

DOI:10.3724/SP.J.1140.2012.04097

早第四纪西太平洋底栖有孔虫群与 大洋深层水环流演化的关系

陈萌莎, 黄宝琦

(北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要:选取赤道西太平洋 ODP 807 站位(3°36.42'N, 156°37.49'E, 水深 2 803.8 m, 岩心长 822.9 m) 26.27~43.02 mbsf 层段中的底栖有孔虫进行研究, 以便了解早更新世 2.5~1.6 Ma BP 时期古生产力和深水环流的变化。结果显示, 这一时期底栖有孔虫堆积速率(BFAR)、表生种和内生种比值(E/I)、*Uvigerina* spp. 百分含量和有机碳百分含量(TOC %)等替代指标反映了西太平洋古生产力总体上呈现冰期高、间冰期低的特点, 而其中 *Bulimina alazanensis* 的丰度变化则相反, 反映了该种有可能更适合温暖、低营养的底层水环境。2.5~1.6 MaBP 时期底栖有孔虫在丰度上以 *Uvigerina* spp. 为主, 指示了早更新世西太平洋深层水受北部水团的控制更强。

关键词:深水环流; 底栖有孔虫群落; 古生产力; 西太平洋

中图分类号: P736.22 文献标识码: A 文章编号: 0256-1492(2012)04-0097-09

早更新世(2.588~0.78 MaBP)是一个气候特殊的时期, 是从上新世气候波动小、二氧化碳含量高、海水表层温度高的“暖室期”过渡到中晚更新世气候波动大的“冰室期”的转折点^[1-4]。在此期间, 冰期-间冰期的周期从上新世的 41 ka 过渡到晚更新世的 100 ka^[2,5]。

从上新世到更新世地球轨道参数的转变, 使得晚上新世全球气候逐渐变冷, 并且东、西太平洋的海水表面温度梯度(SST)开始形成并逐渐加大^[6]。2.7 MaBP 北半球冰盖强化^[7], 至 1.6 MaBP, 赤道太平洋的气候由持久的 El Niño 状态过渡到现代东西太平洋 SST 不对称的状态^[8-9], 全球性的大规模上升流体体系建立和强化^[10]。但是同样作为地球气候系统的重要组成部分之一的大洋深水环流, 在该段时期内的研究却很少。而深海底栖有孔虫对大洋深层水的性质有着很好的记录。过去对太平洋深层水的研究多基于东太平洋^[11], 但是西太平洋作为现代全球海-气交换最强烈、气候变化最敏感的区域, 也是南、北太平洋深层海水交汇关键区域的西太平洋, 却鲜有深水环流的研究。

我们选取西太平洋的 ODP 807 站位作为研究材料。过去对 ODP 807 站位的浮游有孔虫有过较长时间尺度较充分的研究^[12-13], 涵盖了同位素地球

化学, 元素地球化学, 古温度重建, 全球冰量变化等^[9, 12, 14-20]。但是, 对底栖有孔虫和深水环流仅有很少量的研究^[21]。由于底栖有孔虫是反映大洋深层水和底层水的性质变化和水团变化很好的材料^[22]。本文将通过分析对比西太平洋底栖有孔虫群落的属种组合, 来恢复早更新世太平洋深层水的特征。这对西太平洋早更新世以来大洋深层环流的演化和全球气候变化, 以及太平洋深层水形成的问题都有很深的意义。

1 材料与方法

本次研究中我们选用了大洋钻探 ODP 130 航次采自西太平洋 Ontong-Java 海台的 807A 孔沉积柱状样(3°36.42'N, 156°37.49'E, 水深 2 803.8 m, 图 1), 岩心长 822.9 m^[23], 样品均为深海灰绿色钙质超微黏土, 取其中 43.02~26.27 mbsf (meters below sea floor, 对应 2.5~1.6 MaBP) 部分, 以 15 cm 的间隔采样, 部分加密采样, 共得 126 个样品。

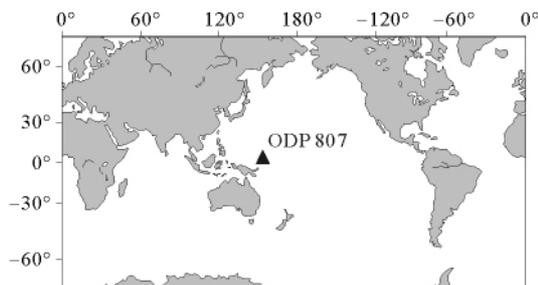


图 1 研究站位

Fig. 1 Site location of ODP 807

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB815901);
国家自然科学基金项目(40306007)

作者简介: 陈萌莎(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事古海洋学与微体古生物研究, E-mail: chenms1985@pku.edu.cn

收稿日期: 2012-07-06; 改回日期: 2012-07-17. 张光威编辑

样品用标准方法处理。湿样称重后 60 °C 低温烘干,烘干后称量干重,将干样放入烧杯中不加任何分散剂,用自来水浸泡 1~2 天至样品完全分散开,将样品置于 250 目(孔径 63 μm)的铜筛中用水冲洗至无泥附着,收集粒径大于 63 μm 的粗组分烘干称重,用 100 目(孔径 154 μm)铜筛进行干筛。在实体显微镜下从 >154 μm 的组分中挑出全部底栖有孔虫,参照 Loeblich 和 Tappan、Lutze、Ujiié^[24-26] 的分类标准对样品中的底栖有孔虫进行分类、鉴定,以及对其中的 *Bulimina alazanensis*、*Cibicidoides wuellerstorfi*、*Favocassidulina favus*、*Uvigerina* spp. 以及底栖有孔虫总数分别进行计数,并根据底栖有孔虫形态上的特征分别统计表生种、内生种的数量^[27]。

