

doi: 10.13745/j.esf.2016.04.025

# 南海北部 MD12-3432 站 MIS 11 期以来底栖有孔虫反映的古环境变化

梁静之<sup>1,2</sup>, 黄宝琦<sup>1</sup>, 董轶婷<sup>1</sup>, 贾文博<sup>1</sup>, 周彦希<sup>1</sup>

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 哥伦比亚大学 Lamont-Doherty 地球观察所; 哥伦比亚大学 地球与环境科学系, 美国 纽约

LIANG Jingzhi<sup>1,2</sup>, HUANG Baoqi<sup>1</sup>, DONG Yiting<sup>1</sup>, JIA Wenbo<sup>1</sup>, ZHOU Yanxi<sup>1</sup>

1. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

2. Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University; Department of Earth and Environmental Sciences, Columbia University, New York, US

LIANG Jingzhi, HUANG Baoqi, DONG Yiting, et al. Benthic foraminifera's implications on paleo-environment variability in MD12-3432 in the northern South China Sea since MIS 11. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(4): 292-300

**Abstract:** The South China Sea (SCS) is a typical marginal sea whose northern continental slope has a high sedimentation rate, which provides ideal material for research on sub-orbital scale climate variability. In this study, samples from sediment core MD12-3432 (19°16.88'N, 116°14.52'E, water depth 2125 m) retrieved from the lower northern continental slope, northern South China Sea, are selected as the major research material. By applying multiple paleo-environmental proxies analysis, including benthic foraminifera abundance, coarse fraction percentage, specific environment indicators' percentage and abundance as well as relevant results from previous studies, the paleoceanographic history of the northern South China Sea is reconstructed, with emphasis on the variability of surface primary productivity and bottom water dissolved oxygen content. Different from previous studies, the results indicate that from Marine Isotope Stage 11(MIS 11, approximately 400 ka B. P.) the primary productivity in the northern SCS is high in warm interglacial period and low in cold glacial period, and it is mainly influenced by the intensity of precipitation controlled by the East Asian Summer Monsoon. During MIS 7 and MIS 9, the rise in the abundance of a low productivity and high dissolved oxygen indicator, the epifaunal *Cibicidoides wuellerstorfi*, coincides with high productivity indicators' records. This inconsistency implies a possible intrusion of oxygen-enriched bottom water in both warm time periods.

**Key words:** the northern South China Sea; benthic foraminifera; primary productivity; dissolved oxygen content

**摘要:** 南海具有典型边缘海特征, 其北部陆坡由于具有高沉积速率的地层剖面, 可以用于研究亚轨道尺度气候变化。本研究以南海北部陆坡下部 MD12-3432 柱状样(19°16.88'N, 116°14.52'E, 水深 2 125 m)为主要研究材料, 分析其粗组分百分含量、底栖有孔虫丰度和特定环境指示属种的百分含量与丰度, 并结合相关研究结果, 运用多指标综合分析, 重建了南海北部陆坡 MIS 11 期(距今约 40 万年)以来的表层初级生产力和底层水溶解氧含量的演化情况。与之前研究不同, 本研究发现 MIS11 期以来南海北部的古生产力在温暖的间冰期高、在寒冷的冰期低, 且主要受控于东亚夏季风影响下低纬地区降水强度的变化。在 MIS 7 期和 MIS 9 期可能有较高溶解氧含量的底层水进入南海北部, 导致在高生产力的暖期中, 喜氧的低生产力指示种 *Cibicidoides wuellerstorfi* 丰度增加。

**关键词:** 南海北部; 底栖有孔虫; 初级生产力; 溶解氧含量

**中图分类号:** Q915.811.1; P532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2016)04-0292-09

**收稿日期:** 2015-06-30; **修回日期:** 2015-12-22

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41376043)

**作者简介:** 梁静之(1992—), 女, 博士研究生, 生物与古环境专业, 主要从事古海洋学与古气候学研究。E-mail: jliang@ldeo.columbia.edu

## 1 研究背景

南海是西太平洋典型的边缘海, 平均水深 1 000 m 以上, 面积约 350 万 km<sup>2</sup>, 是一个半封闭的海盆<sup>[1]</sup>。边缘海对于海水的物理化学性质变化十分敏感, 响应强烈, 可以放大与大洋相关的气候变化信号<sup>[2]</sup>。边缘海近岸的海域, 具有较高沉积速率的地层剖面, 可以用于高分辨古地层学和古气候学的研究。大洋中碳酸盐的补偿深度 (Carbonate Compensation Depth, CCD) 直接影响了沉积物中钙质化石的保存。南海的 CCD 约为 2 900 m<sup>[1]</sup>, 深于其他相邻的西太平洋海区, 因此其沉积物中的微体古生物化石为西太平洋古海洋学研究提供了重要材料。

底栖有孔虫因其属种丰富且具有区域特性, 在古海洋学中有重要的研究意义。根据其在沉积物中生活的位置, 可以将底栖有孔虫分为表生种和内生种。表生种一般具有螺旋、双凸或平-凸的壳型, 便于其在沉积物的表面保持稳定; 内生种的壳体形态相对而言更加多样, 主要有锥形、圆柱形、扁平锥形等, 且不同属种在沉积物内部因“微生境”而展现出垂向分布的性质<sup>[3-4]</sup>。此外, 底栖有孔虫的生态受到底层海水物理和化学性质的影响, 其丰度对环境变化具有良好响应。

Jorissen 等<sup>[5]</sup>提出了沉积物内底栖有孔虫分布的 TROX 模型 (the microhabitat explained in terms of TROphic conditions and OXYgen concentrations), 认为沉积物内底栖有孔虫的分布受营养物质供给和溶解氧含量共同影响。在 TROX 模型中, 沉积物表面具有高的营养物质供给, 因此氧气含量是底栖有孔虫分布的决定因素。在这一偏氧化的环境中, 以 *Cibicides wuellerstorfi* (*C. wuellerstorfi*) 为代表的表生种比较繁盛。从沉积物表面向下, 随着营养物质和溶解氧含量的减少, 偏好还原环境的内生种广泛分布。从有孔虫的丰度上看, 表生种在营养较少的氧化区域占优势, 内生种在营养较丰富的缺氧环境中占主要地位<sup>[5]</sup>。此外, Kaiho<sup>[6]</sup>建立了底栖有孔虫溶解氧指数 (BFOI, Benthic Foraminifera Oxygen Index), 用于定量描述海水中溶解氧的含量。综上所述, 基于不同属种底栖有孔虫对环境条件的偏好, 底栖有孔虫特定属种的丰度及其在底栖有孔虫群落中的百分含量变化可以作为海水中营养物质和溶解氧含量变化的衡量指标。此外, 通过对

