

冲绳海槽中南部 18 ka 以来的底栖有孔虫 与底层水演化*

李铁刚^{①**} 向荣^{①②} 孙荣涛^① 曹奇原^①

(^①中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; ^②中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266003)

摘要 根据冲绳海槽中部 E017 孔底栖有孔虫的定量分析, 结合浮游有孔虫氧碳同位素、AMS¹⁴C 测年和前人在冲绳海槽南部的研究资料, 对 18 cal. ka BP 以来冲绳海槽中南部的底层水团演化进行了初步研究. 结果表明冲绳海槽中南部底栖有孔虫在 9.2 cal. ka BP 以前的冰期-冰消期以 *Bulimina aculeata* (d'Orbigny), *Uvigerina peregrina* (Cushman), *Hispid Uvigerina* 和 *Uvigerina dirupta* (Todd) 等为主. 在 9.2 cal. ka BP 以来的冰后期以 *Epistominella exigua* (Brady), *Pullenia bulloides* (d'Orbigny), *Cibicidoides hyalina* (Hofker), *Sphaeroidina bulloides* (d'Orbigny) 和 *Globocassidulina subglobosa* (Brady) 等为主. 底栖有孔虫堆积速率(BFAR)与生产力定量估算值及底栖有孔虫群落组成等一致反映冲绳海槽中南部冰期-冰消期表层古生产力和有机质通量高于冰后期, 并且在冰期-冰消期表层古生产力由海槽南部向中部逐渐增加, 可能与陆源营养物质的接收量差异有关. 脉冲式有机质输入的指示种 *E. exigua* 在 9.2 cal. kaBP 以后的大量出现可能反映冰后期河流季节性脉冲式注入较冰期-冰消期明显增强, 而且海槽中部接受河流季节性注入的强度可能大于南部. 底层水含氧量与流通状况的典型标志种分布特征显示冲绳海槽中南部冰期-冰消期的底层水流通状况较冰后期弱, 反映冰期西北太平洋中深层水演化没有对冲绳海槽中南部底层水团性质产生影响. 此外, 胶结壳底栖有孔虫的丰度变化和碳酸盐溶解作用表明 18 cal. ka BP 以来冲绳海槽的碳酸盐溶解作用逐渐增强, 其中 9.2 cal. ka BP 至今碳酸盐溶解作用急剧增加, 并于最近 3 cal. ka BP 左右形成现代的浅溶跃面.

关键词 底栖有孔虫 底层水团演化 冲绳海槽中南部

海洋深部环流和水团化学组成的变化对地球气候系统的演化起着重要作用^[1]. 许多研究表明, 冰期

2003-07-04 收稿, 2003-09-15 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程项目(编号: KZCX3-SW-220)、国家自然科学基金项目(批准号: 40176019, 40206007, 40106006)和国家重点基础研究发展规划项目(编号: G20000467)共同资助

** E-mail: tgli@ms.qdio.ac.cn

时的大洋深部水体性质与今明显不同^[2,3]. 在北太平洋, Duplessy 等发现末次冰期北太平洋 700~2600 m 水深范围内的水体流通状况好于现代, 认为冰期时的北太平洋高纬区有“中层水”产生^[4]. Berger^[5]和 Shackleton 等^[6]根据南海和太平洋底栖与浮游有孔虫的 AMS¹⁴C 年龄差在末次盛冰期显著变小, 认为有年龄较轻的“北太平洋深层水”就近形成. 翦知湣等通过对南海冰期深部水团特性的研究也推断出末次盛冰期有北太平洋“深层水”生成, 但只局限于 1000~2500 m 水深范围内^[7]. 在西北太平洋, Keigwin 也发现了在冰期过程中其中层水的通风状况得到了明显的加强^[8]. 可见, 末次冰期时西北太平洋中深层水性质与现代有显著差异. 冲绳海槽作为西北太平洋边缘海, 其底层水体主要来自于 1000~1200 m 的西北太平洋中深层水^[9], 底层水团性质与西北太平洋中深层水密切相关. 然而, 冲绳海槽在末次冰期最盛期的低海平面, 造成冲绳海槽与西北太平洋隔绝状态加强, 因此西北太平洋中深层水的演化是否对冲绳海槽深层水的性质形成深刻的影响, 有待于更多冲绳海槽深部水演化证据的证实. 本研究拟通过对冲绳海槽中南部 E017 孔的底栖有孔虫分析, 结合前人对冲绳海槽南部 255 孔的研究资料^[10], 对冲绳海槽中南部 18 ka 以来底层水团性质的演变进行探讨.

1 材料和方法

E017 孔位于冲绳海槽中南部(126° 01.38' E, 26° 34.45' N, 图 1), 水深 1826 m, 柱长 2.98 m, 整个岩芯以青灰色粉砂质粘土为主, 其中 246~248 cm 夹青灰色有孔虫砂层. 柱状样按 2 cm 的间距进行样品分割, 全柱共获取样品 148 个. 有孔虫分析按 4 cm 的间距进行取样, 共分析了 76 个样品. 样品按标准的微古方法处理, 干样浸泡后用 63 μm 的铜筛冲洗, 粗组分放入烘箱烘干后称重, 计算粗组分(>63 μm)的百分含量. 对大于 150 μm 的组分进行了浮游和底栖有孔虫鉴定统计, 其中底栖有孔虫平均每样统计 210 枚, 共得 90 属 177 种. 对底栖有孔虫原始数据进行处理, 把部分生态类型相近的属种进行合并, 选择至少在 3 个样品中含量占 2% 以上的 52 个属种进行了 Q 型因子分析.