对初级生产力的计算我们采用了 Herguera 和 Berger^[28] 的底栖有孔虫堆积速率 (Benthic Foraminifera Accumulation Rate, BFAR, 单位 $\text{n}/\text{cm}^2/\text{ka}$) 公式,这也是在古海洋学研究中应用很广的一个生产力指标:

$$\text{BFAR} = \text{BF} \times \text{LSR} \times \text{DBD}$$

其中 BF 为干沉积物中大于 150 μm 底栖有孔虫的丰度 (n/g), LSR 为线性沉积速率 (cm/ka), DBD 为沉积物干样密度 (g/cm^3), 本次研究中, LSR 和 DBD 数据来自 ODP130 航次的钻井数据^[23], 通过插入值法拟合到我们的年龄框架上。

以及 Herguera^[29] 利用 BFAR 和生产力的关系推算出的古表层初级生产力的经验公式:

$$\text{PP} = 0.4Z_{\text{km}} \text{BFAR}^{0.5}$$

其中 PP 为初级生产力 (Primary Productivity, $\text{gC}/\text{cm}^2/\text{ka}$), Z 为水深 (km), BFAR 同前。

通常用于反映生产力的还有 U+B (*Uvigerina* + *Bulimina*) 含量^[30]。由于在本次研究中, ODP 807 站样品中 *Bulimina* 属仅有 *B. alazanensis* 一个种,为了说明 *B. alazanensis* 和生产力之间的关系,我们从中将其单独分离出来,仅统计 *Uvigerina* 一个属的百分含量。样品中底栖有孔虫的内生种个数和表生种个数的比值 (E/I) 也能用来反映海洋的表层初级生产力^[27, 31]。

本文的年龄框架采用了底栖有孔虫氧同位素标准曲线“LR04”^[32]。在本次研究中,我们通过地层对比软件“Match”^[33] 将 ODP 807 站已有的通过生物地层学、磁性地层学以及浮游有孔虫氧同位素地层学的基础上建立的地层年龄框架校正到“LR04”之上^[32, 34-35]。

2 结果与讨论

2.1 ODP 807 站位底栖有孔虫的百分含量

在本次研究中,我们统计了 ODP 807 站底栖有孔虫的几个属种,并分别计算它们的相对丰度(图 2)。其中, *Cibicidoides wuellerstorfi* 百分含量的平均值在 6.2%, 2.0 MaBP 之前有缓慢下降的趋势,之后又缓慢回升。 *Uvigerina* spp. 的总体含量较高,平均 8.3%, 整体趋势缓慢增加,在冰期含量高,间冰期含量低,在 2.04~2.01 MaBP 之间 *Uvigerina* spp. 含量发生剧烈的波动,从 20.4% 迅速下降到 0,而后又在 2.01 MaBP 攀升到 16.1%。在 2.03 MaBP 前后 *F. favus* 百分含量也发生了和 *Uvigerina* spp. 类似的剧烈波动。而 *B. alazanensis* 百分含量总体偏低,在 1% 以内,整体呈现出冰期低、间冰期高的特点,其中有 83 个样品中没有发现 *B. alazanensis*。

然而,从形态学上说, *B. alazanensis* 是典型的内生种,在过去的研究中认为其代表的是高营养低氧的环境^[36]。但是, ODP 807 站位的 *B. alazanensis* 在一般认为的生产力较高的冰期含量较低,而在间冰期含量反而增高,和其他的内生属种的表现很不相同。同时,和生产力代表属 *Uvigerina* spp. 对比,它们之间也显示出了相反的变化趋势。

2.2 底栖有孔虫与古生产力

对于底栖有孔虫来说,初级生产力的变化决定了沉降到底层水的有机质多少,即食物供给的量,因此,可通过底栖有孔虫来反应表层初级生产力的变化^[28]。但底栖有孔虫的丰度对作为食物来源有机质输入的反应并不完全是线性关系,过于贫乏或过于丰富都会抑制底栖有孔虫的生长^[37]。古生产力指标往往同时受多种环境因素的影响,对环境变化的响应也会有差异,因此,我们综合了多种古生产力指标,对 ODP 807 站位的 BFAR (底栖有孔虫堆积速率)、PP (初级生产力)、E/I、*Uvigerina* spp. 百分含量、TOC 百分含量等指标进行对比,讨论古生产力对底栖有孔虫的影响。

我们通过 BFAR 来计算 PP。BFAR 和 PP 在 1.75、1.8、2.05、2.2、2.4 MaBP 前后分别出现了较高值,这些时期都对应了冰期。并且对比底栖有孔虫氧同位素曲线, ODP 807 站位的 BFAR 和 PP 总体是冰期高、间冰期低的特点(图 3)。