底栖有孔虫属种组合的分析, 可以“放大”环境效应, 研究特定环境因子的演化特征。

之前关于南海北部的古海洋学研究主要集中于有孔虫属种分析, 有孔虫氧碳同位素分析, 沉积物粒度与矿物种类分析, 钙质超微与蛋白石含量等的研究。这些研究中所采用的大部分柱状样的采样分辨率较低, 时间尺度长。本研究在较长时间尺度上 (MIS 11 期, 约 40 万年前至今) 对南海北部陆坡深海沉积物进行古海洋学研究; 以较高的分辨率 (2 ka) 对底栖有孔虫丰度及属种进行分析, 从表层生产力 and 底层水溶解氧含量两方面对南海北部陆坡 MIS11 期以来的环境变化进行探究, 通过其与多个古气候学指标的对比探讨其古海洋学意义。

## 2 材料和分析方法

本研究采用的沉积物样品来源于 2012 年 6 月 23 日由中法合作-CIRCEA 项目的法国研究船“Marion Dufresne”在南海北部钻取的 MD12-3432 柱状样。MD12-3432 柱状样 (19° 16. 88' N, 116° 14. 52' E, 水深 2 125 m) 位于南海北部陆坡下部。岩心总长 50. 8 m, 所取得的沉积物为由灰色-灰黑色富含钙质有孔虫化石的软泥和黏土级陆源碎屑组成的半深海沉积。

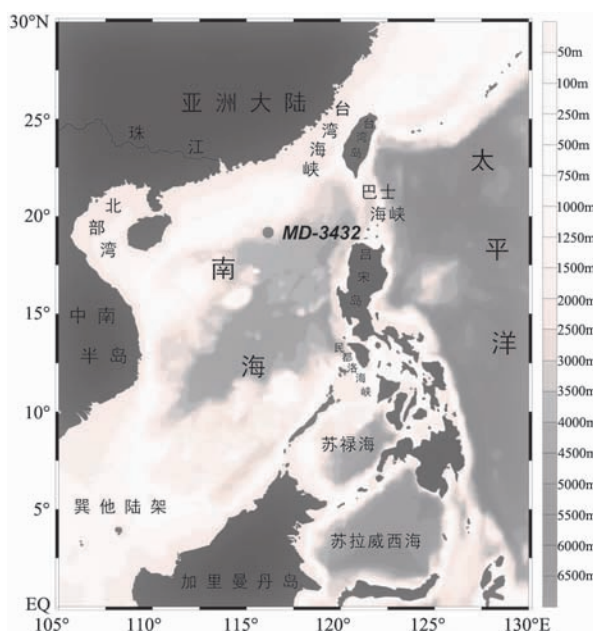


图 1 MD12-3432 站位置图

Fig. 1 The location of MD12-3432

样品处理采用有孔虫分析常规方法, 以 5 cm 间距共取样 1 016 个。对每个样品湿重称量、烘干、干

重称量,在自来水中浸泡 1~2 天,不添加任何化学分散剂。至样品完全散开后,用 250 目的铜筛(孔径 0.063 mm)过筛,并用自来水冲洗至滤液清澈,样品无泥附着。将样品中粒径大于 0.063 mm 的粗组分收集,置于烘箱中低温(50 ℃)烘干、称重,并计算粗组分在干重中的百分含量。

为进行底栖有孔虫丰度分析,对柱状样 0~50.6 m 深度以 20 cm 间隔取样,将 245 个样品的粗组分经 100 目铜筛(孔径 0.154 mm)干筛,对大于 0.154 mm 部分的砂样进行底栖有孔虫数量统计,计算底栖有孔虫在干样中的丰度。

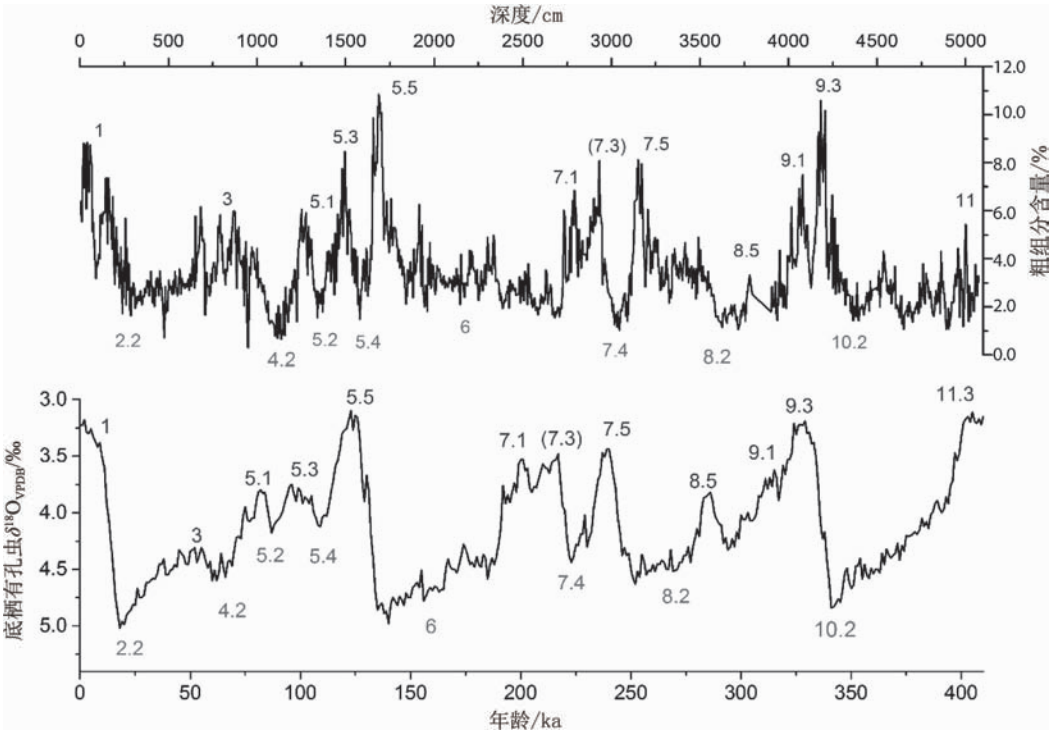
根据 Loeblich 和 Tapan<sup>[7]</sup>的底栖有孔虫分类鉴定标准,在体式显微镜下将上述 245 个样品中的两个内生属 *Uvigerina* (包括 *Uvigerina peregrina*, *Uvigerina hispidocostata*, *Uvigerina proboscidea*), *Bulimina* (包括 *Bulimina aculeate*, *Bulimina mexicana*, *Bulimina alazanensis*) 和一个表生种 *C. wuellerstorfi* 挑出并计数。

