

长江三角洲平原 BZK03 孔更新世以来 古环境演变及多重地层划分对比

林钟扬^{1,2}, 赵旭东², 金翔龙^{1,3*}, 潘少军², 顾明光²

(1. 中国地质大学海洋学院, 湖北 武汉 430074; 2. 浙江省地质调查院, 地质矿产研究所, 浙江 杭州 311203;
3. 自然资源部第二海洋研究所, 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要:对长江三角洲平原 BZK03 钻孔进行沉积物同位素测年、孢粉组合、微体古生物、粒度和磁学的测试分析, 讨论了更新世以来钻孔揭示的沉积环境演化、沉积相和古气候特征, 建立了钻孔的第四纪多重地层划分对比框架。研究表明, 钻孔自下而上依次为白垩纪衢县组的风化粉砂岩及第四纪沉积的嘉兴组、前港组、东浦组、宁波组、镇海组。孢粉组合可划分出 18 个孢粉带, 按暖期温暖潮湿-冷期寒冷干燥古气候旋回变化的周期律, BZK03 钻孔反映该区域共存在 6 个古气候旋回。根据岩性分层、沉积环境、古气候建立的钻孔多重地层划分对比揭示: 144.6~198.5 m 为早更新世时期河流相和河湖相交替沉积环境的嘉兴组, 存在 2 个气候旋回过程; 88.3~144.6 m 为中更新世河湖相-河流相-河湖相-河流相沉积环境的前港组, 包含 2 个气候旋回过程; 16.6~88.3 m 为晚更新世沉积, 沉积环境为河湖相-滨海相-河湖相-潮坪相-河湖相的宁波组和河口相-浅海相的东浦组, 包括 2 个气候旋回; 0~16.6 m 为河湖相-浅湖相-河湖相-潮坪相沉积环境的镇海组, 古气候时期对应北方期和大西洋期。

关键词:第四纪; 孢粉; 古气候; 多重地层划分; 长江三角洲

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2019)04-0115-12

Palaeoenvironmental Evolution and Multi-stratigraphic Division and Correlation of Yangtze River Delta Plain since Pleistocene: Evidence from BZK03 Borehole

LIN Zhongyang^{1,2}, ZHAO Xudong², JIN Xianglong^{1,3*}, PAN Shaojun², GU Mingguang²

(1. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, Zhejiang, China; 3. The Key Laboratory of Submarine Geoscience, Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: Based on the analysis of sediment isotope dating, sporopollen assemblages, microfossils, grain size and magnetism of the samples from BZK03 borehole in the Yangtze River Delta plain, this paper discusses the sedimentary environment evolution, sedimentary facies and paleoclimate characteristics since Pleistocene, and then the Quaternary multi-stratigraphic division and correlation framework of the borehole has been established. The results show that, from bottom

收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-04-16

基金项目: 中国地质调查局“浙江海洋经济发展示范区(嘉兴)城市群地质调查”(1212011220008)和“浙江 1:5 万嘉兴市、平湖市、嘉善县、盛泽镇、新丰镇幅区域地质调查项目”(1212011220538)资助

作者简介: 林钟扬(1985-), 男, 博士, 专业方向为第四纪地质、海洋地质。E-mail: linamdy@163.com

* 通讯作者: 金翔龙(1934-), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 专业方向为海洋地质、海洋地球物理。E-mail: xljin@mail.hz.zj.cn

to top, the samples of drilled holes are weathered siltstone of Cretaceous Quxian Formation and Quaternary sedimentary strata of Jiaxing Formation, Qiangang Formation, Dongpu Formation, Ningbo Formation and Zhenhai Formation. Sporopollen assemblages can be divided into 18 sporopollen zones. According to the cycle law of warm, humid, cold, dry paleoclimate cycles, BZK03 borehole shows that there are 6 paleoclimate cycles in this region. In line with lithologic stratification, sedimentary environment and paleoclimate, the division and correlation of borehole multiple strata reveals that 144.6~198.5m is Jiaxing Formation strata with alternating fluvial and fluvial-lacustrine sedimentary environments in early Pleistocene, and there are two climatic cycles. 88.3~144.6m is the Qiangang Formation stratum of Middle Pleistocene fluvio lacustrine face-fluvial face-fluvio lacustrine face-fluvial face sedimentary environment, including two climatic cycles. 16.6~88.3m is late Pleistocene deposition, and the sedimentary environment is the Ningbo Formation of fluvial-littoral-fluvial-tidal-fluvial facies and the Dongpu Formation of estuarine-neritic facies, including two climatic cycles. 0~16.6m is Zhenhai Formation stratum of fluvial-lacustrine-shallow-fluvial-tidal flat sedimentary environment.

Keywords: Quaternary period; spores and pollen; paleoclimate; multiple stratigraphic division; Yangtze River Delta

全球环境变化日益成为国际社会关注的重要问题,更新世以来的全球气候和环境演变历史研究备受学者关注。长江三角洲是长江入海之前的冲积平原,在第四纪以来的发育和演化过程中受到新构造运动、古气候和海平面波动以及陆源物质供应的综合作用下,导致第四纪地层和沉积环境变化频繁,蕴含了丰富的区域沉积环境演化信息(黄向青等, 2018; 苏建锋等, 2017)。通过开展第四系沉积结构和空间展布规律来科学认识更新世以来地质演化和古地理环境变化是近年来的研究热点,已广泛应用于河口三角洲、湖泊和平原区(杨云平等, 2014; 汤文坤等, 2017),其中地层层序的厘定、海平面变化、古环境演变和海侵时期等科学问题都是备受关注的问题。开展长江三角洲更新世以来沉积地层序列的分析,对研究长江三角洲沉积作用发育历史、古地理环境演化具有重要意义,对研究中国长江三角洲冲积平原形成、古地理环境变迁,也发挥了长江三角洲南翼地理位置上的独特作用(CHEN Q Q et al., 2008; 邓智瑞等, 2016)。

目前,围绕杭州湾地区末次冰期以来的古气候及海平面变化研究已取得了不少重要成果,为第四纪尤其是全新世以来的沉积特征、地层层序和古环境演变进一步研究奠定了基础,为长江三角洲平原第四纪演化研究提供了较为详细的依据(朱季文等, 1994; 张玉兰等, 2005; MIAO Y F et al., 2015; 赵宝成, 2013)。但受前期工作钻探难度、钻孔深度和钻

孔样品采集测试分析的限制,已有研究工作和程度集中对全新世时期的古环境研究较为深入(白雪莘等, 2016; 刘静伟等, 2007; 黎兵等, 2011),而针对长江三角洲南翼更新世时期以来的沉积环境演变研究相对较少,存在诸如缺乏更新世时期以来的高精度地层数据资料等瓶颈问题。

通过对 BKZ03 钻孔沉积物岩心的高分辨率的孢粉、有孔虫、介形类取样测试分析,结合粒度、磁学和同位素测年数据,对长江三角洲平原地区的沉积相、古气候、沉积环境演化特征进行了研究,对钻孔进行了岩性分层及地层划分,建立钻孔多指标的多重地层划分对比,提升了对研究区第四系覆盖层的性质和结构的认识,为长江三角洲地区第四纪地层划分和对比提供了证据,为下一步研究工作的开展提供基础资料。

1 研究材料与方法

BZK03 钻孔($30^{\circ}44'03''N$, $120^{\circ}35'09''E$)位于嘉兴市秀洲区运河农场(图 1),孔深 206.85 m,其中 198.50 m 以下为基岩。将岩心从正中沿纵向剖开、修平,完成岩性描述后,进行沉积物测年、粒度含量、古地磁、孢粉的含量分析和微体古生物鉴定(有孔虫、介形类)的样品采集。采样间隔一般为 1 m,粒度、古地磁采样深度范围为 0~206.0 m,孢粉、有孔虫和介形类采样深度范围为 1.0~197.0 m。