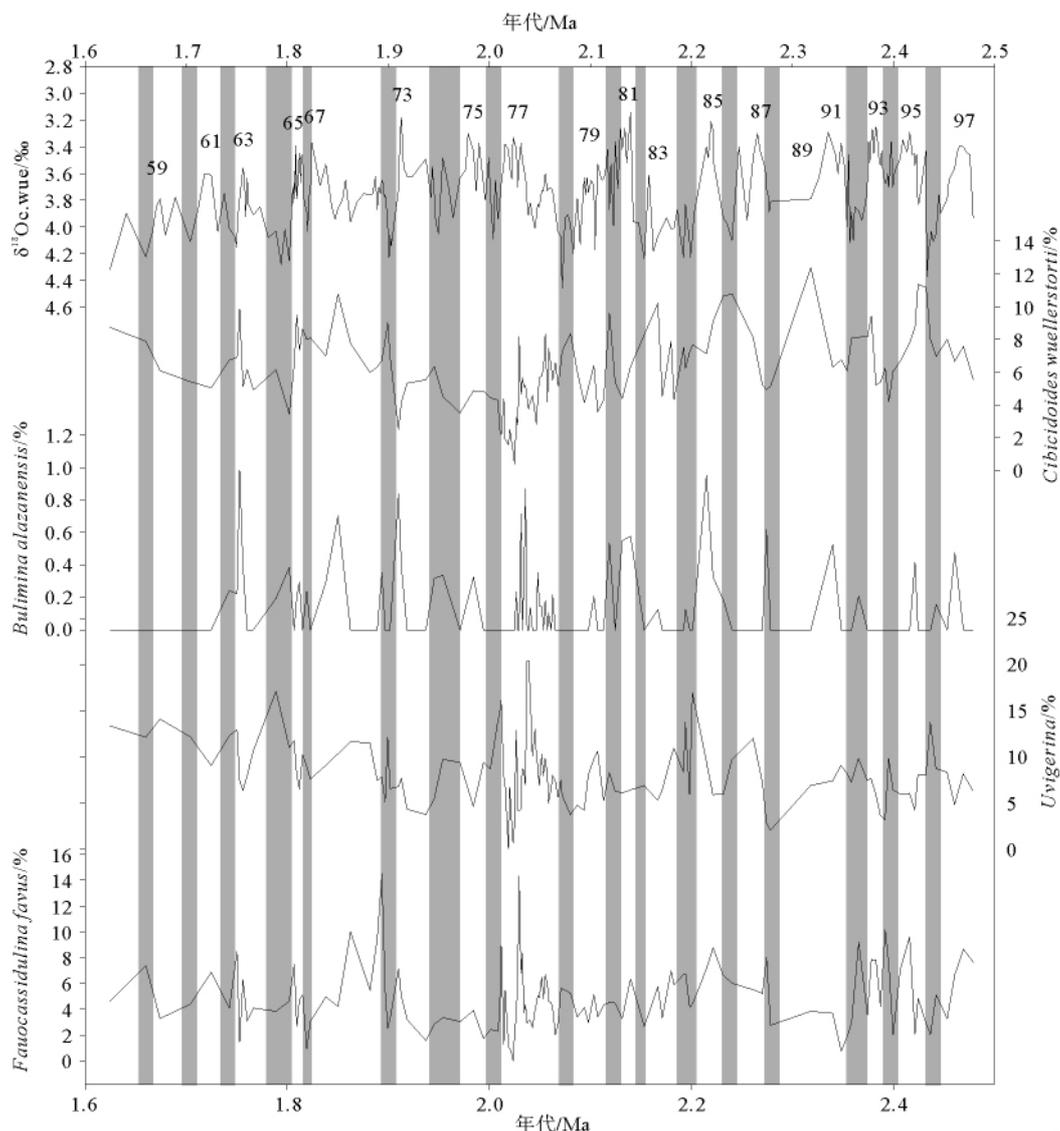


图 2 西太平洋 ODP 807 站位 *C. wuellerstorfi*, *B. alazanensis*, *F. favus*, *Uvigerina* spp. 百分含量和底栖有孔虫氧同位素^[35]对比图, 其中灰色区域为冰期(根据氧同位素曲线)

Fig. 2 Comparison between $\delta^{18}\text{O}_{\text{ann}}/\text{‰}$ and relative abundance of *C. wuellerstorfi*, *B. alazanensis*, *F. favus* and *Uvigerina* spp. from Site ODP 807 (shaded bars mean the glacials)

Uvigerina 是典型的生产力代表属, ODP 807 站位的 *Uvigerina* spp. 百分含量和其他的生产力指标反映的生产力变化大致相同(图 3)。*B. alazanensis* 和 *Uvigerina* spp. 含量变化相反的原因之一可能是它们对营养需求的不同。尽管在过去对底栖有孔虫形态学的研究, 认为 *B. alazanensis* 指示了低溶解氧、高营养的温暖深水环境^[36], 但是, 该种有可能更适合低生产力的环境。

在 ODP 807 站位的底栖有孔虫中, 内生种数量远大于表生种, E/I 比值平均 0.198, 总体呈 3 段式变化(图 3)。在 2.5~2.16 MaBP 之间 E/I 较高, 平均值 0.23。这可能指示了当时的西太平洋底层水是低氧高营养的环境。2.1 MaBP 之后 E/I 开始

降低, 在 2.02 MaBP 前后达到最低值 0.046, 可能是水体营养含量下降的反映。到 1.93 MaBP 之后, 又有所回升。E/I 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{ann}}$ (底栖有孔虫氧同位素) 曲线呈相反的趋势变化, 在冰期时高, 间冰期低。

不过在 ODP 807 站位, E/I 的变化和其他生产力指标表现的并不完全一致。这有可能是因为底栖有孔虫除了受食物控制以外, 其他的环境因素也会影响到它们的生存, 并且每一个属种之间对营养的需求也会有差异, 并不局限在表生种和内生种之间的差别。

