

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018031601

140kaBP 以来南海西南部上升流影响区沉积记录及其古海洋环境变化

邹杨浩^{1,2}, 冉莉华², Martin G Wiesner³, 刘飞^{1,2}, 梁文², 陈建芳², 刘连文¹

1. 南京大学地球科学与工程学院, 表生地球化学教育部重点实验室, 南京 210023

2. 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 杭州 310012

3. Institut für Biogeochemie und Meereschemie, Universität Hamburg, Bundesstrasse 55, D-20146 Hamburg

摘要:对南海西南部现代上升流区沉积物柱样 BIS-187-61 孔有机碳、生物蛋白石、碳酸盐等各沉积组分进行了详细的分析, 试图探讨末次间冰期(MIS 5)以来南海西南部夏季上升流影响区沉积过程及其所反映的海洋环境变化过程。研究发现, 140kaBP 以来该孔沉积记录期总体表现为: 碳酸盐百分含量冰期低间冰期高, 主要受周边陆源物质输入稀释的控制, 为典型的“大西洋型碳酸盐旋回”, 有机碳、生物蛋白石、碳酸钙以及陆源沉积物的堆积速率均在 MIS 2 期、MIS 4 期和 MIS 5e 期出现高值。其中, MIS 2 期和 MIS 4 期生源和陆源沉积堆积速率增加可能与冰期时冬季风增强及海平面下降导致陆源营养物质输入增加对初级生产力的刺激有关, 也可能与陆源物质输入增加对海洋生源颗粒物输出的压载作用增强有关。而 MIS 5e 期南海海平面高度与现代相仿, 间冰期较强的夏季风引起的越南沿岸上升流增强是导致该时段本研究区域表层初级生产力增强, 沉积物总堆积速率及各组分堆积速率都相应增加的主要原因。

关键词: 上升流; 生源沉积; 陆源输入; 末次间冰期以来; 南海

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Sediment records and their paleoceanographic implications in the upwelling area of the southwestern South China Sea during the last 140,000 years

ZOU Yanghao^{1,2}, RAN Lihua², Martin G Wiesner³, LIU Fei^{1,2}, LIANG Wen², CHEN Jianfang², LIU Lianwen¹

1. Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry Of Education, School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, Ministry of Land Resources, Hangzhou 310012, China

3. Institut für Biogeochemie und Meereschemie, Universität Hamburg, Bundesstrasse 55, D-20146 Hamburg, Germany

Abstract: Main sediment components in the modern upwelling area of the southwestern South China Sea during the last 140,000 years were analyzed for a gravity core retrieved by the SONNE 187 cruise in 2006, aiming to reveal the marine environmental changes in the southwestern South China Sea since the last interglacial. During the last 140,000 years, the mass percent of carbonate was generally high in interglacial but low in glacial periods, as the typical “Atlantic type of carbonate”, suggesting strong influences of the terrestrial input in the southwestern South China Sea. Relatively high accumulation rate of organic carbon, biogenic opal and lithogenic components was found in MIS 2 and MIS 4, related to the enhanced primary productivity provoked by the increase in terrestrial input nutrients, as a result of strengthened winter monsoon and the decline of sea level during the ice age; It might also be related to the enhanced ballast effect of the lithogenic matters of sinking particles during the ice age. At the peak of the last interglacial period (MIS 5e), strengthened upwelling off Vietnam coast induced by stronger summer monsoon was responsible for the increase in primary productivity and accumulation of both biogenic and lithogenic sediments.

Key words: upwelling; biogenic sediment; terrestrial input; Last Interglacial period; South China Sea

资助项目: 重点研发计划“海洋微生物碳泵与生物泵的互作过程与储碳机制”(2016YFA0601101); 国家自然科学基金“南海北部‘生物泵’全深度锚系观测及调控机制研究”(91128212), “南海北部和中部沉积物捕获器中的硅藻记录及其古海洋学意义”(41006034); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务专项资金项目“2015—2016 年厄尔尼诺对南海北部硅藻的影响”(JT1401)

作者简介: 邹杨浩(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事古海洋生物地球化学研究, E-mail: zouyh@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 冉莉华(1982—), 女, 副研究员, 从事海洋微体古生物和生物地球化学研究, E-mail: lihuan@sio.org.cn

收稿日期: 2018-03-16; **改回日期:** 2018-09-28. 蔡秋蓉编辑

南海位于亚欧大陆和太平洋之间,东临太平洋暖池,西近青藏高原,是西太平洋上最大的边缘海,独特的地理位置决定了南海对环境气候变化的高敏感性,使其成为古海洋学研究的热点区域^[1]。

由于处于典型的亚洲季风影响区,南海的气候和表层环流格局受东亚季风影响,具有季节性反转的季风环流。冬季在东北季风的驱动下,南海形成海盆尺度的气旋式表层环流,夏季在西南季风的作用下,则在南海南部形成反气旋式表层环流^[2,3]。在季风的影响下,冬季在南海东北部的吕宋岸外,南部巽他陆坡海域,以及夏季在越南岸外发育了强烈的季节性上升流^[4,5]。季节性改变的环流结构及上升流发育使南海上层水体物理化学环境有着显著的季节变化和空间差异,从而强烈影响表层海洋生态系统,包括海洋初级生产力及生物群落结构等,例如夏季风导致的南海西部越南岸外上升流为表层水体带来了丰富的营养盐,促进浮游植物的生长,大大提高上层海洋初级生产力。

已有研究表明,在过去的冰期间冰期旋回中,东亚季风的强度和结构都有着显著的变化,主要表现在冰期时东亚冬季风增强,而间冰期时东亚夏季风强度增加^[6,7]。东亚季风的变化必然导致南海海洋环境的显著变化,此外冰期间冰期旋回过程中全球海平面的变化则导致南海地貌结构的变化,尤其是南海南部巽他陆架在冰期时出露^[8],对整个南海表层环流及海盆区物质来源都有着巨大影响。

由于邻近东亚大陆,南海深海沉积物中生物成因的沉积物含量相对于陆源物质含量较低,但其丰度和组成变化可更直观的反映过去上层海洋环境,尤其是海洋初级生产力的变化情况^[9],因而受到古海洋学家的普遍关注。其中生物蛋白石主要来源于硅藻、放射虫等硅质生物细胞壁或骨骼,沉积物中其相对含量及堆积速率作为古海洋表层生产力的指标之一被广泛应用于各大洋^[10,11]。此外,浮游植物通过一系列生物化学作用将二氧化碳等无机碳转化为有机碳或生物骨骼,随后输出至深海并埋藏于深海沉积物中,因此,深海沉积物中有机碳和碳酸钙沉积不仅可以反映过去海洋生产力及海洋环境变化,也是地质历史上海洋碳循环研究的重要环节。