图1 BZK03 钻孔位置图

Fig. 1 Location of BZK03 bore

孢粉分析称取每个样品取 50 g, 经酸碱处理和重液浮选, 吸取含孢粉的浮选物制片, 在显微镜下鉴定、统计和计算百分比含量(贾丽等, 2006; 杜青松等, 2013)。微体古生物分析包括有孔虫和介形类的属种鉴定和定量统计(陈静等, 2009)具体分析方法是: 采用沉积物样品在 60℃ 下烘干, 称取 50 g 左右干样加少许 15% 的过氧化氢(H_2O_2)溶液, 待样品散开后用 0.052 mm 孔径筛水洗, 进行浮选和过滤后, 在 Nikon E 200 生物显微镜下进行属种鉴定和定量统计(以 100 g 干样计算)。

对 199 件样品进行了沉积粒度分析, 称取 10 g 左右风干样品于 50 mL 烧杯中, 加蒸馏水 15 mL 浸润, 再加入 10 mL 体积分数 20% 的 H_2O_2 溶液去除有机质, 搅拌使其充分反应, 静置 12 h 后抽去上层清液, 加入 10 mL 的 0.1 mol/L 的 $(NaPO_3)_6$ 作为分散剂, 用超声波清洗仪震荡, 使颗粒充分分散, 搅拌后静置 12 h 后抽去上层清液, 最后用蒸馏水稀释、清洗样品, 保留沉积物悬浊液用于测试, 采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测量(赵亚楠等, 2015; 王张华等, 2004)。

选择含有碳屑的沉积物样品经密封包装, 进行沉积物测年。光释光测年(OSL)方法(王张华等, 2002)为: 取约 100 g 未曝光样品放置于 1 000 mL 的烧杯中, 用蒸馏水浸泡; 先用 30% 的双氧水去除有机质, 再用 30% 的盐酸去除碳酸盐类矿物, 然后用蒸馏水将悬浊液洗至中性, 根据 Stokes 定理, 分离出 4~11 μm 的细颗粒混合矿物, 再将它们浸泡

在氟硅酸中 3 天, 去除长石类等矿物, 提纯细颗粒石英, 最后用乙醇将提纯的细颗粒石英样品均匀沉淀在直径为 9.7 mm 的不锈钢片上, 使用丹麦 Risø 实验室生产的 Risø TL/OSL-DA-20 热释光/光释光仪器完成。

AMS¹⁴C 测年方法为对样品低温烘干, 清水浸泡分散, 然后筛选出贝壳、木屑或其他植物碎屑进行年龄测量, 对于部分没有筛选得到有效测年物质的样品则取全岩样品的有机碳进行测量, 用加速器质谱仪进行 AMS¹⁴C 测年, 测量数据用 Calib701 软件校正至日历年龄(李泉等, 2018)。

孢粉分析、微体古生物分析和粒度分析均由中山大学地球科学系完成, 沉积物测年分析委托中国科学院广州地球化学研究所完成。

2 结果

2.1 年代序列

根据 AMS¹⁴C 方法测得的年代数据见表 1, 用线性插值法进行内插和外推, 获得对应深度位置的年代。根据 OSL 方法测得的年代数据见表 2, 在 95.8 m、115.3 m、124.6 m 和 134.8 m 处测得的地层年龄均大于 150 ka。

表1 BZK03 钻孔 AMS¹⁴C 测年结果表Tab. 1 AMS¹⁴C dating results of BZK03

| 样品编号 | 测年物质 | 深度(m) | ¹⁴ C 年龄 (yr BP) | 误差值 (yr) | 校正年龄(yr cal BP, 95%) |
|----------|-------|-------|-------------------------------|-------------|-------------------------|
| BZK03-C1 | 植物碎屑 | 4.2 | 6 100 | 30 | 6 969~7 029 |
| BZK03-C2 | 贝壳 | 7.4 | 6 411 | 28 | 7 278~7 418 |
| BZK03-C4 | 全岩有机质 | 28.5 | 31 100 | 340 | 34 345~35 734 |
| BZK03-C6 | 贝壳碎屑 | 42.6 | 41 920 | 320 | 44 666~45 887 |

表2 BZK03 钻孔 OSL 测年结果表

Tab. 2 OSL dating results of BZK03

| 样品号 | 采样深度 (m) | De(Gy) | Does Rate (Gy/ka) | Age(ka) |
|----------|-------------|---------------|----------------------|---------------|
| BZK03-R2 | 82.0 | (378.32±12.2) | (2.57±0.06) | (147.16±5.95) |
| BZK03-R3 | 95.8 | (101.31±20.1) | (2.59±0.05) | (154.69±8.35) |
| BZK03-R4 | 115.3 | >460 | (3.03±0.16) | >150 |
| BZK03-R5 | 124.6 | >520 | (3.42±0.09) | >150 |
| BZK03-R6 | 134.8 | >530 | (3.52±0.05) | >150 |

2.2 孢粉组合

BZK03 钻孔 91 个孢粉样品共鉴定孢粉类型 59 种,其中木本植物花粉 38 种,草本植物花粉 14 种,蕨类孢子 7 种。孢粉组合中木本植物含量最高,约为 63.5%,草本植物花粉次之,约为 21.0%,蕨类孢子含量仅为 15.5%。针叶类植物花粉以松属(*Pinus*)花粉为主,含有少量铁杉属(*Tsuga*)、罗汉松属(*Podocarpus*)、杉科(*Taxodiaceae*)等花粉。阔叶类植物花粉以栎属(常绿和落叶, *Quercus*)、栗属(*Castanea*)、枫香

树属(*Liquidambar*)、水青冈属(*Fagus*)花粉为主;还含有一定量的鹅耳枥属(*Carpinus*)、化香树属(*Platycarya*)、榆属(*Ulmus*)、胡桃属(*Juglans*)等的花粉。草本植物以藜科(*Chenopodiaceae*)、蒿属(*Artemisia*)花粉为主,其次为禾本科(*Poaceae*)、莎草科(*Cyperaceae*)花粉,其他花粉含量较少。蕨类植物以单缝孢(*Monolete spores*)为主。依据孢粉类型在剖面上的波动,可划分 18 个孢粉组合带(图 2),各孢粉带特征简述如下。