从 ODP 807 站位的 BFAR、PP、E/I、*Uvigerina* spp. 百分含量、TOC 百分含量等生产力指标对比的

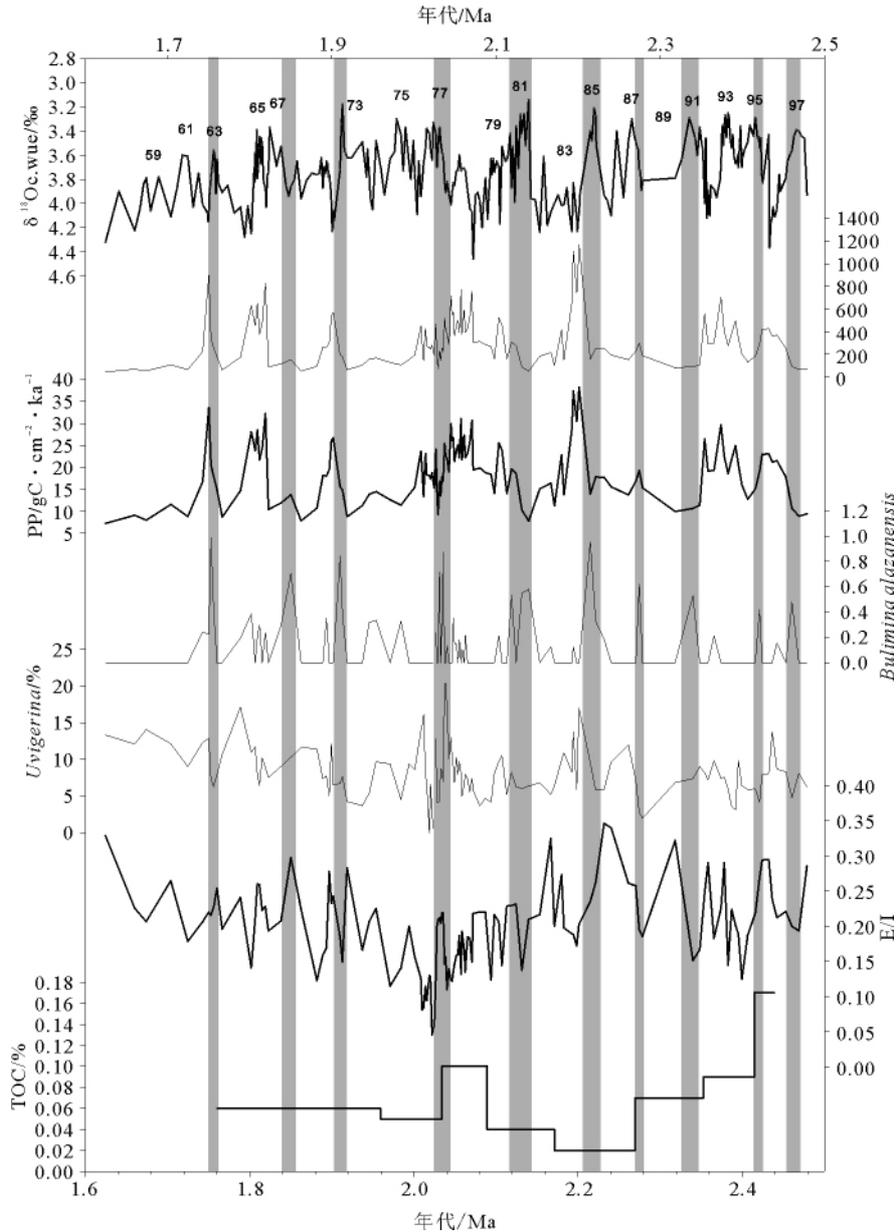


图3 西太平洋 ODP 807 站底栖有孔虫 $\delta^{18}O_{c,wue}/\text{‰}$ [35], *B. alazanensis* /%, *Uvigerina* spp. /%, BFAR, PP, TOC /% [38] 曲线对比 (灰色区域为 *B. alazanensis* 含量较高的时间段)

Fig. 3 Comparison of oxygen isotope of *Cibicidoides wuellerstorfi* with relative abundance of *B. alazanensis* and *Uvigerina* spp., BFAR (Benthic Foraminifera Accumulation Rate), PP (Primary Productivity), E/I ratios, and TOC (Total Organic Carbon) from Site ODP 807. (shaded bars indicate the high *B. alazanensis* relative abundance)

结果来看, 2.5~1.6 MaBP 西太平洋的古生产力大体在冰期高、间冰期低。在 2.4、2.2、2.0、1.8 MaBP 前后, 显示出的生产力较高。ODP 807 的浮游有孔虫碳同位素重值出现在 2.4、2.0 MaBP 前后^[9], 也对应了高生产力的时期。

虽然在本次研究中只统计了 ODP 807 站点 2.5~1.6 MaBP 的底栖有孔虫数据, 仅从这个时期的数据对比可看出, ODP 807 站位的底栖有孔虫 *B. alazanensis* 百分含量的总体变化趋势和同样位于

赤道西太平洋的 ODP 806 站点^[39] 的表现很接近, 5 MaBP 以来 ODP 806 站位的 *B. alazanensis* 含量在 4% 以内, 没有太大的波动。

南海作为西太平洋最大的边缘海, 其深层海水通过巴士海峡与西太平洋相沟通^[40], 南海的底层水和深层水表现出和西太平洋深层水相似的性质。过去的研究中发现南海几个站位的 *B. alazanensis* 在 2.1 MaBP 都有突然减少的现象^[41-42], 这和西太平洋的情况并不相同。如果南海的深层水来源是西

