

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

赵京涛^{①②③}, 李铁刚^{①*}, 李军^②, 胡邦琦^{②③}

① 中国科学院海洋地质与环境地质重点实验室, 青岛 266071;

② 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

③ 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

* 联系人, E-mail: tgli@ms.qdio.ac.cn

2012-02-27 收稿, 2012-04-27 接受

中国科学院知识创新工程重点项目(KZCX2-YW-221)、国家自然科学基金(40906033, 40976036)和中国科学院边缘海地质重点实验室开放基金(MSGL09-11, MSGL12-01)资助

摘要 利用取自南冲绳海槽的 MD05-2908 岩芯中颗石藻化石碳同位素和颗石藻化石下透光带属种 *Florisphaera profunda* 相对百分含量(%Fp)变化, 结合 17 个 AMS¹⁴C 测年数据, 重建了该海区 6.8 ka BP 以来高分辨率的表层海水初级生产力变化, 并对初级生产力受控机制进行探讨。颗石藻化石碳同位素和 %Fp 转换函数结果指示该海区 6.8 ka BP 以来初级生产力呈波动降低趋势, 主要受东亚夏季风降雨有关的陆源输入减弱影响。约 4~2 ka BP 的 PME 事件对应的初级生产力相对高值主要是受黑潮流减弱影响; 而 6.8~4.8 ka BP 期间的初级生产力高值主要受东亚夏季风强降雨输入更多陆源物质控制, 其值也相对高于 4~2 ka BP。

关键词

中全新世
南冲绳海槽
初级生产力
颗石藻化石

相对于北半球高纬区冰盖变化, 低纬热带过程对全球气候变化的影响主要体现在表层海水初级生产力对全球碳循环过程的控制^[1]。海洋表层的浮游植物通过光合作用将大气中的 CO₂“泵”入海底, 这一过程对调节全球碳循环发挥着至关重要的作用^[2]。位于黑潮主流轴之下的冲绳海槽是东海晚第四纪以来一直保持连续沉积的地区, 高温、高盐、寡营养的黑潮主流强烈影响着该海区的上层海水结构和初级生产力变化, 西侧与东亚季风相关的东海陆架陆源营养物质的输入也会在该区沉积物中留有印记。众多学者利用生物分子标志物^[3,4]、生物硅和有机碳等生源组分^[5,6]以及底栖有孔虫^[7,8]对晚第四纪以来冲绳海槽不同地区的古生产力演化进行了深入的研究, 探讨了陆源物质输入和古环境演化对海洋古生产力的影响, 取得了一系列重要成果。

冲绳海槽南部的高沉积速率一直吸引着众多学

者的关注^[9~11]。如大洋钻探计划(ODP)195 航次的 ODP-1202 孔晚全新世以来平均沉积速率高达 325 cm/ka^[12], 本文所选取的 MD05-2908 孔在 6.8 ka BP 以来平均沉积速率更是高达 500 cm/ka, 这为开展晚全新世以来高分辨率古环境演化研究提供了极好素材。对该孔的古环境研究已有不少成果, 如南青云等人^[3]利用长链不饱和烯酮含量及物质通量重建了 7000 a 以来古海洋生产力变化; 李冬玲等人^[13]利用硅藻属种分布反演了 1000 a 以来气候的干、湿变化; 而李传顺等人^[14]则探讨了该孔 6.8 ka BP 以来沉积速率及物源变化特征。颗石藻是海洋中主要的初级生产者之一, 其生命活动与海洋的水文条件及营养水平密切相关^[15,16], 因此沉积物中的颗石藻化石是上层海水结构变化和初级生产力信息的良好载体。本文以 MD05-2908 孔颗石藻化石指标为基础, 定性的反演冲绳海槽南部 6.8 ka BP 以来表层海水初级生产

力(PP)变化趋势,并探讨其受控机制.

1 研究区域概况

冲绳海槽南部地区(图 1)为典型的亚热带季风气候,温度、湿度和大气环流的季节性变化强烈影响着该水文条件^[19]. 起源于赤道太平洋的黑潮流经台湾东北部的 I-Lan 海脊进入冲绳海槽,携带了大量的热量和水汽由西太平洋暖池向中纬度的北太平洋输送^[20]. 黑潮的强弱变化影响着南冲绳海槽表层海水温度(SST)变化,黑潮增强,该区域 SST 升高. 南冲绳海槽表层海水盐度(SSS)和 PP 季节性变化受季风过程影响明显,与夏季风相关的长江和台湾河流巨大径流量引发大量淡水及营养物质输入,可导致冲绳海槽南部 SSS 降低和 PP 升高^[21].