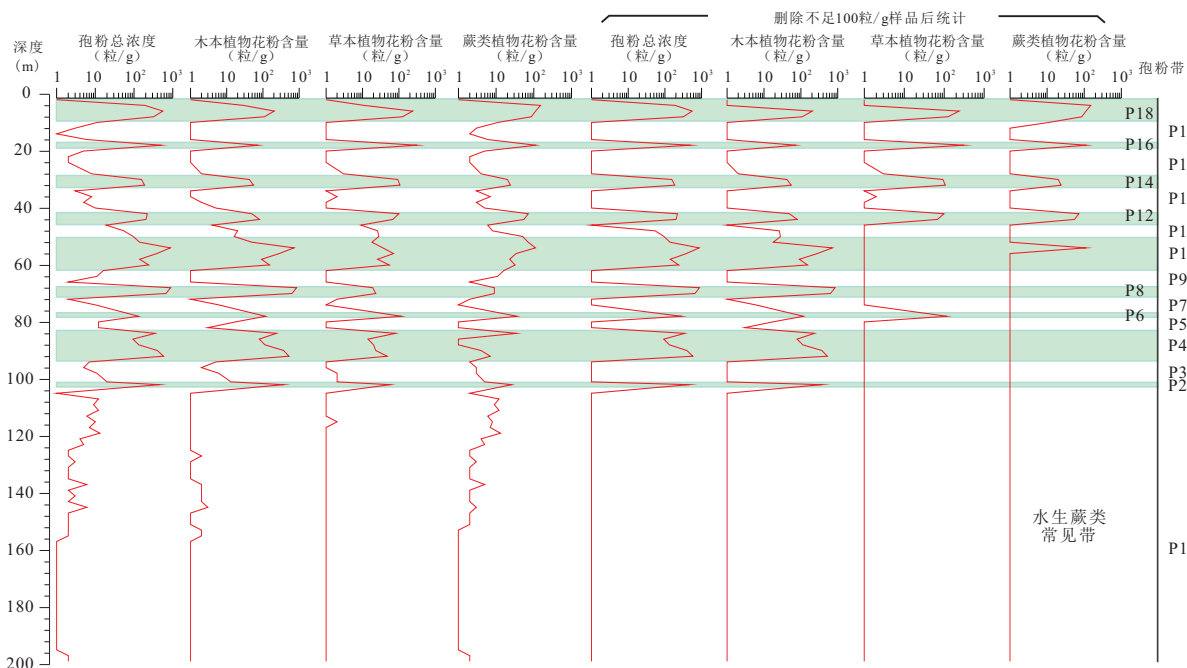


图 2 BZK03 钻孔孢粉组合带划分图

Fig. 2 Distribution of spore combined bands of BZK03

P1:103~197 m。孢粉数量极为稀少,往上孢粉数量有所上升,但浓度仍然很低,平均浓度仅为~0.5 粒/g,蕨类孢子占绝对优势,平均含量可达 81.9%,主要以单缝孢和三缝孢为主。

P2:100 m。孢粉总浓度相对较高,达到 45.1 粒/g,木本植物花粉含量占绝对优势,含量为 81.6%,主要为锥栗属,其次为常绿栎;草本植物花粉含量为 12.6%,主要为禾本科;蕨类植物含量为 5.8%,主要为水龙骨科。

P3:92~99 m。孢粉总浓度仅为 1.1 粒/g,木

本植物花粉含量占据优势,含量为 57.7%,主要为杉科和常绿栎;蕨类植物含量为 35.2%,主要为单缝孢,其次为三缝孢;草本植物花粉含量仅为 7%,主要为蒿属。

P4:82~90 m。孢粉总浓度较高,为 31 粒/g,木本植物花粉含量占绝对优势,含量为 84.1%,主要为枫香树属和落叶栎,其次为常绿栎;草本植物花粉含量为 13.4%,主要为蒿属;蕨类植物含量仅为 2.4%,主要为单缝孢和三缝孢。

P5:78~80 m。孢粉总浓度较低,仅为 2.3 粒/g,

木本植物花粉含量占绝对优势,含量为 60%,主要为常绿栎,其次为水青冈属和罗汉松属;草本植物花粉含量为 38.3%,主要为藜科,其次为禾本科、蒿属和柳叶菜科;蕨类植物含量仅为 1.7%,主要为单缝孢。

P6:76 m。孢粉总浓度较高,为 28.3 粒/g,木本植物花粉含量稍占优势,含量为 45.9%,主要为落叶栎;草本植物花粉含量为 41.3%,主要为藜科;蕨类植物含量仅为 12.7%,主要为单缝孢。

P7:70~72 m。孢粉总浓度仅为 0.6 粒/g,草本植物花粉含量占 55%,主要为禾本科和毛茛科,蕨类植物含量 45%,主要为单缝孢。

P8:66~68 m。孢粉总浓度很高,为 77.1 粒/g,木本植物花粉含量占绝对优势,含量为 96%,主要为落叶栎和榆属,其次为水青冈属;草本植物花粉含量仅为 2.8%,主要为蒿属和毛茛科;蕨类植物含量仅为 1.2%,主要为水龙骨科。

P9:60~64 m。本阶段孢粉含量极少,主要为单缝孢类。

P10:50~58 m。孢粉总浓度较高,为 35.2 粒/g,木本植物花粉含量占主要优势,含量为 64%,主要为落叶栎,其次为常绿栎;蕨类植物含量为 20.6%,主要为单缝孢和三缝孢;草本植物花粉含量为 15.4%,主要为蒿属。

P11:44~48 m。孢粉总浓度较低,为 5.6 粒/g,草本植物花粉含量略占优势,含量为 41.7%,主要为香蒲属和藜科,其次为十字花科;蕨类植物含量为 33.4%,主要为单缝孢,其次为三缝孢;木本植物花粉含量为 25%,主要为常绿栎。

P12:40~42 m。孢粉总浓度较高,为 21.2 粒/g,草本植物花粉含量略占优势,含量为 39.2%,主要为藜科,其次为十字花科。木本植物花粉含量为 30.8%,主要为栗属和常绿栎;蕨类植物含量为 29.9%,主要为单缝孢。

P13:32~38 m。本阶段孢粉总浓度低,仅为 0.7 粒/g。

P14:28~30 m。孢粉总浓度较高,为 17.1 粒/g,草本植物花粉含量占较大优势,含量为 58.8%,主要为藜科。木本植物花粉含量为 28.3%,主要为栗

属,其次为常绿栎;蕨类植物含量为 12.9%,主要为三缝孢。

P15:18~26 m。本阶段几乎不含孢粉,仅为 0.4 粒/g,以蕨类植物为主。

P16:16 m。孢粉总浓度高,为 50 粒/g,草本植物花粉含量占较大优势,含量为 62.6%,主要为藜科。蕨类植物含量为 22.8%,主要为单缝孢和三缝孢;木本植物花粉含量为 14.6%,主要为栗属和常绿栎。

P17:8~14 m。本阶段孢粉总浓度极低,平均浓度几乎为零,仅见零星蕨类植物。

P18:2~6 m。本阶段孢粉含量明显回升,平均浓度约为 35.5 粒/g,蕨类植物仍占优,平均含量高达 42.0%,仍以单缝孢和三缝孢为主。木本植物含量和草本植物含量相当,分别为 28.7%和 29.3%。木本植物以常绿栎和落叶栎为主,草本植物以藜科花粉为主。

2.3 有孔虫

BZK03 孔分析有孔虫样品 99 个,共鉴定出有孔虫 12 属 20 种,19 种底栖有孔虫,1 种浮游有孔虫。每 100 g 沉积物含有孔虫壳体 0~5 963 枚。有孔虫总丰度、分异度和属种深度分布见图 3。根据有孔虫的深度分布特征,以下层位含有孔虫分布特征为:①孔深 76~197 m 层几乎未见有孔虫,仅在 137.5~144.6 m 和 108.0~110.8 m 两个层位发现零星 *Ammonia beccar* II 及 *Cribronion subincertum* 个体。②孔深 28~76 m 层绝大多数不含微体生物,仅 3 个样品见有孔虫壳体,其中孔深 40 m 处丰度为 174 瓣/100 g;2 个样品仅见零星个壳体。③孔深 26 m 处有孔虫和介形类均较丰富,有孔虫丰度达 1 460 枚/100 g,分异度为 5;介形类丰度达 487 瓣/100 g。④孔深 14~16 m 层位为本孔有孔虫最丰富的层位,每 100 g 沉积物含有孔虫壳体数量为 4 356~5 963 枚,有孔虫种类也很丰富,其中 *Ammonia beccar* II、*Elphidium hispidulu* 及 *Elphidium magellanicum* 最为丰富。⑤孔深 7 m 处有孔虫丰度达每 100 g 沉积物 1 027 枚,简单分异度达 10。⑥孔深 2~6 m 层有孔虫少见,深度 4 m 处发现零星 *Ammonia beccar* II。