太平洋,那么,引起南海水质突然变化的现象应该先发生在西太平洋。这有可能是因为,南海在 2.1 MaBP 区域性环境的发生突然改变,而受西太平洋深层水性质的影响较小,另一种可能是西太平洋深层水的性质改变通过边缘海的放大作用,在南海表现的更为明显。

为证明 *B. alazanensis* 的百分含量和生产力之间的关系,我们还对比了南海的记录,因为 ODP 807 站位中的 *B. alazanensis* 含量很少,不足以说明它和生产力之间的关系。而南海该种的丰度最高可达 90% 以上。在 1146 站位 *B. alazanensis* 含量很高的时间段里,和底栖有孔虫氧同位素的对比也显示出了和 ODP 807 站位一样的关系^[41]。反映初级生产力的指标还有总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)含量^[43]。1146、1143 站位的 TOC 含量在 2.7 MaBP 前后开始持续升高^[44]。而 ODP 806、807 站位的有机碳含量在 2.4~2.0 MaBP 前后均有所降低^[38]。南海 1146 站位的浮游有孔虫高生产力属种含量也在 2.1 MaBP 有明显增加^[45]。我们注意到 1146 和 1143 站位的有机碳含量在增高的同时,还伴随着 CaCO_3 百分含量的迅速降低^[44]。2.6 MaBP 以来,印度季风和东亚夏季风减弱,东亚冬季风继续增强^[46]。东亚东季风的增强带来的降雨和陆源输入是导致南海有机碳含量的增高和 CaCO_3 的稀释的原因之一。

现代西太平洋暖池区海-气交互很强烈,海水表面温度高,降水量大,盐度相对较低。在永久性跃层以上是充分混合的温暖的上层水,其中的溶解氧含量高,但是营养盐较低,浮游生物不易繁殖,因此表层生产力也很低^[47]。而南海受东亚季风影响,有较丰富的陆源输入,表层生产力偏高。

现生的 *B. alazanensis* 主要分布在印度洋阿拉伯海^[48-50] 和大西洋东岸^[51-55] 的几个站位。我们对比这些区域的温度、盐度、深度、营养元素含量和溶解氧含量等可能会影响底栖有孔虫生长的生态环境因素^①,这些现生 *B. alazanensis* 分布区域的 N、P、Si 等营养元素含量总体上比南海低得多,和西太平洋的营养元素含量较接近。这些区域的盐度和溶解氧含量都偏高,而海水温度和水深对 *B. alazanensis* 的分布没有明显的影响。这与 *B. alazanensis* 和生产力指标对比所得到的结果相吻合。

2.3 早更新世西太平洋深层水环流变化

在对现代大洋的观测和调查中发现,太平洋的南北部深层海水的物理、化学性质存在很大差

别^[56-57]。南太平洋深层水的主要构成是环南极深层水、北大西洋深层水和南极底层水;而北太平洋深层水的特点是低盐、低氧、高营养,向南可以影响到赤道太平洋^[58]。有研究表明,在太平洋水深 2 000~2 500 m 附近,北纬 22° 以北的底栖有孔虫组合以 *Uvigerina-Cassidulina* 为主,南纬 22° 以南以 *Bulimina* 为主^[59]。

ODP 807 站位的 *Uvigerina* spp. 和 *B. alazanensis* 的百分含量呈现出明显的相反变化。ODP 807 站位在早更新世位于水团交汇处,它们的此种此消彼长或许指示了西太平洋在不同时期南北水团影响的强弱关系。ODP 807 站位的 *B. alazanensis* 百分含量很低,且没有发现 *Bulimina* 属的其他种。而同样位于西太平洋的 ODP 806 站位在 5 MaBP 以来同样只有很低含量的 *B. alazanensis* (4% 以内)^[39]。但是,ODP 807 站位的 *Uvigerina* spp. 百分含量则较高,平均在 10% 左右,最高可达 20% 以上。在沉积样中也有发现一定数量的 *Cassidulina*, 这可能意味着早更新世以来,赤道西太平洋地区深层水受北部水团的影响要比南部来源的水强烈的多。并且北部的 *Uvigerina-Cassidulina* 指示的水团在早更新世能影响到 2 800 m 以深。

现代太平洋的深层水到达北极后从 1 500 m 左右的深度返回赤道,其特点是富营养而贫氧,具有很轻的 $\delta^{13}\text{C}$,而在 2.7~1.4 MaBP 太平洋反转流的核心深度为 2 500 m^[11]。对于西太平洋底栖有孔虫组合变化有两种可能的解释,一是太平洋反转流的加强,反转流的厚度增大使得太平洋更大范围的深层水的性质均一化,使得反转流核心区附近不同深度的深层水具有更相近的性质,并且反转流的加强也使得其具有更大的影响范围,或影响到西太平洋的边缘海地区。第二种可能是北太平洋在早更新世有深层水的形成,北太平洋深层水形成后向南流动,填充了太平洋洋盆。而这种强烈的混合使得高营养的深层水进入南海,使 *B. alazanensis* 的生存环境发生了变化,这或许也是更适应低营养环境的 *B. alazanensis* 走向衰落的原因之一。

3 结论

(1) 西太平洋早更新世的底栖有孔虫含量在整体上呈现出冰期高、间冰期低的特点。其中内生属种 *Uvigerina* spp. 和 *Favocassidulina favus* 的含

