

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.324



# 江汉盆地东部第四纪钻孔地层与沉积环境

顾延生<sup>1,2</sup>, 管 硕<sup>3</sup>, 马 腾<sup>1</sup>, 朱宗敏<sup>1</sup>, 刘红叶<sup>3</sup>, 郭 森<sup>4</sup>, 余舒琪<sup>4</sup>

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

4. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 为深刻理解江汉盆地第四纪新构造运动、气候变化与盆地沉积响应的关联, 利用沔阳凹陷区第四纪典型钻孔样品进行系统岩石学、年代学与沉积学研究, 首次建立了盆地东部沉积中心区可对比的地层序列。利用岩性、粒度、磁组构分析重建了研究区140万年以来依次经历的河流相、河湖交替相、湖相、河湖交替相、湖相、泛滥平原相演化过程。区域构造、沉积、气候资料综合对比表明, 响应于新构造沉降, 江汉盆地第四纪以来存在3大成湖期, 即 $Q_{p2}/Q_{p1}$ 之交、 $Q_{p3}$ 与 $Q_h$ 中后期(古云梦泽), 其中MIS3以来古湖发育是新构造沉降与异常强盛夏季风的耦合, 且湖相沉积的独特环境为盆地高砷地下水的形成提供了重要的物质条件。不仅为第四纪钻孔地层划分对比提供可靠基础资料, 也为盆地地下资源调查与环境规划保护提供重要参考。

**关键词:** 江汉盆地; 第四纪; 钻孔地层; 沉积响应; 新构造运动; 气候变化。

中图分类号: P53

文章编号: 1000-2383(2018)11-3989-12

收稿日期: 2018-08-04

## Quaternary Sedimentary Environment Documented by Borehole Stratigraphical Records in Eastern Jianghan Basin

Gu Yansheng<sup>1,2</sup>, Guan Shuo<sup>3</sup>, Ma Teng<sup>1</sup>, Zhu Zongmin<sup>1</sup>, Liu Hongye<sup>3</sup>, Guo Sen<sup>4</sup>, Yu Shuqi<sup>4</sup>

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution and Eco-Restoration (WEER), Wuhan 430074, China

3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** In order to explore the further relationship among the Quaternary neotectonic movement, climate change and sedimentary response in the Jianghan basin, a systematic study of lithology, geochronology and sedimentology was carried out using typical Quaternary boreholes in the Mianyang depression in the eastern part of the basin. A comparable sequence of Quaternary borehole strata was first established in the deposition center of the eastern Jianghan basin. A complete sedimentary evolution history of the river facies, alternation of river and lacustrine facies, lacustrine facies, alternation of river and lacustrine facies, lacustrine facies and floodplain facies was reconstructed in turn in the past 140 ka based on lithology, grain size and magnetic fabric analysis. The integrated analysis of regional tectonic movement, sedimentary evolution and climatic change shows that there occurred 3 periods of lacustrine deposition including the transition of  $Q_{p2}/Q_{p1}$ ,  $Q_{p3}$ , and mid-late Holocene (ancient Yunmeng lakes), respectively. Our results demonstrate that the development of paleolake since the MIS3 is related to the coupling of neotectonic subsidence and extremely strong summer monsoon. The unique environment of lacustrine deposition provides important material conditions for the formation of high-arsenic groundwater in the basin. This study not only provides reliable basic data for the stratigraphic division and correlation of Quaternary boreholes in the Jianghan basin, but also provides

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No.41572153); 中国地质调查局项目(No.12120114069301)。

**作者简介:** 顾延生(1970—), 男, 教授, 博士, 主要从事生态环境地质研究。ORCID: 0000-0001-6620-1946. E-mail: ysgu@cug.edu.cn

**引用格式:** 顾延生, 管硕, 马腾, 等, 2018. 江汉盆地东部第四纪钻孔地层与沉积环境. 地球科学, 43(11): 3989-4000.

an important reference for underground resources investigation and environmental planning and protection.

**Key words:** Jiangnan basin; Quaternary; borehole stratigraphy; sedimentary response; neotectonic movement; climate change.

江汉盆地为燕山运动晚期以来继承性构造沉降盆地,由近东西向及北东向两组交错断块所形成的盆地,第四纪以来盆地沉积环境演化受到新构造运动控制显著(方鸿琪,1959;张德厚,1994).在新构造沉降影响下,由于长江及其支流汉水等带来大量沉积物堆积,由盆地边缘至中心沉积了厚达百米至数百米不等的冲积物和湖积物,发育连续而完整的第四纪地层序列,蕴含了丰富的环境演化信息,具有重要的全球变化研究价值.

前人在江汉盆地的新构造运动、第四纪沉积与古环境演化方面取得了重要的进展.湖北省水文地质工程地质大队(1985)对江汉盆地第四纪钻孔地层进行了系统的调查与沉积环境研究,将盆地内第四系自下而上划分为东荆河组( $Q_{p1d}$ )、江汉组( $Q_{p2j}$ )、沙湖组( $Q_{p3s}$ )和郭河组( $Q_{hg}$ )4个地层单位,为后期钻孔地层划分对比研究奠定了良好的基础.江汉盆地第四纪沉积分布受构造影响显著,第四纪至少经历了4次波动的升降旋回,特别是早更新世、晚更新世与全新世发生了较大的沉降(方鸿琪,1959;杨青雄等,2016),由于盆地周边发育差异升降、掀斜和拗折运动,盆地中心的下降与周缘山地上升幅度大体相当,具均衡补偿性(张德厚,1994;李长安,1998).在凹陷沉降格局影响下,更新世曾经发生两次湖侵,盆地沉积中心如潜江凹陷、江陵凹陷、沔阳凹陷等地分别堆积了厚达300 m左右的河湖相沉积物(刘昌茂和刘武,1993).江陵47号钻孔沉积硅藻化石表明晚更新世早期为浅滩或河漫滩区,晚更新世中期为泛滥平原中的湖泊或沼泽,晚更新世晚期至全新世中期水体逐渐变深、加宽(施之新,1997).除了新构造控制作用以外,沔城M1孔、周老镇ZL01孔、武汉东西湖ZK25孔、沙湖钻孔沉积记录表明第四纪沉积环境演化还与古气候有关(朱育新等,1997a;张玉芬等,2005;林晓等,2011;王妍妍等,2017).此外,历史时期以来人类活动与江汉湖群演变关系紧密(顾延生等,2013),且人类活动和富营养化对湖泊生态系统的碳埋藏影响显著(郭森等,2017).

然而,过去几十年来,江汉盆地第四纪长时间尺度沉积环境演化的详细资料较少,仅有嘉陵江47号钻孔晚更新世湖泊或沼泽环境(施之新,1997)报道,目前尚未见江汉盆地第四纪钻孔地层与沉积环境的系统研究报道,已有的钻孔研究相互之间缺少可对比性,且缺乏可靠的测年数据和区域沉积环境的对比标志,需要从区域新构造运动、气候变化与盆地沉积响应等方面综合研究,才能全面、深入地了解新构造运动与盆地沉积演化过程.本文利用中国地质调查局开展的江汉平原重点地区1:5万水文地质调查钻孔材料,对江汉盆地东部沔阳凹陷中的第四纪钻孔进行了详细的岩性、AMS<sup>14</sup>C定年、电子自旋共振(ESR)测年、沉积学等分析,确立了第四纪各地层单位形成的新构造背景与沉积环境特征,结合粒度、磁组构、总有机碳等多环境指标,详细研究了下更新统东荆河组( $Q_{p1d}$ )、中更新统江汉组( $Q_{p2j}$ )、上更新统沙湖组( $Q_{p3s}$ )、全新统郭河组( $Q_{hg}$ )的沉积环境特征,相关研究为江汉盆地第四纪地层划分、对比及地下资源调查等提供了重要参考.

