

doi: 10.12029/gc20220221

陈忠良, 张晋喆, 沈仕豪, 黄蒙, 徐锦龙, 葛海影, Simon M. Jowitt. 2022. 长江中下游水阳江流域 BZK0402 孔多重地层划分及其冰后期海平面变化的沉积响应[J]. 中国地质, 49(2): 655–666.

Chen Zhongliang, Zhang Jinzhe, Shen Shihao, Huang Meng, Xu Jinglong, Ge Haiying, Simon M. Jowitt. 2022. Multi-stratigraphic study and response to sea-level fluctuations since the last deglaciation detected from BZK0402 core in the Shuiyang River basin, Yangtze River[J]. *Geology in China*, 49(2): 655–666(in Chinese with English abstract).

长江中下游水阳江流域 BZK0402 孔多重地层划分及其冰后期海平面变化的沉积响应

陈忠良^{1,2}, 张晋喆¹, 沈仕豪¹, 黄蒙¹, 徐锦龙¹, 葛海影¹, Simon M. Jowitt³

(1. 安徽省地质调查院, 安徽合肥 230001; 2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009; 3. 内华达大学拉斯维加斯分校地球科学学院, 内华达州拉斯维加斯 89154–4010)

摘要:【研究目的】开展水阳江流域标准孔 BZK0402 孔多重地层划分, 探讨长江支流水阳江流域冰后期海平面变化的沉积响应以及古丹阳湖的成因和形成时代。【研究方法】以岩石地层为基础, 在磁性地层和年代地层的双重约束下, 对 BZK0402 孔进行多重地层划分。对比分析 BZK0402 孔和长江河谷、长江三角洲等邻区钻孔。【研究结果】BZK0402 孔第四纪地层可划分为中一下更新统大桥镇组、全新统芜湖组。钻孔所属的长江三角洲西缘河湖环境沉积物对末次盛冰期以来海平面升降和气候变化存在沉积响应: 末次盛冰期, 长江中下游河流比降大, 区内河流侵蚀作用强烈, 沉积物以砂砾石层为主; 全新世早期, 区内受冰后期海侵影响, 沉积物粒度逐渐变细, 沉积环境由河漫滩相向湖相过渡。植被覆盖类型以针叶林为主, 林下蕨类植物生长茂盛。平原地区发育湖泊沼泽; 全新世中期, 海侵逐渐至最大, 区内发育湖相淤泥质黏土。森林面貌以针叶–落叶阔叶混交林为主; 全新世晚期至今, 区内沉积物有扰动现象。【结论】长江支流水阳江河谷中不仅是全新世沉积, 还发育更新世沉积。水阳江流域内古丹阳湖形成于全新世早期, 其形成与全新世海侵在时间上存在一致性。

关键词: 磁性地层; ¹⁴C 测年; 光释光测年; 古丹阳湖; 全球气候变化; 环境地质调查工程; 长江

创新点: 长江支流水阳江河谷中发育更新世–全新世沉积。水阳江流域内古丹阳湖的形成与全新世海侵具有时间协同效应。

中图分类号: P534.63 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)02-0655-12

Multi-stratigraphic study and response to sea-level fluctuations since the last deglaciation detected from BZK0402 core in the Shuiyang River basin, Yangtze River

CHEN Zhongliang^{1,2}, ZHANG Jinzhe¹, SHEN Shihao¹, HUANG Meng¹,
XU Jinglong¹, GE Haiying¹, Simon M. Jowitt³

(1. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China; 2. School of Resources and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 3. Department of Geoscience, University of Nevada Las Vegas, Las Vegas 89154–4010, Nevada, USA)

收稿日期: 2019–04–04; 改回日期: 2019–10–05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160036, DD20190043)和安徽省自然科学基金青年项目(1808085QD116)联合资助。

作者简介: 陈忠良, 男, 1984 年生, 博士生, 高级工程师, 长期从事区域地质调查和地学信息技术研究; E-mail: c_mulder@163.com。

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective]To carry out multi-stratigraphic research on the borehole BZK0402 located in the Shuiyang River basin, and explore the sea-level fluctuations since the last deglaciation and the origin of the Paleo-Danyang Lake formation. **[Methods]**Based on the lithostratigraphical classification and the magnetostratigraphic and chronostratigraphical constraints, the multi-stratigraphic study on the BZK0402 core was carried out. Comparative analysis was also been made between the BZK0402 core and the cores which located in the Yangtze River valley and the Yangtze River delta. **[Results]**The analysis divided the BZK0402 core within Quaternary era into two units, namely the Middle-Upper Pleistocene Daqiaozhen Formation and the Holocene Wuhu Formation. The sediments through the western margin of the Yangtze River delta where the BZK0402 core lies in, also furthers our understanding of the general pattern of sea-level change since the Last Glacial Maximum (LGM), with these changes divided into four stages as follows: (1) The LGM was associated with a period of gravel and sand dominated deposition as a result of steep slopes and significant strong fluvial erosion within the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. (2) The Early Holocene saw a decrease in the grain size of the sediments being deposited, with sedimentary facies changing from fluvial to lacustrine environments as a result of post-glacial transgression. This period also saw the development of pteridophyte undergrowth-dominated coniferous forest vegetation along with lakes and bog and swamp areas. (3) The Middle Holocene transgressive maximum was associated with the deposition of lacustrine clays that contain coniferous broad-leaved mixed forest vegetation. (4) These sediments are overlain by disturbed Late Holocene to present sediments, with this disturbance caused by uncertain factors. **[Conclusions]**The sediments in the Shuiyang River, which is a tributary of Yangtze River, not only formed within Holocene, but also formed in Pleistocene. The Paleo-Danyang Lake located within the Shuiyang River Valley formed during the Early Holocene, and the period of the lake formation consistent with the Holocene transgression.

Keywords: paleomagnetism; ^{14}C dating; luminescence dating; Paleo-Danyang Lake; global climate change; environmental geological survey engineering; Yangtze River

Highlights: The Shuiyang River Valley records Pleistocene-Holocene sediments. The formation of the Paleo-Danyang Lake has a time-synergistic effect with Holocene transgression.

About the first author: CHEN Zhongliang, male, born in 1984, doctor candidate, senior engineer, mainly engaged in the regional geological survey and information technology research on geosciences; E-mail: c_mulder@163.com.

Fund Support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20160036, DD20190043) and Anhui Provincial Natural Science Foundation (No.1808085QD116).

1 引 言

全球气候变化及局地的沉积响应一直是第四纪地质研究的热点问题之一(王中波等, 2020; 赵勇等, 2021)。长江中下游地区作为经济快速发展的地区, 面临着诸多地质问题(Jiang et al., 2018; Wang et al., 2019a), 其在第四纪时期对全球气候变化的局地沉积响应也吸引了众多研究者的目光, 相关研究成果相继发表。其中, 针对沉积序列(Wang et al., 2019b; Liu et al., 2019)、长江贯通时间(范代读和李从先, 2007; 张信宝等, 2018)、湖泊的成因与演化(杨达源等, 2000; 张风菊等, 2016)、长江古河谷发育状况(曹光杰, 2006; 杨献忠等, 2010)、人类活动的影响(薛滨等, 2008; 姚书春和薛滨, 2009)等科学问题都是学者们关注的热点问题,

