末次冰消期南海南部的普林虫低值事件

安阳, 翦知湓

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

E-mail: anyang820916@gmail.com

2008-11-05 收稿, 2009-03-05 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815900)、国家自然科学基金(批准号: 40621063)和大洋协会“十一五”课题(编号: DY115-01-2-3)资助项目

摘要 通过对中法合作“马可·波罗”航次在南海南部陆坡采集的 MD 05-2894 柱状样(7°2.25'N, 111°33.11'E, 水深 1982 m)进行浮游有孔虫定量分析, 结果表明, 末次冰消期距今 16.0~14.9 cal ka BP 之间, 浮游有孔虫 *Pulleniatina obliquiloculata*(斜室普林虫)的丰度急剧降低至几乎为零。这次普林虫低值事件在南海南部普遍存在, 发生时间介于 17.0~14.8 cal ka BP 之间, 可以作为地层划分对比的良好标志。对浮游有孔虫表层种 *Globigerinoides* 和次表层种 *P. obliquiloculata* 的壳体进行 Mg/Ca 比值分析, 再造表层和次表层海水的温度, 进一步揭示末次冰消期普林虫低值事件时, 表层海水的温度变化不大, 而次表层海水的温度明显下降~2 °C, 使得温跃层深度随之变浅。这次普林虫低值事件在时间上相当于 H1 的气候变冷事件, 反映了南海南部热带海区上部水体垂向结构的巨大变化, 为研究末次冰消期变暖过程中的快速气候变化提供了重要依据。

关键词

普林虫低值事件
次表层海水温度
上部水体垂向结构
末次冰消期
南海南部

现代调查表明, 浮游有孔虫 *Pulleniatina obliquiloculata*(斜室普林虫, 以下简称普林虫)是生活在温跃层上部水深 ~100 m 的热带抗溶种, 广泛分布于南北纬 10°间狭长区域内大西洋, 印度洋及太平洋的沉积物中, 其相对丰度在赤道西太平洋和南海北部的表层沉积中高达 20% 以上^[1,2]。西北太平洋^[3]及南海^[2]的研究都显示, *P. obliquiloculata* 与黑潮关系密切, 是高温高盐属种。沉积捕集器资料进一步揭示, 该种的季节分布在南海北部的冬季出现峰值^[4]。因此, *P. obliquiloculata* 的丰度变化及其壳体同位素和 Mg/Ca 比值, 与次表层海水温度(主要是冬季的温度)和温跃层深度密切相关, 已成为西太平洋古海洋学研究的热点^[5~8]。

特别是, 在冲绳海槽^[5,6,9~11]和南海北部^[12]的晚全新世 4.5~3.0 cal ka BP 的深海沉积中 *P. obliquiloculata* 丰度曾急剧降低, 反映气候变冷, 与中国大陆湖泊^[13]、石

笋^[14]记录的这一时期东亚夏季风减弱相对应。前人将这一事件称为普林虫低值事件(*Pulleniatina* Minimum Event, 简称 PME), 并主要归咎于黑潮暖流强度和路径的改变或冬季表层海水温度的降低^[5,6,9,11]。然而, 本次研究在南海南部末次冰消期气候变暖的过程中, 也发现了类似晚全新世 PME 的 *P. obliquiloculata* 相对丰度急剧降低的事件, 研究其发生的时间、范围和原因, 对于认识冰消期南海南部热带海区的古海洋变化和了解快速气候变化的机制具有重要意义。

1 样品与分析方法

中法合作“马可·波罗”航次于 2005 年在南海南部陆坡采得高质量的巨型箱式样 MD05-2894(以下简称 MD94)。该柱状样位于 7°2.25'N, 111°33.11'E(图 1), 水深 1982 m, 柱长 10.85 m, 未见明显的浊流层。按照 2 cm 的采样间距, 从深度 0~467 cm 层段采得 230 块样品对浮游有孔虫表层种 *Globigerinoides ruber* 和次表层种

引用格式: 安阳, 翦知湓. 末次冰消期南海南部的普林虫低值事件. 科学通报, 2009, 54: 2527~2532

An Y, Jian Z M. *Pulleniatina* Minimum Event during the last deglaciation in the southern South China Sea. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0290-4