在过去几十年的多项国际合作科学考察航次中虽然取得了许多高质量的岩心,提供了新生代以来的连续深海沉积序列,在东亚古季风演变、古环境演化等领域取得重大进展^[12-15],但是前人对深海沉积物的沉积组分及堆积过程研究还不够全面,多聚焦于一种或者几种成分的变化,如陆源物质不同矿物

的来源变化^[16,17]、碳酸盐的旋回变化^[12,18]、有机质含量的变化^[18,19],整体上对各组分系统研究比较少见^[20,21]。另一方面,以往研究主要集中在南海北部^[22-24],对南海西部现代上升流区涉及较少,本文拟通过分析南海西南部越南岸外现代上升流影响区所采集的柱状沉积物样品中沉积物组成及堆积速率的变化,恢复 140kaBP 以来南海西南部上层海洋生产力及沉积物来源变化,并以此探讨末次间冰期以来东亚季风及海平面变化对南海西南部海洋环境的影响。

1 材料与方法

1.1 样品材料

本研究中沉积物样品来自 2006 年德国“太阳号”科考船第 187 航次在南海西南部采集的一个直径 12cm 的重力柱状样,采样站位号为 BIS-187-61,位于 11°25.5'N、111°17.0'E(图 1),水深为 2226m,柱样长度 927cm。柱状心样岩性单一,为灰绿色粉砂质泥,无明显浊流沉积。用于沉积物组分分析的样品采样间距为 10cm,共分析样品 91 个。

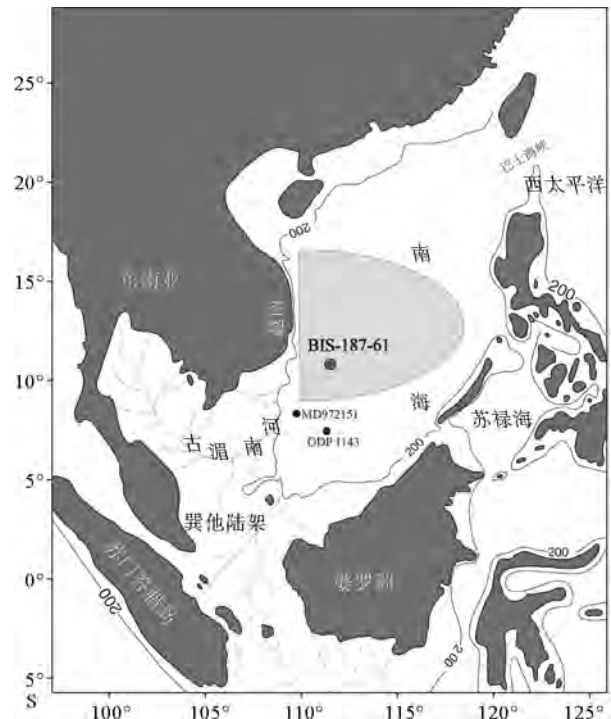


图 1 沉积物柱样 BIS-187-61 站位图

Fig. 1 Location of the sediment core BIS-187-61 in the southwestern South China Sea

1.2 沉积物生物硅的测定

本文采用连续提取法来测定沉积物样品中生物硅的含量,样品的取样量和提取液的固液比值采用 1.25g/L(不存在明显的吸附损失);提取液采用 2 mol/L 的 Na_2CO_3 溶液,以保证较高生物硅含量样品的完全提取;另外采用外推法校正非生物硅的干扰^[12,13]。具体实验步骤如下:将采集的沉积物样品冷冻(-50℃)干燥,室温下平衡后,取 150mg 左右样品轻轻研磨至 200 目左右,烘干后室温下平衡后待用。称取 100mg 样品置于离心管中,加入 5mL 10%的 H_2O_2 ,超声 0.5h 后再加入 1mol/L 的 HCl 超声 0.5h,静置 2h。加入 20mL 超纯水,4000r/min 离心 5min 后去除上清液,如此反复直至溶液呈中性。将上述处理好的样品置于 102℃ 烘箱中烘干 2h。加入 40mL 2mol/L 的 Na_2CO_3 超声 5min 后置于 85℃ 水浴中加热提取生物硅。每隔 1h 用移液枪取 1mL 提取液后混入 0.1mL 酸性钼酸铵溶液后加入到石英比色管中在 TU-1810 型紫外可见分光光度计(吸收峰为 650nm,检出限 10^{-8} g)测量吸光值,并根据标准曲线利用回归方程计算得到生物硅含量(系统误差小于 2%)。

计算生物蛋白石百分含量时,需要确定生物硅分子式 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 中 n 的数值,生物硅的含水率取决于硅质生物的类型与沉积年龄^[14],对于年龄小于 30Ma 的硅藻生物硅平均含水率为 10%^[15],即生物硅分子式为 $\text{SiO}_2 \cdot 0.4\text{H}_2\text{O}$,此次研究采用 opal% 表示生物硅的含量。

1.3 有机碳和碳酸盐含量的测定

根据汪品先等^[12]采用的方法,将采集的沉积物样品冷冻干燥放入干燥器平衡后,取部分样品研磨至 200 目,称取约 100mg 用 1N 盐酸去除碳酸盐,至完全反应后静置 24h,反复多次用纯水洗至中性,烘干称量后将样品研磨粉碎后放入干燥器平衡 24h。另称取 3mg 左右研磨过的原始样品和上述去除碳酸盐后的样品同时在有机元素仪(ThermoQuest Italia.S.P.A)上进行总碳(TC)和有机碳(TOC)的分析(数据误差小于 0.2%),碳酸盐的含量是由总碳和有机碳含量之间的差值计算而来。陆源物质的含量用公式^[24](1)计算:

陆源物质百分含量 = 1 - 碳酸盐百分含量 - 生物蛋白石百分含量 - 有机质百分含量 (1.8 × 有机碳百分含量) (1)

1.4 沉积物干密度测定

在基尔大学岩心库中,对 BIS-187-61 孔每隔 5cm 定量取 2cm³ 的湿样,冷冻干燥后精确称量(精确到 0.00001g, Sartorius CPA225D),计算所得质量体积比为沉积物样品干密度(DBD, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

1.5 钻孔年龄框架确定

本研究的年龄框架主要依据 BIS-187-61 柱样中浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 壳体的氧同位素值(数据由 Martin G Wiesner 提供)与 SPEC-MAP stack 氧同位素曲线^[16]的对比来确定,采用“峰对峰、谷对谷、冰期-间冰期界限位于氧同位素曲线变化最快处”的形态对比法确定了本钻孔主要的年龄拐点(图 2)。此外,本文通过对比本钻孔与邻近海域已发表的 MD972151 孔^[23](8°43.73'N、109°52.17'E,水深 1598m)(图 1)的碳酸盐百分含量^[18,19],来进一步确定更为精细的年代框架。根据定年结果,BIS-187-61 钻孔记录了约 140ka 以来,暨涵盖了末次间冰期(MIS 5 期)以来南海西南部海洋环境的变化信息。