比性,且缺乏可靠的测年数据和区域沉积环境的对比标志,需要从区域新构造运动、气候变化与盆地沉积响应等方面综合研究,才能全面、深入地了解新构造运动与盆地沉积演化过程.本文利用中国地质调查局开展的江汉平原重点地区1:5万水文地质调查钻孔材料,对江汉盆地东部沔阳凹陷中的第四纪钻孔进行了详细的岩性、AMS<sup>14</sup>C定年、电子自旋共振(ESR)测年、沉积学等分析,确立了第四纪各地层单位形成的新构造背景与沉积环境特征,结合粒度、磁组构、总有机碳等多环境指标,详细研究了下更新统东荆河组( $Q_{p1d}$ )、中更新统江汉组( $Q_{p2j}$ )、上更新统沙湖组( $Q_{p3s}$ )、全新统郭河组( $Q_{hg}$ )的沉积环境特征,相关研究为江汉盆地第四纪地层划分、对比及地下资源调查等提供了重要参考.

## 1 样品采集与实验方法

结合中国地质调查局开展的江汉平原重点地区1:5万水文地质调查,本项目于2014—2015年在江汉盆地东部沔阳凹陷区系统采集了Jh001、Jh002、Jh004、YLW-01、LXK02-1钻孔样品(图1),野外采样间距10~50 cm不等,对其中深度大于190 m的Jh001、Jh002、YLW-01孔进行了详细的年代学、沉积学和地层学研究,主要涉及AMS<sup>14</sup>C定年、电子自旋共振(ESR)测年、总有机碳(TOC)、激光粒度和磁组构分析.AMS<sup>14</sup>C测年样品由美国Beta实验室和中国科学院地球环境研究所共同完成,ESR样品在中国地震局地震动力学国家重点实验室完成测试.粒度样品由中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成,仪器为英国产Mastersizer 3000型激光粒度仪,总有机碳(TOC)测试在中国地质大学(武汉)盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地完成,所用仪器为德国产Elementar Vario TOC测定仪.磁组构测量在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成,仪器为捷克产MFK1-FA多功能磁化率仪.

## 2 结果与讨论

### 2.1 钻孔地层研究

#### 2.1.1 钻孔岩性特征 Jh001孔位于湖北仙桃市长

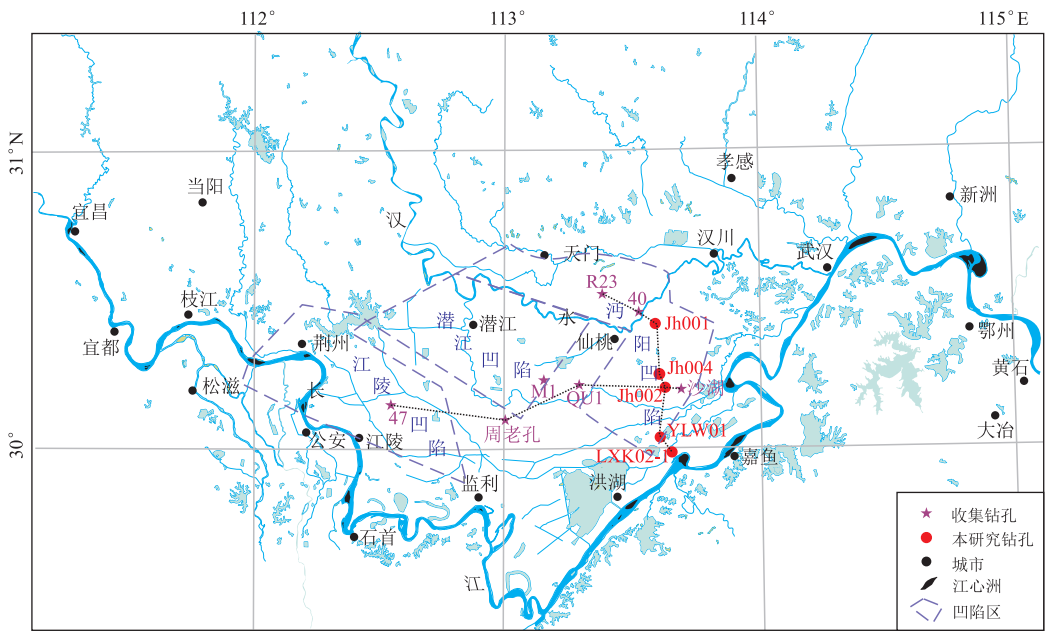


图 1 江汉盆地第四纪钻孔分布图

Fig.1 Distribution of Quaternary boreholes in the Jianghan basin

凹陷区资料引自湖北省地质调查院(2003)

瑞口镇芦东村三组, GPS 为:  $30^{\circ}31'14''N$ ,  $112^{\circ}41'37''E$ , 地表海拔 23.5 m, 钻孔深 196.24 m. Jh001 沉积物颜色、岩性组合分为 3 段: 下段 196~100 m 主要为灰色、青灰色砂砾石层、含砾粗砂、中砂、粉砂、粘土组成的多次正粒序旋回, 含古木和腹足螺类; 中段 100~62 m 为灰色、青灰色砾石层、含砾粗砂、中砂、细砂等组成的多次正粒序旋回, 偶见反粒序; 上段 62~0 m 主要为砂层、粉砂、粘土、淤泥组成的正粒序或反粒序旋回, 含古木和腹足螺类。

Jh002 孔位于湖北仙桃市彭场镇夹河村, GPS 为:  $30^{\circ}10'50.90''N$ ,  $113^{\circ}36'43.17''E$ , 地表海拔 21.40 m, 钻孔深 230.12 m. Jh002 沉积物颜色、岩性组合分为 4 段: 下段 230~114 m 为灰黑色、灰色砂砾石层、中砂、细砂、粘土组成的多次正粒序旋回, 偶见反粒序, 见古木; 114~64 m 为灰色、灰黑色砾石层、含砾粗砂、中砂、细砂、粉砂组成的多次正粒序旋回, 偶见反粒序; 64~12 m 为灰黑色、灰色含砾粗砂、中砂、细砂、粉砂、淤泥组成的多次反粒序旋回, 可见古木和腹足螺类; 顶部 12~0 m 为灰黄色粉砂质粘土夹黄褐、灰黑色粘土、淤泥, 软可塑, 见腹足螺类。

YLW01 钻孔位于湖北省仙桃市杨林镇复兴中心水厂, GPS 为:  $30^{\circ}08'01''N$ ,  $113^{\circ}36'05''E$ , 地表海拔 24 m, 钻孔深度为 201 m, 其沉积物颜色和岩性特征组合分为 3 段: 下段 201~53 m 为灰色、青灰色砂砾石层、粗砂、中砂、粘土组成的多次正粒序旋回,

偶见反粒序, 含丰富的古木、腹足螺类和双壳贝类遗存; 中段 53~18 m 为灰黑色、灰色砾石层、粗砂、中砂、细砂、粉砂、粘土组成的多次反粒序旋回, 含丰富的动植物遗存; 上段 18~0 m 为灰黑色、灰黄色淤泥质粘土、粉砂、粉砂质粘土组成的反粒序旋回, 含丰富的腹足动物遗存。

