



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

徐红艳^{①②}, 常凤鸣^③, 罗运利^{①*}, 孙湘君^{①④}

① 中国科学院植物研究所, 系统与进化植物学国家重点实验室, 北京 100093;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;

④ 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

* 联系人, E-mail: lyl@ibcas.ac.cn

2008-11-25 收稿, 2009-03-02 接受

国家自然科学基金(批准号: 40671198, 40506015)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815906)资助项目

摘要 对冲绳海槽北部 PC-1 岩芯共分析了 103 个孢粉样品, 底部校正年龄为 24280 cal a BP, 样品的时间分辨率为 230 a。根据孢粉百分比的变化, 可划分出 4 个孢粉带: I 带(812~715 cm, 24.2~21.1 cal ka BP)、II 带(715~451 cm, 21.1~15.2 cal ka BP)、III 带(451~251 cm, 15.2~10.8 cal ka BP)、IV 带(251~0 cm, 10.8~0.3 cal ka BP), 分别对应 MIS 3 末期、末次冰盛期、冰消期和全新世。末次冰盛期草本植物花粉占优势, 孢粉沉积率较高, 此时草本花粉主要来源于出露的大陆架, 其上发育了以蒿属为主的草地植被, 气候比较寒冷干燥; 冰消期海平面开始回升, 松属含量升高, 草本植物花粉含量下降; 全新世以木本植物花粉占绝对优势, 栗属-栲属花粉迅速增加, 蕨类孢子含量升高, 草本植物花粉含量锐减, 孢粉沉积率降低。由于海平面回升, 大陆架被淹没, 此时孢粉主要来源于日本岛, 九州地区生长了以栲属、栎属为主的常绿阔叶与落叶阔叶林, 气候温暖湿润。起源于菲律宾吕宋北部至塔斯马尼亚和新西兰气候潮湿的山地林中的叶枝杉属花粉在整个岩芯中零星出现, 暗示了黑潮的影响或者是较强的夏季风。草本植物与松属花粉百分比变化很好地反映了海平面的升降, 松属花粉含量较高指示海平面较高。频谱分析显示存在千年尺度的准周期变化, 有明显的 6.8, 3.8, 2.2, 1.6 ka 的周期。

关键词
东海
冲绳海槽
孢粉学
黑潮
古环境
氧同位素阶

东海陆架是世界上最宽阔的陆架之一, 面积达 770000 km² 左右^[1], 在末次冰盛期(LGM), 东海海平面下降 120~130 m 左右, 绝大部分陆架暴露出海面^[2]。而冲绳海槽是第四纪以来一直保持海洋环境的东海深海区, 该区的海洋环流系统主要受黑潮暖流和沿岸流控制。研究该区深海沉积物中的孢粉有望恢复东海当时出露陆架及周边陆地上发育的古植被, 进而推测古气候与古洋流变化。近年来利用该区孢粉和有孔虫的研究推测古环境和古洋流的变化, 尚存

在争议: 一种观点认为末次盛冰期, 由于琉球群岛和台湾岛之间存在陆桥^[3], 黑潮已东移出冲绳海槽^[3~5], 另一种观点则认为末次冰盛期黑潮仍然流经冲绳海槽^[6,7]。此外 Kawahata 等人^[6]和邓韞等人^[8]研究认为 MIS 2 期出露的大陆架上发育了草地为主的植被; 吕厚远等人^[9]对孢粉、植硅体和硅藻、有孔虫的研究则发现中国东部及邻海区 20 ka BP 以来海洋环境的变化滞后陆地气候的变化约 1 ka。

本文以冲绳海槽北部 PC-1 岩芯孢粉记录为材料,

引用格式: 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

Xu H Y, Chang F M, Luo Y L, et al. Palaeoenvironmental changes from pollen record in deep sea core PC-1 from northern Okinawa Trough, East China Sea during the past 24 ka. Chinese Sci Bull, 2009, 54: 3739~3748, doi: 10.1007/s11434-009-0223-2

以期重建周边地区 24 cal ka BP 以来的古环境.

1 研究区概况

PC-1 站点(31°27.50' N, 128°24.80' E)位于冲绳海槽北部, 黑潮支流对马暖流东侧(图 1), 距离日本九州岛直线距离约 150 km, 距离中国大陆约 600 km. 黑潮起源于西赤道太平洋, 沿东海陆架外缘向东北方向流动, 在大约 29°~30°N 间形成分支, 其主流穿越吐噶喇海峡返回太平洋, 其分支则继续北上, 与来自东海北部的混合水和东海外陆架的混合水一道形成对马暖流. 黑潮是一支高温高盐的流系, 以流速强、流量大、流幅窄、流程远长为特点, 携带了巨大的水量、热量和能量, 对冲绳海槽以及邻近海区海洋沉积物分布特征和古气候变化有着直接的影响.

