

冲绳海槽末次冰期以来千年尺度 古海洋演化的沉积记录^{*}

李铁刚¹ 陈金霞^{1 2}

(¹中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)
(²中国科学院研究生院, 北京 100039)

张德玉 刘振夏

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

格陵兰冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表明, 末次冰期的气候发生了一系列快速的冷暖交替过程, 即所谓的 Dansgaard-Oeschger 旋回 (Dansgaard *et al.*, 1995; Stuiver *et al.*, 1995; Grootes *et al.*, 1997)。在北大西洋区域, 海洋的沉积记录也清楚地再现了在总的冰期背景下代表强烈冰川漂移事件的 6 次变冷事件, 即所谓的 Heinrich 事件 (Bond *et al.*, 1992, 1993; Rasmussen *et al.*, 1997; Andrews, 1998)。通过对比发现 Dansgaard-Oeschger 旋回和 Heinrich 事件并非两个孤立的气候演变过程, Heinrich 事件 (H) 发生在 Dansgaard-Oeschger 旋回的最冷期, 几次大的 Heinrich 事件使格陵兰的大气温度在冰期的气候条件下又降低 $3\sim 6^{\circ}\text{C}$ (Mayewski *et al.*, 1997)。随后, 越来越多的研究成果表明, 这些气候事件的发生, 尤其冷事件并不仅限于格陵兰和北大西洋等北半球的高纬度地区, 几乎在全球各大区域均找到了它们的印记。

冲绳海槽作为西太平洋的一个弧后盆地, 其较高的沉积速率和对全球气候变化的“放大效应”, 为我们识别过去地质历史时期气候演化事件并进行全球对比提供了可靠的保证。本文作者对取自冲绳海槽北部的 CSH1 孔的孢粉组合和中部 DGKS9603 孔的浮游有孔虫动物群进行了分析, 以期获得有关北半球高纬度地区记录的末次冰期气候突变事件具有全球意义的新证据。

一、材料和方法

本文作者共分析了两个钻孔 CSH1 ($31^{\circ}13.733'\text{N}$, $128^{\circ}43.471'\text{E}$, 水深 703 m; 见图 1) 和 DGKS9603 ($28^{\circ}08.869'\text{N}$, $127^{\circ}16.238'\text{E}$, 水深 1 100 m; 见图 1), 对 CSH1 孔进行了孢粉

^{*} 中国科学院知识创新工程重要方向项目, KZCX3-SW-220 号和国家自然科学基金重点项目, 90411014 号。

通讯作者: 李铁刚, 研究员。E-mail: lgli@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2005 年 8 月 2 日。

分析，对 DGKS9603孔进行了浮游有孔虫、 $\delta^{18}\text{O}$ 分析，两个孔都进行了 AMS ^{14}C 测年。

DGKS9603孔于 1996年由中法合作 DONGHA I航次所采集，样品全长 592 cm。沉积物主要由灰色粉砂质泥组成，含火山玻璃及火山碎屑夹层，尤以 41 ~ 46 cm 和 481 ~ 527 cm 最为明显。CSH1孔于 1997年 10月由国家海洋局第一海洋研究所执行“海洋勘测专项”时取得，样品全长 17.32 m，系中国迄今为止用重力活塞取样法所取得的最长柱状样品，其中 0 ~ 61 cm，110 ~ 204 cm和 1 023 ~ 1 542 cm为黑灰色粉砂质泥；61 ~ 110 cm为灰色粉砂；204 ~ 442 cm和 1 542 ~ 1 736 cm为黑灰色软质泥；442 ~ 1 023 cm为深灰色泥。

