

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.06.002

文章编号:1672-3767(2020)06-0010-12

引用格式:赵秀丽,张祥玉,章磊,等. 黄海末次盛冰期以来古环境的演化——来自孢粉组合的证据[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 10-21.

ZHAO Xiuli, ZHANG Xiangyu, ZHANG Lei, et al. Paleoenvironmental evolution since the Last Glacial Maximum in Yellow Sea: Evidence from sporopollen assemblages[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(6): 10-21.

黄海末次盛冰期以来古环境的演化 ——来自孢粉组合的证据

赵秀丽¹, 张祥玉¹, 章磊¹, 李守军¹, 石丰登^{2,3}, 刘建兴^{2,3}

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266037)

摘要:为了在精确的年代框架下重建黄海末次盛冰期以来古植被、古环境的演变,对 NHH01 孔上部 0~7.3 m (~0~22.0 ka B.P.) 岩心样品进行孢粉分析。在 65 个样品中鉴定出 53 科 81 属,根据统计结果中孢粉及碳屑含量变化,划分为 9 个孢粉组合带,草本植物花粉与针叶、落叶阔叶植物花粉含量此消彼长,反映出气候冷暖、干湿的多次变化,总趋势为气候变暖和海平面上升;识别出 3 次降温事件,分别在约 10.0 ka、7.78~7.33 ka、4.89 ka,新仙女木事件(12.88~11.64 ka)对本区影响不显著,表现为湿冷的气候。本次研究对分析不同纬度地区对气候变化的响应提供了新资料。

关键词:孢粉组合;古环境;南黄海;NHH01 孔;末次盛冰期

中图分类号:P52

文献标志码:A

Paleoenvironmental evolution since the Last Glacial Maximum in Yellow Sea: Evidence from sporopollen assemblages

ZHAO Xiuli¹, ZHANG Xiangyu¹, ZHANG Lei¹, LI Shoujun¹, SHI Fengdeng^{2,3}, LIU Jianxing^{2,3}

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources,

Qingdao, Shandong 266061, China; 3. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine

Science and Technology(Qingdao), Qingdao, Shandong 266037, China)

Abstract: To reconstruct the paleovegetation and paleoenvironment evolution of the Yellow Sea since the Last Glacial Maximum at a precise chronological framework, 65 sporopollen samples at depth 0-7.3 m (~0-22.0 ka B.P.) of the sediment core NHH01 from the South Yellow Sea were analyzed. A total of 81 sporopollen types were identified, which belongs to 53 families and 81 genera. According to the changes of sporopollen and charcoal contents, they were divided into 9 sporopollen assemblages. The pollen content of herbaceous plants and that of conifers and broad-leaved trees waned and waxed during the study interval, indicating the multiple climatic changes of temperature and

收稿日期:2019-09-10

基金项目:自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室(MASEG201705);山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室开放课题(DMSM201411)

作者简介:赵秀丽(1968—),女,山东单县人,副教授,博士,主要从事古生物学与地层学教学与科研工作。

E-mail: 272219245@qq.com

humidity in the local coastal areas. As a result, the general trend of climate warming and sea level rise are seen. Three distinct cooling events were identified, at 10.0 ka, 7.78-7.33 ka and 4.89 ka respectively. The New Younger Dryas (12.88-11.64 ka) had no significant effect on this area, resulting in humid and cold climate. This study provides new information for analyzing the response to climate changes at different latitudes.

Key words: sporopollen assemblage; paleoenvironment; South Yellow Sea; core NHH01; last glacial maximum

中国东部和南部有着广阔的大陆架,如黄海、东海和南海。第四纪冰期和间冰期旋回导致海平面大幅度升降^[1-2],陆架海沉积序列记录着丰富的区域、全球环境演化信息。我国近海孢粉学研究已取得大量研究成果,对南黄海表层、柱样以及钻孔沉积物进行了大量孢粉分析。石丰登等^[3]对南黄海 CJ08-185 柱样进行了孢粉分析,并依据孢粉成分的变化将柱样划分出 3 个孢粉组合带,反映了大西洋期气候温暖湿润,亚北方期气候温暖略干,亚大西洋期气候温和湿润。李杰等^[4]依据南黄海北缘 DLC70-3 孔 71.2 m 长沉积序列的孢粉记录,恢复了南黄海 13 万年以来的古环境变化。MIS5 和 MIS3 的亚间冰阶及 MIS2/1(冰消期)阶段,为沉积动力相对稳定的浅海或滨海环境;而 MIS5 和 MIS3 阶段的亚冰阶和 MIS4 阶段,气候偏冷,属沉积动力相对复杂的滨岸湖泊或沼泽等陆相环境。

研究表明,在末次冰期最盛期(22 ka~14 ka B.P.)^[5],黄海大部分出露成陆,在冰后期经历过频繁的气候冷暖变化事件^[3-4]。目前存在的主要问题是年代数据不够充足,有些柱样的年代存在争议;取样密度稀疏,对冰期-间冰期旋回中的气候快速颤动事件识别不够。需要建立较为准确精细的年代框架,提高孢粉分析的分辨率,深入理解不同阶段陆架区的环境演变过程。

1 南黄海陆缘植被概况

南黄海处于暖温带与亚热带的过渡地带,据地理位置大致可分为 5 个植被区^[3]:①朝鲜半岛、山东半岛和苏北、鲁南丘陵山地分布区,为暖温带针叶落叶阔叶混交林,主要有赤松、麻栎、槲栎及榆、枫杨等;②江淮丘陵落叶常绿阔叶混交林植被区,以落叶栎类为主,含少量苦槠、青冈栎、冬青等常绿树种,植被组成具暖温带与亚热带过渡性;③浙皖山区青冈栎、苦槠林植被区,属中亚热带常绿阔叶林,局部伴有喜温的落叶树种枫香;④苏北沿海盐生草甸植被区,组成有藜科、禾本科、菊科等,面积不大;⑤平原地区栽培植物区,主要有水稻、小麦以及油菜等。在河湖边缘水生植被主要有眼子菜、香蒲、莲、慈菇等。

2 样品和方法

黄海为一典型的半封闭型陆架浅海,平均海水深度 44 m^[6],黄河和长江携带大量沉积物流入黄海,黄海沉积物沉积速率快,蕴含丰富的古气候、古环境变化信息。本次研究所用的 NHH01 钻孔(35°13'N、123°13'E)位于南黄海中部泥质区,海水深度 73 m (图 1)。