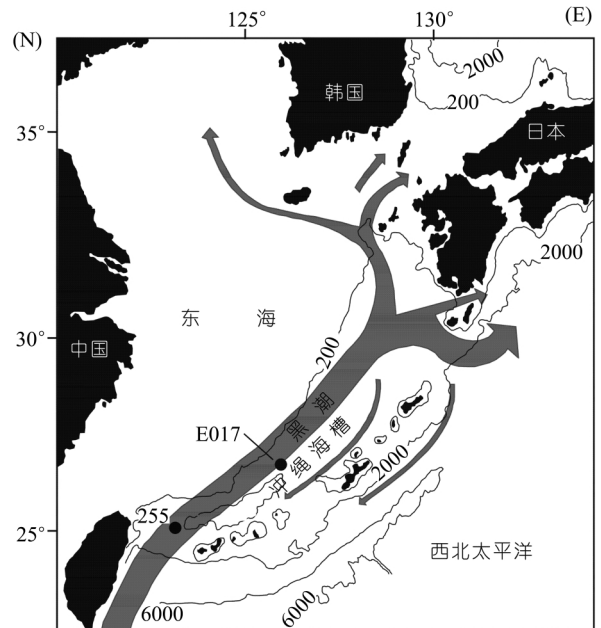


图 1 冲绳海槽中南部 E017 孔和 255 孔站位图

浮游有孔虫氧碳同位素测试在英国剑桥大学 Godwin 第四纪研究所完成, 分别从 300~350 μm 的组分中挑选出浮游有孔虫 *Globigerinoides sacculifer* 个体 20~30 枚在 SIRA 型质谱仪上进行测试, 其中 $\delta^{18}\text{O}$ 分析精度优于 $\pm 0.08\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 分析精度优于 $\pm 0.06\text{‰}$. 对 7 个层位进行了 AMS¹⁴C 年代测试, 分别挑选出浮游有孔虫单种 *Neogloboquadrina dutertrei* 1000 枚以上, 在美国伍兹霍尔海洋研究所 AMS 年代测试中心测试了 3 个 AMS¹⁴C 年龄, 其余 4 个由北京大学螺旋加速器重点实验室测定. 对原始测年数据利用 CALIB4.3 程序进行了日历年龄校正^[11], 400 a 的大气与海水间的全球碳储库差异将由程序自动减去(表 1).

表 1 冲绳海槽 E017 孔 AMS¹⁴C 年代数据/aBP

深度/cm	测试材料	¹⁴ C 年龄	日历年龄	测试单位
14~24	<i>N. dutertrei</i>	3170±60	2946	a)
98~100	<i>N. dutertrei</i>	8760±120	9234	a)
152~158	<i>N. dutertrei</i>	10750±85	12047	b)
172~176	<i>N. dutertrei</i>	11600±180	13064	a)
228~232	<i>N. dutertrei</i>	13560±140	15702	a)
246~248	<i>N. dutertrei</i>	15250±70	17653	b)
280~286	<i>N. dutertrei</i>	14950±75	17307	b)

a) 北京大学螺旋加速器重点实验室; b) 美国伍兹霍尔海洋研究所 AMS 年代测试中心

2 研究结果

2.1 地层和年代

E017 孔在 84~88 cm 和 248~266 cm 处可能为浊流沉积, 虽然沉积物颜色和类型无明显变化, 但层位中无论浮游还是底栖有孔虫的丰度都明显变低(见后文); 在 114~122 cm 为一火山玻璃富集层位; 246~248 cm 为一明显的有孔虫浊流砂层, 其 AMS¹⁴C 年龄比下部 280~286 cm 的年龄还要偏老, 同时在该层位也发现有陆架浅水底栖有孔虫 *Ammonia* spp.

根据 E017 孔的 7 个 AMS¹⁴C 年代数据作为控制点, 控制点之间的年代利用线性插值方法获得, 建立了该孔的年代地层序列, 可看出该孔主要记录了冲绳海槽约 18 cal. ka BP 以来的海洋环境演化. 其沉积速率(剔除火山玻璃和浊流沉积层影响)在 9.2 cal. ka BP 前后(孔深 100cm 处)有一个明显变化(图 2), 9.2 cal. kaBP 以前沉积速率较高, 平均为 21.6 cm/ka; 9.2 cal. kaBP 以后沉积速率明显降低, 平均为 9.2 cm/ka. 此外, 浮游有孔虫 *Pulleniatina obliquiloculata* 的丰度也是在 9.2 cal. ka BP 前后开始显著增加, 可能反映黑潮重新入侵冲绳海槽^[12].

浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 与 AMS¹⁴C 年代反映的地层基本一致, 其中 232~203 cm 和 156~120 cm 阶段(约分别为 15.7~14.4 cal. ka BP 和 12~10.2 cal. ka BP)为 $\delta^{18}\text{O}$

的两个快速变化期. 氧同位素在这两个层位上迅速变轻, 对应于全球冰体快速消溶的终止期 I_A 与终止期 I_B^[13]. 此外, 浮游有孔虫的碳同位素在大约 9~17 cal. ka BP 期间明显变轻, 变轻幅度平均约 0.26‰, 可能对应末次冰消期西太平洋的 $\delta^{13}\text{C}$ 宽幅低值事件^[14], 指示了表层水团的演变.

