

西太平洋暖池北部 15 万年以来的碳同位素低值事件

仇晓华^{1,2,3,4}, 李铁刚^{1,2}, 南青云^{1,2}, 官海明⁴

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250014)

摘要: 对取自西太平洋暖池北部的 MD06-3052 孔的浮游有孔虫表层种 *Globigerinoides ruber* 进行了稳定氧碳同位素测试与分析, 在所建立的年龄模式基础上, 揭示了该孔 150 ka 以来氧碳同位素的变化特征及其碳同位素低值事件的时间。结果表明, 150 ka 以来碳同位素总体上显示出逐渐变重的趋势, 其变化不同于氧同位素, 并未表现出冰期-间冰期尺度的变化特征, 且全新世和末次间冰期碳同位素差异较大。在所识别出的 6 次碳同位素的低值事件中, 除倒数第二次冰消期与岁差低值有相位差以外, 其余均与岁差低值都有很好的对应。幅度较大的 3 次发生于冷期/暖期的过渡期, 其中末次冰消期的碳同位素记录受到浊流的侵蚀作用, 有部分缺失; 该孔与其他海区记录的相似性进一步证实了 3 次冰消期的 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件的普遍性。

关键词: 西太平洋暖池; 碳同位素; 低值事件; 岁差

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2014)11-0116-06

doi: 10.11759/hyxx20130319003

有孔虫壳体的氧碳同位素在古海洋学中应用广泛, 其碳同位素记录了地壳碳储库之间、海洋表层水和深层水之间以及不同海区之间的碳循环过程^[1]; 氧同位素记录了其生存环境中海水的温度、盐度和冰体积变化效应。全球冰体积的变化信号在氧同位素中的反映最为明显, 因此氧同位素在冰期-间冰期的尺度上可全球对比, 通常被用作年代标尺。碳同位素的影响因素则复杂得多。

目前越来越多的古海洋记录显示, 全球各海区均发现冰消期浮游有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件, 然而该事件的机制尚有争议, 许多研究结果支持其与南极深层水的上涌有关^[2-3]。本文选取了西太平洋暖池北部边缘的 MD06-3052 孔, 分析了沉积物中浮游有孔虫表层种的氧碳同位素, 以讨论氧碳同位素的变化规律, 并验证碳同位素低值事件是否影响到西太平洋暖池北部, 进而探讨该事件的机理。

1 材料与方 法

本文选取国际海洋全球变化研究(IMAGES)于 2006 年在西太平洋暖池北部、北赤道流分叉处附近取得的高质量岩心 MD06-3052(图 1)(14°48.6042'N, 123°29.3983'E, 水深 732 m)进行了氧碳同位素测定。该岩心全长 1 948 cm, 岩性以橄榄灰到灰色粉砂质

黏土和黏土质粉砂为主, 以 4 cm 间隔取样, 共获得样品 486 个。

有孔虫氧碳同位素样品的挑选、前处理与测定均按照标准流程在中国科学院海洋地质与环境重点实验室完成。首先取适量沉积物样品置于 50°C 烘箱中烘干后, 用自来水浸泡 1~2 d, 再用 63 μm 的网筛进行冲洗, 最后将 >63 μm 的粗组分置于 50°C 烘箱中烘干, 并在体式显微镜下挑选壳体保存良好、干净、无明显溶蚀痕迹的浮游有孔虫表层种 *Globigerinoides ruber*(250~300 μm)个体约 20 枚。为去除有孔虫壳体的有机质等, 还需进行如下前处理过程: 首先将压碎的有孔虫壳体在 3% 的双氧水中浸泡 0.5 h, 然后加入少量丙酮并超声 30 s, 最后去除上层废液并将残留部分放入 50°C 烘箱中烘干。烘干后的待测样品随后被转移到 GV IsoPrime 型稳定同位素质谱仪中进行氧碳同位素测试, 该仪器对 $\delta^{18}\text{O}$ 的标准偏差为 $\pm 0.06\text{‰}$, 对 $\delta^{13}\text{C}$ 的标准偏差为 $\pm 0.04\text{‰}$, 最后利用 NBS18 标准将测得的氧碳同位素数据转化为国际 PDB 标准。

收稿日期: 2013-03-19; 修回日期: 2013-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41076030, 41230959, 41206044, 40906038)

