

doi:10.3799/dqkx.2011.062

冲绳海槽末次冰消期以来的浮游有孔虫群落变化 及5种古温度转换函数对比

向 荣¹, 刘 芳^{1,3}, 孙有斌², 陈木宏¹

1. 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, 广东广州 510301
2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西西安 710075
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 通过对冲绳海槽中部 A7 孔的浮游有孔虫定量分析, 对该区 18 ka 以来的海洋环境变化进行了探讨. 浮游有孔虫群落表现出非常明显的冰消期—全新世阶段变化: 在 18~15 ka 的冰消期早期, 浮游有孔虫群落以冷水种 *Neogloboquadrina dutertrei* 和 *Neogloboquadrina pachyderma* 等为主; 在 15~9.4 ka, 浮游有孔虫冷水种含量迅速降低; 9.4 ka 以来的全新世则以暖水种有孔虫 *Pulleniatina obliquiloculata*, *Globigerinoides ruber* 和 *Globigerina glutinata* 等为主. 此外, 浮游有孔虫群落对千年尺度的气候变化如 Heinrich 1、博令—阿罗德暖期(Bølling-Allerød)和新仙女木事件(Younger Dryas)都有明显反映, 在全新世还记录了一系列的冷事件(约 2.3~4.6、5.3、6.2、7.3 和 8.2 ka). 9.4 ka 前后浮游有孔虫冷暖种群的变化可能对应了黑潮暖流的突然加强. 采用 5 种不同浮游有孔虫转换函数对表层海水温度进行了估算, 通过与 Mg/Ca 和 U_{37}^k 温度估算结果对比, 对不同转换函数的可靠性进行了评估. 结果发现 SIMMAX 没有明显的冰消期—全新世变化. 另两种基于现代类比技术的转换函数 MAT 和 RAM, 其估算结果较类似, 13 ka 以来的温度波动较小, 对新仙女木事件没有明显反映. 基于 Imbrie-Kipp 转换函数(FP-12E 和 IKM-Chen)的估算结果表现出了较大的冰消期—全新世变化, 然而对于博令—阿罗德暖期变暖和新仙女木降温事件没有反映, 研究发现这主要由 *Globigerina bulloides* 的含量变化造成. 通过消除与生产力水平密切相关的 *G. bulloides* 的含量变化影响, 修正后的两种转换函数 FP-12E 和 IKM-Chen 较好地反映了末次冰消期以来的表层海水温度波动, 与该区 Mg/Ca 和 U_{37}^k 方法重建的古温度有较好的可比性. 因此, 我们认为修正后的转换函数 FP-12E 和 IKM-Chen 更适合冲绳海槽中部的古温度估算.

关键词: 沉积物; 海洋地质; 转换函数; 表层海水温度.

中图分类号: P736.22 **文章编号:** 1000-2383(2011)04-0599-11 **收稿日期:** 2010-09-25

Changes of Planktonic Foraminiferal Assemblages in the Okinawa Trough since the Last Deglaciation and Comparisons of Sea-Surface Temperature Estimated from Five Foraminiferal Transfer Functions

XIANG Rong¹, LIU Fang^{1,3}, SUN You-bin², CHEN Mu-hong¹

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China
2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Quantitatively analyzed planktonic foraminiferal data of core A7 were used to discuss the paleoenvironmental changes in the middle Okinawa Trough during the past 18 000 years. The planktonic foraminiferal fauna shows apparent changes corresponding well to the deglaciation-Holocene phases; At about 18—15 ka, the fauna was dominated by cold water species such as *Neogloboquadrina dutertrei* and *Neogloboquadrina pachyderma*; Cold water species decreased rapidly between 15—9.4 ka; After 9.4 ka the fauna was dominated by warm water species such as *Pulleniatina obliquiloculata*, *Globigerinoides ruber* and

基金项目: 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室开放课题(No. MASEG200611); 国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB428901); 中国科学院知识创新工程资助项目(Nos. KZCX2-YW-211, KZCX2-YW-228); 国家自然科学基金项目(No. 40976031).
作者简介: 向荣(1972—), 男, 研究员, 主要从事微体古生物与海洋沉积古环境研究. E-mail: rxiang@scsio.ac.cn

Globigerina glutinata. Millennial-scale climate changes during the last deglaciation such as Heinrich 1 (H1), Bølling-Allerød (B/A) and Younger Dryas (YD) were also recorded by planktonic foraminiferal changes, it also shows a series of cold events (at about 2.3–4.6, 5.3, 6.2, 7.3, 8.2 ka) superimposed on a Holocene warming trend. At about 9.4 ka, a sudden change in the relative abundance of warm to cold planktonic foraminiferal species probably indicates a sudden strengthening of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough. Five foraminiferal transfer functions were used to estimate the paleo sea-surface temperature (SST) in core A7, through comparisons with SST estimates from two independent methods (U_{37}^k and Mg/Ca-based SST), and the reliability of different foraminiferal transfer functions were evaluated. Our results suggest that SIMMAX doesn't show apparent deglaciation-Holocene SST changes. The other two transfer functions (MAT and RAM), which are also based on modern analog techniques as SIMMAX, both show small SST variations after 13 ka, without any indication of decreased SST during the YD period. Transfer functions FP-12E and IKM-Chen based on Imbrie-Kipp method, show general deglaciation-Holocene SST trends similar to U_{37}^k and Mg/Ca-based SST, however, the deglacial warming is about 1 ka later than the B/A warming, and with no apparent SST decreases during the YD period. We find out that the abnormal SST estimated by FP-12E and IKM-Chen during the last deglaciation were probably caused by *Globigerina bulloides*, the relative abundance of which was probably controlled by productivity during that period. Through getting rid of the productivity effect of *G. bulloides* in FP-12E and IKM-Chen, the two modified transfer functions provide SST estimates comparable to the U_{37}^k and Mg/Ca-based SST. Therefore, we concluded that the modified foraminiferal transfer functions of FP-12E and IKM-Chen are more suitable for paleo-SST estimates in the middle Okinawa Trough.

Key words: sediments; submarine geology; transfer function; sea-surface temperature.