本研究主要收集了 MD12-3432 站的粗组分占干重百分比(coarse fraction,%)、底栖有孔虫的丰度(BF,个/g)、*Bulimina*、*Uvigerina* 和 *C. wuellerstorfi* 的百分含量及丰度。为避免由于底栖有孔虫个体数量太少而造成其环境指示意义失真,本研究

在讨论百分含量时去掉了底栖有孔虫少于 30 枚的样品。为了便于进一步对底栖有孔虫进行属种分析,将 *Bulimina* 和 *Uvigerina* 合并为(U+B)。根据对现生的底栖有孔虫的生态学研究,U+B(*Uvigerina* + *Bulimina*)在底栖有孔虫群落中的含量的高值可以用于指示高的有机碳通量和低的底层水含氧量<sup>[8]</sup>; *C. wuellerstorfi* 的百分含量与有机碳通量呈反比关系<sup>[8]</sup>,而与底层水中溶解氧的含量呈正比关系<sup>[9]</sup>。

MD3432 站柱状样的粗组分是沉积物中除去泥沙后剩余的部分,其主要成分为碳酸钙质的有孔虫壳体。因此,不同深度上粗组分的百分含量可以近似认为是沉积物的碳酸钙含量,而沉积物中碳酸盐的含量与表层海水的生产力、陆源碎屑的输入和海水碳酸盐溶解等过程相关。

MD12-3432 站柱样的粗组分百分含量曲线与全球大洋底栖有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  变化曲线 LR04<sup>[10]</sup> 具有较高一致性(图 2),在冰期时较低,在间冰期时较高。一方面,这说明 MD12-3432 站位附近海域在冰期时陆源物质增多明显,在间冰期时表层生产力旺盛;另一方面,这也说明站位附近海域中的碳酸盐溶解循环为“大西洋型”<sup>[2]</sup>,即在冰期碳酸盐溶解作用加强,CCD 上升,间冰期碳酸盐增多,CCD 下降。由于碳酸钙含量曲线与氧同位素曲线的一致性,



数字表示氧同位素地层期次(Marine Isotope Stage, MIS)<sup>[10]</sup>。

图 2 MD12-3432 粗组分含量和 LR04 底栖有孔虫氧同位素曲线<sup>[11]</sup>

Fig. 2 MD12-3432 coarse fraction and LR04 benthic foraminifera oxygen isotope<sup>[11]</sup>

MD12-3432 站的粗组分含量曲线可以用于冰期旋回的划分和对比<sup>[11]</sup>。

本次研究所用 MD12-3432 站的年龄框架是基于柱状样粗组分含量与 LR04 氧同位素曲线<sup>[10]</sup>的形态对比而建立的。通过对两条曲线的相关性对比,可以确定 26 个年龄控制点(表 1),并拟合柱状样不同位置处年龄与深度的关系(图 3)。如图 3 所示,年龄控制点具有良好的线性关系,这说明 MD12-3432 附近海域在 MIS 11 期以来沉积速率大体均匀。对控制点之间的年代序列进行线性内插,可以建立柱状样的年龄框架。线性插值结果显示,柱状样底部年龄约为 405 ka,相当于氧同位素 11 期(MIS 11),柱状样平均沉积速率约为 12.63 cm/ka。本研究在柱状样 1 720 cm 深度处发现了粉红色 *Globigerinoides ruber* (pink) 的末现面<sup>[12]</sup>。根据之前学者对印度洋和太平洋的古海洋学研究,*G. ruber* (pink) 的末现面时间距今约 125 ka<sup>[13-14]</sup>。如图 3 中的菱形所示,这一生物地层学检验点落在年龄控制点的拟合直线附近,因此可以认为本研究选用的年龄控制点合理有效。

表 1 MD12-3432 年龄控制点  
Table 1 MD12-3432 age control points

深度/cm	年龄/ka	深度/cm	年龄/ka	深度/cm	年龄/ka
0	0	1 340.5	87	3 325.5	252
90.5	9	1 495.5	96	3 780.5	286
285.5	18	1 580.5	109	3 935.5	294
475.5	38	1 685.5	123	4 080.5	315
680.5	45	1 840.5	140	4 125.5	317
820.5	53	2 705.5	185	4 180.5	329
865.5	55	2 810.5	205	4 365.5	341
1 145.5	66	2 930.5	217	5 074.5	405
1 275.5	82	3 045.5	223		

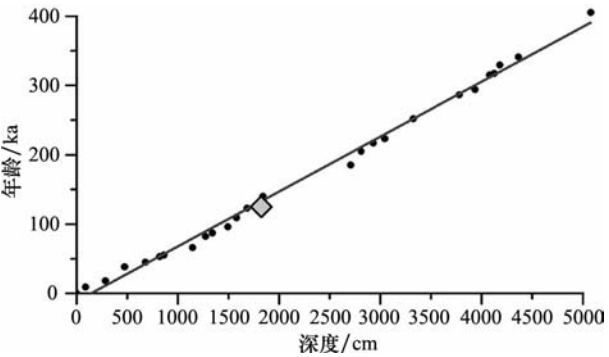


图 3 MD12-3432 年龄控制点散点图以及拟合曲线  
Fig. 3 MD12-3432 age control points and its regression line