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-17-2527>

图 1 本文研究和讨论的南海晚第四纪沉积柱状样的位置

P. obliquiloculata 的壳体进行氧、碳稳定同位素和 Mg/Ca 比值测试, 方法见文献[15], 所有样品分析和测试工作都在同济大学海洋地质国家重点实验室完成. 按 2~4 cm 不等的样品间距, 以“二分法”从各样品中挑出 >0.154 mm 的浮游有孔虫 200~300 枚进行定量分析, 统计属种包括 *G. ruber*, *Globigerinoides sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *Neoglobobulimina dutertrei*. 最后从 7 个样品(柱状样深度见表 1)中挑出 800~1200 枚 *G. ruber* 和 *G. sacculifer* 壳体的混合样送北京大学进行 AMS ^{14}C 放射性年龄测定, 所得 ^{14}C 年龄根据 CALIB 5.0 和 Fairbanks 等人[16]两种方法分别转换为日历年, 两种方法在 0~12.41 ka BP 之间所得的年龄值几乎相同, 但在 11.9~14 ka BP 之间, CALIB 5.0 使用的数据库包括 Cariaco Basin 纹层沉积物和多个珊瑚的数据库, 样品数据质量参差不齐, 而 Fairbanks 等人[16]的数据完全来自树轮, 相对更为可靠, 并被广泛引用. 所以本次研究采用 Fairbanks 等人[16]计算的日历年结果(表 1).

表 1 MD 05-2894 站 AMS ^{14}C 年龄

深度/cm	AMS ^{14}C 年龄/a BP ($\pm 1\sigma$)	日历年/a BP
62.5	5010 $\pm$ 35	5337 $\pm$ 56
104.5	6765 $\pm$ 40	7289 $\pm$ 42
140.5	10825 $\pm$ 45	12324 $\pm$ 105
188.5	13195 $\pm$ 50	14909 $\pm$ 101
214.5	13285 $\pm$ 45	15012 $\pm$ 103
284.5	13785 $\pm$ 50	15584 $\pm$ 121
368.5	14890 $\pm$ 65	17117 $\pm$ 177

2 结果与讨论

本次研究根据 AMS ^{14}C 测年值所转换的日历年龄数据, 建立精确的地层年代框架. MD 94 站深度 0~467 cm 的样品记录了 ~18.9 cal ka BP 以来的古海洋学变化(下文的讨论中涉及的年龄均为日历年), 其中顶部 134.5 cm 为全新世的沉积, 其下为末次冰消期的沉积. 该站不同时间段内沉积速率的变化较大. 全新世沉积速率较小, 平均 11.7 cm/ka, 而末次冰消期及冰期的沉积速率较大, 最高 252.4 cm/ka, 平均 46.2 cm/ka(图 2(c)). 按 2 cm 采样间距, 样品的平均时间分辨率为 82 a/样, 最高可达 8 a/样. 这是迄今南海南部晚第四纪时间分辨率最高的古海洋学研究实例.

图 2 MD05-2894 站 *G. ruber* 和 *P. obliquiloculata* 的 $\delta^{18}\text{O}$, 以及沉积速率的变化

(a) *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$; (b) *P. obliquiloculata* 的 $\delta^{18}\text{O}$; (c) 沉积速率. PME 为晚全新世普林虫低值事件, YD 为新仙女木变冷事件, H1-PME 指与 H1 相对应的末次冰消期普林虫低值事件. 横虚线示意各时间段的平均值. 箭头示意 AMS ^{14}C 测年点

从图 2(a)可以看出, MD 94 站 *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -0.894‰ ~ 3.492‰ 之间变化, 呈现出明显的冰期/间冰期变化, 全新世的值围绕 -3.0‰ 变化, 而冰消期早期(15~18.9 ka BP)则在 -1.7‰ 上下波动, 末次冰期-全新世的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值差异为 1.3‰ , 最大值达 2.6‰ . 浮游有孔虫温跃层种 *P. obliquiloculata* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化趋势与 *G. ruber* 的相似(图 2(b)), 但比 *G. ruber* 的明显偏重, 其全新世和冰消期早期(16~18.9 ka BP)的值分别围绕 -1.3‰ 和 -0.1‰ 波动, 末次冰期-全新世的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值差异为 1.2‰ , 略小于 *G. ruber* 的. 此外, 表层种 *G. ruber* 和次表层种 *P. obliquiloculata* 都记录有明显的新仙女木期变冷事件, 它们的 $\delta^{18}\text{O}$ 在这一时期(末次冰消期的 13.2~11.5 ka BP 之间)分别变重 $\sim 1.0\text{‰}$ 和 0.8‰ 以上(图 2), 说明南海南部的热带海区