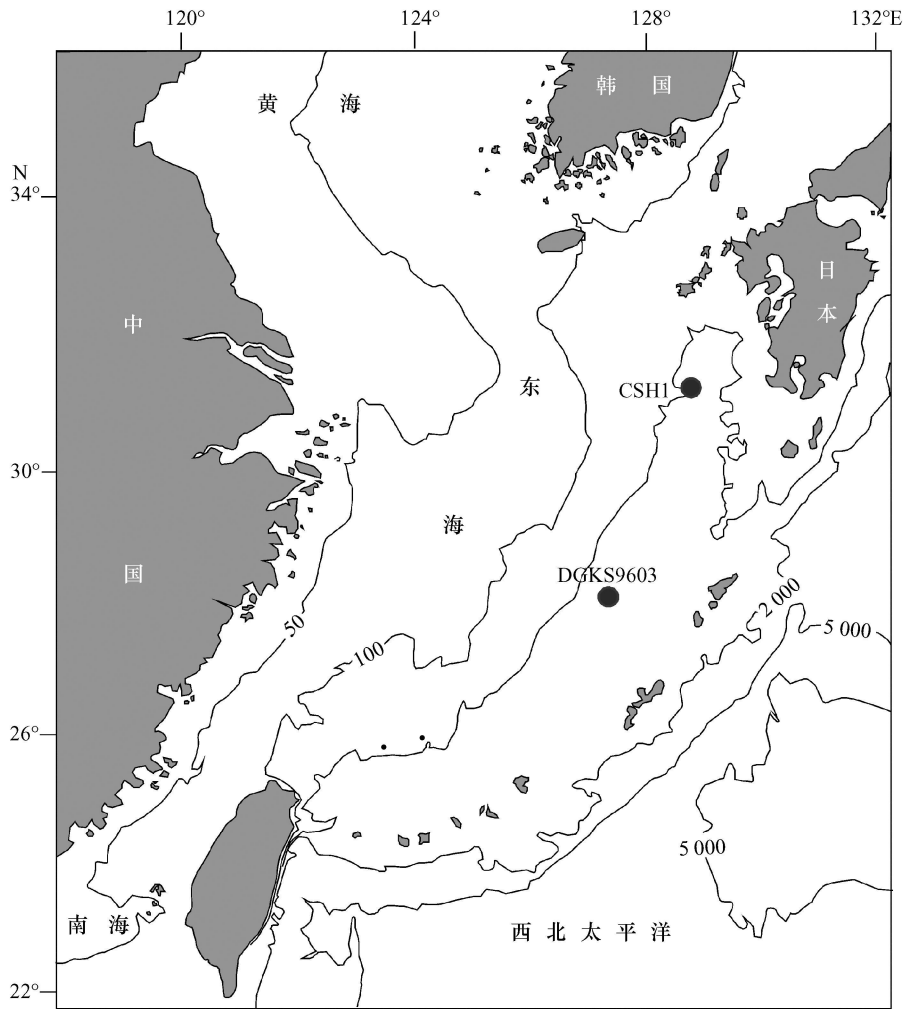


图 1 柱状样取样位置图

1. 有孔虫分析

将所采集样品按 2 cm 间隔取样，称取 5 g 干样，清水浸泡后用 63 μm 的铜筛冲洗，最后对大于 150 μm 的浮游有孔虫进行鉴定统计。为了客观综合地描述浮游有孔虫动物

群的群落组合特征，利用 Q 型因子分析方法 (K lovan *et al*， 1971)对浮游有孔虫的统计结果进行分析。海水表层古温度的估算是依据浮游有孔虫不同属种的丰度变化，采用现代类比技术 (MAT) (Prell 1985)来完成。

2. 孢粉分析

对所采样品进行不等距取样共分析了 114 份样品。样品分析用量为 4 ~15 g 将样品在实验室内加过滤水进行物理浸泡后，加盐酸及碳酸氢钠让其与样品充分混合，然后再进行重液浮选、稀释、集中，对混合液进行处理，最后制成活动玻片在显微镜下进行鉴定。

3. AMS ¹⁴C 测年、氧同位素分析

挑选 20 ~30 个粒径为 300 ~350 μm 的浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 壳体在剑桥大学 G odw in 第四纪研究所使用 SIRA 质谱仪进行氧同位素分析，分析精度优于 ±0.08‰。

DGKS9603 孔 AMS ¹⁴C 年代的测定，是采用 18 ~20 mg 的单种浮游有孔虫壳体，由美国 Bate Analyses 公司完成，共获得 14 个 AMS ¹⁴C 年代数据。CSH 1 孔是挑选浮游有孔虫混合种在奥胡斯大学进行 AMS ¹⁴C 年代的测定，共获得 6 个测年数据 (见表 1)。

表 1 年代数据

柱状样	层位 /m	AMS ¹⁴ C 年龄 ($\pm$ a BP)	校正年龄 /a	测试材料	测试单位
CSH 1	176 ~180	11 000 $\pm$ 90	12 583	混合种	比利时奥胡斯大学
CSH 1	360 ~364	16 990 $\pm$ 140	19 737	混合种	比利时奥胡斯大学
CSH 1	676 ~680	22 430 $\pm$ 240	25 300	混合种	比利时奥胡斯大学
CSH 1	1 000 ~1 004	34 050 $\pm$ 850	36 500	混合种	比利时奥胡斯大学
CSH 1	1 284 ~1 288	> 44 000	—	混合种	比利时奥胡斯大学
CSH 1	岩心最底部	> 47 000	—	混合种	比利时奥胡斯大学
DGKS 9603	11 ~13	2 740 $\pm$ 50	2 843	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	26 ~31	4 500 $\pm$ 50	5 298	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	47 ~49	8 080 $\pm$ 60	8 950	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	63 ~65	9 690 $\pm$ 50	11 090	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	89 ~94	11 230 $\pm$ 50	13 140	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	128 ~130	12 980 $\pm$ 50	15 514	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	174 ~179	16 580 $\pm$ 60	19 643	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	209 ~211	19 070 $\pm$ 80	22 509	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	300 ~302	26 350 $\pm$ 130	29 800	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	368 ~373	27 960 $\pm$ 170	31 400	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	420 ~424	32 300 $\pm$ 260	35 100	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	448 ~450	37 410 $\pm$ 520	39 900	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	484 ~486	39 020 $\pm$ 610	41 400	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司
DGKS 9603	530 ~532	41 260 $\pm$ 580	42 800	<i>G. menardii</i>	美国 Bate Analyses 公司

二、年代模型

每个原始 AMS ¹⁴C 测年数据均减去大气和海水之间平均为 400a 的 ¹⁴C 年代差 (Bard 1988)。对小于 20 ka 的原始测年数据利用 CALIB4.3 程序 (Stuiver *et al*, 1998) 校准到日历年, 400a 的大气和海水之间 ¹⁴C 年代差将由该程序自动减去。对大于 20 ka 的原始测年数据在扣除 400a 之后, 再利用 LaJ 等 (1996) 的方法校准到日历年龄。

DGKS9603 孔的年代模型以 AMS ¹⁴C 为测年数据, 结合 $\delta^{18}\text{O}$ 事件年代标定, 对大于 4 万日历年的年代控制点参照 $\delta^{18}\text{O}$ 事件所标定的年代来确定。通过该孔的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线与 SPECMAP $\delta^{18}\text{O}$ 时间表 (Martinson *et al*, 1987) 的对比, 可识别出 2.0、3.0 和 3.3 等 $\delta^{18}\text{O}$ 事件, 其中事件 3.3 的年代为 50.21 ka 作为大于 5 万年地层年代的控制点。这样, 将利用 13 个 AMS ¹⁴C 年代数据和 1 个 $\delta^{18}\text{O}$ 事件所标定的年代作为建立该孔时间模型的控制点 (图 2)。控制点之间的年代模型利用线性内插法完成, 超过 $\delta^{18}\text{O}$ 事件 3.3 的年代通过线性外插法获得。

