

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018052301

西菲律宾海 26 万年来古生产力变化的颗石藻证据

安佰正^{1,2,3}, 李铁刚^{3,4}, 刘健^{1,3}, 孙晗杰^{2,3}, 徐兆凯^{2,3}, 唐正^{3,4}, 赵京涛^{1,3}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071
2. 中国科学院海洋研究所, 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071
3. 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, 青岛 266061
4. 自然资源部第一海洋研究所, 海洋沉积与环境地质重点实验室, 青岛 266061

摘要: 基于国际海洋古全球变化研究项目 (IMAGES) 在西菲律宾海本哈姆海台获取的高质量柱状沉积物岩芯 MD06-3047 (17°00.44'N, 124°47.93'E), 利用颗石藻下透光带属种 *Florisphaera profunda* 的相对丰度以及初级生产力转换函数, 恢复了 260 ka 以来西菲律宾海上部水体营养跃层以及初级生产力的变化历史。发现该区域 26 万年以来初级生产力冰期-间冰期变化特征较不明显, 冰期生产力平均值略高于间冰期。通过与前人发表的指示东亚冬季风强弱的伊利石/蒙脱石记录和热带太平洋纬向表层海水温度梯度记录的对比, 提出 MIS 8 期以来, 热带西菲律宾海古生产力变化的主要受控因素在 MIS 5a 左右发生明显转变。在 MIS 8 后期至 MIS 5a 之间, 初级生产力受到长期类 ENSO 过程的影响较为显著, 当热带东西太平洋海水表层温度梯度较小的时期, 认为热带太平洋处于类 El Niño 状态, 此时西菲律宾海营养跃层相对较浅, 生产力较高, 反之则相反。而在 MIS 5 末期至末次冰消期时段, 生产力受东亚冬季风的影响相对于长期 ENSO 过程更强, 可能掩盖了后者的古生产力信号。冰期东亚冬季风加强, 一方面, 可以引起上部水体混合加强, 增加下部营养物质向上的输送, 另一方面大量风尘物质的输入可以刺激颗石藻的生长; 反之在冰消期, 水体混合较弱, 风尘输入显著减少, 生产力也随之降低。

关键词: 初级生产力; 颗石藻; 东亚冬季风; 晚第四纪; 西菲律宾海

中图分类号: P736 **文献标识码:** A

Variations of primary productivity in the western Philippine Sea in the past 260000 years: evidence from coccolith

AN Baizheng^{1,2,3}, LI Tiegang^{3,4}, LIU Jian^{1,3}, SUN Hanjie^{2,3}, XU Zhaokai^{2,3}, TANG Zheng^{3,4}, ZHAO Jingtao^{1,3}

- 1 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China
- 2 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
- 3 Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China
- 4 Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China

Abstract: Primary productivity data of the Core MD06-3047 (17°00.44'N, 124°47.93'E, 2510m water depth) from the International Marine Global Change Study Program (IMAGES) is presented in this paper. The core is taken from the Benham Rise of West Philippine Sea. Coccolith records revealed considerable glacial-interglacial changes of paleoproductivity in the west Philippine Sea over the past 260 ka. The recently published research data of the core made this study possible to reveal the forcing mechanisms of the glacial-interglacial variations in primary productivity. During the period of 260~80 ka, the abundance of *F. profunda* and primary productivity shows a similar variation trend with the tropical eastern-western Pacific sea surface temperature gradient (Δ SST). The lower Δ SST in the glacial intervals indicate that tropical Pacific was suffered a long term El Niño-like condition, which produced relatively shallow thermocline/nutricline and high primary productivity in the western Pacific. On the contrary, the higher Δ SST in the interglacial intervals indicates a La Niña-like state in the tropical Pa-

资助项目: 国家自然科学基金项目“15 万年以来热带西太平洋颗石藻碳酸钙输出通量演变及其影响因素”(41706070), “中更新世以来热带西太平洋颗石藻钙化作用研究”(41876041), “80 万年来热带西太平洋上层水体 pH 和 pCO₂ 演变及影响机理”(41230959); 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); 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金“西太平洋上层水体现代颗石藻碳酸钙分布特征”(MGE2017KG03); 山东省自然科学基金面上项目“山东半岛东部近岸中、晚全新世高分辨率环境演化过程研究”(ZR2016DM12)

作者简介: 安佰正(1984—), 男, 博士, 主要从事古海洋学与古环境研究, E-mail: an_baizheng@126.com

通讯作者: 李铁刚(1965—), 男, 研究员, 主要从事古海洋学与古环境研究, E-mail: tgli@fio.org.ac.cn

收稿日期: 2018-05-23; **改回日期:** 2018-08-05. 文凤英编辑

cific, which deepened the thermocline/nutricline and suppressed the primary productivity. From the late MIS5 to the last deglacial, we attribute the high values of productivity in the glacial interval and low values in the interglacial intervals to the Eastern Asian winter monsoon, due to the similar trend between illite/smectite ratio and primary productivity in the core MD06-3047.