重建表层古海洋温度演化史是古海洋学研究的一项长期且重要的任务,对于理解过去全球气候变化机制,驱动和验证全球环流模型,预测未来气候变化有重要意义(Kucera *et al.*, 2005). 2002 年成立的 MARGO (multiproxy approach for the reconstruction of the glacial ocean surface) 工作组的一项主要工作就是利用多种代用指标、多种估算方法来重建末次冰盛期(LGM)的海洋表层温度(Kucera *et al.*, 2005). 浮游有孔虫在海洋中广泛分布、在沉积物中大量保存,对海洋环境变化有良好的指示意义,是迄今应用最广的一种古气候信息载体. 自 CLIMAP(1976)首次在全球大洋中应用浮游有孔虫组合重建 LGM 表层大洋温度以来,利用浮游有孔虫组合重建古海水表层温度的方法便不断得到发展. Imbrie-Kipp 转换函数方法(Imbrie and Kipp, 1971)利用因子分析与回归分析相结合建立的转换函数在 CLIMAP 的 LGM 古温度重建中起了重要作用,在西北太平洋,CLIMAP 项目根据 165 个表层样品建立了一个区域性转换函数 FP-12E (Thompson, 1976, 1981). 随后,另一种基于现代类比技术的古温度转换函数 MAT 出现了(Hutson and Prell, 1980; Prell, 1985). 该方法的主要原理基于相似的温度环境下发育有相似的有孔虫组合,根据未知样品与已知数据库样品的类比,用与其最相似的几个现代样品的平均温度来指示该估算样品的温度,从而达到表层海水温度重建的目的. 近年来,

一些新的基于现代类比技术的转换函数也相继出现,包括 SIMMAX(Pflaumann *et al.*, 1996; Pflaumann and Jian, 1999)和 RAM(Waelbroeck *et al.*, 1998). SIMMAX 采用了相似性指标并结合地理信息来提高估算的精度, RAM 方法则增加了校准样品的数量和校正范围,并且引入了更加严格的标准来选取最相似的样品. 由于这些方法的采用,在表层样品的校准中估算误差都得到了明显改善(Chen *et al.*, 2005). 浮游有孔虫 Mg/Ca 温度计是近年来发展起来的估算表层海水温度的新方法,在古海洋研究中得到了很快的发展和应用(如 Nürnberg *et al.*, 1996; Lea *et al.*, 2000; Stott *et al.*, 2002; Rosenthal *et al.*, 2003). 由于 Mg/Ca 测量可与同一壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 结合重建海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化,并且利用不同浮游有孔虫属种的 Mg/Ca 测量可以获得水体温度结构的变化信息,因此与其他古温度估算方法相比,该方法具有明显优势和应用前景(Barker *et al.*, 2005). 分子标记物长链不饱和烯酮 U_{37}^k 则是另一种相对独立的古温度重建方法,近年来在南海和冲绳海槽中也得到了较多应用(Zhao *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2009).

冲绳海槽是西太平洋边缘海一个典型的弧后盆地,该区的陆源物质输运与东亚季风的变迁密切相关(陈金霞等, 2009). 其海洋环境同时受东亚季风和西太平洋边界流——黑潮的影响,末次冰盛期,海平面曾下降 120 m 左右(Hanebuth *et al.*, 2000),东

海大部分陆架出露成陆,海洋水文环境与今相比明显不同.探讨该区末次冰消期以来的海洋环境演化对于了解黑潮和东亚季风的变迁有重要意义.本文根据冲绳海槽中部 A7 孔 18 ka 以来的高分辨率浮游有孔虫的定量分析,对有孔虫群落反映的海洋环境演化进行了探讨;并采用 5 种浮游有孔虫转换函数对表层海水温度进行了估算,并和该区的 Mg/Ca 和 U_{37}^K 温度估算进行了对比,对影响浮游有孔虫转换函数的因素进行了初步探讨.

1 材料和方法

A7 孔(126°58.7'E, 27°49.2'N, 水深 1 264 m)位于冲绳海槽中部(图 1),柱长 4.5 m,整个岩心以粉砂质粘土为主,在 1.02~1.10 m 处为明显的火山灰层,并夹有几层小的浊积层(孙有斌等, 2003).为了保证获取高分辨率的地质记录,整个岩心以 2 cm 的间隔进行分割取样,共获得 225 个样品.

样品的氧碳同位素和 Mg/Ca 比数据已经发表(Sun *et al.*, 2005),均来自于同种浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* (250~355 μ m 粒级),分别在中国科学院地球环境所和美国伍兹霍尔海洋研究所完成测试.其中 Mg/Ca 古温度采用了 Hastings *et al.* (2001)的南海表层沉积物中浮游有孔虫的校正方程进行了估算(Sun *et al.*, 2005).

A7 孔的年代地层由 15 个浮游有孔虫 AMS¹⁴C 年龄控制,根据 Calib 5.0 程序校正成日历年龄,并采用了 700 年的海洋碳储库年龄进行校正(Sun *et al.*, 2005).15 个年代数据从上往下逐渐变老,与氧同位素资料反映的全新世—冰消期变化非常吻合,指示 A7 孔保存了 18 ka 以来高分辨率的沉积记录(图 2).其中末次冰消期阶段的博令—阿罗德暖期(Bølling-Allerød)与新仙女木冷事件(Younger Dryas)在氧同位素和 Mg/Ca 温度变化曲线上反映非常明显(图 2).Mg/Ca 温度显示冲绳海槽末次冰消期早期的晚春/初夏表层海水温度比现代大约低 3 °C(Sun *et al.*, 2005).整个岩心的沉积速率相对较高,从冰消期阶段的 40 cm/ka 迅速变为全新世的 15 cm/ka,反映了沉积环境的快速变化(Xiang *et al.*, 2007).

浮游有孔虫分析样品按照标准的微体古生物方法进行处理,称取约 5 g 干样,充分浸泡后用 63 μ m 的铜筛冲洗,烘干,称重.对其中大于 150 μ m 的组分进行浮游有孔虫筛分鉴定和定量统计,为了保证统

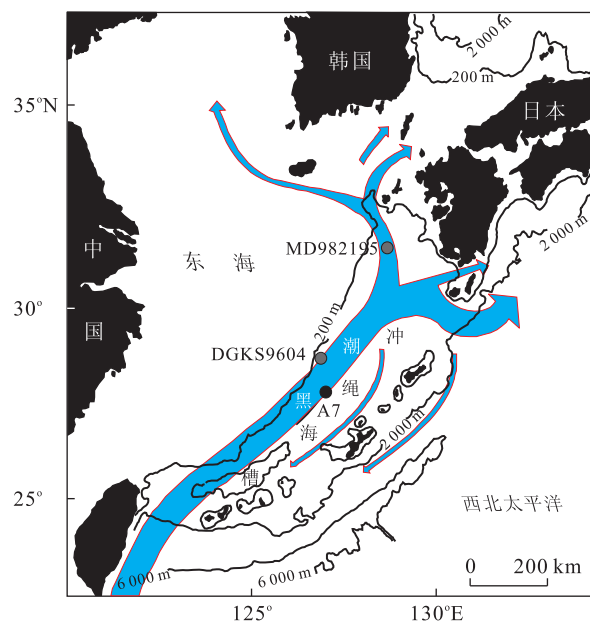


图1 冲绳海槽 A7 孔及参考孔站位

Fig. 1 Locations of core A7 and two reference cores DGKS9604 and MD982195 in the Okinawa Trough DGKS9604(Yu *et al.*, 2009); MD982195(Ijiri *et al.*, 2005)

计的可靠性,平均每样统计了 776 枚个体.为了检验分样的准确性,对部分样品进行了重复统计,所得结果基本一致.根据统计数据计算了浮游有孔虫属种的相对百分含量.

