

冲绳海槽中部距今近 70 ka 以来的孢粉记录及物源探讨

杨士雄¹, 郑卓^{1*}, 魏金辉¹, 邓韞¹, JEAN-PIERRE Suc², SERGE Berne³, 李杰¹

(1. 中山大学 地球科学系, 广东 广州 510275; 2. Institut des Sciences de la Terre Paris, Université P. et M Curie-Paris 6, 75005 Paris, France; 3. Université de Perpignan Via Domitia, 66860 Perpignan, France)

摘要: 研究钻孔 DGKS-9602 位于冲绳海槽中部, 岩芯长度为 931 cm, 钻孔年代覆盖了氧同位素 1~4 阶段, 年代可追溯至距今 73 ka。孢粉分析结果证明, 孢粉带与氧同位素阶段有较好的对应关系, 其中松属花粉与蒿属花粉比值(P/A)与海平面变化曲线相互吻合。应用非相似性类比法将钻孔孢粉样品与陆地表土孢粉样品进行欧氏距离计算, 从而获得陆源物质来源的可能区域, 进而分析了海平面波动下导致陆源区发生的可能变化。结果证明在 MIS 4~3 阶段和全新世均以松属花粉为主, 其类比分析结果表明, 它们与现代陆地样点孢粉组合的相似度都较差, 反映了分散的陆地来源和风力搬运为主导。而在末次盛冰期阶段, 孢粉中的松属与蒿属的比值急剧下降至小于 1, 类比结果显示该段陆源物质很可能来自于盛冰期出露的大陆架平原, 且以草地-湿地植被为主, 该阶段海槽的离岸距离大为缩短, 河流输入导致陆源物质通量增加。研究表明在冰期-间冰期时间尺度上, 中国东部海岸带与冲绳海槽之间的离岸距离变化是制约陆源孢粉物质通量变化和搬运介质改变的主要因素。为更好地理解海洋沉积物孢粉的物质的来源以及解释复杂的古植被和古气候信息奠定了基础。

关键词: 冲绳海槽; 孢粉分析; 古植被; 海平面变化; 孢粉物源

中图分类号: P736.2; P722.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2011)03-0103-11

1 引言

末次盛冰期的海平面大幅下降和陆架出露使全球海岸带大部分区域沉积记录缺失。然而冲绳海槽无论是冰期或间冰期一直处于水下环境, 第四纪保持连续沉积, 不仅保存了古海洋环境演化和海槽发育的历史, 同时也成为中国东部陆地、东海陆架与大洋对比研究的重要纽带, 成为古海洋学和第四纪环境变化研究的最佳材料, 受到中外学者的广泛关注^[1-14]。

冲绳海槽位于东海陆架边缘, 是西太平洋第四纪新生的弧后盆地^[15]。其主体水深大于 1 000 m, 最大深度可达 2 719 m^[16]。到目前为止, 前人已从氧同位素、有孔虫、藻类、沉积矿物等^[13-14, 17-23]多方面去了解冲绳海槽记录的晚第四纪以来的环境变化

信息, 特别是黑潮的变化历史。然而对该区陆源孢粉的研究则比较少^[24-29], 缺乏晚第四纪较长尺度的陆源植被生态环境变化和冰期低海面阶段大陆架沉积和生态特征的有关信息。前人曾对冲绳海槽北部的 CSH1 孔 5 万多年(18 m)的沉积物样品进行了孢粉分析^[11], 发现了孢粉组合与冰期/间冰期变化密切相关, 并揭示出一系列明显的次级波动。实际上, 海域孢粉分析结果的植被与气候重建, 不仅需要根据孢粉谱自身的变化, 同时必须了解该海区冰期与间冰期物质来源的变化。冲绳海槽沉积物质的来源十分复杂, 前人对冲绳海槽沉积物源的研究, 主要是应用各种地球化学方法, 如元素比值、同位素、矿物成分^[30-36]等, 大部分研究集中在表层沉积物质的来源, 而利用钻孔记录来探讨更新世以来物质来源

收稿日期: 2010-03-01; 修订日期: 2011-01-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772113; 40331011)。

作者简介: 杨士雄(1980—), 男, 贵州省六盘水市人, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究。E-mail: ysx_666@163.com

* 通信作者: 郑卓, 从事矿物学、岩石学、矿床学研究。E-mail: eeszhuo@mail.sysu.edu.cn

变化的研究较少^[37]。其次,近十几万年以来冲绳海槽虽然一直接受沉积,但由于东海海平面和海底地貌变化很大,其物源区和海流等也发生了根本的改变。海洋沉积物的孢粉来自陆地,从原理上可以根据孢粉组合来定量追溯其在陆地上的物源区,但事实上要做到物源区的定量判别十分复杂。尽管如此,要通过孢粉来重建该区的环境演变过程,就必须弄清该区沉积物质的主要来源地。基于这一点,本文通过 DGKS-9602 钻孔孢粉分析重建冲绳海槽中部晚更新世以来的沿岸植被和气候环境变化的同时,进行陆源物质来源判别的尝试。主要方法是将划分的每一个孢粉带进行数据整合,进而利用东亚大陆土孢粉数据库现代表土花粉数据与冲绳海槽不同年代每个孢粉带的数据进行相似性类比,找出可能的物质来源的可能区域。在此基础上,进而分析海平面不同高度下陆源区发生的可能变化。

2 研究地点、材料和方法

冲绳海槽地处西太平洋中北部,琉球岛弧西北侧,东部以琉球群岛为界,西至东海大陆架坡折处,南起中国台湾北部,北达日本九州岛西南岸外,轴线以 NNE-SSW 方向延伸,整体上呈微向太平洋凸出的弓字型。海槽南北长约 1 200 km,东西最宽达 230 km,总面积约 2.2×10^5 km²^[38]。槽底地形相对平坦,北浅南深,北部水深一般为 600~800 m,南部水深则为 2 500 m 左右,最大水深出现在台湾东北,为 2 940 m^[39]。槽底第四纪松散沉积物广泛发育,沉积物为半深海沉积,属于陆架浅海与深海的过渡类型,由于地处大陆边缘,其水文和环流体系相当复杂。世界著名强暖流——黑潮流经本区,它对海底地貌的塑造、沉积物的类型和分布起着重要的作用。因此,沉积物的物质来源具有多源性。该区处于东亚季风区,夏季盛行西南风,冬季盛行东北风。

DGKS-9602 钻孔位于中国东海陆架西侧坡槽近槽底处,坐标为 28°07.419' N,127°22.138' E (图 1),水深 988 m,是 1996 年中法科学家合作利用法国 L'ATALANTE 号海洋调查船用法国设计制造的重力活塞取样管在东海获取的 17 个钻孔柱状岩芯中的一个^[40]。地震剖面结果显示,该区沉积物中没有浊流沉积记录,岩芯可以看作为连续沉积。该岩芯长度为 931 cm,主要为细砂沉积。