Key words: primary productivity; coccolith; East Asian Monsoon; Late Quaternary; West Philippine Sea

热带海气相互作用在不同时间尺度上影响了全球气候变化。海气相互耦合作用的变化,首先会影响海洋生物圈,尤其是大洋上层的浮游植物。在低纬海区,浮游植物的活跃程度可以通过初级生产力来进行量化,并与海洋表层的风应力动态相关^[1]。自 Beaufort 等成功建立热带大洋初级生产力转换方程,并开创性地应用到赤道太平洋 5 个柱状样岩芯中以来^[2,3],利用颗石藻特征属种 *Florisphaera profunda* 相对百分含量恢复古生产力,在热带太平洋及其边缘海得到了广泛的应用^[4-18]。到目前为止,热带太平洋的古生产力研究大多显示了冰期高、间冰期低的变化特征^[4,6,8,10],众多证据表明该变动受到北半球高纬地区冰量变动的远程调控^[4,5,8]。

然而,由于海气相互作用的复杂性,对于热带西太平洋海区古生产力在冰期—间冰期时间尺度上变化的驱动机制,到目前为止依然存在争议。通过对热带大洋多个岩芯古生产力的对比以及频谱分析,Beaufort 等提出晚更新世古生产力的变化受到冰期旋回以及长期 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 过程的影响^[3];这一观点在随后得到海水表层温度和其他古生产力等古海洋学记录证据的支持^[8,9,13,19]。然而,也有学者持不同的看法,例如,Zhang 等提出西赤道太平洋生产力变动的主控因素是来自东亚大陆中部的风尘输入^[20]。随着研究的深入开展,发现热带西太平洋初级生产力的受控因素较为复杂,可能是长期 ENSO 过程以及东亚季风共同调控的结果。但是由于研究指标的局限性,往往侧重某一方面进行讨论。Li 等认为尽管东亚冬季风携带来的营养物质能够在一定程度上影响生产力,但冰期—间冰期水体结构的变动对生产力的作用不容忽视,并提出冰期热带太平洋类似于现代 El Niño 状态,热带西太平洋温跃层上升,因此加强了下部营养物质的向上输送,有利于初级生产力的增加^[9]。Xu 等则利用热带西太平洋 70 万年以来东亚冬季风风尘记录及溶解铁与生产力指标的对比,进一步支持了东亚风尘带来的营养物质对冰期生产力的刺激作用^[21]。

热带西菲律宾海位于西太平洋暖池北部边缘,由于同时受东亚季风和热带 ENSO 过程的影

响,因此对气候变化的响应非常敏感。东亚冬季风在 1—3 月爆发,可以引起颗石藻的繁盛^[22];同时,ENSO 过程也可以造成热带西太平洋水体结构的变动,从而影响生产力的变化^[3,23]。近年来热带西太平洋古海洋学的发展,提供了众多指示东亚季风强弱以及长期 ENSO 过程的记录,为进一步开展西菲律宾海冰期—间冰期时间尺度的古生产力研究提供了条件。在西菲律宾海选取合适的岩芯,通过与前人已有的研究工作的对比,有利于进一步查明热带西太平洋古生产力变化的驱动机制。

1 材料和方法

1.1 研究材料

本研究使用的 MD06-3047 柱状样岩芯 (17° 00.44'N, 124°47.93'E, 水深 2510m, 柱长 8.9m), 于 2006 年由法国极地研究所的 Marion-Dufresne 考察船取自吕宋岛以东海域本哈姆海台(图 1)。本哈姆海台是沿着中央海盆洋脊方向的海底高原,约在 45~50Ma 期间形成^[24]。钻孔位置位于吕宋岛以东约 240km。由于吕宋岛东部大陆架很窄(平均少于 10km),且岩芯位置距离陆架相对较远,因此海平面

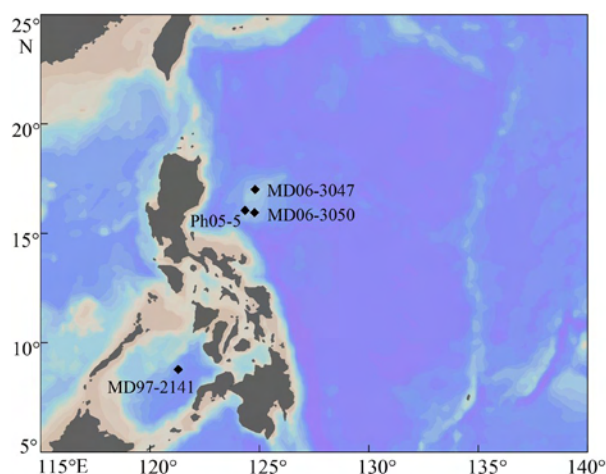


图 1 MD06-3047 岩芯站位图(根据 ODV 软件制图)
Fig.1 Map of the sampling location in the west Philippine Sea
(from Schilitzer, R., Ocean Data View, odv.awi.de, 2017;
available at <http://odv.awi.de>)

变化导致的来自吕宋岛的陆源输入对于本站位的影响可以忽略^[25]。吕宋岛以及邻近海域主要受亚热带东亚季风气候的控制。

岩芯以黄褐色粉砂质黏土为主,未见浊流层以及滑坡沉积。MD06-3047 岩芯所在海区现代溶跃面深度约 3400m^[26,27],沉积物样品中出现翼足类壳体,表明钙质微体化石保存情况良好^[28]。MD06-3047 岩芯年代模式根据底栖有孔虫 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[19]与 LR04 氧同位素标准曲线^[29]进行对比建立。岩芯上部 330cm 用于本研究工作,按照 2cm 间隔取样,用于颗石藻特征种属鉴定,时间跨度为 260ka 至晚全新世,分辨率约为 1.5ka。

1.2 *Florisphaera profunda*——有效的古生产力指标

颗石藻是一种广泛生存在海洋透光带的浮游植物,对光照和营养物质变动响应敏感。相对于透光带上部,下透光带相对光线不足但营养物质较高。在热带大洋,下透光带属种主要以 *F. profunda* 为主,而大部分颗石藻属种生活在上部透光带^[30]。*F. profunda* 占颗石藻群落的相对百分含量与营养跃层的变动密切相关^[31]。营养跃层是指海洋上层水体营养盐浓度(如 NO_3^- , PO_4^{3-})发生显著变动的水层。Li 等根据 ODV 数据库的现代调查数据,绘制了西菲律宾海区 Ph05-5 站位附近温度、盐度、磷酸盐、硝酸盐等参数的深度剖面曲线,认为研究区的年均营养跃层深度约在 200m 水深^[7]。当营养跃层变浅,颗石藻种群以上部透光带属种为主,而当营养跃层加深的时候,颗石藻种群中下透光带属种 *F. profunda* 的比例则大大增加。在低纬度开放大洋,营养跃层的深度主要受到风力强度的影响。风力强时,上部水层混合加强,下部营养物质上涌至上部透光带;反之,当风力减弱的时候,上部水体混合作用减弱,透光带营养物质输入减少^[5]。营养跃层深度变化与颗石藻种群组成的这种关系,已成为追踪热带大洋营养跃层深度变化的重要指标^[6,10,31-33]。同时,通过校正 *F. profunda* 相对百分含量($F_p\%$)与初级生产力(PP)的关系,建立了有效的古生产力替代性指标^[2]。*F. profunda* 相对丰度与初级生产力的函数关系如下:

$$PP=617-[279 \log (F_p+3)] \quad (1)$$

其中,PP 是年均生产力($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), F_p 是 *F. profunda* 的相对百分含量 $\times 100$ 。该方程基于印度洋低纬海区大量表层沉积物样品建立。研究表

明,利用 F_p 得到的古生产力变化与其他古生产力替代性指标相一致^[2]。

1.3 实验方法

取沉积物样品 1~5mg 放至载玻片上,用洗瓶滴加一滴蒸馏水使其分散,用圆滑的牙签侧面来回涂抹至均匀,自然晾干后,在中间滴适量中性树脂,用盖玻片进行固定。将制备的玻片在烘箱中 50℃ 烘干。颗石鉴定工作在同济大学海洋地质国家重点实验室,利用颗石自动鉴定系统对玻片进行常见种属统计。统计方法如下:在 Leica 偏光显微镜(LEICA DM6000 B)下放大 500 倍,随机选取 40 个颗石分布均匀清楚的视域,利用数字摄像头(Spot In-light FireWire,200 万像素)进行拍照。图片进行适当处理后,运行 Syraco4.0 软件分析统计颗石数目和种属鉴定。该自动鉴定的方法已经成功地应用于不同海区多个岩芯中^[3,10,11,32,34]。通过计算获得颗石藻下透光带属种 *F. profunda* 占全部颗石个数的百分含量,并按照方程(1)计算获得 260ka 以来初级生产力变化。

2 结果

2.1 *F. profunda* 相对丰度变化

260ka 以来,*F. profunda* 百分含量为 45%~93%,平均值为 67%,其在 MIS 8, MIS 6, MIS 4 以及 MIS 2 的平均值分别为 58.1%、66.6%、62.4%、66.6%,而在 MIS 7, MIS 5, MIS 3 以及全新世的平均值分别为 63%、72.5%、68.9%、69.6%。尽管 *F. profunda* 百分含量在间冰期平均值相对冰期平均值略高,但通过与代表冰期旋回变化的底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线进行对比(图 2),发现两者之间相关性并不好,因此认为 *F. profunda* % 在过去 26 万年来冰期-间冰期旋回特征不明显。相对于冰期旋回时间尺度来说, $F_p\%$ 在千年尺度上变化特征更为明显。比如, $F_p\%$ 在 MIS 5a, MIS 5b, MIS 5c 出现低值,分别为 59.4%、57.6%、51.9%,而在 MIS 5d, MIS 5e 则呈现高值,分别为 68.4%、80.5%,变化幅度高达 28%,指示了在 MIS 5 期内,营养跃层发生了重大的变动,其在 MIS 5d 之前相对较深,且波动较少,而在 MIS 5c—MIS 5a 期间营养跃层变化幅度很大,并出现营养跃层异常浅的现象。在冰期, MIS 4—MIS 2 期以及 MIS 6 期, $F_p\%$ 的变化幅度甚至更大,最高可达 40%,指示了研究区营养跃层在千

年尺度和亚轨道尺度上的振荡。此外, *F. profunda* 相对百分含量还具有长期变化的趋势, 整体可以划分为两个阶段, 在 150~260ka 期间, 即 MIS 8 后期至 MIS 6 中期, 整体相对较低, 而在 150ka 至晚全新世, 整体有所升高, 表明西菲律宾海营养跃层自 MIS 8 期以来呈现了由浅变深的整体变化趋势。

利用 PAST 软件对 26 万年以来 *F. profunda* % 进行单频谱分析, 结果显示了较强的轨道周期 (55, 28, 19, 14ka) 和千年周期 (7.5, 4, 3ka)。其中 55ka 可能是 10ka 偏心率周期与 41ka 斜率周期叠加造成, 28ka 则可能是由斜率周期 (41ka) 与岁差周期 (19ka) 合成。

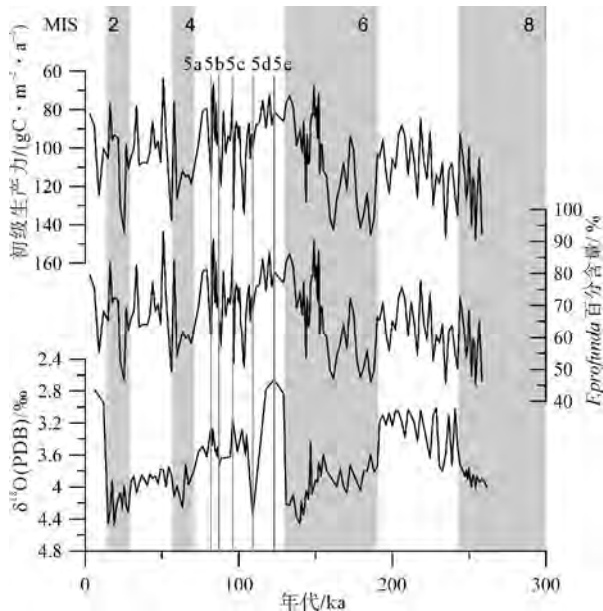


图 2 260 ka 以来 MD06-3047 岩芯 *F. profunda* 相对百分含量以及初级生产力变化曲线

MD06-3047 岩芯的年代模式由底栖有孔虫 *C. wuellerstorfi* 的氧同位素曲线对比 LR04 标准曲线而建立^[19]