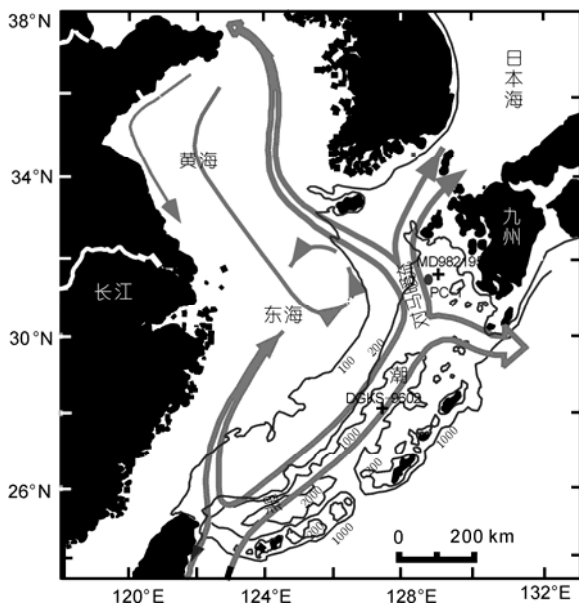


图 1 现代黑潮流系和 PC-1 站点位置图

据参考文献[10]修改

现代沉积物源研究表明: PC-1 站点的陆源物质主要来自日本岛^[11]. 就现代自然植被而言, 九州地区分布着常绿阔叶与落叶阔叶混交林, 海拔 1000 m 以下的地区分布着以壳斗科(Fagaceae)、山茶科(Theaceae)、樟科(Lauraceae)等为主的常绿阔叶林, 常见栲类(*Castanopsis*)、常绿栎类(*Quercus-evergreen*)、润楠类(*Machilus*)等; 海拔 1000 m 以上的地区分布着以水青冈(*Fagus*)为主, 伴生有落叶栎类(*Quercus-deciduous*)、槭(*Acer*)、桦(*Betula*)、鹅耳枥(*Carpinus*)的落叶阔叶林, 以及落叶阔叶林受破坏后形成很多

人工针叶林, 主要有 *Larix leptolepis*, *Cryptomerica japonica*, *Chamaecyparis obtusa*, *Pinus densiflora*, *Abies firma*, *Tsuga sieboldii* 等^[11,12].

2 材料与方法

PC-1 岩芯为 1990 年 3 月由中国科学院海洋研究所“科学一号”考察船于冲绳海槽北部执行科学考察时取得(图 1), 水深 590 m, 柱长 812 cm. 整个岩芯平均沉积速率为 33 cm/ka, 从上到下岩性依次为粉砂质黏土软泥(0~165 cm)、黏土质粉砂(165~410 cm)、粉砂质黏土(410~610 cm)、细粉砂(610~812 cm), 含有孔虫及生物碎屑, 其中在 123~130, 315~330, 735 cm 附近、746~748 cm 处夹有火山玻璃和碎屑.

孢粉样品分析按间隔 8 cm 取样, 个别为 4~6 cm, 共分析了 103 个孢粉样品. 样品干重多在 4~8 g 间, 处理前加入一片外加石松片剂(University of Lund, batch 483216), 每片约含石松孢子 18583 粒, 用以计算孢粉的沉积率. 实验中用 15% 的盐酸溶解钙质, 用氢氟酸除去硅质, 最后用比重为 2.0 g/cm³ 的重液浮选, 得到干净富集的孢粉. 在 Olympus CX31 光学显微镜 400×下鉴定统计. 每个样品统计陆生植物花粉 200 粒以上, 个别样品中孢粉含量较少, 统计孢粉数量略少. 孢粉百分比计算以陆生植物花粉总和为基数, 用 Tilia 软件绘制孢粉百分比和沉积率图.

地层年龄测定由中国科学院海洋研究所挑选直径大于 250 μm 的浮游有孔虫 *Neogloboquadrina dutertrei* 或双壳类(Mollusc)在美国伍兹霍尔海洋研究所 AMS 年代测试中心测定. 共测定了 11 个 AMS ¹⁴C 样品年龄, 其中有两个出现了颠倒(405 cm: (9360 ± 50) a BP 和 809 cm: (13650 ± 80) a BP), 采用其中的 9 个数据建立年龄标尺. 年龄校正用 Calib5.1.0 软件^[13,14], 海-气碳储库差值采用平均值-400(表 1, 图 2). 通过相邻样品深度的线性内插获得每个样品的年龄, 采用外延法得到顶部和底部年龄分别为 351, 24280 cal a BP, 孢粉样品的时间分辨率平均为 230 a. PC-1 岩芯中两个典型的火山灰层: 6.1 ka BP (123~130 cm)和 11.5 ka BP(315~330 cm), 可能分别与 K-Ah(6.3 ka BP)和 U-Ok(9.3 ka BP)火山灰层^[15]相对应, 经过校正, 分别为 6.5, 12.8 cal ka BP.

3 孢粉分析结果

3.1 孢粉种类

共鉴定出 103 类孢粉类型, 其中木本植物花粉

表 1 PC-1 岩芯 AMS ¹⁴C 年龄和沉积速率

深度/cm	材料	AMS ¹⁴ C 年龄/a BP	校正年龄/cal a BP	沉积速率/cm · ka ⁻¹
10	<i>N. dutertrei</i>	1290 ± 30	836 (793~883) ^{a)}	
66	<i>N. dutertrei</i>	3880 ± 30	3851 (3806~3905)	18.6
150	<i>N. dutertrei</i>	7000 ± 50	7496 (7452~7546)	23.1
222	<i>N. dutertrei</i>	9160 ± 40	9965 (9885~10072)	29.2
351	<i>N. dutertrei</i>	12150 ± 70	13600 (13501~13695)	35.5
500	<i>N. dutertrei</i>	13850 ± 50	15978 (15781~16153)	62.7
598	Mollusc	17000 ± 60	19693 (19578~19694)	26.4
708	Mollusc	18100 ± 60	20888 (20695~21055)	92.1
752	<i>N. dutertrei</i>	19200 ± 95	22340 (22251~22428)	30.3