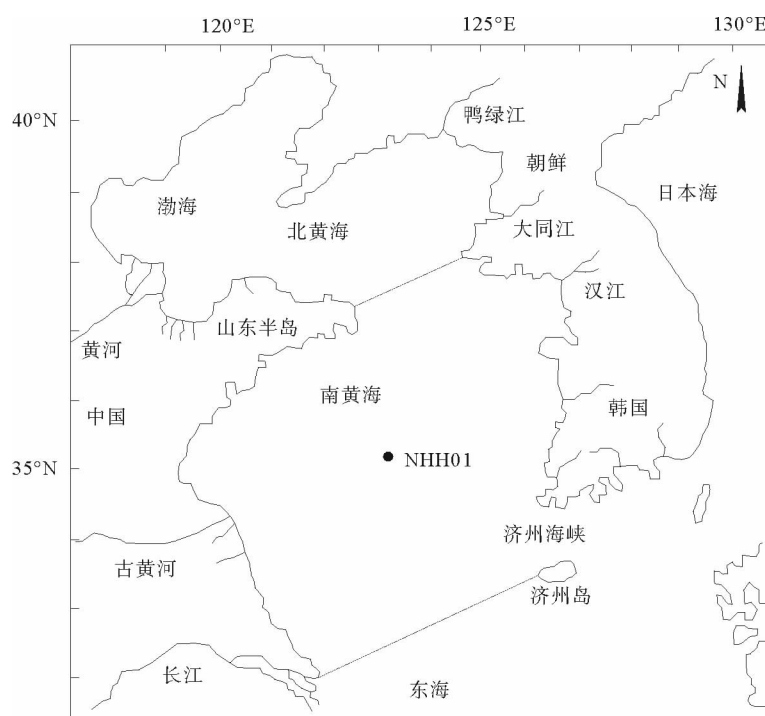


图 1 NHH01 钻孔位置图及黄海表层沉积物分布^[6]

Fig. 1 Location of borehole NHH01 and distribution of sediments in surface of the Yellow Sea

本次在钻孔 7.3 m(约 22.0 ka B.P.)以上岩芯中选择 65 个样品进行孢粉分析,除个别层位样品缺失外均为 10 cm 间隔。样品岩性 0~5.1 m 为灰色黏土,块状构造,质软,分选好,可见有孔虫个体和贝壳碎片,局部夹粉砂;5.1~7.3 m 为灰绿色黏土质粉砂,分选性差,见零星贝壳碎片,局部见水平层理和波状层理。

刘建兴等^[6-7]对 NHH01 孔进行了高分辨率古地磁研究,结果显示 4.26~3.84 m 为一地磁场反极性漂移,结合底栖有孔虫 AMS¹⁴C 测年分析,钻孔深度 4.59、5.69、7.3 m 处的年龄校正值分别为 10.2 ka B.P.、13.5 ka B.P.、22.0 ka B.P.,线性外推该反极性漂移的年限为 9 470~8 540 a B.P.,其余层位样品根据沉积速率采用线性内插法计算。

孢粉样品在山东科技大学孢粉实验室分析。每个样品用量 3 g,为了计算孢粉浓度,处理前加入 1 片石松片剂(27 560 粒/片),用过量 10% 盐酸溶液浸泡去掉沉积物中的钙质,再用过量 36% 氢氟酸浸泡,溶解硅质,用蒸馏水将样品清洗至中性后,用孔径 10 μm 的尼龙筛在超声波清洗仪中过滤,去除杂质,筛上物收集后便可制片观察。利用尼康 E100 生物显微镜进行鉴定、统计、照相,样品中皆含丰富的碳屑和孢粉。碳屑按照粒径分为 10~50、50~100、≥100 μm 三个级别统计,每个样品统计碳屑 1 000 粒以上,孢粉 250 粒以上,孢粉百分比计算以陆生植物花粉总和为基数,孢粉(碳屑)浓度(C_m)计算公式如下:

$$C_m = (27\ 560 \times \text{统计孢粉(或碳屑)粒数 } N) / (\text{统计石松孢子粒数} \times \text{样品质量}(g))。$$

3 孢粉组合特征及古植被演化阶段

3.1 孢粉组合特征

3.1.1 植被生态类型组合

共鉴定出 81 个孢粉类型,归属于 53 科 81 属^[8-9],按照现代植物生长条件及分布范围分成以下植被生态类型组合。

亚热带乔木类(subtropical trees):以常绿栎属(*Quercus-evergreen*)、栲属(*Castanopsis*)、柯属(*Lithocarpus*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)为主,此外还有枫香属(*Liquidambar*)、山核桃属(*Carya*)等。

亚热带温带乔灌木类(subtropical/temperate trees and shrubs):杜鹃属(*Rhododendron*)、榆属(*Ulmus*)、朴属(*Celtis*)、忍冬属(*Lonicera*)、绣线菊(*Spiraea*)、蔷薇属(*Rosa*)、冬青属(*Ilex*)、胡颓子属(*Elaeagnus*)、桑科(*Moraceae*)、盐肤木属(*Rhus*)、化香属(*Platycarya*)、黄杞属(*Engelhardtia*)、水青冈属(*Fagus*)、木犀科(*Oleaceae*)、无患子科(*Sapindaceae*)、芸香科(*Rutaceae*)等。

温带落叶阔叶乔木类(Temperate broad-leaved tree):以桤木属(*Alnus*)、落叶栎属(*Quercus-deciduous*)为主,还有栗属(*Castanea*)、桦木属(*Betula*)、榛属(*Corylus*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、枫杨属(*Pterocarya*)、胡桃属(*Juglans*)、柳属(*Salix*)、椴属(*Tilia*)、槭属(*Acer*)、梧桐科(*Sterculiaceae*)等。

裸子植物中以山地针叶林松属(*Pinus*)、云杉属(*Picea*)、铁杉属(*Tsuga*)为主,可见零星的冷杉属(*Abies*)、柏科(*Cupressaceae*)、落叶松(*Larix*)、落羽杉属(*Taxodium*)、罗汉松属(*Podocarpus*)等,另有少量麻黄属(*Ephedra*)。

陆生草本植物组(Terrestrial Herbs):以蒿属(*Artemisia*)、莎草科(*Cyperaceae*)、禾本科(*Gramineae*)为主,另外还见藜科(*Chenopodiaceae*)、蓼属(*Polygonum*)、菊科紫菀属(*Aster*)、蒲公英(*Taraxacum*)、苦卖菜(*Ixeris*)、唇形科(*Labiatae*)、毛茛科(*Ranunculaceae*)、地榆属(*Sanguisorba*)、白刺属(*Nitraria*)、唐松草属(*Thalictrum*)、葎草属(*Humulus*)等,偶见百合科(*Liliaceae*)、石竹科繁缕属(*Stellaria*)(*Caryophyllaceae*)、伞形科(*Umbelliferae*)、拉拉藤属(*Galium*)、茜草属(*Rubia*)、绣球属(*Hydrangea*)、十字花科(*Cruciferae*)、豆科(*Leguminosae*)、大戟科(*Euphorbiaceae*)等。

水生草本植物组(Aquatics Herbs):香蒲属(*Typha*)、黑三棱属(*Sparganium*)、眼子菜科(*Potamogetonaceae*)、狐尾藻属(*Myriophyllum*)、杏菜属(*Nymphoides*)等。

蕨类植物孢子有:水龙骨属(*Polypodium*)、蕨属(*Pteridium*)、凤尾蕨属(*Pteris*)、骨碎补属(*Davallia*)、里白属(*Hicriopteris*)、石松属(*Lycopodium*)、紫萁属(*Osmunda*)、卷柏属(*Selaginella*)、膜蕨属(*Hymenophyllum*)、金星蕨属(*Parathelypteris*)、鳞盖蕨属(*Microlepia*)、铁线蕨属(*Adiantum*)、桫欏属(*Cya-*

thea)、金毛狗属(*Cibotium*)等。

藻类:盘星藻(*Pediastrum*)、环纹藻(*Concentricystes*)、双星藻(*Zygnema*)、口盖藻(*Operculodinium*)、刀舌藻(*Lingulodinium*)、刺甲藻(*Spiniferites*)。