Fig.2 Records of variations in the abundance of *F. profunda* and primary productivity for the Core MD06-3047 in the last 260 ka

Age model of MD06-3047 was established based on benthic foraminiferal *C. wuellerstorfi* $\delta^{18}\text{O}$ stratigraphy by correlating to LR04 $\delta^{18}\text{O}$ stack^[19]

2.2 初级生产力变化

MD06-3047 岩芯在研究时间段 260ka 以来, 生产力的变动范围为 $64\sim 148\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值为 $104\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 初级生产力的变动趋势与 $F_p\%$ 的变化趋势正好相反 (图 2)。其在冰期, 即 MIS 8, MIS 6, MIS 4 以及 MIS 2 的平均值相对较高, 分别为 $120, 104.7, 111.4, 104.4\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 而在间冰

期, 即 MIS 7, MIS 5, MIS 3 以及全新世相对较低, 平均值分别为 $110.2, 94.1, 100, 98.9\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 此外, 初级生产力在 MIS 5a, MIS 5b 以及 MIS 5c 出现峰值, 分别为 $116.1, 119.7, 131.8\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 而在 MIS 5d 和 MIS 5e 则出现低值, 分别为 $99.9, 80.9\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。此外, 初级生产力表现出长期的变化趋势, 即在 MIS 8 期至 155ka 期间, 初级生产力整体较高, 平均值为 $96.8\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 自 155ka 开始, 初级生产力出现快速降低, 随后短暂升高, 并再次降低, 自 MIS 5d 之后, 生产力有所回升, 并出现多次峰值, 但是 155ka 至全新世晚期, 生产力整体相对较低, 平均值为 $116.4\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

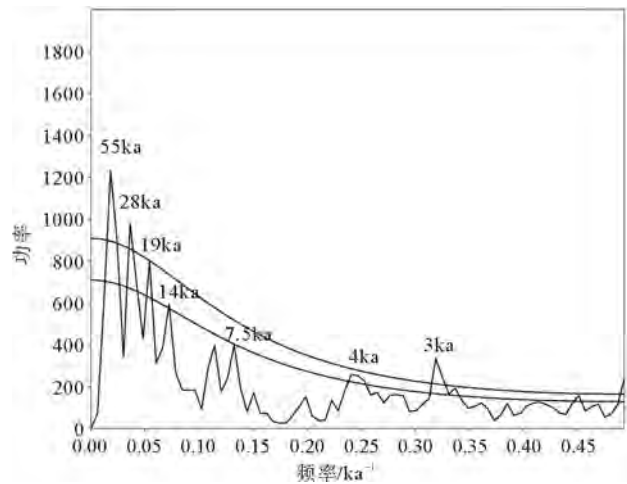


图 3 MD06-3047 站 *F. profunda* 百分含量与初级生产力频谱分析 (图中标出 80% 和 90% 置信曲线)

Fig.3 The spectral analysis for *F. profunda* percentage X-axis indicates frequency, Y-Axis stands for power

3 讨论

3.1 相邻海区不同岩芯初级生产力对比

将 MD06-3047 岩芯获取的初级生产力结果与邻近的站位进行对比, 发现不同站位的古生产力记录虽然在整体上存在冰期高一间冰期低的变化趋势, 但是各站位的生产力变化范围以及变化幅度之间差别较大。整体看来位于苏禄海区的 MD97-2141 站位的初级生产力相对较高, 变化范围为 $80\sim 224\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 在过去 200ka 以来古生产力平均值为 $136.8\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[4]。MD06-3050 岩芯次之, 在研究时段 260ka 以来生产力变化范围为 $69.6\sim 225.5\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值 $120\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[32]。MD06-3047 岩芯初级生产力变化幅度以及平均值

略低于 MD06-3050 岩芯。Ph05-5 岩芯的初级生产力最低,变化幅度为 $63 \sim 112.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均值为 $83 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [35]。说明尽管研究区域相近,不同站位的初级生产力受控因素仍存在较大的差别。由于颗石藻是钙质浮游生物,其在海底的保存受到溶解作用的影响,颗石藻的种属会随着深部溶解作用的加强而有所变化,诸如 *Gephyrocapsa* spp., *Emiliania huxleyi* 等易溶种属相对含量会有所减少,而 *F. profunda*, *Calcidiscus leptoporus* 等抗溶种相对含量则有所增加 [36]。Ph05-5 岩芯所在站位的现代水深为 3382m,接近西太平洋海区现代溶跃面深度(约 3400m) [26,27],因此,该站位受到溶解作用较强,导致颗石藻易溶种属减少, *F. profunda* 相对百分含量较高,从而导致初级生产力的评估可能受到影响,相对其他站位显示了低值。

此外造成不同站位岩芯初级生产力差别的另外一个重要原因是鉴定方法的差异。Ph05-5 站位是人工镜下鉴定,而 MD06-3047 岩芯和 MD06-3050 岩芯利用颗石自动鉴定系统进行种属统计,由于自动鉴定系统无法像人工鉴定那样进行视域旋转,可能会漏检到一部分 *F. profunda*,导致人工鉴定的结果得到的古生产力数值往往低于自动鉴定结果 [10,32],因此,在对不同站位数据结果进行对比时,要注意不同方法所产生的影响。

值得一提的是,尽管 MD97-2141 岩芯所在水深为 3633m,比位于本哈姆海台的 MD06-3047, MD06-3050 以及 Ph05-5 岩芯均要深,受溶解作用应该最强,且采用人工鉴定的方法,但是其初级生产力平均值以及变化幅度最高,因此推测在过去的 200ka,苏禄海区表层初级生产力整体高于西菲律宾海,这可能与苏禄海区受较强东亚季风有关 [5]。

