逐渐

升高, 并在 MIS 3 晚期达到最高值(图 3f), 即表明营养物质利用在 MIS 3 晚期也达到最大。对比浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 在 MIS 3 期呈现先升高后降低的趋势(图 3b)以及该时期营养物质的来源和利用信息可知, MIS 3 早期研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 的升高主要由陆源物质输入引起(MAR 相对高值, DOT 和初级生产力变化不明显), 而在 MIS 3 晚期, 尽管陆源物质输入量大[MAR 和 $\omega(\text{Ti})/\omega(\text{Ca})$ 均呈现高值]、次表层营养物质上涌(DOT 变浅), 但初级生产力对于营养物质的利用量大于前两者营养物质输入量之和, 最终导致研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 在 MIS 3 晚期呈现逐渐降低的趋势。

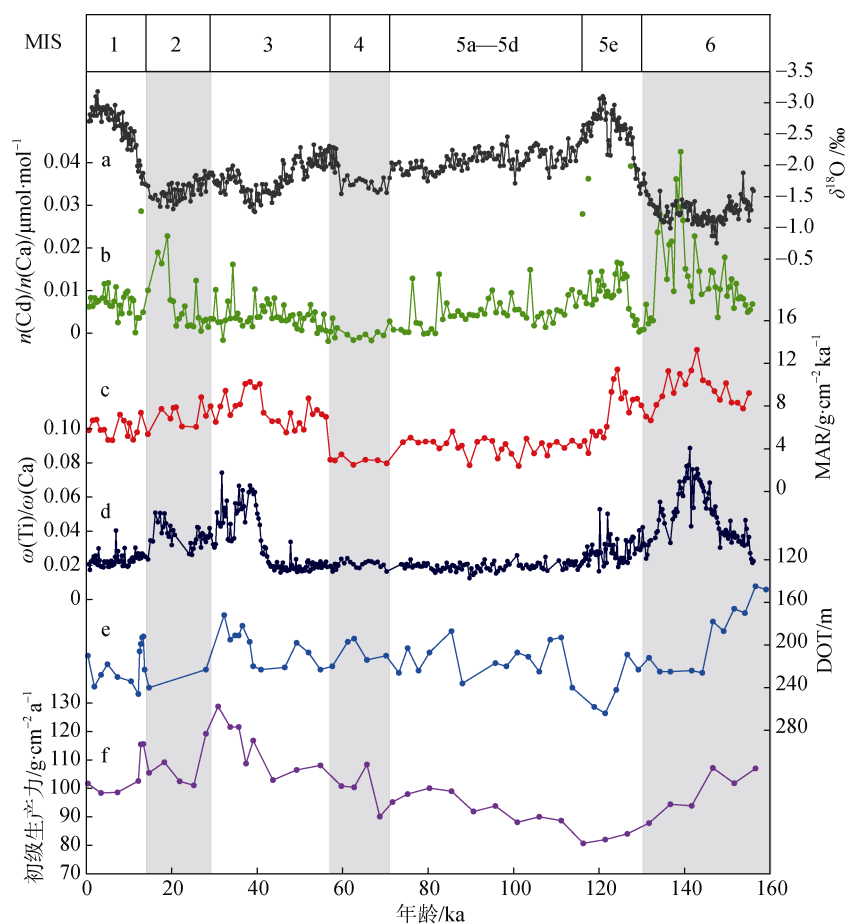


图 3 MD06-3052 孔浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 变化与研究区营养物质来源和利用状况替代性指标变化对比

Fig. 3 Comparison between *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ from core MD06-3052 and the proxies on nutrient contribution and utilization in the study area

a. MD06-3052 孔浮游有孔虫 *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ ^[33]; b. $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$, 离散点指示异常数据点; c, d. 分别为 MD06-3052 孔沉积物 MAR 和 $\omega(\text{Ti})/\omega(\text{Ca})$, 两者的指示区域陆源物质输入量^[28]; e, f. 分别为 Ph05-5 孔的 DOT 和初级生产力^[5]; MIS 为深海氧同位素阶段; 灰色条带部分表示冷期

a. *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ data in Core MD06-3052^[33]; b. $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$, abnormal data set were shown as discrete points; c and d. are MAR and $\omega(\text{Ti})/\omega(\text{Ca})$ of sediment in core MD06-3052, respectively, indicating inputs of the regional terrigenous materials^[28]; e and f. are DOT primary productivity from core Ph05-5, respectively^[5]; MIS means marine isotope stages; Grey bars indicate cold periods

MIS 2 期, 研究区 DOT 再次变深(图 3e), 表明该时期次表层营养物质的输入较少, 而初级生产力的消耗趋于平缓(图 3f), 因此, MIS 2 期研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 的高值则主要由陆源物质引起。