**2.1.2 钻孔年代学** 加速器质谱碳十四( $AMS^{14}C$ ) 测年表明 Jh001 孔在 45.8 m 处为 13 651~13 546 cal. a BP, Jh002 孔 12 m 处为 11 715~11 390 cal. a BP, YLW-01 孔 17 m 处为 13 060~12 820 cal. a BP, 表明 3 个钻孔沉积速率有差异, 全新统底界深度变化大, 北部 JH001 在 35 m 左右, 南部在 15 m 左右(表 1)。电子自旋共振(ESR)测年表明 Jh002 底部最大年龄为  $1\,428 \pm 142$  ka, Jh001 底部年龄为  $924 \pm 92$  ka, YLW-01 孔底部最大年龄为  $1\,167 \pm 116$  ka(表 2), 由于 Jh002 地处长江与汉水中间位置(图 1), 沉积物源不及其他两孔丰富, 整体沉积速率较 Jh001、YLW-01 小, 然而 3 个钻孔均记录了江汉盆地东部沔阳凹陷沉积中心区早更新世中晚期以来沉积环境演化历史, 年代、深度模式具有一定可比性, 反映了区域沉积格局的相似性(图 2)。

**2.1.3 江汉盆地东部钻孔地层划分与对比** 本研究由北向南选取了江汉盆地东部的典型钻孔 R23、40、Jh001、Jh004、Jh002、YLW-01、LXX02-1, 进行了详细的岩石学、年代学和地层划分对比工作, 获得了

表 1 Jh001、Jh002、YLW-01 沉积物 AMS<sup>14</sup>C 测年结果Table 1 AMS<sup>14</sup>C dating results of borehole sediments of Jh001, Jh002 and YLW-01

实验室编号	野外编号	深度(m)	<sup>14</sup> C 年龄(a BP)	2σ 校正(cal. a BP)
XA20110	JH001-14C-379	45.80	11 790±50	13 651~13 546
421874	JH002-294	22.71	12 980±50	15 710~15 320
421876	Jh002-14C-321	38.80	25 650±120	30 205~29 485
447157	YLW01-14C-6	17.00	11 080±40	13 060~12 820

表 2 Jh001、Jh002、YLW-01 钻孔沉积物 ESR 测年数据

Table 2 ESR dating results of borehole sediments of Jh001, Jh002 and YLW-01

实验室号	野外编号	取样深度(m)	含水量(%)	古剂量(Ga)	年剂量(Ga/ka)	年龄(ka)
15176	Jh001-ESR-604	121.8	19.27	2 743±522	3.71	740±141
15178	Jh001-ESR-706	194.0	25.84	2 105±210	2.28	924±92
15179	Jh002-ESR-410	79.0	29.65	1 120±168	2.87	456±69
15180	Jh002-ESR-540	124.0	25.85	2 089±208	2.54	823±82
15181	Jh002-ESR-609	164.0	27.15	2 122±287	2.35	903±122
15182	Jh002-ESR-636	203.0	26.76	2 696±310	2.05	1 316±152
15183	Jh002-ESR-650	230.0	21.62	6 307±1136	3.43	1 428±142
16254	YLW01-ESR-3	74.0	19.2	1 397±139	2.78	503±50
16257	YLW01-ESR-6	141.0	18.9	2 574±257	2.68	960±96
16259	YLW01-ESR-8	176.0	17.4	2 744±305	2.69	1 020±113
16260	YLW01-ESR-9	194.0	20.2	3 256±275	2.79	1 167±116

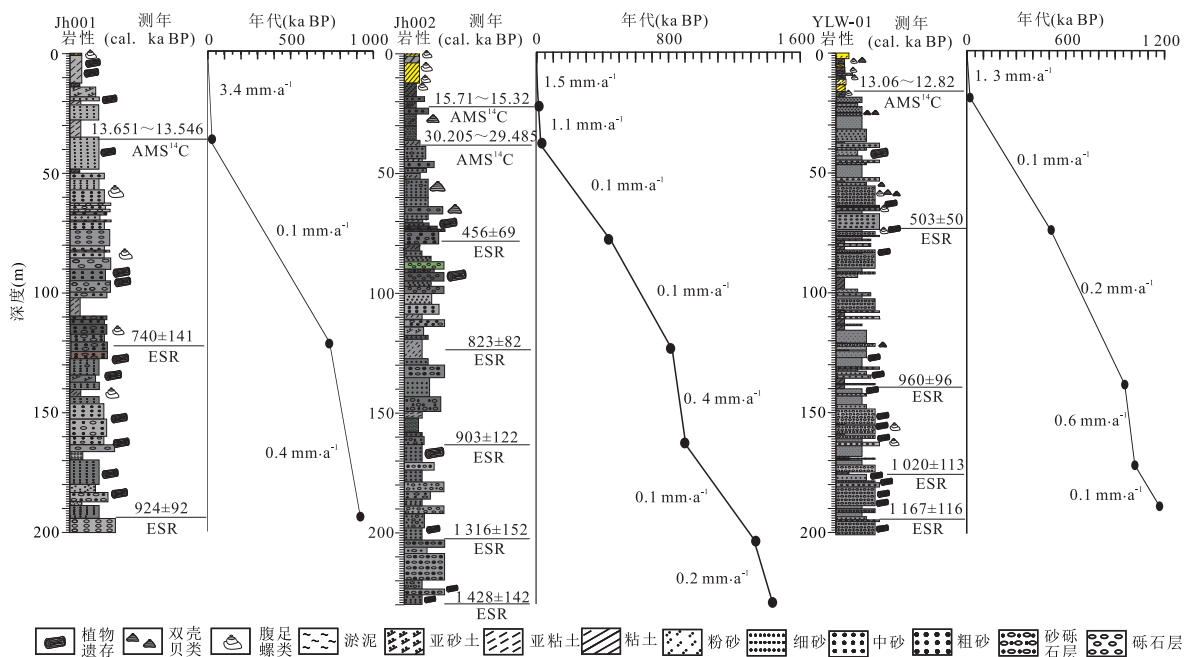


图 2 江汉盆地东部典型钻孔年龄—深度分布

Fig.2 Age-depth distribution pattern of typical boreholes in the eastern Jiangnan basin

江汉盆地东部第四纪地层分布的空间格局,自上而下划分了全新统郭河组(Qhg)、上更新统沙湖组(Qp<sub>3s</sub>)、中更新统江汉组(Qp<sub>2j</sub>)以及下更新统东荆河组(Qp<sub>1d</sub>) (图 3)。其中,早更新世沉积中心在 Jh001 至 YLW-01 一带, Jh002 的下更新统东荆河组(Qp<sub>1d</sub>) 沉积厚度大于 110 m, 下部由河流相青

灰—灰色厚层砂砾石层和细砂、含砾细砂等组成,上部由河湖交替相青灰—深灰色厚层细砂、含砾砂和深灰色淤泥质粘土、青灰色粉质粘土组成,正粒序为主,偶见反粒序,含较丰富的动植物遗存如古木、腹足螺类。中更新统江汉组(Qp<sub>2j</sub>) 厚度介于 30~60 m, 沉积中心在 Jh001 一带, 下部由湖相青灰、灰