3.2 西菲律宾海区初级生产力变化的受控因素

已有的研究表明热带西太平洋气候条件受东亚季风和 ENSO 过程的共同影响 [7,8]。更新世以来东亚季风强度以及 ENSO 过程的发生频率也有了较为深入的研究 [21,25,37,38],然而,到目前为止,在不同时期东亚季风与 ENSO 过程对热带西太平洋生产力的影响,孰重孰轻? 如何评价? 仍旧是热带西太平洋海区古气候研究的难点。借助于最近发表的热带东西太平洋温度梯度的记录 [28] 以及东亚冬季风强度变动指标 [21],可以尝试探讨热带西菲律宾海古生产力变化的影响因素。

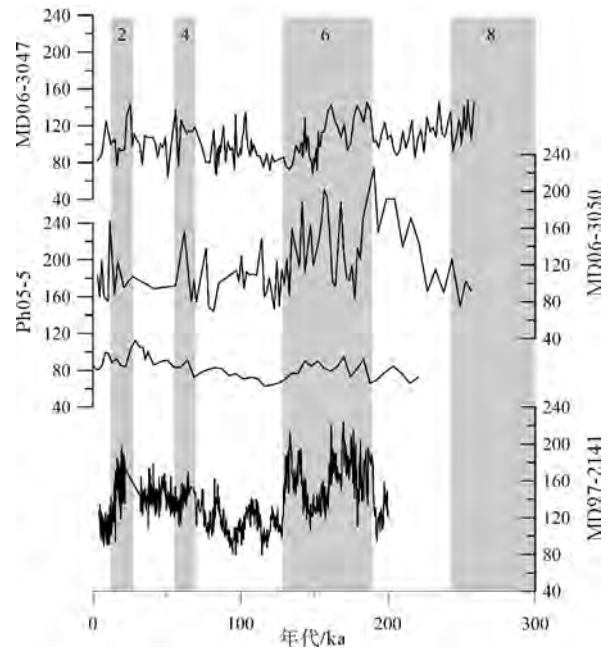


图 4 西太平洋边缘海区 260ka 以来不同站位 *F. profunda* 百分含量对比

MD97-2141 (8°47'N, 121°17'E, 水深 3633m, 苏禄海区) 资料据文献 [4];
Ph05-5 (16°3'N, 124°21'E, 水深 3382m, 本哈姆高原) 资料据文献 [35];
MD06-3050 (15°57.0943'N, 124°46.7747'E; 水深 2967m,
本哈姆高原) 资料据文献 [5, 33, 35]

Fig. 4 Comparison of *F. profunda* % record at different sites in Western Pacific marginal seas in the last 260ka

Data of Ph05-5 (16°3'N, 124°21'E, water depth 3382m, Benham Rise),
MD97-2141 (8°47'N, 121°17'E, water depth 3633m, Sulu sea) and
MD06-3050 (15°57.0943'N, 124°46.7747'E;
water depth 2967m, Benham Rise) (from reference [5, 33, 35])

Beaufort 等通过对赤道太平洋和印度洋 9 个高质量岩芯的颗石藻初级生产力记录进行频谱分析,发现了显著的 30ka 周期和岁差周期,提出类 ENSO 过程是驱动晚更新世低纬大洋初级生产力变化的重要机制 [3]。对 MD06-3047 岩芯 *F. profunda* % 进行频谱分析,同样发现了比较显著的 30ka 周期和岁差周期(图 3),表明该岩芯受到热带 ENSO 过程的影响。在现代热带太平洋,由于信风的作用,形成了自东向西的北赤道流,大量暖水遇到菲律宾岛屿等地形阻隔后积聚在热带西太平洋,因此,热带西太平洋具有相对较厚的温跃层/营养跃层,相对较高的海水表层温度,并与东赤道太平洋温跃层以及表层海水温度形成明显的梯度。当发生 El Niño 时,赤道信风显著减弱,北赤道流减弱,西太平洋暖池的部分温暖海水向东输送,因此,西太平洋温跃层变浅,东太平洋温跃层加深,且表层海水温度有所升高, ΔSST

则相对减少;反之,在 La Niña 年间,东西太平洋 Δ SST 有所增加。古海洋学研究表明,热带太平洋存在长期的类 ENSO 过程^[28,39-43],当东西太平洋 Δ SST 较大时,认为热带太平洋处于长期类 La Niña 状态,反之则为类 El Niño 状态。

从图 4 中可以看出在 MIS 8 后期至 MIS 5a,即 260~80ka,热带东西太平洋温度差值(Δ SST)与 $F_p\%$ 和 PP 表现出一致性,当 Δ SST 较小时, $F. profunda$ 百分含量相对较低,指示营养跃层较浅,对应于较高的初级生产力,热带西太平洋处于类 El Niño 的状态;当 Δ SST 较大时, $F. profunda$ 百分含量相对较高,指示营养跃层加深,恰好对应于较低的初级生产力,此时热带西太平洋对应于类 La Niña 状态。而在该时段,相同岩芯中能够指示东亚冬季风强弱的伊利石/蒙脱石指标,与 PP 以及 $F_p\%$ 曲线相似性较低,因此,认为在 MIS 5a 之前,长期的 ENSO 过程相对于东亚冬季风来说,对热带西太平洋古生产力变化的影响可能更为显著。