2.4 介形类

BZK03 孔分析介形类样品 91 个,共鉴定出介形类 5 属 7 种。每 100 g 沉积物含介形类壳体 0~955 瓣。介形类总丰度、分异度和属种深度分布见图 3。介形类丰度和分异度均偏低,仅不连续出现于 6 个层位,其他层位均未发现介形类化石。①孔深 48 m 处每 100 g 沉积物含介形类壳体仅 8 瓣,全部为 *Sinocytheridea impressa*。②孔深 42 m 处每 100 g 沉积物含介形类壳体最高仅为 13 瓣,均为 *Bicornythere* 属。③孔深 30 m 处见少量的 *Sinocytheridea impressa* 及 *Bico*

rnocythere bisanensis,每 100 g 沉积物含介形类壳体最高仅为 12 瓣。④孔深 26 m 处介形类壳体有所上升,主要为 *Sinocytheridea impressa* 及 *Neomonoceratina dongtaiensis*,每 100 g 沉积物含介形类壳体数量达到 487 瓣。⑤孔深 16 m 处介形类壳体数目为本孔最高值,每 100 g 沉积物含介形类壳体最高达为 955 瓣, *Loxoconcha ocellata*、*Neomonoceratina dongtaiensis*、*Sinocytheridea impressa*、*Neosinocythere elongata* 及 *Neomonoceratina delicata* 均有出现。⑥孔深 6 m 处见零星 *Sinocytheridea impressa*,每 100 g 沉积物含介形类壳体最高仅为 5 瓣。

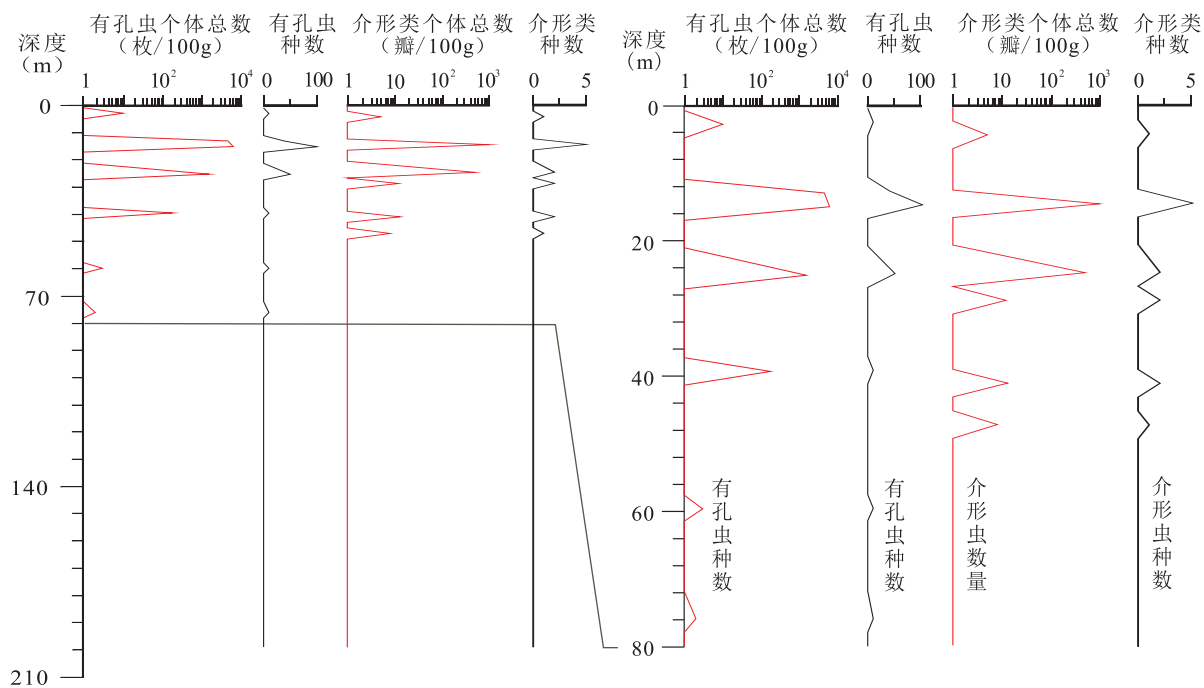


图 3 BZK03 钻孔有孔虫、介形类的丰度和分异度分布图

Fig. 3 Abundance and differentiation distribution of foraminifera and Ostracoda in BZK03

2.5 粒度

BZK03 钻孔粒度频率曲线表明(图 4),0~70 m 基本以细颗粒为主,粒径 $<100 \mu\text{m}$ 含量占比在 90%左右,反映为冲湖积、冲海积与海积共同作用的影响;70~80 m 沉积物粒度以粗颗粒为主,粒径 $<100 \mu\text{m}$ 含量仅占 32%左右,为冲积成因的河口相沉积环境;80~90 m 沉积物粒径 $<100 \mu\text{m}$ 含量占比达 94.7%,为较稳定的浅海

相沉积;90~150 m 以细颗粒的河流相、河湖相形态为主,粒度形态较单一,沉积环境较稳定(杜青松等,2016),沉积物粒径 $<100 \mu\text{m}$ 含量基本为 60%~75%;150~170 m 沉积物粒径 $>125 \mu\text{m}$ 含量占比在 70%左右,推断多为冲(洪)积成因,粗颗粒为河流环境;170~190 m 沉积物粒径 $<100 \mu\text{m}$ 含量占约 60%,细颗粒-粗形态颗粒互层,沉积环境变化频繁的河流相。

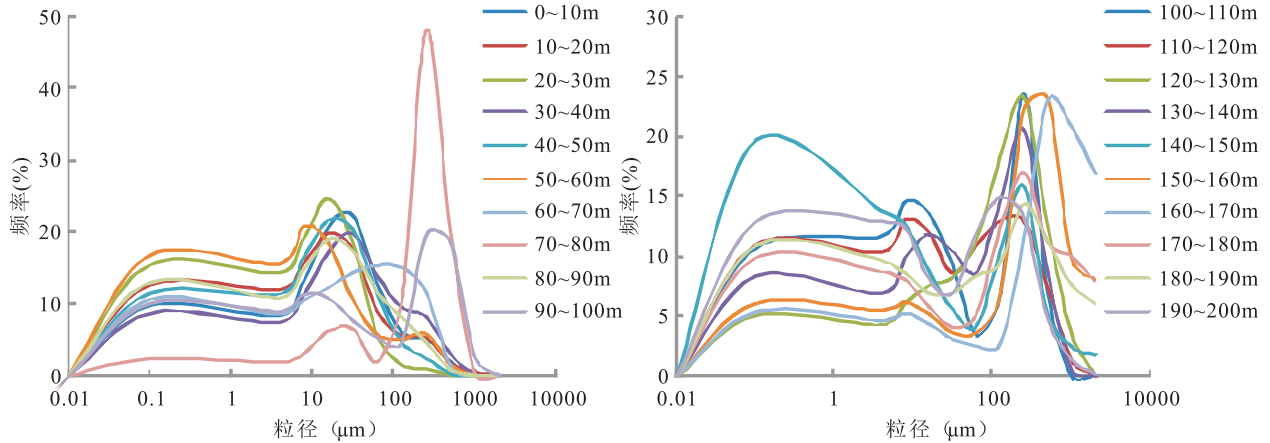


图4 BZK03 钻孔粒度频率曲线图

Fig. 4 Granularity frequency curve of BZK03

3 讨论

3.1 岩性分层及地层划分

BZK03 孔岩性照片和岩性分层见图 5, 可将钻孔自下而上依次为白垩纪衢县组的风化粉砂岩 (K_2q , 198.50~206.85 m), 以及第四纪沉积的嘉兴组、前港组、东浦组、宁波组、镇海组。