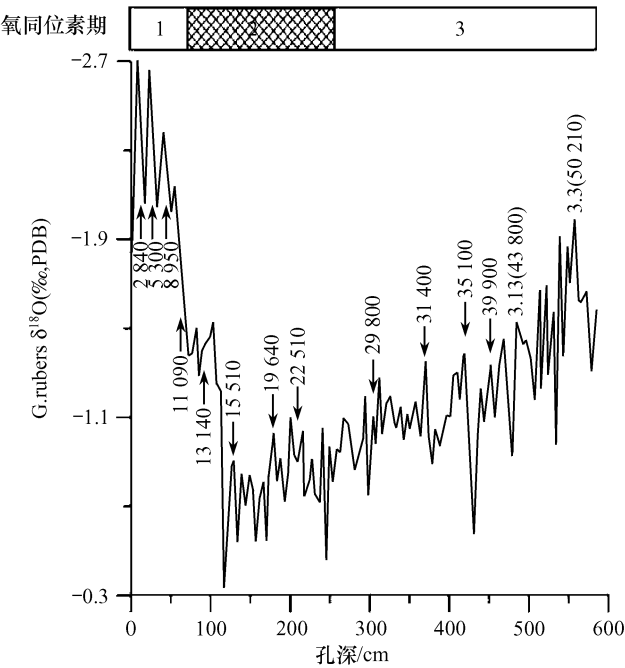


图 2 建立 DGKS9603 孔时间标尺的年代控制点

箭头为 AMS ¹⁴C 年代控制点, 数字为浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 事件年代控制点, 所示年龄为 a

CSH1 孔利用所测 AMS ¹⁴C 年代数据作为建立该孔时间模型的控制点, 控制点之间的年代模型利用线性内插法完成, 控制点之外的年代利用线性外插法获得。

三、结 果

1. 浮游有孔虫分析结果

浮游有孔虫 *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果表明, 在大的冰期至间冰期尺度上反映了可与 SPECMAP $\delta^{18}\text{O}$ 曲线 (Martinson *et al*, 1987) 进行对比的冰期至间冰期旋回过程。同时, *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线分别在距今 11.7~13.0 ka 14.7 ka 24.3 ka 28.5 ka 36.9 ka 46.6 ka 显示出了一系列明显的次级波动, 其变幅分别为 0.22‰ 0.53‰ 0.67‰、0.37‰ 0.63‰和 0.47‰。这些次级波动与格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线所记录的 Younger Dryas事件和可与北大西洋的 Heinrich事件 H1、H2、H3、H4和 H5进行对比的 Dansgaard-Oeschger旋回的 5个最冷期在时代上相吻合 (图 3)。

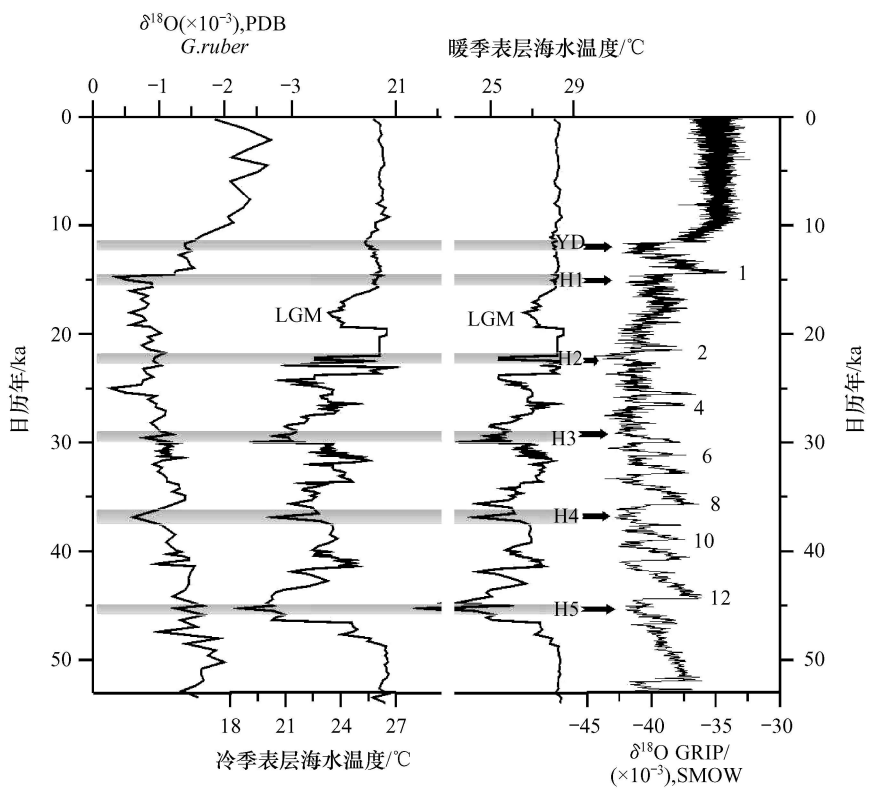


图 3 DGKS9603孔浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 和古水温记录与格陵兰 GRIP 冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线对比

MAT 表层海水古温度记录显示了 5 个主要的低温事件, 除了出现在 18 ka 的末次冰期最盛时 (LGM) 的冷事件外, 其余 4 个冷事件与 *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 较老的 4 个次级变动相对应 (图 3), 这 4 个低温事件的降温幅度在暖季为 2~5℃, 冷季为 3~6.5℃。如与岩心顶部样品的古温度估算值相比, 4 个低温事件在暖季依次分别低 2.4℃、3.2℃、3.8℃和 3.2℃; 冷季依次分别低 5.1℃、4.5℃、5.4℃和 4.8℃, 冷季的降温幅度明显高于暖

季。然而在 $\delta^8\text{O}$ 所示的相当于 Younger Dryas 事件和 Heinrich 事件 H1 两个次级波动中却未出现明显的降温过程，只是在相当于 Younger Dryas 事件的过程中，其冷季表层水温出现了不到 1°C 的轻微波动。