在末二次冰消期(MIS 6/5)期间, 海平面升高迅速^[40], 导致研究区大陆架埋没, 陆源物质在陆架堆积, 陆坡地区(研究区)MAR 出现低值(图 3c)。 $\omega(\text{Ti})/\omega(\text{Ca})$ 出现明显下降趋势(图 3d), 反映的吕宋岛源区陆源物质输入量突然降低, 但此时研究区 DOT 仍然稳定在 MIS 6 晚期水平, 表明次表层营养物质上涌受到阻碍。因此形成研究区营养物质来源短期不足局面, 浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 在 MIS 6/5 冰消期呈现低值(图 3b)。

而在 MIS 5e 期间, 尽管研究区 $\omega(\text{Ti})/\omega(\text{Ca})$ 变化不大, 但 MAR 却呈现高值(图 3c), 即研究区陆源物质输入在该时期可能增多。同时研究区 DOT 到达了 MIS 6 期以来的最深处(图 3e), 即表明该时期上层水体混合作用最弱, 成层化作用增强, 阻止了次表层海水营养物质的上涌。研究区初级生产力在 MIS 5e 期也出现 MIS 6 期以来的最低值(图 f), 表明该时期营养物质的利用量也达到了最低。因此, 由陆源物质输入增多导致的营养物质来源量增多, 而营养物质利用量却达到最低, 导致了 MIS 5e 期研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 出现高值。

此外, MIS 4—5d 期, 研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 呈现下降的趋势, 并在 MIS 4 期出现最低值(图 3b)。相较而言, 研究区 MAR 和 $\omega(\text{Ti})/\omega(\text{Ca})$ 在 MIS 4—5d 期均呈现稳定低值(图 3c 和 d), 即该时期吕宋岛源区的陆源物质输入较低。而研究区的 DOT 同样也呈现稳定深度, 其水深与 MIS 6 晚期近乎持平(图 3e)。虽相对于 MIS 5e 期已经变浅, 但仍深于 MIS 3 晚期和 MIS 6 中期, 即表明研究区在 MIS 4—5d 期相对于 MIS 5e 期上层水体混合作用增强, 次表层营养物质虽有上涌但仍受到阻碍。然而, 研究区初级生产力在 MIS 4—5d 期则逐渐升高(图 3f), 即营养物质利用量升高。由此推断, MIS 4—5d 期研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 的逐渐下降主要受初级生产力对于营养物质的消耗所控制。

4 结论

西菲律宾海 MD06-3052 孔浮游有孔虫 *G. ruber* 的 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 与陆源物质输入状况、海水结构以及初级生产力等重建结果对比, 揭示了 MIS 6 期以来

不同时期影响西菲律宾海表层营养物质水平演化的主导因素。研究显示, 不同时期浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 所反应的受控因素不同, 为了获得更为准确的研究结果, 需要从营养物质来源(陆源物质输入、次表层上涌和层化)和利用(初级生产力)两方面因素对其加以考虑。

除 MIS 3 晚期外, MIS 6 期和 MIS 2—3 期研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 的升高主要由陆源物质引起, 而在 MIS 3 晚期, 初级生产力对于营养物质的利用量大于陆源物质和次表层营养物质对于营养物质的输入量, 最终导致 $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 在该时期呈现逐渐降低的趋势。

MIS 6/5 冰消期, 研究区营养物质来源不足, 致使浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 在该时期呈现低值。而在 MIS 5e 期, 研究区陆源物质输入增多, 使研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 又呈现高值。此外, MIS 4—5d 期研究区浮游有孔虫 *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ 的逐渐下降主要受初级生产力对于营养物质的消耗所控制。

参考文献:

- [1] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420, 000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. Nature, 1999, 399(6735): 429-436.
- [2] Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650, 000–800, 000 years before present[J]. Nature, 2008, 453(7193): 379-382.
- [3] Dansgaard W, Johnsen S, Clausen H, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. Nature, 1993, 364(6434): 218-220.
- [4] Grootes P, Stuiver M, White J, et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores[J]. Nature, 1993, 366(6455): 552-554.
- [5] Li Tiegang, Zhao Jingtao, Sun Rongtao, et al. The variation of upper ocean structure and paleoproductivity in the Kuroshio source region during the last 200kyr[J]. Marine Micropaleontology, 2010, 75(1): 50-61.
- [6] Rich J J, Hollander D, Birchfield G E. Role of regional bioproductivity in atmospheric CO₂ changes[J]. Glob Biogeochem Cycle, 1999, 13(2): 531-553.
- [7] Beaufort L, de Garidel-Thoron T, Mix A C, et al. Enso-like forcing on oceanic primary production during the late Pleistocene[J]. Science, 2001, 293(5539): 2440-2444.
- [8] Garidel-Thoron T, Beaufort L, Linsley B K, et al. Millennial-scale dynamics of the East Asian winter monsoon during the last 200, 000 years[J]. Paleoceanography, 2001, 16(5): 491-502.