a) 括号中的年龄范围为 1σ 的置信区间

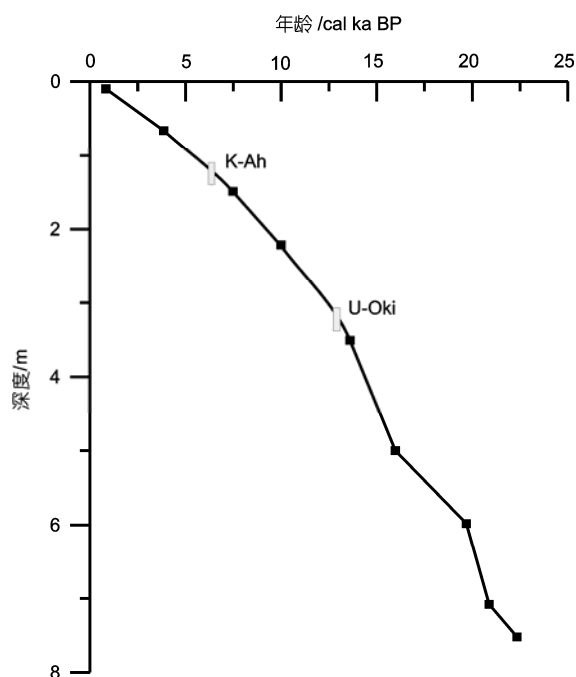


图 2 PC-1 岩芯年龄与沉积速率曲线图

56 类, 草本 19 类, 蕨类孢子 22 类, 水生草本 4 类。按照现代植物生活习性及其分布范围将除松属(*Pinus*)以外的化石孢粉分成以下几种类型:

山地针叶林组(Montane conifers): 冷杉属(*Abies*)、云杉属(*Picea*)、铁杉属(*Tsuga*)、落叶松属(*Larix*)等。

热带山地针叶林组(Tropical montane conifers): 罗汉松属(*Podocarpus*)、叶枝杉属(*Phyllocladus*)、杉科(*Taxodiaceae*)等。

温带落叶阔叶林组(Temperate broad-leaved taxa): 落叶栎属(*Quercus-deciduous*)、桦木属(*Betula*)、桤木属(*Alnus*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、榛属(*Corylus*)、水青冈属(*Fagus*)、胡桃属(*Juglans*)、榆属(*Ulmus*)、柳属(*Salix*)、槭属(*Acer*)、椴属(*Tilia*)、枫杨属(*Pterocarya*)、

蔷薇科(*Rosaceae*)等。

热带亚热带植物组(Tropical and subtropical taxa): 以常绿栎属(*Quercus-evergreen*)、栗属-栲属(*Castanea-Castanopsis*)为主, 还见有大戟科(*Euphorbiaceae*)、阿丁枫属(*Altingia*)、冬青属(*Ilex*)、山核桃属(*Carya*)、化香属(*Platycarya*)、黄杞属(*Engelhardtia*)、野桐属(*Mallotus*)、棕榈科(*Palmae*)、桑科(*Moraceae*)、桃金娘科(*Myrtaceae*)、山龙眼科(*Proteaceae*)、芸香科(*Rutaceae*)、山茶科(*Theaceae*)、漆树科(*Anacardiaceae*)、五加科(*Araliaceae*)、无患子科(*Sapindaceae*)等。

淡水水生植物组(Aquatics): 泽泻属(*Alisma*)、香蒲属(*Typha*)、狐尾藻属(*Myriophyllum*)、黑三棱科(*Sparganiaceae*)等。

草本植物花粉组(Herbs): 常见蒿属(*Artemisia*)、禾本科(*Gramineae*)、莎草科(*Cyperaceae*)、菊科(*Compositae*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、蓼属(*Polygonum*)、十字花科(*Cruciferae*)、唐松草属(*Thalictrum*)、地榆属(*Sanguisorba*)、伞形科(*Umbelliferae*)、毛茛科(*Ranunculaceae*)等, 偶见银莲花属(*Anemone*)、百合科(*Liliaceae*)、唇形科(*Labiatae*)、牻牛儿苗科(*Geraniaceae*)等。

麻黄属(*Ephedra*)虽然属于裸子植物, 但与白刺属(*Nitraria*)均代表了极干旱的环境, 将两者归为一组。

蕨类孢子(Ferns): 常见的类型有水龙骨属(*Polypodium*)、里白属(*Hicriopteris*)、石韦属(*Pyrrosia*)、卷柏属(*Selaginella*)、凤尾蕨属(*Pteris*)、石松属(*Lycopodium*)、芒萁属(*Dicranopteris*)、紫萁属(*Osmunda*)、金毛狗属(*Cibotium*)、桫欏属(*Cyathea*)、骨碎补科(*Davaliaceae*)、鳞毛蕨科(*Dryopteridaceae*)、金星蕨科(*Thelypteridaceae*)等。一些单缝孢类、三缝孢类难以进一步区分, 归于单缝孢类(Monolete-

spores)、三缝孢类(Trilete-spores).

在样品中还见有个别淡水生藻类,主要有环纹孢(*Concentricystes*)、双星藻(*Zygnema*),还有个角苔属孢子(*Anthoceros*).

3.2 孢粉组合特征

根据孢粉组合的变化(图 3, 4), 自下而上可以划分出 4 个孢粉组合带, I, II, III 带草本植物花粉含量很高, 木本植物与蕨类孢子含量较低; IV 带木本植物花粉含量占绝对优势, 蕨类孢子含量上升, 草本植物花粉含量下降, 具体描述如下:

I 带: 812~715 cm, 24.2~21.1 cal ka BP(MIS 3 末期) 本带草本植物花粉含量较高(39.6%~56.5%), 平均 46.5%, 以蒿属(32.3%, 平均百分含量, 下同)、藜科(4.8%)、莎草科(3.2%)、菊科(2.5%)、禾本科(1.3%)、唐松草属(1.1%)为主. 木本植物中除松属(18.6%)外, 以山地针叶林组(16.4%)占优势, 如云杉属(11.7%)、冷杉属(1.6%)、铁杉属(3.2%), 以及温带落叶阔叶林组(14%)为主, 如落叶栎类(7%)、桦木属(1.6%)、桤木属(2.1%)、榛属(1%), 热带亚热带植物类型只有 3.9%, 如栗属-栲属(1.6%)、常绿栎类(1.4%). 水生草本(0.6%)、白刺和麻黄(0.1%)、热带山地针叶林(0.5%)含量均极低, 叶枝杉属零星出现. 蕨类孢子占 3.3%. 孢粉总沉积率 $174.7 \text{ 粒} \cdot (\text{g/cm})^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 草本植物和木本植物分别为 $80.7, 91.4 \text{ 粒} \cdot (\text{g/cm})^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