作者简介: 仇晓华(1983-), 女, 山东莱西人, 博士, 主要从事古海洋与古环境研究, E-mail: xiaohuaqiu@126.com

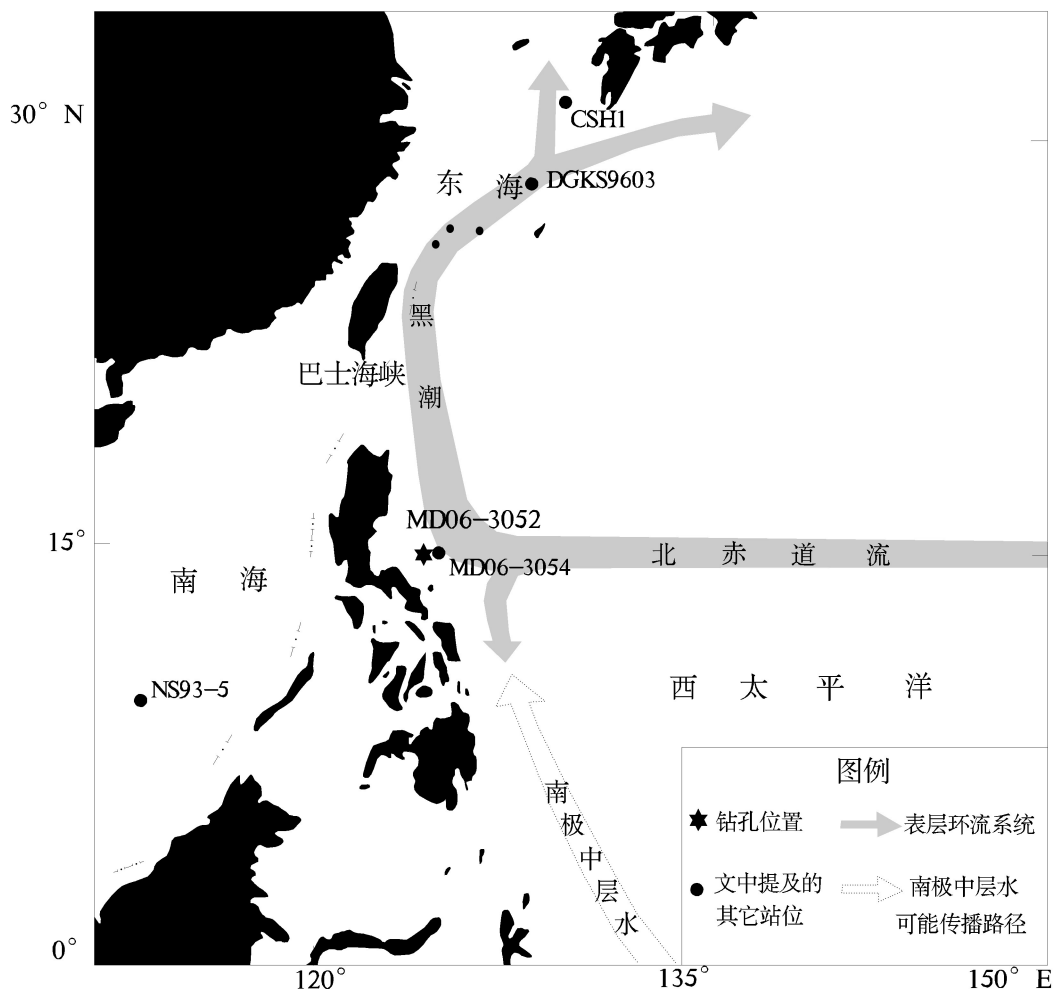


图1 MD06-3052孔及与本文有关的钻孔位置及表层环流系统

Fig.1 Positions of MD06-3052 and other related cores and surface current in the studied area

2 结果

2.1 年龄模式

我们基于3个AMS¹⁴C测年结果^[4](图2箭头及数字)及所研究岩芯浮游有孔虫*G. ruber* δ¹⁸O曲线与SPECMAP δ¹⁸O标准曲线^[5]的对比(图2中虚线指示MD06-3052孔氧同位素地层对应年代)建立了MD06-3052孔的年龄模式^[4]。结果表明MD06-3052孔底部年龄达到150 ka, 即MIS6期, 所研究岩芯的氧同位素期次详细划分情况如图3所示。