夏季充足的降雨搬运的台湾山脉剥蚀物质是南冲绳海槽主要的物质来源^[22],每年约有 6~9 Mt 的沉积物通过台湾北部的兰阳溪进入南冲绳海槽,并且通常表现为脉冲式输入,受控于一些突发气候事件,如地震、台风和洪水等^[23]. 另外,长江每年向东海输入 240~260 Mt 沉积物^[24],其中小部分源于长江悬浮物质和陆架再沉积物质经由东海沿岸流的长距离搬运进入南冲绳海槽^[25],东海陆架东南侧棉花峡谷以

及北棉花峡谷是输送东海陆架沉积物至南冲绳海槽的重要通道^[26].

2 材料与方法

MD05-2908 孔(24°48.04'N, 122°29.35'E, 水深 1276 m)为 2005 年 6 月中法联合 IMAGES147 航次,由“Marion Dufresne”号极地考察船在冲绳海槽南部(台湾东北海域)利用 Calypso 重力活塞取样器所获取(图 1). 该岩芯长 3416 cm,连续沉积,无明显浊流沉积. 岩性较为均一,0~979 cm 为黑灰色黏土;979~3416 cm 为黑灰色粉砂质黏土,含数层厚度不等的粗粉砂夹层. 本次研究按 8 cm 间隔取样 420 个进行颗石藻化石稳定同位素分析;按 10~18 cm 间隔取样 203 个进行颗石藻化石下透光带属种 *Florisphaera profunda* 相对百分含量分析.

用于稳定同位素分析的颗石藻样品参照刘传联等人^[27]的实验处理方法. 处理后的样品在中国科学院地球环境研究所利用 MAT252 气体质谱仪进行测试分析,分析精度 $\delta^{13}\text{C}$ 为 0.08×10^{-3} . *F. profunda* 的鉴定工作在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室进行,采用传统的涂片法,鉴定和统计在 Leica 偏光显微镜下放大 1600 倍进行,超微化石总数的统计个体数>300 粒, *F. profunda* 相对百分含量 $\%F_p = (F. profunda \text{ 盘片数量} / \text{颗石总数}) \times 100$.

根据 MD05-2908 孔年代框架^[14],岩芯底部年龄为 6790 cal a BP,全孔为中全新世以来的沉积产物. 6790 cal a BP 以来 MD05-2908 孔沉积速率变化范围为 0.18~2.12 cm/a,平均为 0.50 cm/a. 该孔极高的沉积速率为我们进行高分辨率古环境分析研究提供了极好的素材,其中钙质超微化石稳定同位素样品平均分辨率高于 17 a, *F. profunda* 相对百分含量分析平均分辨率高于 34 a.

3 结果与讨论

3.1 6.8 ka BP 以来 MD05-2908 孔 *F. profunda* 相对百分含量和颗石藻化石 $\delta^{13}\text{C}$ 变化

如图 2(a)和(b)所示,6.8 ka BP 以来 MD05-2908 孔 *F. profunda* 相对百分含量和颗石藻化石 $\delta^{13}\text{C}$ 变化分别为 30%~58%和 -2.34‰~-0.14‰之间,平均分别为 44%和 -0.90‰. 6.8~4.8 ka BP 期间, *F. profunda* 相对百分含量较低,平均为 42%,该阶段颗石藻化石

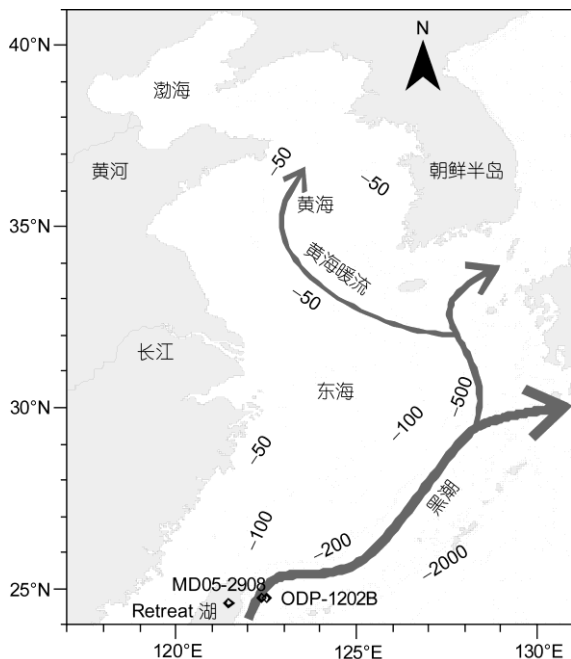


图 1 冲绳海槽南部 MD05-2908 孔站位及 ODP-1202^[12]站位和 Retreat 湖^[17]位置图
图中所示黑潮据文献^[18]