II 带: 715~451 cm, 21.1~15.2 cal ka BP(末次冰盛期) 本带草本植物花粉含量升高并占据优势(39.6%~64.9%), 平均 54.5%, 蒿属占 36.1%; 木本植物花粉含量减少, 松属(10.1%)、云杉属(6.8%)、冷杉属(0.6%)、铁杉属(2.5%)含量下降, 叶枝杉属有零星出现. 落叶栎类(12%)、栲属(4%)、榆属(1.1%)含量升高. 蕨类孢子占 4.9%, 略有升高. 其余类型含量仍很低. 虽然山地针叶林组百分比(9.9%)降低, 但由于孢粉沉积率大幅增加(总沉积率 $276.4 \text{ 粒} \cdot (\text{g/cm})^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 约为前期的 1.5 倍, 草本和木本植物分别为 $147.1, 117.2 \text{ 粒} \cdot (\text{g/cm})^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), 因而它们的绝对数量仍较高.

III 带: 451~251 cm, 15.2~10.8 cal ka BP(冰消期) 本带草本植物花粉含量明显下降, 占 37.7%(28.6%~48.6%), 低于 I, II 带, 其中以藜科(2.2%)、菊科(1.6%)、蒿属(28.4%)为主. 木本植物花粉中松属(24.6%)、温带落叶阔叶(22.3%)如落叶栎类(15.9%)、热带亚热带植物(10%)如栗属-栲属(5.1%)、常绿栎类

(2%) 含量增加. 山地针叶林组(4.8%)如云杉属(2.3%)、铁杉属(1.6%)含量继续下降. 蕨类孢子(7.2%)所占百分比继续增加. 其余类型含量均极低. 孢粉总沉积率较高($343.7 \text{ 粒} \cdot (\text{g/cm})^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), 其中草本花粉沉积率降低, 木本花粉沉积率升高, 分别为 $123.5, 195.4 \text{ 粒} \cdot (\text{g/cm})^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

IV 带: 251~0 cm, 10.8~0.3 cal ka BP(全新世) 该带最大的特征是木本植物花粉(69.7%~95.2%)占绝对优势, 平均 86.3%, 草本植物花粉含量下降至 13.7%, 蕨类孢子上升为 12.7%, 其中水龙骨科(1.6%)较多. 草本植物中以蒿属(9.8%)、藜科(1.2%)为主; 木本植物花粉中松属(37.4%)、常绿栎类(4%)含量增加, 栗属-栲属快速增加到 23.6%, 温带落叶阔叶(16.8%)如落叶栎类(13%)、山地针叶林组(2.9%)如云杉属(1.8%)含量减少. 在个别样品中鉴定出叶枝杉属. 孢粉总沉积率降低($172.8 \text{ 粒} \cdot (\text{g/cm})^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), 草本与木本植物分别为 $20.8, 132.4 \text{ 粒} \cdot (\text{g/cm})^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