3.1.2 孢粉组合特征

根据统计结果中碳屑及孢粉含量变化(图 2、图 3),自下而上可划分为 9 个孢粉组合,各组合特征如下:

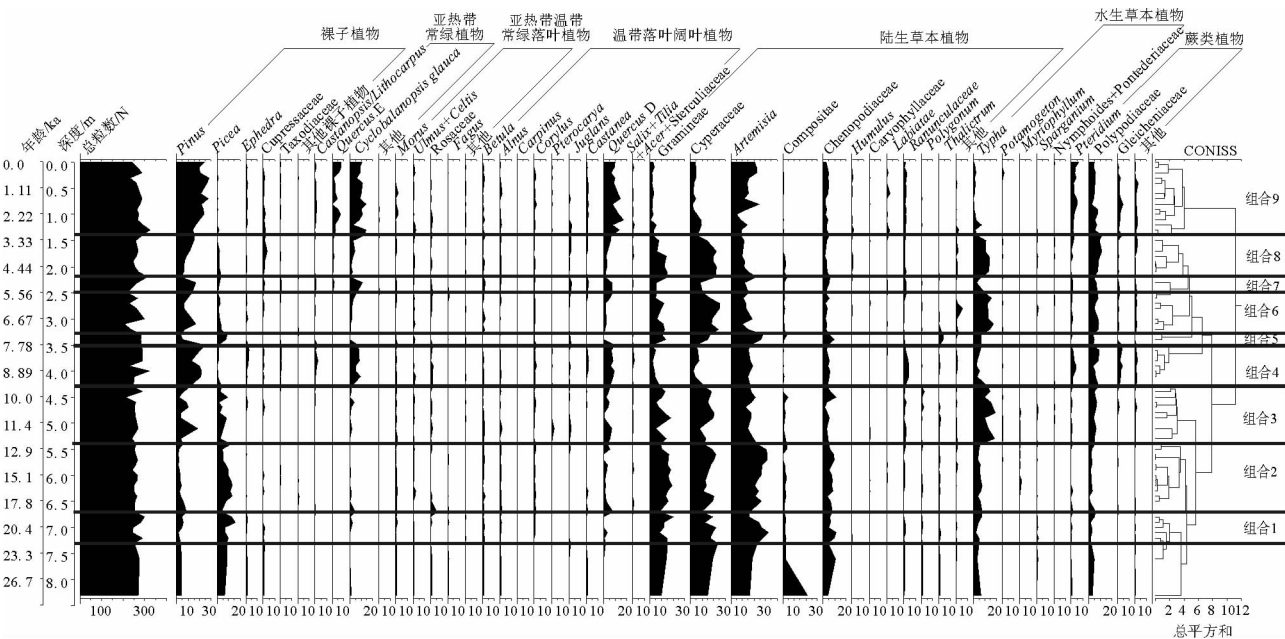


图 2 NHH01 孔主要孢粉属种百分含量变化分布图

Fig. 2 Main pollen and spore percentage diagram of core NHH01

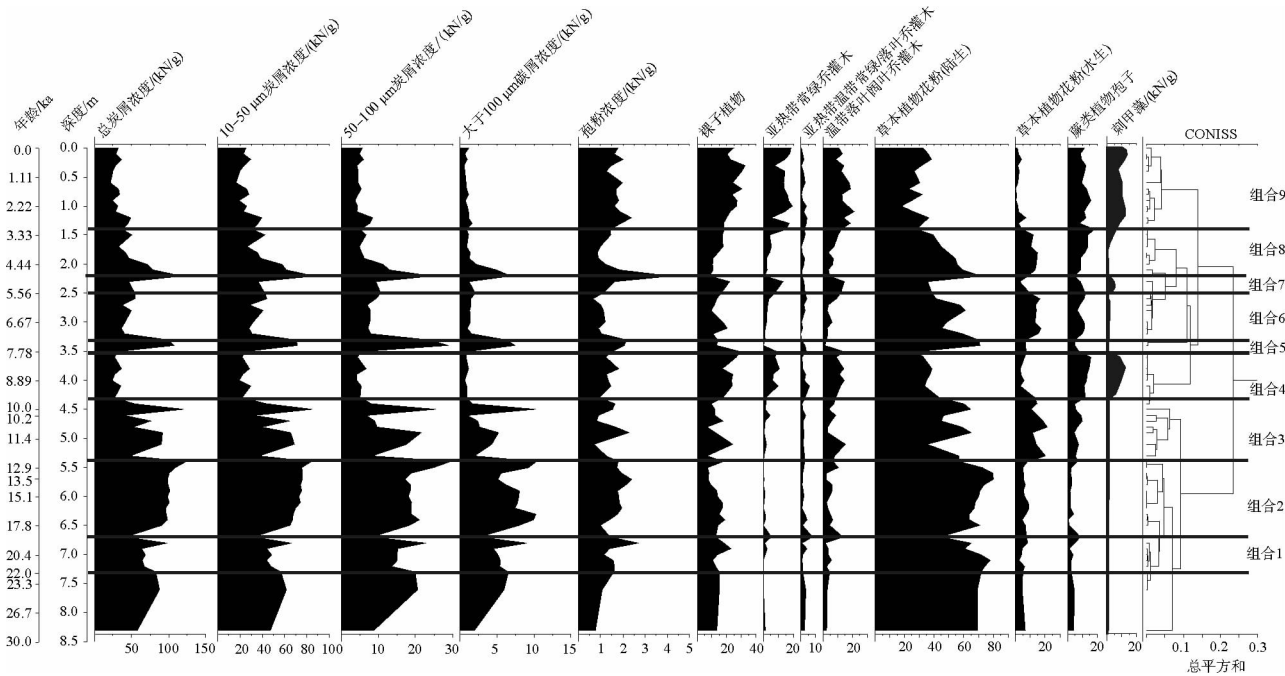


图 3 NHH01 孔碳屑和孢粉大类含量变化分布图

Fig. 3 Distribution of content change of charcoal and major sporopollen categories in core NHH01

1. 组合1 (7.3~6.7 m)(22.0~18.81 ka): 松属(*Picea*)-蒿属(*Artemisia*)-莎草科(Cyperaceae)组合。

本组合蕨类植物含量极少,为1.4%~8.7%,平均4.0%;主要为水龙骨科;裸子植物含量10.66%~22.86%,平均为14.99%,其中云杉属含量最高,平均8.8%,其次为松属,平均4.6%,麻黄属含量平均0.8%;被子植物含量最高,为75.71%~86.89%,平均81.0%,以陆生草本植物为主,含量44.3%~77.9%,平均67.2%,蒿属含量平均22.3%,莎草科平均17.6%。禾本科平均12.9%,藜科平均7.3%,其次有少量紫苑属、蒲公英属、蓼属、唐松草属、毛茛科等;水生草本植物以香蒲属为主,平均含量5.0%;温带落叶阔叶植物含量平均4.5%,主要有落叶栎、栗属冈栎,其次有桑属、榆属、绣线菊属、蔷薇属、山毛榉属等。

本组合总碳屑浓度普遍很高,为42 551~97 961 N/g,大于100 μm 碳屑浓度为2 029~9 005 N/g,平均5 187 N/g;孢粉浓度为776~2 700 N/g,平均1 477 N/g。甲藻类极少,有环纹藻、盘星藻等淡水藻类。植物残片较多。