并在学术界存在一些争论。对于这些科学问题, 第四纪松散沉积物的时代归属和地层划分是每个研究者需要首先面对的基础地质问题。

发源于青藏高原的长江流域自西向东贯穿中国腹地, 长江中下游地区作为长江流域的主要沉积区, 其沉积物忠实地记录了流域气候、河流及源区构造演化等信息。近年, 长江中下游地区的长江三角洲已经在地层、沉积环境和河海相互作用研究方面取得了成果。但是同属长江中下游地区, 处于长江三角洲西缘的水阳江流域的第四系沉积物的地层划分和气候变化研究还很薄弱。对于流域内古丹阳湖的成因, 杨达源等(2000)认为构造沉降是长江中下游湖泊形成的主因。而长江顶托、河流迁移造成的地貌和自然地理横向分异等非构造因素也被认为与古丹阳湖的形成有关(李灼华, 1989)。人

类大规模的围湖垦殖活动被认为加速了古丹阳湖的消亡(戴锦芳和赵锐,1992;庄华峰,2005)。人类活动对湖泊环境演化具有明显的影响。

笔者在水阳江流域宣城段以地质钻探方法为主,开展了较系统的第四纪地质调查。本文选取河湖环境下的BZK0402孔,以岩石地层为基础,在磁性地层和年代地层的双重约束下,对钻孔岩心进行第四纪多重地层划分。结合孢粉分析鉴定,并与长江河谷和长江三角洲等邻区开展对比,探讨长江支流水阳江流域冰后期海平面变化的沉积响应以及古丹阳湖的成因和形成时代。

2 区域地质背景与岩心特征

2.1 区域地质背景

BZK0402孔位于安徽省东南部宣城市宣州区境内。长江支流水阳江从南向北贯穿本区域。在大地构造位置上位于扬子陆块,属下扬子被动陆缘和江南隆起带的结合部位,如图1a。NE向江南断裂带于北西段横穿本区。区内发育盆地构造(宣广盆地)和逆冲推覆构造。区内第四纪地层属于中南—东南地层区下扬子地层分区芜湖—安庆地层小区,可分为河湖环境、坡麓环境和洞穴环境。其中,河湖环境主要是长江支流——水阳江和青弋江冲积平原,地形平坦,以河湖相沉积为主。河湖环境下的第四纪地层一般在10~20 m。通过系统的浅钻揭露,具南向北逐渐加厚的趋势。

水阳江流域下游在全新世存在古丹阳湖,古丹阳湖的范围可从圩区湖相沉积物——青灰色淤泥质黏土的广泛分布得到证实(李灼华,1989)。图1b为古丹阳湖的大致范围。据《三国志》卷64《濮阳兴传》记载,吴景帝永安三年(260年),丹阳都尉严密“建丹杨(阳)湖田,作浦里塘”。古丹阳湖区圈圩垦殖始于三国东吴时期。入宋以后,宣城当涂等地兴建大批圩田(庄华峰,2005)。《宋史》卷173《食货上一·农田》记载,宋绍兴二十三年(1153年)，“宣州水泛滥至境,县诸圩尽没”。至今,古丹阳湖已萎缩成固城湖、石臼湖和南漪湖等现代湖泊。

2.2 BZK0402孔岩心特征

BZK0402孔位于宣城市东侧的水阳江东岸圩区内,距北东向的南漪湖约35 km(图1b),坐标(30°59'29"N,118°46'31"E,H:9 m),孔深13.2 m。钻孔钻

至基岩风化层。基岩为始新统双塔寺组,岩性为砖红色泥岩。12.8 m以上均为第四纪地层。第四纪沉积物岩性为砂砾石、粉细砂、粉质黏土、黏土、淤泥质黏土等。自下而上分为:

(1)0.00~0.25 m,灰褐色耕填土,含植物根须,松散。

(2)0.25~1.05 m,灰色含铁锰结核黏土,可塑。结核含量约5%,分布较均匀。

(3)1.05~1.30 m,灰色黏土,可塑。

(4)1.30~1.50 m,灰黄色含铁锰结核黏土,硬塑。结核含量约3%,分布较均匀。

(5)1.50~1.70 m,浅灰褐色黏土,硬塑。偶含铁锰结核颗粒。

(6)1.70~2.00 m,灰黄色粉质黏土,可塑。

(7)2.00~2.10 m,灰黄色黏质粉砂,密实,稍湿。

(8)2.10~2.20 m,灰黄色细砂,中密,湿。

(9)2.20~5.00 m,灰黑色淤泥质黏土,流塑。

(10)5.00~5.45 m,褐色淤泥质黏土,流塑。

(11)5.45~6.50 m,灰褐色粉质黏土,可塑。

(12)6.50~7.05 m,灰褐色黏土,软塑。

(13)7.05~7.50 m,灰褐色粉质黏土,硬塑。

(14)7.50~12.80 m,灰色、灰黄色砂砾石层,松散,湿。砾石含量约50%,分选中。砾径大者约6 cm,一般1.5~3 cm,呈次棱角状—次圆状。砾石成分主要为石英砂岩、硅质岩。

(15)12.80~13.20 m,强风化砖红色泥岩。

3 材料与方法

3.1 古地磁

本次针对BZK0402孔岩性进行连续定向取样。采样均在现场剖开岩心,采用2 cm×2 cm×2 cm塑料盒扣在半盒岩芯上按下取样。样品盒一侧用箭头标注顶、底方向。采样间隔20 cm左右。个别样品间隔在40~50 cm。共采集了古地磁样品40块。每个样品重量10 g左右。样品在中科院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室的无磁空间内开展测试工作。

测试选择全自动美国产2G-755R U-channel超导磁力仪系统(型号:Model 755R),对可能存在的次生剩磁采用交变退磁的方法作磁清洗。样品进行从10~70 mT交变磁场的逐步退磁,根据样品