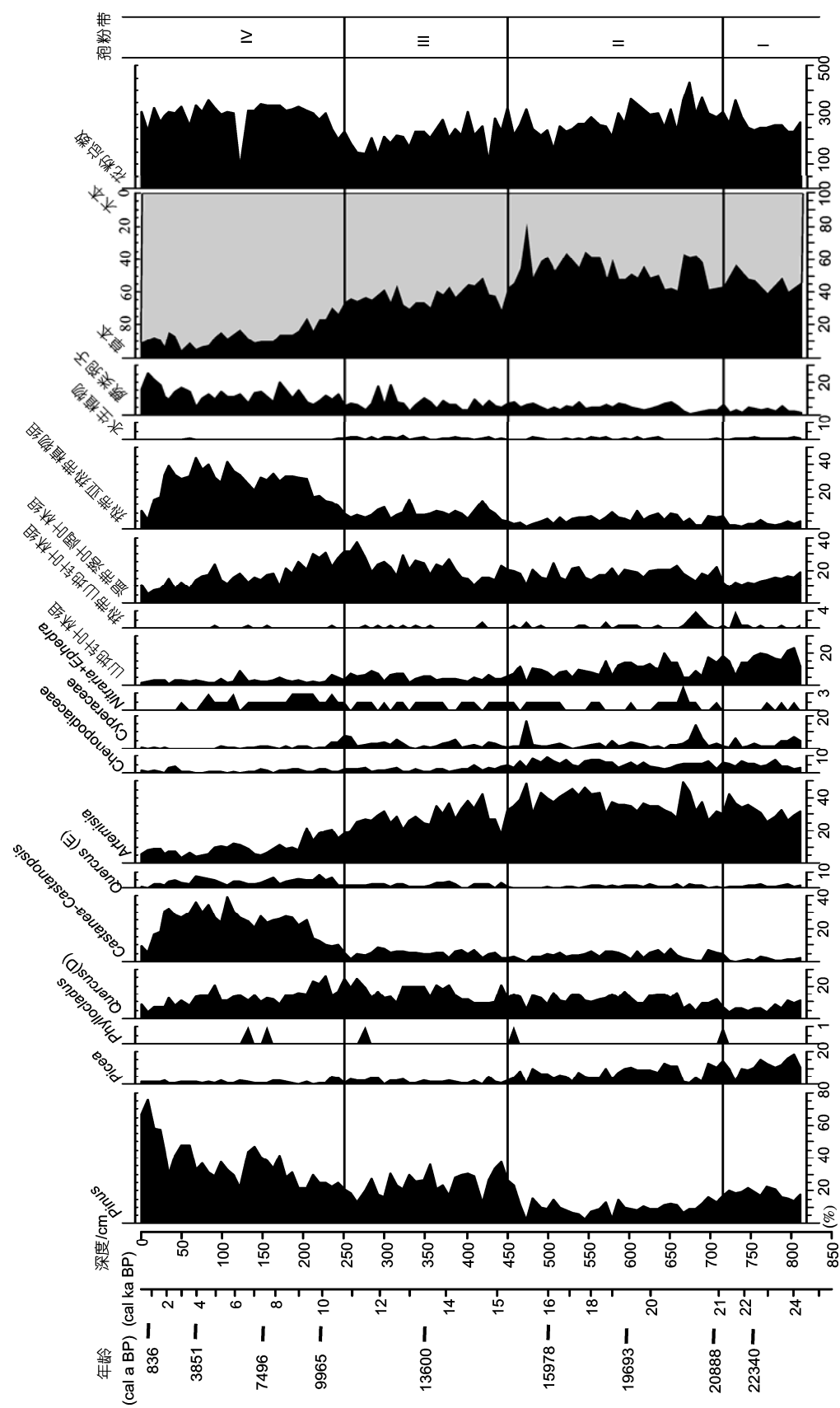
4 讨论和结论

4.1 孢粉反映的 24 cal ka BP 以来的植被变化

对东海冲绳海槽现代海洋沉积物孢粉的研究结果^[16]表明: 与 PC-1 站点邻近的地区孢粉以松属、栎属、栲属为主, 其中常绿阔叶花粉含量很高, 栲属占孢粉总数的 11%, 青冈栎占 10% 以上, 此外, 组合中草本花粉含量很低. 这与 PC-1 岩芯顶部孢粉分析结果一致.

I 带: (812~715 cm, 24.2~21.1 cal ka BP) MIS 3 末期, 沉积速率为 31 cm/ka . 从孢粉组成上来看, 木本植物花粉略占优势(53.5%), 其中山地针叶林组含量较高(16.4%), 温带落叶阔叶林组(14%)次之, 草本植物中以蒿属为主. 当时海平面较现在低 80 m 左右^[2], PC-1 站点离中国东部大陆架的距离大约缩短 400 km, 大面积的陆架出露成为陆地, 地表以粉砂质沉积物为主, 这为蒿属、藜科等草本植物的生长提供了良好的条件, 推测在出露的大陆架上生长着以蒿属为主的草地, 周边高海拔的地方则可能发育针阔混交林.

II 带: (715~451 cm, 21.1~15.2 cal ka BP) 末次冰盛期, 沉积速率为 45 cm/ka . 草本植物花粉含量很高, 木本植物花粉含量下降, 松属百分含量降至最低, 但是热带亚热带植物组和温带落叶阔叶林组的含量却有所升高, 山地针叶林组含量(9.9%)虽然较 I 带低,