同样存在类似新仙女事件的千年尺度快速气候变化。

MD 94 站浮游有孔虫定量分析结果表明, *P. obliquiloculata* 的丰度在 0~21.6% 之间变化, 平均丰度为 5.4%。末次冰消期以来 *P. obliquiloculata* 的丰度有整体降低的趋势, 最大值出现在冰消期的早期 (16.2 ka BP 处; 图 3(b))。该站 *P. obliquiloculata* 的丰度有两个明显偏低的层段: 3.7~5.2 和 14.9~16.0 ka BP。其中, 3.7~5.2 ka BP 之间的样品中, *P. obliquiloculata* 的丰度仅 1.9%, 最低为 0.4%, 时间上对应于西太平洋边缘海广泛记录的全新世 PME [5,6,9~11]。与南海北部 (图 3(a)) 和冲绳海槽不同, 晚全新世 PME 后南海南部 *P. obliquiloculata* 的丰度没有恢复到早全新世的水平 [12]。此外, MD94 站末次冰消期以来 *P. obliquiloculata* 丰度的最显著变化发生在 14.9~16.0 ka BP 之间, 仅少量样品可见 *P. obliquiloculata* 壳体, 平均丰度只有 1.1%, 与上下层段的 *P. obliquiloculata* 丰度 (一般达 10%) 相比急剧降低。这是末次冰消期发生的一次普林虫低值事件。这次事件大约自 16.0 ka BP 起, 至 14.9 ka BP 结束, 持续约 1.1 ka (图 3(b))。由于在时间上, 与众所周知的末次冰消期的 Heinrich 变冷事件 1 (简称 H1) 相吻合, 我们将末次冰消期的这次普林虫低值事件又称为 H1-PME。将 MD94 站的 *P. obliquiloculata* 的丰度曲线与南海其他站位的比较, 发现这次事件在南海南部 (如有精确年龄框架的 17962 [18] 和 MD97~2151 [19]) 广泛存在, 均发生在 14.8~17 ka BP 之间, 而南海北部的 17940 站 [19] (图 3(a)) 则没有记录这次事件。这说明

图 3 南海南部各站位及北部 17940 站 *P. obliquiloculata* 的丰度变化

(a) 17940 站 [19], (b) MD 05-2894 站, 本研究; (c) 17962 站 [18], (d) MD 97-2151 站 [19]。PME 为晚全新世普林虫低值事件, H1-PME 指与 H1 相对应的末次冰消期普林虫低值事件

末次冰消期普林虫低值事件, 不仅是南海南部地层划分对比的良好标志, 也是南海南部热带海区所特有的现象。

前人对晚全新世普林虫低值事件 PME 发生的原因作过深入的探讨, 最初认为引起这次事件的原因是冬季表层海水温度 SST 下降 [5,12], 进一步研究表明, 这次 PME 与黑潮路径和强度的改变 [5,6,9,11] 密切相关; 也有人将这次事件与 ENSO 的作用联系起来 [20]。Lin 等人 [10] 汇总了西太平洋边缘海 (主要是冲绳海槽和南海) 的 20 余个晚第四纪钻孔资料, 并根据新获得的浮游有孔虫多属种氧、碳同位素分析资料以及采用 *G. ruber* 的 Mg/Ca 比值计算的表层海水温度 SST 数据, 在否认以上 3 种解释的同时, 又提出全新世普林虫低值事件与古海洋学变化无关。确实, 全新世普林虫低值事件在南海南部 (图 3) 的存在, 无法用黑潮路径或强度的改变来解释; 冲绳海槽 [10,21] 和南海南部 [22,23] Mg/Ca 比值计算的表层海水温度也不支持 PME 时期的降温; 如果 PME 反映的是 El Nino 增强的话 [20], 很难解释古气候和数值模拟研究揭示的 PME 后 El Nino 进一步加强 [24], 何况 ENSO 对于 *P. obliquiloculata* 丰度变化的影响也只能是间接的。至于末次冰消期的普林虫低值事件, 由于目前仅在南海南部发现, 其发生的原因可能与全新世普林虫低值事件的不一致, 但也至少不能用黑潮或者表层海水温度的变化来解释。譬如, 末次冰消期南海南部表层海水温度升高的过程中, 在 14.8~17 ka BP 之间并没有与 H1-PME 相对应的表层海水降温 [22]。要了解晚第四纪 *P. obliquiloculata* 丰度的这种突然变化, 看来必须从影响这个种的生态因素 (次表层海水的温度和营养物供给等) 去分析。