$\delta^{13}\text{C}$ 较高, 平均为 -0.66‰ . 4.8 ka BP 之后, 颗石藻化石 $\delta^{13}\text{C}$ 经历了先升高后降低然后再升高的变化过程, *F. profunda* 相对百分含量波动幅度较颗石藻化石 $\delta^{13}\text{C}$ 更为剧烈, 但整体上与 $\delta^{13}\text{C}$ 变动趋势相反. 颗石藻化石 $\delta^{13}\text{C}$ 在 4~2 ka BP 之间表现出相对高值区, 平均为 -0.80‰ , 略低于 6.8~4.8 ka BP 段, 该时段 *F. profunda* 相对百分含量相对偏低, 平均为 44%.

3.2 6.8 ka BP 以来南冲绳海槽表层海水初级生产力变化

颗石藻仅在透光层生长和钙化, 因此携带表层水体的同位素特征. 早在 20 世纪 70 年代中期, 学术界就已经认识到颗石藻稳定同位素组成的古海洋学应用潜力^[28]. Goodney 等人^[29]在对印度洋表层沉积物中颗石藻化石碳同位素的研究中发现, 虽然颗石藻化石与海水之间的碳同位素不平衡, 但其 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要受控于海水初级生产力. 近期, 来自中国南海南部、西太平洋暖池核心区和西菲律宾海等中低纬度海区的第四纪沉积物记录表明, 颗石藻化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以定性地反应表层海水 PP 的高低, $\delta^{13}\text{C}$ 值低时, PP 也低^[27,30-32].

在热带低纬地区, 下透光带(大约 60~180 m)颗石藻组合以 *F. profunda* 为主, 而其他大多数种属则生活在上透光带(0~60 m)^[33]. 透光带生产力高时, *F. profunda* 相对百分含量则低. 因此, *F. profunda* 相对百分含量是表层海水 PP 变化的一项可靠指标. Beaufort 等人^[34]利用印度洋 96 个表层沉积样品中 *F. profunda* 百分含量, 结合卫星获得的 PP 数据, 得出初级生产力转换方程($\text{PP}=617-(279 \times \log(\% \text{Fp}+3))$)($\% \text{Fp}$ 代表 *F. profunda* 相对百分含量), 同时指出纬度范围是该方程的主要限制条件. 随后, Beaufort 等人^[35]将该转换方程应用于赤道印度洋和太平洋的 9 个岩芯中, 取得良好结果. 尽管 MD05-2908 孔的纬度位置(24.8°N)不在其适用范围($20^\circ\text{S}\sim 20^\circ\text{N}$)内, 但由于该海域具有强烈的暖水来源性质, 本研究尝试利用该转换方程重建 MD05-2908 孔的 PP($\% \text{Fp}$)记录, 并将其与颗石藻化石的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录进行对比, 探讨中全新世以来的南冲绳海槽地区表层海水 PP 的演化过程. MD05-2908 孔表层样品 PP($\% \text{Fp}$)值为 $135 \text{ gC (m}^2 \text{ a)}^{-1}$, 与 Gong 等人^[21]通过实测资料估算的该区夏季表层 PP 值 $358 \pm 49 \text{ mgC (m}^2 \text{ d)}^{-1}$ (相当于 $131 \pm 18 \text{ gC (m}^2 \text{ a)}^{-1}$)十分相近, 体现利用前述转换方程估算 PP 比较可靠.

6.8 ka BP 以来 PP($\% \text{Fp}$)变化为 118~193 $\text{gC (m}^2 \text{ a)}^{-1}$ 之间, 平均分别为 $151 \text{ gC (m}^2 \text{ a)}^{-1}$ (图 2 (c)). 6.8~4.8 ka BP 期间, PP($\% \text{Fp}$)位于平均达 $156 \text{ gC (m}^2 \text{ a)}^{-1}$ 的高值区, 与该阶段颗石藻化石 $\delta^{13}\text{C}$ 较高的平均值指示的较高 PP 一致. 4.8 ka BP 之后, PP($\% \text{Fp}$)经历了先升高后降低然后再升高的变化过程, 整体上与 $\delta^{13}\text{C}$ 反映的 PP 变动趋势相似(图 2(b)和(c)). 值得关注的是二者共同体现的 PP 高值区介于 4~2 ka BP 之间, 与指示黑潮减弱的普林虫低值事件(PME)^[10,36]相对应. 如图 2(b)和(c)所示, MD05-2908 孔颗石藻化石碳同位素和 $\% \text{Fp}$ 转换方程指示的 6.8 ka BP 以来 PP 总体上呈现波动性降低.