此外，对 22 个浮游有孔虫主要属种的 Q 型因子分析结果显示，上述气候事件也反映在浮游有孔虫动物群的群落结构和组成上。在 262 个岩心沉积物样品中，共抽取了 3 个主因子，可解释总方差的 95.5%，共同度介于 0.82 ~ 0.99 之间，图 4 为其因子载荷的分布特征。表 2 为不同属种的因子得分情况。主因子 1 可解释总方差的 49.2%，其最高的正载荷主要分布在超过 15 ka 的末次冰期内（图 4），热带-亚热带属种 *Neoglobobulimina dutertrei* 和 *G. ruber* 显示了最高的正得分（表 2）。主因子 2 可解释总方差的 24.8%，凉水分子 *Gibbersonia inflata* 和 *Gibbersonia quinquebba* 为其代表属种（表 2）。主因子 3 可说明总方差的 21.5%，其最高的负得分主要集中在距今 15 ka 冰消期以来的层位中（图 4），并以典型的暖水种 *Pulleniatina obliquiloculata* 和 *Gibbersonoides sacculifer* 为其特征属种（表 2）。

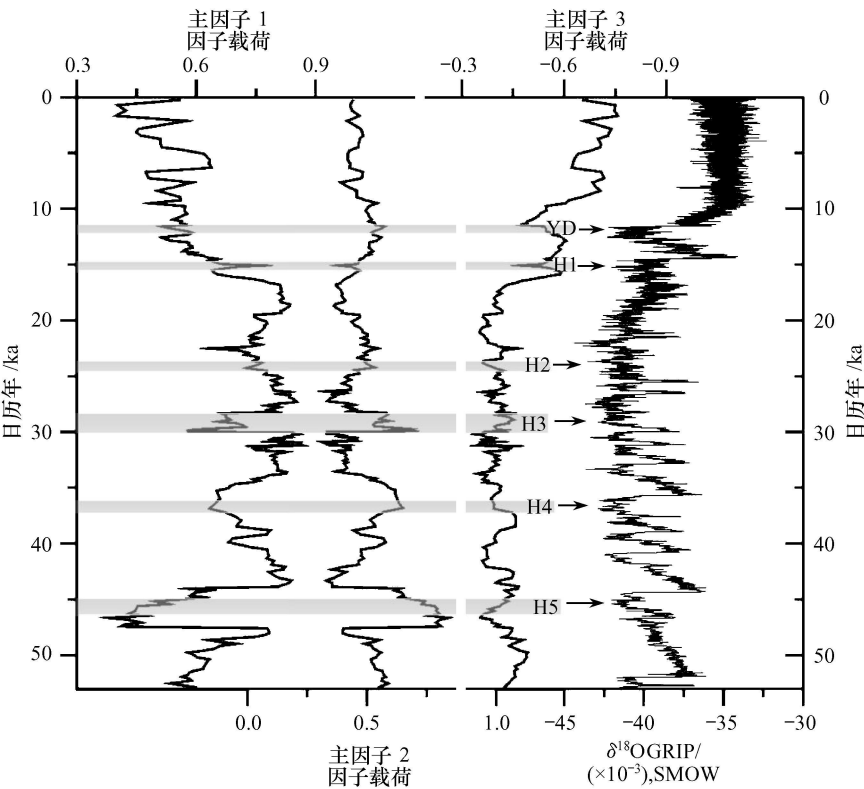


图 4 DCKS9603 孔浮游有孔虫群落结构对末次冰期以来高频古气候事件的反映

表 2 浮游有孔虫优势属种在 3 个主因子上的方差最大因子得分

属种	主因子 1	主因子 2	主因子 3
<i>Orbulina universa</i>	0.176	0.709	0.326
<i>Gibbersonoides angulatus</i>	-0.127	-0.022	-0.644
<i>G. ruber</i>	2.680	1.033	-1.431

续表

属种	主因子 1	主因子 2	主因子 3
<i>G. tenellus</i>	-0.021	-0.052	-0.143
<i>G. sacculifer</i> (S. L.)	-0.529	1.092	-1.950
<i>Sphaeroidinella dehiscentis</i>	-0.038	-0.042	-0.129
<i>Globigerinella aequilateralis</i>	-0.577	0.413	-1.144
<i>Globigerina alida</i>	-0.048	0.759	0.283
<i>G. bulboides</i>	-0.491	1.149	-0.697
<i>G. falconensis</i>	0.133	0.753	0.138
<i>G. nubescens</i>	0.019	1.408	0.668
<i>G. quinqueloba</i>	0.066	1.975	1.276
<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> (R)	0.221	0.730	0.349
<i>N. dutertrei</i>	3.423	-0.173	-0.736
<i>Pulleniatina obliquiculata</i>	-0.674	0.545	-2.574
<i>Globorotalia inflata</i>	0.127	2.168	1.164
<i>G. truncatulinoides</i> (R)	0.354	0.844	0.568
<i>G. crassiformis</i>	0.252	1.311	0.801
<i>G. hisuta</i>	0.031	0.293	0.104
<i>G. scitula</i>	0.000	-0.004	-0.011
<i>G. menardii</i> (S. L.)	-0.022	0.574	-0.130
<i>Globigerinita glutinata</i>	-1.211	1.521	-1.409

注: *Globigerinoides sacculifer*(S. L.)等于 *G. sacculifer* 加上 *G. tribus* *Globorotalia menardii*(S. L.)等于 *G. menardii*加上 *G. flexuosa*(*neoflexosa*)和 *G. tumida*

从上述因子模型的结果来看,主因子 1和主因子 3代表暖水种组合,主因子 2为凉水种组合。同时,主因子 1和主因子 3之间明显呈负关联,其绝对值又以 15 ka为界存在各自的高值分布区。由此可见,主因子 1和主因子 3反映了两种截然不同环境背景下的暖水组合,即主因子 1反映冰期条件下的暖水组合,主因子 2反映末次冰消期以来温暖气候条件下的暖水组合,其间可能与黑潮暖流的摆动有关。