2.2 浮游有孔虫氧碳同位素变化

150 ka以来表层种*G. ruber*的δ¹⁸O整体上显示出冰期-间冰期尺度的变化特点, 即冰期(MIS6期、MIS2~MIS5d期)较重, 间冰期(MIS1期、MIS5e期)较轻(图3)。表层种*G. ruber*的氧同位素在终止期

II(即MIS6期向末次间冰期过渡的时期, 倒数第二次冰消期)变化幅度较大, 为1.9‰。与邻近海区相比, SO18459孔(帝汶海区印度尼西亚贯穿流出口处)*G. ruber*的氧同位素从135 ka的-1.1‰减小到128 ka的-2.5‰, 变轻幅度约为1.4‰^[8]; 而MD98-2162孔(Makassar海峡)的变化幅度为1.9‰^[9]; ODP806B孔(西太平洋暖池核心区)的变化幅度为1.1‰^[10]。各海区变化幅度各不相同, 很大程度上是由于当地水文条件(如降雨)和温度的差异造成的。150 ka以来MD06-3052孔受到5次浊流作用的侵蚀, 因此本文中删除了所有浊积层的记录^[4]。

碳同位素的变化要比氧同位素复杂得多。整体趋势上, 150 ka以来δ¹³C在0.1‰~1.5‰变动(图3), 尤其是137.2 ka以来, 碳同位素呈现逐渐变重的趋势, 与南海200 ka以来碳同位素的变重趋势类似^[11]。具体来讲, 137.2 ka之前, δ¹³C变化幅度较小; 137.2 ka

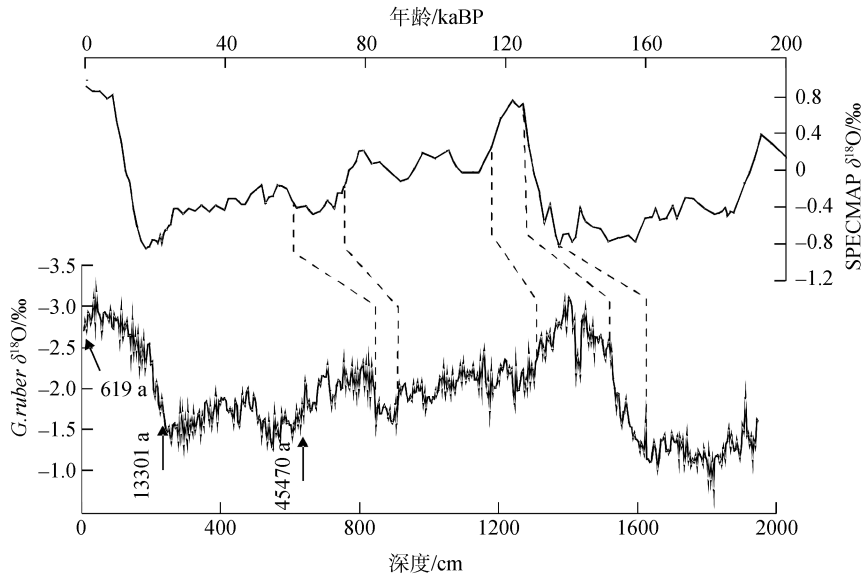


图2 MD06-3052孔 AMS¹⁴C 测年结果^[4](已校正)及 *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ 曲线与 SPECMAP $\delta^{18}\text{O}$ 标准曲线^[5]的对比

Fig.2 AMS¹⁴C dating points of core MD06-3052 and comparison between *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ curve of the studied core and the SPECMAP curve