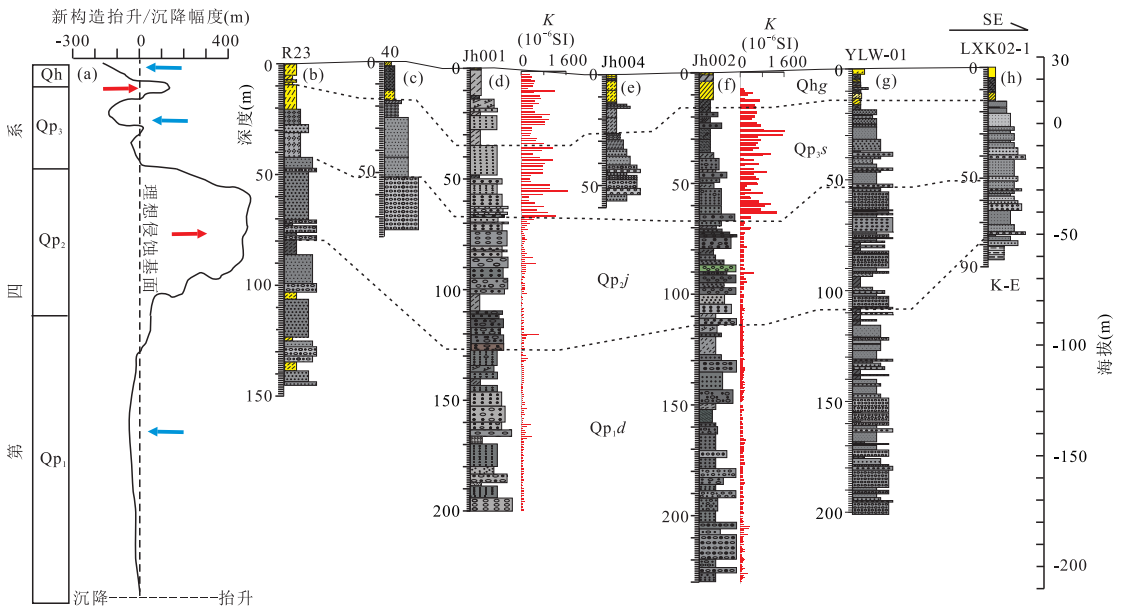


图 3 江汉盆地东部沔阳凹陷第四纪钻孔地层划分对比

Fig.3 Stratigraphic division and correlation of Quaternary boreholes in the Mianyang depression, eastern Jiangnan basin

a 引自方鸿琪(1959);b 引自杨青雄等(2016);c 引自湖北省水文地质工程地质大队(1985);d~h 为本次钻孔.岩性图例同图 2

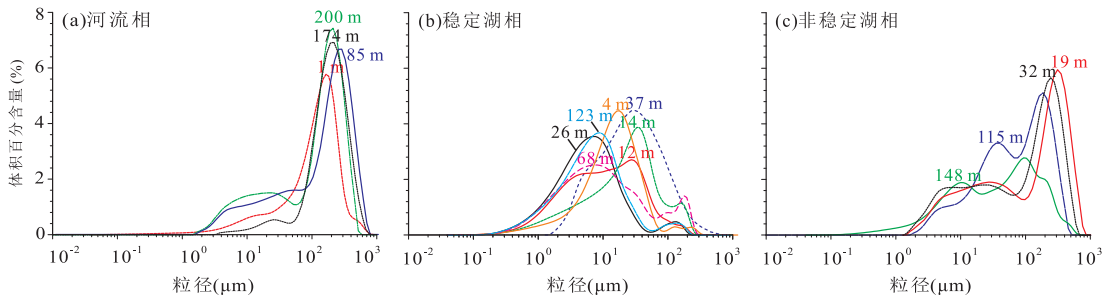


图 4 Jh002 孔沉积物粒度频率曲线与典型沉积相

Fig.4 Grain size frequency curves for typical sedimentary facies of borehole Jh002

色砂层组成,上部由河湖交替相青灰、灰色厚层砂砾石层和细砂、亚粘土、淤泥质粉砂组成的正粒序旋回,含较多动植物遗存.上更新统沙湖组(Qp<sub>3s</sub>)厚度介于 30~65 m,沉积中心在 Jh002 一带,主要由湖相青灰—深灰色淤泥层、淤泥质粉砂层组成的反粒序旋回,偶见正粒序,可见丰富的动植物遗存.全新统郭河组(Qhg)厚度介于 15~35 m,沉积中心在 Jh001 至 Jh004 一带,自北向南厚度呈现减小趋势,沉积中心钻孔岩性以灰色砂层和粘土为主,其余以灰黄色粉砂质粘土为主,夹杂黄褐、灰黑色粉砂质粘土与淤泥层,有机质较少,可见双壳、腹足螺类等遗存.沔阳凹陷沉积中心全新统郭河组 35 m 厚度比前人报道的位于潜江凹陷的 M1 孔全新统厚度小(朱育新等,1997b),反映了区域沉降的差异性.

### 2.2 沉积环境分析(以 Jh002 孔为例)

#### 2.2.1 粒度分析 (1) 沉积相判别.粒度频率曲线是

反映沉积物各粒径含量、众数粒径值以及沉积物颗粒粗细相对关系的重要指标.Jh002 沉积物形态粒度频率曲线形态具有多样性,可分为单峰型、双峰型和多峰型(图 4).当沉积物频率曲线表现为单峰时,可能指示沉积物物源单一或具有单一的水动力条件.当沉积物频率曲线为双峰或多峰时,可能表明沉积物受到不同搬运作用影响,或是具有不同的物源条件(殷志强等,2008).河流相沉积物频率曲线形态多为单峰或极不对称的双峰态,颗粒较粗,主峰峰值较大,峰值区间窄,分选好,指示强水动力环境,在细粒端偶尔有一极低的拖尾;细粒组分,众数粒径在 5~20 μm;粗粒组分,众数粒径在 100~600 μm(图 4a).Jh002 湖相沉积物的频率曲线形态主要表现为不对称双峰或三峰型,对应稳定湖相和非稳定湖相(张平等,2008)(图 4).稳定湖相多为双峰态,总体而言,峰值较河流相小,峰值区间宽,在粗粒端有一极低的拖