2.2 底栖有孔虫分布

E017 孔含有较丰富的底栖有孔虫壳体, 每 5g 干样中底栖有孔虫丰度分别为 30~250 枚不等(浊积层除外)(图 3), 18 cal. ka BP 以来的底栖有孔虫丰度总体上呈现逐渐降低的趋势, 在 9.2 cal. ka BP 以前的冰期-冰消期丰度较高, 而在之后的冰后期丰度显著变低. 在 84~88 cm 和 248~266 cm 处, 底栖有孔虫的丰度明显偏低, 对应的粗组分在全孔中的含量也降至最低; 在 246~248 cm 处底栖有孔虫丰度和粗组分都达到了全孔最高. 底栖有孔虫丰度在这些层位的变化特征可能是浊流沉积的结果.

优势属种主要有 *Bulimina aculeata* (d'Orbigny), *Uvigerina peregrina* (Cushman), *Uvigerina dirupta* (Todd), *Hispid Uvigerina*, *Pullenia bulloides* (d'Orbigny), *Cibicidoides hyalina* (Hofker), *Epistominella exigua* (Brady), *Hoeglundina elegans* (d'Orbigny), *Sphaeroidina bulloides* (d'Orbigny), *Gyroidina* spp., *Bulimina mexicana* (Cushman) 和 *Globocassidulina*