用于孢粉分析的取样间距为 10 cm,一共分析鉴定 88 个样品。花粉分离技术采用常规酸碱处理

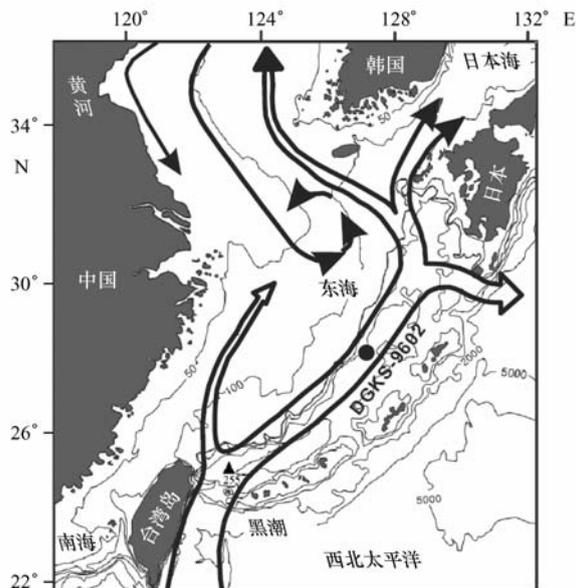


图 1 冲绳海槽 DGKS-9602 钻孔位置

和重液悬浮法,加入 10% HCL 与 40% HF 取出钙质与硅质,然后再用 15% 的 KOH 去除有机质,最后用重液浮选两次。孢粉观察和统计在 400 或 1 000 倍显微镜下进行,每个样品统计孢粉数不少于 200 粒。孢粉绝对浓度的计算采用体积法^[41]。

本文的年龄框架主要根据浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 的氧同位素测试曲线与 SPECMAP 氧同位素曲线的拟合来获得^[42-43],DGKS-9602 钻孔与 SPECMAP 的氧同位素峰谷值之间有较好的对应。因此根据氧同位素多个控制点的年龄(见图 2),获得本钻孔岩芯的年代总体框架(见表 1)。控制点之间以线性插值估算各深度年龄。该年龄模式与冲绳海槽中部的 MD012404 孔^[44]和南海的 MD972151 孔^[45]的氧素曲线均有可比性(见图 3,4)。

该钻孔 0~39 cm 段对应 MIS 1 氧同位素阶段,39~260 cm 对应 MIS 2,260~745 cm 对应 MIS 3,745~931 cm 对应 MIS 4。所得到钻孔的沉积速率 MIS 1 阶段为 3.21 cm/ka, MIS 2 阶段为 18 cm/ka, MIS 3 阶段为 14 cm/ka, MIS 4 阶段为 12 cm/ka。海槽内全新世沉积物沉积速率比晚更新世低,主要是由于全新世海平面抬升,输入到海槽的陆源物质相对减少,从而导致沉积速率降低。整个钻孔其平均沉积速率为 12.34 cm/ka,与相邻钻孔 DGKS-9603^[46]的平均沉积速率 11.3 cm/ka 基本一致。Xiong 等^[47]基于 AMS¹⁴C 测年,从南到北对冲绳海槽 11 个钻孔进行了研究,其沉积速率在 11~

39 cm/ka。由此说明了 DGKS-9602 孔年代构建的年龄框架是合理的。

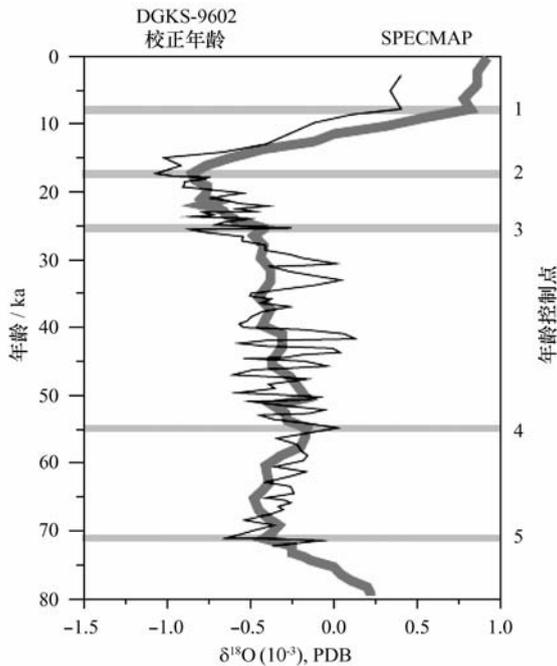


图2 SPECMAP 氧同位素曲线与经其校正后的 DGKS-9602 孔氧同位素曲线的对比及年龄控制点

表1 DGKS-9602 孔与 SPECMAP 氧同位素的控制点年龄

深度/cm	定年方法	年龄/a BP
21.099	SPECMAP	7 810
60.587	SPECMAP	17 310
260.463	SPECMAP	25 350
707.685	SPECMAP	54 840
913.189	SPECMAP	71 120

3 结果

DGKS-9602 钻孔孢粉分析共鉴定出 102 个孢粉种属,其中包括 65 种木本植物、13 种草本植物和 24 种蕨类与藻类。最常见的花粉类型是针叶类,包括松属(*Pinus*)、铁杉属(*Tsuga*)、冷杉属(*Abies*)、杉科(*Taxodiaceae*)、云杉属(*Picea*)、罗汉松属(*Podocarpus*)、苏铁属(*Cycas*)、柏科(*Cupressaceae*)等。被子植物花粉主要有落叶类栎属(*Quercus*)、榆属(*Ulmus*)、栗属(*Castanea*)、桤木属(*Alnus*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、桦木属(*Betula*)、枫香属(*Liquidambar*)、榛属(*Corylus*)、山毛榉属(*Fagus*)、金缕梅科(*Hamamelidaceae*);常绿乔木主要有山茶科(*Theaceae*)和桑科(*Moraceae*)、大戟属

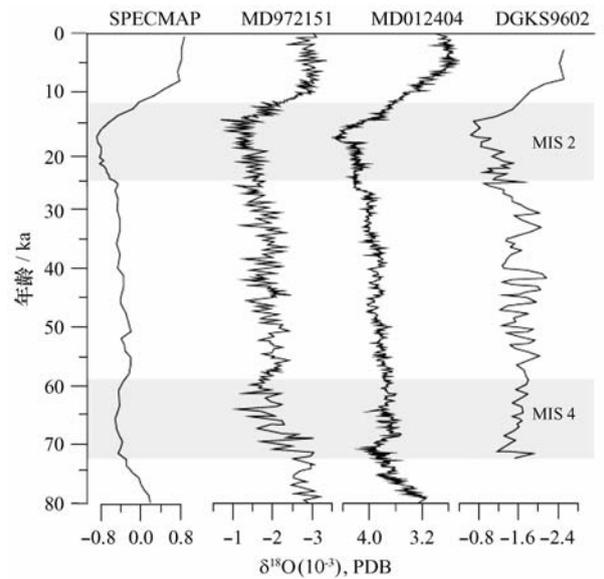


图3 DGKS-9602 孔与东海 MD012404^[44]和南海 MD972151 孔^[45]氧同位素曲线对比

(*Euphorbia*)、棕榈科(*Arecaceae*)等。草本花粉以蒿属(*Artemisia*)为优势,其他含量较高的草本有莎草科(*Cyperaceae*)、禾本科(*Poaceae*)和藜科(*Chenopodiaceae*)等。常见的孢子主要有水龙骨科(*Polypodiaceae*)、芒萁属(*Dicranopteris*)、里白属(*Hicriopteris*)和石松属(*Lycopodium*)等。