1.6 各沉积组分堆积速率的计算

为了量化展示出每个沉积组分真实变化情况,而避免百分比数据明显的反相关关系,本文计算了每个组分的堆积速率(Mass Accumulation Rate MAR, $\text{mg} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{ka}^{-1}$)。根据钻孔年代框架及采样深度,计算可得该沉积柱样不同时期的线性沉积速率(Sedimentation Rate (SR), $\text{cm} \cdot \text{ka}^{-1}$),在此基础上 MAR 使用公式(2)求得:

$$\text{MAR} = 1000 \times \text{wt.}\% \times \text{DBD} \times \text{SR} \quad (2)$$

其中 wt.% 代表每个组分的质量百分比。

2 结果

2.1 沉积物堆积速率

如图 3a 所示,在约 19~29、65~71 以及 120kaBP,研究区海域有较高的线性沉积速率。该柱样沉积物干密度变化范围较小,为 0.6~0.9 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。在此基础上,计算所得总的沉积物堆积速率与线性沉积速率变化基本保持一致,总体上表现为冰期(MIS 2 和 MIS 4 期)高、间冰期(MIS 1, MIS 3 和 MIS 5 期)低的特点。

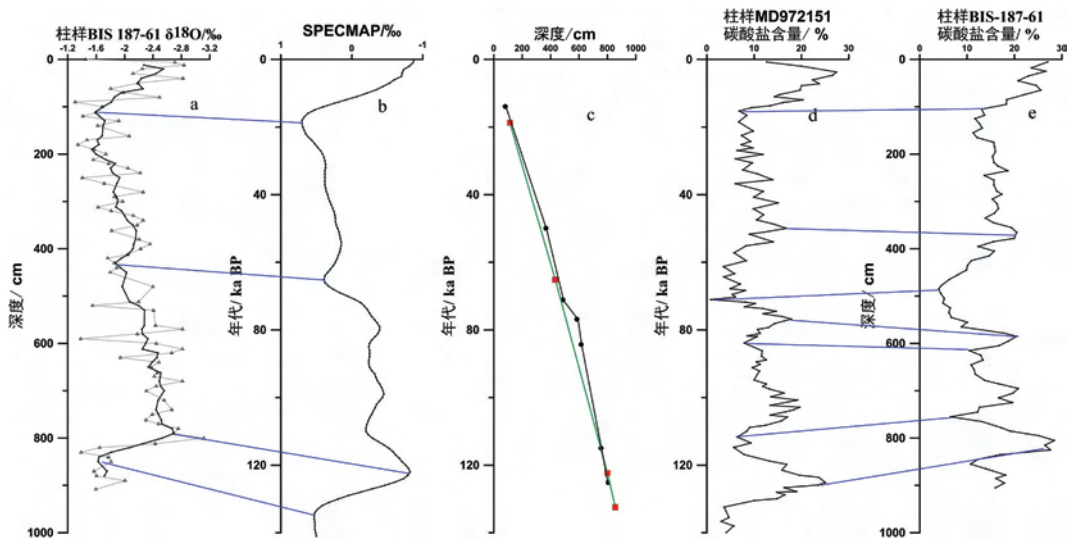


图2 柱状样 BIS-187-61 的年龄框架

a:柱状样 BIS-187-61 *Globigerinoides ruber* 氧同位素曲线; b:SPECMAP;c:柱状样 BIS-187-61 年龄控制点; d:MD972151 孔碳酸盐百分含量; e:BIS-187-61 孔碳酸盐百分含量

Fig.2 Age model of core BIS-187-61 in the southwestern South China Sea

a: oxygen isotope ($\delta^{18}O$) of *Globigerinoides ruber* in core BIS-187-61; b: SPECMAP; c: Control Point of the core BIS-187-61; d: Carbonate% of core MD972151; e: Carbonate% of core BIS-187-61

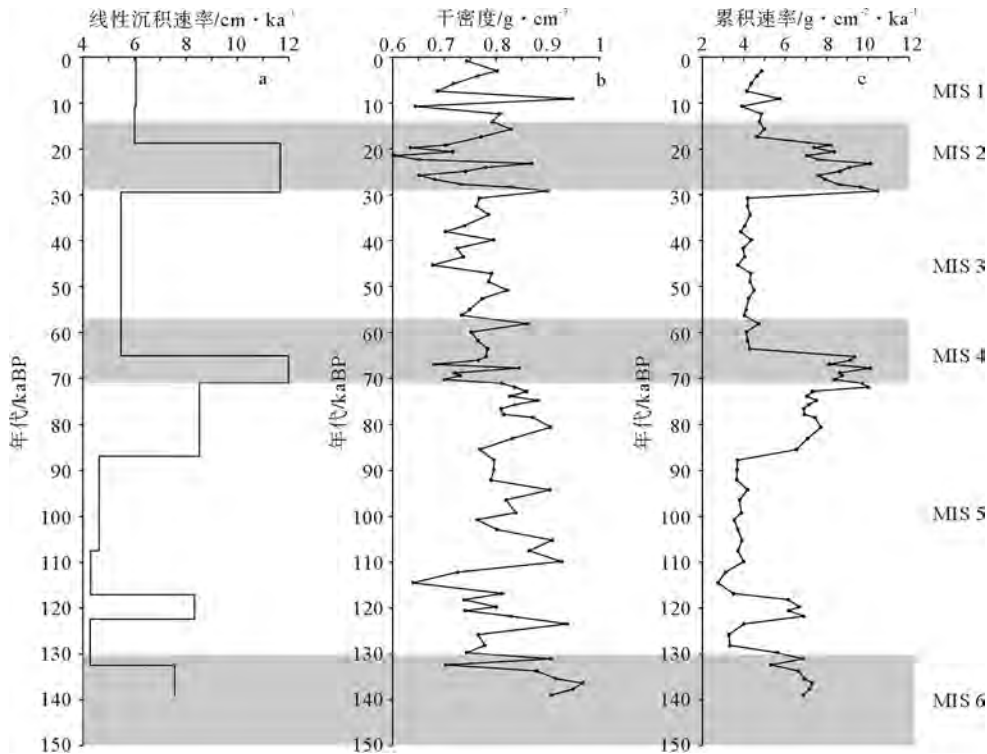


图3 南海西南部柱状样 BIS-187-61 的沉积速率 SR(a),干密度 DBD(b)和堆积速率 MAR(c)

Fig.3 Sedimentation rate(a), dry bulk density(b) and mass accumulation rate(c) in core