① <http://www.ewoce.org/>

量变化趋势较接近,显示出冰期高、间冰期低的特点,*Uvigerina* spp. 在 ODP 807 站位的百分含量整体偏高。*Bulimina alazanensis* 百分含量的变化比较特殊,它在样品中的含量很少,几乎都在 1% 以内,呈冰期低、间冰期高的特点。*B. alazanensis* 和同样属于生产力代表属种的 *Uvigerina* spp. 含量的变化呈相反的关系。

(2) 2.5~1.6 MaBP 时期 BFAR、E/I、*Uvigerina* spp. % 和 TOC % 等替代指标反映了西太平洋早更新世古生产力总体上冰期高、间冰期低的特点。对比古生产力指标的变化,*B. alazanensis* 可能代表了一种温暖、生产力低的环境。另外,*B. alazanensis* 和 *Uvigerina* spp. 此消彼长的关系有可能反映了早更新世西太平洋地区主要水团的来源,早更新世的西太平洋深层水更多的受北部来源的水团控制。

(3) 西太平洋地区的 *B. alazanensis* 在 5 MaBP 以来的记录显示出与南海地区不同的变化,可能是东亚冬季风在早更新世加强,引起南海表层水生产力增加所致。而太平洋的深层水在早更新世发生过调整,这可能是反转流的增厚或是太平洋深层水形成的结果,南海 *B. alazanensis* 的变化也可能是太平洋地区的深层水在早更新世发生的调整,而作为边缘海的南海放大了这种影响。

致谢:感谢同济大学海洋地质国家重点实验室为本次研究提供 ODP 807 站样品。

参考文献 (References)

- [1] Haywood A M, Dowsett H J, Valdes P J, et al. Introduction. Pliocene climate, processes and problems[J]. Philosophical Transactions, 2009, 367: 3-17.
- [2] Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. Science, 2001, 292:686-693.
- [3] Wara M W, Ravelo A C, Delaney M L. Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period[J]. Science, 2005, 309:758-761.
- [4] Russon T, Elliot M, Kissel C, et al. Middle-late Pleistocene deep water circulation in the southwest subtropical Pacific[J]. Paleoceanography, 2009, 24:PA4205:1-16.
- [5] Clark P U, Alley R B, Pollard D. Northern Hemisphere Ice-Sheet Influences on Global Climate Change[J]. Science, 1999, 286:1104-1111.
- [6] 马文涛, 田军, 李前裕, 晚上新世赤道太平洋气候转型和北极冰盖扩张的轨道驱动[J]. 科学通报, 2009, 54(22): 3537-3545. [MA Wentao, TIAN Jun, LI Qianyu. Astronomically modulated late Pliocene equatorial Pacific climate transition and Northern Hemisphere ice sheet expansion[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(2):212-220.]
- [7] Haug G H, Ganopolski A, Sigman D M, et al. North Pacific seasonality and the glaciation of North America 2.7 million years ago[J]. Nature, 2005, 433:821-825.
- [8] Russon T, Elliot M, Sadekov A, et al. Inter-hemispheric asymmetry in the early Pleistocene Pacific warm pool[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37: L11601, 1-5.
- [9] 金海燕, 翦知湑, 成鑫荣, 等. 早更新世赤道太平洋上部水体结构的東西向不对称格局的形成[J]. 科学通报, 2011, 56(20): 1635-1641. [JIN Haiyan, JIAN Zhimin, CHENG Xinrong, et al. Early Pleistocene formation of the asymmetric east-west pattern of upper water structure in the equatorial Pacific Ocean[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(21):2251-2257.]
- [10] Marlow J R, Lange C B, Wefer G, et al. Upwelling intensification as part of the Pliocene-Pleistocene climate transition[J]. Science, 2000, 290:2288-2291.
- [11] Kwiek P B, Ravelo A C. Pacific Ocean intermediate and deep water circulation during the Pliocene[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1999, 154:191-217.
- [12] Prentice M L, Friez J K, Simonds G G, et al. Neogene trends in planktonic foraminifer $\delta^{18}\text{O}$ from site 807: implications for global ice volume and western equatorial Pacific sea surface temperatures[A]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Result[C]. College Station, Texas: Ocean Drill. Prog., 1993, 281-305.
- [13] Sliva I P. Paleocene through middle Eocene planktonic foraminifers from Hole 807C, Ontong Java Plateau[A]. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Result[C]. College Station, Texas: Ocean Drill. Prog., 1993, 103-111.
- [14] Gourelan A T, Meynadier L, Allegre C J. Tectonically driven changes in the Indian Ocean circulation over the last 25 Ma: Neodymium isotope evidence[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 267(1-2): 353-364.
- [15] Fantlea M S, DePaola D J. Ca isotopes in carbonate sediment and pore fluid from ODP Site 807A: The Ca^{2+} (aq) calcite equilibrium fractionation factor and calcite recrystallization rates in Pleistocene sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(10):2524-2546.
- [16] Houedec S L, Meynadier L, Allegre C J. 80 Myr high resolution Nd isotopes record in Western Pacific (ODP 807) [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement, 2009, 73: A741.
- [17] 金海燕, 翦知湑, 刘东升. 西太平洋翁通—爪哇海台晚第四纪浮游有孔虫群与古温度变化[J]. 海洋地质第四纪地质, 2003, 23(4):65-71. [JIN Haiyan, JIAN Zhimin, LIU Dongsheng. Late quaternary variations of planktonic foraminiferal assemblage and paleo-temperature of Ontong-Java plateau, west Pacific[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(4):65-71.]
- [18] 张江勇, 汪品先, 成鑫荣, 等. 赤道西太平洋晚第四纪古生产力变化: ODP807A 孔的记录[J]. 地球科学——中国地质