根据陆生植物花粉的含量对所有样品进行了有序聚类分析,将岩心分为四个组合带,其中第三个组合带分成三个亚带。有序聚类分析由 CONISS^[48]软件完成。四个组合带与氧同位素阶段 1~4 期基本对应,各花粉带描述如下:

花粉带 F(931~745 cm,约 73~57 ka),相当于氧同位素 MIS 4 阶段。该带针叶类乔木花粉含量较高,占总花粉含量达 62%~98%,其中松属占主要优势,其次尚有铁杉、冷杉、杉科和云杉等。阔叶类乔木主要为栎属,含量逐渐升高,总木本植物呈现升高的趋势。草本植物花粉通常占花粉总量 5%以下,以禾本科为主,个别样点含量可达到 28%。

花粉带 E(745~525 cm,约 57~42.5 ka),MIS 3c 阶段。该带针叶类乔木花粉仍占主导地位,为 79~98%。松属仍占主要优势,但相对于 F 带略低,其次铁杉、冷杉、柏科和杉科等含量有较明显的升高,其中冷杉和铁杉属含量在整个钻孔剖面中含量最高。阔叶乔木中,栎属、栗属和山毛榉属含量升高。草本植物花粉含量较低,仍以禾本科为主,其次为莎草科、蒿属和少量麻黄属。

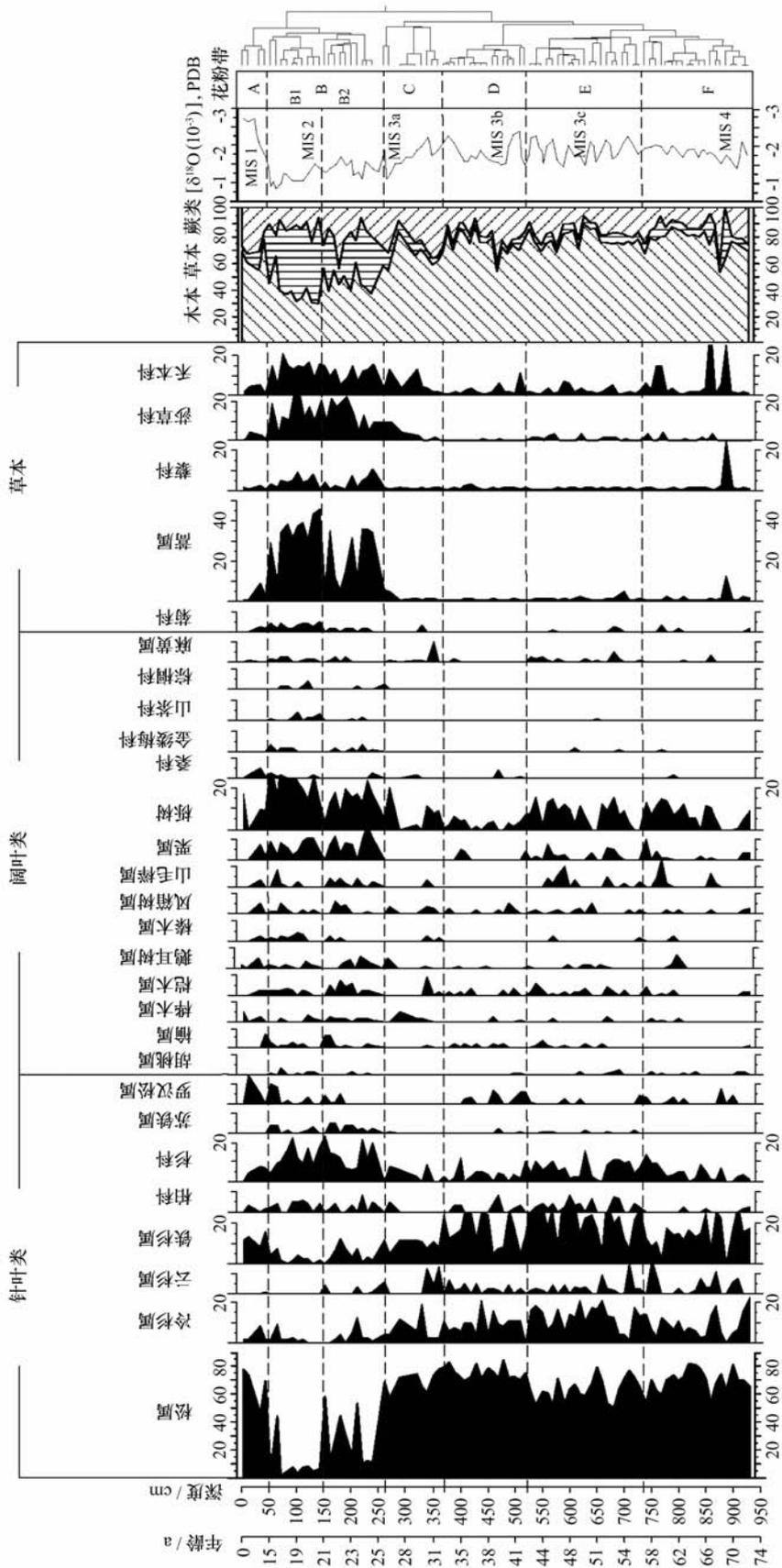


图4 DGS-9602孔主要花粉种属与氧同位素曲线对比(花粉含量由陆生植物花粉总量计算得到,而木本、草本和孢子各大类百分比含量以总孢粉统计数量计算得到。除松、蒿属外图中花粉含量均放大1倍。松含量比例尺缩小1/3)

花粉带 D(525~360 cm, 约 42.5~33 ka), MIS 3b 阶段。本组合针叶类乔木花粉含量为 86%~98%。松属含量在整个钻孔剖面中达到最高, 平均为 75%。阔叶树种栎属、栗属含量显著减少, 在整个钻孔剖面中达到最低值。草本含量很低, 一般均小于 2%。

花粉带 C(360~260 cm, 约 33~25.5 ka), MIS 3a 阶段。本带针叶类花粉含量为 70%~90%, 呈现出由下至上逐渐降低的趋势。特别是松属和铁杉属花粉有明显降低的趋势, 而杉科花粉略有增加。阔叶类乔木栎属含量在上部逐渐增加。草本植物含量由下至上从 3% 逐渐升高至 17%, 禾本科、莎草科的含量明显增加, 尤其是上部增加明显, 表现出由木本优势转变为草本优势的过渡阶段。