(1) 嘉兴组。全部为陆相沉积物, 根据颗粒粗细、岩性特征规律, 分为 2 段, 硬土层为顶, 砂、砂砾石为底, 厚度为 53.9 m。144.6~150.4 m 为冲湖积成因嘉兴组三段 ($al-lN - Q_{p1}j^3$), 厚度为 5.8 m, 岩性以亚粘土为主。150.4~194.3 m 为冲(洪)积成因嘉兴组三段 ($al(pl)N - Q_{p1}j^3$), 厚度为 43.9 m, 上部 26.2 m 岩性以含粘性土砂、砾砂为主; 中部 6.8 m 岩性为细砂、粉砂; 下部 10.9 m 为亚砂土和含砾中砂交替出现。194.3~195.0 m 为冲湖积成因嘉兴组二段 ($al-lN - Q_{p1}j^2$), 厚度为 0.7 m, 岩性以亚粘土为主。195.0~198.5 m 为冲(洪)积成因嘉兴组二段 ($al(pl)N - Q_{p1}j^2$), 厚度为 3.5 m, 岩性以细砂为主。

(2) 前港组。以硬土层为标志, 分为 2 段, 总厚度为 56.3 m。88.3~91.2 m 为冲湖积成因前港组二段 ($al-lQ_{p2}q^2$), 厚度为 2.9 m, 亚粘土夹中砂。91.2~96.1 m 为湖沼积成因前港组二段 ($lhQ_{p2}q^2$), 厚度为 4.9 m, 亚粘土, 层理发育。96.1~104.2 m 为冲积成因前港组一段 ($alQ_{p2}q^2$), 厚度为

8.1 m, 中砂, 粘粒含量高。104.2~118.0 m 为冲湖积成因前港组一段 ($al-lQ_{p2}q^1$), 厚度为 13.8 m, 亚粘土为主, 部分夹层亚砂土。118.0~124.0 m 为冲积成因前港组一段 ($alQ_{p2}q^1$), 厚度为 6.0 m, 岩性细砂为主。124.0~129.0 m 为冲湖积成因前港组一段 ($al-lQ_{p2}q^1$), 厚度为 5.0 m, 亚粘土为主。129.0~137.5 m 为冲积成因前港组一段 ($alQ_{p2}q^1$), 厚度为 8.5 m, 中细砂与亚粘土互层。137.5~144.6 m 为冲湖积成因前港组一段 ($al-lQ_{p2}q^1$), 厚度为 7.1 m, 细砂, 夹亚粘土薄层。

(3) 东浦组。主要为亚粘土层, 厚度为 26.5 m。61.8~68.1 m 为海积成因东浦组 ($mQ_{p3}d$), 厚度为 6.3 m, 亚粘土夹亚砂土, 微层理发育。68.1~80.0 m 为冲积成因东浦组 ($alQ_{p3}d$), 厚度为 11.9 m, 中砂, 夹亚粘土。80.0~88.3 m 为海积成因东浦组 ($mQ_{p3}d$), 厚度为 8.3 m, 岩性为亚粘土层。

(4) 宁波组。上部主要为亚粘土层, 下部粘土层, 厚度为 45.2 m。16.6~28.2 m 为冲湖积成因宁波组二段 ($al-lQ_{p3}n^2$), 厚度为 11.6 m, 亚粘土, 含铁锰质氧化物较多。28.2~31.3 m 为海积成因宁波组二段 ($mQ_{p3}n^2$), 厚度为 3.1 m, 亚粘土。31.3~45.9 m 为冲湖积成因宁波组一段 ($al-lQ_{p3}n^1$), 厚度为 14.6 m, 亚粘土为主, 夹粘土、亚砂土。45.9~52.1 m 颗粒较粗, 为海积成因宁波组一段 ($mQ_{p3}n^1$), 厚度为 6.2 m, 粘土层。52.1~61.8 m 为冲海积成因宁波组一段 ($al-mQ_{p3}n^1$), 厚度为 9.7 m, 亚砂土夹亚粘土互层。

(5)镇海组。上覆淤泥质亚粘土,下伏亚粘土与亚砂土夹层,厚度为16.6 m。0~4.0 m为冲湖积成因镇海组二段($al-lQhzh^2$),0~0.9 m为杂填土,下部为亚粘土。4.0~7.3 m为湖沼积成因镇海组二段($lhQhzh^2$),厚度为3.3 m,亚砂土夹淤泥质亚

粘土。7.3~15.0 m为冲湖积成因镇海组一段($al-lQhzh^1$),厚度为7.7 m,亚粘土与粘土互层。15.0~16.6 m为冲海积成因镇海组一段($al-mQhzh^1$),厚度为1.6 m,亚砂土夹亚粘土,微层理发育。