- 大学学报, 2007, 32(3):303-312. [ZHANG Jiangyong, WANG Pinxian, CHENG Xinrong, et al. Late Quaternary variations of productivity in the western Equatorial Pacific Ocean: Records from ODP Hole 807A[J]. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 2007, 32(3):303-312.]
- [19] 刘传联, 张拭颖, 金海燕, 等. 暖池区 1.53Ma 以上上层海水变化的颗石藻证据[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(9):1172-1176. [LIU Chuanlian, ZHANG Shiyong, JIN Haiyan, et al. Coccolith evidence of upper ocean water variations for past 1.53 Ma in western Pacific Warm Pool[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(9):1172-1176.]
- [20] 吴旻哲, 乔培军, 邵磊. 西太平洋 807A 孔的元素地球化学特征及其对中更新世气候转型期的记录[J]. 海洋地质第四纪地质, 2010, 30(2):67-74. [WU Minzhe, QIAO Peijun, SHAO Lei. Element geochemical record of the western Pacific ocean site ODP 807A: implication for the middle Pleistocene climate transition [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(2):67-74.]
- [21] 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, 64:121-140.
- [22] Keigwin L D. North Pacific deep water formation during the latest glaciation[J]. Nature, 1987, 330:362-364.
- [23] Shipboard Scientific Party. Site 807[A]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Report[C]. College Station, Texas: Ocean Drill. Prog., 1991, 369-493.
- [24] Loeblich A R, Tappan J H. Foraminiferal Genera and Their Classification[M]. New York: Van nostrand reinhold company, 1988.
- [25] Ujiie H. Bathyal Benthic Foraminifera in a Piston Core East off the Miyako Islands, Ryukyu Island Arc[M]. Ryukyus: Bull. Coll. Sci. Univ., 1990, 49: 1-60.
- [26] Lutze G F. Depth distribution of benthic foraminifera on the continental margin of northwest Africa[J]. Meteor Forschungsgeb. Reihe C, 1980, 28:133-169.
- [27] Corliss B H, Chen C. Morphotype patterns of Norwegian Sea deep-sea benthic foraminifera and ecological implication[J]. Geology, 1988, 16:716-719.
- [28] Herguera J C, Berger W H. Paleoproductivity from benthic foraminifera abundance: Glacial to postglacial change in the west-equatorial[J]. Geology, 1991, 19(12):1173-1176.
- [29] Herguera J C. Last glacial paleoproductivity patterns in the eastern equatorial Pacific, benthic foraminifera records[J]. Marine Micropaleontology, 2000, 40:259-275.
- [30] Kaiho K. Benthic foraminiferal dissolved-oxygen index and dissolved-oxygen levels in the modern ocean[J]. Geology, 1994, 22(8):719-722.
- [31] Li Q, McGowran B. Miocene upwelling events: Neritic foraminiferal evidence from southern Australia[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1994, 41(6):593-603.
- [32] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. Paleoclimatology, 2005, 20:PA1003:1-17.
- [33] Lisiecki L E, Lisiecki P A. Application of dynamic programming to the correlation of paleoclimate records[J]. Paleoclimatology, 2002, 17(4):1049:1-12.
- [34] 郭建卿, 成鑫荣, 陈荣华, 等. 西太平洋暖池核心区上新世以来浮游有孔虫氧同位素特征及古海洋变化[J]. 海洋地质第四纪地质, 2010, 30(3):87-95. [GUO Jianqing, CHENG Xinrong, CHEN Ronghua, et al. Oxygen isotope characteristic and paleoceanographic variations of the western Pacific warm pool since Pliocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(3):87-95.]
- [35] 杜江辉. 早更新世西太平洋深层水环流的变化[D]. 北京: 北京大学地球与空间科学学院硕士论文. [DU Jianghui. Western Pacific Deep Water Circulation in Early Pleistocene[D]. 2011, Beijing: Master's Thesis of School of Earth and Space Science, Peking University, 2011.]
- [36] Gupta A K, Sarkar S, Mukherjee B. Paleoclimatographic changes during the past 1.9 Myr at DSDP Site 238, Central Indian Ocean Basin: Benthic foraminiferal proxies[J]. Marine Micropaleontology, 2006, 60:157-166.
- [37] 陈双喜, 南青云, 李铁刚, 等. 高有机质输入对底栖有孔虫的抑制作用 — 以西北太平洋菲律宾海 MD06-3054 孔为例[J]. 第四纪研究, 2011, 31(2):292-298. [CHEN Suangxi, NAN Qanqingyun, LI Tiegang, et al. Inhibiting effect of high organic matter influx on the bloom of benthic foraminifera fauna — an example from core MD06-3054 in Philippine Sea, northwestern Pacific[J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(2):292-298.]
- [38] Stax R, Stein R. Long-term changes in the accumulation of organic carbon in Neogene sediments, Ontong Java plateau [A]. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Result [C]. College Station, Texas: Ocean Drill. Prog., 1993, 573-584.
- [39] Resig J M, Cheong H-K. Pliocene-Holocene Benthic foraminiferal assemblages and water mass history, ODP806B, western equatorial Pacific[J]. Micropaleontology, 1997, 43(4): 419-439.
- [40] Wang P X, Li Q Y. The South China Sea Paleoclimatology and Sedimentology[M], Springer, 2009, Vol. 13.
- [41] 黄宝琦, 翦知潜, 汪品先. 晚上新世南海北部底栖有孔虫 *Bulimina alazanensis* 含量变化及其原因探讨[J]. 科学通报, 2007, 52:313-317. [Huang Baoqi, JIAN Zhimin, WANG Pinxian. Benthic foraminiferal fauna turnover at 2.1 Ma in the northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 51(6):839-843.]
- [42] Hess S, Kuhnt W. Neogene and Quaternary paleoceanographic changes in the southern South China Sea (Site 1143): the benthic foraminiferal record[J]. Marine Micropaleontology, 2005, 54:63-87.
- [43] Altenbach A V, Pflaumann U, Schiebel R, et al. Scaling percentages and distributional patterns of benthic foraminifera