孢粉带 B(260~39 cm, 约 25.5~12 ka), MIS 2 阶段。本带带气囊类针叶植物花粉显著减少, 最低降至 7%, 为整个剖面最低值, 而裸子植物的杉科花粉含量在整个剖面中达到最高。阔叶乔木栎属和栗属为整个剖面最高值。草本植物花粉含量在这一组合带急剧增加, 含量为 15%~64%, 其中显著增加的草本花粉类型主要是蒿属、莎草科、禾本科、石竹科等。该带仍可细分为 B1 和 B2 带, 其中 B2 带松属花粉有所增加, B1 带松属花粉降至最低值, 伴随栎属以及草本的蒿属急剧增加。

孢粉带 A(39~0 cm, 约 12~0 ka), MIS 1 阶段。该带针叶类乔木花粉含量又逐渐升高为 60%~92%, 热带和亚热带常见的罗汉松属、铁杉含量相对较高。阔叶树种栗属、栎属较孢粉带 B 明显降低。草本植物花粉含量一般小于 5%。

4 讨论

4.1 海平面变化

DGKS-9602 孔的花粉分析结果最明显的特征是松属和蒿属花粉的相互消长, 其变化趋势与氧同位素记录的冰期旋回密切相关。由于松属花粉在海水漂流过程中被长距离搬运能力强, 因此当海平面较高和钻孔地点离岸线距离相对较远时, 因沉积分异作用使带有气囊类的松属花粉相对含量增高, 而另一些沉降速率较高的花粉种类则含量相对降低。与此相反, 盛冰期的海平面下降使岸线更靠近钻孔取样点, 而出露的大陆架平原表面各类草本繁茂, 因此蒿属等草本花粉在低海面阶段含量升高, 松属花粉含量相应地降低, 可见松属花粉的相对含量可以

指示离岸距离的远近, 而松属花粉含量(P)和蒿属花粉含量(A)的消长也可以反映海平面或海岸线距离的变化, 两者均可作为海平面升降的替代性指标^[49]。

从 DGKS-9602 孔的松属花粉、蒿属花粉的纵向变化特征分析, 距今 25~15.5 ka 是冲绳海槽海平面和沉积环境变化最大的时期, 图 5 清楚地反应出松属花粉在末次盛冰期由原来的 70%~80% 急剧下降至小于 10%, 而蒿属花粉由 2%~5% 快速升至 35% 左右, 两者的比值(P/A)急剧下降至小于 1。松属花粉含量与氧同位素曲线的变化也是基本吻合的, 其中孢粉 B2 带的末次盛冰期早期的氧同位素曲线变化也相应地由松属花粉含量的略微升高而体现出来^[50]。此外, 沉积孢粉绝对浓度在低海面时期较高, 高海面时期因离岸距离远而浓度降低。

至于氧同位素 MIS 4 期, 本钻孔无论是氧同位素还是孢粉的变化都比较小。根据新几内亚胡昂半岛(Huon Peninsula)的海平面变化曲线^[51], MIS 4 期的海平面下降幅度较小, 约为 70 m, 与末次盛冰期的 120 m 相比有较大差距。此外, 东海陆架 60~70 m 的等深线与冲绳海槽仍有较远距离, 因此这一时期的钻孔位置的沉积物源与海岸线距离仍较大, 从而使松属花粉依然保持较高的含量。此外, MIS 4 阶段的 P/A 平均比值为 71, 而在 MIS 3 阶段(57~25.5 ka BP)的 P/A 平均比值为 78, 较 MIS 4 阶段高。

末次冰消期松属花粉急剧升高, 蒿属花粉下降, 两者的比值与全球海平面上升的结果是一致的。尽管全新世松属花粉有升降变化, 但由于沉积速率慢, 取样点密度较低, 难以从孢粉结果证实新仙女木期的快速变化是否存在。

4.2 陆源孢粉的物质来源判别

本研究首先分别对上述 MIS 1 至 MIS 4 阶段所有样品的孢粉数据进行累加和重新求和, 并计算平均百分比, 从而获得各带的整体孢粉含量数值。由于松属花粉在海洋中的比例特别大, 且松属花粉只能鉴定到属一级分类单位, 加上松属植物在大陆上南北均有分布, 不利于寻找具体的分布点。因此, 在用于物源分析的百分比计算时排除了松属、蕨类和水生植物。东亚表土孢粉数据库所有样点均参与类比运算, 考虑到陆地来源的最远距离, 现代表土样品仅取用了距离钻孔位置小于 2 500 km 辐射范围内的样点, 现代陆地地表土样参考点位置包括中国大陆、海南岛、台湾和日本等。花粉种属在排除松属之

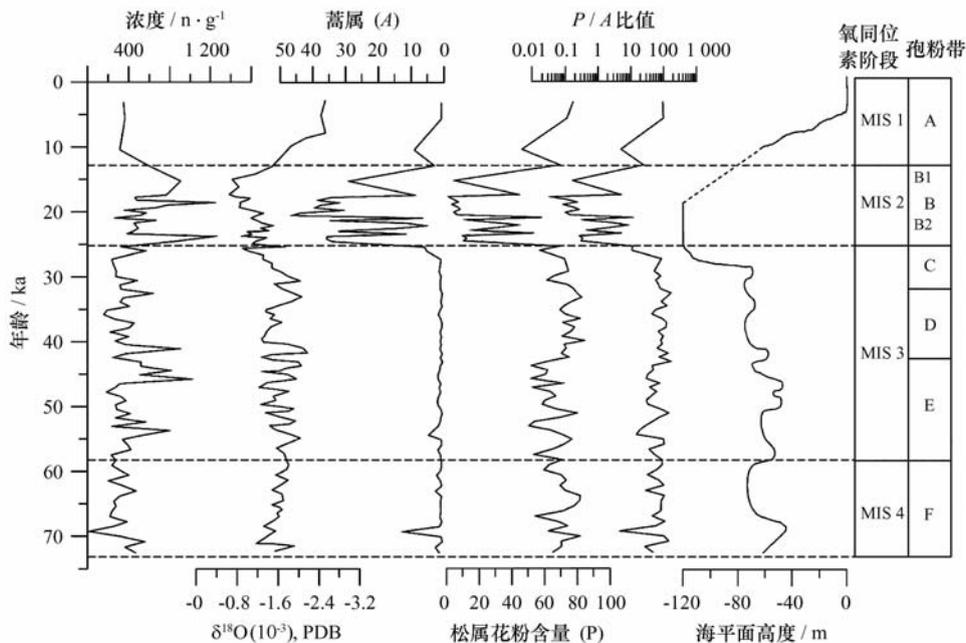


图5 DGKS-9602 钻孔孢粉浓度、氧同位素、蒿属(A)、松属(P)含量及其比值(P/A)与海平面变化^[51]对比

后重新计算百分含量,与 DGKS-9602 钻孔按相同的孢粉种属划分规则得到用于最佳类比计算的数据库种属和数据点分布表。在不考虑气候背景下植被迁移导致古代植被与现代植被分布差异性的情况下,使用数理统计软件将 DGKS-9602 各孢粉带花粉数据与表土数据库的花粉数据进行最佳类比计算^[52],找出最接近的样点(采用欧式距离:Euclidian 距离计算),该类比的目的实际上是计算每一个现代样点与化石样点的相似程度,并将相似程度的计算结果显示在地理空间位置上,前人研究认为^[53],对于大陆尺度的非相似性距离计算,具有类比意义的阈值下限约为小于 0.4。但对于冲绳海槽沉积物源来说,无论是搬运距离还是来源地范围都比较大,因此绝大部分样品的距离计算都超过 0.4。因此,本研究将所有地表的类比值以圆点大小的方式显示在地理位置图上,以便追踪可能的物源区域。需要指出的是,两样品非相似距离较小的结果(小于 0.4)可能表明搬运距离较短和来源点的孢粉组合相似度较高。而非相似距离越大则表明陆地来源点的地表孢粉组合越不相似和搬运距离越大,以及来源面可能较广。另一方面,考虑到冰期与间冰期气候植被环境的差异性,计算得到的相似度较高的现代表土样点并不能直接代表第四纪某一个时期的精确来源地,而需要考虑当时的诸多因素,如植被带移动、大陆架出露等。