选用了 5 种浮游有孔虫转换函数(FP-12E, IKM-Chen, MAT, SIMMAX, RAM)分别对 A7 孔的表层海水温度进行了估算.其中 IKM-Chen 转换函数是根据现代西太平洋 694 个浮游有孔虫数据库样品重新建立的 Imbrie-Kipp 型转换函数,年均表层海水温度(SSTa)的校准误差为 1.37 °C(Chen *et al.*, 2005).基于现代类比技术的 MAT、SIMMAX 和 RAM 转换函数同样采用了这 694 个表层样品作为校准数据库, SSTa 的校准误差分别为 0.97、0.96 和 0.85 °C(Chen *et al.*, 2005).

2 结果和讨论

2.1 浮游有孔虫群落变化

A7 孔沉积物中含有大量的浮游有孔虫,由于水深(1 264 m)居于现代冲绳海槽溶跃面(1 700 m)之上(陈荣华等, 1999; 向荣等, 2001),溶解影响作用较小,整个岩心的浮游有孔虫平均丰度为 1 361 枚/g,保存有丰富的古环境演化信息.对现代太平洋和大西洋的表层浮游有孔虫组合与环境参数的研究表

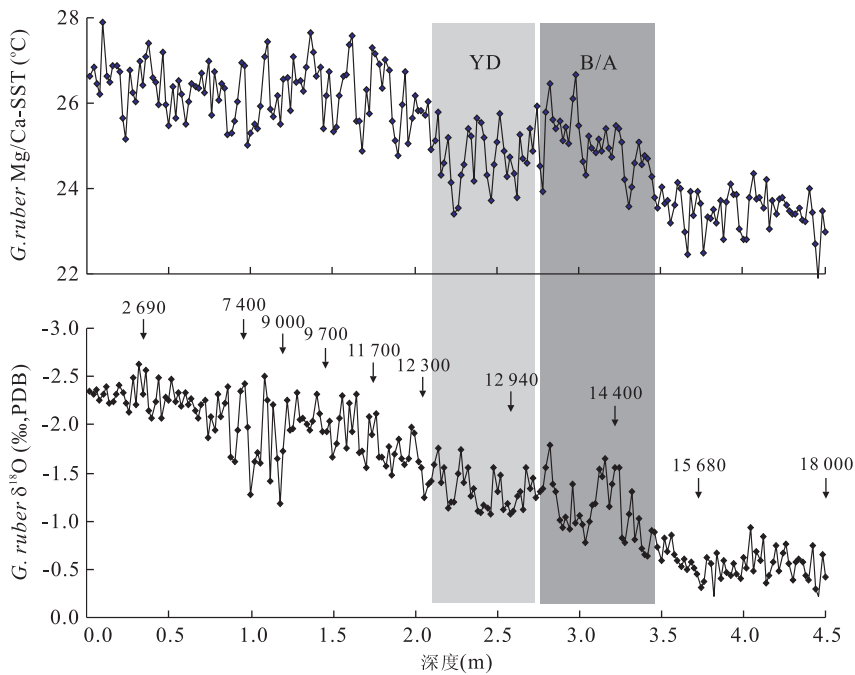


图 2 A7 孔 *G. ruber* 的氧同位素和 Mg/Ca 比古温度变化(据 Sun *et al.* , 2005)

Fig. 2 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ and Mg/Ca-based SST of *G. ruber* in core A7

氧同位素曲线上方年代为 AMS¹⁴C 测年层位, 数字为日历年龄(Cal aBP); YD. 新仙女木事件; B/A. Bølling-Allerød 暖期

明, 温度是影响浮游有孔虫组合变化的主要因素 (Morey *et al.* , 2005). A7 孔末次冰消期以来的浮游有孔虫群落同样反映了这一事实. 该孔的浮游有孔虫群落为典型的亚热带群落 (Bé, 1977), 以 *Neogloboquadrina dutertrei*、*Globigerinoides ruber*、*Pulleniatina obliquiloculata*、*Globigerinita glutinata*、*Globigerina bulloides* 和 *Globigerinoides sacculifer* 为主, 亚极地冷水种 *Neogloboquadrina pachyderma* (右旋) 在 15 ka 之前大量出现, 表明该时期冲绳海槽受来自亚极地水体的影响 (Sun *et al.* , 2005). 从图 3 可以看出, A7 孔的浮游有孔虫群落呈现出明显的冰消期—全新世变化: 18~15 ka 的冰消期早期, 主要以冷水浮游有孔虫 *N. pachyderma* (右旋)、*N. dutertrei*、*Globorotalia inflata* 和 *Globigerina quinqueloba* 为主, 冷水种群相对百分含量平均约占总种群的 50%; 15~11.7 ka 的晚冰消期, 冷水种群浮游有孔虫含量迅速降低, 平均含量约占总种群的 34%, 暖水浮游有孔虫 *G. ruber*、*G. glutinata* 和 *P. obliquiloculata* 的含量则迅速上升; 全新世期间冷水种群含量急剧降低, 平均含量约为 24%, 暖水种群相对百分含量进一步增加, 平均约占总种群的 54%.

在末次冰消期到全新世的整体变暖的大趋势上, 浮游有孔虫记录了明显的千到百年尺度的气候

波动变化 (图 3): 在 15.3~16.8 ka, 暖水种 *P. obliquiloculata* 和 *G. ruber* 的相对百分含量呈现明显低值, 相应的冷水浮游有孔虫 *N. pachyderma*、*N. dutertrei* 和 *G. quinqueloba* 的相对含量则为全孔最高, 与北大西洋高纬地区的 Heinrich 1 (H1) 事件 (15.4~16.9 cal kaBP) 对应 (Bond *et al.* , 1993); 在 13.1~14.8 ka, 冷水浮游有孔虫含量迅速降低, 对应了北大西洋高纬地区的博令—阿罗德暖期; 11.7~13.1 ka 冷水浮游有孔虫的含量再次回升, 与新仙女木冷事件对应. 这些事件同样在 *G. ruber* 的 Mg/Ca 温度和 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线上有明显反映 (图 2), 表明了冲绳海槽末次冰消期间的气候环境变化与北大西洋有明显的相关. 这种中低纬地区与高纬地带气候之间的相关性同样在南海热带海区有良好记录 (葛黄敏等, 2010). 全新世 A7 孔的浮游有孔虫群落在整体逐渐变暖的趋势上, 叠加了次一级的波动变化, 约在 2.3~4.6 ka、5.3 ka、6.2 ka、7.3 ka 和 8.2 ka, 冷水浮游有孔虫 *N. pachyderma*、*N. dutertrei*、*G. quinqueloba* 的相对百分含量有明显的峰值, 同时暖水浮游有孔虫的含量亦有相应的降低, 暖水种群与冷水种群比值对应有明显的低值, 与 *G. ruber* 的 Mg/Ca 温度有良好对应, 反映了全新世记录的一系列冷事件, 可能与黑潮的强弱波动有关, 冷事件期间黑潮强度可能相对较弱 (Jian *et al.* , 2000; Sun