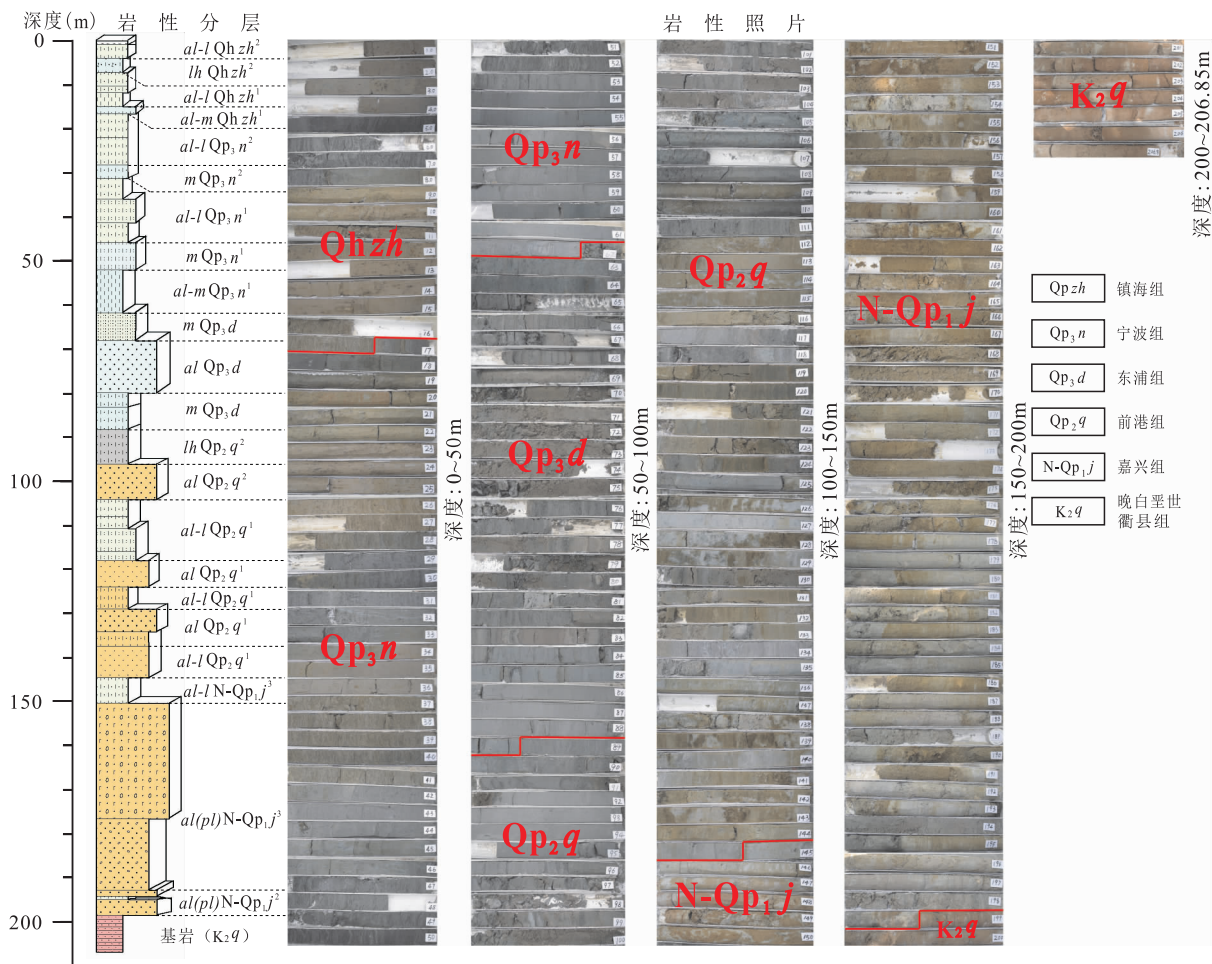


图5 BZK03 钻孔岩性分层及地层划分图

Fig. 5 Lithology stratification and stratigraphic division of BZK03

3.2 多重地层划分对比

通过粒度分析、有孔虫分析、磁化率等指标提供的信息来区分不同层位的沉积相;根据孢粉、有孔虫等指标恢复不同时期的气候,这已被广泛应用于第四纪研究(吴洁等,2014;佘桐等2018;于俊杰等2016;刘杜娟等,2005;刘春莲等,2008)。BKZ03孔揭示的地层为孔深198.5 m以上的沉积记录,根据岩性地层分层特征、沉积相、孢粉、有孔虫及介形类以及粒度分布频率曲线对钻孔的沉积

环境进行综合分析,建立BKZ03孔多重地层划分框架(图6)。

(1)早更新世(144.6~198.5 m)。钻孔揭露早更新世地层相当于孢粉P1带早期,沉积物为亚粘土、含粘性土砂、细砂、中砂和亚砂土为。下部冲(洪)积成因嘉兴组二段属于河流相和河湖相沉积,粘粒含量较高,孢粉组合反映植被较少,气候寒冷干燥,推测为第三寒冷期。上部冲(洪)积成因嘉兴组三段属于河流相沉积为主,木本植物平均含量约为

17.3%,以松属等针叶植物为主,同时含有少量栎属花粉,本阶段几乎不含草本植物花粉,根据孢粉组合特征,推测当时的沉积环境水动力条件较强,植被为暖温带混交林,气候偏凉,推测为第四温暖期。顶部 144.6~150.4 m 为冲湖积成因嘉兴组

三段河湖相沉积,孢粉含量低,推测为第四寒冷期。根据多重地层划分对比,依据古土壤层及河流冲刷面等寒冷期的标志,按暖期—冷期的周期律,BZK03 孔揭示研究区早更新世时期存在 2 个气候旋回过程。

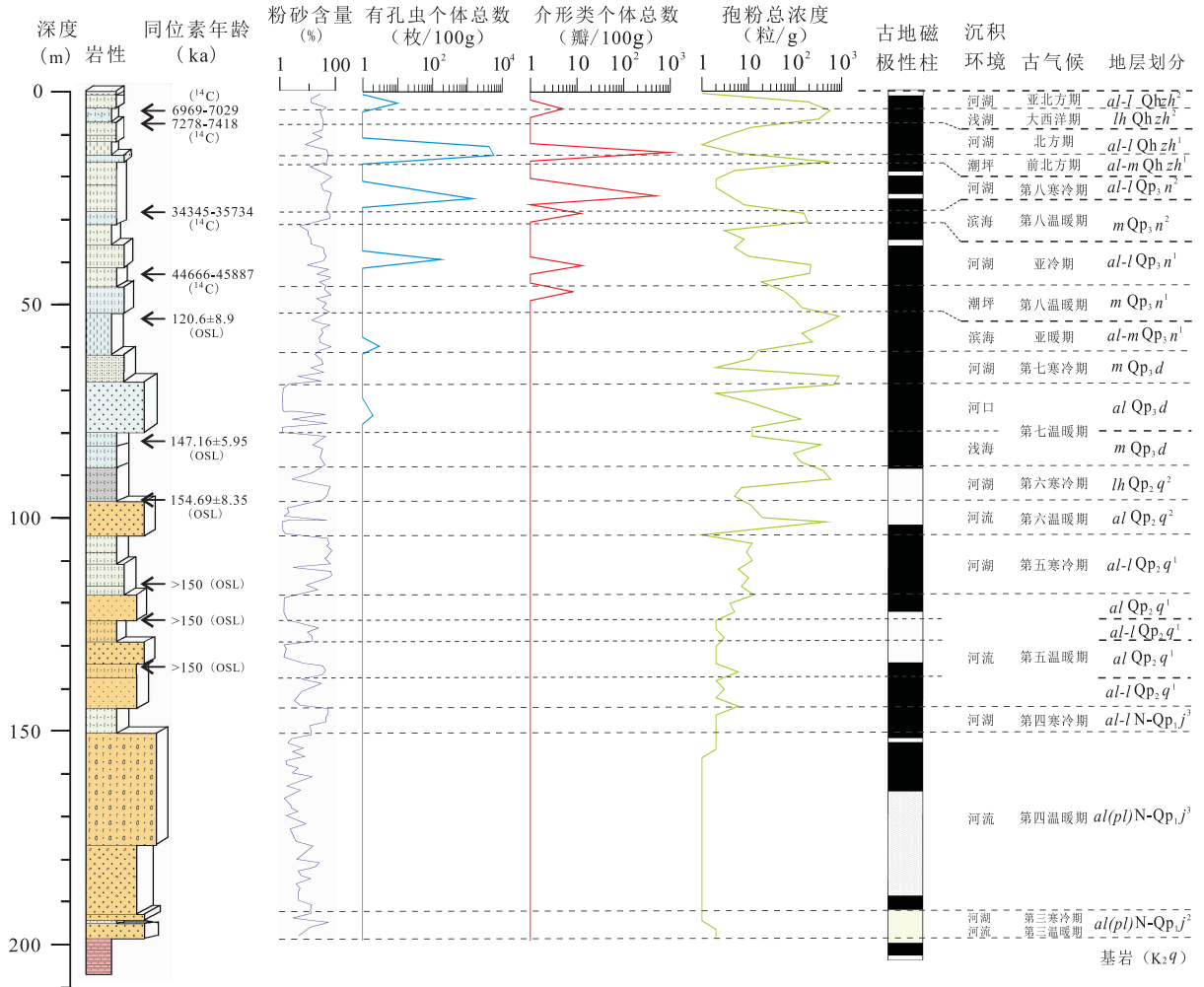


图 6 BZK03 钻孔多重地层划分对比图

Fig. 6 Multiple stratigraphic division and correlation of BZK03

(2)中更新世(88.3~144.6 m)。钻孔揭露中更新世地层对应孢粉 P1 带后期及 P2~P4 带沉积物多为亚粘土、细砂,含较多铁锰质氧化物。下段前港组一段(104.2~144.6 m)为河流相和河湖相沉积。河流相层位孢粉含量较高,木本植物花粉含量占绝对优势,含量占比为 81.6%,气候类型应为亚热带季风气候,温暖湿润,推测为第五温暖期,河湖相层位孢粉含量低,推测为第五寒冷期。上段前港