3.3 6.8 ka BP 以来南冲绳海槽表层海水初级生产力影响机制探讨

前人对冲绳海槽北部和中部的研究表明 10 ka 乃至 100 ka 以来古生产力的演变与陆源输入物质关系密切, 进而受东亚季风的影响明显^[40,41]. MD05-2908 孔位于冲绳海槽东北-西南倾斜的南端槽底, 西面直对台湾兰阳溪河口三角洲, 正北方自西向东依次为基隆海谷、棉花峡谷和北棉花峡谷, 这种地形特征使得该孔所在位置极易接受来自东海陆架和台湾陆源物质. 邻近的 ODP1202 孔矿物和地球化学指标表明全新世以来该区物源主要来自台湾东北部河流^[42]. 现代沉积动力观测表明大量的台湾山脉剥蚀物质在夏季被搬运至南冲绳海槽地区^[22]. 而且东亚夏季风引发强降雨, 使得台湾河流携带大量陆源物质进入冲绳海槽南部, 加强上层海水扰动, 下层营养物质上翻, 营养跃层变浅, PP 增加; 此外, 大量陆源营养物质的输入同样也会增加 PP. 因此, MD05-2908 孔所记录的古生产力演变对东亚夏季风变化的响应比冲绳海槽其他地区更加敏感.

中全新世北半球夏季太阳辐射量增加, 导致气候季节性对比增强^[43]. 数值模拟结果表明, 中全新世夏季增强的亚洲低压和太平洋高压强化了海陆压力梯度, 导致东亚夏季风明显增强^[44]. 相对于中全新世, 晚全新世北半球太阳辐射量降低^[37](图 2(d)), 减弱了将 ITCZ(副热带辐合带)“拖离”赤道的能力, 对降雨有绝对影响作用的 ITCZ 相应南移^[38](图 2(e)), 东亚夏季风减弱^[39](图 2(f)). 与 MD05-2908 孔位置较近的台湾东北部 Retreat 湖的 TOC 含量指示晚全新世东亚夏季风降雨输入明显低于中全新世^[17](图 2 (g)).