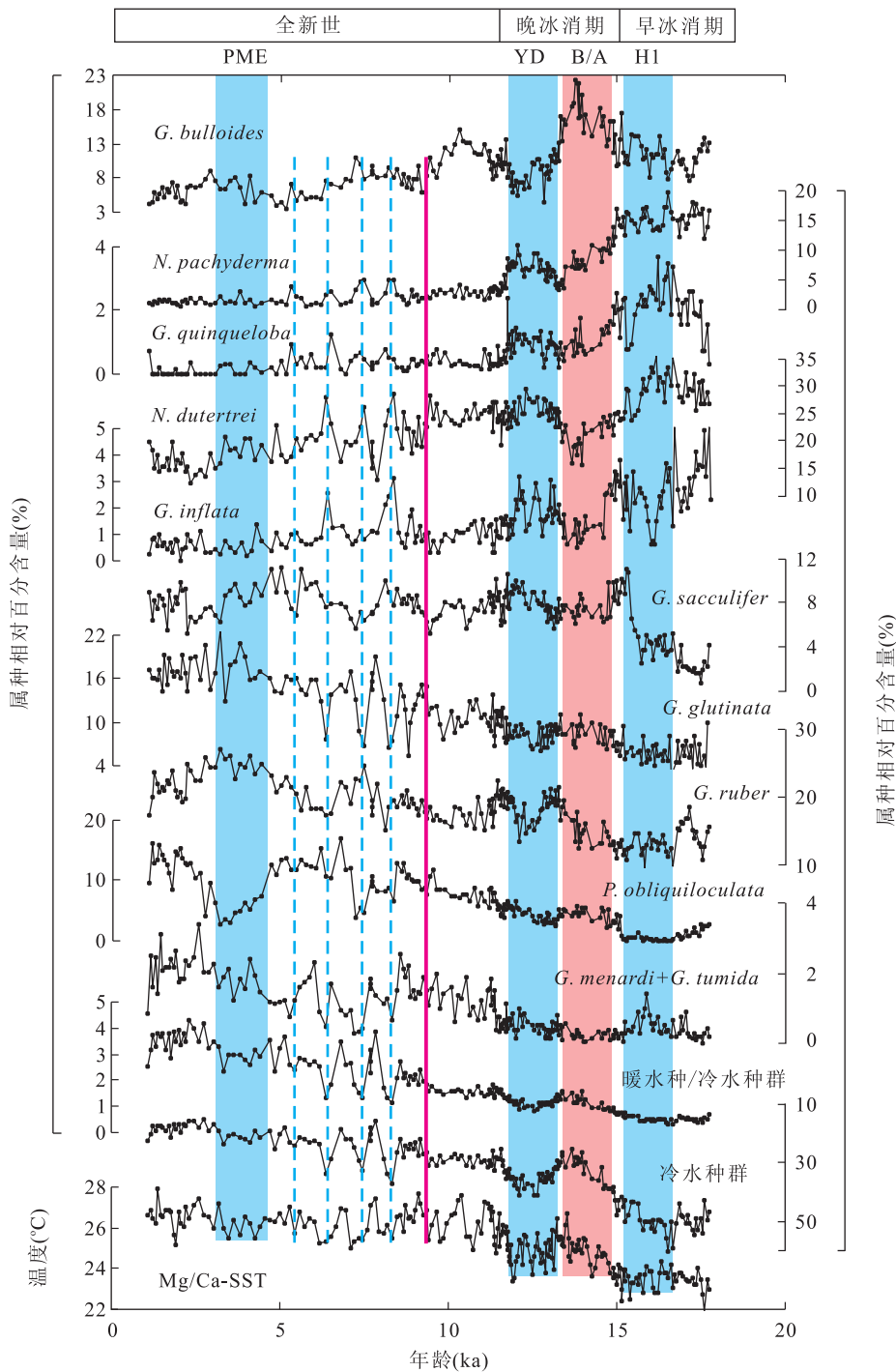


图 3 A7 孔主要浮游有孔虫属种相对百分含量变化和 Mg/Ca 比表层海水温度对比

Fig. 3 Variations of relative abundance of dominated planktonic foraminiferal species and their comparisons with Mg/Ca-based SST in core A7

虚线. 全新世的冷事件; 红线. 9.4 ka 黑潮的增强; PME. 普林虫低值事件; YD. 新仙女木事件; B/A. 博令—阿罗德暖期; H1. Heinrich 1 事件; 暖水种群. *G. ruber*, *G. sacculifer*, *G. glutinata*, *P. obliquiloculata*, *G. conglobatus*, *G. menardii* 和 *G. tumida* 的相对含量之和; 冷水种群. *N. dutertrei*, *N. pachyderma*, *G. quinqueloba* 和 *G. inflata* 的相对含量之和

et al., 2005).

此外, 在大约 9.4 ka, 浮游有孔虫冷水种群相对百分含量有明显的降低, 平均由 29% 降到 25% (图

3), 相应的暖水种群相对百分含量则由 45% 上升到 51%, 暖水种群与冷水种群比值则由 1.6 上升到 2.0 左右. 浮游有孔虫深水种群与浅水种群比值亦在该

处有突然变化(Xiang *et al.*, 2007),表明该时期冲绳海槽的环境有明显的转变. 这一转变在时间上与 9.5~9.2 ka 发生在东海、黄海和南海的一次海平面快速上升大致相同(Liu *et al.*, 2004),可能指示黑潮在这一时期有明显的加强(Xiang *et al.*, 2007).

2.2 有孔虫转换函数古温度估算比较

Mg/Ca 和 U_{37}^k 是近年来发展的两种相对独立的古温度估算方法. 冲绳海槽 A7 孔 *G. ruber* 的 Mg/Ca 温度显示了早冰消期与全新世的平均温度差大约为 3 °C, 两次明显的升温出现在博令—阿罗德暖期和新仙女木事件后期(Sun *et al.*, 2005). 根据 U_{37}^k 方法估算的冲绳海槽中部(DGKS9604)早冰消期与全新世温度差大约为 3 °C, 冲绳海槽北部(MD982195)的温度差约 4 °C, 与 Mg/Ca 温度估算结果大致相当, 对博令—阿罗德暖期、新仙女木事件及其后期的升温同样有明显的反映(Ijiri *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2009). 因此, 我们把 5 种有孔虫转换函数温度估算结果与上述 Mg/Ca 和 U_{37}^k 方法进行对比, 着重注意早冰消期与全新世温度差、新仙女木降温事件以及发生在博令—阿罗德暖期和新仙女木事件后期的升温, 进而对有孔虫转换函数古温度估算方法进行评估.