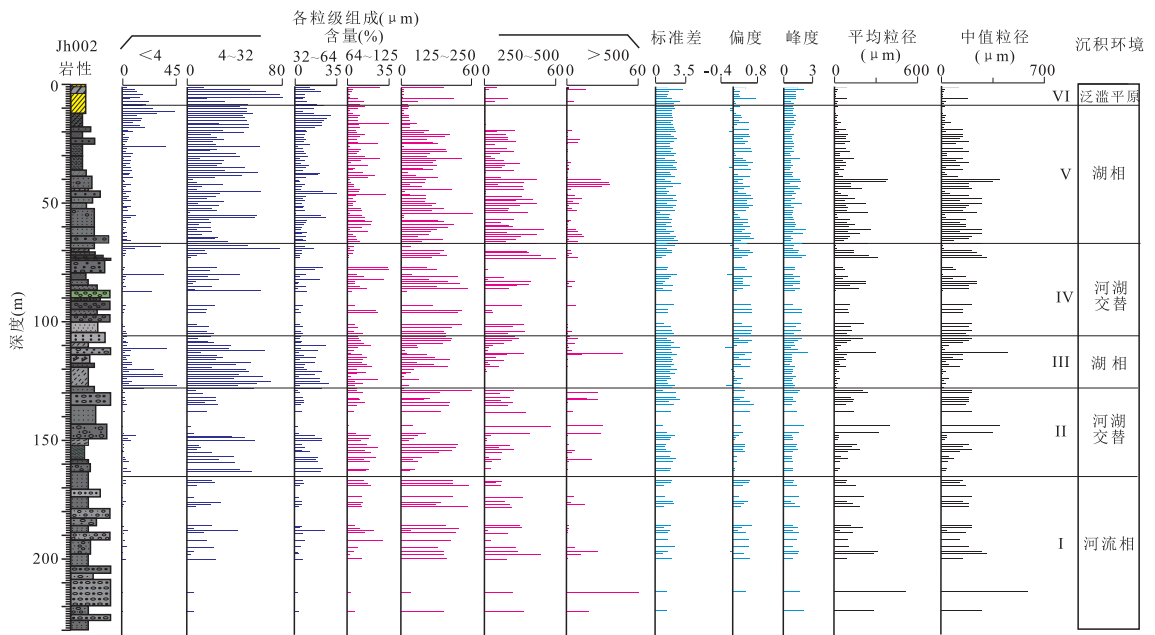


图 5 Jh002 孔沉积物粒度参数分布与沉积环境演化

Fig.5 Distribution of grain size parameters and evolution of sedimentary environment of borehole Jh002

岩性图例同图 2

尾,表明水动力较弱且稳定,众数值变化范围大,指示沉积环境较复杂,有两种或多种沉积作用参与其中(图 4b).非稳定湖相多为三峰态或多峰态,峰值介于河漫滩相与滨湖相之间,峰值区间最宽,表明水动力较强且有多种沉积作用(如入湖河流、洪水、风力等)参与其中,细粒组分众数粒径在  $4\sim 60\ \mu\text{m}$ ,粗粒组分众数粒径在  $100\sim 700\ \mu\text{m}$ (图 4c).

(2)Jh002 粒度组成与沉积环境演化.分别统计不同粒组如  $<4\ \mu\text{m}$ (粘土)、 $4\sim 32\ \mu\text{m}$ (细粉砂)、 $32\sim 64\ \mu\text{m}$ (粗粉砂)、 $64\sim 125\ \mu\text{m}$ (极细砂)、 $125\sim 250\ \mu\text{m}$ (细砂)、 $250\sim 500\ \mu\text{m}$ (中砂)和  $>500\ \mu\text{m}$  含量的变化,粒度组成、粒度参数与相关频率曲线综合表明 Jh002 钻孔存在河流相、河湖交替相、湖相沉积环境,钻孔剖面粒度组成分布表明研究区早更新世以来存在 6 个阶段沉积环境演化,具体如下(图 4,图 5).

阶段 I( $230.13\sim 165\ \text{m}$ ):该段样品沉积物粒径均较大,细砂至粗砂含量高, $<4\ \mu\text{m}$  的粘土组分含量低,平均粒径和中值粒径平均值大于  $170\ \mu\text{m}$ ,粒度频率曲线为典型河流相单峰态,偶见湖相宽缓曲线.该段岩性组成主要由青灰、灰色厚、薄层河床相砂砾石层和中砂、含砾细砂、细砂等组成的多次二元结构的正粒序旋回,推断该时期水动力强,河床沉积发育.

阶段 II( $165\sim 128\ \text{m}$ ):与阶段 I 相比,该段  $<4\ \mu\text{m}$  的粘土组分、粉砂含量快速增加,其中大部

分为细粉砂,而中、粗砂明显减少,粒级粗细变化频繁,平均粒径和中值粒径平均值大于  $100\ \mu\text{m}$ .该段岩性组成主要由深灰色中细砂和淤泥质粉砂、粘土等组成的正粒序或反粒序,粒度频率曲线为河流相单峰态以及不稳定湖相的三峰、多峰态,水动力由强变弱,漫滩与湖相细粒沉积发育,推断该时期为河漫滩至不稳定湖相交替沉积环境.

阶段 III( $128\sim 106\ \text{m}$ ):相比阶段 II,该段粘土组分、细粉砂含量快速增加,而细砂至粗砂快速减少,粒级有由细向粗变化趋势,平均粒径和中值粒径平均值小于  $100\ \mu\text{m}$ .该段岩性组成主要由深灰色粉砂质粘土、细砂等组成的反粒序,粒度频率曲线为不稳定湖相的三峰或多峰态,水动力弱,以细粒沉积为主,推断该时期为不稳定湖相沉积环境.

阶段 IV( $106\sim 67\ \text{m}$ ):与阶段 III 相比,该段粘土组分、粉砂含量快速减少,细砂至粗砂含量增高,粒级粗细变化频繁,平均粒径和中值粒径平均值大于  $140\ \mu\text{m}$ .该段岩性组成主要由灰—青灰色砂砾石层、中砂层、细砂层、粉砂、粘土等组成的正粒序旋回,粒度频率曲线为河流相单峰态及不稳定湖相的三峰、多峰态,水动力强弱不等,河漫滩相或湖相细粒沉积发育,推断该时期为河流相至不稳定湖相交替沉积环境.

阶段 V( $67\sim 9\ \text{m}$ ):相比阶段 IV,该段粘土组分、细粉砂含量快速增加,而细砂至粗砂快速减少,

粒级有由粗向细变化趋势,平均粒径小于  $80 \mu\text{m}$ ,和中值粒径平均值小于  $110 \mu\text{m}$ 。该段岩性组成主要由青灰—深灰色淤泥层、淤泥质粉砂层、细砂层等组成的正粒序或反粒序,粒度频率曲线由稳定湖相的双峰态或不稳定湖相的三峰或多峰态,水动力整体由强变弱,且不稳定,以细粒沉积为主,推断该时期为稳定湖相与不稳定湖相交替沉积环境。

阶段 VI(9~0 m):相比阶段 V,该段粘土组分、细粉砂含量继续增加,细砂至粗砂继续减少,粒级呈由细向粗变化趋势,平均粒径和中值粒径平均值小于  $50 \mu\text{m}$ 。该段岩性组成主要为黄色粉砂质粘土夹灰色、灰黑色淤泥质粉砂、粉砂质粘土层等组成的反粒序,粒度频率曲线为河流相单峰态、稳定湖相的双峰态或不稳定湖相的三峰、多峰态,水动力整体弱,且不稳定,以细粒沉积为主,为泛滥平原相沉积环境。

**2.2.2 Jh002 孔磁组构特征与沉积环境演化** 沉积物的磁组构即沉积物中磁性矿物的空间分布或物理取向受沉积动力条件的控制。描述沉积物磁组构特征的参数众多,但所有的磁组构参数都是由磁化率量值椭球的 3 个主轴,即最大磁化率主轴  $\kappa_1$ ,中间磁率主轴  $\kappa_2$  和最小磁化率主轴  $\kappa_3$ 。按不同的方式演算而来(朱宗敏等,2006),本文仅利用其中较常见的磁组构参数如平均体积磁化率( $K = (\kappa_1 + \kappa_2 + \kappa_3) / 3$ )、磁线理度( $L = \kappa_1 / \kappa_2$ )、磁面理度( $F = \kappa_2 / \kappa_3$ )、磁化率各向异性度( $P = \kappa_1 / \kappa_3$ )进行沉积环境探讨。Jh002 孔磁组构参数、TOC 深度分布表明研究区 140 万年来存在 6 个阶段沉积环境演化,同时也验证了粒度分析获得的河流相、河湖交替相、湖相、河湖交替相、湖相、泛滥平原相的演化过程(图 6),详细如下。