为此, 本次研究在对表层种 *G. ruber* 进行分析的同时, 也对次表层种 *P. obliquiloculata* 进行了氧、碳稳定同位素和 Mg/Ca 比值分析。分别采用 Dekens 等人 [25], Lea 等人 [26] 和 Huang 等人 [27] 的公式计算 Mg/Ca 比值的表层海水温度 SST, 发现 Huang 等人 [27] 的公式计算的柱状样顶部样品 SST (春夏季与秋冬季的平均值, 28.0) 与该站位现代的年均 SST [28] 更为接近, 且该公式来自南海, 故本文 SST 的计算采用 Huang 等人 [27] 的公式。分别采用 Anand 等人 [29] 和 Huang 等人 [27] 的公式通过 *P. obliquiloculata* 的 Mg/Ca 比值计算次表层海水温度 (subsurface sea temperature, 简称 SSST), 发现末次冰期以来 Huang 等人 [27] 的计算结果一直比 Anand 等人 [29] 的结果高 0.29, 可能是这两个公式分别来自南海与

马尾藻海所造成的。本次研究选择来自南海的Huang等人^[27]的计算结果。详细的Mg/Ca比值古温度分析将另文讨论, 本文将着重在全新世和末次冰消期的普林虫低值事件中的温度变化。

如图4(b)所示, 从总趋势上看, Mg/Ca比值计算的SST与 $\delta^{18}\text{O}$ 相似。SST在23.7~29.8之间变化, 冰消期早期(15.0~18.9 ka BP)SST较低, 平均为25.5, 最低仅23.7; 全新世SST显著增高, 平均为28.8, 冰期与全新世的SST差值为~3.3, 与附近的MD97~2151(2.9^[30])和MD01~2390(3^[22])的结果相当。在全新世和末次冰消期的普林虫低值事件期间, SST都没有明显的降低, 只是在末次冰消期普林虫低值事件后进入终止期IA的升温阶段(图4(b))。然而, 研究区的浮游有孔虫转换函数估算的冬季SST, 在全新世和末次冰消期的普林虫低值事件期间都有明显降低, 如17962站的冬季SST在17~15 ka BP之间的最大降幅达到了约6^[31]。这可能与这一时间段*P. obliquiloculata*丰度急剧降低造成的非类比问题^[15,23]有关, 说明在南海南部采用转换函数恢复古温度可能存在很大的误差。由于邻近站位(如MD97-2151^[30]和MD01-2390^[22])的SST在17.0~14.8 ka BP之间也没有明显的降温, 说明表层海水温度变化不是普林虫低值事件的原因。

图4 MD 05-2894站表层和次表层海水古温度及其与MD97-2151站表层海水温度SST的比较

(a) MD05-2894站*P. obliquiloculata*的Mg/Ca比值计算的次表层海水温度SSST, 虚线示意3点滑动移动平均曲线; (b) MD05-2894站*G. ruber*的Mg/Ca比值计算的表层海水温度SST, 横虚线示意各时间段的平均值; (c) MD97-2151站 U_K^{37} 计算的表层海水温度SST^[30]。PME为晚全新世普林虫低值事件, YD为新仙女木变冷事件, H1-PME指与H1相对应的末次冰消期普林虫低值事件。