最佳类比计算结果显示,钻孔底部孢粉带 F—C (MIS 4~3 阶段)的孢粉组合与表土孢粉的非相似距离计算结果接近,基本上均大于 0.6。这一结果证明研究区海域周边的陆地上找不到与化石孢粉谱相似的来源点,表明该时期海面仍然较宽,陆地孢粉来源地距离较大,且搬运介质很可能主要是风力作用,河流输入孢粉物源比例较小。根据非相似性距离排列,非相似距离相对较小的样点分散在我国东部的中北部和日本南部岛屿,有些样点分布在长江中上游区域。根据东亚地区和海域的大气运动规律判断,该时期冲绳海槽的孢粉物源绝大部分是冬季风路径的搬运结果,少量物源可能来自于长江和黑潮海流。

末次盛冰期孢粉带 B(MIS 2 阶段)以陆生草本蒿属、藜科等花粉为主,该阶段与表土样点的类比计算结果(见图 6c)表明,孢粉谱与陆源区表土样点类似程度较高,非相似性距离可达到 0.36,表土样点的地理分布显示,地表相似样点集中位于目前的华北平原区,其对应的植被类型为非乔木覆盖区的草地植被,高含量的蒿属花粉是这一区域的主要孢粉特点^[54]。分析认为,华北平原的表土孢粉虽然具有较高的类比相似度,但并不是末次盛冰期冲绳海槽沉积孢粉的物源地。这是因为盛冰期海平面下降后整个东海大陆架露出地表,数百千米宽阔的陆架地表植被很可能是以草地和湿地类型为主^[8],其对应

的孢粉组合应该与目前华北平原的草地植被基本一致。因此可以推测,冲绳海槽末次盛冰期的孢粉沉积来源不是华北平原,而是与目前华北平原草地类型相似的东海陆架平原,而这一区域目前淹没在海域之下。此外,上述草地植被,并不是植物地理学意义上的地带性草原植被东移^[55],而是河口冲积平原或近海泛滥平原的草地—湿地类型。由于盛冰期海平面大幅下降,在东海大陆架旱地上蒿属和藜科等草本植物大量生长,局部低洼地区还有沼泽发育。

该时期海岸带向东推移,使钻孔与距海岸线大幅缩短,因此陆源孢粉物质以近源的大陆架平原草地植被为主,且河流是该时期的主要搬运介质。从物源点的纬度来看,华北平原样点比钻孔位置偏北约8~9个纬度。根据末次盛冰期陆地上的气候和孢粉研究结果^[56-57],温带植被带当时向南推移约8个纬度,这一结果证明冰期东海大陆架的草地植被类型也向南推移,而向南移动8~9个纬度的结果正好与长江下游出口相衔接。

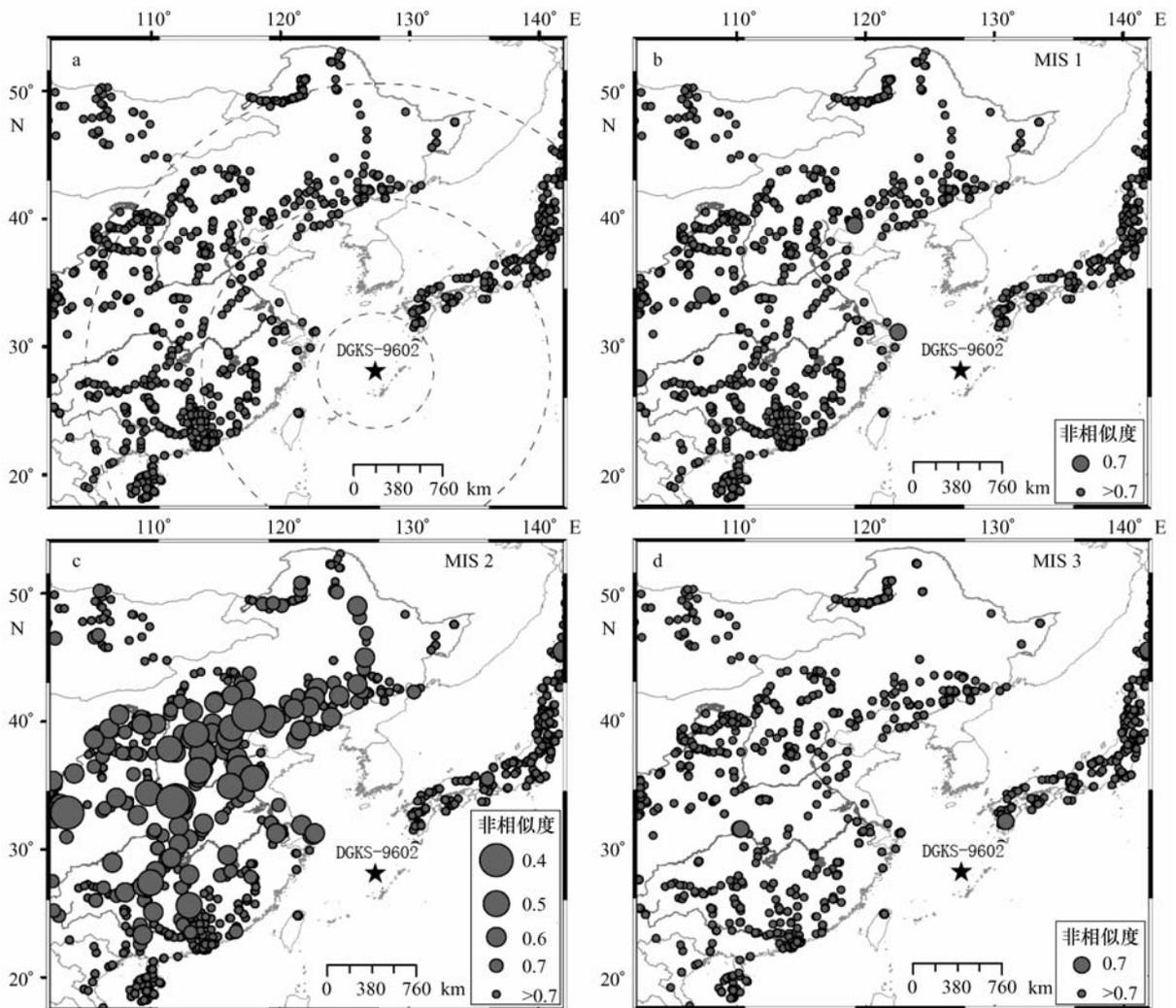


图6 DGKS-9602孔各时段孢粉物质来源类比结果(仅显示非相似距离最小的前50个样点)

a. 物源区的陆地表土样品点, b. 钻孔孢粉 A 带(MIS 1)的陆地表土孢粉样点相似度, c. 钻孔孢粉 B 带(MIS 2)的陆地表土孢粉样点相似度, d. 钻孔孢粉 C—E 带(MIS 3)的陆地表土孢粉样点相似度