组二段为湖沼积和冲积成因,孔深 95.8 m 处测得的 OSL 年龄为(154.69±8.35) ka,属于河流相和河湖相沉积地层。河流相层位木本植物花粉含量占据优势,含量占比为 57.7%,气候类型应为温带海洋性气候,温冷湿润,该时期推测对应第六暖期和第六寒冷期的短期气候旋回变化。多重地层划分对比揭示 BZK03 孔在中更新世包括 2 个气候旋回。

(3)晚更新世(16.6~88.3 m)。多重地层划分对比表明,BZK03孔在孢粉组合P5~P15带对应晚更新世地层,反映晚更新世包括2个气候旋回。东浦组(61.8~88.3 m)以亚粘土层为主,夹中砂和粉砂层,早期为浅海相和河口相沉积,少见微体古生物,孢粉总浓度较高,木本植物主要为常绿栎及松属等针叶植物花粉占优,孢粉组合表现的植被类型应为亚热带草原和森林交互地带,气候温暖偏湿,推测为第七暖期;东浦组晚期为河湖相沉积,本阶段孢粉含量极少,气候条件应为冷而干,推测为第七寒冷期。晚更新世晚期为宁波组(16.6~61.8 m),主要为河湖相、潮坪和滨海相沉积,宁波组下段孢粉总浓度较高,孢粉P8~P12带均反映植被类型应为亚热带森林,气候温暖偏湿、温凉湿润,推测对应第八温暖期;宁波组上段含 *Bicorncythere bisanensis*、*Sinocytheridea impressa* 及 *Neomonoceratina dongtaiensis* 等介形类,在孔深26 m层位有孔虫和介形类均较丰富,有孔虫丰度达1460枚/100 g,孢粉含量较低,对应孢粉P13~P15带,气候寒冷而干燥,推测对应第八寒冷期。

(4)全新世(0~16.6 m)。全新世早期,气候温暖,海平面上升,揭示为镇海组,沉积环境为河湖相、浅湖相和潮坪相等,对应孢粉P16~P18带。下部为镇海组一段地层(7.3~16.6 m),亚粘土夹亚砂土层,底部有孔虫丰富,尤其在孔深14~16 m处,每100 g沉积物含有孔虫壳体数量达4356~5963枚,并且有孔虫种类也很丰富,其中 *Ammonia beccar* II、*Elphidium hispidulu* 及 *Elphidium magellanicum* 最为丰富;介形类含量也丰富,主要有 *Loxoconcha ocellata*、*Neomonoceratina dongtaiensis*、*Sinocytheridea impressa*、*Neosinocythere elongata* 及 *Neomonoceratina delicata* 等;该时期孢粉总浓度稍低,草本植物花粉含量占较大优势,含量为62.6%,孢粉组合表现的气候类型应为亚热带草原气候,温暖偏湿,推测为北方期的古气候时期。上部为镇海组二段地层(0~7.3 m),主要为亚粘土层,孔深7 m处有孔虫丰度达每100 g沉积物1027枚,孔深4 m处发现零星 *Ammonia beccar* II;孔深6 m处见零星 *Sinocytheridea impressa* 介形类;本阶段孢粉含量明显回升,平均浓度约为35.5粒/g,蕨类植物仍占优,平均含量高达42.0%,孢

粉组合表现的植被类型应为落叶阔叶林,气候温暖湿润。

4 结论

(1)根据岩性分层、粒度分析和同位素年龄测定,推测BZK03钻孔自下而上依次为白垩纪衢县组的风化粉砂岩及第四纪沉积的嘉兴组、前港组、东浦组、宁波组、镇海组。嘉兴组位于孔深144.6~198.5 m,厚度为53.9 m,对应早更新世地层;前港组位于孔深88.3~144.6 m,厚度为56.3 m,对应中更新世地层;东浦组位于孔深61.8~88.3 m,厚度为26.5 m,宁波组位于孔深16.6~61.8 m,厚度为45.2 m,对应晚更新世地层;镇海组位于孔深0~16.6 m,对应全新世地层。

(2)通过孢粉组合和多重地层划分对比分析,可将钻孔划分18个孢粉带和6个气候旋回。早更新世地层相当于孢粉P1带早期,对应2个古气候旋回,下部冲(洪)积成因嘉兴组二段属于河流相和河湖相沉积,孢粉组合反映植被较少,气候寒冷干燥;上部冲(洪)积成因嘉兴组三段属于河流相沉积,不含草本植物花粉,植被为暖温带混交林,气候偏凉。中更新世地层包含2个古气候旋回,对应孢粉P1带后期及P2~P4带,下部前港组一段为河流相和河湖相沉积,包含温暖湿润和短期的寒冷干燥气候;上部前港组二段为湖沼积和冲积成因,为温带海洋性气候,温冷湿润。晚更新世地层对应孢粉组合P5~P15带,揭示2个气候旋回,包含浅海相、河口相的东浦组和河湖相、潮坪相的宁波组气候温暖偏湿、温凉湿润,宁波组上段有孔虫和介形类均较丰富,气候寒冷而干燥;全新世地层为镇海组,沉积环境为河湖相、浅湖相和潮坪相,对应孢粉P16~P18带,底部有孔虫、介形类数量和种类丰富,为亚热带草原气候,温暖偏湿。

参考文献(References):

- 黄向青,梁开,夏真,等.北部湾北部上更新统的沉积特征及其记录的古环境[J].第四纪研究,2018,38(2):454-471.
- HUANG Xiangqing, LIANG Kai, XIA Zhen, et al. The