2. 组合2 (6.7~5.4 m)(18.81~12.6 ka): 云杉属(*Picea*)-禾本科(Gramineae)-蒿属(*Artemisia*)组合。

本组合与组合1相似,蕨类植物含量为0.7%~7.3%;主要为水龙骨科,其次有里白属、蕨属零星出现;裸子植物含量7.14%~19.01%,其中云杉属含量最高,平均9.5%,其次为松属,偶见麻黄属;被子植物含量最高74.62%~90.08%,平均83.85%,仍以陆生草本植物为主,含量为56.9%~80.1%,蒿属含量平均26.1%,莎草科含量减少,平均16.7%,禾本科含量有所增加,平均15.2%,藜科平均7.0%,水生草本植物平均6.48%,以香蒲属为主,平均含量5.6%,偶见狐尾藻属、眼子菜科等;亚热带组分比组合1含量降低。

本组合总碳屑的浓度为91 342~124 373 N/g,大于100 μm 的碳屑浓度为5 104~10 364 N/g,平均8 002 N/g;孢粉浓度为974~2 386 N/g,平均1 791 N/g。

3. 组合3 (5.4~4.3 m)(12.6~9.56 ka): 禾本科(Gramineae)-蒿属(*Artemisia*)-莎草科(Cyperaceae)-香蒲属(*Typha*)组合。

本组合蕨类植物含量为5.2%~12.1%,水龙骨科、里白属含量稍有增加;裸子植物含量6.61%~24.07%,松属含量增加,为2.4%~18.5%,平均7.7%,云杉属含量有所降低,偶见麻黄属、柏科、杉科;被子植物含量最高,为68.15%~88.02%,平均79.35%,陆生草本植物含量下降,为35.2~65.1%,平均52.9%,蒿属含量平均17.3%,莎草科平均15.7%。禾本科平均10.6%,藜科平均4.7%,其次有少量紫苑属、蓼属、唐松草属、毛茛科、唇形科等;水生草本植物含量增加,平均15.54%,以香蒲属为主,平均含量14.4%,偶见眼子菜、黑三棱属、狐尾藻属等;温带落叶阔叶植物含量稍有增加,平均7.29%,主要有落叶栎、桦属、桤木属、榛属、胡桃属,其他零星可见的有柳属、椴属、栗属等;亚热带温带植物为2.36%~7.72%,平均3.61%,主要有榆属、蔷薇属,其次有青冈栎、桑属、山毛榉属等零星可见。

本组合总碳屑浓度降低,为27 689~120 201 N/g,大于100 μm 碳屑的浓度为903~10 183 N/g,平均3 370 N/g;孢粉浓度为711~2 270 N/g,平均1 306 N/g。甲藻类较少,偶见环纹藻、盘星藻等淡水藻类。

4. 组合4 (4.3~3.5 m)(9.56~7.78 ka): 松属(*Pinus*)-蒿属(*Artemisia*)-青冈栎属(*Cyclobalanopsis*)组合。

本组合裸子植物含量增加为17.0%~29.0%,平均为24.0%,松属含量增加,平均20.1%,偶见云杉属、麻黄属、柏科、杉科等;被子植物含量下降57.6%~68.5%,平均63.3%,陆生草本植物含量28.6%~38.8%,平均34.4%,以蒿属、莎草科、藜科为主,水生草本植物含量低,以香蒲为主,平均含量4.8%;温带落叶阔叶植物含量稍有增加9.3%~14.6%,主要有落叶栎、栗属、桦属、桤木属、榛属、胡桃属、柳属、椴属零星可见;亚热带温带植物为8.41%~15.87%,平均11.36%,主要有青冈栎、栲属。

本组合总碳屑浓度大大降低,为24 049~36 647 N/g,大于100 μm 碳屑浓度为707~1 161 N/g,平均910 N/g;孢粉浓度为1 228~1 804 N/g,平均1 438 N/g。

5. 组合5 (3.5~3.3 m)(7.78~7.33 ka): 云杉属(*Picea*)-蒿属(*Artemisia*)-莎草科(Cyperaceae)组合。

本组合裸子植物含量减少,平均为13.7%,其中云杉属含量增加,平均8.3%,松属含量降低,偶见麻黄属;被子植物含量平均为81.21%,其中陆生草本植物含量增加,平均为70.6%,以蒿属、莎草科、禾本科、藜科为主,温带落叶阔叶植物和亚热带常绿落叶植物等零星可见。

本组合总碳屑浓度大大增加,平均 104 141 N/g,大于 100 μm 碳屑浓度平均为 6 884 N/g;孢粉浓度平均为 2 113 N/g。甲藻类极少。

6. 组合 6 (3.3~2.5 m)(7.33~5.56 ka):松属(*Pinus*)-莎草科(*Cyperaceae*)-蒿属(*Artemisia*)-香蒲属(*Typha*)组合。

本组合蕨类植物稍有增加,平均为 9.9%,裸子植物含量平均为 14%,以松属为主,偶见麻黄属、铁杉属等;被子植物含量平均为 76.1%,陆生草本植物含量下降,平均为 52.3%,水生草本植物含量增加,平均 15.0%,以莎草科、蒿属、香蒲属为主;温带落叶阔叶植物和亚热带常绿落叶植物等含量较少。

本组合总碳屑浓度较低,平均 43 245 N/g,大于 100 μm 碳屑浓度平均为 1 396 N/g;孢粉浓度低,平均为 988 N/g。甲藻类极少。反映气候湿冷。

7. 组合 7 (2.5~2.2 m)(5.56~4.89 ka):松属(*Pinus*)-青冈栎属(*Cyclobalanopsis*)-落叶栎(*Quercus* D)组合。

本组合蕨类植物稍有增加,平均为 10.7%,裸子植物含量平均为 19.3%,以松属为主;被子植物含量平均 70%,陆生草本植物含量下降,平均 37.3%,水生草本植物下降,平均 6.5%,仍以蒿属、莎草科、香蒲属为主;温带落叶阔叶植物含量为 11.9%~14.7%,亚热带常绿落叶植物含量增加,为 10.5%~15.4%,主要为青冈栎、常绿栎、栲属等。

本组合总碳屑浓度较低,平均 50 848 N/g,大于 100 μm 碳屑浓度平均为 1 688 N/g;孢粉浓度平均为 1 382 N/g。甲藻类增多。

8. 组合 8 (2.2~1.4 m)(4.89~3.11 ka):莎草科(*Cyperaceae*)-蒿属(*Artemisia*)-香蒲属(*Typha*)组合。

本组合裸子植物含量平均为 12.9%,以松属为主;被子植物含量平均为 70%,草本植物含量在 2.2 m (4.89 Ma)处最高,向上逐渐降低,为 51.6~80.8%,其中莎草科、禾本科、香蒲属含量增加,蒿属含量下降;温带落叶阔叶植物含量为 3.7%~10.5%,亚热带常绿落叶植物含量降低,为 1.6%~7.0%。

本组合总碳屑浓度高,平均为 440 781 N/g,大于 100 μm 碳屑的浓度平均为 2 683 N/g;孢粉浓度平均为 1 642 N/g。甲藻类较少。

9. 组合 9 (1.4~0.0 m)(3.11~0.0 ka):松属(*Pinus*)-常绿栎(*Quercus* E)-落叶栎(*Quercus* D)组合。

