自然科学基金项目进展专栏

论 文

冲绳海槽 200 ka 的孢粉记录及冰期-间冰期旋回
古环境重建郑卓^{①*}, 黄康有^{①†}, 邓韞^②, 曹玲珑^③, 余少华^①, Jean-Pierre SUC^④, Serge BERNE^⑤,
François GUICHARD^⑥

① 中山大学地球科学系, 广州 510275;

② Paléoenvironnements et Paléobiosphère, Université Claude Bernard-Lyon1, Villeurbanne 69622, France;

③ 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院, 广州 510300;

④ Institut des Sciences de la Terre Paris, Université P. et M. Curie, Paris 75005, France;

⑤ Université de Perpignan Via Domitia, Perpignan 66860, France;

⑥ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette 91191, France

* 联系人, E-mail: eeszzhuo@mail.sysu.edu.cn

† 同等贡献, E-mail: hkangy@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2012-07-05; 接受日期: 2012-11-23; 网络版发表日期: 2013-07-22

国家自然科学基金(批准号: 40772113, 41072128)、中山大学高校基本科研业务费(编号: 101GZD08)和国家海洋局青年基金资助

摘要 本文对冲绳海槽中部 MD982194 钻孔 29.78 m 近 200 ka BP 的岩芯进行了孢粉研究. 结果表明, 孢粉组合主要表现为裸子植物与草本植物花粉之间的交替. 带气囊类的松属、铁杉在间冰期的 1, 3, 5 和 7 氧同位素期显著增高, 而草本则在冰期阶段占优, 两者的含量变化显示出对冰期-间冰期环境变化的敏感响应. 本钻孔发现莎草科花粉在冰期阶段含量大幅度增加, 伴随蒿属、禾本科、菊科、藜科和淡水藻类的显著升高. 它们与轨道尺度的海平面变化呈现十分吻合的负相关关系. 草本花粉总量的周期性变化可以作为该区域海平面变化的替代性指标. 末次盛冰期的海平面下降导致陆地与冲绳海槽的距离大幅缩小, 源于长江的物质随河流进入大陆架后因流速急剧降低发生沉降, 导致上游物质难以被远距离搬运到海槽. 因此, 冰期阶段冲绳海槽的孢粉物质可能主体来自于大陆架前缘的地表植被, 而间冰期带气囊类花粉的比例增大与海岸距离较远和风力搬运物质的比例增加有关. 钻孔的孢粉组分更替与气候变化也有显著的对应关系, 反映出氧同位素 7, 5 和 1 期木本含量高, 并与东亚夏季风增强和降雨量增大有关. 其中 MIS 5.3, MIS 5.1 和 MIS 3.3 段的松属花粉峰值可能与轨道和亚轨道周期的地表太阳辐射和季风增强有密切联系. 研究认为, 盛冰期的东海陆架平原的气温和降雨量都有较明显的下降, 但低海面时期裸露的大陆架平原可能并非由半干旱的地带性草原所覆盖, 而是以疏林草地及密布的隐域性植被(河流补给淡水湖沼和湿地)组成. 海平面变化引起的海岸距离伸缩和源区气候变化对陆源物质通量和孢粉组分更替起到联合制约的作用, 而冲绳海槽冰期-间冰期尺度的海岸线距离变化在孢粉信号中的表现要明显强于陆源区域的气候变化.

关键词

冲绳海槽
孢粉分析
东海陆架
海平面
陆源植被
气候变化

中文引用格式: 郑卓, 黄康有, 邓韞, 等. 冲绳海槽 200 ka 的孢粉记录及冰期-间冰期旋回古环境重建. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1231-1248
英文引用格式: Zheng Z, Huang K Y, Deng Y, et al. A ~200 ka pollen record from Okinawa Trough: Paleoenvironment reconstruction of glacial-interglacial cycles. Science China: Earth Sciences, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4619-0

中国东部陆架是世界上最宽和范围最大的陆架之一, 冲绳海槽位于东海陆架东部边缘, 作为第四纪新生弧后盆地的冲绳海槽, 在冰期和间冰期旋回过程中一直处于水下沉积环境, 因此是东海从第三纪到全新世有连续沉积的唯一地区. 由于冲绳海槽的沉积具有较快的沉积速率和较高的地层年代分辨率, 以其完整的沉积序列保存了丰富的古环境演化和海槽发育历史信息, 近十多年来成为第四纪海洋环境变迁和海平面变化研究的理想对象. 同时, 作为连接中国东部陆地与大陆架和大洋对比研究的关键区域, 一直以来引起第四纪科学研究的广泛关注. 冲绳海槽高分辨率的古环境研究主要开始于 20 世纪 90 年代以来^[1-5], 其中 1996 年中法合作的东海海洋地质调查以及 1998 年 IAGES 计划第四航次在冲绳海槽和东海陆架取得多个钻孔, 为近年来高分辨率的地层学、地球化学、微体古生物和孢粉学等研究提供了良好的材料^[6-8].

冲绳海槽钻孔孢粉分析是判别物质来源和沿岸陆地生态环境的最好方法, 20 世纪 80 年代我国对东海陆架至冲绳海槽开始涉及海洋孢粉研究^[9,10], 但具有高时间分辨率的孢粉序列不多. 近些年陆续有孢粉研究涉及该区域晚更新世以来的孢粉分析工作, 其中在海槽北部地区的研究较多^[6,11,12], 总体揭示出末次冰期孢粉以草本为主, 冰消期以后木本植物花粉快速增加, 并以松属和蕨类为优势种类, 且孢粉物质被认为大部分来自于日本南部. Kawahata 和 Ohshima^[6]还发现少量的热带地区种类如 *Phyllocladus*, 由此认为黑潮在末次冰期并没有向东移出. 对海槽中部 DGKS9602 和北部 PC-1 孔的研究表明末次冰期以来草本植物与松属花粉百分比变化与氧同位素和海平面升降有很好的对应关系^[13,14]. 最近海槽中部 DG9603 钻孔的孢粉结果较高分辨率地揭示了从盛冰期到冰后期的孢粉变化过程^[15], 进一步证明了末次盛冰期东海陆架湿地和草地扩张和全新世乔木花粉快速增加的特点.

前人的钻孔孢粉分析结果为理解陆源物质的来源和沿海及陆架生态环境变迁积累了资料. 然而, 上述沉积物的钻孔长度大部分均小于 10 m, 底部年代不超过 50 ka BP. 本研究取自冲绳海槽中部西侧槽坡的 MD982194 钻孔, 其岩芯长度近 30 m, 底部年龄可达到~200 ka BP, 是目前为止研究冲绳海槽沉积记录最长的序列之一. 该钻孔的孢粉分析结果对探讨

中国东海沿岸地区最后两次冰期-间冰期旋回的植被与气候变化及古海洋环境都具有重要的意义.