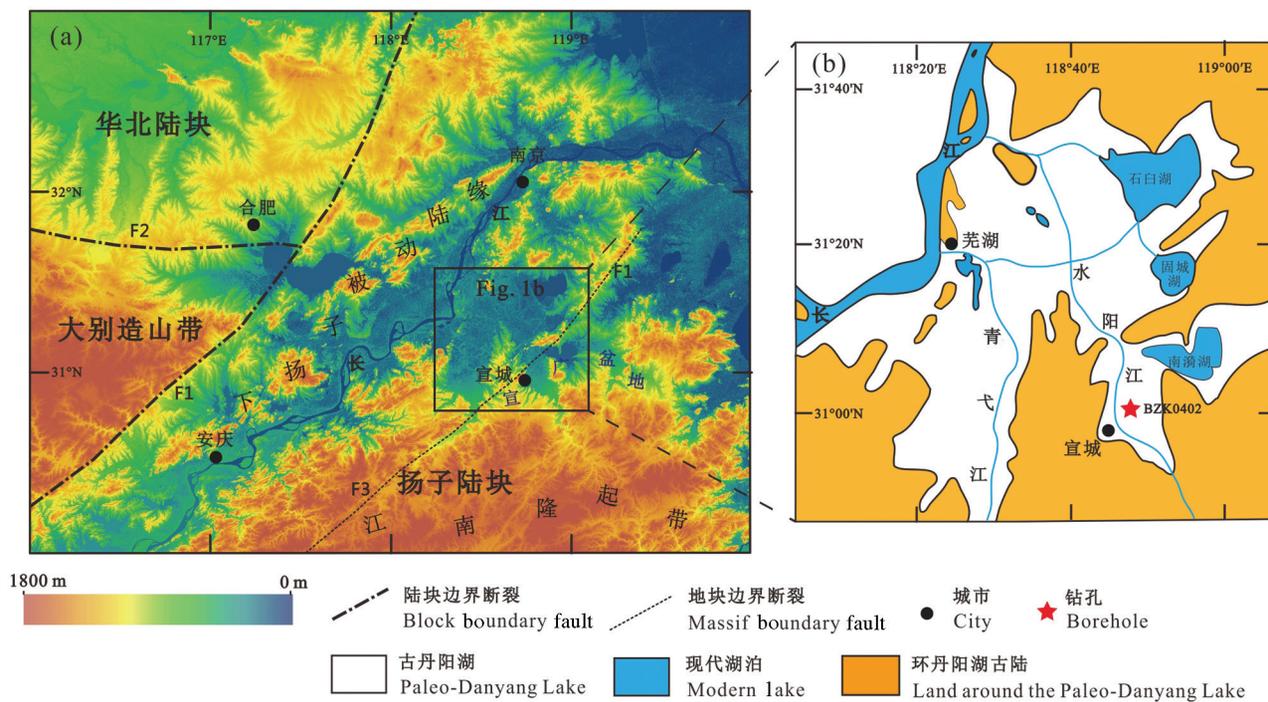


图1 研究区及BZK0402孔位置图

F1—滁庐断裂带; F2—六安断裂; F3—江南断裂带

Fig.1 Maps of the study area showing the topography and geology of the region

F1—Tancheng-Lujiang Fault; F2—Luan Fault; F3—Jiangnan Fault

的退磁曲线分析,样品的退磁值多数选在20~50 mT,少数样品选在60~70 mT。采样Kirsivink主向量分析法对这40个实验结果进行逐个分析以得到磁倾角和倾角误差。在分析的过程中,参考对应岩芯的照片及其分样时的描述,对于被扰动的岩心,如果其倾角发生反转,则将认为是扰动所致,相应地舍弃这部分结果。所得结果中只有退磁曲线清晰且明显趋向原点并且最大角偏差(MAD)小于20°的数据才被利用。

3.2 光释光与AMS ^{14}C 测年

针对BZK0402孔砂砾石层以及砂砾层之上的灰黑色黏土、淤泥质黏土层,分别采用光释光(OSL)测年AMS ^{14}C 测年方法进行绝对年龄定年。测年结果可以对古地磁样品进行年代约束。

光释光测年样品直接取自岩心中。取样时用黑雨伞避光取样。样品在岩性相对均一的细粉砂中采样,并剥去暴露表面后再取样。样品用铝罐包装。BZK0402孔采集光释光样品1个,样品重约1000 g。样品送往南京鲲鹏地质技术服务有限公司完成测试。OSL测年对经过化学前处理提纯后的

石英颗粒,采用单片再生剂量(SAR)测试程序,测试样品的等效剂量(De);通过样品含水量测试以及U、Th、K含量分析测试,算出样品的年剂量(Dose rate);根据样品所在高程、采样深度、位置(经度和纬度)、含水率以及样品环境剂量率等,按公式计算出样品OSL年代。OSL测年使用德国Lexsygresearch测年系统。样品环境剂量率有北京原子能研究院测试完成。主要测试年代范围为0.01~150 KaBP,精度误差为 $\pm 10\sim 15\%$ 。

AMS ^{14}C 测年样品同样直接取自岩心中并装入塑料袋中。BZK0402孔采集AMS ^{14}C 样品3个,每个样品重约500 g。样品送至中国科学院地球环境研究所西安加速器质谱中心完成年龄测试。实验室提供的惯用年龄据OxCal v4.4.2软件的IntCal13进一步校正为日历年龄。

3.3 孢粉分析鉴定

孢子花粉外壁由有机化合物和近似角质纤维素组成,300°C不分解,高压不变形,强酸强碱中不溶解,保存广,数量多。孢粉在一定程度上可以反映沉积时的古植被情况,包括种类、数量等。通过

对孢粉的研究可以恢复古气候、古地理环境,在第四纪古气候研究中得到广泛应用(Xu et al.,2016)。

本次对钻孔岩心,按照岩性不同分别进行孢粉采样。孢粉分析样品用自封袋进行包装。其中,黏土、粉土采 100 g;砂、砂砾层采 150 g;泥炭采 30 g。采样结束时,及时进行塑料袋封口,以免飞进现代花粉。取下一个样之前,应清理取样工具,防止上一个样品混入。根据岩心的岩性变化,BZK0402孔分别在 1.75 m、3.40 m、6.30 m 和 11.20 m 采集孢粉样品共 4 个。样品预处理、分析鉴定均在北京光释光实验室科技有限公司完成。样品的孢粉分析采用常规的实验室分析处理方法,孢粉的化学提取流程主要包括 HCl 去除钙质,氢氧化钾热水浴,过筛后用重液浮选法提取花粉,最后制成玻片,所有玻片在显微镜下经过观察和鉴定统计。

4 结果与分析

4.1 年代地层约束下的磁性地层

本次工作在 BZK0402 孔中根据分别根据岩性的差异,在 6.8 m 黏土、4.85 m 淤泥质黏土和 2.90 m 淤泥质黏土中取 AMS ^{14}C 样品。测年结果分别为 $(10925\pm 40)\text{a BP}$ 、 $(9420\pm 35)\text{a BP}$ 和 $(6770\pm 30)\text{a BP}$ 。对于实验室测得的 AMS ^{14}C 年龄,本次校正采用的软件是牛津大学考古实验室的 OxCal v4.4.2,以 IntCal13 为校正曲线。校正后的日历年龄数据见表 1。据此测年结果,可以初步判断 6.8 m 以上为全新世地层。

表 1 BZK0402 孔 AMS ^{14}C 年代序列及 OxCal v4.4.2 校正结果

Table 1 Results of the radiocarbon dating of the BZK0402 core

实验室编号	深度/m	测年材料	AMS ^{14}C	校正年龄(2σ)
			年龄/a BP	/cal. a BP
XA20535	2.95	淤泥质黏土	6770 ± 30	7670 ~ 7581
XA20536	4.85	淤泥质黏土	9420 ± 35	10741 ~ 10571
XA20537	6.85	黏土	10925 ± 40	12872 ~ 12703

注:计算年龄所用的 ^{14}C 半衰期为 5568 年。

为判断钻孔下部岩石年代,在 10.90 m 砂砾石层取 OSL 样品,获得 OSL 年龄为 $(71.2\pm 6.4)\text{ka BP}$ 。测年结果表明钻孔下部为晚更新世地层。表 2 为 BZK0402 孔 OSL 测试结果。

全新世与晚更新世的界限依据钻孔孔磁性地层划分。Morner and Lanser(1974)于 20 世纪 70 年代提出哥德堡极性漂移事件的存在,认为其持续时间和漂移形态并不确定:一种认为该漂移为 1000 ~ 2000 a 较长时间的稳定 / 不稳定反极性期,另一种认为是短期的(小于 100 a)磁极性倒转和随后千年尺度的不稳定期。虽然此后很长时间内对于哥德堡事件的存在仍然有争议,笔者也专文对该事件是否具有区域上的可对比性以及其区域上记录地点、未记录地点和影响因素进行讨论(Chen et al.,2020)。本次参考马醒华等(1994)在邻区江苏固城湖的高分辨率磁性地层研究,以及长江三角洲(缪卫东等,2016)、东海(赵松龄和张宏才,1981;葛淑兰等,2008)、黄海(刘建兴等,2012;Liu et al.,2014)已发表成果对该事件的认同,以哥德堡事件(Gothenburg geomagnetic excursion)的出现作为更新世的顶界,全新世与更新世的界限确定为 10 ~ 12 ka BP。图 2 为 BZK0402 孔的岩性剖面、古地磁曲线图及测年结果。全孔均处于布容正极性时,在 6.5 ~ 7.2 m 记录有极性漂移,根据 AMS ^{14}C 测年结果的约束,应为哥德堡极性漂移事件。在 0 ~ 2.2 m 数据不稳定,如图 2b 所示,可能由于沉积物松散或人为扰动等因素,作为扰动层处理(Chen et al.,2020)。