BIS-187-61 in the southwest South China Sea

2.2 末次间冰期以来 BIS-187-61 孔生源沉积相对含量变化

如图 4 所示,陆源物质是 BIS-187-61 孔沉积物的主要贡献者,其质量百分比达 65.28% ~

91.74%,碳酸盐的贡献次之,生物蛋白石和有机碳的含量则颇低。

过去 140ka 以来,BIS-187-61 岩心中的碳酸盐含量变化范围为 3.98%~28.43%,较低值出现在大约 17~23、63~75、130~136kaBP,较高值出现在

约 1~12、50~55、79~84、100~109、119~128kaBP,其中最低值出现在 69kaBP(3.98%),最高值出现在 123kaBP(28.43%),平均值为 15.26%(图 4d)。

生物蛋白石质量百分比为 1.59%~6.23%,平均值是 3.27%(图 4b)。大约在 140~116kaBP 期间,生物蛋白石含量相对较高,随后迅速下降,至 107kaBP 达到极小值 1.76%,自 107kaBP 至 14kaBP,生物蛋白石百分含量有一个缓慢上升的趋

势,但在末次冰期晚期至全新世初生物蛋白石含量再次出现极低值,而后在全新世期间逐渐回升。有机碳在沉积物中仅占 0.4%~0.93%,总体变化幅度不大,其平均值为 0.68%,最低值出现在约 123kaBP,最高值则出现在约 36kaBP(图 4a)。

2.3 末次间冰期以来 BIS-187-61 孔生源沉积堆积速率变化

如图 5a 所示,碳酸盐的堆积速率变化范围为

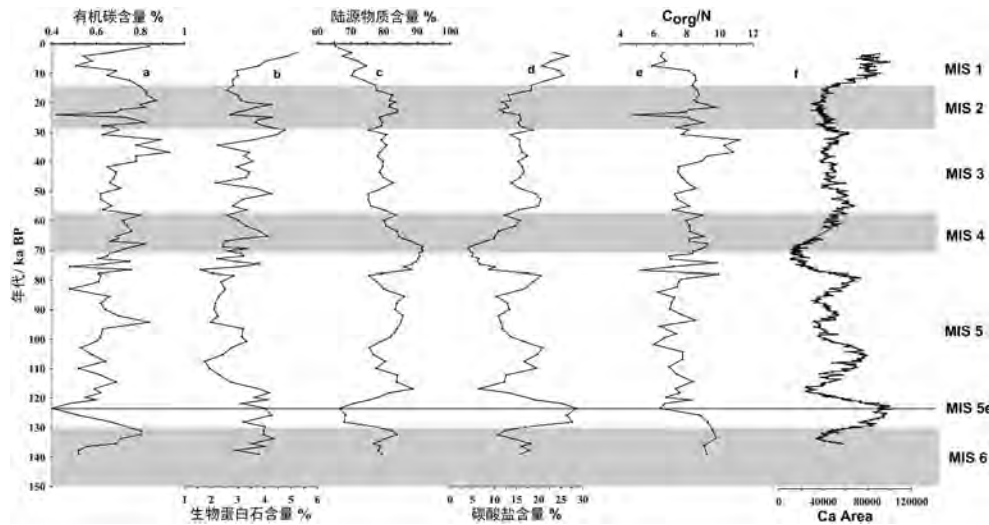


图 4 南海西南部柱状样 BIS-187-61 孔中有机碳百分含量(a);生物蛋白石百分含量(b);陆源物质百分含量(c);碳酸盐百分含量(d);有机碳和氮元素比值(e);XRF 中 Ca 的值(f)

Fig.4 Organic carbon% (a), opal% (b), lithogenics% (c), carbonate% (d), C_{org}/N (e), Ca area (f) in core BIS-187-61

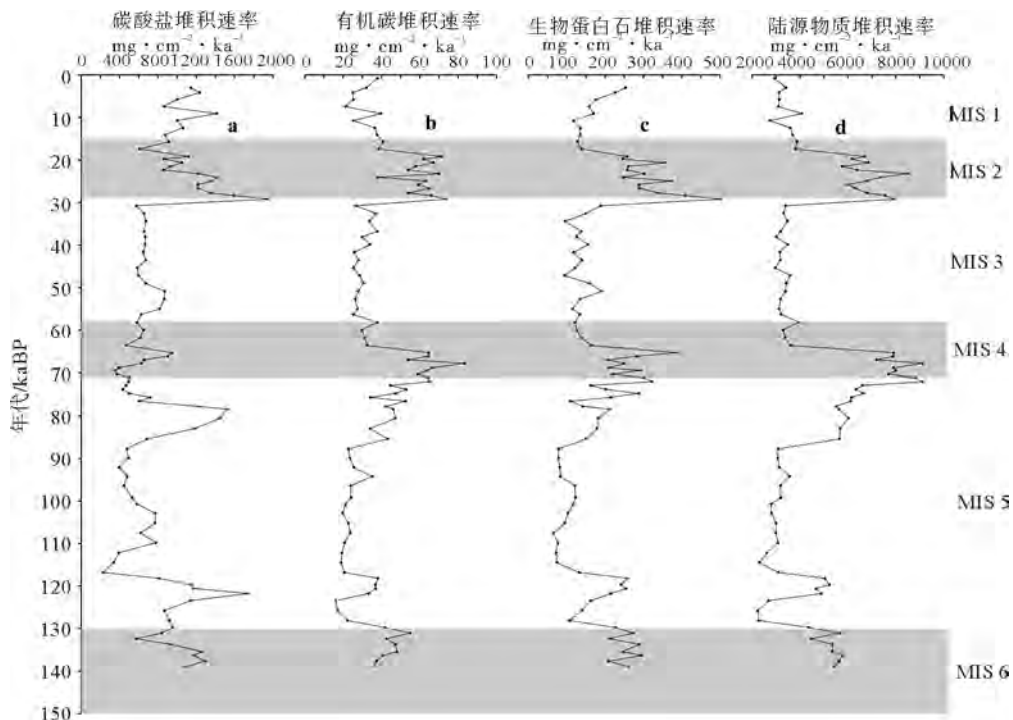


图 5 南海西部柱状样 BIS-187-61 碳酸盐的堆积速率(a);有机碳堆积速率(b);生物蛋白石堆积速率(c);陆源物质的堆积速率(d)

Fig.5 The mass accumulation rate of carbonate (a), C_{org} (b), opal (c), and lithogenic matters (d) in core BIS-187-61

210.1~1949.2 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$, 平均值为 787.5 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$, 在约 123、78、65 和 29kaBP 出现明显的极大值, 分别为 1740.55、1432.36、945.05 和 1949.19 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$ 。

有机碳的堆积速率变化范围是 16.2~82.9 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$, 平均值为 37.4 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$ 。在 118~122、65~78、19~29kaBP 有机碳平均堆积速率分别为 36.2、64.9、63.8 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$, 高于相邻的时期(图 5b)。