3 结果

由于本研究所选取的 MD12-3432 柱状样品的沉积速率基本不变,所以底栖有孔虫丰度随深度变化曲线可以反映底栖有孔虫的生物量随时间的变化,而粗组分的百分含量曲线反映的是钙质有孔虫(包括浮游和底栖)生物量的变化情况。由于浮游和底栖有孔虫的食物来源为生产者在表层海水生产的有机物,因此这两条曲线都可以用来衡量海水初级生产力的大小,但后者在陆源碎屑成分增多的情况下与初级生产力的变化趋势呈相反关系。MD12-3432 站的粗组分和底栖有孔虫丰度的变化趋势基本一致,表现为在氧同位素暖期时,底栖有孔虫的丰度和粗组分的含量都相对较高,亦即暖期时海洋的表层初级生产力较高(图 4)。

将底栖有孔虫丰度和粗组分曲线分别与 U+B 曲线相对比,可以发现,偏好高的有机碳通量和低氧环境的内生种在暖期时占底栖有孔虫的百分含量较高(图 4)。在 MIS 3 期约 53 ka 年龄处,U+B 的百分含量高达 48.06%,相对应的 BF 丰度 53 个/g 为 405 ka 以来的最高值(图 4)。然而,此时粗组分含量为低值 2.92%,说明此时伴随生产力增加的还有陆源碎屑。虽然陆源成分的加入“稀释”了碳酸钙质有孔虫的含量,但这也是表层生产力勃发的一个重要原因。

通过对比 U+B 和 *C. wuellerstorfi* 的曲线可以发现,两条曲线在趋势上具有相反的波动特征。在 MIS 5 期初约 125 ka 年龄处,*C. wuellerstorfi* 含量为 MIS 11 期以来的最高值 19.44%,而 U+B 含量和 BF 丰度均为局部的低值,分别为 16.67%和 17.14 个/g,相对应的粗组分的含量为局部高值 10.09%。说明此时陆源物质输入较少,初级生产力水平偏低。在 MIS 5、7、9 和 11 期的初期,*C. wuellerstorfi* 含量偏高,即在 U+B 含量和 BF 丰度指示的初级生产力从低向高过渡的时期,*C. wuellerstorfi* 含量的增加与 U+B 含量的相对降低同时存在。对于这一现象的一种可能的解释是:在刚刚进入间冰期时,海水中营养物质并不丰富,但较为适宜的环境使得作为低生产力指标的 *C. wuellerstorfi* 百分含量明显上升。从粗组分含量的高值可以看出此时陆源输入的营养物质的减少,这也可能是温暖的 MIS 5 期开始时初级生产力较低的一个原因。