- [9] Beaufort L, Garidel-Thoron T, Linsley B, et al. Biomass burning and oceanic primary production estimates in the Sulu Sea area over the last 380, 000 kyr and the East Asian monsoon dynamics[J]. *Marine Geology*, 2003, 201(1): 53-65.
- [10] Li Tiegang, Zhao Jingtao, Nan Qingyun, et al. Palaeo-productivity evolution in the centre of the Western Pacific Warm Pool during the last 250 ka[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2011, 26(5): 478-484.
- [11] Fraser N, Kuhnt W, Holbourn A, et al. Precipitation variability within the West Pacific Warm Pool over the past 120 ka: Evidence from the Davao Gulf, southern Philippines[J]. *Paleoceanography*, 2015, 29(11): 1094-1110.
- [12] Herguera J C, Berger W. Paleoproductivity from benthic foraminifera abundance: Glacial to postglacial change in the west-equatorial Pacific [J]. *Geology*, 1991, 19(12): 1173-1176.
- [13] Corliss B H, Chen C. Morphotype patterns of Norwegian Sea deep-sea benthic foraminifera and ecological implications[J]. *Geology*, 1988, 16(8): 716-719.
- [14] Shemesh A, Macko S, Charles C, et al. Isotopic evidence for reduced productivity in the glacial Southern Ocean[J]. *Science*, 1993, 262: 407-409.
- [15] Mortlock R, Charles C, Froelich P, et al. Evidence for lower productivity in the Antarctic Ocean during the last glaciation[J]. *Nature*, 1991, 351(6323): 220.
- [16] Elderfield H, Rickaby R E M. Oceanic Cd/P ratio and nutrient utilization in the glacial Southern Ocean[J]. *Nature*, 2000, 405(6784): 305-310.
- [17] Rickaby R E M, Elderfield H. Planktonic foraminiferal Cd/Ca: Paleonutrients or paleotemperature?[J]. *Paleoceanography*, 1999, 14(3): 293-303.
- [18] Bryan S P, Marchitto T M. Testing the utility of paleonutrient proxies Cd/Ca and Zn/Ca in benthic foraminifera from thermocline waters[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(1): doi: 10.1029/2009GC002780.
- [19] Yu Jimin, Thornalley D J, Rae J W, et al. Calibration and application of B/Ca, Cd/Ca, and $\delta^{11}\text{B}$ in *Neogloboquadrina pachyderma* (sinistral) to constrain CO_2 uptake in the subpolar North Atlantic during the last deglaciation[J]. *Paleoceanography*, 2013, 28(2): 237-252.
- [20] Lin H L, Lai C T, Ting H C, et al. Late Pleistocene nutrients and sea surface productivity in the South China Sea: A record of teleconnections with northern hemisphere events[J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1): 197-210.
- [21] Boyle E A. Cadmium, zinc, copper, and barium in foraminifera tests[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1981, 53(1): 11-35.
- [22] Ohkouchi N, Kawahata H, Okada M, et al. Benthic foraminifera cadmium record from the western equatorial Pacific[J]. *Marine Geology*, 1995, 127(1): 167-180.
- [23] Rosenthal Y, Boyle E A, Labeyrie L. Last glacial maximum paleochemistry and deepwater circulation in the Southern Ocean: Evidence from foraminiferal cadmium[J]. *Paleoceanography*, 1997, 12(6): 787-796.
- [24] Delaney M L. Uptake of cadmium into calcite shells by planktonic foraminifera[J]. *Chemical Geology*, 1989, 78(2): 159-165.
- [25] Keigwin L D, Boyle E A. Late Quaternary paleochemistry of high-latitude surface waters[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1989, 73(1): 85-106.
- [26] Lea D W. The glacial tropical Pacific: not just a west side story[J]. *Science*, 2002, 297(5579): 202-203.
- [27] Bolliet T, Holbourn A, Kuhnt W, et al. Mindanao Dome variability over the last 160 kyr: Episodic glacial cooling of the West Pacific Warm Pool[J]. *Paleoceanography*, 2011, 26(1): doi: 10.1029/2010PA001966.
- [28] Xu Zhaokai, Li Tiegang, Clift P D, et al. Bathyal records of enhanced silicate erosion and weathering on the exposed Luzon shelf during glacial lowstands and their significance for atmospheric CO_2 sink [J]. *Chemical Geology*, 2018, 476: 302-315.
- [29] Lea D W, Pak D K, Spero H J. Climate impact of late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations[J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1719-1724.
- [30] Spero H J, Mielke K M, Kalve E M, et al. Multispecies approach to reconstructing eastern equatorial Pacific thermocline hydrography during the past 360 kyr[J]. *Paleoceanography*, 2003, 18(1): doi: 10.1029/2002PA000814.
- [31] Martin P A, Lea D W. A simple evaluation of cleaning procedures on fossil benthic foraminiferal Mg/Ca[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3(10): 1-8.
- [32] Boyle E A. Manganese carbonate overgrowths on foraminifera tests[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(10): 1815-1819.
- [33] Qiu Xiaohua, Li Tiegang, Chang Fengming, et al. Sea surface temperature and salinity reconstruction based on stable isotopes and Mg/Ca of planktonic foraminifera in the western Pacific warm pool during the last 155 ka[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(1): 187-200.
- [34] Anderson R, Ali S, Bradtmiller L, et al. Wind-driven upwelling in the Southern Ocean and the deglacial rise in atmospheric CO_2 [J]. *science*, 2009, 323(5920): 1443-1448.
- [35] Ortiz J D, Mix A C, Wheeler P A, et al. Anthropogenic CO_2 invasion into the northeast Pacific based on concurrent $\delta^{13}\text{C}_{\text{dic}}$ and nutrient profiles from the California Current[J]. *Glob Biogeochem Cycle*, 2000, 14(3): 917-929.
- [36] Liu Zhifei, Zhao Yulong, Colin C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(11): 2195-2205.
- [37] Wan Shiming, Yu Zhaojie, Clift P D, et al. History of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the