全新世孢粉带 A(MIS 1)在陆地花粉谱中难以找到相似性程度高的样点,其类比距离一般都大于 0.65,表明可能的来源地距离远,且分布比较广和分

散(图 6b),并且以风力搬运为主。根据非相似距离地理分布图推测,冲绳海槽 DGKS-9602 孔全新世沉积的最主要来源地均集中在东亚陆地,并以亚热

带和温带广大区域为主要风力物源区,秋冬季节相对干燥的冬季风可能是主要的搬运介质。

上述结果与前人多学科方法分析的结果相吻合,冲绳海槽的陆源物质主要来源于由长江输运的我国大陆物质,在冰期—间冰期时间尺度上,海平面升降导致的长江河口与冲绳海槽之间的距离变化是制约陆源物质通量变化的主要因素。冬季风的增强可能使更多的粉砂级物质进入冲绳海槽,导致陆源物质通量增加^[58]。研究证明周边陆地现代土数据与海槽沉积孢粉结果的定量比较,从一定程度上反映出不同时代海洋孢粉的可能物源和搬运介质的变化。末次盛冰期的沉积孢粉以近源为主,其源地绝大部分为冰期低海面时出露的大陆架平原地区。而全新世地层与现代陆地表土花粉之间的相似度较差,表明沉积孢粉来自于广大的沿岸陆地,岸线距离远,且物质来源分散的特点表明风力输入可能大于河流输入。上述研究证明,边缘海较深海域的长尺度时间序列钻孔中孢粉的陆源物质来源地很可能发生重大变化;同时随着离岸距离的伸缩,孢粉输入的搬运介质也会发生根本变化。因此,在解释孢粉古生态的同时,需要首先了解沉积物的主要孢粉来源,才能更好地理解海洋沉积物孢粉组合特征及其与植被和气候之间的关系。

4.3 孢粉反映的陆缘植被和环境变化

冲绳海槽中段的 DGKS-9602 孔孢粉分析结果证明,氧同位素 MIS 4 阶段(孢粉带 F)的孢粉物质来源可能由风力输入为主,因此,孢粉来源可能包括了我国东部和海域相邻的亚洲各国,主要反映这些地区的植被环境。孢粉中的针叶类除了松属以外,铁杉、冷杉、云杉均有一定的数量。阔叶类植物花粉相对较少,主要为栎属。上述植物类型中,松属、铁杉属和栎属可能反映了海槽北部沿岸山地以针叶林为主,沿岸低地则有针阔叶混交林,而冷杉和云杉则来自于较高海拔的中国东北及朝鲜半岛的寒温带针叶林。此外,个别样品草本植物禾本科和藜科花粉突然增多,表明海岸线变化引起的物源区改变波动性较大。

在氧同位素 MIS 3 阶段(孢粉带 C—E)的物源分析表明,孢粉物源也同样较为分散,针叶树种松属和铁杉属在整个剖面中含量达到最大值。铁杉属植物在亚洲主要分布于亚洲季风区东部,间断分布于中国大陆的西南山区(横断山区和部分东喜马拉雅)、中部山区(秦岭—大巴山区)、东南山区(华东山

地)、台湾岛以及日本列岛(除北海道)。亚洲季风区铁杉属的现代分布环境要求年降水量范围为 720~2 103 mm,生长季降水量为 635~1 489 mm,年均温范围为 5.8~18.2 °C,最冷月均温为 3.7~10.9 °C,气温年较差为 9.7~25.4 °C^[59]。亚洲季风区铁杉属的现代地理分布表明,冲绳海槽中部在 MIS 3 时期的主要物源仍然是北亚热带至暖温带的长江流域一带,这些地区的山地针叶植被发育,相伴的阔叶树种主要有枫香属、栎属、榆属、山毛榉属、栗属等。

在 MIS 2 阶段的末次盛冰期,气候寒冷干燥,海平面明显下降,海岸线向东推至海槽附近。钻孔显示,该时期草本花粉含量急剧增高,蒿属、禾本科、藜科、石竹科、莎草科等十分丰富。而松属和其他木本植物花粉含量相应降低。该阶段孢粉带的陆源类比分析结果表明,高含量的草本花粉与华北平原的草地类型十分相似,但该时期的物源并非来自于华北平原,这是因为末次盛冰期海平面下降后,整个大陆架出露,在大陆架上的植被类型应与目前华北平原的草地环境相似。在大陆架上未能生长森林植被的原因主要是沼泽密布,同时季风降雨期平原区常被洪水泛滥,导致树木难以生长,而一年生草本植物则大片发育。寒冷盛冰期大陆架上的草原湿地与地带性的草原不同,前者与降雨量无关,而后者是降雨量降低导致的结果。从这一时段蒿属与禾本科的比例和物源地的气候环境分析,当时的东海陆架同一纬度的气温明显低于现代,植被带南移至少 8 个纬度。

从末次冰消期开始(约 12.05~0 ka 的 MIS 1 阶段),气候快速转暖,海面上升,钻孔点的离岸距离迅速增大。季风搬运再次成为海槽孢粉输入的主要介质。此外,部分热带属种的发现证明海流的输入逐渐增强,包括从热带海域如东南亚等地带来的鸡毛松等罗汉松科花粉,反映了黑潮对物源的影响。

5 结论

冲绳海槽中部 DGKS-9602 孔记录了晚更新世~73 ka BP 以来古海洋环境和陆源地植被变化。根据钻孔的陆生植物花粉谱的有序聚类分析,可以将其分为 6 个组合带,它们与氧同位素阶段 1~4 期基本对应。

钻孔中的松属、蒿属花粉纵向变化反映了 25~1.5 ka BP 末次盛冰期的海平面变化,松属花粉由原来的 70%~80% 急剧下降至小于 10%,而蒿属花

粉由 2%~5% 快速升至 35% 左右。松属花粉含量的垂向变化与氧同位素曲线基本吻合。因此,松属花粉的相对含量可以指示离岸距离的远近,而松属和蒿属花粉含量的消长也可以反映海平面或海岸线距离的变化,两者均可作为海平面升降的替代性指标。