然而,自 MIS 5 末期,东西太平洋 Δ SST 的变化与 $F_p\%$ 呈现相反的趋势,即 Δ SST 相对较低的时候,如 MIS 3 期, $F_p\%$ 值相对较高,指示了营养跃层较深,初级生产力相对较低,这与类 El Niño 状态时较浅的温跃层/营养跃层相矛盾,同理,当 Δ SST 较大时,指示了热带西太平洋为长期的类 La Niña 状态,如 MIS 2 期,此时,热带西太平洋应呈现较深的温跃层/营养跃层,然而实际上 $F_p\%$ 显示了低值,指示了较浅的营养跃层,对应着较高的初级生产力。基于以上讨论,推测在 MIS 5a 至晚全新世期间,长期 ENSO 过程并非影响生产力变化的主要因素。实际上,基于单个有孔虫个体的 Mg/Ca 比的海水表层温度指示了在末次冰期冰盛期(LGM)热带太平洋 ENSO 活动有所减弱,进一步支持了我们的推论^[41]。

相反,在 MIS 5a 至末次冰消期,伊利石/蒙脱石比值与初级生产力之间表现了较高的相似性变化(图 5)。伊利石/蒙脱石的高值,指示了东亚冬季风的加强。中尺度铁肥实验表明,对包括热带太平洋在内的很多大洋海区,海洋上层常因缺铁等营养因素而使浮游植物的生长受到限制^[44]。有证据表明,在赤道太平洋中部,冰期大陆矿物悬浮颗粒(风尘)的通量最大可以超过间冰期该通量的 2 倍^[45]。冰期,风尘的增加,会带来更多的铁,很可能会刺激热带赤道太平洋的生物生产力。Zhang 等的研究支持了这一观点,认为过去 550ka 以来,西赤道太平洋生物生产力增加的主要驱动者很可能是来自东亚中部

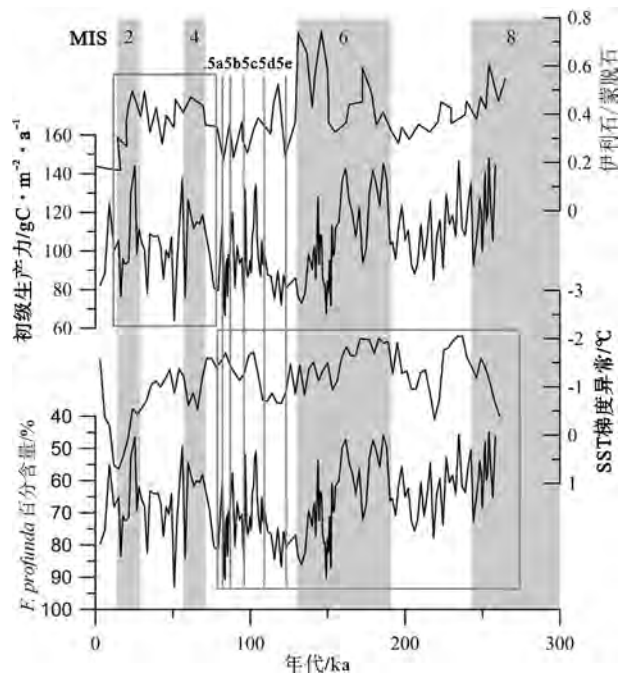


图 5 过去 260ka 以来西菲律宾海 MD06-3047 岩芯初级生产力及 $F. profunda$ 相对百分含量变化与其他古环境指标对比图

自上而下分别为东亚冬季风替代指标——黏土矿物伊利石/蒙脱石变化曲线^[21];基于经验公式计算得到的初级生产力变化曲线(本研究);指示热带太平洋长期 ENSO 过程的热带东西太平洋海水表层温度梯度异常变化曲线(相对于全新世 SST 数值)^[28];颗石藻下透光带属种 $F. profunda$ 相对百分含量变化曲线(本研究)

Fig.5 Correlation between primary productivity and abundance of $F. profunda$ of Core MD06-3047 for the past 260ka, compared with long term ENSO proxy and East Asian Winter Monsoon proxy

The above curve is illite/smectite ratio in clay mineral fraction of core MD06-3047 that could indicate the intensity of the East Asian Winter Monsoon^[21]; Zonal SST gradient anomaly relative to the Holocene values, which represents the SST difference of the western and eastern Pacific based on the Mg/Ca-based SSTs^[28]

大陆的风尘通量^[20]。此外, Kim 等对西太平洋沉积物捕获器样品的分析表明,在 La Niña 强盛的时期,颗粒物通量的增加与季风加强造成的上部水体的混合加强有关^[23]。东亚冬季风的加强一方面使得研究区上部水体混合增加,营养跃层变浅,向上输送的营养物质增加;另一方面加强了风尘的输入,刺激了上部水体浮游植物的生长。尽管不能定量地评估风尘通量对生产力的影响,但可以肯定的是,东亚季风加强以及大陆的干旱条件,在冰期向海洋输送了大量的大陆风尘,进而影响热带西太平洋生产力的增加^[21]。苏禄海 MD97-2141 岩芯也显示了生产力

在冰期增加,认为与东亚冬季风的加强有关,并且提出在过去的 8 万年间,苏禄海区存在 8 个显著的初级生产力增加事件,对应于该时期中国黄土记录的东亚季风的加强^[4]。而当伊利石/蒙脱石出现低值时,即 MIS3 期,东亚冬季风相对较弱,上部水体混合减弱,风尘输入也有所减少,对应于上部水体相对较低的初级生产力。

东亚季风与 ENSO 过程之间存在着复杂的耦合过程^[46],一定程度上解释了 MD06-3047 岩芯呈现较不明显的冰期-间冰期旋回变化以及较强的千年尺度变化。通过多指标对比研究表明,在 260~80ka,西菲律宾海区初级生产力受到长期 ENSO 过程下营养跃层/温跃层变动的的影响相对较强;而在 80 ka 以来,东亚冬季风相对于长期 ENSO 过程来说,对该区初级生产力的影响可能更为显著。