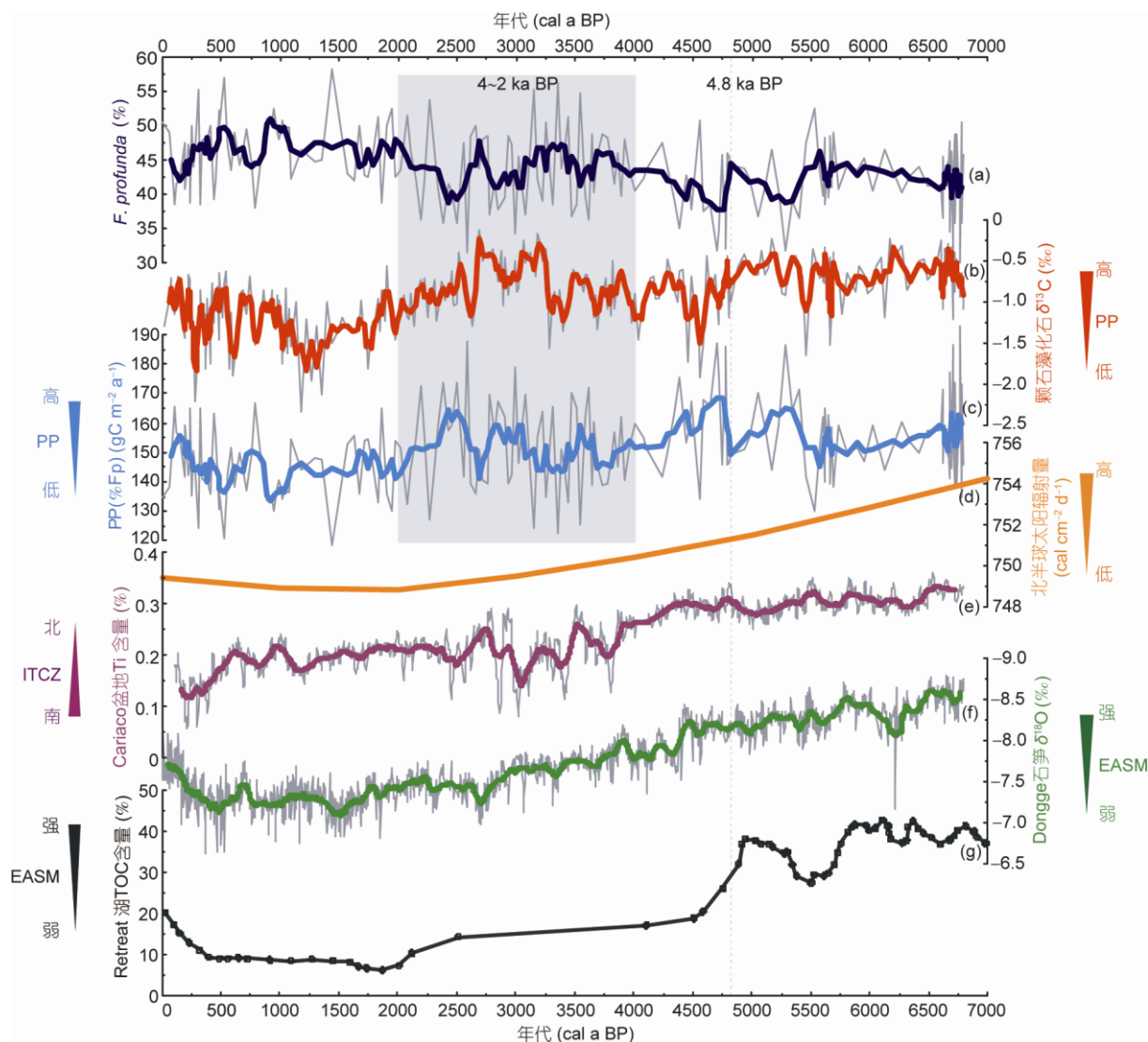


图2 6.8 ka BP 以来颗石藻化石 %Fp (a), $\delta^{13}\text{C}$ (b), PP(%Fp) (c), 北半球太阳辐射量^[37] (d), Cariaco 盆地 Ti 含量^[38] (e), Dongge 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[39] (f) 和 Retreat 湖 TOC 含量^[17] (g) 变化对比

中全新世以来, 东亚夏季风逐渐减弱这一变化特征在亚洲季风区域内诸多记录中都有体现, 例如中国江西定南泥炭和东北泥炭记录^[45,46]、中国南部 Dongge 石笋和湖北神农架和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[47,48]、中国广东湛江湖光岩玛珉湖孢粉记录^[49]等。晚全新世以来东亚夏季风减弱, 导致台湾河流陆源物质输入减少, 南冲绳海槽海域上层海水结构较为稳定, 营养跃层较深, PP 较低, 这与 MD05-2908 孔颗石藻化石碳同位素和 %Fp 转换方程指示的 6.8 ka BP 以来 PP 总体上呈现波动性降低趋势是一致的。

位于南冲绳海槽的 MD05-2908 孔位于黑潮主流经台湾东北部的 I-Lan 海脊进入冲绳海槽的拐角处,

黑潮的强弱变化明显影响着该海区上层水体的水文条件。起源于北赤道流的黑潮, 携带大量高温、高盐、寡营养的赤道表层水体经台湾东北部进入冲绳海槽, 当黑潮增强时, 台湾东北部海区 SST 升高, 营养跃层和温跃层加深, 导致 PP 降低。

4~2 ka BP 期间, MD05-2908 孔颗石藻化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 PP(%Fp) 共同指示 PP 为较为稳定的相对高值区 (图 2(b) 和 (c)), 此阶段与指示黑潮减弱的 PME 事件^[10,36,50] 发生时间大体一致。黑潮减弱, 代表着北赤道流减弱, 赤道太平洋上空信风减弱, 有利于 El Niño 事件爆发。秘鲁北部地质考古学证据显示 ~5 ka BP 之后 ENSO 活动性增强^[51], 来自南美洲西北厄瓜