1 研究材料及方法

冲绳海槽 MD982194 钻孔是“国际海洋全球变化研究计划(International Marine Global Change Study, IMAGES)第 4 航次 1998 年在冲绳海槽获取的岩芯之一, 位于冲绳海槽西侧槽坡近槽底处(图 1), 钻孔位置距东海大陆架 120 m 等深线最近距离约 50 km, 距 200 m 等深线直线距离仅为 30 km. 钻孔坐标为 127°22'E, 28°07'N, 水深 989 m, 钻孔总长度为 29.78 m. 整条岩芯沉积物主要以均匀的粉砂质粘土为主, 其中间隔有若干次砂质沉积. 对整条岩芯进行了 2 cm 间隔的颜色和体积密度测试^[16]. 整条岩芯按平均间距 20 cm 共取 136 个样用于孢粉分析. 孢粉分析的化学分离采用了氢氟酸和重液提取相结合的方法萃取孢粉, 定量计数采用体积法. 每个样品的平均孢粉统计数量为 270 粒, 除松属以外的孢粉统计数不少于 150 粒, 百分比含量计算中, 对于花粉的百分比含量以花粉总数为基数计算, 而其他种类如蕨类孢子和藻类则以总的孢粉统计数来计算.

该孔的年代框架采用了 AMS¹⁴C 测年和氧同位素地层对比相结合的方法, 两个同位素年代分别为 110 cm 的(11347±41) a BP 和 330 cm 的(22145±81) a BP(中国科学院广州地球化学研究所 AMS¹⁴C 制样, 北京大学测试). 对 AMS¹⁴C 测年数据利用 Calib 软件进行了日历年校正^[17,18], 获得相应的日历年分别为(12799±83)和(26056±142) cal a BP. 对于整体的年代框架, 我们用浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线与 SPECMAP 结果进行了拟合^[19](表 1), 并与 LR04 钻孔的氧同位素曲线进行对比^[20]. 结果表明本钻孔在轨道尺度上能够很好地反映冰期-间冰期旋回, 并清楚地辨识出氧同位素 1~7 期的变化(图 2). 根据钻孔氧同位素的拟合结果获取了 6 个年代控制点, 在控制点之间采用线性内插, 控制点之外则使用线性外插方法. 根据上述年代框架, 底部 29.70 m 的年龄推测值为~19.5 ka BP. 钻孔的沉积速率计算表明, 冰期的 MIS 2 和 MIS 6 沉积速率较高, 分别达到 16 和 22 cm ka⁻¹(图 3). 全新世沉积速率最低, 平均为 8.59 cm ka⁻¹.

图 1 东海海洋环境及 MD982194 钻孔位置

(a) CCC 为沿岸流, YSCC 为黄海冷流, TWC 为台湾暖流, YSWC 为黄海暖流, Kuroshio 为黑潮, TSWC 为对马暖流. (b) 红色星号为钻孔位置, 绿色部分为 -120 m 等深线以上大陆架前缘

图 2 冲绳海槽 MD982194 氧同位素与 SPECMAP 的氧同位素阶段^[19]以及 LR04 的氧同位素曲线对比^[20]

图3 冲绳海槽 MD982194 钻孔深度-年龄框架、沉积速率和沉积物体积密度

表1 MD982194 钻孔的 AMS¹⁴C 测年结果及根据氧同位素年代地层^[19]的控制点

深度(cm)	测年结果与控制点	日历年(cal a BP)
110	AMS ¹⁴ C: (11347±41) a BP	(12799±83)
330	AMS ¹⁴ C: (22145±81) a BP	(26056±142)
670	MIS 3.31	55450
900	MIS 5.1	79250
1230	MIS 5.33	103290
1370	MIS 5.51	122560
2920	MIS 7.0	189600
2930	MIS 7.1	193030

2 孢粉分析结果

本岩芯沉积物中孢粉含量丰富, 136 个样品中共鉴定出陆生木本植物花粉类型(AP)51 种、红树花粉 2 种、草本植物花粉类型(NAP)43 种、水生植物花粉类型 3 种, 以及多种蕨类孢子和淡水藻类(图 4)。岩芯样品中还同时见有海洋生活的沟鞭藻和硅藻。

从钻孔样品孢粉含量来看, 乔木类花粉在间冰期阶段含量较高, 其中最常见花粉为裸子植物的松属(*Pinus*), 含量区间为 10%~61%, 平均值也达到 30%。其他常见的裸子植物花粉有 *Abies*(平均值到最大值为 2.4%~24.8%), *Taxodiaceae*(3.2%~14.2%), *Tsuga*(2.0%~12.6%), *Podocarpus*(1.1%~7.8%), *Cupressaceae*(1.0%~7.9%)和 *Picea*(0.7%~5.2%)等。被子植物乔木种类中, 最常见的为常绿栎类 *Quercus*(E)(1.1%~14.8%), 落叶栎类 *Quercus*(1.8%~10.8%), *Fagus*(0.9%~6.8%), *Castanea-Castanopsis* (0.5%~4.7%),

Ulmus(0.9%~3.2%), *Carpinus*(0.9%~3.4%), *Liquidambar formosana* (0.3%~3.6%), *Juglans* (0.3%~2.3%), *Moraceae* (0.3%~2.0%)和 *Alnus*(0.2%~1.8%)等。热带海岸潮间带红树林也有少量出现, 如 *Rhizophora*, *Sonneratia* 等。

草本植物按照含量多少主要有 *Cyperaceae*(平均值到最大值 18.0%~40.3%), *Poaceae*(3.9%~12.6%), *Artemisia* (3.4%~11.0%), *Compositae*(1.3%~4.9%), *Chenopodiaceae* (1.2%~4.7%), *Typha* (0.4%~2.4%), *Polygonum* (0.2%~1.2%)和 *Plantago*(0.2%~1.2%)等。

蕨类孢子中, 光面单缝孢子含量较高, 平均值到最大值含量为 11.3%~22.6%, 三缝孢子为 4.8%~18.1%。其他蕨类还有 *Pteris*, *Plagiogyria*, *Hymenophyllaceae*, *Hicriopteris* 和 *Lygodium* 等。孢粉鉴定过程中发现了大量的藻类孢囊, 其中最常见的是甲藻类的 *Dinoflagellate*, 其平均含量 3.9%, 最大值可达到 80.7%, 其次为刺球藻(1.9%~9.5%), 此外还有淡水藻类如盘星藻 *Pediastrum*(0.5%~3.2%)和 *Concetricystes* 等其他藻类。

根据花粉分析的结果, 岩芯自下而上可分为 7 个花粉带, 与深海氧同位素 1~7 阶段基本对应, 其中孢粉带 3, 5 和 6 还可进一步划分若干个亚带。自下而上各带的主要特征如下。

孢粉带 7(2960~2840 cm, 相当于 MIS 7 上部)。该带位于钻孔底部, 共有 6 个样品, 本花粉带最主要的特征是高含量的松属花粉(平均 43%)和较低含量的草本植物花粉(平均 14%), 其中莎草科为 7%, 禾本科为 4%, 蒿属 2.7%。阔叶类花粉总体含量较低。蕨类中的三缝孢子较多, 淡水藻类少见, 但海洋类型的沟鞭藻在本阶段下部含量相对丰富。