4 结论

对位于西菲律宾海的 MD06-3047 岩芯,进行颗石藻化石鉴定统计,获取 *F. profunda* 百分含量,并基于此恢复了该海区 26 万年以来的初级生产力和营养跃层的变化历史,发现初级生产力冰期旋回的变动特征并不明显。频谱分析结果显示西菲律宾海上层水体结构具有明显的轨道周期和千年尺度变化周期,说明该区的初级生产力的受控因素相对较为复杂。

(1) 26 万年到 8 万年之间,东西太平洋温度梯度(Δ SST)与初级生产力变动具有较强的相似性,指示了长期 ENSO 过程对西菲律宾海初级生产力的影响相对于东亚季风对初级生产力的影响更为显著,认为在 MIS7 初期, MIS6 期前半段以及 MIS5 中后期,热带太平洋呈现类 El Niño 状态,对应研究区较浅的营养跃层/温跃层,初级生产力相对较高;其余时段热带太平洋则处于长期的类 La Niña 状态,对应较深的营养跃层/温跃层,初级生产力相对较低。

(2) 8 万年以来,西菲律宾海初级生产力受东亚冬季风的影响加强或者 ENSO 状态的减弱,可能掩盖了长期 ENSO 过程对生产力影响的信号。冰期时东亚冬季风加强,一方面可以加强上部水体的混合作用,另一方面增加了来自东亚中部的风尘物质的输入,两者均有利于初级生产力的增加;而在间冰期,东亚冬季风减弱,上部水体混合作用减少,同时风尘物质输入量也显著降低,因此初级生产力相对降低。

致谢:本研究使用的沉积物样品由国际海洋全球变化研究 Marco Polo IMAGES XIV 航次提供。感谢中国科学院南海海洋研究所苏翔博士在实验工作中的大力帮助,感谢中国科学院海洋研究所贾奇博士提供的浮游有孔虫表层海水温度数据。在此一并感谢。

参考文献 (References)

- [1] Nair R, Ittekkot V, Manganini S, et al. Increased particle flux to the deep ocean related to monsoons[J]. *Nature*, 1989, 338(6218): 749-751.
- [2] Beaufort L, Lancelot Y, Camberlin P, et al. Insolation cycles as a major control of equatorial Indian Ocean primary production[J]. *Science*, 1997, 278(5342): 1451-1454.
- [3] 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.
- [4] Garidel-Thoron T, Beaufort L, Linsley B K, et al. Millennial-scale dynamics of the East Asian winter monsoon during the last 200000 years[J]. *Paleoceanography*, 2001, 16(5): 491-502.
- [5] Beaufort L, De Garidel-Thoron T, Linsley B, et al. Biomass burning and oceanic primary production estimates in the Sulu Sea area over the last 380 kyr and the East Asian monsoon dynamics[J]. *Marine Geology*, 2003, 201(1-3): 53-65.
- [6] Liu C, Wang P, Tian J, et al. Coccolith evidence for Quaternary nutricline variations in the southern South China Sea[J]. *Marine Micropaleontology*, 2008, 69(1): 42-51.
- [7] Li T, Zhao J, Sun R, et al. The variation of upper ocean structure and paleoproductivity in the Kuroshio source region during the last 200 kyr[J]. *Marine Micropaleontology*, 2010, 75(1-4): 50-61.
- [8] 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): PA1208.
- [9] Li T, Zhao J, Nan Q, et al. Palaeoproductivity 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.
- [10] Su X, Liu C, Beaufort L, et al. Late Quaternary coccolith records in the South China Sea and East Asian monsoon dynamics[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 111: 88-96.
- [11] Bordiga M, Beaufort L, Cobianchi M, et al. Calcareous plankton and geochemistry from the ODP site 1209B in the NW Pacific Ocean (Shatsky Rise): New data to interpret calcite dissolution and paleoproductivity changes of the last 450 ka[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 371: 93-108.
- [12] 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 nannofossil evidence for variations in Quaternary surface water paleoproductivity in the southern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(4): 61-66.]
- [13] 李铁刚, 赵京涛, 孙荣涛, 等. 250kaBP 以来西太平洋暖池中心区——ontong Java 海台古生产力演化[J]. 第四纪研究, 2008, 28(3): 447-457. [LI Tiegang, ZHAO Jingtao, SUN Rongtao, et al. Paleoproductivity evolution in the ontong Java plateau-center of the western Pacific warm pool during the last 250ka[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(3): 447-457.]
- [14] 赵京涛, 李铁刚, 常凤鸣, 等. 西太平洋暖池核心区 MIS 7 期以来的古生产力变化: 类 ENSO 式过程的响应[J]. 海洋学报, 2008, 30(4): 87-94. [ZHAO Jingtao, LI Tiegang, CHANG Fengming, et al. Variations of paleoproductivity in the nuclear region of western Pacific warm pool since MIS 7: response to ENSO-like process[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(4): 87-94.]
- [15] 赵京涛, 李铁刚, 李军, 等. 中全新世以来南冲绳海槽古生产力变化的颗石藻化石证据[J]. 科学通报, 2012, 57(26): 2523-2529. [ZHAO Jingtao, LI Tiegang, LI Jun, et al. Paleoproductivity variations in the southern Okinawa trough since the middle Holocene: Calcareous nannofossil records[J]. Chin Sci. Bull., 2012, 57(26): 2523-2529.]
- [16] 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(2): 71-76. [SU Xiang, LIU Chuanlian, LI Jianru. Coccolith evidence for variations in upper ocean water in upwelling area off the coast of Vietnam for the past 450000 years[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(2): 71-76.]
- [17] 金晓波, 刘传联, 褚智慧. 末次冰消期以来苏拉威西海颗石藻化石记录与古海洋变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(4): 131-137. [JIN Xiaobo, LIU Chuanlian, CHU Zhihui. Coccolithophore records and their response to paleoclimatic and paleoenvironmental changes in Sulawesi Sea from the last deglacial[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(4): 131-137.]
- [18] 梁丹, 刘传联, 苏翔. 西太平洋暖池核心区晚第四纪颗石藻属种变化及对环境演化的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(4): 115-121. [LIANG Dan, LIU Chuanlian, SU Xiang. Coccolith variations in central west Pacific warm pool and their response to environmental change during late Quaternary[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(4): 115-121.]
- [19] Tang Z, Li T, Chang F, et al. Paleoproductivity evolution in the West Philippine Sea during the last 700 ka[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(2): 435-444.
- [20] Zhang J, Wang P, Li Q, et al. Western equatorial Pacific productivity and carbonate dissolution over the last 550 kyr: Foraminiferal and nannofossil evidence from ODP Hole 807A [J]. Marine Micropaleontology, 2007, 64(3): 121-140.
- [21] Xu Z, Li T, 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.
- [22] Wiesner M G, Zheng L, Wong H K, et al. Fluxes of Particulate matter in the South China Sea, in Particle Flux in the Ocean[M]. Edited by J. Ittekkot et al., John Wiley, New York, 1996:293-312.
- [23] Kim H J, Hyeong K, Park J-Y, et al. Influence of Asian monsoon and ENSO events on particle fluxes in the western subtropical Pacific[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2014, 90: 139-151.
- [24] Hilde T W, Chao-Shing L. Origin and evolution of the West Philippine Basin: a new interpretation[J]. Tectonophysics, 1984, 102(1-4): 85-104.
- [25] Wan S, Yu Z, 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.
- [26] Berger W, Bonneau M, Parker F. Foraminifera on the deep-sea floor-lysocline and dissolution rate[J]. Oceanologica Acta, 1982, 5(2): 249-258.
- [27] Groetsch J, Wu G, Berger W H. Carbonate saturation cycles in the western equatorial Pacific. [C]// Cycles and Events in Stratigraphy[C]. Springer, Heidelberg, 1991: 110-125.
- [28] Jia Q, Li T, Xiong Z, et al. Hydrological variability in the western tropical Pacific over the past 700kyr and its linkage to Northern Hemisphere climatic change[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 493: 44-54.
- [29] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. Paleoceanography, 2005, 20(1): PA1003.
- [30] Okada H, Honjo S. The distribution of oceanic coccolithophorids in the Pacific[C]. Deep Sea Research, 1973, 20(4): 355.
- [31] Molfino B, McIntyre A. Precessional forcing of nutricline dynamics in the equatorial Atlantic[J]. Science, 1990, 249(4970): 766-769.
- [32] Sun H, Li T, Liu C, et al. Variations in the western Pacific warm pool across the mid-Pleistocene: Evidence from oxygen isotopes and coccoliths in the West Philippine Sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 483: 157-171.
- [33] Sun H, Li T, Chang F, et al. Deep-sea carbonate preservation in the western Philippine Sea over the past 1Ma[J]. Quaternary International, 2017, 459: 101-115.
- [34] Grelaud M, Beaufort L, Cuvén S, et al. Glacial to interglacial primary production and El Niño-Southern Oscillation dynamics inferred from coccolithophores of the Santa Barbara Basin [J]. Paleoceanography, 2009, 24(1): PA1203.
- [35] 赵京涛, 李铁刚, 常凤鸣, 等. 近 190kaBP 以来西太平洋暖池北缘上层海水结构和古生产力演化特征及其控制因素——