采用*P. obliquiloculata*的Mg/Ca比值计算的次表

层海水温度SSST(图4(a))在16.0~23.2之间变化, 略大于表层海水温度的变化幅度。SSST的总体变化趋势也与 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化相似, 呈现冰消期早期温度低, 全新世温度高的特点, 不同的是SSST在早, 中全新世高温之后有持续降低的趋势, 这一点与蒂汶海*P. obliquiloculata*记录的次表层海水温度变化一致^[8]。与*G. ruber*记录的表层海水温度变化不同, 次表层海水温度清楚地记录全新世和末次冰消期普林虫低值事件以及新仙女木事件的降温, 最大降幅分别达~3.1, 4.8和3.1。其中, 末次冰消期普林虫低值事件的次表层海水降温最为明显, 平均温度较之前的降低了~2。

由于全新世和末次冰消期普林虫低值事件期间, 表层海水温度变化不大, 而次表层海水温度降低, 使得海洋上层的垂向温度梯度(ΔT)增大(图5(a)), 因而温跃层变浅。实际上, 浮游有孔虫次表层种*P. obliquiloculata*于表层种*G. ruber*之间的 $\delta^{18}\text{O}$ 差值($\Delta\delta^{18}\text{O}$)常用来指示温跃层深度(depth of thermocline, 简称DOT)的变化, 该值越大, 指示温跃层越浅^[7,32]。图5(b)示 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 在全新世和末次冰消期普林虫低值事件期间增大, 说明温跃层变浅, 与海洋上层的垂向温度梯度 ΔT 增大相吻合。此外, ΔT 和 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 都指示冰消期早期的温跃层深, 全新世的温跃层浅, 而末次冰消期普林虫低值事件正处于这两种温跃层结构转变的阶段(图5)。看来, 次表层海水的降温和温跃层结构的改变, 引起的热带暖水种*P. obliquiloculata*的生态环境发生改变, 可能是其丰度急剧降低的直接原因。

图5 MD 05-2894站表层和次表层海水的Mg/Ca比值古温度和 $\delta^{18}\text{O}$ 差值

(a) Mg/Ca比值古温度的差值(ΔT); (b) 浮游有孔虫表层种*G. ruber*与次表层种*P. obliquiloculata*的 $\delta^{18}\text{O}$ 差值($\Delta\delta^{18}\text{O}$)。PME为晚全新世普林虫低值事件, H1-PME指与H1相对应的末次冰消期普林虫低值事件。横虚线示各时间段的平均值。

那么, 又是什么原因引起次表层海水降温和温

跃层结构的改变呢？由于全新世普林虫低值事件广泛见于西太平洋洋边缘海，而末次冰消期低值事件仅见于南海南部，说明南海南部末次冰消期存在有别于西太平洋其他地区的古海洋学变化。Koutavas等人^[33]通过比较东太平洋V21-30站与南海南部18287站的SST记录，发现17.0~14.8 ka BP之间东西太平洋的温差减小，El Nino增强，与南海南部的末次冰消期普林虫低值事件在时间上完全一致，但是*P. obliquiloculata*丰度的这一变化并不见于赤道西太平洋海域^[8]，无法用热带气候的变化(如ENSO的作用)来解释。末次冰消期普林虫低值事件在时间上相当于H1变冷事件。一种推测是，H1事件时北大西洋深层水(NADW)减弱，北太平洋中、深层水加强^[34]。低温的北太平洋中、深层水进入南海后，在南海南部受阻而上翻，有可能影响到次表层水，使得次表层海水降温、温跃层变浅，从而导致*P. obliquiloculata*的丰度降低。另一种可能的解释是，末次冰消期时南海南部与印度洋和太平洋的海洋通道逐步打开，改变了南海南部上部水体的垂向结构，使得生活在次表层水的*P. obliquiloculata*丰度降低。此外，根据南海现代海洋学研究表明，冬季风增强导致南海北部混合层加厚，上层海水经向温度梯度加大，温跃层通风性最好。混合层内水体可以沉入通风温跃层中、并向南呈气旋式移动^[35]。H1期间冬季风增强，南海温跃层通风性较好，更多的南海北部低温的表层海水进入季节性通风温跃层并向南部移动，成为南海南部的