本组合裸子植物含量平均为 24.4%,以松属为主;被子植物含量平均为 63.3%,陆生草本植物含量降低,平均为 29.8%,以蒿属为主,香蒲属含量下降,平均为 1.9%;温带落叶阔叶植物 8.7%~21.3%,以落叶栎类为主,亚热带常绿落叶植物含量增加,平均为 16.6%,以青冈栎、常绿栎为主。

本组合总碳屑浓度较低,平均为 32 439 N/g,大于 100 μm 碳屑的浓度平均为 973 N/g;孢粉浓度平均为 1 754 N/g。甲藻类数量丰富。

3.2 孢粉组合反映的古植被演化阶段

海洋沉积物中的孢粉分析数据能很好地反映陆缘的植被分布及海平面升降^[4,9]。黄海表层沉积物孢粉分布规律显示^[9]:草本植物花粉在大陆架离岸近的区域或河流入海口附近沉积物中含量高,越往深海含量越低;而松属等具气囊花粉沉降速度相对较慢,靠风传播,表现出离岸越近含量越少的规律;木本植物以松、栎、桦、榆为主,柳、栗、胡桃等花粉含量较少,这些花粉主要来自辽东半岛和山东半岛。连云港以南的陆缘地区分布着含常绿阔叶树的落叶阔叶林区,为极少数常绿植物花粉的来源区^[9]。

因此,NHH01 孔位置附近具有代表性或相关性显著的能指示区域或地方性植被的花粉类型主要包括松属、蒿属、藜科、莎草科、禾本科、栎属、桦属、常绿栎类等,所以草本植物花粉含量增高与研究区附近草原扩张有关,反映海平面下降,陆架出露。草本植物花粉含量降低,松属及其他阔叶木本植物花粉含量高反映海平面上升,草原退缩,陆架区被淹没;落叶阔叶及常绿树种的含量变化可说明陆缘区山地植被随气候波动而发生的变化,为气候较暖阶段,木本花粉,尤其是常绿阔叶树种呈增加趋势,少量热带、亚热带植物孢粉来源于南部,或与暖流有关,因此常绿植物花粉含量高反映海平面上升。黄海沉积物中刺甲藻类对环境反映十分敏感,为近岸或浅海环境的良好指示物^[4,9]。

因此本次孢粉分析划分的 9 个孢粉组合,可以反映出黄海及陆缘地区古植被演化阶段为:

阶段1(22.0~18.81 ka):大致为末次盛冰期早期阶段,组合1的特征代表了混有稀疏针阔混交林的草原。以蒿属、莎草科、禾本科等陆生草本植物为主,水生草本植物较少,反映气候比较干旱寒冷,海平面降低,黄海陆架古植被为干旱草原景观。

阶段2(18.81~12.6 ka):为末次盛冰期晚期阶段,组合2的特征代表了混有稀疏针阔混交林的湿润草原。水生草本植物含量略有增加,尤其至顶部5.4 m处(~12.6 ka)碳屑浓度达到最高,暗示有泥炭层形成,反映气候转暖,钻孔附近为湿润的草原环境。

阶段3(12.6~9.56 ka):为前北方期,组合3代表了植被组成为混有稀疏针叶阔叶混交林的沼泽草原,蒿属、禾本科等陆生草本植物有所减少,水生草本植物香蒲明显增加,落叶栎、榆树、桦树等稍有增加,刺甲藻类开始少量出现。钻孔附近为滨海沼泽至草原的环境。

阶段4(9.56~7.78 ka):大致为北方期,植被为针叶落叶阔叶混交林,混有少量常绿植被。松树林增加,云杉林衰退,草本植物大大减少,常绿栎以及落叶栎、榆树、桦树、桤木等增加,甲藻类数量增加。说明钻孔位置远离陆地,反映气候转暖,气候较为湿润,海平面上升。

阶段5(7.78~7.33 ka):大致为大西洋期早期,为混有松树林、云杉林的干凉草原;陆生草本植物又有所扩张,以蒿属、莎草科、禾本科、藜科为主,温带落叶阔叶植物和亚热带常绿落叶植物等零星可见。刺甲藻类极少出现,反映海平面又降低。

阶段6(7.33~5.56 ka):大致为大西洋期,为湿润沼泽草原。草原上生长着莎草科、蒿属、禾本科,水生草本植物香蒲增加,陆架周缘生长着少量的温带落叶阔叶植物和亚热带常绿落叶植物。植被组成中水龙骨科稍有增加,松树林渐渐取代云杉林,并有少许麻黄属、铁杉属等。

阶段7(5.56~4.89 ka):为大西洋期末期,草原退缩,陆缘植被为温暖常绿落叶阔叶混交林。此时为温暖时期。

阶段8(4.89~3.11 ka):大致为亚北方期早期,反映了以针阔混交林,湿润草原为主的植被面貌。

阶段9(3.11~0.0 ka):为亚北方期晚期至亚大西洋期,植被面貌为常绿落叶阔叶混交林。甲藻类数量丰富,反映海平面上升。

4 孢粉组合记录的古气候变化

4.1 黄海古气候、古地理的演化历史

本次孢粉分析反映了黄海地区古气候、古地理的演化历史:自~22.0~12.6 ka(LGM)时期气候相对干冷,海平面下降,黄海陆架出露,蒿属和禾本科陆生草本植物占据优势;12.6~9.56 ka时期为过渡期,莎草科、香蒲属等湿生草本植物有所增加,落叶栎属、榆属、桦属等温带乔木增加,说明仍出露的部分陆架上分布着大量湿地及沼泽,为近海沼泽草原环境,揭示此时气候较为湿冷,冰川融化,海平面有所上升,但存在气候快速波动,10.0 ka时期甲藻类极少,水生草本植物减少说明在升温过程中的一次短期降温;9.56~7.78 ka期间亚热带常绿植物孢粉开始增多,来源于南部沿海地区,或南方暖流携带至沉积区,反映气候温暖湿润,海平面继续上升,黄海陆架被淹没;7.78~7.33 ka时期,广泛发育陆生草本植物,海平面又一次降低,反映气候变得干凉;7.33~4.89 ka时期(大致为大西洋期)为全新世的最适宜期,气候相对湿热,海平面上升;在4.89 ka处又出现一次草本植物的扩张,甲藻类的衰退,反映经历了一次短暂的降温事件,之后气候较为温暖湿润,为现代陆架海环境。

4.2 快速降温事件

贵州D4石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 也记录了全新世3次最明显的冷事件,分别发生于10.91、8.27以及4.75 ka B.P.,降温幅度可达 $2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10]。石笋记录的这些气候突变事件时间的分辨率较高,为千年百年尺度,其延续年代的范围可以与格陵兰GISP2冰芯进行对比。8.27及4.75 ka B.P.冷事件,可以和爱尔兰CC3石笋记录进行对比^[10-12]。南海记录了11.3~10.0 ka B.P.的冷事件^[13],MD05-2904站位 $\delta^{18}\text{O}$ 、硅藻、孢粉资料记录了11.4~10.1 cal ka B.P.的冷事件^[14],南黄海NHH01孔孢粉记录的10.0、7.78~7.33 ka气候变冷事件比贵州、南海记录的气候变冷事件在时间上有所延迟,4.89 ka冷事件与贵州4.75 ka B.P.的冷事件在时间上较为一