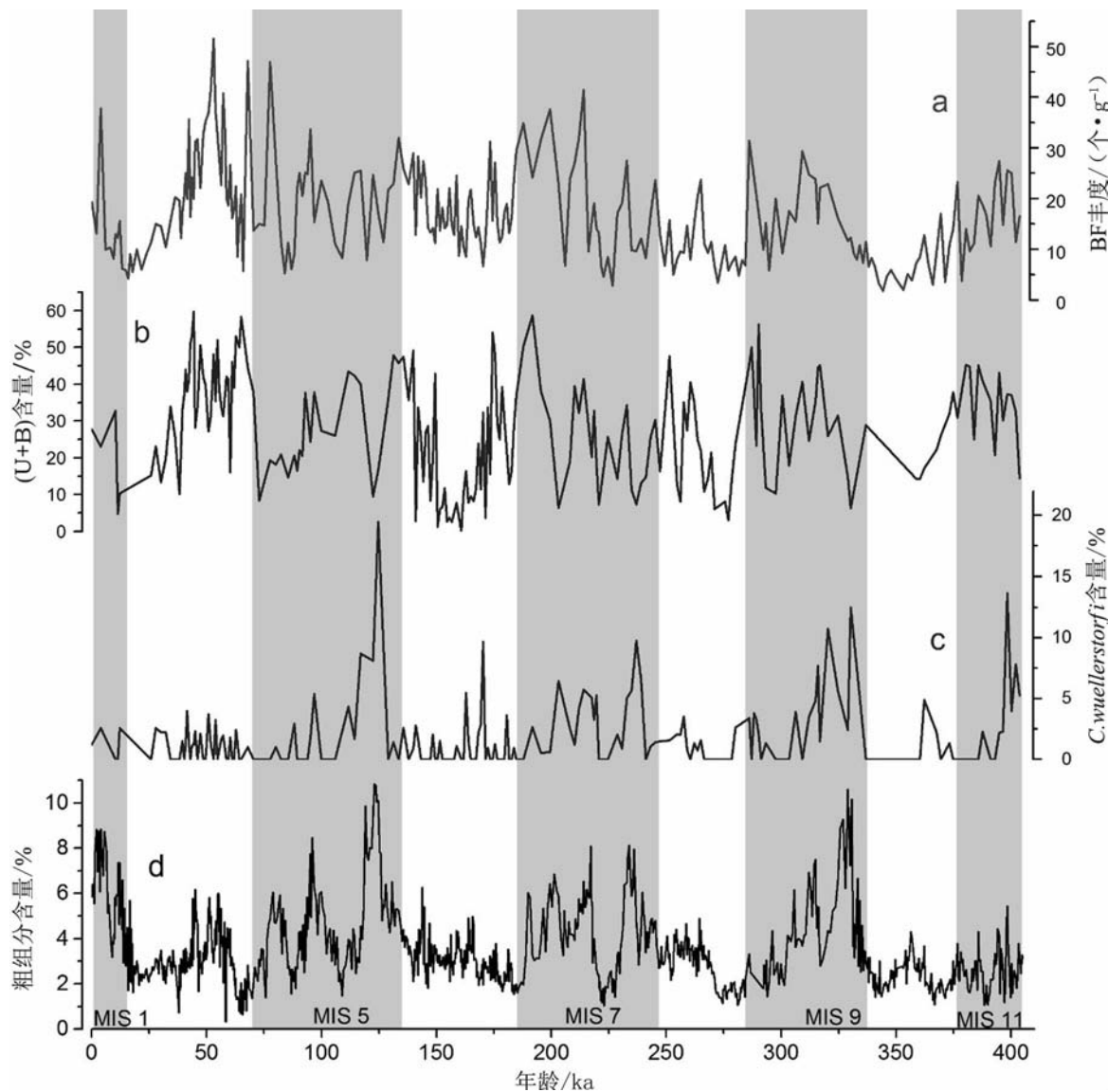


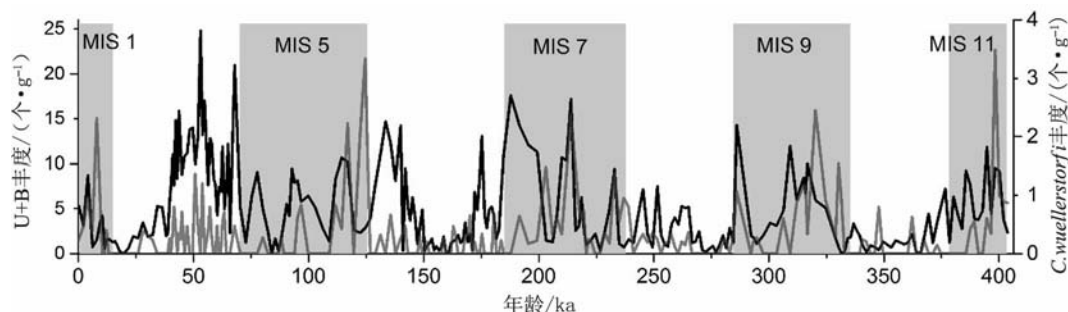
图4 MD12-3432 底栖有孔虫丰度(a)、U+B含量(b)、*C. wuellerstorfi*含量(c)和粗组分含量(d)  
Fig.4 MD12-3432 BF abundance(a), U+B(b), *C. wuellerstorfi*(c) and coarse fraction(d)

细致对比 U+B 和 *C. wuellerstorfi* 百分含量的曲线可以发现,在 MIS 7 期约 192~244 ka 年龄段内,分别反映高/低生产力的这两条曲线具有一致的变化趋势。这说明在这一时间段中具有高生产力偏好的属种与低生产力偏好的属种都相对勃发,而且综合粗组分和底栖有孔虫丰度的曲线看,此时海洋的初级生产力也处于高值(图 4)。因此,为了解释气候温暖时期表生种百分含量增高的现象,需要考虑另一个影响底栖有孔虫属种丰度的重要因素——海水中的溶解氧含量。

为了减小底栖有孔虫的低生物量对底栖有孔虫百分含量的“放大效应”,对比了 U+B 和 *C. wuellerstorfi* 丰度的曲线(图 5)。U+B 和 *C. wuellerstorfi*

的丰度在 0~200 ka 年龄,相当于 MIS 7 期至今都具有明显的相反的波动趋势。在约 53 ka 处,U+B 达到最大丰度 24.8 个/g,而 *C. wuellerstorfi* 的丰度为 0 个/g;在约 125 ka 年龄处,*C. wuellerstorfi* 达到最大丰度 3.33 个/g,而 U+B 为局部的低值 2.86 个/g。但在 200~320 ka 这个年龄段内,两条曲线具有相似的变化规律,之前之后均为相反的波动趋势(图 5)。这说明由于生产力高低偏好不同而具有不同丰度波动特征的底栖有孔虫属种,可能因为深海溶解氧含量的增加而具有局部相似的波动特征。这个现象的一个可能的原因是:在 MIS 7 期中和 MIS 9 期初,较高溶解氧含量的底层水进入南海北部,使得偏好低有机碳通量的 *C. wuellerstorfi* 在干样中的丰度上升。



图5 MD12-3432 站位 U+B 丰度(黑色)与 *C. wuellerstorfi* 丰度(灰色)Fig. 5 MD12-3432 U+B abundance (black) and *C. wuellerstorfi* abundance (grey)

## 4 讨论

南海位于东亚季风区内,在冬季主要受到来自东北方向的冬季风影响,在夏季主要受到来自西南方向的夏季风影响。与南亚季风的情形不同,东亚季风中的冬季风对南海影响十分显著,强大的冬季风主要作用于南海南-北的生产力梯度以及表层海水温度梯度<sup>[15]</sup>。东亚夏季风是东亚地区降雨的主要来源,并进一步影响着地区内的植被分布、风化作用、沉积作用以及边缘海中表层生产力的分布情况<sup>[16]</sup>。陆源碎屑是海洋初级生产者的主要营养物质来源,而东亚季风对于陆源物质向南海的输入主要作用于两个方面:其一是温暖湿润的夏季风会带来较多降雨,使得由河流注入的陆源营养物质增多;其二是寒冷干燥的冬季风会将更多细粒黏土级的风尘带到南海并沉降下来<sup>[17]</sup>。因此,冬、夏两季的季风的增强,都会使陆源物质在南海的沉积增加,表层生产力上升。

为研究同时期降雨量对南海北部初级生产力的影响,本研究参考了能指示东亚中-低纬地区降雨强度的中国石笋氧同位素的数据。石笋中的  $\delta^{18}\text{O}$  与大气降水具有分馏平衡:当低纬度地区降雨量大时,其  $\delta^{18}\text{O}$  变轻;反之亦然<sup>[18]</sup>。中国南方石笋中  $\delta^{18}\text{O}$  的记录<sup>[19-21]</sup> 具有明显的 20 ka 轨道周期,其波动规律与 MD12-3432 站位的底栖有孔虫丰度和 U+B 含量相似(图 6)。这说明东亚中-低纬度地区的降雨量对南海北部的生产力具有明显的影响。