^δ18O和海水表层古温度所表现出的几个变冷事件在浮游有孔虫动物群的群落结构及组合特征上均有明显的反映(图 4),而且在每一个事件过程中不同的组合类群显示了不同的响应特征。除了发生在 14.7 ka与 H1事件相当的变冷事件外,在其他变冷事件过程中主因子 2均显示了较高的正载荷,说明在这些事件过程中以 *G. inflata*和 *G. quinqueloba*为代表的凉水分子繁盛。相对来说,以 *N. dutertrei*和 *G. nuber*为代表的暖水组合主因子 1在这些事件过程中却呈现明显低载荷分布。主因子 3的载荷值主要在与 Younger Dryas和 H1相当的两个降温事件过程中出现明显波动,说明以 *P. obliquiculata*和 *G. sacculifer*为标志的暖水种组合对这两次事件反映较为敏感。然而有趣的是,在与 H1相当的事件过程中,另一暖水种组合主因子 1却显示了较高的正载荷,冷水种组合主因子 2却出现较低的载荷值,这可能是由于这一事件发生快速而短暂,只是在对气候比较敏感的浮游有孔虫类群和 ^δ18O 组成上留下了记录。

2. 孢粉分析结果

除个别样品外，每份样品所统计的孢粉量均在 150 粒以上，共鉴定出 59 种常见的孢粉种属以及部分尚难以准确鉴定的类型。主要科属有松属 (*Pinus*)、铁杉属 (*Tsuga*)、桦木属 (*Betula*)、胡桃属 (*Juglans*)、落叶栎属 [*Quercus*(*D*)]、常绿栎属 [*Quercus*(*E*)]、栗属 (*Castanea*)、栲属 (*Castanopsis*)、蔷薇科 (*Rosaceae*)、藜科 (*Chenopodiaceae*)、菊科 (*Compositae*)、蒿属 (*Artemisia*)、石松科 (*Lycopodiaceae*)及水龙骨科 (*Polypodiaceae*)。

松属花粉在整个钻孔中均有分布，且含量很大，这与松属易于长距离随风飘移有关，剔除松属后将余下的属种分为如下五大类：高山针叶树有云杉属 (*Picea*)和冷杉属 (*Abies*)；落叶阔叶林主要包括：落叶栎属、水青冈属 (*Fagus*)、栗属 (*Castanea*)、桦木属、胡桃属等；常绿阔叶林主要包括：常绿栎属、陆均松属 (*Dacrydium*)、栲属、杜英科 (*Elacocarpaceae*)、桃金娘科 (*Myrta*)、蔷薇科、枫香属 (*Liquidambar*)等；草本植物以藜科草本植物以藜科、菊科、蒿属、莎草科 (*Cyperaceae*)、十字花科 (*Cruciferaeae*)、茜草科 (*Rubiaceae*) 为主，另有少量禾本科 (*Gramineae*)、茄科 (*Solanaceae*)、豆科 (*Leguminosae*)、香蒲科 (*Typha*)等；蕨类植物有石松科、卷柏科 (*Selaginellaceae*)、凤尾蕨科 (*Pteridaceae*)、水龙骨科。

作者将草本植物、乔木加灌木植物、松属、高山针叶树、常绿阔叶林、落叶阔叶林、蒿属、藜科、菊科花粉的百分含量曲线与格陵兰冰心 GISP2 $\delta^{18}O$ 曲线进行了对比(图 5)。通过分析发现图 5 中各花粉百分含量曲线分别在距今 4.1~4.6 ka、11.7~13.0 ka、15.4 ka、23.2 ka、29.4 ka、47.4 ka 显示出了一系列明显的次级波动，具体表现为温带旱生草本植物花粉，高山针叶树花粉及温带落叶阔叶林花粉含量突然增加形成高峰，松属花粉，热带、亚热带常绿阔叶林花粉含量则明显降低。这些次级波动与格陵兰冰芯 $\delta^{18}O$ 曲线所记录的 4 ka 降温事件、Younger Dryas 事件和 Heinrich 事件 H1、H2、H3 和 H5 在时代上相吻合。