4.2 多重地层划分

BZK0402 孔沉积物以河湖相为主,岩性具二元结构,基岩埋深较浅,属第四纪浅覆盖区。本次以岩石地层为基础,在磁性地层和年代地层的双重约束下,对其所属河湖环境第四纪地层进行多重地层划分。参考于振江和彭玉怀(2008)对安徽省第四纪岩石地层的划分,共划分出中—上更新统大桥镇组(Qp_{2-3d})、全新统芜湖组(Qhw)。其中芜湖组根据沉积环境的不同,进一步细分为芜湖组下段(Qhw¹)和

表 2 BZK0402 孔 OSL 定年结果

Table 2 Results of the optically stimulated luminescence dating of the BZK0402 core

野外编号	采样深度/m	实验室编号	K/%	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Water/%	De/Gy	OSL 年龄/ka BP	
								Age	Uncertainty
BZK0402-OSL2	10.9	180206-3	0.408	4.18	2.29	13.1	100.3	71.2	6.4

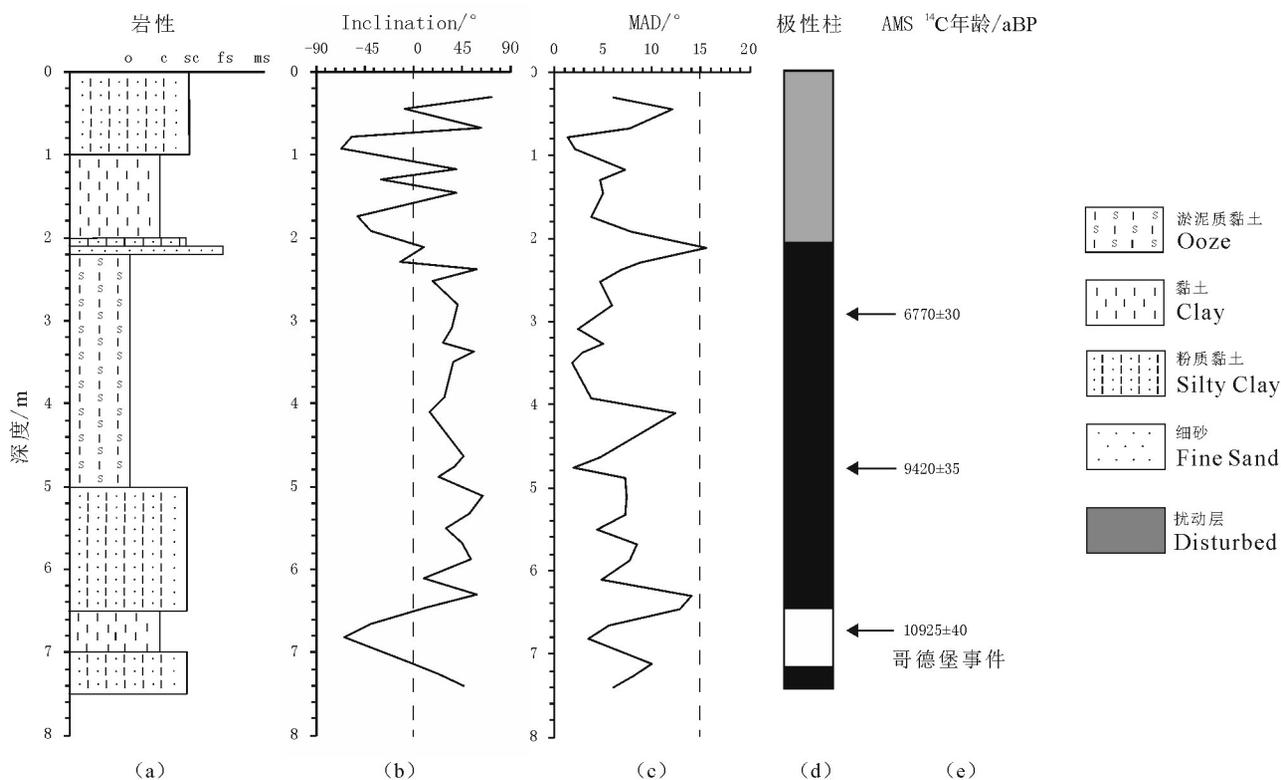


图2 BZK0402孔岩性剖面、古地磁曲线图及测年结果

Fig.2 Stratigraphic column for the BZK0402 core showing variations in lithologies, the magnetostratigraphy of the sediments, and the results of the radiocarbon dating undertaken during this study

芜湖组中段(Qhw²)。芜湖组上段现代河滩、河心滩沉积物在钻孔中未见。第四纪地层具体划分如下:

中—上更新统大桥镇组(Qp_{2-3d}): 12.8~7.5 m, 依据 10.90 m 光释光测年结果(71.2±6.4)ka BP, 该层底界年龄未到中更新世(更新世中期与晚期的界限为 100~150 ka BP, 古地磁出现布莱克事件(Blake)。邻区芜湖市大桥镇南芜湖师专院内大桥镇组建组剖面(孔口坐标 X: 3483200 m, Y: 20634100 m, Z: 27.15 m)通过孢粉研究, 其形成时期的气候变化(冷—暖—冷—暖—冷)与淮北平原地层小区的茆塘组相似, 将其底界年龄定为 0.25 Ma 左右, 时代归属于中—晚更新世(于振江和彭玉怀, 2008)。岩性主要为砂砾石层。砾石分选和磨圆度较好, 砾石成分成熟度较高, 多为石英砂岩、硅质岩。沉积环境为河流相的河床亚相。

全新统芜湖组(Qhw), 底界以哥德堡极性漂移事件(10~12 ka)出现为界。6.8 m 处 AMS ¹⁴C 测年结果为(10925±40) a BP, 校正日历年龄为 12872~12703 cal. a BP。极性漂移事件与测年结果之间对

应较好。根据岩性变化, 可进一步细分为下、中两段。芜湖组下段(Qhw¹), 7.5~5.0 m, 岩性主要为粉细砂、粉质黏土、淤泥质黏土。河流水动力条件明显减弱; 芜湖组中段(Qhw²), 5.0~0.0 m, 底界以灰蓝色淤泥质黏土出现为界, 沉积环境由河流相转变为湖相, 最后再次转变为河流相。

4.3 孢粉分析

BZK0402 孔 4 个孢粉样品共统计陆生植物花粉 1332 粒, 平均每个样品 333 粒, 孢粉总浓度平均每个样品 2418 粒/g, 共发现并鉴定了 33 个科属的植物花粉。其中包括 10 个科属属的木本植物花粉: 松(*Pinus*)、铁杉(*Tsuga*)、杉科(*Taxodiaceae*)、榆(*Ulmus*)、胡桃(*Juglans*)、山毛榉(*Fagus*)、落叶栎(*Deciduous Quercus*)、常绿栎(*Evergreen Quercus*)、椴(*Tilia*)、枫香(*Altingia*); 10 个科属的草本植物花粉: 禾本科(*Gramineae*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、菊科(*Compositae*)、蒲公英(*Taraxacum*)、毛茛科(*Ranunculaceae*)、蔷薇科(*Rosaceae*)、蓼科(*Polygonaceae*)、柳叶菜科(*Onagraceae*)、血水草

(*Eomecon*)、莎草科(*Cyperaceae*);12个科属的蕨类孢子:水蕨(*Ceratopteris*)、披针石松(*L.fordii*)、紫萁(*Osmunda*)、鳞盖蕨(*Microlepria*)、芒萁(*Dicranopteris*)、凤尾蕨(*Pteris*)、金毛狗(*Cibotium*)、膜蕨科(*Hymenophyllaceae*)、海金砂(*Lygodium*)、水龙骨科(*Polypodiaceae*)、单缝孢(*Laevgatomonoleti*)、蹄盖蕨科(*Athyriaceae*)和1个科属的藻类:环纹藻(*Concentricystis*)。