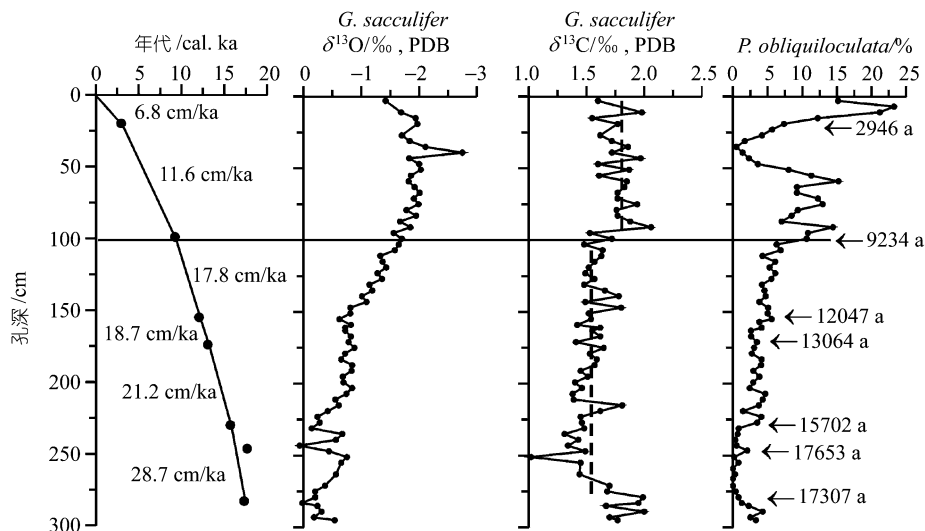


图 2 冲绳海槽 E017 孔地层年代与氧碳同位素记录

实线指示沉积速率突变界线

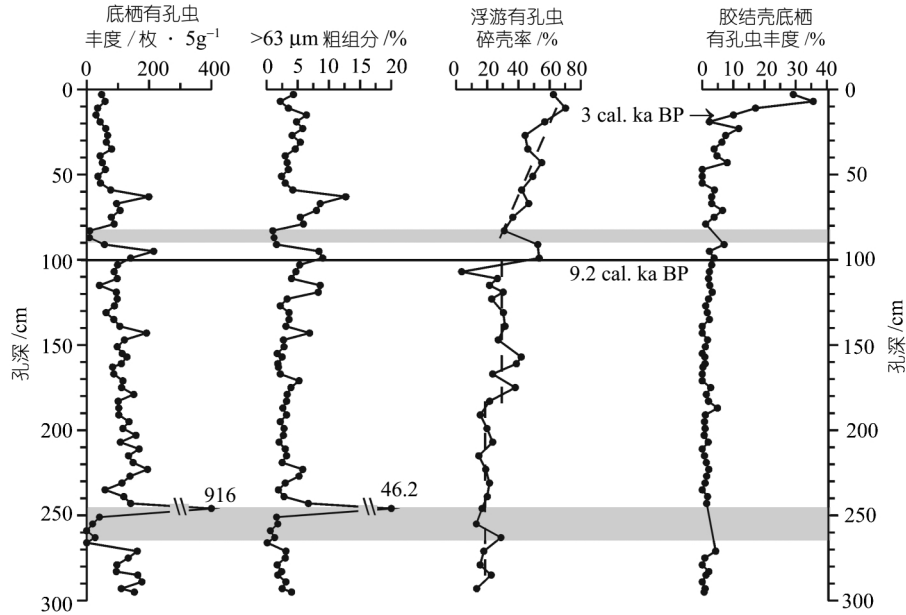


图 3 E017 孔底栖有孔虫丰度、粗组分、浮游有孔虫碎壳率和胶结壳底栖有孔虫丰度变化
阴影区域代表浊流影响层位

subglobosa (Brady)等, 这几个属种的含量在整个岩芯中占全群总体的 70% 以上. 从图 4 可以看出, 优势属种的分布在 100 cm 处(约 9.2 cal. ka BP)发生了明显的变化, 在 9.2 cal. ka BP 以后的冰后期, 以 *P. bulloides*, *C. hyaline*, *E. exigua*, *S. bulloides* 和 *G. subglobosa* 等为主; 在 9.2 cal. ka BP 以前的冰期-冰消期, 内生种 *B. aculeate*, *U. dirupta*, *U. peregrina* 和 *Hispid Uvigerina* 占主导地位. 此外, 红褐色的深海胶结壳底栖有孔虫 *Cyclammina compressa* (Cushman), *Trochammina globigeriniformis* (Parker and Jones), *Rhabdammina* spp. 等只出现在岩芯 20 cm 以上.

为客观地描述底栖有孔虫属种的分布特征, 对 52 个主要底栖有孔虫属种进行了 Q 型因子分析, 获得了两个方差极大因子, 解释了总方差的 83.4%. 根据 Q 型因子载荷分布(图 5), E017 孔整体上可以分为上下两层, 以大约 9.2 cal. ka BP 为界, 之前主要由因子 1(F1)控制, 之后则以因子 2(F2)为主, 分别代表着两类明显不同的底栖有孔虫组合. 因子 1(F1)解释了总方差的 60.8%, 主要分布在 9.2 cal. ka BP 以前的冰期-冰消期, 根据因子得分可以看出(表 2), 对该组合贡献最大的底栖有孔虫有 *B. aculeate*, *U. peregrina*,

Hispid Uvigerina 和 *U. dirupta* 等, 主要以列式壳为主体; 因子 2(F2)解释了总方差的 22.6%, 主要分布在 9.2 cal. ka BP 以后的冰后期, 对该组合贡献最大的属种依次为 *E. exigua*, *P. bulloides*, *C. hyaline*, *S. bulloides* 和 *G. subglobosa* 等, 主要以平旋和螺旋壳体为主.

3 讨论

3.1 底层水营养状况与表层古生产力

底栖有孔虫堆积速率(BFAR)与有机质沉积通量显著相关, 高的 BFAR 对应高的表层海水古生产力和有机质沉降通量, 是估计初级生产力的一个简单可靠的工具^[15,16]. E017 孔 18 cal. ka BP 以来的 BFAR 呈逐渐降低的趋势, 大致可以分为 3 段, 在 18~13.5 cal. ka BP 期间 BFAR 为全孔最高; 13.5~9.2 cal. ka BP 期间 BFAR 相对稳定, 维持在一个相对较高的水平; 9.2 cal. ka BP 以后的 BFAR 则迅速降低. 总体看来 9.2 cal. ka BP 以前的 BFAR 指示了较高的有机质通量, 9.2 cal. ka BP 以后到达海底的有机质通量明显降低.

利用 Herguera 的古表层初级生产力(pPP)的经验公式: $pPP=0.4Z_{km}BFAR^{0.5}$ 对冲绳海槽表层初级生产力进行了估算^[17], 结果表明 18 cal. ka BP 以来冲绳海