图 4 显示了 5 种不同浮游有孔虫转换函数方法估算的表层海水古温度. 从图中可以看出, 利用 FP-12 和 IKM-Chen 转换函数估算出来的表层海水温度变化趋势较相似, 均表现出明显的早冰消期—晚冰消期—全新世温度波动阶段变化, 其中 FP-12 记录的相对较大的早冰消期—全新世温度差, 约 4 °C (图 4b), IKM-Chen 反映的温度差相对要小, 约 3 °C 左右(图 4c). 总体上这两种转换函数与冷水种群浮游有孔虫反映的温度变化趋势大体相似, 然而对于博令—阿罗德暖期的变暖和仙女木降温事件没有反映, 其中冰消期的突然升温出现在约 13.6 ka, 明显晚于博令—阿罗德暖期的变暖约 1 ka, 对应的新仙女木期间也没有明显的降温, 与大多数浮游有孔虫种属以及 Mg/Ca 温度反映出的温度变化明显不一致. 其他 3 种基于现代类比技术的转换函数 MAT、RAM 和 SIMMAX 的估算结果与基于因子分析与回归分析结合的 FP-12 和 IKM-Chen 转换函数估算结果有明显的差异. 其中 SIMMAX 没有表现出明显的冰消期—全新世变化趋势, 整个 18 ka 以来的温度变化均大致在同一温度水平上波动, 对于新仙女木降温事件没有反映, 而博令—阿罗德暖期则表现为相反的降温事件, 与浮游有孔虫冷

水种群和 Mg/Ca 温度反映的温度变化明显不同(图 4f). MAT 和 RAM 古温度重建结果较相似, 对博令—阿罗德暖期的升温均有明显表现(图 4d, 4e), 对于早冰消期的温度下降也有明显的反映, 然而表现出较大的波动幅度, 且早冰消期—全新世的温度差异相对较小, 约为 2 °C. 这两种方法自 13 ka 以来的温度估算波动较小, 基本在同一水平上变化, 对新仙女木降温事件没有明显反映. 这与南海南部 18287-3 孔的 RAM 和 SIMMAX28 转换函数同样不能反映 U_{37}^k -SST 记录的博令—阿罗德暖期和新仙女木事件一致(Steinke *et al.*, 2001).

相似度是衡量地质历史时期的浮游有孔虫组合与现代浮游有孔虫组合的相似程度. 在 IKM 转换函数中, 共同度反映的是估算样品被现代几个环境因子解释的方差总和(Thompson, 1981), 可以作为相似程度的一种度量; MAT 和 RAM 中的非相似度反映的是过去组合与现代组合的差异, SIMMAX 则用相似系数来衡量过去组合与现代组合的相似程度. 从图 5 可以看出, 虽然 5 种转换函数计算出来的 SST 差异较大, 但是相似度变化却非常一致, 末次冰消期样品中浮游有孔虫种群与现代样品种群之间的非相似性明显增大. 在南海同样发现这种情况(Steinke *et al.*, 2008), 表明了冰消期的浮游有孔虫种群与现代浮游有孔虫种群之间存在明显的非相似性, 这可能是造成 MAT、RAM 和 SIMMAX3 种基于现代类比技术转换函数估算结果与有孔虫暖水种/冷水种群变化、 U_{37}^k 和 Mg/Ca 古温度差异较大的主要原因.

通过对比转换函数估算的结果与一些主要浮游有孔虫属种的相对含量变化, 我们发现转换函数 FP-12 和 IKM-Chen 估算的温度结果与 *G. bulloides* 的变化在 13.6 ka 和 10 ka 前后存在明显的相似, 两次明显的升温均对应于 *G. bulloides* 含量的明显下降(图 4a, 4b, 4c). 其他 3 种方法则没有这种对应. *G. bulloides* 通常是亚极区的一种主要浮游有孔虫, 然而在低纬度地区的上升流和边界流区它同样常见(Bé, 1977), 在阿拉伯海, 它被认为是上升流的一个重要标志种(Peeters *et al.*, 2002). 在低纬边缘海中, 它的高含量作为季风驱动上升流的一个指标已经被大量的研究所证实(Wang *et al.*, 2005). *G. bulloides* 同样是东海陆架水体中的一个常见种, 通常与低温的表层水和由河流注入引起的较高的营养水平相联系(Xu and Oda, 1999). 在 A7 孔, 同为冷水种的 *G. bulloides* 含量变化与其他冷