致。产生差异可能的原因有年龄控制点较少、内插法获得的数据偏差以及不同纬度地区局部气候效应的影响^[15]。虽然均为降温事件,但是南海地区在冰期陆架大面积出露,其上生长了较多乔木植被,主要以热带亚热带常绿植物为主,草本植物含量最高 60% 左右^[14],而黄海地区草本植物含量在 80% 左右,亚热带常绿植物极少,说明南海地区较黄海地区气候温暖,可能是由于不同纬度地区受太阳辐射及水汽等因素影响的差异造成的。

著名的“新仙女木事件”(~12.88~11.64 ka)是在格陵兰冰心和北大西洋海底钻孔中 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的一次明显降温事件^[16],贵州荔波董歌洞 D4 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录也显示了 12.80~11.58 ka 期间的降温事件^[10],低纬度地区,如中国南海 17 940 站位 $\delta^{18}\text{O}$ 数据、孢粉资料和 MD05-2904 站的硅藻资料^[17-18]等均明显揭示了新仙女木事件的发生;另外,MD05-2904 钻孔的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据仅有 0.75‰ 的变化^[19],温度下降幅度较小,大约 1℃^[20],而孢粉数据没有显著揭示新仙女木事件^[14],在 12.88~11.64 ka 期间南黄海的孢粉植物群以草本植物为主,水生草本植物含量较多,说明仍出露的部分陆架上分布着大量湿地及沼泽,此时气候虽冷但并不干旱,表现为湿冷的气候,笔者认为这是在由冰期向间冰期过渡时期、气候转暖湿润的正常表现。新仙女木事件对本区影响并不显著,这次变冷事件对不同区域的影响也存在差异。

米兰科维奇理论认为,北半球高纬度地区夏季太阳辐射变化是驱动第四纪冰期-间冰期旋回的主要因素,地球中、低纬度地区接受太阳辐射量的变化主要受控于岁差(周期 1~2.3 万年)和偏心率(周期 10 万年)。但是末次盛冰期以来,特别是全新世时期千年尺度的气候波动现象无法用 Milankovitch 理论进行解释,其驱动机制是深入了解气候系统演化过程的关键。但目前缺少全新世高分辨率气候波动周期等方面的详细研究,研究地区仍十分有限,对全新世气候不稳定性的机制仍缺少统一的认识^[21]。对于这一问题还有待今后更多的研究工作。

5 结论

1) 对 NHH01 孔柱状样末次盛冰期以来的 65 个孢粉样品进行分析,鉴定出 53 科 81 属,建立了 9 个孢粉组合;草本植物花粉与针叶、落叶阔叶植物花粉含量此消彼长。

2) 孢粉组合特征显示了黄海及陆缘植被的演化历史,反映了气候的变化,末次盛冰期(22.0~12.6 ka)黄海地区为滨岸草地,气候较为干冷;12.6~9.56 ka 时期为冰期向全新世冰后期的过渡期,气候湿冷,为滨海沼泽湿地;9.56~7.78 ka 时期气候温暖湿润,海平面上升;7.78~7.33 ka 时期,气候变得干凉,海平面短暂下降;7.33~4.89 ka 时期(大致为大西洋期)气候相对湿热;4.89 ka 之后气候温暖湿润。

3) 识别出 3 次明显的气候变冷事件,分别在 10.0 ka、7.78~7.33 ka、4.89 ka;新仙女木事件对本区影响并不显著,表现为湿冷气候。

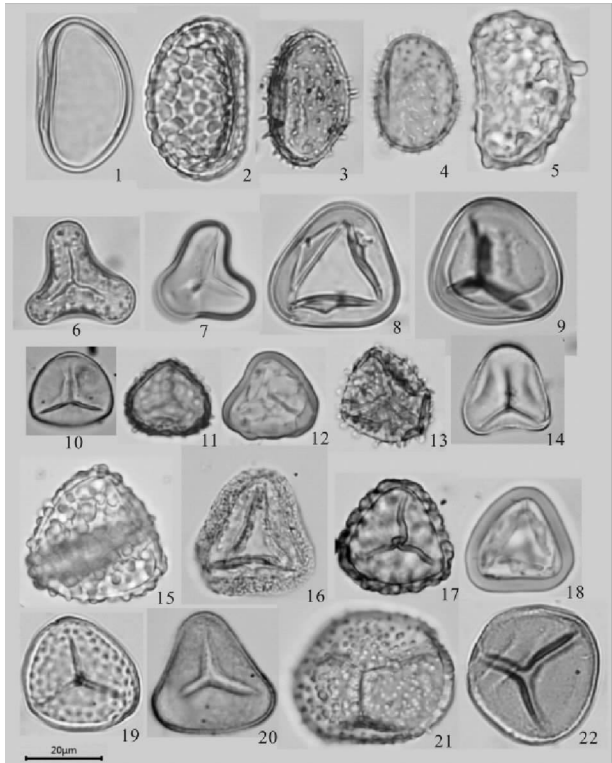
参考文献:

- [1] 李守军,陈宇慧,赵秀丽,等.潍坊北部晚第四纪介形类与环境演变研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(1): 1-11.
LI Shoujun, CHEN Yuhui, ZHAO Xiuli, et al. Late Quaternary ostracoda and environmental evolution in the north Weifang [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(1): 1-11.
- [2] LI Z, POSPELOVA V, LIU L J, et al. High-resolution palynological record of Holocene climatic and oceanographic changes in the northern South China Sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 483: 94-124.
- [3] 石丰登,程振波,石学法,等.南黄海 CJ08-185 柱样大西洋期以来的孢粉组合及其古环境意义[J].海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 83-87.
SHI Fengdeng, CHENG Zhenbo, SHI Xuefa, et al. Palynological assemblages and their paleoenvironment significance in core CJ08-185 since the Atlantic period, South Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(6): 83-87.
- [4] 李杰,梅西,李日辉,等.南黄海晚更新世以来孢粉记录的古环境变化[J].海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(4): 93-105.
LI Jie, MEI Xi, LI Rihui, et al. Environmental changes inferred from pollen records in the South Yellow Sea since Late Pleistocene[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2014, 34(4): 93-105.
- [5] 于革,张恩楼.全球大陆末次盛冰期气候和植被研究进展[J].湖泊科学, 1999, 11(1): 1-10.