孢粉带 6(2840~1480 cm, 相当于 MIS 6)。草本植物在本花粉带含量明显增高, 平均含量为 37%, 最高可达 57%。其中仅莎草科平均占花粉总量的 24%。蒿属、藜科、菊科、禾本科等的含量也显著增加, 特别是水生植物花粉出现频率增多。与之相反, 松花粉含量显著减少, 在花粉总量中的平均含量从上一花粉带的 43%减少到 21%。其他裸子植物在花粉组合中的含量变化不明显, 冷杉花粉略有增加。而落叶阔叶类在本带有较明显的增加, 主要是落叶栎类, *Carpinus*, *Juglans*, *Fagus* 和 *Tilia* 等。亚热带树种的百分含量与上一花粉带相比没明显变化。蕨类孢子中单缝类增多, 三缝类相应减少。淡水中生长的环纹

图 4 冲绳海槽 DM98219 钻孔孢粉百分比图式

藻、盘星藻和光面球型藻在本阶段含量增加, 而海洋的沟鞭藻类含量大为减少. 该带可进一步分为 2 个亚带, 下部亚带(2770~2000 cm)松属花粉最低, 平均含量仅为 13%, 而上部亚带(2000~1480 cm)松属花粉平均为 20%.

孢粉带 5(1480~840 cm, MIS 5). 与上一花粉带相比, 孢粉组合在本带发生了明显的变化. 裸子植物花粉除罗汉松属外均有大量增加, 松属花粉在本带的平均含量大幅增加到 47%, 最高达 61%. 其他带气囊类花粉如云杉、冷杉、铁杉的含量与上一阶段相比也相应增加. 整个孢粉带均有增加的是亚热带山地植物铁杉属, 而其他裸子植物如 *Pinus*, *Abies*, *Picea* *Cupressaceae*, *Taxodiaceae* 等在 5b 亚带(1200~920 cm)达到整个钻孔的最高值. 落叶阔叶类树种一些花粉类型如 *Quercus*, *Carpinus* 和 *Juglans* 等呈现下降的趋势, 特别在 5b 和 5a 带下降最明显. 草本和水生植物花粉和淡水藻类等的百分含量在本带也有明显下降, 其中草本植物的莎草科的平均含量由原来的 37%降低到 7%左右. 蕨类孢子的三逢孢子类在 5c 带含量达到最高值, 而单逢孢子类则相对减少. 海洋藻类沟鞭藻是在整条岩芯中含量最高的时段, 平均含量为 12%左右, 而在 5b 带可达到 20%, 其种类以 *Spiniferites* 为主.

孢粉带 4(840~700 cm, MIS 4). 本带在岩芯中所占厚度不大, 孢粉组合主要以松属及其他裸子植物和沟鞭藻的突然减少为特征, 同时, *Quercus*, *Fagus*, *Castanea* 和 *Ulmus* 等温带落叶树种和 *Artemisia*, *Cyperaceae* 为主的草本相应增加, 单逢孢子类在本带达到最高值(平均 13%).

孢粉带 3(700~300 cm, MIS 3). 该带的最主要特征是松属花粉含量在 3b 带有明显增加, 然后逐渐回落的过程. 阔叶类的 *Quercus* 呈现增长的趋势, 但其他阔叶类没有明显的变化. 草本花粉中, 莎草科表现为逐渐升高的趋势, 并在上部的 3a 带含量较高, 伴随增加的还有一些淡水藻类如盘星藻等, 而其他旱地草本变化较小.

孢粉带 2(300~120 cm, MIS 2). 本花粉带与上一带相比花粉组合变化较大, 其中松属的百分含量呈明显下降, 平均为 14%. 呈较明显减少趋势的还有柏科和部分阔叶类型如 *Carpinus* 和 *Fagus* 等. 相反, 裸子植物罗汉松属的含量则略有增加. 本阶段草本植

物仍以莎草科的高含量为主要特征, 平均含量约为 30%. 而最突出的是 *Artemisia*, *Chenopodiaceae* 明显上升, 并达到本岩芯中的最大值. 环纹藻、盘星藻的含量十分常见, 但含量起伏较大. 沟鞭藻含量明显降低.

孢粉带 1(120~0 cm, MIS 1). 裸子植物的 *Pinus*, *Tsuga* 和 *Cupressaceae* 等含量再次明显增加, 同时 *Alnus*, *Corylus*, *Carpinus*, *Fagus* 和 *Quercus* 等阔叶树种的含量也相对增加. 相反, 草本植物显著减少, 其中 *Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Compositae* 和 *Cyperaceae* 的含量显著减少. 蕨类的三逢孢子含量略高, 而淡水藻类如环纹藻和盘星藻几乎绝迹, 相反沟鞭藻则明显增加.

3 讨论

近 30 m 岩芯的孢粉组合清楚地揭示了 200 ka 以来冰期与间冰期的交替变化, 主要表现为裸子植物与草本植物花粉之间的交替. 带气囊类的松属、铁杉在间冰期的 1, 3, 5 和 7 氧同位素期显著增高, 且常与高含量的海洋甲藻类沟鞭藻同步变化. 而草本则在冰期阶段占优, 特别是莎草科、蒿属和藜科, 同时伴随较丰富的水生植物花粉和淡水藻类如盘星藻等. 然而, 阔叶类植物花粉在整个剖面上总体变化幅度较小. 本钻孔孢粉鉴定的种类组成与中国东部中北亚热带至温带地区植被中的建群种基本一致. 因此, 该钻孔的孢粉沉积物源总体上可能主要来自于中国东部地区, 但由于冰期与间冰期海平面升降导致海岸线大幅变化, 因此陆源孢粉的来源区也应有较大的变化.

3.1 不同孢粉类型在时间序列上的变化特征

3.1.1 裸子植物花粉

裸子植物中的带气囊类花粉含量表现出与冰期-间冰期大致同步变化, 尤其是 *Pinus*, *Tsuga* 和 *Abies* 的同步消长最为明显. 其中 *Pinus* 在冰期的平均含量约为 14%~20%, 而在间冰期则上升至 43%~47%. 与松属花粉变化最相似的是 *Tsuga*, 该花粉在冰期平均含量约为~1%, 而在氧同位素 1 和 5 期增加 4 倍至 4%左右. *Abies* 花粉也存在类似的变化, 但主要在 5 期的 5b 孢粉带有最明显的增加(图 5). *Picea* 虽然在 5 期也有所增加, 但在全新世含量很低, 规律性相对不明显.

图 5 裸子植物花粉、海水藻类以及氧同位素曲线的对比图
图内显示带气囊类花粉含量增加与间冰期海平面上升具有密切的相关性

南亚热带和热带分布的 *Podocarpus* 和 *Dacrydium* 等虽然也是带气囊花粉, 但它们的含量变化与 *Pinus* 并不相似. *Podocarpus* 仅在末次冰期阶段(氧同位素 2 期为主)含量明显增加, 间冰期反而降低.