阶段 I(230.13~165 m):该段样品沉积物磁线理度  $L$ 、磁化率各向异性度  $P$  均较高,平均值分别为 1.02、1.04,平均体积磁化率  $\kappa$  值低,平均值为  $97 \times 10^{-6} \text{ SI}$ ,TOC 整体偏低。该段河流相粗颗粒含量高, $L$  高值表明河流水流动力的单一性,流体流动持续而稳定,颗粒排列有序度高, $P$  高值反映沉积物中颗粒排列的有序化程度,河流水动力的强度及稳定性好,沉积动力强度高而稳定。该结果与粒度分析揭示的河流二元结构发育,水动力强,河床沉积发育结果一致。

阶段 II(165~128 m):相比阶段 I,该段样品沉积物平均体积磁化率  $\kappa$ 、磁线理度  $L$ 、磁面理度  $F$ 、磁化率各向异性度  $P$  均较低,平均值分别为  $95 \times 10^{-6} \text{ SI}$ 、1.01、1.02、1.03,TOC 由高向低变化。该段

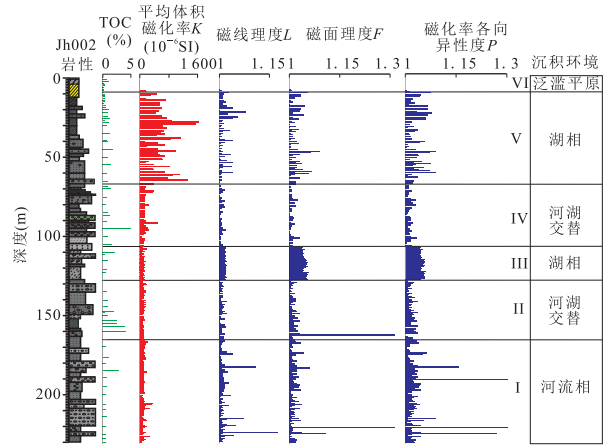


图 6 Jh002 孔沉积物磁组构参数分布与沉积环境演化  
Fig.6 Distribution of magnetic fabric parameters and evolution of sedimentary environment of borehole Jh002  
岩性图例同图 2

河湖交替相细颗粒含量增加,低  $L$ 、 $F$ 、 $P$  值以及  $F$  略高于  $L$  的特征反映沉积环境水动力弱且方向和强度均不稳定,与粒度分析得到的漫滩与湖相细粒沉积发育结果一致。

阶段 III(128~106 m):相比阶段 II,该段样品沉积物平均体积磁化率  $\kappa$ 、磁线理度  $L$  较低,而磁面理度  $F$ 、磁化率各向异性度  $P$  较高,平均值分别为  $92 \times 10^{-6} \text{ SI}$ 、1.01、1.02、1.03,TOC 由低向高变化。该段湖相细颗粒含量高,较高的  $F$ 、 $P$  值反映沉积环境水动力方向和强度均较稳定,与粒度分析得到的湖相细粒沉积发育结果一致。

阶段 IV(106~67 m):与阶段 III 相比,该段样品沉积物平均体积磁化率  $\kappa$  渐渐升高,平均为  $140 \times 10^{-6} \text{ SI}$ ,磁线理度  $L$ 、磁面理度  $F$ 、磁化率各向异性度  $P$  整体较低,平均值分别为 1.01、1.01、1.02。该段为河湖交替相,粗细颗粒变化频繁,总体较低的  $L$ 、 $F$ 、 $P$  值反映沉积环境水动力方向和强度均不稳定,与粒度分析获得的河湖交替相结果一致。

阶段 V(67~9 m):相比阶段 IV,该段样品沉积物平均体积磁化率  $\kappa$  较高,平均为  $562 \times 10^{-6} \text{ SI}$ ,磁线理度  $L$ 、磁面理度  $F$ 、磁化率各向异性度  $P$  变化频繁,整体偏高,平均值分别为 1.01、1.02、1.04,TOC 由高向低变化。该段沉积物细颗粒含量高,频繁变化的  $L$ 、 $F$ 、 $P$  值反映沉积环境水动力方向和强度均不稳定,与粒度分析得到的稳定湖相与不稳定湖相交替沉积环境结果一致。

阶段 VI(9~0 m):相比阶段 V,该段样品沉积物平均体积磁化率  $\kappa$ 、磁线理度  $L$ 、磁面理度  $F$ 、磁



表 3 江汉盆地晚新生代新构造运动综合对比表

Table 3 Comprehensive correlation of Late Cenozoic neotectonic movement in the Jianghan basin

地质年代	方鸿琪, 1959	徐瑞瑚等, 1988	张德厚, 1994	杨青雄等, 2016
全新世(Qh)	强烈沉降	先升后降		强烈沉降
晚更新世(Qp <sub>3</sub> )	稳定下沉	稳定下沉		稳定下沉
中更新世(Qp <sub>2</sub> )	强烈抬升	强烈抬升		抬升
早更新世(Qp <sub>1</sub> )	稳定下沉	稳定下沉	拗折沉降	稳定下沉
上新世(N <sub>2</sub> )	缓升			

化率各向异性度  $P$ 、TOC 均较低, 结合粒度分析可知, 为泛滥平原相沉积环境, 水动力整体弱, 以细粒沉积为主。

### 2.3 江汉盆地第四纪钻孔地层与环境

**2.3.1 新构造运动与盆地沉积响应** 江汉盆地是中、新生代形成的裂陷盆地, 据沉积建造、地层分布、岩浆及构造等资料分析, 盆地经历了白垩纪至古近纪的裂陷过程, 新近纪和第四纪为重新下沉期, 形成了现今的盆地构造地貌景观。新生代以来, 江汉盆地新构造运动表现为周缘山地拱曲抬升隆起, 山前或平原周边以掀斜为主, 盆地腹部呈下沉趋势, 故新生代以来江汉盆地沉降中心不断南移(张德厚, 1994; Zhao *et al.*, 2010)。古近纪沉降中心在潜江凹陷的蚌湖、周矶一带, 渐新世与中新世之交, 随着长江贯通东流, 江汉盆地内陆河湖沉积格局打破, 奠定了现代江汉盆地的雏形(Zheng *et al.*, 2013)。新近纪沉降中心向西南移至熊口、浩门, 更新世沉降中心在潜江、仙桃一带(张德厚, 1994)。1928—1953 年重复水准测量表明现代沉降中心在枝城—监利一带(湖北省地质调查院, 2003)。

第四纪以来江汉盆地东部沉积环境的演化过程和沉降中心的迁移变化反映了新构造运动的影响(表 3), 第四纪时期江汉盆地经历了间歇性沉降, 其沉降幅度在 300 m 以上, 为泥沙沉积提供良好的构造环境, 而且还汇聚流域的来水来沙(刘昌茂和刘武, 1993)。区域构造、沉积资料综合对比研究表明(图 3), 早更新世江汉盆地处于稳定下沉(方鸿琪, 1959; 徐瑞瑚等, 1988; 张德厚, 1994; 杨青雄等, 2016), 沉积中心分布于沔阳凹陷的广泛范围, 凹陷内大量接受沉积, 先后经历了河流相、河湖交替相、湖相沉积环境, 含较丰富动植物遗存, 沉积厚度大于 110 m。受中国东部地壳普遍抬升影响, 中更新世江汉盆地处于稳定抬升, 除中心仍有相对沉降外, 大多数地区开始抬升(方鸿琪, 1959; 徐瑞瑚等, 1988; 杨青雄等, 2016), 早更新世晚期形成的湖沼消失, 沉积中心区局限于 Jh001 一带, 形成了一套河湖交替相