运用孢粉专业作图软件Tilia作出孢粉百分比含量图式(图3)。每个地层单位均采集了1~2个孢粉样品,主要是辅助BZK0402孔的多重地层划分。根据有限的孢粉样品数据,可初步分析各地层所处时代可能的植被类型。

中一晚更新统大桥镇组(Qp_{2-3d}):本层岩性为砂砾石,在11.2 m处采集1个孢粉样品。可能由于砂砾石层水动力强的原因,样品鉴定结果未达到孢粉统计量(≥50粒),孢粉总浓度为1粒/g,孢粉组合中主要有松属和海金沙等。因孢粉太少,很难推断植被类型。

芜湖组下段(Qhw¹):本层在6.3 m处采集1个孢粉样品。孢粉总浓度为71粒/g,孢粉组合中蕨类孢子(89.5%)占绝对优势,披针石松达87.1%,其次是零星的金毛狗(1.0%)、紫萁属(0.35%)、水龙骨科(0.35%)和蹄盖蕨科(0.35%)等;藻类只有淡水环纹藻(5.9%);木本植物花粉(2.4%)中有松属(1.75%)、落叶栎(0.37%)和常绿栎(0.35%)等;草本植物(2.1%)中可见禾本科(1.4%)、藜科(0.7%)等。孢粉组合为披针石松-环纹藻-禾本科-松,发现淡水藻类环纹藻。本阶段森林面貌以针叶林为主,林下蕨类植物生长茂盛,平原地区发育湖泊沼泽。区域上,南京秦淮河流域N06S6孔同时期的孢粉带(IV

带)孢粉组合为松-冷杉-铁杉,同样指示该沉积时期的植被属针叶林(熊振等,2010)。

芜湖组中段(Qhw²):本层孢粉共采集了2个样品,分别位于1.75 m和3.4 m处。孢粉总浓度为4813粒/g,孢粉组合中草本植物花粉(31.46%~64.19%,平均47.83%)居多,其中以禾本科(42.65%)为主,其次是莎草科(3.56%)、蒲公英(0.57%)、毛茛科(0.37%)、蓼科(0.29%)、柳叶菜科(0.1%)和血水草(0.1%)等;木本植物花粉(27.24%~62.55%,平均44.89%)中以针叶树种松属(35.42%)居多,落叶栎(5.16%)次之,还有少量的枫香属(1.88%)、常绿栎(0.94%)、榆属(0.37%)、胡桃(0.28%)、铁杉(0.28%)和杉科(0.28%)等;藻类同样只含淡水环纹藻(1.6%)。本层孢粉含量显著增多,孢粉组合为禾本-松-栎-环纹藻,草本中禾本科含量最高,木本中以针叶成分占优势,阔叶树花粉含量大于常绿树花粉含量,发现淡水藻类环纹藻。孢粉数据反映本阶段森林面貌以针叶-落叶阔叶混交林为主,平原地区湖泊沼泽仍然存在。区域上,长江中下游的鄱阳湖ZK01孔孢粉记录同样指示同时期林下蕨类植物繁茂,山地以针叶-落叶阔叶混交林为主,建群种以栎和松为主,平原地区湖泊沼泽较发育(谢振东等,2006)。南京秦淮河流域N06S6孔同时期的孢粉组合为松-桦-蒿,指示该沉积时期的植被属以松为主的亚热带常绿针叶林间夹针阔叶混交林(熊振等,2010)。

5 讨论

5.1 新构造运动

新构造运动是区域BZK0402孔沉积物粒度具明显变粗的旋回,指示区域上在晚更新世—全新世

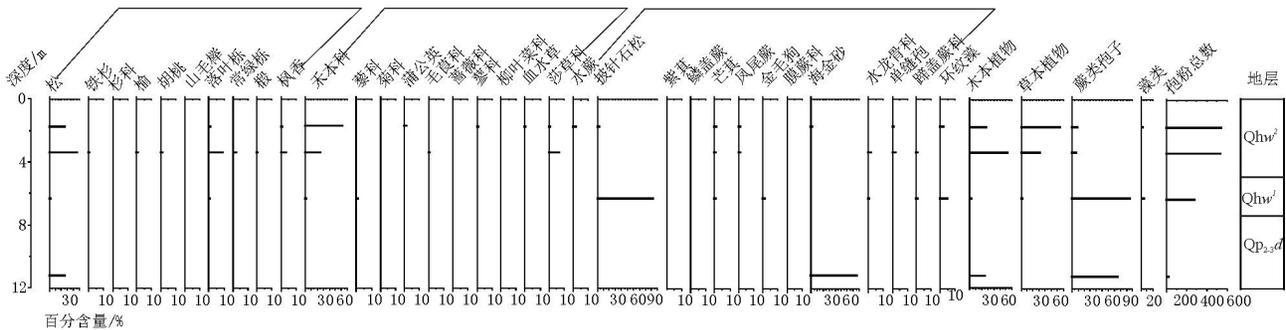


图3 BZK0402孔主要孢粉百分比图
Fig.3 Percentage of main pollen species in the BZK0402 core

之交未发生明显的构造抬升,但不能排除构造下降的可能,如珠江口盆地就曾整体沉降(马明等,2019)。影响钻孔沉积过程区域性断裂为NE向江南断裂带(图1a)。该断裂自赣北经七都、石台沿青弋江至泾县、宣城、郎溪入江苏南部,为中生代形成的张性断层。泾县赤滩至章家渡一段青弋江河道及沿岸发育楔入中山区的唯一一条狭窄的新近纪—第四纪河床相泥砂砾石层,表明该段在新生代有过活动。推测该断裂为早—中更新世断裂(王浩男等,2016)。

水阳江流域邻区新构造运动又是怎样的呢?邻区镇江地区通过地质地貌调查、遥感影像解译、地球物理勘查、钻探等手段,对区内断裂构造两侧开展第四纪地层的年代学研究,同样认为新构造活动时间在更新世,全新世活动较弱,并趋于稳定(宗开红等,2016)。水阳江流域北侧的长江谷地安庆—马鞍山段新构造研究显示控制新生代盆地发育且规模较大的断裂最新活动时代同为中更新世(宋方敏等,2008)。同属长江三角洲的苏州地区新构造运动控制了平原和山区的地貌演变。平原区为构造沉降带,新构造运动表现为持续缓慢下沉和局部相对上升;丘陵和岛状山体属于构造上升区,相对缓慢持续抬升并具有震荡性特点。早更新世新构造活动规模小于中更新世和晚更新世。第四纪沉积总体表现为早期受构造演化控制,后期受海平面变化与气候演变制约(尹行,2013)。

综上所述,BZK0402孔所在的区域及邻区新构造活动时代为更新世。区域资料与BZK0402孔相互印证。基本可以认为BZK0402孔所在的区域,在晚更新世—全新世之交未发生明显的构造抬升,以稳定的河流相沉积为主。

5.2 地层对比与冰后期海侵

水阳江流域为长江中下游地区的长江支流,地处长江三角洲西缘。宣城地区的BZK0402孔(Z:9 m)和固城湖孔(Z:6 m)均位于水阳江流域,前者较后者位于上游,二者相距约33 km。岩性对比图上(图4)可见二者在全新世早期均沉积淤泥质黏土,与前人所指古丹阳湖成湖时间基本一致,并指出泥沙淤积和长江水位顶托是成湖的有利因素(李灼华,1989)。泥沙淤积和长江水位顶托的起因主要存在新构造运动、海平面升降和气候变化。而前述