上述裸子植物花粉的含量变化究竟是轨道周期性气候对陆地植被的直接影响, 还是受到海平面变化引发的陆源区距离改变所致? 有研究表明松属花粉随着离岸距离的增加, 其相对比例也随之升高^[13,21], 水体中的松花粉沉降速率经研究并不低于草本类花粉^[22], 因此可以认为松属和铁杉属花粉在间冰期阶段的百分比增高很大可能性与风力传播有关. 也就是说, 间冰期海面上升, 海槽的离岸距离增大, 陆源孢粉由陆地径流带来的数量大为减少, 而空气传播而来的孢粉比例增大. 表土中的松属花粉在整个亚洲东部含量均较高^[23], 分布范围与大于 600 mm 降雨量地理区间基本吻合. 松属花粉的开花期多在 3~4 月, 冬季风在 3 月依然强盛, 因此吹向海洋的干冷空气携带大量松属花粉, 从而使间冰期远离陆地的冲绳海槽松属花粉比例增高. 铁杉花期一般在 4 月, 这一时期处于冬-夏季风的转换时段, 大部分时间风向仍从大陆吹向海洋, 因此铁杉花粉在间冰期的相对高比例也很可能是风力搬运的结果. 铁杉为我国中亚热带地区特有的第三纪残遗树种, 植株高大, 在冲绳海槽东部的中国大陆台湾岛以及日本列岛均有分布. 铁杉属在中国大陆间断分布于西南山区(横断山区和部分东喜马拉雅)、中部山区(秦岭-大巴山区)和东南山区^[24]. 其中, 南方铁杉(*Tsuga chinensis*)是中亚热带中山山地针叶林及针阔混交林中的优势种, 而长苞铁杉(*T. longibracteata*)广泛分布于华南山地. 可见, 铁杉花粉的间冰期相对含量增加可以大致追溯其来源地主要为亚洲东部的亚热带山地, 包括中国东部(秦岭以南为主)、中国台湾、日本南部等地. 然而, 罗汉松、陆均松等热带花粉并没有在间冰期比例升高, 其原因可能与它们的地理分布和花期有关, 这些南亚热带和热带树种主要分布在华南南部及东南亚, 花期通常在 5 月, 这一时期大气湿度大, 空气中含花粉数量较少; 另一方面, 5 月以后进入夏季风盛行季节, 风向基本是由东部的海洋吹向陆地, 加上热带地区距离冲绳海槽较远, 远距离空气搬运的数量有限.

3.1.2 阔叶类植物花粉

阔叶类花粉中最常见的包括 *Quercus*, *Carpinus*,

Juglans, *Fagus*, *Ulmus* 和 *Castanea* 等. 总的阔叶类花粉含量在 5%~25%变化, 在 MIS 5 期的中部(孢粉带 5b)降到最低. 但大部分阔叶类型的花粉变化幅度不大. 北亚热带-温带落叶类型的 *Carpinus*, *Juglans*, *Fagus* 和 *Ulmus* 等在冰期阶段稍高, 特别是氧同位素 6 期的下部(孢粉带 6b). 壳斗科的重要建群树种 *Quercus*(常绿和落叶类型)在 MIS 4 期以来逐渐升高, 在全新世达到最大值. 总体上看, 冲绳海槽的阔叶类花粉组成以北亚热带-暖温带的种类为主, 少量常绿组分. 与中国东部现代植被和表土花粉分布对比, 与长江流域中山和长江以北山地的植被面貌相似. 实际上, 常绿与落叶阔叶混交林在中国东部的分布范围很广, 同时在日本南部也有分布, 因此无论在冰期和间冰期, 阔叶类花粉的变化都不十分明显. 亚热带和温带阔叶类花粉综合曲线表明, 亚热带常绿阔叶类型在 10%左右波动, 没有明显的变化规律. 而温带落叶阔叶类则在 25%上下波动, 大于 25%较高值的出现时间主要在间冰期的 MIS 1 期和 5 期(孢粉带 5b). 如果将 *Pinus* 花粉加入亚热带组分, 则曲线变化与氧同位素比较接近, 但松属花粉的来源不仅局限在亚热带, 而且该类花粉的含量变化与传播介质和传播距离改变关系更大, 而与植被的气候响应关系较小.

3.1.3 草本植物花粉

在岩芯 MD982194 中, 当以松属花粉为主的乔木花粉含量降低时, 相应地有多种草本花粉显著增加. 研究发现, 本钻孔草本植物花粉含量对氧同位素反映的冰期-间冰期环境变化有十分敏感的响应. 可以认为, 冲绳海槽的草本花粉是最好的古环境替代性指标之一. 根据花粉百分比统计, 所有非乔木类花粉总和在冰期与间冰期之间的变化幅度约为 10%~40%, 其中莎草科花粉在冰期阶段明显增加, 幅度从~5%增加至 25%~30%左右. 其他同步升降的草本花粉还有 *Artemisia*, *Poaceae*, *Compositae* 和 *Chenopodiaceae* 等(图 6). 其中, 末次盛冰期(孢粉带 2)*Artemisia* 的增加较明显, 其间冰期平均含量 1%~2%, 冰期~5%, 末次盛冰期~10%. 值得注意的是, 水生植物花粉和部分淡水藻类孢囊在冰期阶段与草本植物同步增长, 比较突出的有盘星藻、光面藻类、蓼科、眼子菜属等. 冰期阶段(MIS 2~4 和 MIS 6)草本植物和湿生与水生植物含量的显著增加证明了大陆架大面积草地和湿地的存在.

图 6 部分草本、蕨类和陆地淡水藻类的孢粉图式

图内示意草本和淡水藻类等的增加与冰期阶段海平面下降和陆架出露有关

莎草科为多年生或一年生草本, 主要生长在较湿润的低洼地、沼泽或水域附近, 在高山草甸也有较广泛的分布. 东海现代表层花粉中, 莎草科的平均相对含量只占约 1.5%^[25]. 莎草科花粉通常搬运距离较短, 该花粉在本钻孔的大量出现表明了冰期阶段随着海平面的下降, 在裸露的陆架上形成大面积冲积平原草地和沼泽湿地. 因此莎草科花粉在孢粉组合中大量出现的唯一合理的解释是其花粉来源于海面下降后出露的陆架. 样品中发现的淡水藻类也证明了淡水水体的广泛存在. 前人的研究表明, 冰期过程表现为以蒿属花粉增长为主要特征, 其次有禾本科、藜科和莎草科^[15]. 由于钻孔位置在冰期阶段已很接近海岸线, 因此网状河口区海岸的陆源携带物在不同的位置会有很大的差异. 冲绳海槽之所以在冰期阶段草本植物花粉大量增加与大陆架的出露, 以及大陆架出露后的植被组成有密切联系.

3.2 孢粉组合反映的气候与海平面变化

3.2.1 孢粉组合反映的海平面变化

由于冲绳海槽西侧东海陆架的 130 m 等深线距离现代海岸线接近 400 km, 在冰期与间冰期交替过程中, 海岸线和物质来源发生了巨大的变化. 因此, 冲绳海槽的沉积孢粉在解释陆地植被和气候变化时, 需要首先分析冰期与间冰期主体沉积物的源区变化和搬运途径. 换句话说, 孢粉记录的气候变化信号来自于哪里? 冰期和间冰期转换过程中, 孢粉反映的植被和气候来源地是否发生了根本性变化?