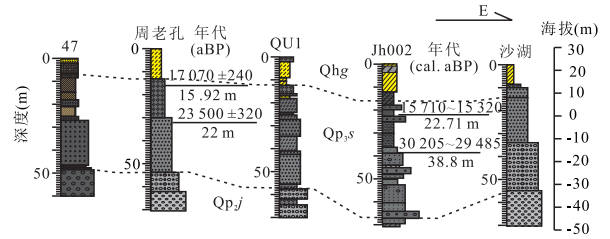


图 7 江汉盆地沉积中心晚更新世古湖沉积地层对比  
Fig.7 Correlation of paleolake sedimentary strata in the Late Pleistocene in the deposition center of Jianghan basin  
47 孔引自施之新(1997); 周老孔引自张玉芬等(2005); QU1 孔引自杨青雄等(2016); 沙湖孔来自湖北省水文地质工程地质大队(1985); Jh002 为本次研究钻孔。岩性图例同图 2

砂砾石层和砂层, 总体沉积厚度较小, 介于 30~60 m。晚更新世江汉盆地处于强烈沉降(方鸿琪, 1959; 徐瑞瑚等, 1988; 杨青雄等, 2016), 处于快速下沉并接受大量沉积, 沉积中心位于 Jh001 至 Jh002 一带, 形成了一套厚层的湖相砂层和粘土、淤泥层, 富含动植物遗存(施之新, 1997), 总体沉积厚度较大, 介于 30~60 m。晚更新世末期至全新世早期, 随着秦岭大别的掀升作用(李长安, 1998), 江汉盆地周缘区发生明显抬升, 晚更新世时期广泛湖相逐步消失, 而全新世以来沉积中心区再次强烈沉降(方鸿琪, 1959; 杨青雄等, 2016), 沔阳凹陷区沉积中心逐步南移, 形成了一套厚达 15 m 左右的泛滥平原相砂层、粘土和淤泥层(图 3)。此外, 中晚全新世以来受到气候降水与古长江河道南移的影响(朱育新等, 1997b), 古云梦泽湖泊群在低洼的泛滥平原环境下发育(图 3), 距今 3 500~1 200 a 的较长湿润期与古云梦泽兴盛关系密切, 与此前报道众多钻孔调查发现的古云梦泽湖沼相沉积吻合(顾延生等, 2007, 2009), 宋代以来人类大规模挽堤围垸活动加速了江汉湖群萎缩与消亡进程(顾延生等, 2013)。

**2.3.2 江汉盆地晚更新世构造—气候耦合作用与古湖沉积响应** 如前所述, 晚更新世时期江汉盆地东部沔阳凹陷区广泛的古湖沉积发育与该时期新构造强烈沉降有关, 来自盆地中心江陵凹陷、潜江凹陷



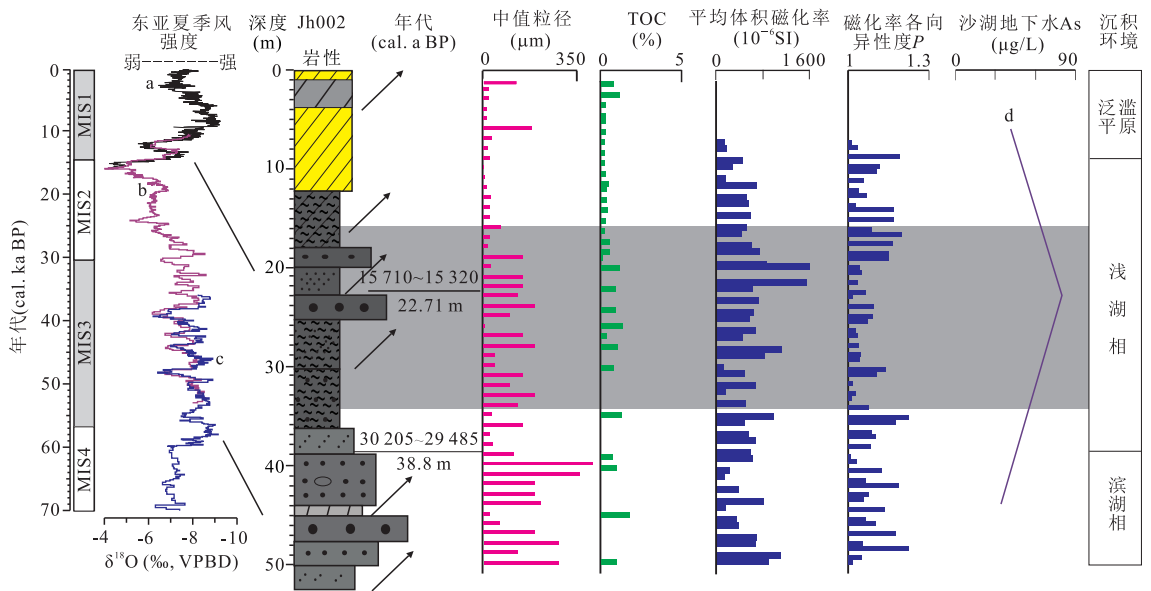


图 8 江汉盆地 MIS3 以来气候变化、湖泊沉积与高砷地下水形成的关联

Fig.8 Correlation between climate change, lacustrine deposition and formation of high-arsenic groundwater since MIS3 in the Jiangnan basin

a 引自 Dykoski *et al.* (2005); b~c 引自南京葫芦洞石笋氧同位素 (Wang *et al.*, 2001); d 引自甘义群等 (2014). 岩性图例同图 2

的 47 孔、周老孔、QU1 孔与沔阳凹陷的 Jh002、沙湖孔综合对比表明,晚更新世以来,江汉盆地中心自西向东的几大凹陷区均存在古湖相沉积,古湖相沉积的存在为区域钻孔地层划分、对比提供了重要的参考。值得一提的是,研究区 MIS3 以来的古湖沉积异常发育,区域上具有良好的对比性(施之新,1997;张玉芬等,2005;杨青雄等,2016;王妍妍等,2017)(图 7)。

Jh002 钻孔沉积记录表明,上更新统沙湖组(Qp<sub>3s</sub>)青灰、深灰色薄层含砾砂层和青灰、深灰色淤泥层、淤泥质粉砂层组成,富含有机质和动植物遗存,为湖沼相沉积。有意义的是,岩性、粒度分析与磁组构等指标均表明 MIS3-2 时期古湖的沉积发育不仅与构造沉降有关,而且与区域季风异常湿润具有紧密关系(图 3,图 8)。江汉盆地 MIS3 以来古湖环境的出现与中国东部石笋记录的夏季风兴盛有关,同时也与青藏高原及其北侧的高湖面记录、MIS3 后期青藏高原异常的温暖湿润气候具有一致性(施雅风等,1999;Wang *et al.*, 2001),异常强盛的东亚季风带来了丰富降水,造就了江汉盆地沉积中心地区广泛发育的湖沼沉积。由于气候的干湿变化及水位的波动,湖泊沉积物的粒度粗细呈现频繁的变化,出现了 5 次由细到粗的反粒序旋回(图 8),形成了多层粗细相间的沉积,其中两细(淤泥或粘土)夹一粗(粉砂、细砂或砂土)形成了明显的三明治模式,富含有机质的湖相沉积物为砷的富集提供了有利条件,