多尔的高山湖泊风暴沉积记录同样证明了现代周期性 ENSO 事件始于~5 ka BP, 而 El Niño 事件爆发频率性在~3.5~2.6 ka BP 之间尤其高^[52]. Koutavas 等人^[53]利用浮游有孔虫 Mg/Ca SST 反演了全新世以来赤道太平洋东西温度梯度变化, 表明约 4 ka BP 以来东西赤道太平洋的温度梯度减小, El Niño 事件爆发频繁. 约 5~2 ka BP 热带西太平洋 SST 温度下降 1.6℃^[54], 赤道东西太平洋 SST 梯度减小, 暗示着该时间段 El Niño 事件盛行. El Niño 状态下的海洋-大气相互作用导致热带太平洋上空的 ITCZ 南向移动^[55], 引发东亚季风季节性减弱, 夏季风减弱. 约 4~2 ka BP 亚洲夏季风减弱事件在亚洲季风影响区域多处都有体现, 如台湾东北部 Retreat 湖于 4.5~2.1 ka BP 由于季风降雨骤减出现沉积间断^[17]; 阿曼北部 Hoti 溶洞石笋生长记录在 5.2~2.5 ka BP 出现间断^[56], 表明该时间段印度季风降雨减弱; 中国中部湖北神农架山宝洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值指示 4.4~2.1 ka BP 东亚夏季风减弱, 该时段为降水较少的干旱期^[48].

由上述讨论可以看出, 在 4~2 ka BP 期间, 东亚夏季风降雨减弱导致陆源输入减少并没有造成南冲绳海槽 PP 明显降低. 相反, 该时段黑潮高温、寡营养水体输入减弱引发的南冲绳海槽营养跃层变浅, 反而导致该区域 PP 相对较高. 4~2 ka BP 期间 $\delta^{13}\text{C}$ 平

均为-0.80‰, PP(%Fp)平均为 151 gC (m² a)⁻¹, 这两项 PP 指标都反映该时段 PP 低于 6.8~4.8 ka BP ($\delta^{13}\text{C}$ 平均值为-0.66‰, PP(%Fp)平均为 156 gC (m² a)⁻¹). 由图 2(d)~(g)可以看出, 与 4~2 ka BP 相比, 6.8~4.8 ka BP 期间北半球太阳辐射量更高, ITCZ 纬度位置更加北移, 东亚夏季风引发的降雨输入更强. 但是来自该孔不饱和烯酮数据表明, 6.8~4.8 ka BP 期间 SST 高于 4~2 ka BP^[57]. 前人研究也证明中全新世黑潮强于晚全新世^[10,36,58]. 由此可见, 与 4~2 ka BP 相比, 6.8~4.8 ka BP 的 PP 更高主要受控于东亚夏季风降雨输入更强而黑潮增强的影响并不明显, 这表明海洋初级生产力的变化受多种因素耦合的影响.

4 结论

通过分析颗石藻化石碳同位素和下透光带属种 *F. profunda* 相对百分含量变化, 结合 17 个 AMS¹⁴C 测年数据, 重建了中全新世以来南冲绳海槽 MD05-2908 孔高分辨率的表层海水初级生产力变化. 6.8 ka BP 以来南冲绳海槽初级生产力呈波动式降低趋势, 该变化主要受控于与东亚夏季风降雨有关的陆源输入逐渐减弱. 约 4~2 ka BP 的 PP 相对高值主要受控于黑潮流减弱, 6.8~4.8 ka BP 的 PP 高值区主要受东亚夏季风强降雨输入更多陆源物质影响, 其值也相对高于 4~2 ka BP.

参考文献

- 汪品先. 气候演变中的冰和碳. 地学前缘, 2002, 9: 85-93
- Archer D, Winguth A, Lea D, et al. What caused the glacial/interglacial atmospheric $p\text{CO}_2$ cycles? Rev Geophys, 2000, 38: 159-189
- 南青云, 李铁刚, 陈金霞, 等. 南冲绳海槽 7000 a BP 以来基于长链不饱和烯酮指标的古海洋生产力变化及其与气候的关系. 第四纪研究, 2008, 28: 482-490
- 邢磊, 赵美训, 张海龙, 等. 冲绳海槽中部过去 15 ka 来浮游植物生产力和种群结构变化的生物标志物重建. 科学通报, 2008, 53: 1448-1455
- 黄小惠, 王汝建, 翦知潜, 等. 全新世冲绳海槽北部表层海水温度和初级生产力对黑潮变迁的响应. 地球科学进展, 2009, 24: 652-661
- 窦衍光, 杨守业, 唐珉, 等. 冲绳海槽 28 ka 以来陆源物质输入和古环境演化的生源组分记录. 第四纪研究, 2011, 31: 236-243
- 翦知潜, 李保华, Pflaymann U, 等. 西太平洋晚全新世变冷事件. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26: 461-466
- 李铁刚, 向荣, 孙荣涛, 等. 冲绳海槽中南部 18 ka 以来的底栖有孔虫与底层水演化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 163-170
- 翦知潜, 陈荣华, 李保华. 冲绳海槽南部 20 ka 来深水底栖有孔虫的古海洋学记录. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26: 467-473
- Li B H, Jian Z M, Wang P X. *Pulleniatina obliquiloculata* as a paleoceanographic indicator in the southern Okinawa Trough during the last 20000 years. Mar Micropaleontol, 1997, 32: 59-69
- Li T G, Liu Z X, Hall M A, et al. Heinrich event imprints in the Okinawa Trough: Evidence from oxygen isotope and planktonic foraminifera. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2001, 176: 133-146
- Wei K Y. Late Quaternary sedimentation and paleoceanography in the Southern Okinawa Trough. ODP Synthesis: Site 1202. 2006
- 李冬玲, 蒋辉, 李铁刚, 等. 南冲绳海槽 1000 年以来的硅藻记录及古环境. 科学通报, 2011, 56: 589-597