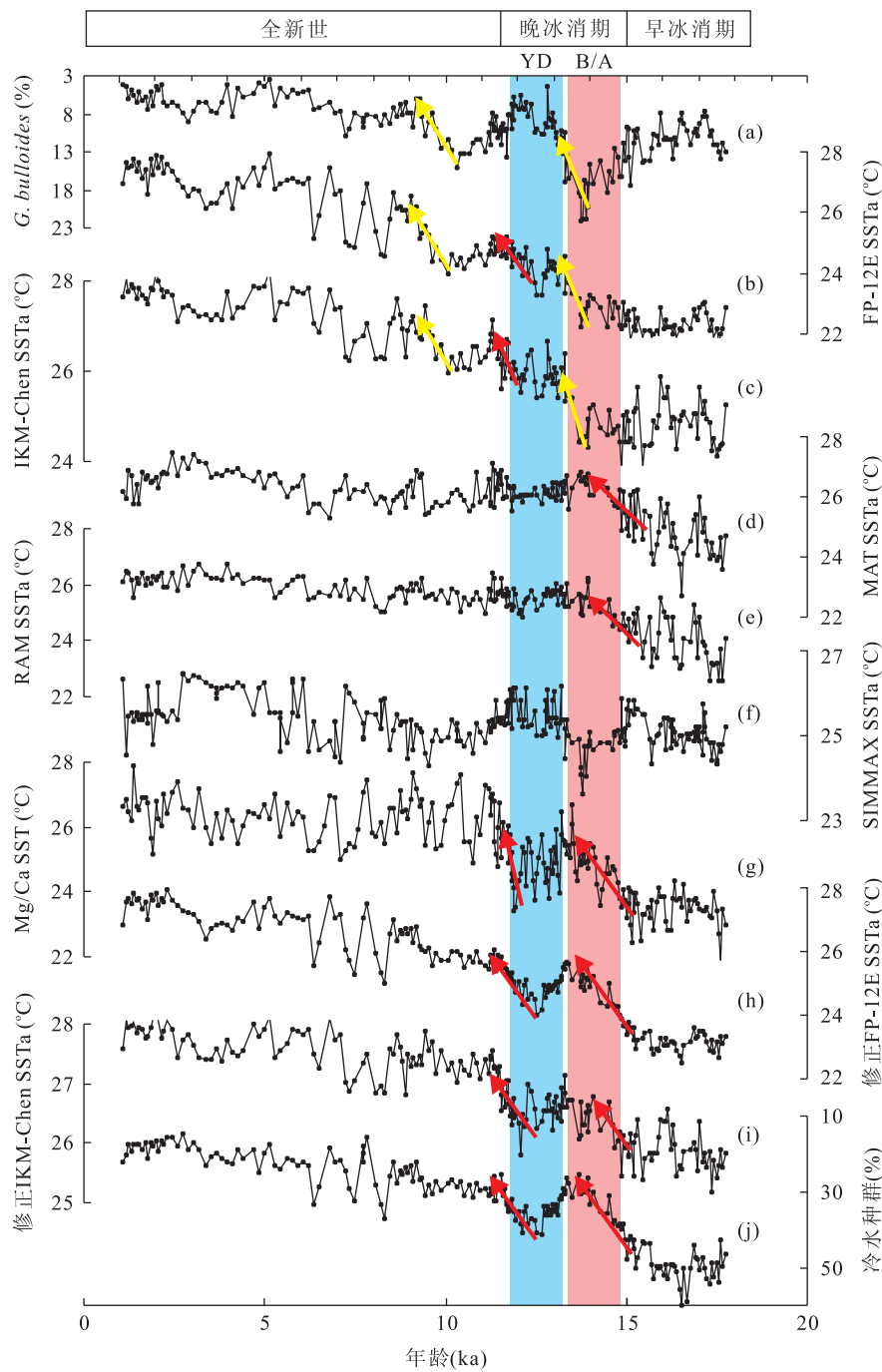


图 4 A7 孔 5 种不同浮游有孔虫转换函数估算的年均表层海水温度(SSTa)与 Mg/Ca 比温度的比较

Fig. 4 Comparison of average annual SST estimated from 5 foraminiferal transfer functions with Mg/Ca-based SST of *G. ruber* in core A7

红色箭头. 博令暖期和 YD 结束时的突然升温;黄色箭头. 与 Mg/Ca 比温度相比的异常升温变化;修正 FP-12E 和修正 IKM-Chen. 消除 *G. bulloides* 含量变化影响后的转换函数估算结果;YD. 新仙女木事件;B/A. Bolling-Allerod 暖期

水浮游有孔虫明显不同,尤其表现在末次冰消期阶段(图 3),这种现象同样出现在低纬度的南海(Huang *et al.*, 1997). 因此我们推测冲绳海槽末次冰消期 *G. bulloides* 的高含量变化可能主要受表层海水古生产力变化控制,这与冲绳海槽末次冰消期

阶段的较高生产力水平一致(Li *et al.*, 2005). 我们进而推测 FP-12 和 IKM-Chen 转换函数估算结果与大多数浮游有孔虫种属以及 Mg/Ca 温度反映出的温度变化差异可能是由 *G. bulloides* 的含量变化造成的,这种由生产力增加引起的含量变化

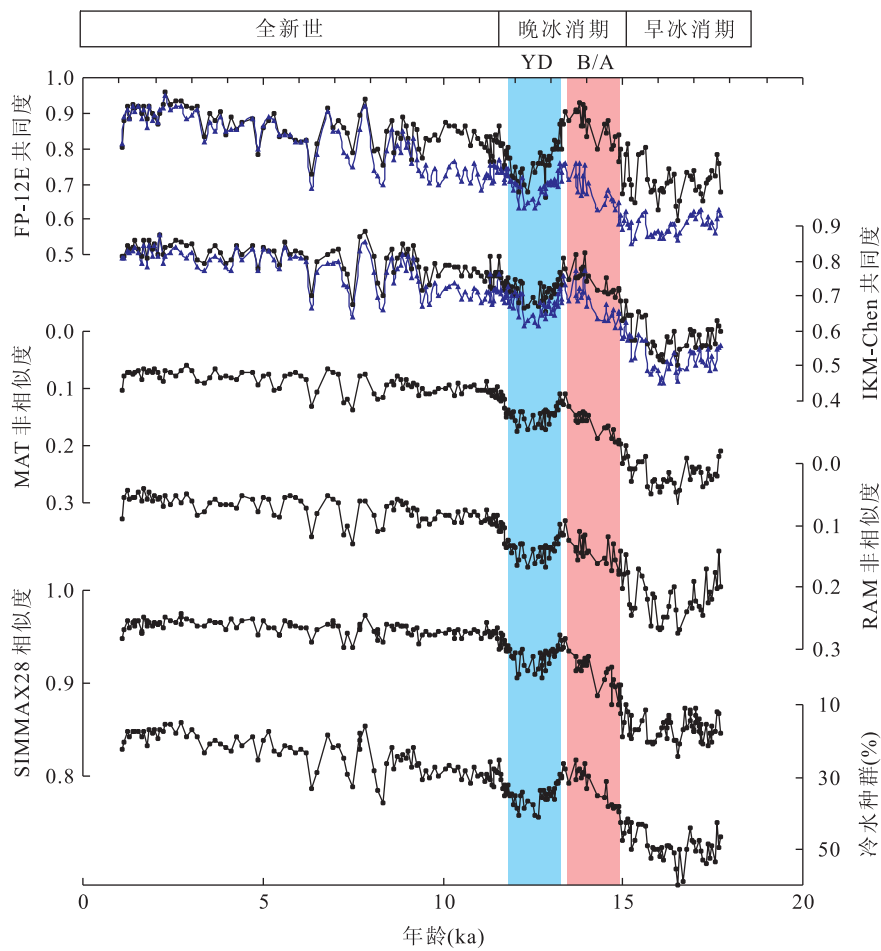


图 5 A7 孔 5 种不同浮游有孔虫转换函数的相似度变化

Fig. 5 Variation of communality, similarity and dissimilarity of 5 foraminiferal transfer functions in core A7
蓝色曲线, 经过 *G. bulloides* 含量修正后的 FP-12E 和 IKM-Chen 转换函数共同度; YD. 新仙女木事件; B/A. Bolling-Allerød 暖期

被估算成温度变化可能造成了以上结果。针对这个问题,我们对这两种转换函数的估算数据作了如下修改,以此消除 *G. bulloides* 的含量变化影响:整个孔中 *G. bulloides* 含量变化用全新世阶段的平均值 5%来代替(假设该种冰消期含量主要受生产力变化的影响),在计算其他种属相对含量时不考虑 *G. bulloides* 的统计数,并乘系数 0.95。图 4 显示使用修正后的这两种转换函数计算,得到的结果有很大的改善,基本上反映了大多数浮游有孔虫指示的温度变化(图 4h, 4i),其中博令—阿罗德暖期和新仙女木事件降温在估算结果上都有明显反映,与 Mg/Ca 温度相关性明显提高(FP-12E, $r=0.85$; IKM-Chen, $r=0.83$)。其中 FP-12 方法估算的早冰消期—全新世温度差约为 4°C , IKM-Chen 估算的温度差约为 2°C ,对全新世千年尺度的降温事件也均有较好反映,表明了基于因子分析与回归分析结合的 Imbrie-Kipp 转换函数在相似性相对差的情况