要解决上述问题, 首先要深入理解冰期与间冰期的海平面波动和岸线移动幅度, 以及按时间序列的孢粉搬运距离变化. 邻近钻孔 DGKS9603 利用元素地球化学对陆源物质沉积通量进行了估计^[26], 认为在冰期-间冰期时间尺度上, 海平面升降导致的陆地与海槽之间距离的大幅度伸缩是制约陆源物质通量变化的主要因素. 盛冰期海平面的降低和东亚冬季风的增强均可导致陆源物质通量的增加. 对冲绳海槽南部(E017孔)沉积物的地球化学研究表明, 全新世沉积速率低, 而末次冰消期沉积速率较高, 且陆源碎屑组分 SiO_2 , Al_2O_3 和 K_2O 等相对较高, 海洋生源组分 CaO 和 Sr 的含量则相对较低^[27]. 可见, 冰期过程的海平面下降导致陆地与海槽的距离大幅缩小, 陆源物质通量明显增加. 在末次盛冰期最低海平面

阶段, 源于长江途径数百公里整个裸露大陆架到达冲绳海槽的陆源物质中, 绝大部分来自于大陆架地表的植被, 由于裸露的大陆架可能成为长江的巨大冲积平原, 因此低平的洼地大量发育草地和沼泽湿地, 使沉积物的陆源草本植物花粉增多(图 7).

相反, 在间冰期的高海面期间, 陆地河流搬运物质从河口进入海域后, 长距离穿过整个东海陆架到达冲绳海槽的孢粉个体数量极其微小. 事实上, 东海复杂的洋流系统和季节转换使长江携带的陆源孢粉难以直接被搬运到海槽区域. 有研究表明, 中晚全新世淤泥物质 80% 沉积在内陆架, 其中大部分在河口及水下三角洲沉积, 另有一部分(约 32%)在沿岸流的搬运下向南部沿岸的浙江-福建沉积区堆积^[28]. 对 DGKS9603 钻孔的细粒沉积物元素分析表明, 末次冰期距今 41.0~11.2 ka BP 以陆源沉积作用为主, 而全新世以来则以海洋生物源沉积作用为主^[29]. 因此, 间冰期高海面引起的搬运距离增大导致绝大部分河流带入的陆源物质和孢粉在河口及大陆架沿岸带沉降, 只有少量孢粉能够随水流飘过整个东海陆架到达冲绳海槽. 虽然大气沉降通量在河口地区与河流携带入海的物质通量相比显得微不足道, 但在高海面时期远离河口区的冲绳海槽, 风力搬运有可能是最主要的孢粉输送介质, 而带气囊类的松科花粉是公认空气搬运能力较强的类型, 每年 3~4 月开花季节随着冬季风飘散的松科花粉成为离岸距离较远的海洋沉积中的主要种类. 松属花粉在 MD982194 中相对含量较高的时段分别为 MIS 1, MIS 3.3, MIS 5 和 MIS 7, 显示出与相对高海面密切相关. 相反, 盛冰期阶段虽然冬季风强盛, 但由于海平面降低使岸线东移数百公里, 且十分靠近冲绳海槽, 陆地水流携带的花粉通量此时远大于风力传播的数量(图 7). 相似的孢粉沉积搬运模式在南海北部也同样见到^[21].

另一方面, MD982194 钻孔在低海面时期草本植物花粉和陆地淡水藻类大幅增加, 指示了大陆架裸露时期主要由草地和湿地植被所覆盖. 钻孔孢粉记录中特别显示出莎草科花粉的急剧增加, 并伴随湿生和水生植物(香蒲属等)、淡水藻类(如盘星藻等)和其他陆生草本的增加, 同时, 陆源植物粗碎屑和大颗粒碳屑也相应大量出现(图 8). 部分样品的扫描电镜观察, 还发现了湿生水松花粉. 这些都证明了冰期阶段在裸露的大陆架前沿为巨大的冲积平原, 其中有广泛分布的网状河道和湖泊、沼泽湿地, 并存在巨大

图 7 冲绳海槽钻孔揭示的冰期与间冰期海岸线距离变化示意图, 示陆源孢粉源区变化和搬运模式

(a) 间冰期的陆地-海洋沉积环境; (b) 冰期的陆地-海洋沉积环境

的海岸平原湿地生态系统。地球物理研究表明, 低海面期陆架古河槽坡度低于万分之一, 河势不稳, 易于形成游荡性大型河道系统, 有研究认为, 长江口外中上部陆架可能存在 6 条主要的大型古河道系统, 应该是末次冰期古长江的主要流路^[30]。冲绳海槽中部其他钻孔如 DGKS9602 和 DGKS9603 岩芯的孢粉分析结果也发现末次盛冰期草本增加^[15,22], 但主要是 *Artemisia* 较多, 说明当时的海岸带因网状河流系统的复杂分布, 导致林地、草地和湿地分布不均匀, 且近距离搬运可导致草本成分具有不稳定的局部变化。

本研究表明, 草本植物的总含量与海平面变化^[31,32]总体呈现负相关, 两者的相关拟合程度十分高(图 9)。类似的结果在南海也有体现^[21,33], 带气囊

的松属花粉与草本的比值被用于指示海侵-海退过程的海岸线距离变化。因此, 在冲绳海槽中部, 草本植物花粉的含量变化以及松属与草本的比值同样可以作为海岸线距离或海平面变化的替代性指标。

需要指出的是, 草本和气囊类植物花粉含量对岸线距离和海平面变化的指示作用仅对宽广大陆架区域和具备陆地大型河流注入的地区才有效, 流经大陆山区的大型河流注入可导致陆架平原面网状淡水水系发达, 频繁的大型河流洪水泛滥可导致平缓的陆架上乔木幼苗难以发育成林。如东海陆架的长江与黄河注入, 以及南海北部的珠江等河流注入都具备上述条件。对于狭窄或无大陆架延伸的海域如日本东部和菲律宾东部等, 或无大型水系注入的平

图 8 冰期阶段近源搬运的主要花粉类型及丰富的植物碎屑和碳屑的显微照片及扫描照片

1-Asteraceae(220 cm); 2-Typha(480 cm); 3-Chenopodiaceae(2080 cm); 4-Poaceae(220 cm); 5-Cyperaceae(530 cm); 6-Cryptomeria(300 cm); 7-Glyptostrobus(300 cm); 8-Phaeoceros(380 cm); 9-Ainsilaea type(300 cm); 10-Pediastrum(460 cm); 11-Cyperaceae(SEM 480 cm); 12-Glyptostrobus(SEM, 310 cm); 13-Poaceae(SEM, 310 cm); 14-Glyptostrobus(表面颗粒纹饰 SEM×25000, 310 cm); 15-碳屑和植物碎屑(×400, 300 cm); 16-碳屑和植物碎屑(×100, 480 cm)

缓陆架区^[34], 冰期低海面过程的孢粉组合可能并不存在高含量的草本花粉特征^[35-37]. 因此, 冲绳海槽和南海北部的离岸距离替代性指标并非在所有海区都适用.