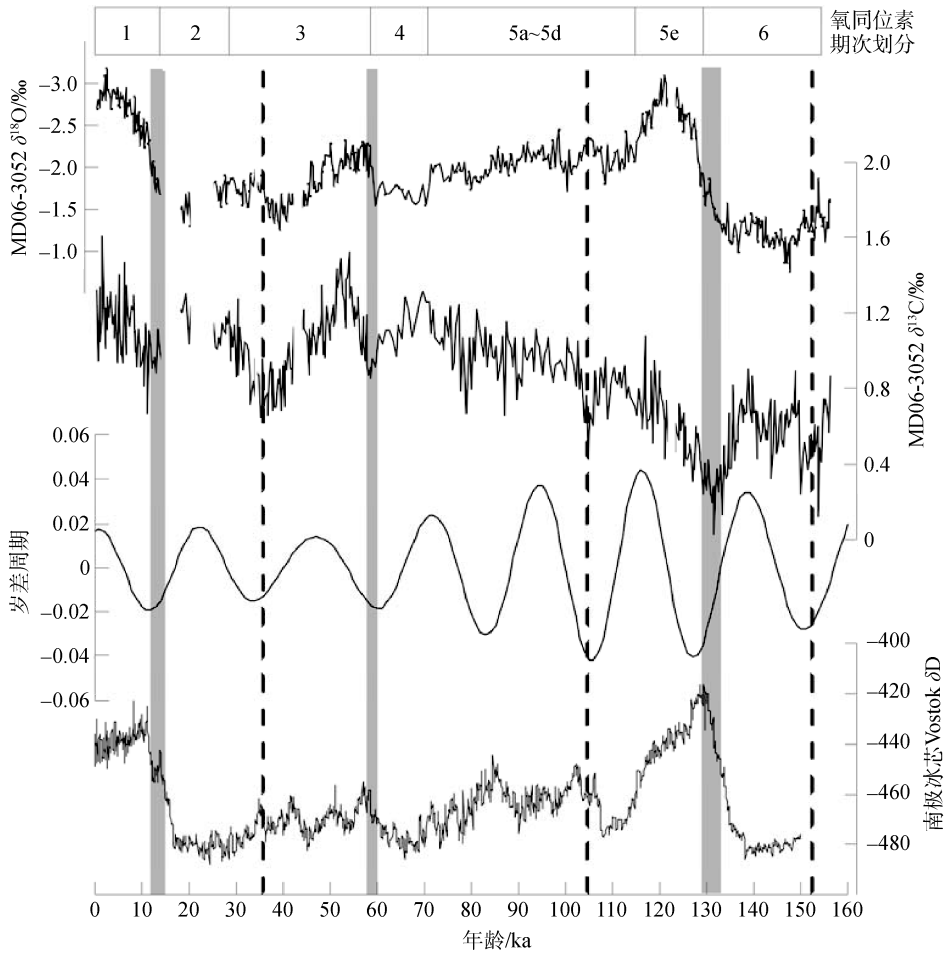


图3 MD06-3052孔 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 及其与岁差周期^[6]、南极冰芯 Vostok δD ^[7]的对比

Fig.3 Oxygen isotope, carbon isotope of Core MD06-3052 and the comparison with the precession cycles and Antarctic Vostok ice core δD

之后 $\delta^{13}\text{C}$ 开始变轻, 在 131.6 ka 达到最低。这一次低值事件是 150 ka 以来最明显持续时间最长的(约 133.1~129.1 ka)。随后, 碳同位素开始逐渐变重, 直到 MIS4 期伊始(约 71 ka)达到极值, 在逐渐变重过程中有几次小幅度的变轻事件出现; 进入 MIS4 期之后, $\delta^{13}\text{C}$ 开始逐渐变轻, 直到 MIS4/3 过渡期出现低值事件(60.4~57.7 ka)之后又逐渐变重, 至 54 ka 达到极值。最后一次低值事件发生的时期在末次冰消期, 然而由于浊流作用, 造成了沉积记录的不完整, 低值事件的起始时间较难确定。低值事件之后, $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐变重, 直至早全新世(8.3 ka), 与东赤道太平洋的时间(中全新世)有所差异^[12]。

除上述发生在冰期-间冰期过渡期的碳同位素低值事件外(图 3 中灰色阴影指示), 我们还识别出了 MD06-3052 孔的另外 3 次小幅度低值事件, 分别发生在 MIS6 期(极值在 149.9 ka)、MIS5 期(极值 104.8 ka)和 MIS3 期(35.2 ka)(图 3 中虚线指示)。这 3 次低值事件的持续时间以及变化幅度各不相同, 其中又以发生于 MIS3 期的最为明显、幅度最大; 其余两次的持续时间短、变化幅度很小。