- 来自钙质超微化石,有孔虫和同位素的证据[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(4): 305-311. [ZHAO Jingtao, LI Tiegang, CHANG Fengming, et al. Evolution in upper water structure and paleoproductivity in the northern margin of the western Pacific warm pool and its forcing mechanism during the last 190ka BP evidence from nannofossil, foraminifera and their isotope composition [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2008, 39(4): 305-311.]
- [36] Fernando A G S, Peleo-Alampay A M, Lucero E S, et al. Surface sediment distribution of *Florisphaera profunda* in the South China Sea: an effect of dissolution? [J]. J. Nannoplankton Res., 2007, 29(2): 102-107.
- [37] Sun X J, Luo Y L, Huang F, Tian J, and Wang P X. Deep-sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of East Asian monsoon[J]. Marine Geology, 2003, 201(1-3): 97-118.
- [38] Clement A C, Seager R, and Cane M A. Orbital controls on the El Niño/Southern Oscillation and the tropical climate[J]. Paleoclimatology, 1999, 14(4): 441-456.
- [39] Stott L, Poulsen C, Lund S, et al. Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scales [J]. Science, 2002, 297(5579): 222-226.
- [40] Koutavas A, Joanides S. El Niño-Southern Oscillation extreme in the Holocene and Last Glacial Maximum[J]. Paleoclimatology, 2012, 27(4): PA4208.
- [41] Ford H L, Ravelo A C, Polissar P J. Reduced El Niño-Southern Oscillation during the last glacial maximum[J]. Science, 2015, 347(6219): 255-258.
- [42] Liu Z, Lu Z, Wen X, et al. Evolution and forcing mechanisms of El Niño over the past 21000 years [J]. Nature, 2014, 515(7528): 550.
- [43] Leduc G, Vidal L, Cartapanis O, et al. Modes of eastern equatorial Pacific thermocline variability: Implications for ENSO dynamics over the last glacial period[J]. Paleoclimatology, 2009, 24(3): PA3202.
- [44] Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E, et al. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean[J]. Nature, 1996, 383(6600): 495-501.
- [45] Anderson R, Fleisher M, Lao Y. Glacial-interglacial variability in the delivery of dust to the central equatorial Pacific Ocean[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 242(3): 406-414.
- [46] Wang B, Wu R, Fu X. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [J]. Journal of Climate, 2000, 13(9): 1517-1536.