3.2.2 孢粉组合反映的气候变化与季风过程

为了获取孢粉组合反映的气候变化, 本研究将花粉种类划分出亚热带类型(以常绿为主)和温带类型(以落叶阔叶为主), 在草本中分出陆生旱地草本类

型. 从乔木类型的亚热带常绿植物花粉来看, 总含量一般不超过 15%, 其变化规律与气候冷暖没有明显的对应关系, 反而在冰期阶段含量略高, 尤其是末次盛冰期的含量相对较高. 温带阔叶类型也同样没有明显规律, 最低含量位于 MIS 6.2 期, 最高含量在全新世. 相反, 草本总量和陆生草本的高含量与冷期有明显的对应, 特别是早生草本高于 5% 的时间段分布于 MIS 2, MIS 4 和 MIS 6 期, 草本总含量也有类似的情况, 可见与干冷时期的气候关系密切. 特别是在

图9 草本、带气囊类花粉以及陆源淡水藻类和海洋藻类的含量变化及其与海平面变化曲线^[32]的对比图

图内显示草本花粉含量与海平面变化密切相关

MIS 2期(孢粉带 2)蒿属花粉达到最大值, 应与季风减弱和气候冷干有关. 相反, 松属花粉可以间接作为温暖气候的指标, 大于 25%的峰值出现在 MIS 1, MIS 3.3, MIS 5 和 MIS 7.

在冰期阶段, 特别是盛冰期, 北方寒温带的针叶类植物如云杉、落叶松和桦木科阔叶类并没有明显的增加. 而生长在裸露的大陆架草本植物花粉含量显著增高. 其原因可能是海平面和气候变化双重因素所决定的. 如冲绳海槽在盛冰期尽管陆源物质通量明显增加, 但是长江运输的山地陆源物质仍然难以到达冲绳海槽^[26], 这是因为长江流入裸露的大陆架后, 地势急剧变缓, 流速减低和流水面积扩大, 导致大量运输物质在到达冲绳海槽之前已经发生沉降, 能够在平缓的出露大陆架长途搬运数百公里到达冲绳海槽的山地物质数量极少. 因此山地寒冷气候的针阔叶花粉在花粉谱中没有显著增加, 反而因搬运距离增大导致长江中上游山地花粉到达冲绳海槽的比例显著降低. 另外, 盛冰期时长江源区气候变冷, 季风减弱和降雨量减少, 导致长江水流输运量减小. 因此, 冲绳海槽虽然在冰期阶段陆源物质通量大幅增加, 但其“陆源”主要来自于东海和黄海大陆架, 由

于冰期大陆架上广泛发育草地和湿地沼泽, 草本花粉的增多也就成为了冰期阶段的主要特征. 上述变化模式体现了海平面升降和源区气候对陆源物质通量和孢粉组分更替的联合制约作用(图 7 和 9).

华南地区的洞穴石笋研究表明, 石笋的氧同位素明显受到太阳辐射和夏季风强弱变化的控制^[38-40], 亚洲季风的变化应是影响中国南部石笋氧同位素在冰期/间冰期或冰段/间冰段的尺度上变化的主导因素, 并可能与 ITCZ 南北移动有关^[41]. 本研究的孢粉结果显示, 整个组合的复杂变化除了受到海平面变化过程(冰盖消长)的影响外, 还受到诸如太阳辐射和季风变化的多重影响. MD982194 的孢粉变化规律总体与冰期/间冰期有良好的对应, 而部分冰段与石笋和太阳辐射可以对比. 草本植物花粉的变化与冰川和海平面变化引起的气候冷暖和干湿变化关系较密切, 与冰期和间冰期有很好的对应关系, 反映出东亚夏季风在氧同位素 MIS 7, MIS 5 和 MIS 1 明显增强, 降雨量增大. MIS 3 的中段还反映出相对湿润的气候特征. 而乔木花粉除了对冰期-间冰期的响应以外, 还部分叠加了太阳辐射的影响, 如 MIS 6.2 期的亚热带和阔叶类花粉的降低与石笋氧同位素的大幅变化相

图 10 典型孢粉及生态群与洞穴石笋氧同位素和太阳辐射周期的对比

冰芯 CO₂ 据参考文献[44]; 石笋氧同位素据参考文献[40]

对应; 此外 MIS 5.3, MIS 5.1 和 MIS 3.3(孢粉带 3b) 期松属花粉的峰值均发生在间冰期或亚间冰期内的冰段变化, 与地表太阳辐射周期和季风强弱有密切的相关性. 孢粉结果存在轨道或亚轨道的周期变化在大西洋和西南太平洋都有显示^[42,43], 对南海北部的孢粉研究也发现了明显的轨道周期及低纬度驱动的半岁差周期(图 10)^[21].

深海孢粉组合反映的盛冰期植被变化在解释上过去存在一些争议, 最根本的问题是: 盛冰期低海面时期陆架平原地区草地面积明显扩大的事实是否意味着该时期地带性草原从西部一直扩张到长江流域以致整个东部大陆架? 在南海南北陆坡末次冰盛期沉积物的孢粉数据也证明, 末次冰盛期低海面时出露的北部大陆架曾覆盖着以蒿属和禾本科为主的草地生态系统, 同时也有沼泽及湿地分布^[45]. 根据冲绳海槽的孢粉分析结果, 东海陆架上在末次冰盛期草地中的陆生植物也是以蒿属为主. 因此, 是否相应的地带性植被类型应属于或接近温带草原? 由于我国温带草原的气候特征属于半干旱类型, 年降雨量约为 200~450 mm, 因此如果末次冰期裸露的东海大陆架植被属于这一类型的话, 意味着冰期时东海陆架的降雨量小于 450 mm, 而往西的整个华中地区的降雨量更低, 甚至达到荒漠的自然条件. 事实上,

MD982194 钻孔的研究表明, 冲绳海槽在冰期阶段并非简单地都由陆生草本植物占优, 沼泽湿地植物如莎草科, 以及大量的生活在湖沼环境的淡水藻类如盘星藻等也十分常见, 南海北部陆架也存在相似的情况^[33]. 此外, 一些代表荒漠条件的典型花粉极少见, 如麻黄属(*Ephedra*)、怪柳属(*Tamarix*)等. 因此可以推论, 低海面时期裸露的数百公里大陆架平原并非由地带性温带草原所覆盖, 而是以洪水泛滥平原草地和隐域性植被(湖沼等)的植被覆盖为主, 同时还有稀疏亚热带-温带林木的分布. 上述草地-湿地植被的出现除了与夏季风和降雨减弱以外, 更与平坦宽阔的大陆架平原上大型网状河流的淡水持续注入与频繁的洪水泛滥有关.