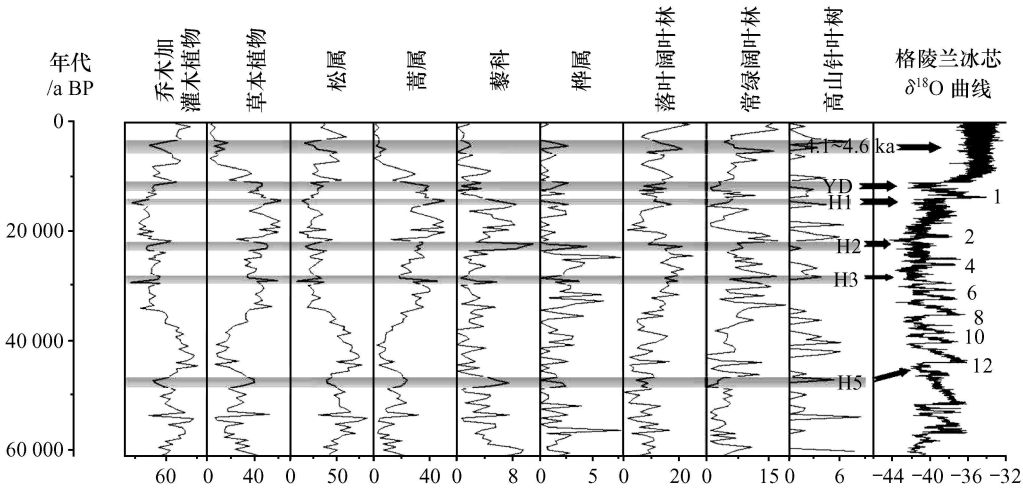


图 5 CSH1 孔孢粉百分含量与格陵兰冰芯 GISP2 $\delta^{18}O$ 记录的对比

四、讨 论

距今 4 ka左右在中国很多地区记录中为一段环境剧烈变动的时期。敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 在距今 4.7~4.3 ka间出现两次低值; 云南滇池的孢粉记录显示在距今 3.9 ka青冈栎、栲属降至距今 12 ka以来的最低值; 而在中国东部距今 4 ka左右首先记录的是灾难性的大洪水, 紧随洪水之后的是气候变冷变干; 在杭嘉湖地区距今 4 ka左右的孢粉组合中常绿阔叶林青冈栎、栲属已不存在, 柏科增加, 水生植物减少, 气候明显比现今干凉; 长江下游的孢粉记录显示距今 4~3.6 ka为松阔混交林为主的干凉期; 而长白山孤山屯剖面的孢粉分析也表明从距今 4 ka起松、云、冷杉数量明显增加, 植被由榆、白蜡树、栎、胡桃和桦占绝对优势的阔叶林演变为松、云、冷杉为主的针阔混交林, 无疑这是一个冷峰(施雅风等, 1992 施少华, 1993)。而在欧洲 Alps地区距今 4.8~4.5 ka前后也出现了一个持续 300a的冷事件(Bamni 1996)。王开发(1990)的综合研究也表明距今 5.0~4.0 ka之间全球曾发生一次短暂的变冷降温事件, 在中国南方降温开始于距今 4.5 ka左右。

冲绳海槽与 4 ka左右降温事件相当的气候波动事件在有孔虫记录中没有显示, 只表现在孢粉组合的波动上, 具体表现为从距今 8 800a起草本植物花粉含量突然急剧降低, 此后一直维持低值, 但在 4 100~4 600a间, 草本植物花粉含量突然增加, 同时高山针叶树花粉及落叶阔叶林花粉含量突然回升, 松属花粉, 常绿阔叶林花粉含量则明显降低形成低谷。

随着末次间冰期的结束, 在持续近 100 ka的末次冰期背景下发生了一系列全球性和区域性的气候突变事件, 尤以格陵兰冰芯、北大西洋和西北欧等北半球高纬度区域的古气候记录最为强烈, 其中 Younger Dryas事件是目前研究最为详细的一个快速气候变冷事件。最初确认的 Younger Dryas事件发生年代是距今 11 000~10 000a (^{14}C) (Broecker 1994), 后来 Bond等(1992)标定的日历年为距今 12 900~11 500a (Bond *et al.*, 1997)。作者所确认的与 Younger Dryas事件相当的 $\delta^{18}\text{O}$ 和孢粉波动事件的日历年均介于距今 13 000~11 700a 在年代上与 Bond等(1992)标定的日历年吻合。

随着有关 Younger Dryas事件全球性证据的不断积累, 其全球意义已逐渐被人们所接受。西太平洋的海洋证据也显示了 Younger Dryas事件在这一地区的存在。 $\delta^{18}\text{O}$ 和微体化石记录表明在 Younger Dryas事件期间日本岸外曾发生了一次降温事件, 并伴随着黑潮和极锋南移 (Chinzei *et al.*, 1987; Kall *et al.*, 1988); 在苏禄海 (Linsley *et al.*, 1990)和南海 (Wang *et al.*, 1999)等边缘海也都发现了 Younger Dryas事件的 $\delta^{18}\text{O}$ 和海洋微体古生物的证据。在冲绳海槽与 Younger Dryas事件相当的气候波动事件主要反映在 $\delta^{18}\text{O}$ 、浮游有孔虫群落组成、孢粉组合丰度的波动上, 具体表现为浮游有孔虫 *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 增加 0.22‰, 以 *P. obliquiloculata* 和 *G. sacculifer* 为代表的暖水种组合丰度降低, 相应地伴随着 *G. inflata* 和 *G. quinqueloba* 等凉水种丰度的增加; 蒿属、菊科、藜科、常绿针叶林、落叶阔叶林花粉含量突然回升, 松属、常绿阔叶林花粉含量下降。

DGKS9603孔 MAT表层海水古温度记录却显示 Younger Dryas事件期间海水表层古

温度记录未发生明显的变化, 只是冷季的水温出现了不到 1°C 的轻微波动。可见 Younger Dryas 事件期间冲绳海槽并未出现明显的降温过程, 这一结果与 Thunell 等 (1996) 的结论趋于一致, 即 Younger Dryas 事件期间西太平洋中低纬度区域没有经历显著的变冷过程 (Thunell *et al.*, 1996)。本文作者的分析结果为 Younger Dryas 事件的全球意义和重新认识该事件在不同区域的特点提供了新的证据。

随着格陵兰冰芯 Dansgaard-Oeschger 气候旋回和北大西洋 Heinrich 事件的发现, 人们便在全球范围内寻找它们的印记。尽管还没有充足的证据证明这些高频事件具有全球意义, 但越来越多的研究成果表明这些气候事件并不仅限于格陵兰和北大西洋等北半球的高纬度区域。Schulz 等 (1998) 将阿拉伯海岩芯的有机碳记录与格陵兰 GISP2 冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 进行了对比, 认为快速的 Dansgaard-Oeschger 旋回和 Heinrich 事件也是过去 110 ka 低纬度区域气候变化的重要成分 (Schulz *et al.*, 1998)。中国黄土记录也发现了可与北大西洋气候记录在时代上进行对比的粒度最大层位 (Porter *et al.*, 1995)。在东北太平洋的 Santa Barbara 盆地的沉积记录中, 浮游有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 和群落变化特征 (Hendy *et al.*, 1999) 以及深层水的通风状况和环流记录 (Behl *et al.*, 1996) 均显示了与 Dansgaard-Oeschger 旋回有关的波动信号。最近, 通过对日本海晚第四纪高分辨率沉积记录的分析, Tada 等 (1999) 认为代表干湿旋回的浅色和暗色沉积物的互层也可能与 Dansgaard-Oeschger 气候旋回有关。此外, 在中纬度的大西洋的海洋记录及欧洲、北美的孢粉记录中, 也都显示出可与格陵兰和北大西洋等高纬区古气候记录进行对比的千年尺度上的气候不稳定性。