- last one million years[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 326: 152-159.
- [38] Jiang Fuqing, Zhou Ye, Nan Qingyun, et al. Contribution of Asian dust and volcanic material to the western Philippine Sea over the last 220 kyr as inferred from grain size and Sr - Nd isotopes[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2016, 121(9): 6911-6928.
- [39] Xu Zhaokai, Li Tiegang, Clift P D, et al. Quantitative estimates of Asian dust input to the western Philippine Sea in the mid - late Quaternary and its potential significance for paleoenvironment[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(9): 3182-3196.
- [40] Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E, et al. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1-3): 295-305.

The variations and controls of surface ocean nutrient concentration in the West Philippine Sea since MIS 6: evidence from Cd/Ca in planktonic foraminifera *Globigerinoides ruber*

GUO Jing-teng^{1, 2}, LI Tie-gang^{3, 4}, XIONG Zhi-fang^{3, 4}, QIU Xiao-hua⁵, QIN Bing-bin³, CHANG Feng-ming^{1, 4}

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 4. Laboratory for Marine Geology and Environment, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 5. No.1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Received: Mar.19, 2018

Key words: planktonic foraminifera; $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$; nutrient; terrigenous materials; primary productivity

Abstract: Compared the variation of $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ of planktonic foraminifera *Globigerinoides ruber* for core MD06-3052 in the West Philippine Sea with the reconstructive results of terrigenous input, upper water body structure and marine primary productivity, from the two aspects of nutrient contribution and utilization, we investigate the variations and controls of surface ocean nutrient concentration in the West Philippine Sea since MIS 6, providing new insights for the biological pump and oceanic nutrient cycling. The increases in *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ during later MIS 6, early MIS 3 and MIS 2 likely resulted from the increases in Luzon-sourced terrigenous inputs during MIS 6 and MIS 2—3. During later MIS 3, *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ shows a downward trend, although the terrigenous input and local upwelling intensity are high during this interval. We suspect that nutrient utilization overwhelm the terrigenous input and upwelling, resulting in a decrease in *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ during later MIS 3. *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ reached a minimum during the MIS 6/5 deglaciation, which was caused by a sea level rise-induced low nutrient input. But the increased terrigenous input in the study area keeps *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ in higher values during MIS 5e. In addition, from MIS 5d to 4, the terrigenous input was low, and the upwelling of subsurface nutrient were still hindered. However, the primary productivity gradually increased during this interval, which means increased nutrient utilization resulted in a decrease in *G. ruber* $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$. The results suggest the controls of $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ in planktonic foraminifer *G. ruber* are complicated, and both nutrient sources and nutrient utilization should be considered in $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ proxy interpretation. In conclusion, the exploration of planktonic foraminifera $n(\text{Cd})/n(\text{Ca})$ proxy in the West Philippine Sea not only lays the foundation for the research of paleoceanography in the tropical western Pacific, but also provides new insights for the more accurate inquiry of the proxy in other sea areas.

(本文编辑: 刘珊珊)