为讨论东亚季风对降雨量的影响,本研究选取了能指示东亚夏季风强度的黄土的磁化率和能指示东亚冬季风强度的黄土中石英颗粒大小<sup>[22]</sup>,将它们分别与中国石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  曲线对比(图 6)。从黄土磁化率曲线上可以看出,在间冰期时黄土的磁化率

较高,说明夏季风较强;冰期时反之。从黄土石英颗粒大小变化曲线中可以看出,冰期时石英平均粒度较大,说明冬季风较强,间冰期时反之<sup>[22]</sup>,但依然具有近似 20 ka 的波动周期。对比黄土磁化率曲线与石笋中氧同位素记录可以发现,在间冰期时,石笋曲线与黄土磁化率曲线的变化规律一致;在冰期时,尽管夏季风明显减弱但降雨平均强度并没有明显减少,依然具有 20 ka 周期的波动特征。对比黄土石英颗粒大小的变化曲线与石笋氧同位素变化曲线可以发现,无论在冰期还是在间冰期,两条曲线的波动趋势相反,即冬季风强时降水强度弱,反之亦然。总之,东亚季风中的夏季风在间冰期时的强度较大,在冰期时强度明显减弱;而冬季风反之。在对东亚中-低纬度地区降雨量的影响方面,在间冰期,夏季风越强降雨量越大;在冰期,冬季风越强降雨量越小。

由于所有的古生产力指标都存在明显的不确定性,因此在进行古生产力变化的特征讨论时一般需要对多指标进行对比分析<sup>[23]</sup>。ODP 1146 站采样位置(19°27.40'N, 116°16.37'E, 水深 2 092 m)位于 MD12-3432 柱状样西北部,两站位距离接近、深度相近且都在南海北部陆坡上,所以可以参考 ODP 1146 站的古生产力指标,用以佐证 BF 丰度和 U+B 百分含量曲线所指示的古生产力演化特征。海洋中 Ba 元素主要来源于河流输送的陆源物质,并主要通过生物作用以有机物质中的重晶石形式沉降到沉积物表面。因此,生物成因 Ba 元素的通量是衡量海洋生产力常用的地球化学指标,当海洋生产力繁盛时,生物成因 Ba 的通量就会增高<sup>[24]</sup>。对比 ODP 1146 的生物成因 Ba 通量<sup>[25]</sup> 和 MD12-3432 的 U+B 含量和 BF 丰度曲线可以发现,这三条曲线具有一致的变化趋势,即在冰期时显示表层初级生产力明显低于间冰期(图 6)。

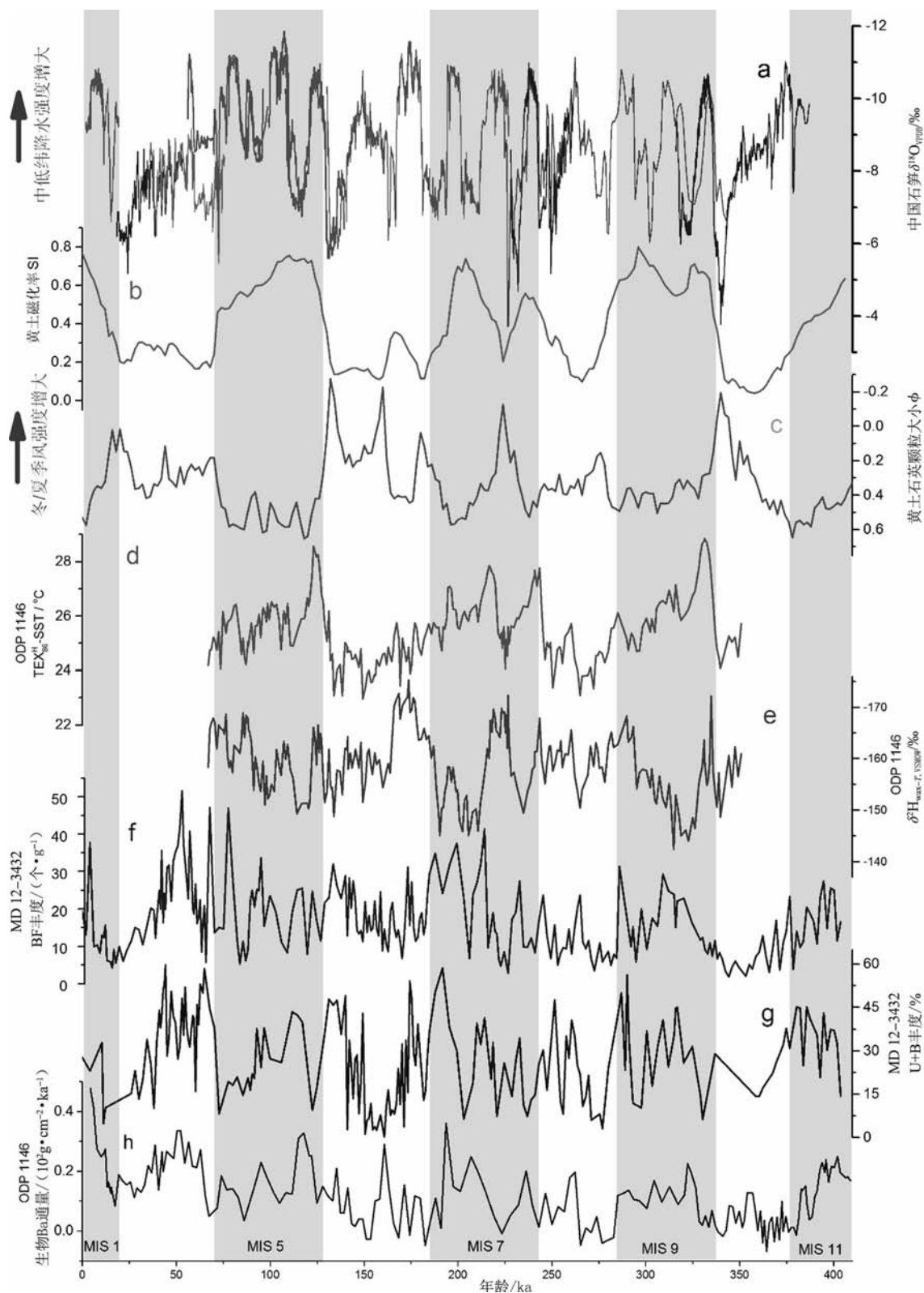


图6 中国石笋  $\delta^{18}\text{O}$ (a)<sup>[19-21]</sup>、中国黄土磁化率及石英颗粒大小(b和c)<sup>[22]</sup>、ODP 1146  $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST 及  $\delta^2\text{H}_{\text{wax-T}}$ (d和e)<sup>[26]</sup>、MD12-3432 BF 与 U+B 丰度及 ODP 1146 生物成因 Ba 通量(f—h)<sup>[25]</sup>