- YU Ge, ZHANG Enlou. Newly-studies on global continental climate and terrestrial vegetation during the LGM[J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 11(1): 1-10.
- [6] 刘建兴, 石学法, 葛淑兰, 等. 全新世初期地磁极性漂移在南黄海中部泥质区的记录[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 663-669.
LIU Jianxing, SHI Xuefa, GE Shulan, et al. Record of geomagnetic excursion during early Holocene in the central Southern Yellow Sea mud[J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(4): 663-669.
- [7] LIU J X, SHI X F, LIU Q S, et al. Magnetostratigraphy of a greigite-bearing core from the South Yellow Sea: Implications for remagnetization and sedimentation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2014, 119, doi: 10.1002/2014JB011206.
- [8] 唐领余, 毛礼米, 舒军武, 等. 中国第四纪孢粉图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 204-377.
- [9] 王开发, 王永吉. 黄海沉积孢粉藻类组合[M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 123-159, 图版 1-29.
- [10] 覃嘉铭, 袁道先, 程海, 等. 新仙女木及全新世早中期气候突变事件—贵州茂兰石笋氧同位素记录[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(1): 69-74.
QIN Jiaming, YUAN Daoxian, CHENG Hai, et al. The Younger Dryas and the climatic catastrophe event during early-middle Holocene: Oxygen isotope record of stalagmite in Maolan Guizhou[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2004, 34(1): 69-74.
- [11] BOND G, BROECKER W, JOHNSEN S, et al. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice[J]. Nature, 1993, 365(6442): 143-147.
- [12] STUIVER M, GROOTES P M, BRAZIUNAS T F. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16 500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes[J]. Quaternary Research, 1995, 44(3): 341-354.
- [13] SUN X J, LI X. A pollen record of the last 37 Ka in deep sea core 17 940 from the northern slope of the South China Sea[J]. Marine Geology, 1999, 156(1/2/3/4): 227-244.
- [14] 常琳, 罗运利, 孙湘君. 南海北部 MD05-2904 站位 2 万年以来孢粉记录的古环境演变[J]. 科学通报, 2013, 58(30): 3079-3087.
CHANG Lin, LUO Yunli, SUN Xiangjun. Paleoenvironmental change base on a pollen record from deep sea core MD05-2904 from the northern South China Sea during the past 20 000 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(30): 3079-3087.
- [15] CHINZEI K, FUJIOKA K, KITAZATO H, et al. Postglacial environmental change of the Pacific Ocean off the coasts of central Japan[J]. Marine Micropaleontology, 1987, 11(4): 273-291.
- [16] ALLEY R B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland[J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(1/2/3/4): 213-226.
- [17] 黄元辉, 黄玥, 蒋辉. 南海北部 15 ka BP 以来表层海水温度变化—来自海洋硅藻的记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 65-74.
HUANG Yuanhui, HUANG Yue, JIANG Hui. Surface water temperature changes in the northern South China Sea over last CA. 15 000 years: Evidence from marine diatoms[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(5): 65-74.
- [18] 黄元辉. 末次冰消期以来南海北部表层海水盐度变化[J]. 微体古生物学报, 2008, 25(2): 125-131.
HUANG Yuanhui. Variation of sea surface salinity in the northern South China sea since the Last Deglaciation[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2008, 25(2): 125-131.
- [19] 葛黄敏, 李前裕, 成鑫荣, 等. 南海北部晚第四纪高分辨率浮游氧同位素地层学及其古气候信息[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010, 35(4): 515-525.
GE Huangmin, LI Qianyu, CHENG Xinrong, et al. Late quaternary high resolution monsoon records in Planktonic stable isotopes from northern South China Sea[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(4): 515-525.
- [20] 贺娟, 赵美训, 李丽, 等. 南海北部 MD05-2904 沉积柱状样 26 万年以来表层海水温度及陆源生物标记物记录[J]. 科学通报, 2008, 53(11): 1324-1331.
HE Juan, ZHAO Meixun, LI Li, et al. Biomarker records of environment change and SST records in the northern South China Sea (MD05-2904 core) since 260 kyr[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(11): 1324-1331.
- [21] 王琳森. 南黄海中部泥质区全新世以来古环境沉积记录及其对东亚季风的响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.

WANG Linmiao. Sediment record of paleoenvironment of the central mud of the South Yellow Sea and its response to the East Asian Monsoon during the Holocene[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.

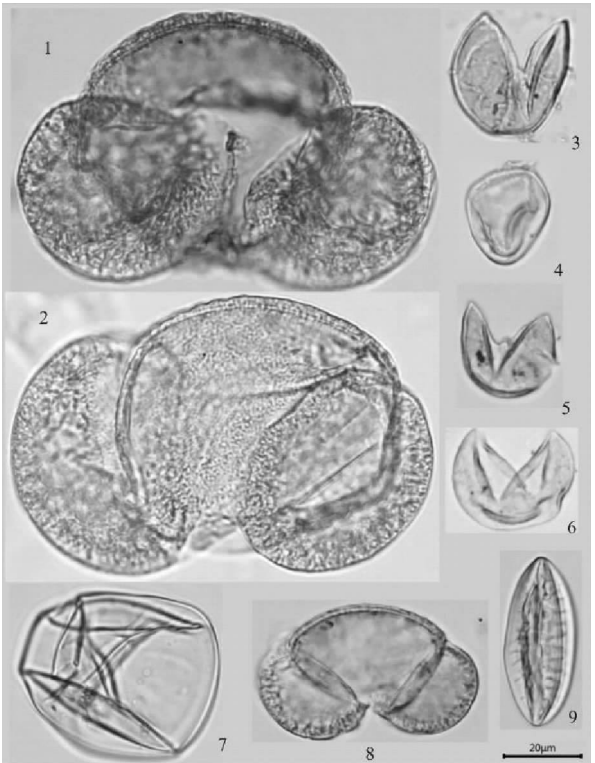
(责任编辑:高丽华)



1—*Polypodium*; 2—*Drynaria*; 3, 4—*Parathelypteris*; 5—*Lepisorus*;
6, 7—*Alsophila*; 8, 9—*Microlepia*; 10—*Pteridium*; 11, 13—*Seleginella*;
14—*Hicriopteris*; 15—*Seleginella*; 16, 18—*Pteris*; 19—*Lycopodium*;
20—*Microlepia*; 21—*Osmunda*; 22—*Hymenophyllum*

图版 1

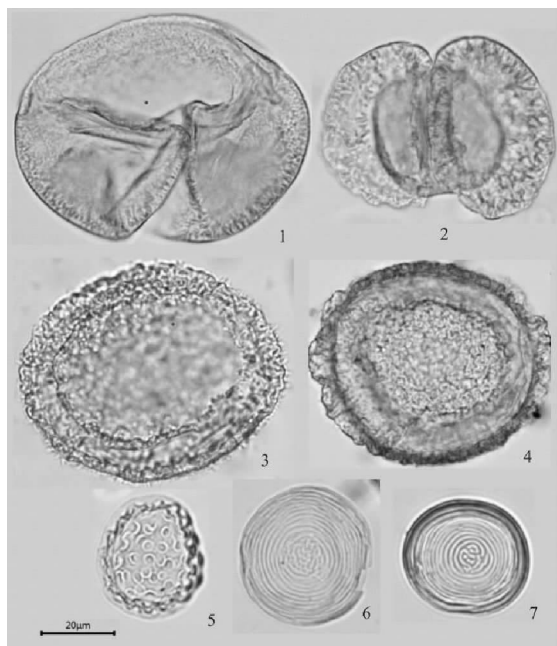
Plate 1 Fern spores



1—*Abies*; 2—*Pinus*; 3, 4—*Cupressaceae*; 5, 6—*Taxodiaceae*;
7—*Larix*; 8—*Pinus*; 9—*Ephedra*