下也能较好地重建千年尺度温度波动变化,但前提是要修正生产力或其他因素造成的主要属种的含量变化影响。

Chen *et al.* (2005)在对 5 种转换函数在南海南部 MD972151 孔的应用评价时认为几种基于现代类比技术的转换函数 MAT、RAM 和 SIMMAX 比 Imbrie-Kipp 转换函数方法估算结果更可靠。然而他并没有注意到南海南部末次冰期 *P. obliquiloculata* 的非相似性表现,该暖水种在南海南部冰期比全新世含量明显增加(Huang *et al.*, 2002; Steinke *et al.*, 2008),这种增加可能是受生产力增加的影响而非温度变暖,正是 *P. obliquiloculata* 在冰期的异常高含量才导致了 Imbrie-Kipp 转换函数估算的冰期温度高于全新世(Steinke *et al.*, 2008; Xiang *et al.*, 2009)。如果修正该属种的生产力影响 Imbrie-Kipp 转换函数估算的温度可能会更可靠。当然,这些转换函数中属种影响的修正还有待于这些海区

现代浮游有孔虫生态研究来进一步验证,目前在南海已经开展了这方面的工作(向荣等,2010)。

3 结论

(1)冲绳海槽末次冰消期以来的浮游有孔虫群落主要受温度变化的影响,主要浮游有孔虫种属的相对含量呈现出明显的早冰消期—晚冰消期—全新世阶段变化:在18~15 ka的冰消期早期,浮游有孔虫群落以冷水种 *N. dutertrei* 和 *N. pachyderma* 等为主;在15~9.4 ka,浮游有孔虫冷水种含量迅速降低;9.4 ka以来的全新世则以暖水种有孔虫 *P. obliquiloculata*, *G. ruber* 和 *G. glutinata* 等为主。此外浮游有孔虫群落对千年尺度的气候变化如 Heinrich 1、博令—阿罗德暖期和新仙女木事件都有明显反映,在全新世还记录的一系列冷事件(约2.3~4.6, 5.3, 6.2, 7.3和8.2 ka)。9.4 ka前后浮游有孔虫冷暖种群的变化可能对应了黑潮暖流的突然加强。

(2)末次冰消期阶段 *G. bulloides* 的含量变化可能主要受生产力变化影响,这导致基于 Imbrie-Kipp 转换函数(FP-12E 和 IKM-Chen)的古温度估算出现较明显偏差。通过消除 *G. bulloides* 的含量变化影响,这两种转换函数估算的结果较好,与多数浮游有孔虫属种反映的温度变化以及 Mg/Ca 和 U_{37}^k 古温度估算有较好的可比性。其他3种基于现代类比技术的转换函数 MAT、RAM 和 SIMMAX 的估算结果13 ka以来的温度波动较小,对新仙女木事件没有明显反映,可能与冲绳海槽冰消期的浮游有孔虫种群与现代浮游有孔虫种群之间存在明显的非相似性密切相关。因此,我们认为修正后的 FP-12E 和 IKM-Chen 转换函数可能更适合冲绳海槽中部的古温度估算。

致谢:中国科学院海洋研究所海洋地质与地球物理研究室以及“科学一号”考察船的全体船员在海上完成了 A7 孔岩心采集,谨此致谢。

References

Barker, S., Cacho, I., Benway, H., et al., 2005. Planktonic foraminiferal Mg/Ca as a proxy for past oceanic temperatures: a methodological overview and data compilation for the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 24: 821—834. doi: 10. 1016/j. quascirev. 2004. 07. 016.

Bé, A. W. H., 1977. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In: Ramsay, A. T. S., ed., *Oceanic micropaleontology*. Academic Press, London.

Bond, G., Broecker, W., Johnsen, S., et al., 1993. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 365: 143—147.

Chen, J. X., Li, T. G., Nan, Q. Y., 2009. Variations of terrigenous material discharges in the South Okinawa Trough and its relation to the East Asian summer monsoon since the last millennium. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(5): 811—818 (in Chinese with English abstract).

Chen, M., Huang, C., Pflaumann, U., et al., 2005. Estimating glacial western Pacific sea-surface temperature: methodological overview and data compilation of surface sediment planktic foraminifer faunas. *Quaternary Science Review*, 24: 1049—1062. doi: 10. 1016/j. quascirev. 2004. 07. 013

Chen, R. H., Meng, Y., Li, B. H., et al., 1999. Variations in the lysocline of carbonate in the southern Okinawa Trough during the last 20 000 years. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 19 (1), 25—30 (in Chinese with English abstract).

CLIMAP Project Members, 1976. The surface of the ice-age Earth. *Science*, 191: 1131—1137.

Ge, H. M., Li, Q. Y., Cheng, X. R., et al., 2010. Late Quaternary high resolution monsoon records in planktonic stable isotopes from northern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4): 515—525 (in Chinese with English abstract).

Hanebuth, T., Stattegger, K., Grootes, P. M., 2000. Rapid flood of the Sunda shelf: a late-glacial sea-level record. *Science*, 288: 1033—1035. doi: 10. 1126/science. 288. 5468. 1033

Hastings, D., Kienast, M., Steinke, S., et al., 2001. A comparison of three independent paleotemperature estimates from a high resolution record of deglacial SST records in the tropical South China Sea. American Geophysical Union, Fall Meeting, 82(47), Abstract PP12B—10.

Huang, C. C., Chen, M. T., Lee, M. Y., et al., 2002. Planktic foraminifer faunal sea surface temperature records of the past two glacial terminations in the South China Sea near Wan-An shallow (IMAGES core MD972151). *Western Pacific Earth Sciences*, 2: 1—4.

Huang, C. Y., Wu, S. H., Zhao, M. X., et al., 1997. Surface ocean and monsoon climate variability in the South China Sea since the last glaciation. *Marine Micropaleontology*,