本研究利用 DGKS-9602 孔的孢粉分析结果进行陆源物质来源判别的尝试,计算结果显示,钻孔孢粉带中,除了末次盛冰期对应的 B 带具有与陆地样点较高相似度以外,其他时段的孢粉带均在陆地表土样品中找不到相似点。如孢粉带 F—C (MIS 4~3) 找不到与其类似的陆地表层样点,即海槽样品与陆地样品孢粉组合的非相似距离普遍较大。而海域周边相邻大陆均有可能为分散的物源区,包括我国东部、朝鲜半岛和日本南部。此外,由于此阶段海槽的离岸距离仍较远,风力搬运可能是主要的孢粉输入介质。全新世孢粉带 A (MIS 1) 也同样在陆地中难以找到相似性程度高的样点,但根据非相似距离排序,其较可能的来源地主要在中国大陆,其搬运

输入的主要介质可能为风力作用,其次为河流入海和黑潮带来的孢粉。

在末次盛冰期,相当于孢粉带 B (MIS 2),其孢粉谱与陆源区表土样点计算获得的相似度较高,这些样点集中位于华北平原及邻近区域。推测冲绳海槽末次盛冰期的孢粉沉积来源不是华北平原,而是与目前华北平原草地类型相似的东海陆架平原,而这一区域目前淹没在海域之下。

在冰期—间冰期时间尺度上,中国东部海岸带与冲绳海槽之间的离岸距离变化是制约陆源孢粉物质通量变化的主要因素。在盛冰期气候变冷时期,海平面下降,离岸距离大幅缩短,河流输入迅速增强,使更多的陆地孢粉物质进入冲绳海槽,导致陆源物质通量增加。在相对高海面期,离岸距离急剧增大,河流输入被洋流阻隔,孢粉通量降低,大气搬运成为孢粉沉降的主要来源,此时孢粉物质来源地较不确定。海洋沉积孢粉与东亚陆地表土孢粉数据的定量比较,为更好地理解海洋沉积物孢粉的物质来源以及揭示复杂的古环境信息提供了重要依据。

参考文献:

- [1] LI B H, JIAN Z M, WANG P X. Pulleniatina obliquiloculata as paleoceanographic indicator in the southern Okinawa Trough during the last 20000 years[J]. Mar Micropaleontol, 1997, 32: 59—69.
- [2] 刘娜, 孟宪伟. 冲绳海槽中段表层沉积物中稀土元素组成及其物源指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 37—43.
- [3] 李培英, 王永吉, 刘振夏. 冲绳海槽年代地层与沉积速率[J]. 中国科学: D 辑, 1999, 29(1): 50—55.
- [4] 刘振夏, SAITO Y, 李铁刚. 冲绳海槽晚第四纪千年尺度的古海洋学研究[J]. 科学通报, 1999, 44(8): 883—887.
- [5] LÜ H Y, LIU Z X, WU N Q, et al. Diatom and paleoceanography in domain of Kuroshio Current in Okinawa Trough during the past 20000a[C]//Dedicated to the 4th International Conference on Asia Marine Geology. Beijing: SOA China, 1999: 51—62.
- [6] 孟宪伟, 刘焱光, 刘振夏, 等. 冲绳海槽全新世表层水温、盐度和大气 p_{CO_2} 恢复及其古气候意义[J]. 科学通报, 2001, 46(增刊): 80—83.
- [7] 蓝东兆, 方琦, 廖连招. 冲绳海槽表层沉积硅藻对黑潮流的响应[J]. 台湾海峡, 2002, 21(1): 1—5.
- [8] 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[J]. 中国地质大学学报, 2005, 30(5): 597—603.
- [9] 刘振夏, 李培英, 李铁刚, 等. 冲绳海槽 5 万年以来的古气候事件[J]. 科学通报, 2000, 45(16): 1776—1781.
- [10] 蓝东兆, 陈承惠, 李超. 冲绳海槽末次冰期以来黑潮流游移在沉积硅藻中的记录[J]. 古生物学报, 2003, 42(3): 466—472.
- [11] 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[J]. 海洋学报, 2006, 28(1): 85—91.
- [12] 陈金霞, 李铁刚, 南青云. 冲绳海槽千年来陆源物质输入历史与东亚季风变迁[J]. 中国地质大学学报, 2009, 34(5): 811—818.
- [13] LI T G, LIU Z X, HALL M A, et al. Heinrich event imprints in the Okinawa Trough: evidence from oxygen isotope and planktonic foraminifera[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 176: 133—146.
- [14] IJIRI A, WANG L J, OBA T, et al. Palaeoenvironmental changes in the northern area of the East China Sea during the past 42 000 years[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 219: 239—261.
- [15] 郑求根, 周祖翼, 蔡立国, 等. 东海陆架盆地中生代构造背景及演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 197—201.
- [16] 游文丽, 张学惠, 张晓. 中日东海海域划界争端及解决[J]. 北京化工大学学报, 2008(3): 13—18.
- [17] LIU Z X, BERNÉS, SAITO Y, et al. Quaternary seismic stratigraphy and paleoenvironments on the continental shelf the East China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000(18): 441—452.
- [18] SHIEH Y T, WANG C H, CHEN M P, et al. The last glacial maximum to Holocene environment changes in the southern Okinawa Trough[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1997, 15(1): 3—8.
- [19] 陈振波, 刘振夏, 石学法, 等. 东海 DGKS9603 岩芯中微体化石的古海洋学特点、 $\delta^{18}O$ 曲线与 AMS ^{14}C 测年[J]. 沉积学报, 2000, 18(4):

501—505.