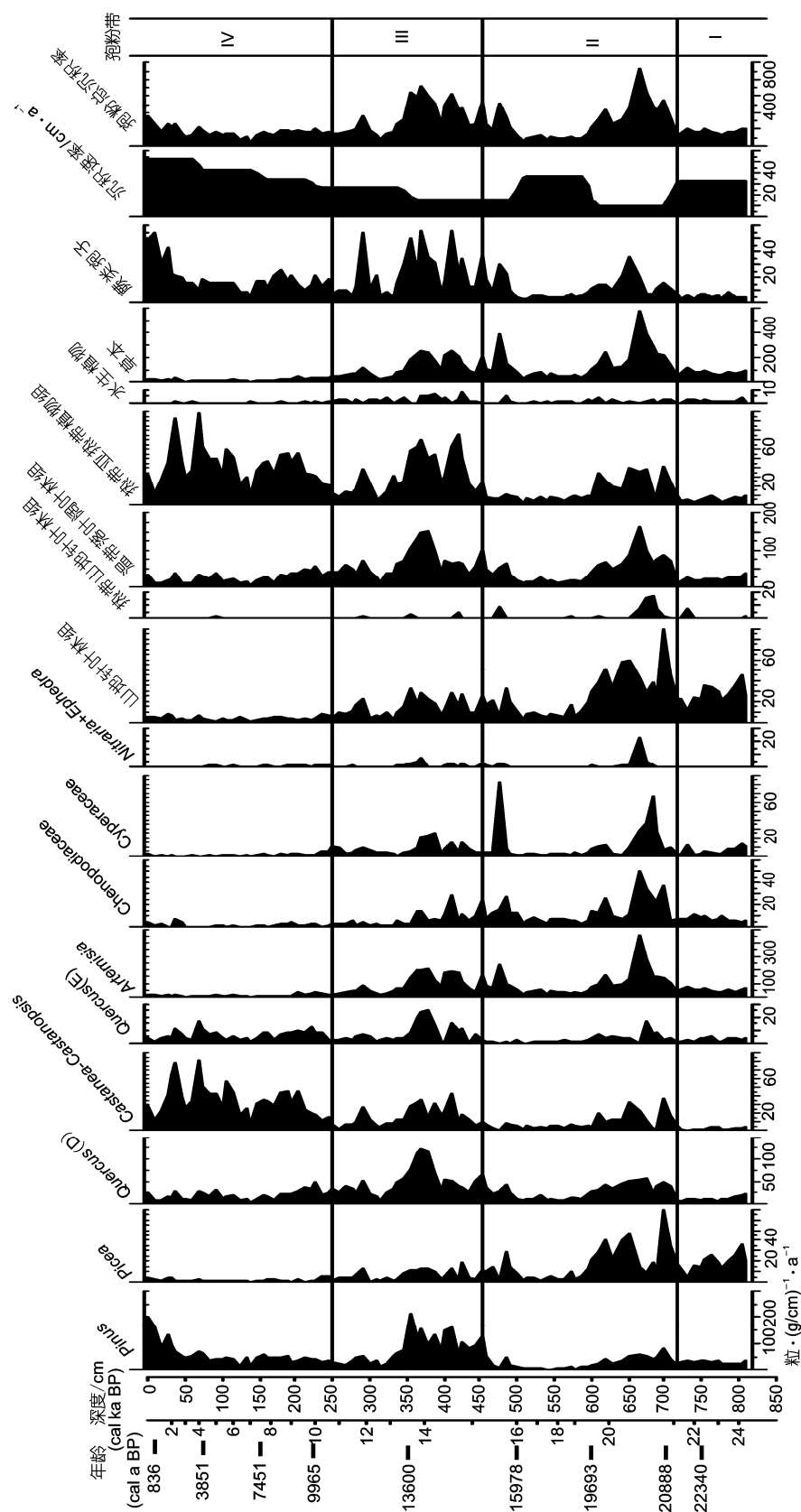


图 4 PC-1 岩芯孢粉沉积率图

但由于花粉沉积率高, 因而其绝对数量较高。末次冰盛期东海海平面继续下降, 可达 120 m 左右^[2], 大陆架完全出露水面, 海岸线距离现代长江出海口超过 500 km, 此时冲绳海槽的沉积物主要来自大陆架的剥蚀, 孢粉来源与沉积地点的距离缩短, 因此沉积物和孢粉沉积速率均较高。大陆架上以蒿属为主的草本植物更加发育, 同时温带阔叶植物花粉显示周边可能存在稀疏的落叶阔叶林, 高海拔的地方(长江中上游和日本九州地区)可能存在针阔混交林。

邓韞等人^[8]研究了冲绳海槽中部 DGKS-9602 孔 (28°07.491'N, 127°22.13'E) 末次冰盛期的孢粉资料, 认为出露的大陆架上发育了草地为主的植被, 与我们的结论一致。前人利用孢粉资料重建 LGM 时期的生物群区^[17,18], 表明 LGM 时中国大部分区域被草原和荒漠占据, 草原已推进至现代常绿阔叶林区的北部, 而常绿阔叶林退到现代热带区域, 针阔混交林退到常绿阔叶林区。根据这一成果, LGM 时长江中下游的植被也应为草原。Tsukada^[19]研究了日本 LGM 时期的孢粉资料, 认为当时整个日本群岛多为针叶林覆盖, 九州地区当时为以 *Picea polita*, *Abies firma*, *Tsuga sieboldii*, *Pinus*, *Fagus*, *Ulmus* 为主的温带针叶-落叶阔叶林, 乔木花粉含量在 95% 以上。PC-1 岩芯中此阶段草本花粉含量很高, 同时温带落叶阔叶林组的含量较 I 带高, 可能反映了在末次冰盛期 PC-1 孔沉积物中的草本植物花粉主要来自出露的东海大陆架, 而针叶及落叶阔叶林花粉可能是九州植被对该地区沉积的影响。

III 带: (451~251 cm, 15.2~10.8 cal ka BP) 末次冰消期, 沉积速率为 46 cm/ka。草本植物花粉以及云杉属、冷杉属等山地针叶林组的花粉含量降低, 松属、热带亚热带植物组、温带落叶阔叶林组以及蕨类孢子的含量升高, 表明气候转暖转湿, 海平面开始回升。但仍有部分陆架出露水面, 推测其上仍然生长草地, 周边生长落叶阔叶林。孢粉沉积率和沉积物沉积速率很高, 可能是由于此时, 尽管海平面已有所升高, 但大陆架仍然出露, 而降雨量增加, 由河流运移来的物质增加所致。Xu 等人^[20]研究了位于冲绳海槽北部的 KH82-4-14 孔 (31°44.4'N, 129°02.1'E) 和中部的 RN80-PC3 孔 (29°04.1'N, 127°22.6'E) 沉积物中的有孔虫发现, 在 19.5~10.5 cal ka BP 时段低盐温水种含量很高, 推测此时河流注入较多, 使得盐度降低。与我们的研究结论相吻合。

IV 带: (251~0 cm, 10.8~0.3 cal ka BP) 全新世, 沉积速率为 24 cm/ka。松属、蕨类孢子百分含量继续增加, 栗属-栲属花粉百分含量急剧增加, 草本植物花粉含量降低, 沉积物和孢粉沉积速率大大降低。这说明由于大陆架的沉没, 研究地区远离中国大陆, 这时的花粉主要来自日本, 九州地区当时分布以栲属、栎属为主的常绿阔叶和落叶阔叶林, 气候温暖湿润。此时沉积物和孢粉沉积速率的降低, 与海平面升高, 大陆架重新被淹没有关。宋长青等人^[11]研究了位于冲绳海槽北部的 B-3GC 孔全新世以来的孢粉, 认为当时发育以常绿阔叶林和落叶阔叶林交替出现为主的植被。

综上所述, 可归纳为: 冰期时东海大陆架大面积的出露, 孢粉源地距离沉积地点较近, PC-1 岩芯中此阶段草本植物花粉含量较高, 孢粉沉积率较高, 反映出大陆架上发育了蒿属为主的草地植被, 山地针叶林组和温带落叶阔叶组花粉指示当时日本九州地区可能生长了针阔混交林; 进入全新世, 海平面回升导致大陆架被淹没, 此时孢粉源地发生了变化, 孢粉主要来源于九州地区, 孢粉沉积率降低, 栗属-栲属、松属含量迅速升高, 反映了九州地区发育常绿阔叶和落叶阔叶林。