新构造活动时代为更新世,BZK0402孔所在的全新世沉积对海平面升降和气候变化又是如何响应的呢?选择水阳江流域的BZK0402孔、固城湖孔(马醒华等,1994),秦淮河流域的N06S6孔(Z:8 m,孔深45 m;熊振等,2010)与长江三角洲北翼镇江的B09孔(Z:3.3 m,孔深83 m;杨献忠等,2010)进行地层对比(图4),探讨末次盛冰期以来,海平面变化在长江中下游的沉积响应,进一步探讨全新世早期古丹阳湖的形成机制。表3为被选钻孔的基本信息。由图4可见,各孔顶层均不同程度发育填土、耕填土。其中,固城湖孔位置选在原湖(现为圩区)中心附近现为围垦的农田中。钻孔上部1.7 m左右为表层耕填土层(马醒华等,1994)。本文BZK0402孔同样位于围垦的农田中,上部0~2.2 m古地磁为扰动层,进一步验证了该层为耕填土。推测本层不同程度发育的铁锰结核与本层土壤化关系密切。

长江中下游所在的中国东部末次盛冰期历时约7 ka(22~15 ka BP),大陆架有500~600 km露出水面,长江往东经东海陆架入东海或冲绳海槽。当时南京附近水面与海平面的高差约为80 m,则河流纵比降约为(0.727~0.615)m/10000 m,比现在长江南京以下段比降大得多(现在南京附近水面高程约为6 m,距长江口约400 km,比降为0.150 m/10000 m)。由于基面大幅度调整,比降大,河流动力作用强劲,引起强烈下切,形成长江古深槽。同样的古深槽也出现在青弋江河口、裕溪口(曹光杰等,2006)。

冰后期海平面上升引发的海侵造成古河谷的充填,在镇江段B09孔依次形成河床相、河漫滩相。在水阳江流域的BZK0402孔、固城湖孔和秦淮河流域的N06S6孔均依次出现河床相、漫滩相。¹⁴C测年时间均在10 ka BP左右,指示在晚更新世—全新世整个长江中下游均处于河流相沉积环境之中。

全新世早期9 ka BP左右,冰后期海侵到达镇江段。最大海侵发生在6.5~7.0 ka BP,镇江段三角洲开始发生进积作用,河口沙坝开始形成(杨献忠等,2010;高茂生等,2018;Gao et al., 2019)。与此同时,在秦淮河流域发育天然堤沉积(熊振等,2010),指示高水位环境。作为水阳江流域的下游,秦淮河流域的高水位环境很可能是长江水位顶托的直接因素。在海侵引起的长江水位顶托作用下,水阳江流域河水难以快速通过长江排泄入海,出现湖相沉

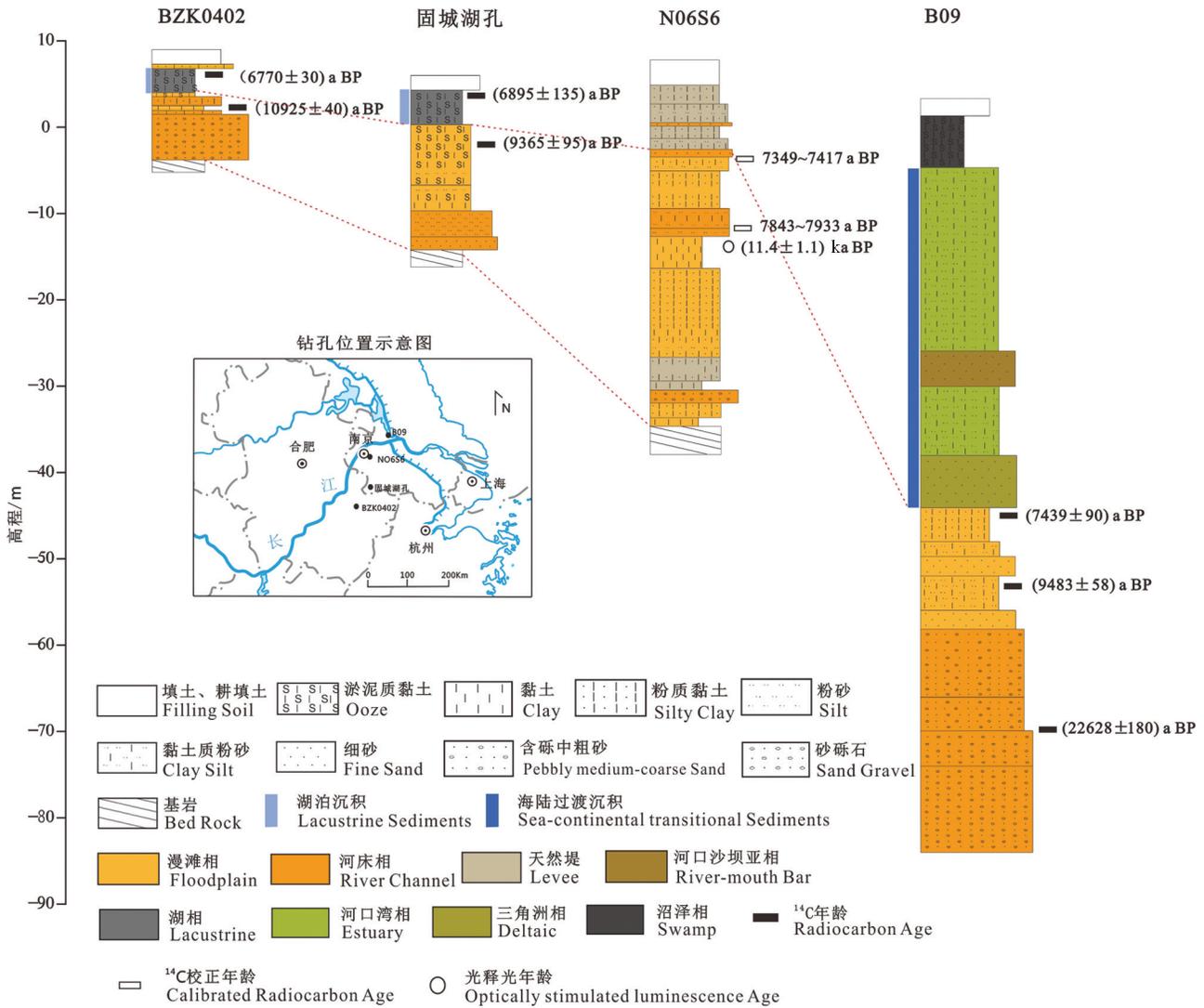


图4 BZK0402孔与固城湖孔、秦淮河流域N06S6孔、镇江B09孔岩性和沉积环境对比

Fig.4 Correlation diagram showing links between sediments within the Shuiyang River basin, Qinghuai River basin, and the Yangtze River with the data obtained from the BZK0402 (this study), Gucheng Lake and N06S6 cores within the Qinghuai River basin, and the B09 core in Zhenjiang

积。图5为BZK0402孔中湖相沉积物的岩心照片。

6 结论

(1) 针对长江中下游地区水阳江流域实测标准

孔BZK0402,以岩石地层为基础,在磁性地层和年代地层的双重约束下,对其所属河湖环境第四纪地层进行多重地层划分,共划分出中—上更新统大桥镇组、全新统芜湖组。地层划分进一步说明长江支

表3 BZK0402孔与固城湖孔、N06S6孔、B09孔基本信息

Table 3 Essential information about the BZK0402 (this study), Gucheng Lake, N06S6, and B09 cores

钻孔编号/名称	位置	孔深/m	孔口高程/m	参考文献
BZK0402	安徽省宣城市宣州区	13.2	9.0	本文
固城湖孔	江苏省高淳县固城湖	20	-	马醒华等,1994
N06S6	南京市汉府街长途汽车站院内	45	8.0	熊振等,2010
B09	长江三角洲镇江(大港)—江都河段	83	3.3	杨献忠等,2010