如图 5c 所示, 生物蛋白石的堆积速率变化范围为 60.9~199.8 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$, 平均值为 180.1 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$ 。最小值出现在约 107kaBP, 最大值出现在 29kaBP。与有机碳的堆积速率相似, 生物硅堆积速率在 118~122、65~71、19~29kaBP 出现较高的值, 分别为 242.7、283.6、280.3 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$ 。

如图 3 及 5 所示, 除碳酸盐以外, 其他沉积物组分堆积速率与沉积物总的堆积速率基本保持一致, 均表现为冰期(即 MIS 4 和 MIS 2)时堆积速率较高, 间冰期时较低。此外, 末次间冰期 MIS 5e 期各组分堆积速率都出现了极大值。碳酸盐堆积速率在 MIS 2 期和 MIS 5e 期也出现了极大值, 但在 MIS 4 期及 MIS 5 后期, 其变化与其他组分存在差异。

3 讨论

3.1 BIS-187-61 孔碳酸盐沉积记录及其古海洋学意义

碳酸盐丰度是沉积物中最常用的古海洋环境指标, 一直以来也是古海洋学研究的热点之一, 早期南海的古海洋学即始于沉积物碳酸盐旋回的研究^[24]。

研究表明, 低纬度海域沉积物中碳酸盐相对含量变化主要取决于 3 个因素^[18]: (1) 表层海水的生产力, 主要是有孔虫、颗石藻等钙质骨骼生物的生产力; (2) 深层海水对碳酸盐的溶解作用, 一般而言深度越大水压增大, 水温下降, 碳酸盐溶解作用越强; (3) 陆源物质输入量的变化, 即陆源输入的增加对碳酸盐造成了稀释作用。

如图 3a 所示, BIS-187-61 孔 140kaBP 以来的碳酸盐百分含量变化总体表现为冰期高、间冰期低的特征, 呈现出典型的“大西洋型旋回”特征, 这表明南海南部海域碳酸盐含量变化主要反映陆源物输入量的变化和稀释作用。如图 4b、c 所示, BIS-187-61 孔碳酸盐百分含量与该孔陆源物质含量呈现明显的负相关, 而与生物硅和有机质百分含量无明显关系,

这进一步证实南海南部 MIS 5 期以来沉积物碳酸盐旋回主要受控于陆源物质输入量。研究表明冰期时全球海平面下降 80~150m, 彼时南海西南部广阔的巽他陆架出露, 并发育大型网状的古巽他河口^[25], 这可能是冰期时南海南部海域大量陆源物质的主要来源。BIS-187-61 孔碳酸盐百分含量与 XRF 岩心扫描元素 Ca 的相对含量(图 4f)具有很好的线性相关性($R^2=0.87$), 这表明该柱状样中碳酸钙是主要的碳酸盐矿物。

3.2 南海西南部古海洋生产力变化探讨

如图 5b、c 所示, BIS-187-61 孔有机碳和生物蛋白石堆积速率都有着较大幅度的波动, 可能指示南海西南部海域 140kaBP 以来古海洋生产力存在明显的波动。海洋自生有机质 C/N 比值为 6~7^[26], 由于浮游植物有机质降解时 N 相对于 C 优先损失^[27], 因此, 典型的海洋沉积物有机质 C/N 比值为 8~9。而陆生植物因富含纤维素和木质素等, 其有机质 C/N 比值则较高(20~200)^[28]。因此, 海洋沉积物有机质中碳、氮元素比值可作为一个较好的指示海洋沉积物中有机质来源的指标。如图 4e 所示, 过去 140kaBP 以来 BIS-187-61 孔沉积物有机 C/N 比值变化为 4~12, 绝大部分时期 C/N 比均小于 9, 说明该孔沉积物中的有机质主要来自海洋自生生物, 陆源有机质输入相对有限。因此, 140kaBP 以来 BIS-187-61 孔有机碳的堆积速率可以一定程度上反映古海洋生产力的变化。根据 Sarnthein 等^[29]提出的计算古海洋生产力计算公式(3), 我们估算了 BIS-187-61 孔过去 15 万年的新生产力变化(图 6):

$$P_{\text{new}} = 0.0238 (\%C^{0.6429}) (SR^{0.8575}) (DBD^{0.5364}) \times (Z^{0.8292}) (SR(1 - \%C))^{-0.2392} \quad (3)$$

其中 %C 表示沉积物有机碳的百分含量, SR 是沉积物线性沉积速率, Z 是水深。考虑到仍然有少量的陆源有机碳的贡献, 此处估算应该被认为是该海域过去新生产力的最高水平。此外, 根据 Eppley 和 Peterson^[30]提出的 $P_{\text{new}} = PP^2/400$ ($P_{\text{new}} < 100$), PP 表示初级生产力(以碳计), 我们进一步计算出该海域过去 140ka 以来的初级生产力变化(图 6)。如图 6 所示, 估算出的新生产力和初级生产力水平的变化范围分别为 21.3~77.5 和 92.40~176.03 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均值是为 41.7 和 127.41 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。估算结果显示该海域生产力在冰期, 即 MIS 4 期和 MIS 2 期, 高于邻近间冰期, 但在 MIS 5e 和全新世后期也有明显增加。

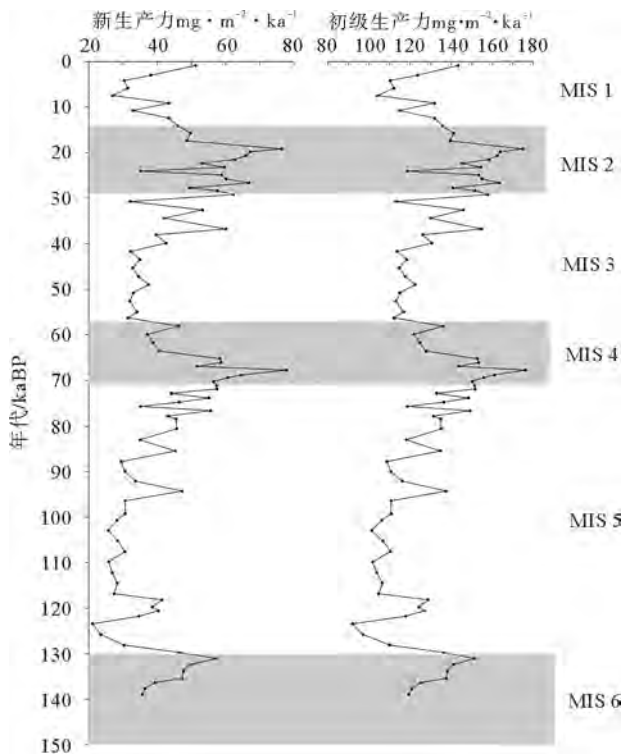


图 6 末次间冰期以来南海西南部上升流海域初级生产力和新生产力变化

Fig.6 Primary productivity and new productivity in the southwestern South China Sea since last interglacial period