- 32: 71—94. doi:10.1016/S0377—8398(97)00014—5
- Hutson, W. H. , Prell, W. L. , 1980. A paleoecological transfer function, FI-2, for Indian Ocean planktonic foraminifera. *Paleontology*, 54: 381—399.
- Ijiri, A. , Wang, L. , Oba, T. , et al. , 2005. Paleoenvironmental changes in the northern area of the East China Sea during the past 42 000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 219: 239—261. doi:10.1016/j.palaeo.2004.12.028
- Imbrie, J. , Kipp, N. G. , 1971. A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology: application to a Late Pleistocene Caribbean core. In: Turekian, K. K. , ed. , *The Late Cenozoic glacial ages*. Yale University Press, New Haven, 71—181.
- Jian, Z. , Wang, P. , Saito, Y. , et al. , 2000. Holocene variability of kuroshio current in the Okinawa Trough, north-western Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 184: 305—319. doi:10.1016/S0012—821X(00)00321—6
- Kucera, M. , Rosell-Melé, A. , Schneider, R. , et al. , 2005. Multiproxy approach for the reconstruction of the glacial ocean surface (MARGO). *Quaternary Science Reviews*, 24: 813—819. doi:10.1016/j.quascirev.2004.07.017
- Lea, D. W. , Pak, D. K. , Spero, H. J. , 2000. Climate impact of Late Quaternary equatorial Pacific Sea surface temperature variations. *Science*, 289: 1719—1724. doi:10.1126/science.289.5485.1719
- Li, T. , Xiang, R. , Sun, R. , et al. , 2005. Benthic foraminifera and deep-water evolution of the middle and southern Okinawa Trough during the last 18 000 years. *Science in China (Ser. D)*, 48(6): 805—814. doi:10.1360/03yd0222
- Liu, J. P. , Milliman, J. D. , Gao, S. , et al. , 2004. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea. *Marine Geology*, 209: 45—67. doi:10.1016/j.margeo.2004.06.009
- Morey, A. E. , Mix, A. C. , Pisias, N. G. , 2005. Planktonic foraminiferal assemblages preserved in surface sediments correspond to multiple environment variables. *Quaternary Science Reviews*, 24: 925—950. doi:10.1016/j.quascirev.2003.09.011
- Nürnberg, D. , Bijma, J. , Hemleben, C. , 1996. Assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 803—814.
- Peeters, F. J. C. , Brummer, G. J. A. , Ganssen, G. , 2002. The effect of upwelling on the distribution and stable isotope composition of *Globigerina bulloides* and *Globigerinoides ruber* (planktonic foraminifera) in modern surface waters of the NW Arabian Sea. *Global Planetary Change*, 34: 269—291. doi:10.1016/S0921—8181(02)00120—0
- Pflaumann, U. , Duprat, J. , Pujol, C. , et al. , 1996. SIM-MAX: a modern analog technique to deduce Atlantic Sea surface temperatures from planktonic foraminifera in deep-sea sediments. *Paleoceanography*, 11(1): 15—35. doi:10.1029/95PA01743
- Pflaumann, U. , Jian, Z. , 1999. Modern distribution patterns of planktonic foraminifera in the South China Sea and western Pacific: a new transfer technique to estimate regional sea-surface temperatures. *Marine Geology*, 156: 41—83. doi:10.1016/S0025—3227(98)00173—X
- Prell, W. L. , 1985. The stability of low-latitude sea-surface temperatures: evaluation of the CLIMAP reconstruction with emphasis on the positive SST anomalies. Government Printing Office, US, 1—2; 1—60.
- Rosenthal, Y. , Oppo, D. W. , Linsley, B. K. , 2003. The amplitude and phasing of climate change during the last deglaciation in the Sulu Sea, western equatorial Pacific. *Geophysical Research Letters*, 30: 1428. doi:10.1029/2002GL016612
- Steinke, S. , Kienast, M. , Pflaumann, U. , et al. , 2001. A high-resolution sea-surface temperature record from the tropical South China Sea (16 500—3 000 aBP). *Quaternary Research*, 55: 352—362. doi:10.1006/qres.2001.2235
- Steinke, S. , Yu, P. S. , Kucera, M. , et al. , 2008. No-analog planktonic foraminiferal faunas in the glacial southern South China Sea: implications for the magnitude of glacial cooling in the western Pacific warm pool. *Marine Micropaleontology*, 66: 71—90. doi:10.1016/j.marmicro.2007.07.008
- Stott, L. , Poulsen, C. , Lund, S. , et al. , 2002. Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scales. *Science*, 297: 222—226. doi:10.1126/science.1071627
- Sun, Y. B. , Gao, S. , Li, J. , 2003. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous materials in marginal sea setting. *Chinese Science Bulletin*, 48: 184—187.
- Sun, Y. B. , Oppo, D. W. , Xiang, R. , et al. , 2005. Last deglaciation in the Okinawa Trough: subtropical Northwest Pacific link to northern hemisphere and tropical climate. *Paleoceanography*, 20: A4005. doi:10.1029/2004PA001061
- Thompson, P. R. , 1976. Planktonic foraminiferal dissolution and the progress towards a Pleistocene equatorial Pacific

- ic transfer function. *Journal of Foraminiferal Research*, 6: 208—227.
- Thompson, P. R., 1981. Planktonic foraminifera in the western North Pacific during the past 150 000 years: comparison of modern and fossil assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 35: 241—279. doi:10.1016/0031-0182(81)90099-7
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Duplessy, J. C., et al., 1998. Improving past sea surface temperature estimates based on planktonic fossil faunas. *Paleoceanography*, 13(3): 272—283. doi:10.1029/98PA00071
- Wang, P., Clemens, S., Beaufort, L., et al., 2005. Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues. *Quaternary Science Reviews*, 24: 595—629. doi:10.1016/j.quascirev.2004.10.002
- Xiang, R., Chen, M., Li, Q., et al., 2009. Planktonic foraminiferal records of East Asia monsoon changes in the southern South China Sea during the last 40 000 years. *Marine Micropaleontology*, 73: 1—13. doi:10.1016/j.marmicro.2009.06.004
- Xiang, R., Chen, M. H., Zhang, L. L., et al., 2010. Composition and distribution of living planktonic foraminifera in autumn waters of the northern South China Sea. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 35(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, R., Li, T. G., Yan, J., et al., 2001. Planktonic foraminiferal distribution and modern carbonate dissolution in the southern Okinawa Trough. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 26 (Suppl.): 69—74 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, R., Sun, Y., Li, T., et al., 2007. Paleoenvironmental change in the Middle Okinawa Trough since the last deglaciation: evidence from the sedimentation rate and planktonic foraminiferal record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 243: 378—393. doi:10.1016/j.palaeo.2006.08.016
- Xu, X., Oda, M., 1999. Surface-water evolution of the eastern East China Sea during the last 36 000 years. *Marine Geology*, 156: 285—304. doi:10.1016/S0025—3227(98)00183—2
- Yu, H., Liu, Z., Berné, S., et al., 2009. Variations in temperature and salinity of the surface water above the middle Okinawa Trough during the past 37 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281: 154—164. doi:10.1016/j.palaeo.2009.08.002
- Zhao, M. X., Huang, C. Y., Wang, C. C., et al., 2006. A millennial-scale U_{87}^{K} sea-surface temperature record from the South China Sea (8°N) over the last 150 kyr: monsoon and sea-level influence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 236(1—2): 39—55. doi:10.1016/j.palaeo.2005.11.033

附中文参考文献

- 陈金霞, 李铁刚, 南青云, 2009. 冲绳海槽千年来陆源物质输入历史与东亚季风变迁. 地球科学——中国地质大学学报, 34(5): 811—818.
- 陈荣华, 孟翔, 李保华, 等, 1999. 冲绳海槽南部两万年来碳酸盐溶跃面的变迁. 海洋地质与第四纪地质, 19(1): 25—30.
- 葛黄敏, 李前裕, 成鑫荣, 等, 2010. 南海北部晚第四纪高分辨率浮游氧同位素地层学及其古气候信息. 地球科学——中国地质大学学报, 35(4): 515—525.
- 孙有斌, 高抒, 李军, 2003. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析. 科学通报, 48(1): 83—86.
- 向荣, 陈木宏, 张兰兰, 等, 2010. 南海北部秋季活体浮游有孔虫的组成与分布. 地球科学——中国地质大学学报, 35(1): 1—10.
- 向荣, 李铁刚, 阎军, 等, 2001. 冲绳海槽南部的浮游有孔虫分布与现代碳酸盐溶解作用. 地球科学——中国地质大学学报, 26(增刊): 69—74.