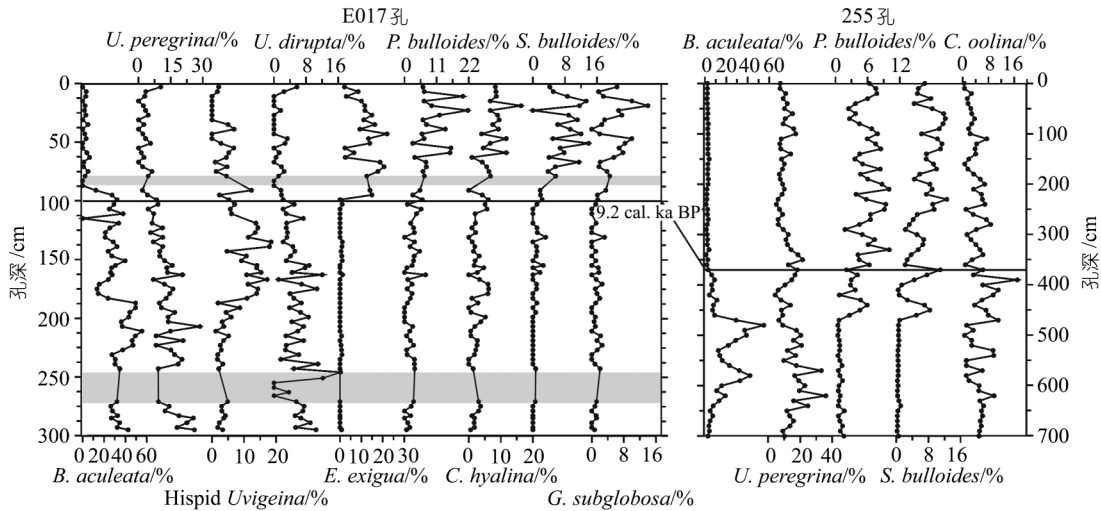


图4 冲绳海槽中南部 E017 孔和 255 孔主要底栖有孔虫种属相对丰度变化及对比
实线指示底栖有孔虫群落突变界线；阴影区域代表浊流影响层位

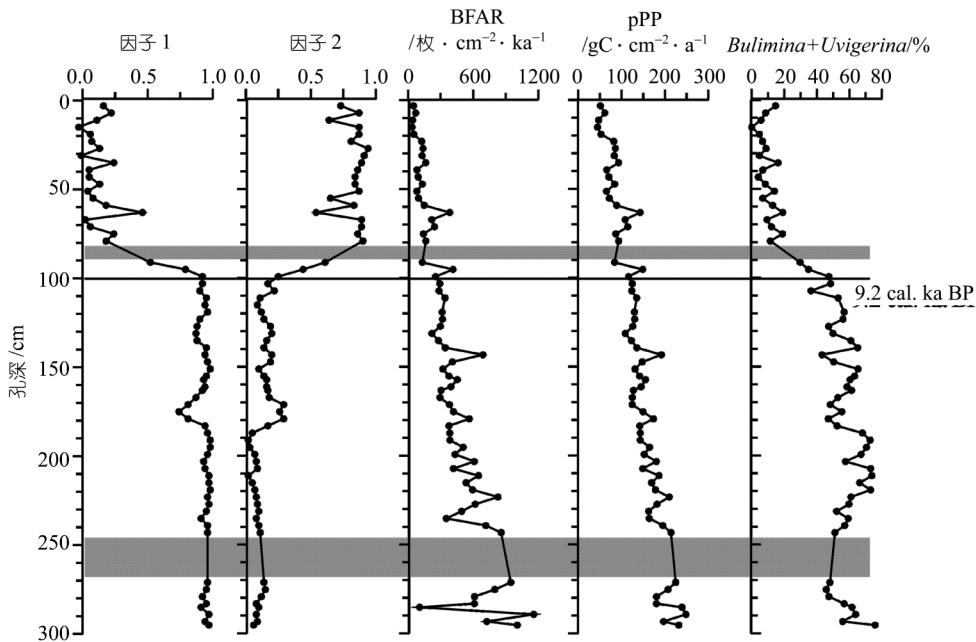


图5 E017 孔底栖有孔虫 Q 型因子载荷、底栖有孔虫堆积速率(BFAR)、古生产力估算和 *Bulimina+Uvigerina* 的丰度变化
实线指示底栖有孔虫群落突变界线；阴影区域代表浊流影响层位

槽的表层初级生产力整体呈逐渐降低的趋势(图5): 9.2 cal. ka BP 以前的冰期-冰消期平均 $161.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 明显高于冲绳海槽南部的 255 孔全新世以前的估算值^[10]. 9.2 cal. ka BP 以后的冰后期初级生产力显著降低, 平均为 $79.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 与 255 孔全新世的估算值非常接近^[10], 并与现今冲绳海槽黑潮水团的年均集

成初级生产力 IP($106.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[18]大致相当.

表层海水初级生产力的上述演化特征在浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 变化上也可找到相应的证据. 表层水营养物质浓度的增加会引起表层海水 $\delta^{13}\text{C}$ 变轻^[19]. 因此, E017 孔约 9.2 cal. ka BP 以前的 *G. sacculifer* $\delta^{13}\text{C}$ 低值可能对应了表层海水营养物质浓度的增加, 9.2 cal.

表 2 E017 孔底栖有孔虫在 2 个因子上的方差最大因子得分

属种	因子 1	因子 2	属种	因子 1	因子 2
<i>Uvigerina peregrina</i>	1.618	0.368	<i>Pullenia bulloides</i>	0.043	3.092
<i>Uvigerina dirupta</i>	1.125	0.260	<i>Pullenia</i> spp.	0.254	1.082
Hispid <i>Uvigerina</i>	1.531	0.878	<i>Globocassidulina subglobosa</i>	-0.051	1.822
<i>Bulimina aculeata</i>	6.726	-0.205	<i>Cassidulina carinata</i>	0.232	0.296
<i>Bulimina mexicana</i>	0.552	0.386	<i>Cassidulina laevigata</i>	0.084	0.248
<i>Bulimina submarginata</i>	0.027	0.138	<i>Islandiella islandica</i>	-0.029	0.202
<i>Bulimina exilis</i>	0.044	0.034	<i>Epistominella exigua</i>	-0.473	4.203
<i>Bulimina rostrata</i>	0.165	0.227	<i>Pseudoepionides japonicus</i>	0.096	0.583
<i>Bolivina</i> spp.	0.113	0.399	<i>Osangularia bengalensis</i>	0.012	0.483
<i>Praeglobobulimina</i> spp.	0.391	0.257	<i>Cibicidoides hyalina</i>	0.106	2.820
<i>Chilostomella</i> spp.	0.006	0.761	<i>Oridorsalis</i> spp.	0.279	0.784
<i>Globobulimina pacifica</i>	0.030	0.039	<i>Gyroidina broeckiana</i>	0.012	0.922
<i>Fursenkoina rotundata</i>	0.107	0.005	<i>Gyroidina orbicularis</i>	0.017	0.580
<i>Nodosaria inflexa</i>	0.011	0.178	<i>Gyroidina neosoldanii</i>	0.111	0.150
<i>Ehrenbergina pacifica</i>	0.104	0.116	<i>Gyroidina nipponica</i>	0.048	0.240
<i>Eggerella</i> spp.	-0.047	1.221	<i>Lenticulina</i> spp.	0.124	0.493
<i>Sigmoilopsis</i> spp.	0.112	0.098	<i>Cibicides pseudoungerianus</i>	0.067	0.291
<i>Quinqueloculina</i> spp.	0.446	0.147	<i>Cibicides wuellerstorfi</i>	0.197	0.373
<i>Pyrgo depressa</i>	0.251	0.174	<i>Discorbis</i> sp.	0.027	0.153
<i>Pyrgo</i> spp.	0.130	0.105	<i>Nonion</i> spp.	0.038	0.286
<i>Biloculinella</i> spp.	0.066	0.014	<i>Nonionella</i> spp.	0.083	0.161
<i>Fissurina</i> spp.	0.058	0.418	<i>Pseudononion</i> sp.	0.060	0.011
<i>Parafissurina</i> spp.	0.048	0.135	<i>Melonis barleeanum</i>	0.605	0.196
<i>Hoeglundina elegans</i>	0.827	0.061	<i>Martinotiella</i> spp.	0.073	0.181
<i>Sphaeroidina bulloides</i>	-0.295	2.663	<i>Trochammina globigeriniformis</i>	-0.023	0.198
<i>Florilus</i> spp.	0.080	0.090	<i>Cyclammina compressa</i>	-0.022	0.186