4.2 松属和草本植物花粉百分含量变化对海平面的指示意义

如图 5 所示, PC-1 孔中松属花粉的百分含量变化与氧同位素曲线的变化趋势一致: LGM 低海面时期 PC-1 钻孔位置距离岸线十分接近, 松属花粉含量最低, 草本植物花粉含量较高; 末次冰消期时海平面开始回升, 松属花粉含量上升; 进入全新世, 海平面逐渐升至现代水平, 松属花粉含量升高, 草本植物花粉含量迅速下降。因此, 可认为该孔松属花粉与草本植物花粉的相对含量变化代表了钻孔离岸距离远近的变化即相对海平面升降。这与邓韞等人^[8]对冲绳海槽中部 DGKS-9602 孔孢粉研究的结果一致; 在前人对南海的研究中亦得到类似的现象^[21,22]。孙湘君等人^[23]认为草本植物花粉与松属花粉的比值 (*Herbs/Pinus*) 即 H/P 可以反映研究点离陆地的距离: H/P 值升高反映海退, 陆架出露, 岸线逼近; H/P 值降低反映海进, 陆架淹没, 岸线远离; 同时 H/P 值升降幅度越大, 则显示海岸线迁移的幅度越大, 即陆架宽度越大。PC-1 孔 H/P 值在 MIS3 末期为 2.5 (平均值, 下同), LGM 期最高 (5.4), 在冰消期下降为 1.7, 全新世降至 0.4, 反

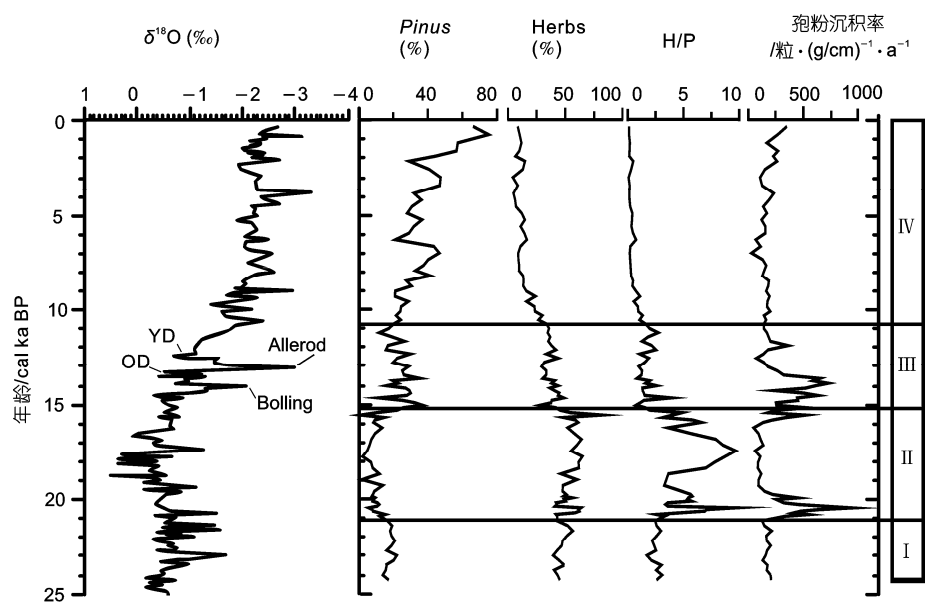


图 5 PC-1 岩芯孢粉百分含量、H/P 值、沉积率与 MD982195 孔的氧同位素曲线对比图^[10]
YD 和 OD 分别代表新、老仙女木期

映了东海宽阔的大陆架在冰期时广泛出露的特征.

4.3 叶枝杉属花粉

叶枝杉属花粉在日本的第三纪-第四纪沉积物中未曾发现过. 现代研究资料表明: 该属植物分布于菲律宾吕宋北部至塔斯马尼亚和新西兰气候潮湿的山地林中, 我国台湾没有分布^[24]. 该属花粉个体较小、气囊很小(图 6). PC-1 站点整个岩芯有叶枝杉属花粉零星出现(图 3, 表 2), 推测花粉传播的动力可能有两种. 一种是洋流, 可能是花粉被河流带入海洋, 继而被洋流远距离运输, 在该地区传输的动力是黑潮, 说明黑潮 24 cal ka BP 以来可能都影响着冲绳海槽北部的沉积环境. 在与 PC-1 邻近的钻孔 MD982195 (31°38.33'N, 128°56.63'E)的孢粉分析中也得到了这一结论^[6]. 前人对冲绳海槽区有孔虫的研究也支持了这一观点^[7,12,20]. 另一种可能是由较强的夏季风携带而来.

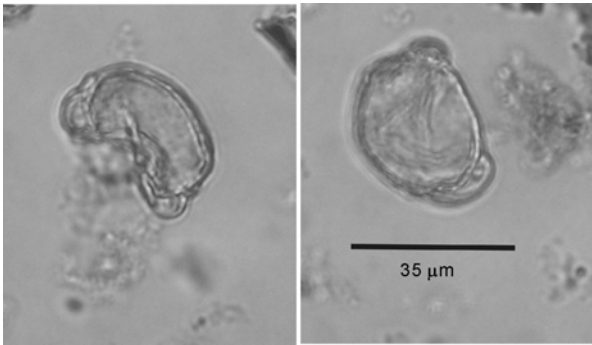


图 6 叶枝杉属花粉形态

4.4 频谱分析

孢粉百分比显示各个阶段各类型孢粉含量存在明显的波动(图 3), 在末次冰消期和全新世尤为明显, 末次冰消期松属与蒿属交替升降, 全新世松属、落叶栎类、栗属-栲属波动明显. 对 PC-1 岩芯中松属、

表 2 叶枝杉属花粉含量及沉积率

深度/cm	校正年龄/cal a BP	浓度/粒·g ⁻¹	百分含量(%)	沉积率/粒·(g/cm) ⁻¹ ·a ⁻¹
131	6670	15	0.3	0.3
155	7667	16	0.3	0.4
275	11458	36	0.7	1.3
459	15323	18	0.5	1.1
715	21119	12	0.3	0.4