- 14 李传顺, 江波, 李安春, 等. 冲绳海槽西南端中全新世以来的沉积速率与物源分析. 科学通报, 2009, 54: 1303–1310
- 15 Okada H, Wells P. Late Quaternary nannofossil indicators of climate change in two deep-sea cores associated with the Leeuwin Current off Western Australia. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1997, 131: 413–432
- 16 Beaufort L, De Garidel-Thoron T, Linsley B K, 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. *Mar Geol*, 2003, 201: 53–65
- 17 Selvaraj K, Arthur Chen C T, Lou J Y, et al. Holocene weak summer East Asian monsoon intervals in Taiwan and plausible mechanisms. *Quat Int*, 2011, 229: 57–66
- 18 Ijiri A, Wang L J, Oba T, et al. Paleoenvironmental changes in the northern area of the East China Sea during the past 42000 years. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 219: 239–261
- 19 Lee H J, Chao S Y. A climatological description of circulation in and around the East China Sea. *Deep-Sea Res Part II*, 2003, 50: 1065–1084
- 20 Hsin Y C, Wu C R, Shaw P T. Spatial and temporal variations of the Kuroshio east of Taiwan, 1982–2005: A numerical study. *J Geophys Res*, 2008, 113: C04002
- 21 Gong G C, Shiah F K, Liu K K, et al. Spatial and temporal variation of chlorophyll *a*, primary productivity and chemical hydrography in the southern East China Sea. *Cont Shelf Res*, 2000, 20: 411–436
- 22 Hsu S C, Lin F J, Jeng W L, et al. Observed sediment fluxes in the south western most Okinawa Trough enhanced by episodic events: Flood runoff from Taiwan rivers and large earthquakes. *Deep-Sea Res Part I*, 2004, 51: 979–997
- 23 Jeng W L, Lin S, Kao S J. Distribution of terrigenous lipids in marine sediments off northeastern Taiwan. *Deep-Sea Res Part II*, 2003, 50: 1179–1201
- 24 Liu J, Xu K, Li A, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. *Geomorphology*, 2007, 85: 208–224
- 25 Liu K, Peng T, Shaw P, et al. Circulation and biogeochemical processes in the East China Sea and the vicinity of Taiwan: An overview and a brief synthesis. *Deep-Sea Res Part II*, 2003, 50: 1055–1064
- 26 Hung J J, Lin C S, Hung G W, et al. Lateral transport of lithogenic particles from the continental margin of the southern East China Sea. *Estuar Coast Shelf Sci*, 1999, 49: 483–499
- 27 刘传联, 成鑫荣, 王汝建, 等. 西太平洋暖池区第四纪钙质超微化石氧碳同位素特征及意义. 地球科学, 2005, 30: 559–603
- 28 Margolis S V, Kroopnick P M, Goodney D E, et al. Oxygen and carbon isotopes from calcareous nannofossils as paleoceanographic indicators. *Science*, 1975, 189: 555–557
- 29 Goodney D E, Margolis S V, Dudley W C, et al. Oxygen and carbon isotopes of recent calcareous nannofossils as paleoceanographic indicators. *Mar Micropaleontol*, 1980, 5: 31–42
- 30 刘传联, 成鑫荣, 祝幼华, 等. 南海南部近百万年来钙质超微化石氧、碳同位素记录. 科学通报, 2002, 47: 330–335
- 31 赵京涛, 李铁刚, 常凤鸣, 等. 西菲律宾海 190 ka 以来钙质超微化石的氧碳同位素记录. 地球科学, 2008, 33: 183–189
- 32 Liu C, Wang P, Tian J, et al. Coccolith evidence for Quaternary nutricline variations in the southern South China Sea. *Mar Micropaleontol*, 2008, 69: 42–51
- 33 Okada H, Honjo S. The distribution of oceanic coccolithophorids in the Pacific. *Deep-Sea Res Part I*, 1973, 20: 355–364
- 34 Beaufort L, Lancelot Y, Camberlin P, et al. Insolation cycles as a major control of Equatorial Indian Ocean primary production. *Science*, 1997, 278: 1451–1454
- 35 Beaufort L, Garidel-Thoron T, Mix A C, et al. ENSO-like forcing on oceanic primary production during the Late Pleistocene. *Science*, 2001, 293: 2440–2444
- 36 Jian Z, Wang P, Saito Y, et al. Holocene variability of the Kuroshio current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 184: 305–319
- 37 Berger A, Loutch M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quat Sci Rev*, 1991, 10: 297–317
- 38 Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, et al. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science*, 2001, 293: 1304–1308
- 39 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854–857
- 40 Chang Y P, Wang W L, Chen M T. The last 100000 years' palaeoenvironmental changes inferred from the diatom assemblages of core MD012404 from the Okinawa Trough, East China Sea. *J Quat Sci*, 2009, 24: 890–901
- 41 常凤鸣, 李铁刚, 庄丽华, 等. 近 3000 cal a BP 以来东海东北部环境异常及其对全新世 El Niño 活动的可能联系. 第四纪研究, 2008, 28: 472–481
- 42 Diekmann B, Hofmann J, Henrich R, et al. Detrital sediment supply in the southern Okinawa Trough and its relation to sea-level and Kuroshio dynamics during the late Quaternary. *Mar Geol*, 2008, 255: 83–95