- with flux rates of organic carbon[J]. *Journal of Foraminiferal Research*, 1999, 29(3):173-185.
- [44] Wang L W, Lin H L. Data report: carbonate and organic carbon contents of sediments from sites 1143 and 1146 in the South China Sea[A]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results[C]. Texas A & M University: Ocean Drilling Program, 2002, 1-9.
- [45] 黄宝琦, 成鑫荣, 翦知湑, 等. 晚上新世以来南海北部上部水体结构变化及东亚季风演化[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(1):110-115. [HUANG Bbaoqi, CHENG Xinrong, JIAN Zhimin, et al. Variations in upper ocean structure in the South China Sea and the evolution of the east Asian monsoons since late Pliocene [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(1):110-115.]
- [46] An Z, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya - Tibetan plateau since Late Miocene times[J]. *Nature*, 2001, 411: 62-66.
- [47] 李铁刚, 赵京涛, 孙荣涛, 等. 250kaB.P. 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.]
- [48] Heinz P, Hemleben C. Regional and seasonal variations of recent benthic deep-sea foraminifera in the Arabian Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2003, 50(3):435-477.
- [49] Kurbjeweit F, Schmiel G, Schiebel R, et al. Distribution, biomass and diversity of benthic foraminifera in relation to sediment geochemistry in the Arabian Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000, 47(14):2913-2955.
- [50] Heinz P, Hemleben C. Foraminiferal response to the North-east Monsoon in the western and southern Arabian Sea[J]. *Marine Micropaleontology*, 2006, 58(2):103-113.
- [51] OMEX Project Members, Stigter H D. Abundance of living benthic foraminifera in sediment core CD86_05_BC5 [Z]. 2004, Available from: <http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.207937>.
- [52] OMEX Project Members, Stigter H D. Abundance of living benthic foraminifera in sediment core CD86_09_BC1 [Z]. 2004, Available from: <http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.207941>.
- [53] OMEX Project Members, Stigter H D. Abundance of living benthic foraminifera in sediment core CD86_10_BC4 [Z]. 2004, Available from: <http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.207942>.
- [54] Licari L, Schumacher S, Wenzler F, et al. Communities and microhabitats of living benthic foraminifera from the tropical East Atlantic: impact of different productivity regimes[J]. *Journal of Foraminiferal Research*, 2003, 33(1): 10-31.
- [55] Schumacher S, Mackensen A. Assemblage of living benthic foraminifera in sediment profile PS2560-4[Z]. 2002, Available from: <http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.66652>.
- [56] Macdonald A M, Mecking S, Robbins P E, et al. The WOCE-era 3-D Pacific Ocean circulation and heat budget[J]. *Progress In Oceanography*, 2009, 82(4):281-325.
- [57] Bostock H C, Opdyke B N, Williams M J M. Characterising the intermediate depth waters of the Pacific Ocean using $\delta^{13}\text{C}$ and other geochemical tracers[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2010, 57(7):847-859.
- [58] Sokolov S, Rintoul S. Circulation and water masses of the southwest Pacific: WOCE Section P11, Papua New Guinea to Tasmania[J]. *Journal of Marine Research*, 2000, 58(2): 223-268.
- [59] Murray J W. Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera[M]. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1991.

EVOLUTION OF EARLY PLEISTOCENE DEEP WATER CIRCULATION IN WESTERN PACIFIC: EVIDENCE FROM BENTHIC FORAMINIFERA

CHEN Mengsha, HUANG Baoqi

(School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: Benthic foraminifera picked out from the interval of 43.02~26.27 mbsf (meters below seafloor) of ODP 807 (3°36.42'N, 156°37.49'E, water depth 2803.8 m, length 822.9 m) on the Ontong-Java Plateau, western Pacific was studied for understanding the changes in paleoproductivity and its relation with deep water circulation during the period of 2.5~1.6 MaBP. The benthic foraminifera accumulation rate (BFAR), Epifaunal/Infaunal ratio (E/I), percentage of *Uvigerina* spp. and total organic carbon (TOC%) were used as the proxies of paleoproductivity in this study. Results show that the change in paleoproductivity was generally high in glacial but low in interglacial during the period of 2.5~1.6 MaBP., except *Bulimina alazanensis*, of which the paleoproductivity was low in glacial but high in interglacial. It may suggest that *B. alazanensis*, opposite to the others, preferred a warmer environment with lower nutrients. The benthic foraminiferal fauna was dominated by *Uvigerina* spp. in the samples, indicating that the western Pacific deep water was under the control of the North Pacific Deep Water Mass during Early Pleistocene.

Key words: deep water circulation; benthic foraminifera; paleoproductivity; western Pacific