次表层水，也可能引起次表层海水降温，温跃层变浅，从而导致*P. obliquiloculata*的丰度降低。当然，所有这些解释都需要在精确的年代地层框架的工作基础上，通过进一步探讨各种可能的古海洋学变化之间的联系，才能揭示南海南部末次冰消期普林虫低值事件期间次表层海水温度降低的原因。

3 小结

本次研究在南海南部MD05-2894站发现末次冰消期16.0~14.9 ka BP之间浮游有孔虫温跃层种*P. obliquiloculata*的丰度急剧降低至几乎为零，且这次事件在南海南部普遍存在，发生的时间介于17.0~14.8 ka BP之间，在时间上相当于H1气候变冷事件，可以作为地层划分对比的良好标志。通过对浮游有孔虫表层种*G. ruber*和次表层种*P. obliquiloculata*的稳定同位素和Mg/Ca比值分析，揭示了全新世和末次冰消期普林虫低值事件期间表层海水温度变化不大，而次表层海水降温和温跃层变浅明显。至于引起末次冰消期南海南部次表层海水明显下降~2℃的原因，应该还与这一时期南海南部独特的古海洋学变化(譬如，进入南海的北太平洋中、深层水在南海南部上翻，末次冰消期海洋通道的打开，或南海北部低温的表层海水沿通风温跃层进入南海南部次表层等，所引起的上部水体垂向结构改变)有关，有待今后进一步地研究。

致谢 本研究的样品由“国际海洋全球变化计划(IMAGES)”2005年中法合作“马可·波罗”航次提供，在此特别向所有船上科学家及工作人员表示感谢。同时，感谢成鑫荣和乔培军在实验测试上的大力帮助。