Fig. 6  $\delta^{18}\text{O}$  of Chinese speleothem(a)<sup>[19-21]</sup>; Chinese loess magnetic susceptibility and quartz grain size(b and c)<sup>[22]</sup>; ODP 1146  $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST and  $\delta^2\text{H}_{\text{wax-T}}$ (d and e)<sup>[26]</sup>;MD12-3432 BF and U+B abundance, and ODP 1146 biogenic Ba flux(f—h)<sup>[25]</sup>

如前所述, 南海北部初级生产力的增加与降雨量的增加相关。结合黄土中季风强度的变化曲线(图 6)可以看出, 在夏季风强、冬季风弱的 MIS 5、MIS 7 和 MIS 9 三个暖期, 降雨量与初级生产力都较高; 在夏季风弱、冬季风强的 MIS 6、MIS 8 和 MIS 10 三个冷期时, 降雨量持续波动, 但初级生产力低于间冰期时。值得注意的是, 在 MIS 3 期, 黄土磁化率记录的夏季风强度并没有明显增加, 但冬季风的强度有两个高峰; 同时 BF 丰度和 U+B 的百分含量都出现明显的高值, 这说明冬季风可能是这一时期初级生产力增加的主要原因。在 MIS 3 期这个冰期中较暖的时期内, 底栖有孔虫反映出的初级生产力的高值, 甚至超过了其前一个间冰期——MIS 5 期, 而与 MIS 7 期和 MIS 9 期的初级生产力水平相当。这一情况在 ODP1146 的生物成因 Ba 中也有明显的体现(图 6)。底栖有孔虫对初级生产力的这一响应是因为 MIS 3 期的生产力过高, 还是 MIS 5 期的生产力过低, 抑或是当时冬季风的增强在南海北部引发的上升流使局部海域中的生产力勃发, 值得进一步的研究。

ODP 1146 柱状样的  $\delta^2\text{H}_{\text{wax-T}}$  是将表层海水温度  $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST (Sea Surface Temperature, SST) 的影响从叶蜡氢同位素组成  $\delta^2\text{H}_{\text{wax}}$  中减去得到的, 可以作为大气降水中氢同位素组成  $\delta^2\text{H}$  的替代指标<sup>[26]</sup>。Thomas 等<sup>[26]</sup>发现在南海北部, 当夏季太阳辐射最高时,  $\delta^2\text{H}_{\text{wax-T}}$  变轻; 而且与通常用作降雨量指标的中国石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  不同,  $\delta^2\text{H}_{\text{wax-T}}$  受全球冰量周期的影响小, 受北半球太阳辐射量周期影响较大。南海北部降水量、表层海水温度和代表初级生产力水平的生物成因 Ba 通量、U+B 和 BF 丰度曲线(图 6 中曲线 d—h) 对比显示, 在 67~350 ka B. P. 这段时期, 这几项古环境指标的变化趋势基本一致(图 6)。在 MIS 5、MIS 7 和 MIS 9 三个暖期, 夏季太阳辐射量增强时, 表层海水升温, 南海北部降水量增加伴随着初级生产力的上升。在 MIS 6 和 MIS 8 两个冷期, 南海北部  $\delta^2\text{H}_{\text{wax-T}}$  偏轻且持续波动, 与指示高生产力的 U+B 曲线相对比其振幅较小, 但两条曲线的波动趋势基本一致。这说明此时明显减弱的东亚夏季风带来的降水的源区水蒸气本身  $\delta^2\text{H}_{\text{wax-T}}$  偏轻, 降水量的变化对于表层初级生产力的影响与暖期相同, 即降水量越大, 生产力增加。

之前对于南海北部第四纪以来古生产力的研究主要考察蛋白石含量和堆积速率的变化。现代海洋

调查的结果表明, 在南海中部, 冬/夏季风是影响和控制南海蛋白石颗粒通量和初级生产力变化的主要因素, 一年中冬/夏季风盛行的月份中蛋白石的通量和初级生产力都会明显增加<sup>[27]</sup>。由于蛋白石通量/颗粒总通量与有机碳通量和初级生产力之间存在较高相关性, 因此可以作为表层生产力的替代指标<sup>[28]</sup>。MIS 11 期以来, 南海北部的 ODP 1144、1145、1146 和 1148 站柱状样的生源蛋白石通量和堆积速率的数据表明, 在这段时间内, 初级生产力的变化较之前剧烈, 并且具有冰期高、间冰期低的普遍特征<sup>[28]</sup>。对于这一现象的一个可能解释是, 在南海北部, 冰期时海平面下降, 强大的冬季风将距离海岸更近的陆地上的营养物质更多地带入海中, 导致初级生产力增强; 在间冰期, 海平面的上升使得陆地与海岸的距离增大, 使河流搬运的陆源物质难以到达研究站位, 河流搬运作用不能对生产力的变化产生明显影响<sup>[17, 28]</sup>。王汝建等<sup>[28]</sup>在南海北部基于硅质蛋白石记录的古生产力变化与本文中南海北部 MD12-3432 站和 ODP 1146 站柱状样基于钙质有孔虫和生物成因 Ba 指标的古生产力变化的趋势不同。因此, 在南海北部不同古生产力指标之间产生差异的原因是采样分辨率不同、指标本身对于海水营养成分变化的响应机制不同还是古生产力波动特征具有独立的亚轨道周期, 值得进一步研究。