冰期阶段草本的高含量证明, 大陆架上盛冰期阶段草地发育, 降雨量因海岸距离增大和季风减弱有明显降低, 但可能达不到地带性草原的干旱条件. 中国东部沿海地区盛冰期降雨量的降低在 RegCM2 对 LGM 的模拟结果也得到相似的结果^[46]. 模拟结果显示, 降雨量因夏季风减弱在中国东部和东海地区降低幅度最大, 但我国西部则降雨变化较小(图 11)(据参考文献[46]修改). 由于我国目前东部沿海的降雨量分布约为 800~1400 mm, 东海海域平均约为 1200 mm, 因而尽管冰期的降雨量减少 50%, 也尚未

图 11 中国东部及其相邻海域根据 RegCM2 模拟的 LGM 年平均降雨量相对于现代值的距平(mm/day)

达到地带性草原气候的环境。温度的估算由于山地乔木花粉含量很低,难以采用森林植被带的变化来进行重建。根据郑卓等^[47]的现代亚洲东部草本比值模型,蒿属与禾本科花粉的比例随纬度发生变化,~30°N 以北,蒿属含量大于禾本科,~30°N 以南则禾本科大于蒿属花粉。冲绳海槽 MD982194 的蒿属花粉与禾本科的比值在 LGM 明显增高,意味着盛冰期温度显著下降导致草地类型向南移动,邻近的 DGKS9602 钻孔根据草本花粉比值估算的 LGM 时期的温度比现今下降 8°C 左右^[22],这一结果与模拟的盛冰期中国东部地区降温幅度是一致的^[46]。可见,孢粉分析用草本指示的气候变化幅度是基本合理的。

4 结论

冲绳海槽中部 MD982194 岩芯的孢粉分析结果共鉴定出陆生木本植物 51 种、红树 2 种、草本植物 43 种、水生植物 3 种,以及多种蕨类孢子和淡水藻类。岩芯样品中还同时见有海洋生活的沟鞭藻和硅藻。孢粉研究表明,近 200 ka BP 以来冰期-间冰期的交替变化在孢粉谱中有很好的体现,主要表现为裸子植物带气囊类花粉与草本植物花粉之间的交替。带气囊类的松属、铁杉在间冰期的 1, 3, 5 和 7 氧同位素期显著增高,变化幅度约为 15%~50%,且常与高含量的海洋甲藻类沟鞭藻同步变化。可以认为松属和铁杉属花粉在间冰期阶段的比例增高与风力传播有关,即由于间冰期冲绳海槽的离岸距离增大数百公里,使陆地径流入海的陆源孢粉通过整个东海水域带入冲绳海槽的数量大为减少,导致空气传播而来的孢粉比例相应增大。而草本花粉在冰期阶段的明显优势表明,其含量对冰期-间冰期的周期性变化十分敏感。其中,本钻孔莎草科花粉在冰期阶段含量较高,与其同步变化的草本花粉还有蒿属、禾本科、菊科和藜科等。伴随草本增加的还有水生植物花粉和淡水藻类如盘星藻等。

然而,阔叶类植物花粉在整个剖面上总体变化幅度较小,与冰期-间冰期的波动没有明显的对应关系。本钻孔孢粉鉴定的种类组成与中国东部中北亚热带至温带地区植被中的建群种基本一致。因此,该钻孔的孢粉沉积物源总体上可能主要来自于中国东部地区,但由于冰期与间冰期海平面升降导致海岸线大幅变化,因此海槽孢粉的来源区和孢粉输运介

质在此过程中也发生了根本的变化。可见,利用花粉来重建陆缘区的古植被和古气候时需要了解冰期与间冰期交替过程中物源地点的巨大变化。

距今 200 ka 以来的冰期阶段,海平面下降导致陆地与冲绳海槽的距离大幅缩小,近距离搬运的陆源物质通量明显增加。在末次盛冰期最低海平面阶段,源于长江的陆源物质,由于进入数百公里的裸露大陆架后河流流速急剧降低,大部分物质快速发生沉降,从而难以直接到达冲绳海槽。因此,在冲绳海槽冰期阶段的陆源物质中,绝大部分可能来自于大陆架前缘的地表植被。而盛冰期裸露的大陆架可能沦为长江的巨大冲积平原,其中分布有广泛的湖泊和隐性沼泽湿地,形成巨大的网状河口海岸湿地生态系统。

草本植物花粉含量或松/草本的比值与轨道尺度的海平面变化呈现十分吻合的相关关系,可以作为海平面变化的替代性指标。但草本植物花粉含量增加与海平面降低相关性的环境指示作用仅对那些具有宽广大陆架和有可能成为大型河流的古冲积平原的地区有效,对于狭窄或无大陆架延伸的区域如日本东部和菲律宾等海域,冰期低海面过程的孢粉组合并没有高含量的草本花粉特征。因此,该海平面替代性指标并非在所有海区都适用。

我国东部末次盛冰期低海面阶段草地面积明显扩大的事实表明中国东部沿海气候显著变干,RegCM2 模拟的 LGM 年平均降雨量也有类似的结果。但本研究认为冰期的干旱化并未达到地带性草原的气候条件。即地带性草原并没有从西部一直扩张到长江流域以致整个东部大陆架。由于草本类花粉总量在冰期与间冰期之间的变化幅度约为 10%~40%,因此即便在冰期阶段尚有超过 50% 的木本植物花粉,反映了冰期低海面时期裸露的几百公里大陆架除了低平的泛滥平原上广泛发育草地和湿地以外,在丘陵地仍大片生长茂密的林木群丛。

孢粉的变化规律总体与轨道尺度冰川体积和海平面变化引起的环境变化关系密切,乔木花粉除了对冰期-间冰期的响应以外,还部分叠加了太阳辐射的影响,如 MIS 6.2 期的亚热带和阔叶类花粉的降低与石笋氧同位素的大幅变化相对应;此外 MIS 5.3, MIS 5.1 和 MIS 3.3 期松属花粉峰值的变化与太阳辐射周期和季风强弱有密切的相关性。这些变化模式