注:“-”引文中未说明。



图5 BZK0402孔湖相沉积物岩心照片
Fig.5 Lacustrine sediments found in the BZK0402 core

流水阳江河谷之中不全是全新世沉积。

(2)长江中下游各地的钻孔对比说明,冰后期长江河谷及其支流未见沉积物粒度明显变粗的旋回,指示区域上在晚更新世—全新世之交未发生明显的构造抬升。结合长江河谷、邻区镇江和苏州地区新构造研究成果,基本可以认为研究区全新世以稳定的河流相沉积为主。

(3)全新世早期,海侵到达长江镇江段,对水阳江流域的沉积过程产生影响。海侵引起的长江水位顶托造成水阳江流域水流不畅,淤塞形成古丹阳湖。湖泊形成的全新世早期,新构造运动无明显表现。湖泊形成与冰后期的海侵在时间上存在一致性。

致谢:感谢安徽省地质调查院彭玉怀正高级工程师在本文研究过程中的指导和黄俊高级工程师、岳运华高级工程师在野外采样过程中的大力帮助。感谢中国科学院西安加速器质谱中心杜花高级工程师在AMS ^{14}C 测量过程中的大力帮助。感谢中科院地球环境研究所强小科正高级工程师在古地磁样品测量过程中的指导。

References

- Cao Guangjie, Wang Jian, Xiong Wanying, Zhang Xueqin. 2006. Sedimentary characteristics of the Yangtze River's paleovalley in Nanjing since the last glaciation maximum[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(1): 23– 28(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhongliang, Yuan Feng, Zhang Jinzhe, Shen Shihao, Li Xiaohui, Li Xiangling, Huang Meng, Simon M J. 2020. Paleomagnetic

- evidence for the Gothenburg geomagnetic excursion during the Pleistocene– Holocene transition recorded in the Paleo– Danyang Lake, eastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 201: 104140.
- Dai Jinfang, Zhao Rui. 1992. An Application of Remote Sensing Techniques in the Study of Palaeo– danyang lake evolution[J]. *Journal of Lake Sciences*, 4(2): 67– 72(in Chinese with English abstract).
- Fan Daidu, Li Congxian. 2007. Reviews on researches of timing of the Yangtze draining the Tibetan Plateau to the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(2): 121– 131(in Chinese with English abstract).
- Gao Maosheng, Guo Fei, Hou Guohua, Qiu Jiandong, Kong Xianghui, Liu Sen, Huang Xueyong, Zhuang Haihai. 2018. The evolution of sedimentary environment since Late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. *Geology in China*, 45(1): 59– 68(in Chinese with English abstract).
- Gao Maosheng, Guo Fei, Huang Xueyong, Hou Guohua. 2019. Sediment distribution and provenance since Late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. *China Geology*, 2: 16– 25. doi: 10.31035/cg2018062.
- Ge Shulan, Shi Xuefa, Wu Yonghua, Xiong Yingqian, Han Yibing, Tang Baogen. 2008. Magnetostratigraphy of Borehole EY02–1 in the northern outer continental shelf of the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 30(2): 51– 61(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuehua, Lin Liangjun, Chen Lide, Ni Huayong, Ge Weiya, Cheng Hangxin, Zhai Gangyi, Wang Guiling, Ban Yizhong, Li Yuan, Lei Mingtang, Tan Chengxuan, Su Jingwen, Zhou Quanping, Zhang Taili, Li Yun, Liu Hongying, Peng Ke, Wang Hanmei. 2018. An overview of the resources and environment conditions and major geological problems in the Yangtze River economic zone,

- China[J]. *China Geology*, 1(4): 435–449. doi: 10.31035/cg2018040.
- Li Zhuohua. 1989. The questions of the ancient geographical environments in the upper reaches region of Yangtze River Delta[J]. *Journal of Seismology*, (3): 54–59(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianxing, Shi Xuefa, Ge Shulan, Li Xiaoyan, Yao Zhengquan, Wang Xin. 2012. Record of geomagnetic excursion during Early Holocene in the Central Southern Yellow Sea mud[J]. *Quaternary Sciences*, 32(4): 663–669(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianxing, Shi Xuefa, Liu Qingsong, Ge Shulan, Liu Yanguang, Yao Zhengquan, Zhao Quanhong, Jin Chunsheng, Jiang Zhaoxia, Liu Shengfa, Qiao Shuqing, Li Xiaoyan, Li Chuanshun, Wang Chunjuan. 2014. Magnetostratigraphy of a greigite-bearing core from the South Yellow Sea: Implications for remagnetization and sedimentation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(10): 7425–7441.
- Ma Ming, Qi Jiafu, Zhang Yuanze, Miao Quanyun, Chen Weichang, Zhang Shuai. 2019. An analysis of subsidence characteristics and affecting factors in the Pearl River Mouth Basin in Cenozoic[J]. *Geology in China*, 46(2): 269–289(in Chinese with English abstract).
- Ma Xinghua, Sun Zhiming. 1994. The Gothenburg event recorded in lake sediments[J]. *Quaternary Sciences*, 8(2): 175–182(in Chinese with English abstract).
- Miao Weidong, Li Shijie, Fen Jinshun, Gao Li, E Jian. 2016. Stratigraphic division of NB5 core in the Yangtze delta area and its environmental change information[J]. *Geology in China*, 43(6): 2022–2035(in Chinese with English abstract).
- Morner N A, Lanser J P. 1974. Gothenburg Magnetic ‘flip’[J]. *Nature*, 251: 408–409.
- Liu Rui, Mei Xi, Zhang Jin, Zhao Debo. 2019. Characteristics of clay minerals in sediments of Hemudu area, Zhejiang, China in Holocene and their environmental significance[J]. *China Geology*, 2: 8–15. doi: 10.31035/cg2018069.
- Song Fangmin, Deng Zhihui, Ma Xiaojing, Zu Jinhua, Chu Quanzhi, Yin Gongming, Zhou Qing. 2008. Neotectonics and fault activity in the Anqing–Ma’anshan section of the Chang Jiang River valley[J]. *Seismology and Geology*, 30(1): 99–110(in Chinese with English abstract).
- Wang Fu, Li Jianfen, Shi Peixin, Shang Zhiwen, Li Yong, Wang Hong. 2019a. The impact of sea-level rise on the coast of Tianjin–Hebei, China[J]. *China Geology*, 2(1): 26–39.
- Wang Haonan, Wu Zhonghai, Li Haomin. 2016. Basic characteristics of the main active faults and seismic activities in Pan Yangtze River delta region[J]. *Journal of Geomechanics*, 22(3): 500–516(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongbo, Li Rihui, Yang Shouye, Bai Fenglong, Mei Xi, Zhang Jian, Lu Kai. 2019b. Comparison of detrital mineral compositions between stream sediments of the Yangtze River (Changjiang) and the Yellow River (Huanghe) and their provenance implication[J]. *China Geology*, 2(3): 169–178. doi: 10.31035/cg2018065.
- Xie Zhengdong, Feng Shaohui, Huang Wenhong, Luo Ying, Feng Changhe, Ma Zhengxing. 2006. Sporopollen record of drilling hole ZK01 and its paleoenvironmental information in Poyang Lake area, Jiangxi[J]. *Resources Survey & Environment*, 27(1): 60–69(in Chinese with English abstract).
- Xiong Zhen, Hou Kangming, Li Qinghe, Chen Jie. 2010. Standard well for Quaternary research and its geological interpretation in Qinhuai River Valley of Nanjing Area[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(4): 498–508(in Chinese with English abstract).
- Xu Qinghai, Zhang Shengrui, Gaillard Mariejose, Li Manyue, Cao Xianyong, Tian Fang, Li Furong. 2016. Studies of modern pollen assemblages for pollen dispersal–deposition–preservation process understanding and for Pollen–based reconstructions of past vegetation, climate, and human impact: A review based on case studies in China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 149: 151–166.
- Xue Bin, Yao Shuchun, Xia Weilan. 2008. Modern environmental changes of typical lakes along the middle and lower reaches of Yangtze River Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(8): 1135–1141 (in Chinese with English abstract).
- Yang Dayuan, Li Xusheng, Zhang Zhenke. 2000. Lake evolution along middle–lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 12(3): 226–232(in Chinese with English abstract).
- Yang Xianzhong, Wei Naiyi, Wang Qiang, Yu Junjie, Jiang Ren, Zhang Zongyan, Zhao Ling. 2010. Sedimentary characteristics of an ancient river channel in Zhenjiang–Jiangdu segment of Yangtze River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(5): 11–18(in Chinese with English abstract).
- Yao Shuchun, Xue Bin. 2009. Recent Environmental evolution of Shijiu Lake inferred from lake sediments[J]. *Quaternary Sciences*, 29(2): 248–255(in Chinese with English abstract).
- Yin Hang. 2013. Quaternary Strata, Sea-level Change and Neotectonism of Suzhou and Adjacent Area[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Yu Zhenjiang, Peng Yuhuai. 2008. Quaternary lithostratigraphic sequence in Anhui Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 254–261(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fengju, Xue Bin, Yu Ge. 2016. The lake status change of China since the Late Quaternary and its significance for palaeoenvironment[J]. *Quaternary Sciences*, 36(3): 598–611(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xinbao, Liu Yu, Wang Shijie, Liu Weimin, Xue Wenxuan. 2018. On the chronology of the Yellow Rivers and the Yangtze Rivers[J]. *Mountain Research*, 36(5): 661–668(in Chinese with English abstract).
- Zhao Songling, Zhang Hongcai. 1981. The short reversal polarity event in the latest Pleistocene[J]. *Marine Geological Research*, 1