- [20] 赵泉鸿, 苏新. 冲绳海槽南部末次间冰期以来古海洋学变迁: ODP1202 站的记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 61—66.
- [21] 李双林, 李绍全, 孔祥君. 东海陆架晚第四纪沉积物化学成分及物源示踪[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 21—28.
- [22] 吴自银, 金翔龙, 李家彪. 中更新世以来长江口至冲绳海槽高分辨率地震地层学研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 9—20.
- [23] YOO D G, LEE C W, KIM S P, et al. Late Quaternary transgressive and highstand systems tracts in the northern East China Sea mid-shelf[J]. *Marine Geology*, 2002, 178: 313—328.
- [24] 王开发, 孙煜华. 冲绳海槽沉积的孢粉、藻类组合[J]. 海洋与湖沼, 1982, 13(5): 440—450.
- [25] 王开发, 孙煜华, 张玉兰, 等. 东海沉积孢粉藻类组合[M]. 北京: 海洋出版社, 1987.
- [26] 宋长青, 孙湘君, SAITO Y. 冲绳海槽钻孔 B-3GC 柱状样花粉记录的古环境信息[J]. 科学通报, 2001, 46(2): 153—157.
- [27] 陈金霞, 李铁刚, 曹奇原, 等. 7500a BP 以来冲绳海槽北部孢粉组合及古环境意义[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(5): 475—480.
- [28] 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[J]. 科学通报, 2009, 54(20): 3117—3126.
- [29] XU D K, LÜ H Y, WU N Q, et al. 30 000-year vegetation and climate change around the East China Sea shelf inferred from a high-resolution pollen record[J]. *Quaternary International*, 2010, 227: 53—60.
- [30] 姜善春, 傅家谟, 栾作峰. 冲绳海槽沉积物中陆源标志物——单萜烯[J]. 地球化学, 1984(2): 161—165.
- [31] 姜善春, 傅家谟, 栾作峰. 冲绳海槽沉积物中陆源标志物—屈、苯并芘、芘、晕苯[J]. 海洋湖沼通报, 1985(4): 36—39.
- [32] 孟宪伟, 王永吉, 吕成功. 冲绳海槽中段沉积地球化学分区及其物源指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(3): 37—43.
- [33] 臧启运, 蔡德陵, 王琦, 等. 冲绳海槽中段表层沉积物物源判识及定量估算[J]. 黄渤海海洋, 1999, 17(4): 20—29.
- [34] 杜德文, 孟宪伟, 王永吉, 等. 沉积物物源组成的定量判识方法及其在冲绳海槽的应用[J]. 海洋与湖泊, 1999, 30(5): 352—358.
- [35] 蒋富清, 李安春. 冲绳海槽南部表层沉积物地球化学特征及其物源和环境指示意义[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 680—686.
- [36] 黄小慧, 王汝建, 翦知湮. 全新世冲绳海槽北部陆源输入物变化及其古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 73—82.
- [37] 李传顺, 江波, 等. 冲绳海槽西南端中全新世以来的沉积速率与物源分析[J]. 科学通报, 2009, 54(9): 1303—1310.
- [38] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽容, 等. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [39] 金翔龙. 东海海洋地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [40] BERNE S. Donghai Cruise preliminary report[R]. IFREMER cruise report DRO/GN/96/29, 1996: 74.
- [41] COUR P. Nouvelles techniques de detection des flux et des retombées polliniques; etude de la sedimentation des pollens et des spores a la surface du sol[J]. *Pollen & Spores*, 1974, 16: 103—142.
- [42] AGNER P. Séquences de dépôt du Quaternaire supérieur et variations climatiques en Mer de Chine de l'Est[D]. Université de Lille 1, 2001.
- [43] MARTINSON D, PISIAS N, HAYS J, et al. Age dating and orbital theory of the ice ages: development of a high resolution 0-300 000 years chronostratigraphy[J]. *Quaternary Research*, 1987(27): 1—29.
- [44] YUAN P C, SHIU M W, KUO Y W, et al. Foraminiferal oxygen isotope stratigraphy and high-resolution organic carbon, carbonate records from the Okinawa Trough (IMAGES MD012404 and ODP Site 1202)[J]. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 2005, 16(1): 57—73.
- [45] MENG Y L, KUO Y W, YUE G C. High resolution oxygen isotope stratigraphy for the last 150 000 years in the southern South China Sea; Core MD972151[J]. *The Journal of Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1999, 10(1): 239—254.
- [46] 李铁刚, 孙荣涛, 张德玉, 等. 晚第四纪对马暖流的演化和变动: 浮游有孔虫和氧碳同位素证据[J]. 中国科学, 2007, 37(5): 660—669.
- [47] XIONG Y Q, LIU Z X, LI T G, et al. The sedimentation rates in the Okinawa Trough during the Late Quaternary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(4): 146—154.
- [48] GRIMM E C. CONISS: A FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares[J]. *Computer & Geosciences*, 1987, 13(1): 13—35.
- [49] SUN X J, LUO Y L, HUANG F, et al. Deep-sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of east Asian monsoon[J]. *Marine Geology*, 2003, 201: 97—118.
- [50] CHAPPEL J, OMURA A, ESAT T, et al. Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 141: 227—236.
- [51] KURT L, JOHN C. Sea level change through the last glacial cycle[J]. *Paleoclimate*, 2001, 292: 679—686.
- [52] SCHWEITZER P N. ANALOG: a program for estimating paleoclimate parameters using the method of modern analogs[R]. U. S. Geological Survey Open-file Report, 1994: 94—645.
- [53] Jackson S T, Williams J W. Modern analogs in Quaternary paleoecology: here today, gone yesterday, gone tomorrow? [J]. *Annual Review Earth and Planetary Sciences*, 2004, 32: 495—537.
- [54] 郑卓, 黄康有, 邓福, 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[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(4): 534—543.
- [55] 孙湘君, 宋长青, 陈旭东. 中国第四纪孢粉数据库(CPD)和生物群区(Biome 6000)[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 407—411.

- [56] ZHENG Z, YUAN B Y, NICOLE P M. Paleoenvironments in China during the last glacial maximum and the Holocene optimum[J]. *Epi-sodes*, 1998, 21(3): 152—158.
- [57] ZHENG Z. Vegetation and climate since the late Pleistocene in southern China[J]. *Journal of Geosciences of China*, 2000, 2(1): 7—20.
- [58] 孟宪伟, 杜德文, 刘焱光, 等. 冲绳海槽近 3.5 万 a 来陆源物质沉积通量及其对气候变化的响应[J]. *海洋学报*, 2007, 29(5): 74—80.
- [59] 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[J]. *云南植物研究*, 2009, 31(5): 389—398.

Pollen records from the middle Okinawa Trough and the terrigenous pollen source analysis for 70 ka BP

YANG Shi-xiong¹, ZHENG Zhuo¹, WEI Jin-hui¹, DENG Yun¹, JEAN-PIERRE Suc²,
SERGE Berne³, LI Jie¹

(1. *Department of Earth Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China*; 2. *Institut des Sciences de la Terre Paris, Université P. et M Curie-Paris 6, 75005 Paris, France*; 3. *Université de Perpignan Via Domitia, 66860 Perpignan, France*)

Abstract: Core DGKS-9602 is located in the middle Okinawa Through. The total length of the core is 931 cm and 88 samples were collected from the core. the core age appears to cover marine isotope stages (MIS) 1~4, with the oldest age at approximatedly 73 ka BP. A pollen analysis from the core indicates that there is a strong relationship between pollen zones and oxygen isotope stages. The curve of ratio between *Pinus* and *Artemisia* (*P/A*) is concordance with sea-level change of the region. Fossil pollen and modern surface pollen were used to calculate the Euclidean distance by non-similarity analogy and to estimate the pollen source areas, which made it possible for further study on the changes of the terrigenous matter source regions under different sea-level conditions. The results show that during MIS 4 the main source of pollen is the north region of the Okinawa Through, which is dominated by coniferous forest. At the MIS 3 stage, the sea-level is relatively high, and the eastern China (the Middle and Lower Changjiang River) and Kyushu may be the main source areas during this period where the mountain conifers mix with some broad-leaved plants dominated the forests. During MIS 2, the sea level declined dramatically, that is coincided with *P/A* ratio by dropping sharply to <1 . The pollen analogue study shows that the pollen grains at last glacial maximum (MIS 2) may be mostly derived from the vicinal continental shelf plains in a short transport distance where the vegetation is predominated by grassland and wetland. Regarding to the Holocene, the result indicates a wide and diverse source areas, including the Changjiang River and the Huanghe River in China, as well as the water current of Kuroshio flowing from tropical regions.

Key words: Okinawa Trough; pollen analysis; palaeo-vegetation; sea-level change; pollen sources