蒿属、落叶栎、温带落叶阔叶类、热带亚热带组分的孢粉百分比含量分别进行了频谱分析^[25], 反映出相似的周期性, 图 7 示松属花粉含量揭示的千年级准周期变化. 其中 6.8 ka 周期可与北大西洋发现的 Heinrich 周期相对应^[26-28], 3.8, 2.2 ka 周期可能与格陵兰冰芯中发现的 D-O 旋回的周期相对应^[29,30], 1.6 ka 周期与一些热带海洋地区的研究中发现的 1.5 ka 周期对应^[5,31]. 由于样品分辨率为 230 a/样, 0.7 ka 周期可信度较差. 孢粉揭示的古植被与古气候的周期性变化与冰筏沉积物、全球碳循环过程可能有内在的一致性. 千年尺度的气候变化已经得到了很多研究者的证实, 可能与季风的的活动周期有关, 受太阳活动、大气循环和大洋内部不稳定性等多种因素的影响, 然而其机制与影响仍有待于进一步的研究.

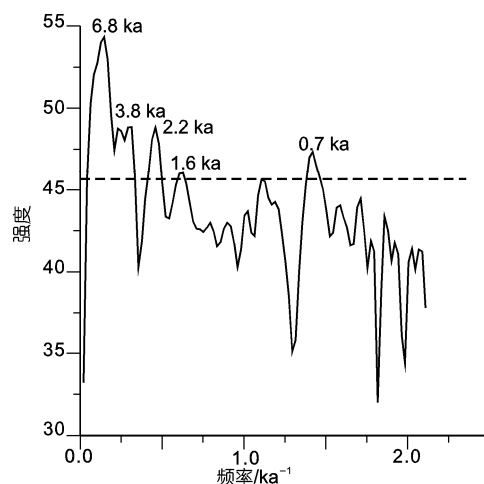


图 7 松属花粉百分含量频谱分析显示的千年尺度准周期
虚线代表 95% 的可信度

致谢 感谢中国科学院植物研究所孔昭宸研究员提供的专业指导和帮助, 席以珍研究员、张玉龙研究员在孢粉鉴定过程中给予的极大帮助.

参考文献

- 1 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质. 北京: 科学出版社, 1987. 1—200
- 2 Saito Y, Katayama H, Ikehara K, et al. Transgressive and highstand systems tracts and post-glacial transgression, the East China Sea. *Sediment Geol*, 1998, 122: 217—232^[DOI]
- 3 Ujiie H, Ujiie Y. Late Quaternary course changes of the Kuroshio Current in the Ryukyu arc region, northwestern Pacific Ocean. *Mar Micropaleontol*, 1999, 37: 23—40^[DOI]
- 4 翦知湜, Saito Y, 汪品先, 等. 黑潮主流轴近两万年来位移. *科学通报*, 1998, 43: 532—535^[DOI]
- 5 Jian Z M, Wang P X, Saito Y, et al. Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 184: 305—319^[DOI]
- 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^[DOI]
- 7 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. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 50: 660—669^[DOI]
- 8 邓韫, 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
- 9 吕厚远, 刘振夏, 刘宝柱, 等. 2 万年来我国东部海陆环境变化的不同步现象. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22: 17—23
- 10 Ijiri A, Wang L J, Oba T, et al. Paleoenvironmental changes in the northern area of the East China Sea during the past 42,000 years. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 219: 239—261^[DOI]
- 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^[DOI]
- 12 何飞. 日本的森林植被. *四川林业科技*, 2006, 27: 38—41
- 13 Hughen K A, Baillie M G L, Bard E, et al. MARINE04 marine radiocarbon age calibration, 0—26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 2004, 46: 1059—1086
- 14 Reimer P J, Baillie M G L, Bard E, et al. INTCAL04 Terrestrial Radiocarbon age calibration, 0—26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 2004, 46: 1029—1058
- 15 Machida H, Arai F. Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large late quaternary eruptions. *J Volcanol Geotherm Res*, 1983, 18: 151—164^[DOI]
- 16 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

- 17 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). 地球科学进展, 1999, 14: 407—411
- 18 中国第四纪孢粉数据库小组. 中国中全新世(6 ka BP)和末次盛冰期(18 ka BP)生物群区的重建. 植物学报, 2000, 42: 1201—1209
- 19 Tsukada M. Vegetation and climate during the Last Glacial Maximum in Japan. *Quat Res*, 1983, 19: 212—235[DOI]
- 20 Xu X D, Oda M. Surface-water evolution of the eastern East China Sea during the last 36,000 years. *Mar Geol*, 1999, 156: 285—304[DOI]
- 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[DOI]
- 22 罗运利, 孙湘君. 末次冰期以来南海北部孢粉记录的植被演化及千年尺度气候事件. 科学通报, 2005, 50: 691—697[DOI]
- 23 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
- 24 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第一卷). 北京: 科学出版社, 2004. 112
- 25 Schulz M, Stettin K. Spectrum analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series. *Comput Geosci*, 1997, 23: 929—945[DOI]
- 26 Heinrich H. Origin and consequence of the cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130000 years. *Quat Res*, 1988, 29: 142—152[DOI]
- 27 Elliot M, Labeyrie L, Bond G, et al. Millennial-scale iceberg discharges in the Irminger Basin during the last glacial period: Relationship with the Heinrich events and environmental settings. *Plaeoceanography*, 1998, 13: 433—446[DOI]
- 28 Broecker W S. Massive iceberg discharge as triggers for global climate change. *Nature*, 1994, 372: 421—424[DOI]
- 29 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993, 364: 218—220[DOI]
- 30 Bond G, Broecker W S, Johnsen S, et al. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 1993, 365: 143—147[DOI]
- 31 Pterson L C, Huang G H, Hugen K, et al. Rapid changes in the hydrologic cycle of the tropical Atlantic during the last glacial. *Science*, 2000, 290: 1947—1951[DOI]