除 Younger Dryas 事件外, 孢粉组合、浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 、MAT 表层海水古温度和浮游有孔虫种群组合的变化中还记录了与 Heinrich 事件 H1、H2、H3 和 H5 同时代的降温事件, 其中与 H1 相当的变冷事件快速而短暂, 表现在浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的骤然增加和暖水分子 *P. Obliquiloculata* 及 *G. sacculifer* 的急剧降低, 草本植物花粉含量出现极高值而乔木加灌木花粉含量出现极低值, 而所估算的表层海水古温度并未出现明显的变化。其余 3 个变冷事件在浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 显著增加的同时均伴随着急剧的降温过程, 浮游有孔虫的组合特征也显示了凉水种增多和暖水种减少的变化过程, 孢粉组合则显示了温带中旱生草本植物花粉、高山针叶树花粉及温带落叶阔叶林花粉含量突然增加形成高峰, 松属花粉、热带、亚热带常绿阔叶林花粉含量则明显降低。与 Heinrich 事件 H4 相当的降温事件在孢粉记录上没有显示, 此时表现为浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 显著增加, 海水古温度急剧地降低。可见, 与 Heinrich 事件 H2、H3、H4 和 H5 相当的 4 次气候变冷事件是冲绳海槽末次冰期期间发生的最为强烈的气候突变事件。

随着格陵兰及北大西洋区域末次冰期气候变化的全球性效应在东亚及西太平洋地区证据的增加, 自然要求对其影响机制进行解释, 而可直接将两个区域的气候联系在一起的媒介和载体即是风场。Porter 等 (1995) 将中国黄土粒度变化所记录的可能与 Heinrich 事件有关的气候事件解释为 Heinrich 事件期间东亚季风的加强。Tada 等 (1999) 也认为日本海与 Dansgaard-Oeschger 旋回有关的代表干湿交替的浅色和暗色沉积物互层现象是受亚洲夏季风强度变化的控制。冲绳海槽作为西北太平洋的一个边缘海盆, 毗邻中国大陆和日本海, 其气候环境自然也是在东亚季风的影响和控制之下。因此, 冲绳海槽古气

候记录所反映的可与格陵兰和北大西洋气候记录进行对比的高频气候波动事件, 如果从东亚季风的角度考虑应该具有相同的机制, 即格陵兰和北大西洋等北半球高纬区所发生的气候波动, 使北半球的大气环流系统发生相应的变化, 从而对亚洲季风系统产生深刻的影响, 使其在传播高纬度气候变化信号中起到重要的作用。

五、结 论

通过上述关于 CSH1 孔和 DGKS9603 孔末次冰期以来孢粉组合、浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 组成、群落组合和海水表层古温度的分析, 发现了格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 所记录的 Dansgaard-Oeschger 旋回的冷期事件, 即相当于 4 ka 左右降温事件、Younger Dryas 事件和北大西洋最年轻的 5 个 Heinrich 事件在冲绳海槽的印记。冲绳海槽不同区域通过不同研究手段得出的结论略有不同, 北部的 CSH1 孔过孢粉含量变化反映了 4 ka 左右降温事件, 但没反映出 Heinrich 事件 H4, 中部的 DGKS9603 孔通过浮游有孔虫组合与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线所得结果则反映了 Heinrich 事件 H4 而没发现有关 4 ka 左右降温事件的印记, Younger Dryas 事件和 Heinrich 事件 H1, H2, H3, H5 两者则都有反映, 而且年代很接近。由于这些事件存在强弱差异, 故在多项气候记录之间的表现程度也有较大的不同。发生在末次冰消期, 与 Younger Dryas 和 H1 事件相当的两次变冷事件在 MAT 表层海水古温度估算中未出现显著的降温记录, 而主要表现在孢粉组合、浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 组成和群落结构的波动上。在与 H2, H3, H4 和 H5 相当的 4 个变冷事件过程中, 冲绳海槽经历了较强的气候突变, MAT 表层海水古温度估算记录了剧烈的降温过程, 并伴随着孢粉组合中草本植物花粉, 高山针叶树花粉及落叶阔叶林花粉含量突然增加, 松属花粉常绿阔叶林花粉含量明显降低, 浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 组成和凉水种组合的显著增加及暖水种的明显减少。尽管格陵兰和北大西洋所发生的气候突变事件影响冲绳海槽区域的机制还有待于进一步探讨, 但这些高频气候波动事件所诱发的东亚季风强度的变化将是传播北半球高纬度地区气候变化信号的主要载体。

参 考 文 献

- 施少华. 1993. 中国全新世高温期中的气候突变事件及其对人类的影响. 海洋地质与第四纪地质, 13(4): 65~73
- 施雅风, 孔昭良, 王苏民等. 1992. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. 中国科学(B辑), 22(12): 1300~1308
- 王开发. 1990. 全新世温暖期中低温事件的初步研究. 第四纪研究, 2: 168~174
- 孙湘君, 王琤瑜, 宋长青. 1996. 中国北方部分科属花粉-气候响应面分析. 中国科学, D辑, 26(15): 427~432
- Andrews J T. 1998. Abrupt changes (Heinrich events) in late Quaternary North Atlantic marine environments. *Journal of Quaternary Science*, 13: 3~16
- Bard E. 1988. Correction of accelerator mass spectrometry ^{14}C ages measured in planktonic foraminifera: Paleoceanographic implications. *Paleoceanography*, 3: 635~645
- Bond G, Heinrich H, Broecker W, et al. 1992. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the Last glacial period. *Nature*, 360: 245~249
- Bond G, Broecker W, Johnsen S, et al. 1993. Correlation between climate records from North Atlantic sediment and Greenland ice. *Nature*, 365: 143~147