如图 5,6 所示, BIS-187-61 孔生物蛋白石堆积速率和有机碳堆积速率及新生产力的变化有很好的相关性, 高值均出现在 MIS 2 期、MIS 4 期和 MIS 5e 期, 而碳酸盐堆积速率的变化与生物蛋白石和有机碳的堆积速率变化则存在明显的差异, 这表明该海域古海洋生产力的变化可能主要由硅质浮游生物生产力变化所引起, 而与钙质生物生产力的变化关系较小。

3.3 过去 140kaBP 以来南海西南部海洋环境变化

已有的研究表明, 在第四纪冰期间冰期旋回中, 南海古生产力的变化主要受到东亚季风和海平面升降的控制(表 1), 主要表现为冰期时东亚冬季风增强一方面导致上层海水的混合作用加强, 另一方面导致南海北部冬季离岸上升流增强, 同时陆源物质输入的增加也为南海带来更多的营养物质, 导致南海北部生产力的升高。相反地, 间冰期夏季风增强导致南海西部或西南部夏季上升流增强, 混合作用加强, 为相应海域带来较多的营养物质, 使得南海南部生产力得以提高。

如图 1 所示, BIS-187-61 孔处在南海西南部越南岸外夏季上升流影响的海域, 夏季风导致的季节性上升流将为该海域上层水体带来较丰富的营养物

表 1 南海不同海域的第四纪古生产力特征

Table 1 Characteristics of the reconstructed productivity in different areas in the SCS

位置	站位	北纬	东经	指标	变化特征	可能的影响因素	参考文献
南海北部	17928	18°9'36"	119°26'24"	底栖有孔虫丰度	末次冰期和 MIS 6 期生产力较高	冰期冬季风增强, 冬季上升流加强, 而且陆源营养物质输入量增加	[31]
	17937	19°30'	117°39.9'	沉积物中有机碳的含量及不同有机碳比值	生产力在 MIS 2 期较高	冰期冬季风强化, 海水混合程度加强, 营养物质利用更充分以及陆源输入增多导致营养物质增加	[32]
南海西部	17954	14°48'	111°31'48"	Ba/(Zr + Rb) 值底栖有孔虫丰度和有机碳通量	间冰期生产力高, MIS 3 期最大	夏季风增强, 上升流发育, 带来大量营养物质	[33,34]
	MD05-2901	14°13'12"	110°26'24"	生源组分、颗石藻丰度	冰期生产力高间冰期生产力低, 末次冰期生产力最高	冰期海平面下降, 陆源物质输入增加, 东北风发育也促进生产力的提高	[35,36]
	BIS-187-61	11°25.5'	111°17.0'	有机碳通量、蛋白石通量	冰期生产力高, 间冰期低	冰期陆源物质输入增多, 营养物质增多促进生产力提高	本研究
南海南部	ODP1143	9°12'36"	113°10'12"	蛋白石百分含量及其堆积速率 钙质超微化石丰度及堆积速率	间冰期生产力高, 冰期生产力低	间冰期夏季风增强, 上升流增强, 营养物质增加	[21,22]
	MD05-2896	8°29'24"	111°15'36"	Ba/Al 比值	间冰期生产力高, MIS 3 期生产力较高	间冰期夏季风增强, 上升流增强, 陆源有机物质输入增多	[37]

质,从而刺激浮游植物的生长旺盛^[38]。此外,现代东亚夏季风导致南海西部发育两个对称涡旋,并随之产生的离岸流(jet)^[39,40],也可能将沿岸的营养物质和颗粒物输送至本钻孔所在区域。据此可以推测间冰期时夏季风增强所导致的南海西南部上升流强度增加,会为本研究区域浮游植物生长带来更丰富的营养物质,从而导致海洋初级生产力和生源物质堆积速率的增加。然而如图5,6所示,BIS-187-61孔有机碳和生物蛋白石堆积速率以及根据有机碳估算出的古海洋生产力的高值出现在MIS 5e、MIS 4和MIS 2期,其中仅MIS 5e处在末次间冰期。总体而言该孔生源物质堆积速率表现为冰期高,而间冰期相对较低的变化趋势,与之前推测的间冰期夏季风增强、上升流增强可能引起海洋初级生产力和生源物质堆积速率增加的变化趋势相去甚远,因此,本孔所记录的冰期时生源物质堆积速率的增加必然存在其他原因。

根据刘志飞等的研究结果^[25](图7a,b),冰期时整个南海南部巽他陆架出露。与现代南海相比,BIS-187-61孔所处位置离陆地距离更近,这可能导致本研究区域在冰期时接受大量来自巽他陆架的陆源物质输入。此外,冰期时东亚冬季风增强,也将使整个南海接收更多来自亚洲大陆的陆源物质。如图

5d所示,陆源物质堆积速率在MIS 2和MIS 4期明显增加,与有机质和蛋白石堆积速率变化趋势基本保持一致(图5),且这两个时期陆源物质百分含量也相对较高,证明冰期时本研究海域确实接收了更多来自东亚大陆或巽他陆架的陆源物质。陆源物质输入的增加一方面会为上层海洋带来更多的营养物质,从而刺激上层海洋浮游植物的生长,另一方面,陆源物质作为海洋沉降颗粒物最重要的压载物之一,其沉积通量(即堆积速率)的增加也将会携带更多的上层生源颗粒物往深海沉降,从而提高颗粒物的沉降速率,减少生源颗粒物在水柱中的停留时间,有利于生源物质的保存^[41-43],即发现大西洋有机碳向海底的输出通量随着离岸距离的增加(即接受的陆源输入的减少)而减少,而与上层海洋初级生产力的变化趋势无明显关系。综上所述,我们认为BIS-187-61孔所记录的冰期时(MIS 2和MIS 4期)生源物质和陆源物质的协同增加,反映了冰期时由于东亚季风增强以及巽他陆架出露,为研究海域带来大量陆源物质,可能促进浮游植物生长,生产力提高,同时对海洋上层颗粒物起到强烈的清扫作用,提高沉积物堆积速率,并在一定程度上增加了生源颗粒物的保存效率。