3 讨论

3.1 与其他地区 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件间对比

$\delta^{13}\text{C}$ 低值事件在全球范围内广泛存在, 在邻近海区, 如冲绳海槽、南海和西北太平洋均有相关记录。

冲绳海槽北部 CSH1 孔(图 1) $\delta^{13}\text{C}$ 曲线显示, 48 ka 以来出现了 4 个明显的宽幅低值时期, 时间分别为 44~38.5, 36~30, 25~18.5 和 14~10 ka^[13]; 冲绳海槽中部的 DGKS9603 孔(图 1)也发现了末次冰消期浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 的宽幅低值事件^[14]。

南海 NS93-5 孔(图 1)终止期 II 出现浮游有孔虫壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件, 极低值的出现时间约在 131 ka^[15]; 南海 8 个站位浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 综合曲线显示, 近 200 ka 来发生了 3 次碳同位素的低值事件, 且均发生在冰消期^[11], 其变化与太平洋^[16-17]和大西洋^[18]的记录一致。

西北太平洋 MD06-3054 孔(图 1)末次冰消期浮游有孔虫表层种 *G. ruber* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 极低值出现的时间为 13.0~11.0 ka, 领先于次表层种 *Pulleniatina obliquiloculata* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 极低值出现的时间^[19]。

此外, 其他海区也发现了碳同位素低值事件的证据, 如东赤道太平洋 TR163-19 终止期 I 和 II 均发现碳同位素低值事件, 其中终止期 I 极低值出现的时

间约 15.9 ka \pm 0.2 ka^[12]; 东太平洋 ODP1240 站位 3 个终止期均发现了 *Neogloboquadrina dutertrei* 碳同位素低值事件, 并且时间与次表层水开始变暖的时间一致^[20]。

总的来说, MD06-3052 孔与以上海区在终止期 I、II 的 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件记录上相吻合^[11-20], 在 MIS4/3 过渡期事件上与南海一致^[11], 而在 35.2 ka 事件上则与冲绳海槽北部的记录较一致^[13]。

3.2 机制探讨

关于冰消期 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件的驱动机制目前仍存在争议, 许多证据将这一信号的来源指向南半球高纬。东太平洋 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件的开始时间、表层海水温度开始增温的时间与南极开始变暖的时间一致, 指示着碳同位素低值信号很有可能来自南半球高纬^[12], 认为冰消期时南大洋水分层结束、南极底层水的上涌, 一方面造成了冰期时封存于深层水中的 CO_2 的释放, 另一方面通过南极深层水对流活动、亚南极模态水和南极中层水将 $\delta^{13}\text{C}$ 低值信号带到低纬海区。

西北太平洋黑潮源区 MD06-3054 孔的记录表明末次冰消期表层种 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件领先于次表层种, 可能是来源于南半球高纬 $\delta^{13}\text{C}$ 低值信号的不同传播途径造成的, 次表层 $\delta^{13}\text{C}$ 低值可能是通过水团(即南极中层水)的传播, 而表层水 $\delta^{13}\text{C}$ 低值更可能与大气 CO_2 的影响有关^[19]。李铁刚等^[14]推测末次冰消期冲绳海槽中部表层水 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件应是受西太平洋表层水体直接影响。卢苗安等^[15]发现倒数第二次冰消期南海地区的浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件发生于全球快速升温、冰盖快速消融和大气甲烷浓度快速增加的时期, 推测该低值事件是由于大洋环流格局的变化引起西太平洋边缘海海底天然气水合物突然失稳导致大量甲烷释放造成的。李建如等^[11]通过全球对比, 发现了南海 200 ka 来浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件的时间与其他大洋的共同特征, 即 3 次 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件均发生在冰消期; 另外, $\delta^{13}\text{C}$ 还显示出冰期-间冰期旋回、偏心率长周期和岁差周期的变化。南海 $\delta^{13}\text{C}$ 的冰期-间冰期旋回变化反映了陆地植被对大洋碳储库的影响; 200 ka 以来 $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐变重的趋势, 对应着最后两次碳同位素重值事件之间($\delta^{13}\text{C}_{\text{maxII-I}}$)的后半部分, 是 500 ka 偏心率周期的表现; 而 3 次低值事件均对应岁差低值时期, 可能是低纬过程驱动(如季风)的反映^[11]。