- sedimentary characteristics of Upper Pleistocene and its palaeo-environmental records in northern Beibu Gulf [J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(2): 454-471.
- 苏建锋, 范代读, 冷伟, 等. 冰后期以来长江水下三角洲层序地层特征及沉积环境演化[J]. *古地理学报*, 2017, 19(3): 541-556.
- SU Jianfeng, FAN Daidu, LENG Wei, et al. Postglacial sequence stratigraphy and sedimentary environment evolution of the Yangtze River subaqueous delta[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(3): 541-556.
- 杨云平, 李义天, 孙昭华, 等. 长江口邻近陆架表层沉积物变化特征及成因[J]. *沉积学报*, 2014; 32(5): 863-872.
- YANG Yunping, LI Yitian, SUN Zhaohua, et al. Surface sediment in the nearby shelf of the Yangtze River: Change and Causes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(5): 863-872.
- 汤文坤, 王永, 董进, 等. 海南北部近 2000 年气候环境变化——来自双池玛珥湖高分辨率沉积记录[J]. *西北地质*, 2017, (1): 291-300.
- TANG Wenkun, WANG Yong, DONG Jin, et al. High Resolution Paleoenvironmental Evolution Revealed by a Lacustrine Sediment Sequence in Shuangchi Maar Lake during Past 2000 Years in North Hainan Island[J]. *Northwestern Geology*, 2017, (1): 291-300.
- 邓智瑞, 何青, 邢超锋, 等. 长江口北槽柱状沉积物粒度分布特征及沉积环境指示意义[J]. *海洋科学*, 2016, 40(1): 112-122.
- DENG Zhirui, HE Qing, XING Chaofeng, et al. Sediment depositional characteristics of North Passage in the Yangtze River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(1): 112-122.
- 朱季文, 季子修, 蒋自巽, 等. 海平面上升对长江三角洲及邻近地区的影响[J]. *地理科学*, 1994, 14(2): 109-117.
- ZHU Jiwen, JI Zixiu, JIANG Zixun, et al. Impacts of sea level rise on the Changjiang River Delta and its adjacent area[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1994, 14(2): 109-117.
- 张玉兰. 长江三角洲前缘地区晚第四纪沉积的孢粉与环境研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 2005, 27(4): 82-87.
- ZHANG Yulan. Studies on sporo-pollen and environment of Late Quaternary on the front edge of Changjiang River Delta[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(4): 82-87.
- 赵宝成. 长江三角洲前缘晚第四纪层序特征及冰后期海平面波动沉积响应[J]. *上海国土资源*, 2013, 34(2): 50-54.
- ZHAO Baocheng. Late Quaternary sequence stratigraphy of the Yangtze River Delta-Front area with special reference to the response of the sedimentary environment to postglacial sea-level change[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2013, 34(2): 50-54.
- 白雪莘, 张卫国, 董艳, 等. 长江三角洲全新世地层中潮滩沉积磁性特征及其古环境意义[J]. *沉积学报*, 2016, 34(6): 1165-1175.
- BAI Xuexin, ZHANG Weiguo, DONG Yan, et al. Magnetic properties of holocene tidal flats in the Yangtze Delta and their paleoenvironmental implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(6): 1165-1175.
- 刘静伟, 赵淑君, 程捷, 等. 杭州湾钱塘江两岸全新世以来的古植被及古气候研究[J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 235-245.
- LIU Jingwei, ZHAO Shujun, CHENG Jie, et al. A study of vegetation and climate evolution since the Holocene near the banks of the Qiantang River in Hangzhou Bay[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 235-245.
- 黎兵, 魏子新, 李晓, 等. 长江三角洲第四纪沉积记录与古环境响应[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(2): 316-328.
- LI Bing, WEI Zixin, LI Xiao, et al. Records from quaternary sediment and palaeo-environment in the Yangtze River Delta [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(2): 316-328.
- 贾丽, 张玉兰. 长江三角洲东缘晚新近纪沉积的孢粉与古环境研究[J]. *微体古生物学报*, 2006, 23(1): 70-76.
- JIA Li, ZHANG Yulan. Studies on palynological assemblages and paleoenvironment of late quaternary in the east margin of the Changjiang(Yangtze) River Delta[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2006, 23(1): 70-76.
- 杜青松, 常诗楠, 李志华, 等. 全新世以来岱海湖泊沉积与环境演变[J]. *西北地质*, 2013, 46(3): 140-147.
- DU Qingsong, CHANG Shinan, LI Zhihua, et al. Holocene Lake Sediments and Environmental Changes in Daihai [J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(3): 140-147.
- 陈静, 李晓, 王张华, 等. 长江三角洲 120kaB.P. 以来孢粉记录反映的古气候变化及其与海平面的耦合[J]. *海洋科学*, 2009, 32(2): 68-73.
- CHEN Jing, LI Xiao, WANG Zhanghua, et al. Paleoclimate and sea level fluctuations in Shanghai region: sporo-pollen implications during the past 120000 years[J]. *Marine Sciences*, 2009, 32(2): 68-73.
- 赵亚楠, 王张华, 吴绪旭, 等. 长江口现代潮滩沉积物粒度特征及其在沉积相识别中的应用[J]. *古地理学报*,

- 2015, 17(3): 405-416.
- ZHAO Yanan, WANG Zhanghua, WU Xuxu, et al. Grain size distribution of modern tidal flat sediments at the Yangtze River mouth and its application to identification of sedimentary facies[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(3): 405-416.
- 王张华, 丘金波, 冉莉华, 等. 长江三角洲南部地区晚更新世年代地层和海水进退[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 1-8.
- WANG Zhanghua, QIU Jinbo, RAN Lihua, et al. Chronostratigraphy and transgression/regression during late Pleistocene in the Southern Changjiang (Yangtze) River Delta Plain[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(4): 1-8.
- 王张华, 赵宝成, 陈静, 等. 长江三角洲地区晚第四纪年代地层框架及两次海侵问题的初步探讨[J]. *古地理学报*, 2008, 10(1): 99-110.
- WANG Zhanghua, ZHAO Baocheng, CHEN Jing, et al. Chronostratigraphy and two transgressions during the late Quaternary in Changjiang Delta Area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(1): 99-110.
- 李泉, 赵艳. 基于孢粉组合定量重建古植物多样性的方法与进展[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(4): 821-829.
- LI Quan, ZHAO Yan. Quantitative methods and progress of paleo-floristic diversity reconstruction based on pollen assemblages[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(4): 821-829.
- 杜青松, 常诗楠, 李志华, 等. 全新世以来岱海湖泊沉积与环境演变[J]. *西北地质*, 2013, 46(3): 140-147.
- DU Qingsong, CHANG Shinan, LI Zhihua, et al. Holocene Lake Sediments and Environmental Changes in Daihai [J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(3): 140-147.
- 吴洁, 刘春莲, 张素青, 等. 珠江三角洲东部晚第四纪微体动物群的古环境意义[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2014, 53(6): 45-52.
- WU Jie, LIU Chunlian, ZHANG Suqing, et al. Palaeoenvironmental significance of late quaternary microfaunas in the eastern pearl river delta[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014, 53(6): 45-52.
- 仵桐, 王炬川, 杨涛, 等. 西昆仑苏巴什东部侏罗系杨叶组孢粉化石的发现及其沉积环境分析[J]. *西北地质*, 2018, (1): 44-53.
- WU Tong, WANG Juchuan, YANG Tao, et al. Discovery and Sedimentary Environment of Sporopollen Fossils at Jurassic Yangye Formation in East Subashi, West Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2018, (1): 44-53.
- 于俊杰, 劳金秀, 蒋仁, 等. 基于多重地层对比研究还原长江三角洲北翼晚第四纪古环境演变[J]. *地质通报*, 2016, 35(10): 1692-1704.
- YU Junjie, LAO Jinxiu, JIANG Ren, et al. Reconstruction of the Late Quaternary palaeoenvironment on the north wing of Yangtze River Delta, based on comparative study of the multistratigraphies[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(10): 1692-1704.
- 刘杜娟, 叶银灿. 长江三角洲地区的相对海平面上升与地面沉降[J]. *地质灾害与环境保护*, 2005, 16(4): 400-404.
- LIU Dujuan, YE Yincan. Relative sea surface rise and land subsidence in Changjiang Delta Area[J]. *Journal of Geological Hazards And Environment Preservation*, 2005, 16(4): 400-404.
- 刘春莲, Fürsich Franz T., 董艺辛, 等. 珠江三角洲 PRD05 孔的高分辨率介形类记录与晚第四纪古环境重建[J]. *古地理学报*, 2008, 10(3): 313-322.
- LIU Chunlian, FRANZ T FÜRSICH, DONG Yixin, et al. High resolution ostracod records of borehole PRD05 and the late Quaternary palaeoenvironment in Pearl River Delta[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(3): 313-322.
- CHEN Qingqiang, LI Congxian, LI Ping, et al. Late Quaternary palaeosols in the Yangtze Delta, China, and their palaeoenvironmental implications [J]. *Geomorphology*, 2008; 100(3-4): 465-483.
- MIAO Yunfa, ZHANG Ping, LU Shengmei, et al. Late Quaternary pollen records from the Yangtze River Delta, East China, and its implications for the Asian monsoon evolution [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015; 8(10): 7845-7854.