- Broecker W S. 1994. Massive iceberg discharges as triggers for global climate. *Nature* **372**: 421~424
- Bond G G, Showers W, Cheseby M. 1997. A pervasive millennial scale cycle in the North Atlantic Holocene and glacial climate. *Science* **278**: 1257~1265
- Behl R J, Kennett J P. 1996. Brief interstadial events in the Santa Barbara Basin, NE Pacific, during the last 60 kyr. *Nature* **379**: 243~246
- Baroni C., Ornbelli G. 1996. The Alpine 'ice man' and Holocene climatic change. *Quaternary Research* **46**(1): 78~83
- Chinzei K, Fujioka H, Kitazato M *et al.*, 1987. Postglacial environmental change of the Pacific Ocean off the coast central Japan. *Marine Micropaleontology* **11**: 273~291
- Dansgaard W, Johnson S J, Clausen H B *et al.* 1995. Evidence for general instability of past climate from a 250 kyr ice core record. *Nature* **364**: 218~220
- Grotes P M, Stuiver M. 1997. Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10^3 to 10^5 -year time resolution. *Journal of Geophysical Research* **102**: 26455~26470
- Hendy I L, Kennett J P. 1999. Latest Quaternary North Pacific surface water responses inply atmosphere driven climate instability. *Geology* **27**: 289~384
- Klvan J E, Imbrie J. 1971. An algorithm and FORTRAN IV program for large-scale Q-mode factor analysis and calculation of factor scores. *Mathematical Geology* **3**: 61~77
- Kall N, Labeyrie L D, Amoh M *et al.* 1988. Evidence of cooling during the Younger Dryas in the western North Pacific. *Oceanology Acta* **11**(4): 369~375
- Laj G, Mazaud A, Duplessy J C. 1996. Geomagnetic intensity and ^{14}C abundance in the atmosphere and ocean during the past 50 kyr. *Geophysical Research Letters* **23**: 2045~2048
- Linsley B K, Thunell R C. 1990. The record of deglaciation in the Sulu Sea: Evidence for the Younger Dryas event in the tropical western Pacific. *Paleoceanography* **5**: 1025~1039
- Martinson D G, Pisias N G, Hays J D *et al.* 1987. Age dating and the orbital theory of ice ages: development of a high resolution 0 to 300 000 years chronostratigraphy. *Quaternary Research* **27**: 1~29
- Mayewski P A, Meeker L D. 1997. Twicken M S *et al.* Major features and forcing of high latitude Northern Hemisphere atmospheric circulation using a 110 000-year long glaciochemical series. *Journal of Geophysical Research*, **102**: 26345~26365
- Prell W L. 1985. The stability of low-latitude sea surface temperature: An evaluation of the CLIMAP reconstruction with emphasis on the positive SST anomalies. Rep. TR025, U. S. Dep. of Energy, Washington, D. C.
- Porter S C, An Zhisheng. 1995. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature* **375**: 305~308
- Rasmussen T L, van Weering T C E, Labeyrie L. 1997. Climate instability: ice sheets and ocean dynamics at high northern latitudes during the last glacial period (58~10 ka BP). *Quaternary Science Reviews* **16**: 73~80
- Stuiver M, Reimer P J, Bard E *et al.* 1998. INTCAL98 Radiocarbon age calibration 24 000 ~ 0 cal BP. *Radiocarbon* **40**: 1041~1083
- Stuiver M, Grotes P M, Braziunas T F. 1995. The GISP2 ^{18}O climate record of the past 16 500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Research* **44**: 341~354
- Schulz H, V on Rad U. 1998. Erlenkeuser H. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110 000 years. *Nature* **393**: 54~57
- Thunell R C, Miao Q. 1996. Sea surface temperature of the western equatorial Pacific Ocean during the Younger Dryas. *Quaternary Research* **46**: 72~77
- Tada R, Irino T, Koizumi I. 1999. Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales recorded in late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography* **14**: 236~247
- Wang Lujang, Samthein M, Erlenkeuser H *et al.* 1999. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology* **156**: 245~284

Sedimentary Record of Millennial scale Paleoceanography Evolution since the Last Glaciation in the Okinawa Trough

LI Tiegang¹ CHEN Jinxia^{1,2}

(¹ *Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071*)

(² *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

ZHANG Deyu LIU Zhenxia

(*The First Institute of Oceanography, Qingdao 266003*)

ABSTRACT

Piston cores CSH1 and DGKS9603 used in this study were collected from the Middle Okinawa Trough (31° 13.733' N, 128° 43.471' E, water depth 703m and 28° 08.869' N, 127° 16.238' E, water depth 1100 m, respectively) during a China-France joint survey in the East China Sea. The palynologic assemblages of core CSH1 and planktonic foraminifers investigated in this work provide a direct historical record of paleoclimate oscillations during the last 50 kys. A total of six cooling events were identified based on sporepollen assemblages of core CSH1, these cold events occurred at 4.1 ~ 4.6, 11.7 ~ 13.0, 15.4, 23.2, 29.4 and 47.4 ka respectively. The planktonic foraminiferal $\delta^{18}O$, faunal variations and MAT SST records of core DGKS9603 also show six cooling events during the last 50 kys, unlike core CSH1 these events occurred at 11.7 ~ 13.0, 14.7, 24.3, 28.5, 36.9 and 45.3 ka respectively. The cold events of the two piston cores show good correlation with the coldest stadials of Dansgaard-Oeschger cycles documented from the Greenland GRIP ice cores. $\delta^{18}O$ record corresponding to the youngest five Heinrich events. Our study indicates that cold events (Younger Dryas event and the four Heinrich events H1, H2, H3, H5) shown by different palaeoenvironment investigative methods in different regions from the Okinawa Trough correlated well. Although the true climate teleconnections between the Okinawa Trough and Greenland and the North Atlantic is unclear, millennial to centennial fluctuations in the intensity of the East Asian monsoon circulation induced by climate oscillations in the high latitudes of the North Hemisphere could be the main mechanism.