将 MD06-3052 孔 $\delta^{13}\text{C}$ 显示出的低值事件与其他海区记录对比发现, MD06-3052 孔 150 ka 以来冰消

期的 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件与南海的记录(即 MIS5/6、MIS3/4 以及 MIS1/2 过渡期的低值事件)有较好的对应, 逐渐变重的趋势也较明显^[11]。与之不同的是, MD06-3052 孔 $\delta^{13}\text{C}$ 并没有显示出冰期变轻, 间冰期变重的趋势, 全新世和末次间冰期 $\delta^{13}\text{C}$ 的记录差异也很大。此外, 其余 3 次幅度较小的低值事件也没有显示一致性。MD06-3052 孔 $\delta^{13}\text{C}$ 的记录在 149.9, 104.8, 35.2 ka 的 3 次小幅度的低值事件与岁差低值^[6](图 3)有较好的对应, 同时冰消期的 3 次低值事件也对应着岁差低值, 除了终止期 II 的 $\delta^{13}\text{C}$ 低值可能由于年代框架的误差而与岁差低值有相位差外, 其余均对应良好, 可见碳同位素的岁差周期较为明显。

与南极的 $\delta\text{D}^{[7]}$ (温度指标)记录对比则发现, 终止期 II 和 MIS4/3 过渡期 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件的开始与南极的变暖是同时的(图 3), 说明这两次 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件信号的来源可能与南极的变暖有关。

总之, 西太暖池北部边缘 MD06-3052 孔与其他海区记录的相似性, 进一步证实了 3 次冰消期的 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件的普遍性。而其他 3 次小幅度的 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件与岁差低值的对应, 可能是低纬西太平洋的区域性特点。由于西太平洋暖池北部受到 ENSO 和季风作用的强烈影响, 其降雨、水体营养水平等被制约, 进而影响了 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化, 而 ENSO 和季风等作用是具有岁差周期的。另外, 新兴的热带驱动假说^[21]认为季风通过降水影响陆地化学风化作用, 这一作用又控制 Si 向大洋的输入, 进而调整大洋浮游植物中硅藻与颗石藻的比值, 改变了有机碳和无机碳的比例, 最后影响了大洋碳储库及 $\delta^{13}\text{C}$ 的周期性变化, 然而这种影响是否具有岁差周期, 仍有待进一步检验。

4 结论

1) 西太平洋暖池北部 MD06-3052 孔 150 ka 以来浮游有孔虫表层种的 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 显示不同的变化特征, $\delta^{13}\text{C}$ 并未显示出明显的冰期-间冰期变化。

2) 从 MD06-3052 孔的记录中共识别出 6 次 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件, 其中 3 次较明显, 发生在冷期向暖期过渡的时期即冰消期, 而其余 3 次幅度较小, 与岁差低值对应较好。

3) MD06-3052 孔 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件与岁差低值的对应, 可能反映了低纬过程(如 ENSO、季风)对西太平洋暖池北部表层海水碳同位素组成的控制。

参考文献:

[1] Hilting A K, Kump L R, Bralower T J. Variations in the

oceanic vertical carbon isotope gradient and their implications for the Paleocene-Eocene biological pump[J]. *Paleoceanography*, 2008, 23(3): PA3222.

- [2] Spero H J, Mielke K M, Kalve E M, et al. Multispecies approach to reconstructing eastern equatorial Pacific thermocline hydrography during the past 360 kyr[J]. *Paleoceanography*, 2003, 18(1): 1022.
- [3] Anderson R F, Ali S, Bradtmiller L I, et al. Wind-driven upwelling in the Southern Ocean and the deglacial rise in atmospheric CO_2 [J]. *Science*, 2009, 323(5920): 1443-1448.
- [4] 仇晓华, 李铁刚, 常凤鸣, 等. 西菲律宾海 15 万年以来的浊流沉积及其成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(4): 157-163.
- [5] Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, et al. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record [C]//Berger A, Imbrie J, Hays J, et al. *Milankovitch and Climate*. Dordrecht: Dordrecht Reidel Publishing Company, 1984: 269-305.
- [6] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2004, 428(1): 261-285.
- [7] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. *Nature*, 1999, 399(6735): 429-436.
- [8] 田翠翠, 田军. 倒数第 2 个冰消期印度尼西亚穿越流的增温幅度及其与高纬气候变化的关系[J]. *科学通报*, 2010, 55(30): 2944-2952.
- [9] Visser K, Thunell R, Stott L. Magnitude and timing of temperature change in the Indo-Pacific warm pool during deglaciation[J]. *Nature*, 2003, 421(6919): 152-155.
- [10] Lea D W, Pak D K, Spero H J. Climate impact of late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations[J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1719-1724.
- [11] 李建如, 汪品先. 南海 20 万年来的碳同位素记录[J]. *科学通报*, 2006, 51(12): 1482-1486.
- [12] Spero H J, Lea D W. The cause of carbon isotope minimum events on glacial terminations[J]. *Science*, 2002, 296(5567): 522-525.
- [13] 孙荣涛, 李铁刚, 张德玉, 等. 冲绳海槽 48ka 以来的碳同位素记录及其环境指示意义[J]. *海洋与湖沼*,