体现了海岸距离伸缩和源区气候变化对陆源物质通量和孢粉组分更替的联合制约作用, 其中, 海平面升

降导致物源区变化及其搬运距离和搬运方式的改变可能是导致孢粉组分和含量变化的最主要因素。

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- 1 Sawada K, Handa N. Variability of the path of the Kuroshio ocean current over the past 25000 years. *Nature*, 1998, 392: 592–595
- 2 Ujiié H, Hatakeyama Y, Gu X X, et al. Upward decrease of organic C/N ratios in the Okinawa Trough cores: Proxy for tracing the post-glacial retreat of the continental shore line. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2001, 165: 129–140
- 3 Kawahata H, Ohshima H. Small latitudinal shift in the Kuroshio extension during the glacial times evidenced by pollen transportation. *Quat Sci Rev*, 2002, 21: 1705–1717
- 4 李铁刚, 向荣, 孙荣涛, 等. 冲绳海槽中南部 18 ka 以来的底栖有孔虫与底层水演化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34: 163–170
- 5 Zhou H, Li T, Jia G, et al. Sea surface temperature reconstruction for the middle Okinawa Trough during the last glacial-interglacial cycle using C_{37} unsaturated alkenones. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2007, 246: 440–453
- 6 Kawahata H, Ohshima H. Vegetation and environmental record in the northern East China Sea during the late Pleistocene. *Glob Planet Change*, 2004, 41: 251–273
- 7 Chang Y P, Wang W L, Chen M T. The last 100000 years' palaeoenvironmental changes inferred from the diatom assemblages of core MD012404 from the Okinawa Trough, East China Sea. *J Quat Sci*, 2009, 24: 890–901
- 8 Yu H, Liu Z X, Berné S, et al. Variations in temperature and salinity of the surface water above the middle Okinawa Trough during the past 37 kyr. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2009, 281: 154–164
- 9 王开发, 孙煜华. 冲绳海槽沉积的孢粉、藻类组合. *海洋与湖沼*, 1982, 13: 440–450
- 10 王开发, 孙煜华, 张玉兰, 等. 东海沉积孢粉藻类组合. 北京: 海洋出版社, 1987. 1–139
- 11 宋长青, 孙湘君, Saito Y. 冲绳海槽 B-3GC 钻孔柱状样花粉记录的古环境信息. *科学通报*, 2001, 46: 153–157
- 12 陈金霞, 张德玉, 张文卿, 等. 末次冰期以来冲绳海槽北部古气候变化的孢粉记录. *海洋学报*, 2006, 28: 25–90
- 13 邓韞, 郑卓, Suc J P, 等. 冲绳海槽末次盛冰期孢粉组合的古环境指示意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 2005, 30: 597–603
- 14 徐红艳, 常凤鸣, 罗运利, 等. 冲绳海槽北部 PC-1 岩芯 24 ka BP 以来孢粉记录的古环境信息. *科学通报*, 2009, 54: 3117–3126
- 15 Xu D K, Lu H Y, Wu N Q, et al. 30000-Year vegetation and climate change around the East China Sea shelf inferred from a high-resolution pollen record. *Quat Int*, 2010, 227: 53–60
- 16 Bassinot F C, Michel E. Physical properties of sediment core MD98-2194. *PANGAEA*, 2001, doi: 10.1594/Pangaea.59633
- 17 Stuiver M, Reimer P J. Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 1993, 35: 215
- 18 Stuiver M, Reimer P J, Bard E, et al. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24000–0 cal BP. *Radiocarbon*, 1998, 40: 1041–1083
- 19 Martinson D, Pisias N, Hays J D. Age dating and orbital theory of the ice ages: Development of a high resolution 0–300000 years chronostratigraphy. *Quat Res*, 1987, 27: 1–29
- 20 Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography*, 2005, 20, PA1003
- 21 Sun X J, Luo Y L, Huang F, et al. Deep-sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of East Asian monsoon. *Mar Geol*, 2003, 201: 97–118
- 22 Zheng Z, Yang S X, Deng Y, et al. 2011 Pollen record of the past 60 ka BP in the Middle Okinawa Trough: Terrestrial provenance and reconstruction of the paleoenvironment. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2011, 307: 285–300
- 23 郑卓, 黄康有, 许清海, 等. 中国表土花粉与建群植物地理分布的气候指示性对比. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 28: 701–14
- 24 杨青松, 星耀武, 周浙昆. 亚洲季风区铁杉属现代分布区及其气候特征. *云南植物研究*, 2009, 31: 389–39
- 25 邓韞, 郑卓, Cour P, 等. 中国东部花粉比值与气候的关系及其在定量古气候中的应用. *古生物学报*, 2002, 41: 508–516
- 26 孟宪伟, 杜德文, 刘焱光, 等. 冲绳海槽近 315 万年来陆源物质沉积通量及其对气候变化的响应. *海洋学报*, 2007, 29: 74–80
- 27 蒋富清, 李安春, 李铁刚. 冲绳海槽南部柱状沉积物地球化学特征及其古环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22: 11–17
- 28 Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. *Geomorphology*, 2007, 85: 208–224
- 29 熊应乾, 刘振夏. 冲绳海槽 DGKS9603 孔细粒沉积物元素组合特征及其意义. *海洋学报*, 2004, 26: 61–71
- 30 李广雪, 刘勇, 杨子庚, 等. 末次冰期东海陆架平原上的长江古河道. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 35: 284–289

- 31 Yokoyama Y, Lambeck K, Deckker P D, et al. Timing of the Last Glacial maximum from observed sea-level minima. *Nature*, 2000, 406: 713–716
- 32 Lea D W, Martin P A, Pak D K, et al. Reconstructing a 350 ky history of sea level using planktonic Mg/Ca and oxygen isotopic records from a Cocos Ridge core. *Quat Sci Rev*, 2002, 21: 283–293
- 33 孙湘君, 罗运利. 南海北部 280 ka 以来深海花粉记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31: 846–853
- 34 李逊, 孙湘君. 南海南部末次冰期以来的孢粉记录及其气候意义. *第四纪研究*, 1996, 6: 526–535
- 35 Heusser L E, Morley J J. Pollen and radiolarian records from deep-sea RC14-103: Climatic reconstructions of northeast Japan and northwest Pacific for the last 90000 years. *Quat Res*, 1985, 24: 60–72
- 36 Kawahata H, Ohshima H, Kuroyanagi A. Terrestrial-Ocean environmental change in the northwestern Pacific from the glacial times to Holocene. *J Asian Earth Sci*, 2011, 40: 1189–1202
- 37 Igarashi K, Yamamoto M, Ikehara K. Climate and vegetation in Hokkaido, northern Japan, since the LGM: Pollen records from core GH02-1030 off Tokachi in the northwestern Pacific. *J Asian Earth Sci*, 2011, 40: 1102–1110
- 38 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, 294: 2345–2348
- 39 Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. *Science*, 2004, 203: 575–578
- 40 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years. *Nature*, 2008, 451: 1090–1093
- 41 程海, 艾思本, 王先锋, 等. 中国南方石笋氧同位素记录的重要意义. *第四纪研究*, 2005, 25: 157–163
- 42 Heusser L. Northeast Asian climatic change over the last 140000 years inferred from pollen in marine cores taken off the Pacific coast of Japan. In: Leinen M, Sarnthein M, eds. *Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*. Dordrecht: Kluwer, 1989. 665–692
- 43 Heusser L E, Morley J J. Monsoon fluctuations over the past 350 kyr: High-resolution evidence from northeast Asia/Northwest Pacific climate proxies (marine pollen and radiolarians). *Quat Sci Rev*, 1997, 16: 565–581
- 44 Petit J R, Jouzel J, Raynaud D. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctic. *Nature*, 1999, 399: 429–436
- 45 孙湘君, 陈旭东, 罗运利, 等. 末次冰盛期低海面时南海南北陆架上的植被. *植物学报*, 1999, 41: 1016–1023
- 46 Ju L X, Wang H J, Jiang D B. Simulation of the Last Glacial maximum climate over East Asia with a regional climate model nested in a general circulation model. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 2007, 248: 376–390
- 47 郑卓, 黄康有, 邓韞, 等. 中国东部大陆尺度南北样带尘土花粉散布规律与现状植被的关系. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 534–543