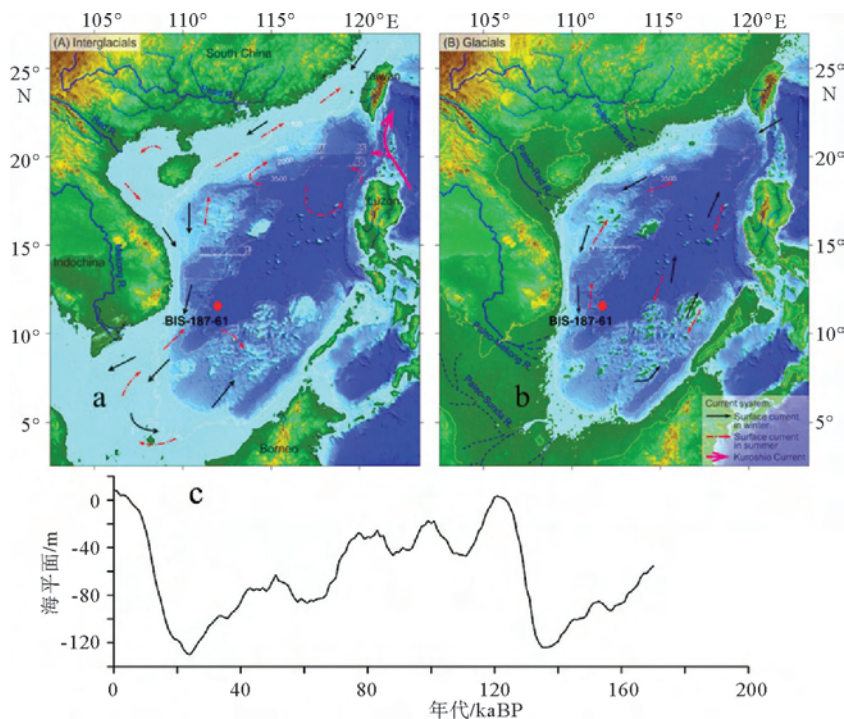


图7 间冰期(a)和冰期(b)时南海地形地貌^[25],及末次间冰期以来全球海平面的平均变化(c)

Fig.7 The South China Sea during interglacial (a) and glacial periods (b) and the average global sea level change since last interglacial period (c)

在约 120kaBP,即 MIS 5e 期,可以看到所有的沉积物组分堆积速率都明显增加。区别于 MIS 2 和 MIS 4 期,MIS 5e 期沉积碳酸盐的相对含量处于一个显著的高值,而陆源物质含量则出现相应的低值,这说明此时陆源输入相对较低,生源物质的增加主导了 MIS 5e 期沉积物堆积速率的增加。MIS 5e 作为末次间冰期最盛期,被广泛深入的研究,以更好的与现代间冰期即全新世做对比,并帮助更好的预测全球变暖可能导致的未来全球环境变化。如图 7c(海平面变化)所示,MIS 5e 期南海海平面和现今海平面相差不大^[44,45],可以推测该时期南海地貌格局与现代相仿。因此,MIS 5e 期 BIS-187-61 孔较高的有机碳、生物硅和碳酸钙等生源物质堆积速率可能是由于末次间冰期夏季风增强导致沿岸上升流增强,为研究海域带来更多营养物质,促使浮游生物大量繁盛,海洋生产力增加。该时期陆源物质堆积速率的相应增加则可能与浮游植物与陆源物质的相互作用有关,研究认为浮游植物藻类分泌的黏液会增加陆源颗粒物,尤其是一些细颗粒的陆源物质的胶结聚合,因此在陆源输入颗粒物向深海沉降过程中起到关键作用^[29]。

4 结论

(1) 碳酸钙是南海西南部柱样 BIS-187-61 孔主要的碳酸盐矿物,碳酸盐含量变化为 3.98%~28.43%,总体表现出冰期低、间冰期高的特征,表现为典型的“大西洋型碳酸盐旋回”,表明南海南部深海沉积物中碳酸盐沉积主要受控于周边陆源物质输入稀释的控制;

(2) 南海西南部研究区沉积物有机碳和生物蛋白堆积速率在 MIS 2 期和 MIS 4 期和 MIS 5e 出现较高值。沉积有机质碳氮元素比表明该孔有机质主要来源于海洋自生有机碳,并据此估算出过去 140kaBP 以来该区域新生产力和初级生产力水平变化范围分别为 21.3~77.5 和 92.40~176.03g·m⁻²·a⁻¹;

(3) 冰期时(MIS 2 和 MIS 4 期)南海西南部海域接受了更多来自东亚大陆和巽他陆架的陆源物质沉积,大量陆源物质输入可能为研究区域带来更丰富的营养物质,从而刺激上层生产力的增加,另外也提高了生源颗粒物的沉降速率和保存效率,从而导致生源物质堆积速率的增加;而 MIS 5e 期各沉积物组分堆积速率的高值则与末次间冰期夏季风增强、上升流增强有关。

参考文献 (References)

- [1] Wang P, Li Q, Li C F. Geology of the China Seas[M]. Elsevier, 2014.
- [2] Cheng X, Huang B, Jian Z, et al. Foraminiferal isotopic evidence for monsoonal activity in the South China Sea: a present-LGM comparison[J]. Marine Micropaleontology, 2005, 54(1): 125-139.
- [3] Zhao M, Huang C Y, Wang C C, et al. A millennial-scale UK'37 sea-surface temperature record from the South China Sea(8°N) over the last 150 ka: Monsoon and sea-level influence[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 236: 39-55.
- [4] Hellerman S, Rosenstein M. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates[J]. Journal of Physical Oceanography, 1983, 13(7): 1093-1104.
- [5] WIESNER M G. Fluxes of particulate matter in the South China Sea[J]. Particle Flux in the Ocean, Scope 57, 1996: 293-312.
- [6] Jian Z, Cheng X, Zhao Q, et al. Oxygen isotope stratigraphy and events in the northern South China Sea during the last 6 million years[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2001, 44(10): 952-960.
- [7] Tamburini F, Adatte T, Föllmi K, et al. Investigating the history of East Asian monsoon and climate during the last glacial-interglacial period (0-140 000 years): mineralogy and geochemistry of ODP Sites 1143 and 1144, South China Sea[J]. Marine Geology, 2003, 201(1): 147-168.
- [8] Hanebuth T, Statterger K, Grootes P M. Rapid flooding of the Sunda Shelf: a late-glacial sea-level record[J]. Science, 2000, 288(5468): 1033-1035.
- [9] Ragueneau O, Tréguer P, Leynaert A, et al. A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy [J]. Global and Planetary Change, 2000, 26(4): 317-365.
- [10] Wells M L, Vallis G K, Silver E A. Tectonic processes in Papua New Guinea and past productivity in the eastern equatorial Pacific Ocean[J]. Nature, 1999, 398(6728): 601.
- [11] Archer D, Lyle M, Rodgers K, et al. What controls opal preservation in tropical deep-sea sediments? [J]. Paleooceanography, 1993, 8(1): 7-21.
- [12] DeMaster D J. The supply and accumulation of silica in the marine environment[J]. Geochimica et Cosmochimica acta, 1981, 45(10): 1715-1732.
- [13] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments [J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1989, 36(9): 1415-1426.
- [14] Hurd D C, Theyer F. Changes in the physical and chemical properties of biogenic silica from the central equatorial Pacific; Part II, Refractive index, density, and water content of acid-cleaned samples[J]. American Journal of Science, 1977,