ka BP 以后 *G. sacculifer* $\delta^{13}\text{C}$ 变重, 反映表层海水营养物质浓度的降低(图 2)。

冲绳海槽中南部 18 cal. ka BP 以来古生产力的演化可能与海平面变化和陆源营养物质的输入有关。冰期-冰消期的低海平面, 径流带来的陆源营养物质直接注入到冲绳海槽, 导致了表层初级生产力的提高; 全新世冰后期随海平面上升, 进入海槽区的营养物质锐减, 导致了表层初级生产力的下降^[10]。从 E017 和 255 孔的对比来看, 冰期-冰消期冲绳海槽中部的初级生产力要高于南部, 可能与陆源营养物质的接收量差异有关。

底栖有孔虫群落组成也可反映古生产力的变化。Altenbach 和 Sarnthein 发现在全球所有海盆中底栖有孔虫的分布都表现出受控于表层海洋生产力和到达海底的有机碳通量的变化^[20], 表明了食物供应是影响底栖有孔虫发育的一个重要因素。因此, 在不同的食物供应环境下也发育了不同种类的底栖有孔虫。

底栖有孔虫内生种 *Uvigerina* 和 *Bulimina* 属常用来指示高有机质通量和低氧浓度的沉积环境^[21]。对南海的底栖有孔虫研究发现, *B. aculeata* 和 *U. peregrina* 在有机碳通量大于 $3.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的环境中占主导地位。在冲绳海槽, *B. aculeata* 也被用来指示高表层生产力^[22]。E017 孔中, *B. aculeata*, *U. peregrina*, Hispid *Uvigerina* 和 *U. dirupta* 等高有机质通量和低氧浓度指示种主要出现在 9.2 cal. ka BP 以前的冰期-冰消期(图 4), 对应于组合 F1, 其中 *Uvigerina* 和 *Bulimina* 的总含量在 9.2 cal. ka BP 以前平均达 57%(图 5)。该组合与冲绳海槽南部 255 孔的冰期底栖有孔虫组合^[10]的主要属种一致(图 4)。表明冰期-冰消期期间, 冲绳海槽中南部具有较高的表层海水古生产力和有机质沉降通量, 底层水含氧量较低。

E017 孔 9.2 cal. ka BP 以来的底栖有孔虫组合以 F2 为主。该组合最重要的代表种 *E. exigua* 主要生活在沉积物和水界面的浮游腐殖质松软层中, 以植物碎

屑为食, 适应于季节性变化的食物供应环境^[23,24], 在季节性变化较强的贫营养区尤其有竞争能力^[15,25], 是脉冲式有机质输入的有效指示标志^[26]. *E. exigua* 在低纬度大西洋也是低生产力组合的代表分子^[27], 在冲绳海槽也曾被用来指示低生产力环境^[28]. 因此, 在 E017 孔中, *E. exigua* 在 9.2 cal. ka BP 以后的大量出现, 不仅反映表层古生产力降低, 同时也反映了冰后期河流季节性脉冲式注入过程的显著增强. 尽管与 255 孔相比冰后期底栖有孔虫组合的主要分子非常相似, 但 255 孔中的 *E. exigua* 却处于相对次要的地位^[10], 表明全新世冰后期冲绳海槽中部接受河流季节性注入的强度可能大于南部.

F2 组合中的其他代表种, 如 *P. bulloides*, *C. hyalina* 和 *G. subglobosa* 通常也出现在有机质通量贫乏的贫营养区, 指示低生产力环境^[10, 27-30]. 组合 F2 中的这些代表分子反映了 9.2 cal. ka BP 以来表层海水古生产力和有机质通量显著降低, 底层水团的营养状况较低. 此外, F2 组合中另一个重要属种是 *S. bulloides*, 该种在东太平洋被认为是高生产力的指示种^[31]. 而在 E017 孔和 255 孔中, *S. bulloides* 均与指示低生产力的属种形成组合, 可能表明该种的丰度在冲绳海槽中南部还受到其他如含氧量和种间竞争等因素的影响.