- (2): 61–67(in Chinese with English abstract).
- Zhuang Huafeng. 2005. Cultivation of diked paddy-fields in ancient South-east China and their effects on ecological environment[J]. Journal of Chinese Historical Geography, 20(3): 87–94(in Chinese with English abstract).
- Zong Kaihong, Zong Wen, Kang Congxuan, Bai Shibiao. 2016. Research on the major active faults in Zhenjiang, Jiangsu and the late quaternary activities[J]. Journal of Geomechanics, 22(3): 439–453(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹光杰, 王建, 熊万英, 张学勤. 2006. 长江南京段末次盛冰期以来的古河谷沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 26(1): 23–28.
- 戴锦芳, 赵锐. 1992. 遥感技术在古丹阳湖演变研究中的应用[J]. 湖泊科学, 4(2): 67–72.
- 范代读, 李从先. 2007. 长江贯通时限研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 27(2): 121–131.
- 高茂生, 郭飞, 侯国华, 仇建东, 孔祥准, 刘森, 黄学勇, 庄海海. 2018. 渤海南部莱州湾晚更新世以来沉积演化特征[J]. 中国地质, 45(1): 59–68.
- 葛淑兰, 石学法, 吴永华, 熊应乾, 韩貽兵, 唐保根. 2008. 东海北部外陆架EY02—1孔磁性地层研究[J]. 海洋学报, 30(2): 51–61.
- 李灼华. 1989. 长江三角洲上游地区的古地理环境问题[J]. 地震学刊, (3): 54–59.
- 刘建兴, 石学法, 葛淑兰, 李小艳, 姚政权, 王昕. 2012. 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, 32(4): 663–669.
- 马明, 漆家福, 张远泽, 苗全芸, 陈玮常, 张帅. 2019. 珠江口盆地新生代沉降特征及其影响因素分析[J]. 中国地质, 46(2): 269–289.
- 马醒华, 孙知明, 胡守云. 1994. 哥德堡事件在湖泊沉积物中的记录[J]. 第四纪研究, 8(2): 175–182.
- 缪卫东, 李世杰, 冯金顺, 高立, 鄂建. 2016. 长江三角洲NB5孔第四纪地层划分及环境变化信息[J]. 中国地质, 43(6): 2022–2035.
- 宋方敏, 邓志辉, 马晓静, 祖金华, 楚全芝, 尹功明, 周庆. 2008. 长江谷地安庆—马鞍山段新构造和断裂活动特征[J]. 地震地质, 30(1): 99–110.
- 王浩男, 吴中海, 李浩民. 2016. 泛长三角地区主要活动断裂及地震活动基本特征[J]. 地质力学学报, 22(3): 500–516.
- 王中波, 张江勇, 梅西, 陈晓辉, 赵利, 张勇, 张志珣, 李学杰, 李日辉, 陆凯, 孙荣涛, 杨守业. 2020. 中国陆架海 MIS5(74 ~ 128 ka)以来地层及其沉积环境[J]. 中国地质, 47(5): 1370–1394.
- 谢振东, 冯绍辉, 黄文虹, 罗音, 冯昌和, 马振兴. 2006. 江西鄱阳湖区 ZK01 钻孔孢粉记录及其古环境信息[J]. 资源调查与环境, 27(1): 60–69.
- 熊振, 侯康明, 李清河, 陈杰. 2010. 南京秦淮河流域汉府街第四纪标准钻孔研究及其地质意义[J]. 高校地质学报, 16(4): 498–508.
- 薛滨, 姚书春, 夏威夷. 2008. 长江中下游典型湖泊近代环境变化研究[J]. 地质学报, 82(8): 1135–1141.
- 杨达源, 李徐生, 张振克. 2000. 长江中下游湖泊的成因与演化[J]. 湖泊科学, 12(3): 226–232.
- 杨献忠, 魏乃颀, 王强, 于俊杰, 蒋仁, 张宗言, 赵玲. 2010. 长江三角洲镇江—江都河段古河谷沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 30(5): 11–18.
- 姚书春, 薛滨. 2009. 石臼湖近代环境演化历史[J]. 第四纪研究, 29(2): 248–255.
- 尹行. 2013. 苏州及邻区第四纪地层、海平面变化与新构造运动[D]. 中国地质大学(北京).
- 于振江, 彭玉怀. 2008. 安徽省第四纪岩石地层序列[J]. 地质学报, 82(2): 254–261.
- 张风菊, 薛滨, 于革. 2016. 晚第四纪中国湖泊水量变化及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 36(3): 598–611.
- 张信宝, 刘戈, 王世杰, 刘维明, 薛雯轩. 2018. 黄河、长江的形成演化及贯通时间[J]. 山地学报, 36(5): 661–668.
- 赵松龄, 张宏才. 1981. 晚更新世末期的地磁短期反极性事件[J]. 海洋地质研究, 1(2): 61–67.
- 赵勇, 杨誉博, 李瑞杰, 杨吉龙, 王强, 李亚林, 王纯君, 魏波, 方同明, 王志辉. 2021. 永定河中下游 MIS7 以来地层沉积演化及新石器时代以来气候变化[J]. 中国地质, 48(4): 1188–1199.
- 庄华峰. 2005. 古代江南地区圩田开发及其对生态环境的影响[J]. 中国历史地理论丛, 20(3): 87–94.
- 宗开红, 宗雯, 康从轩, 白世彪. 2016. 江苏镇江地区主要活动断裂及其晚第四纪活动性研究[J]. 地质力学学报, 22(3): 439–453.