- 2007, 38(4): 314-321.
- [14] Li T, Liu Z, Hall MA, et al. The planktonic foraminiferal $\delta^{13}\text{C}$ broad minimum event during the last deglacial in Okinawa Trough (in Chinese)[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(4): 298-301.
- [15] 卢苗安, 马宗晋, 陈木宏, 等. 倒数第二次冰消期西太平洋边缘海地区 $\delta^{13}\text{C}$ 值快速负偏事件及其成因[J]. 第四纪研究, 2002, 4: 349-357.
- [16] Shackleton N J, Hall M A. Stable isotope history of the Pleistocene at ODP Site 677[J]. Proc ODP Sci Results, 1989, 111: 295-316.
- [17] Schmidt H, Berger W H, Bickert T, et al. Quaternary carbon isotope record of pelagic foraminifers: Site 806, Ontong Java Plateau[J]. Proc ODP Sci Results, 1993, 130: 397-409.
- [18] Tiedemann R, Sarnthein M, Shackleton N J. Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic $\delta^{18}\text{O}$ and dust flux records of Ocean Drilling Program Site 659[J]. Paleoceanography, 1994, 9(4): 619-638.
- [19] Chen S X, Li T G, Tang Z, et al. Response of the northwestern Pacific upper water $\delta^{13}\text{C}$ to the last deglacial ventilation of the deep Southern Ocean[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(24): 2628-2634.
- [20] Pena L D, Cacho I, Ferretti P, et al. El Niño–Southern Oscillation–like variability during glacial terminations and interlatitudinal teleconnections[J]. Paleoceanography, 2008, 23(3): PA3101.
- [21] 汪品先, 翦知潜, 刘志飞. 地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录(II): 气候变化的热带驱动与碳循环[J]. 地球科学进展, 2006, 21(4): 338-345.

Carbon isotope minimum events in the northern margin of western Pacific Warm Pool since during the past 150 ka

QIU Xiao-hua^{1, 2, 3, 4}, LI Tie-gang^{1, 2}, NAN Qing-yun^{1, 2}, GONG Hai-ming⁴

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. No.1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan, 250014, China)

Received: Mar., 19, 2013

Key words: the western Pacific Warm Pool; carbon isotope; $\delta^{13}\text{C}$ minimum events; precession

Abstract: Based on the establishment of Age model, we investigated the stable oxygen and carbon isotope of *Globigerinoides ruber* from core MD06-3052 recovered from the northern margin of the western Pacific Warm Pool and then revealed the characteristic of carbon and oxygen isotope and the timing of $\delta^{13}\text{C}$ minimum events during the past 150 ka. The results show that the carbon isotope increased gradually since 150 ka ago, and there were no glacial-interglacial scale changes and indicated diversity between Holocene and last interglacial, distinct from oxygen isotope changes. We recognized 6 $\delta^{13}\text{C}$ minimum events, most of which correlated closely with low precession values, except that the Termination II $\delta^{13}\text{C}$ minimum event has phase difference. 3 of the $\delta^{13}\text{C}$ minimum events occurred at the transitions of glacial episode to interglacial episode. The last deglacial $\delta^{13}\text{C}$ minimum event was eroded partly by the turbidite event. The 3 $\delta^{13}\text{C}$ minimum events corresponded consistently with low precession periods. The similarity between the data obtained from MD06-3052 and other oceans further confirmed the universality of the 3 deglacial $\delta^{13}\text{C}$ minimum events.

(本文编辑: 刘珊珊)