图版 2

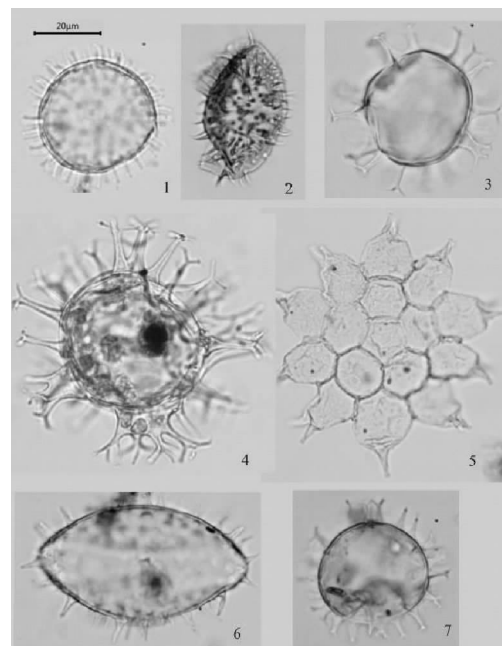
Plate 2 Gymnosperms pollen



1—*Picea*; 2—*Podocarpus*; 3, 4—*Tsuga*; 5—*Zygnera*;
6, 7—*Concentricystes*

图版 3

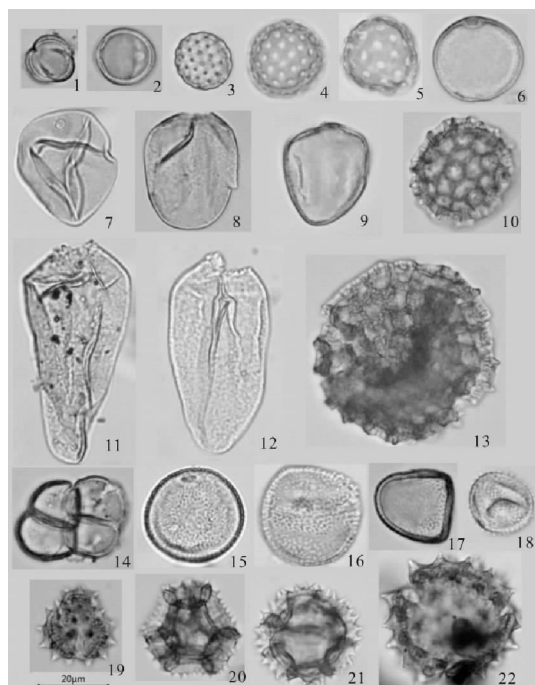
Plate 3 Gymnosperms pollen and Algae



1—*Operculodinium*; 2, 6—*Lingulodinium*;
3, 4, 7—*Spini ferites*; 5—*Pediatrum simplex*

图版 4

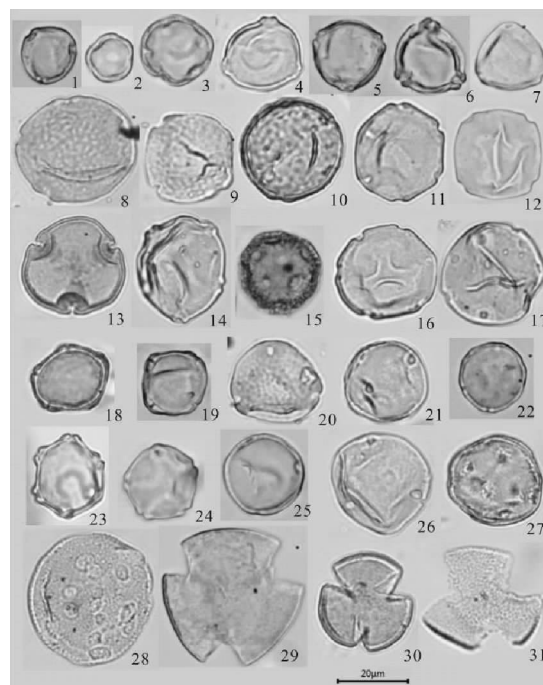
Plate 4 Algae



1, 2—*Artemisia*; 3, 5—*Chenopodium*; 6, 7—*Gramineae*;
8, 9—*Carex*; 10, 13—*Polygonum*; 11, 12—*Cyperus*;
14, 17—*Typha*; 15, 16—*Sparganium*; 18—*Potamogeton*;
19, 22—*Aster*; 20, 21—*Taraxacum*

图版 5

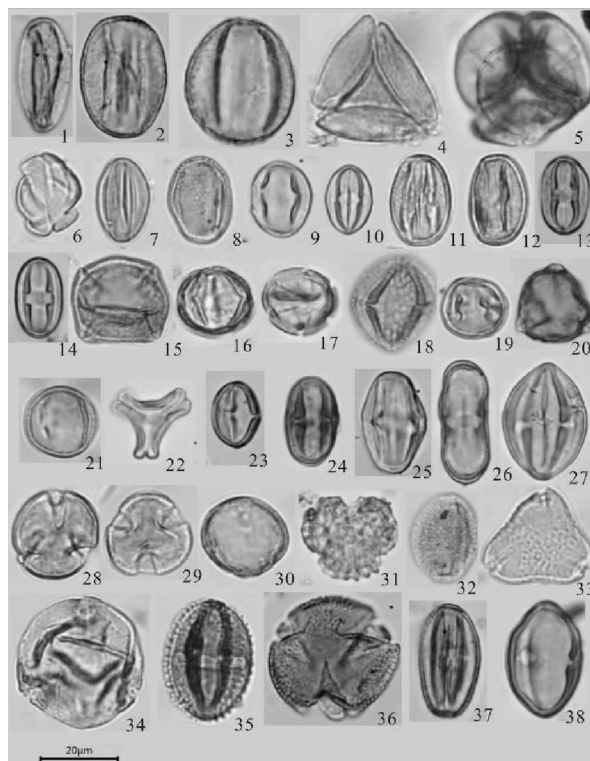
Plate 5 Angiosperm pollen



1—*Fatoua*; 2, 3—*Thalictrum*; 4—*Corylus*; 5, 6—*Betula*;
7—*Engelhardtia*; 8, 10—*Ulmus*; 11, 12—*Pterocarya*; 13—*Tilia*;
14—*Carpinus*; 15—*Stellaria*; 16, 17, 22—*Juglans*;
18, 19—*Myriophyllum*; 20, 21—*Celtis*; 23, 24—*Alnus*;
25—*Morus*; 26—*Carya*; 27—*Altingia*; 28—*Liquidambar*;
29, 30—*Labiatae*; 31—*Corylopsis*

图版 6

Plate 6 Angiosperm pollen (the scale bar is 20 µm)



1,7—*Ranunculus*; 2,3—*Quercus acutissima*; 4—*Nymphoides*; 5—*Rhododendron*; 6,19—*Rubia*; 8—*Salix*;
 9,12—*Cyclobalanopsis glauca*; 13,14—*Canstanopsis*; 15—*Meliaceae*; 16—*Spiraea*; 17,25—*Sanguisorba*;
 18—*Rutaceae*; 20—*Hippophae*; 21—*Hydrangea*; 22—*Loranthus*; 23,24—*Castanea*; 26—*Umbelliferae*;
 27—*Euphorbiaceae*; 28,29—*Rosa*; 30—*Pyrus betulaefolia*; 31—*Ligustrum*; 32—*Cruciferae*; 33—*Symplocos*;
 34—*Fagus*; 35—*Rhus*; 36—*Corylopsis*; 37—*Euphorbia*; 38—*Nitra*

图版 7

Plate 7 Angiosperm pollen