## 5 结论

通过对比 MD12-3432 站位中 U+B 含量和 *C. wuellerstorfi* 含量的变化发现, 两条曲线具有相反的波动特征。偏好低有机碳通量和高含氧量的 *C. wuellerstorfi* 在冷期时的含量较暖期时有明显增高, 而 U+B 的含量反之。在 200~320 ka B. P. 这个时间段内, U+B 丰度和 *C. wuellerstorfi* 丰度两条曲线具有相似的变化规律, 之前之后均为相反的波动趋势。基于 TROX 模型的假设, 这说明由于生产力高低偏好不同而具有不同丰度波动特征的底栖有孔虫属种, 可能因为深海溶解氧含量的增加而具有局部相似的波动特征, 即在 MIS 7 期中和 MIS 9 期初这段时间内在南海北部较高含氧量的底层水的进入, 使得偏好低有机碳通量的 *C. wuellerstorfi* 在干样中的丰度相对上升。

MIS 11 期至今, 中国石笋的氧同位素记录与指示高生产力的 U+B 百分含量曲线有基本一致的变化趋势, 这说明在这段时期内, 季风引起的降水带来



的陆源物质供给可能是初级生产力的主要影响因素。通过对比 ODP1146 的生物成因 Ba 通量、MD3432 的 U+B 含量和 BF 丰度三条曲线可以发现, 这三条曲线具有十分一致的变化趋势。将这 3 条曲线与指示东亚夏季风强度的黄土磁化率曲线及指示东亚冬季风强度的黄土高原石英颗粒大小变化曲线相对比, 结合能代表降水强度的 ODP 1146 柱状样的  $\delta^2\text{H}_{\text{wax-T}}$  可发现: 在本研究的时间范围内, MIS 5、MIS 7 和 MIS 9 三个暖期时南海北部表层初级生产力的升高可能与夏季风的增强引起的降雨量的增加有关; 而 MIS 3 期时表层生产力的升高与冬季风的增强引起的风尘搬运的增加有关。

感谢为本研究提供样品的中法合作-CIRCEA 项目以及“Marion Dufresne”研究船上的科学家和工作人员。感谢同济大学的成鑫荣研究员和党皓文博士为本文写作提出的宝贵意见。

## 参考文献

- [1] Wang P, Li Q. The South China Sea: Paleooceanography and Sedimentology[M]. Amsterdam: Springer, 2009: 204.
- [2] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 十三万年来南海北部陆坡的浮游有孔虫及其古海洋学意义[J]. 地质学报, 1986(3): 215-225.
- [3] Corliss B H. Microhabitats of benthic foraminifera within deep-sea sediments[J]. Nature, 1985, 314: 435-438.
- [4] 张江勇, 汪品先. 深海研究中的底栖有孔虫: 回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2004(4): 545-551.
- [5] Jorissen F J, de Stigter H C, Widmark J G V. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats[J]. Marine Micropaleontology, 1995, 26: 3-15.
- [6] Kaiho K. Benthic foraminiferal dissolved-oxygen index and dissolved-oxygen levels in the modern ocean[J]. Geology, 1994, 22(8): 719-722.
- [7] Loeblich A R. Foraminiferal Genera and Their Classification [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1988: 970.
- [8] 翦知湣, 王律江, Kienast M. 南海晚第四纪表层古生产力与东亚季风变迁[J]. 第四纪研究, 1999(1): 32-40.
- [9] Kaiho K. Effect of organic carbon flux and dissolved oxygen on the benthic foraminiferal oxygen index (BFOI) [J]. Marine Micropaleontology, 1999, 37(1): 67-76.
- [10] Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300000-year chronostratigraphy[J]. Quaternary Research, 1987, 27(1): 1-29.
- [11] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records[J]. Paleooceanography, 2005, 20(1): PA1003.
- [12] 贾文博. 南海 MD190 航次 3432 站末次间冰期以来的底栖有孔虫含量变化[D]. 北京: 北京大学, 2014: 10.
- [13] Thompson P R, Be A W H, Duplessy J C, et al. Disappearance of pink-pigmented Globigerinoides ruber at 120000 yr BP in the Indian and Pacific Oceans[J]. Nature, 1979, 280: 554-558.
- [14] Sarnthein M, Sadatzki H, Jian Z. Stratigraphic gaps at northern South China Sea margin reflect changes in Pacific deepwater inflow at glacial Termination II[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 56(10): 1748-1758.
- [15] Wang P, Li Q, Tian J. Pleistocene paleoceanography of the South China Sea: Progress over the past 20 years[J]. Marine Geology, 2014, 352: 381-396.
- [16] 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[J]. 科学通报, 2005(1): 48-52.
- [17] Wang L, 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.
- [18] Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(1/2): 71-86.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, et al. Ice Age Terminations[J]. Science, 2009, 326: 248-252.
- [22] Sun Y, Clemens S C, An Z, et al. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(1/2): 33-48.
- [23] Averty K B, Paytan A. A comparison of multiple proxies for export production in the equatorial Pacific[J]. Paleooceanography, 2004, 19(4): PA4003.
- [24] Schoepfer S D, Shen J, Wei H, et al. Total organic carbon, organic phosphorus, and biogenic barium fluxes as proxies for paleomarine productivity[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 149: 23-52.
- [25] Clemens S C, Prell W L, Sun Y, et al. Southern hemisphere forcing of Pliocene  $\delta^{18}\text{O}$  and the evolution of Indo-Asian monsoons[J]. Paleooceanography, 2008, 23(4): PA4210.
- [26] Thomas E K, Clemens S C, Prell W L, et al. Temperature and leaf wax  $\delta^2\text{H}$  records demonstrate seasonal and regional controls on Asian monsoon proxies[J]. Geology, 2014, 42(12): 1075-1078.
- [27] 陈荣华, 郑玉龙, Wiener M G, 等. 1993—1996 年南海中部海洋沉降颗粒通量的季节和年际变化[J]. 海洋学报, 2006(3): 72-80.
- [28] 王汝建, 翦知湣, 肖文申, 等. 南海第四纪的生源蛋白石记录: 与东亚季风、全球冰量和轨道驱动的联系[J]. 中国科学: D 辑, 2007(4): 521-533.