3.2 底层水含氧量与流通状况

底栖有孔虫不但是底层水营养状况与表层古生产力的替代指标, 同时也是底层水含氧量与流通状况的良好的指示标志. E017 孔和 255 孔均显示 *B. aculeata* 的高丰度值出现在冰期-冰消期的层位中, 而在冰后期丰度极低, 趋于消失. *U. peregrina* 的丰度亦显示冰期-冰消期明显高于冰后期的分布特征(图 4). 此外, E017 其他内生种, 如 *Hispid Uvigerina* 和 *U. dirupta* 以及 255 孔中的典型低氧含量指示种 *Chilostomella oolina*^[10] 都有与 *B. aculeata* 和 *U. peregrina* 相同的分布趋势.

相反, 底层水高溶解氧含量的典型指示种 *C. hyalina* 和 *G. subglobosa*^[21] 均在全新世冰后期显示出高的丰度值, 而在 9.2 cal. ka BP 以前的冰期-冰消期地层中丰度非常低, 表明尽管具有较高的营养物质通量, 但底层水的较低含氧量已经不适合 *C. hyalina*

和 *G. subglobosa* 等喜氧种生存.

因此, 根据现有底栖有孔虫群落组成特征, 冲绳海槽中南部底层水冰后期的流通较冰期-冰消期活跃, 从而说明冰期-冰消期时的底层水很可能没有受到冰期西北太平洋中深层水演化^[4-6,8]的显著影响. 其原因可能是冰期-冰消期低海面时, 海槽内底层水与西北太平洋的中深层水之间的水体交换程度减弱, 如果在隔绝增强的状态下有径流注入海槽, 会导致海水分层加剧从而进一步减弱底层海水的流通强度.

3.3 碳酸盐溶解作用

E017 孔位于现代冲绳海槽碳酸盐溶跃面(1600~1700 m)深度以下^[32-33], 从该孔的浮游有孔虫碎壳率指标和底栖有孔虫中胶结壳百分含量看, 约 9.2 cal. ka BP 以来的冰后期碳酸盐溶解作用显著增强, 与冲绳海槽的溶解作用在冰后期增强相一致^[10]. 浮游有孔虫碎壳率反映了 18 cal. ka BP 以来冲绳海槽的碳酸盐溶解作用可以分为 3 个阶段(图 3): 约 18~13.5 cal. ka BP, 碳酸盐溶解作用较弱; 13.5~9.2 cal. ka BP, 碳酸盐溶解作用有所增强; 9.2 cal. ka BP 至今碳酸盐溶解作用急剧增加, 并在最近 3 cal. ka BP 以来碳酸盐溶解强度变至最大. 对应的, E017 孔红褐色深海胶结壳 *Cyclammmina compressa*, *Trochammmina globigeriniformis*, *Rhabdammina* 属等只出现在岩芯 20 cm 以上, 有可能表明冲绳海槽现代浅溶跃面是最近 3 cal. ka BP 左右才形成的.

4 结论

冲绳海槽中南部 18 cal. ka BP 以来的底栖有孔虫组合发生了明显改变, 在 9.2 cal. ka BP 以前的冰期-冰消期以 *B. aculeata*, *U. peregrina*, *Hispid Uvigerina* 和 *U. dirupta* 等列式壳为主. 在 9.2 cal. ka BP 以后的冰后期以 *E. exigua*, *P. bulloides*, *C. hyalina*, *S. bulloides* 和 *G. subglobosa* 等平旋和螺旋壳体为主. 底栖有孔虫堆积速率(BFAR)和底栖有孔虫群落组成等多项指标一致反映冲绳海槽中南部冰期-冰消期表层古生产力和有机质通量高于冰后期. 定量估算结果进一步表明冰期-冰消期表层古生产力由南向北逐渐增强, 可能与陆源营养物质的接收量差异有关. 此外,

脉冲式有机质输入的指示种 *E. exigua* 在冰后期的大量出现可能反映冰后期河流季节性脉冲式注入较冰期-冰消期明显增强, 并且海槽中部接受河流季节性注入的强度可能大于南部。

底层水含氧量与流通状况的典型标志种分布特征显示冲绳海槽中南部冰期-冰消期的底层水流通状况较差, 没有充分证据显示冰期西北太平洋中深层水演化对冲绳海槽中南部底层水团性质产生明显的影响。其原因可能是冰期-冰消期低海面时, 冲绳海槽隔绝状态加强, 底层水与西北太平洋的中深层水之间的水体交换程度减弱所致。此外, 底栖有孔虫和碳酸盐溶解作用表明 18 cal. ka BP 以来冲绳海槽的碳酸盐溶解作用是逐渐增强的, 其中 9.2 cal. ka BP 至今碳酸盐溶解作用急剧增加。研究表明现代冲绳海槽浅浴跃面可能是最近 3 cal. ka BP 左右才形成的。