参考文献

- 1 Bé A W H. An ecological, zoogeographical and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In: Ramsay A T S, ed. *Oceanic Micropaleontology*. London: Academic Press, 1977. 1—100
- 2 Pflaumann U, Jian Z M. Modern distribution patterns of planktonic foraminifera in the South China Sea and western Pacific: A new transfer technique to estimate regional sea-surface temperatures. *Mar Geol*, 1999, 156: 41—83[DOI]
- 3 Thompson P R. Planktonic foraminifera in the western north Pacific during the past 150 000 years: Comparison of modern and fossil assemblages. *Palaeogeogr Paleoclimatol Palaeoecol*, 1981, 35: 241—279[DOI]
- 4 陈荣华, 翦知潜, 郑玉龙, 等. 南海中部浮游有孔虫通量的季节变化及其古海洋学意义. *同济大学学报(自然科学版)*, 2000, 28: 73—77
- 5 Li B H, Jian Z M, Wang P X. *Pulleniatina obliquiloculata* as a paleoceanographic indicator in the southern Okinawa Trough during the last 20,000 years. *Mar Micropaleontol*, 1997, 32: 59—69[DOI]
- 6 Jian Z M, Wang P X, 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[DOI]
- 7 Tian J, Wang P X, Chen R H, et al. Quaternary upper ocean thermal gradient variations in the South China Sea: Implications for East Asian monsoon climate. *Paleoceanography*, 2005, 20: PA4007, doi: 10.1029/2004PA001115
- 8 Xu J, Holbourn A, Kuhnt W, et al. Changes in the thermocline structure of the Indonesian Outflow during Terminations I and II. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 273: 152—162[DOI]
- 9 Ujiie Y, Ujiie H. Late Quaternary course changes of the Kuroshio Current in the Ryukau Arc region, northwestern Pacific Ocean. *Mar Micropaleontol*, 1999, 37: 23—40[DOI]
- 10 Lin Y S, Wei K Y, Lin I T, et al. The Holocene *Pulleniatina* Minimum Event revisited: Geochemical and faunal evidence from the Okinawa Trough and upper reaches of the Kuroshio Current. *Mar Micropaleontol*, 2006, 59: 153—170[DOI]
- 11 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 Paleoclimatol Palaeoecol*, 2001, 176: 133—146[DOI]
- 12 翦知湓, 汪品先, 李保华, 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
- 13 Peng Y, Xiao J, Nakamura T, et al. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 233: 467—479[DOI]
- 14 Wang Y J, Cheng H, Edwards L R, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and north Atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854—857[DOI]
- 15 翦知湓, 王博士, 乔培军. 南海南部晚第四纪表层海水温度的变化及其与极地冰芯古气候记录的比较. *第四纪研究*, 2008, 3: 391—398
- 16 Fairbanks R G, Mortlock R A, Chiu T C, et al. Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years B.P. based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals. *Quat Sci Rev*, 2005, 24: 1781—1796[DOI]
- 17 Wang L J, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Mar Geol*, 1999, 156: 245—284[DOI]
- 18 房殿勇, 成鑫荣, 吴国琮, 等. 南沙南部近 30 ka 来的古海洋学记录. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20: 81—86
- 19 Huang C Y, Chen M T, Lee M Y, et al. Planktic foraminifer faunal sea surface temperature records of the past two glacial terminations in the South China Sea near WanAn Shallow (IMAGES core MD972151). *Western Pacific Earth Sci*, 2002, 2: 1—14
- 20 Ujiie Y, Ujiie H, Taira A, et al. Spatial and temporal variability of surface water in the Kuroshio source region, Pacific Ocean, over the past 21,000 years: Evidence from planktonic foraminifera. *Mar Micropaleontol*, 2003, 49: 335—364[DOI]
- 21 Sun Y B, Oppo D W, Xiang R, et al. Last deglaciation in the Okinawa Trough: Subtropical northwest Pacific link to Northern Hemisphere and tropical climate. *Paleoceanography*, 2005, 20: PA4005, doi: 10.1029/2004PA001061
- 22 Steinke S, Chiu H, Yu P, et al. On the influence of sea level and monsoon climate on the southern South China Sea fresh water budget over the last 22,000 years. *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 1477—1488
- 23 Steinke S, Yu P, Kucera M, et al. 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. *Mar Micropaleontol*, 2008, 66: 71—90[DOI]
- 24 Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, et al. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature*, 2002, 420: 162—165[DOI]
- 25 Dekens P, Lea D, Pak D, et al. Core top calibration of Mg/Ca in tropical foraminifera: Refining paleotemperature estimation. *Geochem Geophys Geosyst*, 2002, 3: 1022, doi: 10.1029/2001 GC000200
- 26 Lea D W, Pak D, Spero H. Climate impact of Late Quaternary Equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science*, 2000, 289: 1719—1724
- 27 Huang K F, You C F, Lin H L, et al. *In situ* calibration of Mg/Ca ratio in planktonic foraminiferal shell using time series sediment trap: A case study of intense dissolution artifact in the South China Sea. *Geochem Geophys Geosyst*, 2008, 9, doi: 10.1029/2007 GC001660
- 28 Levitus S, Boyer T P. *World Ocean Atlas 1994: Temperature*. NOAA Atlas NESDIS, 4. Washington D C: US Department of Commerce, 1994
- 29 Anand P, Elderfield H, Conte M. Calibration of Mg/Ca thermometry in planktonic foraminifera from a sediment trap time series. *Paleoceanography*, 2003, 18: 1050, doi: 10.1029/2002PA 00846
- 30 Zhao M X, Huang C Y, Wang C C, et al. A millennial-scale U_K^{37} sea-surface temperature record from the southern South China Sea (8°N) over the last 150 ka: Monsoon and sea-level influence. *Palaeogeogr Paleoclimatol Palaeoecol*, 2006, 236: 39—55[DOI]
- 31 李保华, 翦知湓, 黄宝琦, 等. 南海南部表层海水古温度估算与次表层海水特征变化. *微体古生物学报*, 2004, 21: 37—43
- 32 Jian Z, Huang B, Lin H, et al. Late Quaternary upwelling intensity and East Asian monsoon forcing in the South China Sea. *Quat Res*, 2001, 55: 363—370[DOI]
- 33 Koutavas A, Stieglitz J, Marchitto T, et al. El Niño-like pattern in Ice Age Tropical Pacific sea surface temperature. *Science*, 2002, 297: 226—230[DOI]
- 34 Sarnthein M, Thorsten K, Grootes P, et al. Warmings in the far northwestern Pacific promoted pre-Clovis immigration to America during Heinrich Event 1. *Geology*, 2006, 34: 141—144, doi: 10.1130/G22200.1
- 35 王东晓, 杜岩, 施平. 冬季南海温跃层通风的证据. *科学通报*, 2001, 46: 758—762