- 43 Kutzbach J E. Monsoon climate of the early Holocene: Climate experiment with the Earth's orbital parameters for 9000 years ago. *Science*, 1981, 214: 59–61
- 44 周波涛, 赵平. 古东亚冬季风和夏季风反相位变化吗? *科学通报*, 2009, 54: 3136–3143
- 45 Zhou W, Yu X, Jull A J T, et al. High-resolution evidence from southern China of an early Holocene optimum and a mid-Holocene dry event during the past 18000 years. *Quat Res*, 2004, 62: 39–48
- 46 Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and paleo-El Niño. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 231: 337–346
- 47 Dykoski C, Edwards R, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 233: 71–86
- 48 邵晓华, 汪永进, 程海, 等. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录. *科学通报*, 2006, 51: 80–86
- 49 王淑云, 吕厚远, 刘嘉麒, 等. 湖光岩玛珥湖高分辨率孢粉记录揭示的早全新世适宜期环境特征. *科学通报*, 2007, 52: 1285–1291
- 50 Xiang R, Sun Y B, Li T G, et al. Paleoenvironmental change in the middle Okinawa Trough since the last deglaciation: Evidence from the sedimentation rate and planktonic foraminiferal record. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2007, 243: 378–393
- 51 Sandweiss D H, Richardson J B, Reitz E J, et al. Geoarchaeological evidence from Peru for a 5000 years BP: Onset of El Niño. *Science*, 1996, 273: 1531–1533
- 52 Rodbell D T, Seltzer G O, Anderson D M, et al. A ~15000-year record of El Niño-driven alluviation in southwestern Ecuador. *Science*, 1999, 283: 516–520
- 53 Koutavas A, Demenocal P B, Olive G C, et al. Mid-Holocene El Niño-Southern Oscillation (ENSO) attenuation revealed by individual foraminifera in eastern tropical Pacific sediments. *Geology*, 2006, 34: 993
- 54 Stott L, Cannariato K, Thunell R, et al. Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. *Nature*, 2004, 431: 56–59
- 55 Gagan M K, Hendya E J, Haberleb S G, et al. Post-glacial evolution of the Indo-Pacific Warm Pool and El Niño-Southern Oscillation. *Quat Int*, 2004, 118: 127–143
- 56 Fleitmann D, Burns S J, Mangini A, et al. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quat Sci Rev*, 2007, 26: 170–188
- 57 南青云. 25 ka BP 以来黑潮流域古环境演化对高频全球变化事件的响应. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2008. 38–40
- 58 王吉良, Saito Y, Oba T, 等. 近万年来冲绳海槽温跃层的高分辨率记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2000, 30: 233–238