- 277(9): 1168-1202.
- [15] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(9): 1415-1426.
- [16] Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, et al. The orbital theory of Pleistocene climate; support from a revised chronology of the marine $d^{18}O$ record[C]. *Milankovitch & Climate: Understanding the Response to Astronomical Forcing. Milankovitch and Climate: Understanding the Response to Astronomical Forcing*, 1984.
- [17] Wetzel A, Tjallingii R, Wiesner M G. Bioturbational structures record environmental changes in the upwelling area off Vietnam (South China Sea) for the last 150,000 years[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 311(3-4): 256-267.
- [18] Wang P, Wang L, Bian Y, et al. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: surface circulation and carbonate cycles[J]. *Marine Geology*, 1995, 127(1-4): 145-165.
- [19] 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(1): 245-284.
- [20] Wang Y, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years[J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- [21] 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(1): 74-77.]
- [22] 刘传联, 祝幼华, 成鑫荣. 南海南部第四纪表层海水古生产力变化的钙质超微化石证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 61-66. [LIU Chuanlian, ZHU Youhua, CHENG Xinrong. Calcareous nanno-fossil evidence for variations in Quaternary surface water paleoproductivity in the southern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 61-66.]
- [23] Zhao M, Huang C Y, Wang C C, et al. A millennial-scale U 37 K' sea-surface temperature record from the South China Sea (8 N) over the last 150 ka: Monsoon and sea-level influence[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 236(1): 39-55.
- [24] Wang P X, Min Q B, Bian Y H, et al. Planktonic foraminifera in the continental slope of the northern South China Sea during the last 130,000 years and their paleo-oceanographic implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986, 60(3): 215-225.
- [25] Liu Z, Zhao Y, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [26] Stevenson F J, Cheng C N. Organic geochemistry of the Argentine Basin sediments: carbon-nitrogen relationships and Quaternary correlations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, 36(6): 653-671.
- [27] Emerson S, Hedges J I. Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments[J]. *Paleoceanography*, 1988, 3(5): 621-634.
- [28] Thunell R C, Qingmin M, Calvert S E, et al. Glacial-Holocene biogenic sedimentation patterns in the South China Sea: Productivity variations and surface water pCO_2 [J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(2): 143-162.
- [29] Sarnthein M, Winn K, Duplessy J C, et al. Global variations of surface ocean productivity in low and mid latitudes: influence on CO_2 reservoirs of the deep ocean and atmosphere during the last 21,000 years[J]. *Paleoceanography*, 1988, 3(3): 361-399.
- [30] Eppley R W, Peterson B J. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean[J]. *Nature*, 1979, 282(5740): 677.
- [31] 黄宝琦, 翦知潜, 林慧玲. 南海东北部晚第四纪古生产力变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(2): 65-68. [HUANG Baoqi, JIAN Zhimin, LIN Huiling. Late Quaternary changes of paleoproductivity in the northeastern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(2): 65-68.]
- [32] 李丽, 王慧, 罗布次仁, 等. 南海北部 4 万年以来有机碳和碳酸盐含量变化及古海洋学意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6): 79-85. [LI li, WANG Hui, LUO Buciren, et al. The characterizations and paleoceanographic significances of organic and inorganic carbon in northern South China Sea during past 40ka[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(6): 79-85.]
- [33] 青子琪, 刘连文, 郑洪波. 越南岸外夏季上升流区 22 万年来东亚季风的沉积与地球化学记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(2): 68-72. [QING Ziqi, LIU Lianwen, ZHENG Hongbo. Sedimentological and geochemical records of East Asian Monsoon in summer upwelling region off the coast of Vietnam for the past 220ka[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(2): 68-72.]
- [34] 黄宝琦, 翦知潜. 越南岸外晚第四纪上升流与东亚夏季风变迁[J]. *第四纪研究*, 1999, 19(6): 518-526. [HUANG Baoqi, JIAN Zhimin. Late Quaternary coastal upwelling and variations of the East Asian summer Monsoon off the Vietnam coast[J]. *Quaternary Research*, 1999, 19(6): 518-526.]
- [35] 向菲, 王汝建, 李建如, 等. 越南岸外上升流区 48 万年来高分辨率的生源组分记录及其古海洋学意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(6): 81-89. [XIANG Fei, WANG Rujian, LI Jianru, et al. High-resolution records of biogenic components and their Paleoceanographic implications in the upper upwelling area of the South China Sea off eastern Vietnam over past 480 ka[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(6): 81-89.]
- [36] 苏翔, 刘传联, 李建如. 越南岸外上升流区 45 万年来上层海水变化的颗石藻证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27: 71-

- 76.[SU Xiang, LIU Chuanlian, LI Jianru. Coccolith evidence for variations in upper ocean water in upwelling area off the coast of Viet- nam for the past 450 ka[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27: 71-76.]
- [37] 梅西, 张驯华, 郑洪波, 等. 南海南部 120 ka 以来元素地球化学记录的东亚夏季风变迁[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, 29(2): 134-141. [MEI Xi, ZHANG Xunhua, ZHENG Hongbo, et al. Element Geo- chemical record in southern South China Sea sediments during the past 120 ka and its implications for East Asian summer Mon- soon variation[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geo-Chemistry*, 2010, 29(2): 134-141.]
- [38] Pennington J T, Chavez F P. Seasonal fluctuations of temperature, salinity, nitrate, chlorophyll and primary production at station H3/M1 over 1989-1996 in Monterey Bay, California[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000, 47(5-6): 947-973.
- [39] Ning X R, Chai F, Xue H, et al. Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C10).
- [40] Chen C, Wang G. Interannual variability of the eastward current in the western South China Sea associated with the summer Asian monsoon[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(9): 5745-5754.
- [41] Honjo S. Seasonality and interaction of biogenic and lithogenic particulate flux at the Panama Basin[J]. *Science*, 1982, 218(4575): 883-884.
- [42] Jickells T D, Dorling S, Deuser W G, et al. Air-borne dust fluxes to a deep water sediment trap in the Sargasso Sea[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(2): 311-320.
- [43] Honjo S, Manganini S J, Cole J J. Sedimentation of biogenic matter in the deep ocean[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1982, 29(5): 609-625.
- [44] Spratt R M, Lisiecki L E. A Late Pleistocene sea level stack [J]. *Climate of the Past*, 2016, 12(4): 1079.
- [45] Lambeck K, Chappell J. Sea level change through the last glacial cycle[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 679-686.