参 考 文 献

- Boyle E A. Quaternary deepwater paleoceanography. *Science*, 1990, 249: 863-870
- Curry W B, Duplessy J C, Labeyrie L D, et al. Quaternary deep-water circulation changes in the distribution of $\delta^{13}\text{C}$ of deep water ΣCO_2 between the last glaciation and the Holocene. *Paleoceanography*, 1988, 3(3): 317-342
- Oppo D W, Fairbanks R G. Variability in the deep and intermediate water circulation of the Atlantic Ocean during the 25000 years: Northern Hemisphere modulation of the Southern Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 86: 1-15
- Duplessy J C, Shackleton N J, Fairbanks R G, et al. Deep water source variations during the last climate cycles and their impact on the global deepwater circulation. *Paleoceanography*, 1988, 3(3): 343-360
- Berger W H. Ocean ventilation during the last 12,000 years: hypothesis of counterpoint deep water production. *Marine Geology*, 1987, 78: 1-10
- Shackleton N J, Duplessy J C, Arnold M, et al. Radiocarbon age of last glacial Pacific deep water. *Nature*, 1988, 335: 708-711
- 翦知潜. 南海冰期深部水性质的稳定同位素证据. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(3): 250-256
- Keigwin L D. Glacial-age hydrography of the far northwest Pacific Ocean. *Paleoceanography*, 1998, 13(4): 323-339
- 杨天鸿. 东海黑潮水团的初步分析. *海洋科学集刊*, 1984, 21: 179-200
- 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*, 1996, 26(5): 467-473
- Stuiver M, Reimer P J, Bard E, et al. INTCAL98 Radiocarbon age calibration 24000-0 cal aBP. *Radiocarbon*, 1998, 40: 1041-1083
- 向荣, 李铁刚, 杨作升, 等. 冲绳海槽南部海洋环境改变的地质记录. *科学通报*, 2003, 48(1): 78-82
- Duplessy J C, Delibrias G, Turon J L, et al. Deglacial warming of the northeastern Atlantic Ocean: correlation with the paleoclimate evolution of European continent. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1981, 35: 121-144
- 李铁刚, 刘振夏, Hall M A, 等. 冲绳海槽末次冰消期浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 的宽幅低值事件. *科学通报*, 2002, 47(4): 298-301
- Schmidl G, Mackensen A. Late Quaternary Paleoproductivity and deep water circulation in the eastern South Atlantic Ocean: Evidence from benthic foraminifera. *Palaeogeography palaeoclimatology palaeoecology*, 1997, 130: 43-80
- Herguera J C, Berger W H. Paleoproductivity from benthic foraminifera abundance: Glacial to postglacial change in the west-equatorial Pacific. *Geology*, 1991, 19: 1173-1176
- Herguera J C. Last glacial paleoproductivity patterns in the eastern equatorial Pacific: benthic foraminifera records. *Marine Micropaleontology*, 2000, 40: 259-275
- Gong G, Shiah F, Liu K, et al. Spatial and temporal variation of chlorophyll a, primary productivity and chemical hydrography in the southern East China Sea. *Continental Shelf Research*, 2000, 20: 411-436
- Wang L, Sarnthein M, Erlenheuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology*, 1999, 156: 245-284
- Altenbach A, Sarnthein M. Productivity in benthic foraminifera, In: Berger W H, Smetacek V S, Wefer G, eds. *Productivity of the ocean: present and past*. New York: John Wiley & Sons, 1989. 255-270
- Kaiho K. Benthic foraminiferal dissolved-oxygen index and dissolved-oxygen levels in the modern ocean. *Geology*, 1994, 22: 719-722
- Jian Zhimin, Luejiang Wang, Kienast M, et al. Benthic foraminiferal paleoceanography of the South China Sea over the last 40,000 years. *Marine Geology*, 1999, 156: 159-186
- Goody A J. A response by benthic foraminifera to the deposition of phytodetritus in the deep sea. *Nature*, 1988, 332: 70-73
- Goody A J. Deep-sea benthic foraminiferal species which exploit phytodetritus: characteristic features and controls on distribution. *Marine Micropaleontology*, 1993, 22: 187-205
- Lohmann G P. Increasing seasonal upwelling in the subtropical South Atlantic over the past 700,000 yrs: Evidence from deep-living planktonic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 1992, 19: 1-12
- Smart C W, King S C, Goody AJ, et al. A benthic foraminiferal proxy of pulsed organic matter paleofluxes. *Marine Micropaleontology*, 1994, 23: 89-99
- Fariduddin M, Loubere P. The surface ocean productivity response of deeper water benthic foraminifera in the Atlantic Ocean. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32: 289-310
- 翦知潜, Saito Y, 汪品先, 等. 黑潮主流轴近两万年来位移. *科学通报*, 1998, 43(5): 532-536
- Rijk S D, Jorissen F J, Rohling E J, et al. Organic flux control on bathymetric zonation of Mediterranean benthic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 2000, 40: 151-166
- Bruke SK, Berger W H, Coulbourn W T. Benthic foraminifera in box core ERDC 112, Ontong Java Plateau. *Journal of Foraminiferal Research*, 1993, 23 (1): 19-39
- Loubere P. The surface ocean productivity and bottom water oxygen signals in deep water benthic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 1996, 28: 247-261
- 陈荣华, 孟 翊, 李保华, 等. 冲绳海槽南部两万年来碳酸盐浴跃面的变迁. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 25-30
- 向荣, 李铁刚, 阎 军, 等. 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*, 2001, 26(增刊): 69-74