较强的水化学还原环境是促使其他形态砷向亚砷酸盐转化、造成地下水的毒性增强的主要原因(图 8),因而湖相沉积成为了地下水高砷所在含水层位(王焰新等,2010;甘义群等,2014;王妍妍等,2017)。

### 3 结论

为了全面、深入地了解江汉盆地第四纪新构造运动、气候变化与盆地沉积响应的关联,本文利用江汉盆地东部沔阳凹陷区典型第四纪钻孔地层进行了系统的岩石学、年代学与沉积学研究,首次系统研究了江汉盆地第四纪钻孔地层下更新统东荆河组(Qp<sub>1d</sub>)、中更新统江汉组(Qp<sub>2j</sub>)、上更新统沙湖组(Qp<sub>3s</sub>)、全新统郭河组(Qhg)的沉积学特征。利用粒度、磁组构辨识了河流相、稳定湖相、非稳定湖相,重建了研究区第四纪以来的沉积环境演化过程,结果表明江汉盆地东部沉积中心区由早至晚经历了 6 阶段沉积环境演化即河流相、河湖交替相、湖相、河湖交替相、湖相、泛滥平原相。第四纪以来江汉盆地东部沉积环境的演化反映了新构造运动与气候的影响,早更新世江汉盆地处于稳定下沉,凹陷内大量接受沉积,沉积了下更新统东荆河组(Qp<sub>1d</sub>),先后经历了河流相、河湖交替相、湖相沉积环境,含较丰富的动植物遗存,沉积厚度大于 110 m。中更新世江汉盆地处于稳定抬升,沉积中心较局限,沉积了中更新

统江汉组(Qp<sub>2j</sub>)一套河湖交替相厚达 60 m 的砂砾石层和砂层。晚更新世江汉盆地处于强烈沉降,快速下沉并接受大量沉积,形成了上更新统沙湖组(Qp<sub>3s</sub>)一套厚达 60 m 的湖相砂层和粘土、淤泥层。全新世以来江汉盆地再次强烈沉降,沉积中心仍位于盆地腹地,形成了全新统郭河组(Qhg)厚达 35 m 左右的泛滥平原相砂层、粘土和淤泥层。基于对区域构造、沉积、气候变化资料的综合对比研究,本文首次提出江汉盆地第四纪以来存在 3 期显著成湖期,分别是 Qp<sub>2</sub>/Qp<sub>1</sub> 之交、Qp<sub>3</sub>、Qh 中后期(古云梦泽),其中 MIS3 以来古湖泊的发育是新构造沉降与季风异常降水的耦合,湖相沉积的独特环境为盆地高钾地下水的形成提供了重要的物质条件。本文的研究深刻理解了区域新构造运动、气候变化与盆地沉积响应的关系,该研究对于江汉盆地第四纪钻孔地层划分对比及地下资源调查、环境规划与保护等具有重要指导意义。

致谢:硕士研究生丁俊傑、伦子健、田文、刘胡玫同学参加了野外钻孔样品采集,研究过程得到中国地质大学(武汉)李永涛教授、洪汉烈教授、黄春菊教授的支持,以及匿名审稿专家对本文提出的宝贵意见在此表示衷心感谢!

## References

- Dykoski, C. A., Edwards, R. L., Cheng, H., et al., 2005. A High-Resolution, Absolute-Dated Holocene and Deglacial Asian Monsoon Record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1–2): 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.01.036>
- Fang, H. Q., 1959. Neotectonic Movements in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. *Acta Geologica Sinica*, 39(3): 328–343 (in Chinese with Russian abstract).
- Gan, Y. Q., Wang, Y. X., Duan, Y. H., et al., 2014. Dynamic Changes of Groundwater Arsenic Concentration in the Monitoring Field Site, Jiangnan Plain. *Earth Science Frontier*, 21(4): 37–49 (in Chinese with English abstract).
- Gu, Y. S., Ge, J. W., Huang, J. H., et al., 2009. Climate Change and Human Activity and Its Relationship with the Evolution of the Jiangnan Lakes over the Past 20 000 Years. Geol. Press, Beijing (in Chinese).
- Gu, Y. S., Li, K. J., Qin, Y. M., et al., 2013. The Impact of Human Activity on the Evolution of the Ecological Environment of Jiangnan Lake Group since the Historical Period, Central China. *Earth Science*, 38(S1): 133–144 (in Chinese with English abstract).
- Gu, Y. S., Yu, J. X., Xie, S. C., et al., 2007. Palaeoclimate Changes Derived from Core Sediments Spore-Pollen and Phytolith Records in the Jiangnan Plain over the Past 5 000 Years. *Earth Science*, 32(Suppl.): 133–141 (in Chinese with English abstract).
- Guo, S., Gu, Y. S., Ding, J. J., et al., 2017. Evolution of Eco-Environment and Carbon Burial of Critical Zones in Xiantao Area, Hubei Province. *Earth Science*, 42(5): 707–715 (in Chinese with English abstract).
- Institute of Hubei Hydrogeology and Engineering Geology, 1985. Quaternary Geological Survey Report of Jiangnan Plain, Hubei Province. Institute of Hubei Hydrogeology and Engineering Geology, Jingzhou (in Chinese).
- Institute of Hubei Geological Survey, 2003. An Evaluation Report on the Flooding Areas of Environmental Geological Investigation in the Jingjiang River and Jiangnan Plains in the Middle Reach of the Yangtze River. Institute of Hubei Geological Survey, Wuhan (in Chinese).
- Li, C. A., 1998. Effect of Tilted Uplift of Tongbai-Dabie Mountains on Middle Yangtze River Environment. *Earth Science*, 23(6): 562–566 (in Chinese with English abstract).
- Lin, X., Lu, J. Y., Tian, W. X., et al., 2011. Sedimentary Environment and Palaeoclimate Changes Reflected by Quaternary Sediments of the Bore ZK25 in Dongxihu District of Wuhan City. *Geological Science and Technology Information*, 30(3): 33–40 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. M., Liu, W., 1993. The Evolution of Lakes on Jiangnan Plain in Quaternary. *Journal of Central China Normal University (Natural Science)*, 27(4): 533–536 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Z. X., 1997. Fossil Diatoms in No. 47 Borehole of Jiangnan Plain and Their Significance to Paleoenvironmental Analysis. *Acta Botanica Sinica*, 39(1): 68–76 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. F., Liu, X. D., Li, B. Y., et al., 1999. The Extremely Strong Summer Monsoon Event in the Qinghai-Tibet Plateau and Its Relationship with the Precession Period at 40–30 ka. *Chinese Science Bulletin*, 44(14): 1475–1480 (in Chinese).
- Wang, Y. J., Chen, H., Edwards, R. L., et al., 2001. A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, 294(5550): 2345–2348. <https://doi.org/10.1126/science.1064618>
- Wang, Y. X., Su, C. L., Xie, X. J., et al., 2010. The Genesis of High Arsenic Groundwater: A Case Study in Datong Basin. *Geology in China*, 37(3): 771–780 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Y., Huang, S. B., Zhao, L., et al., 2017. Evolution of Quaternary Sedimentary Environment in Shallow Aquifer

- fers, at Shahu Area, Jiangnan Plain. *Earth Science*, 42 (5): 751—760 (in Chinese with English abstract).
- Xu, R. H., Qi, G. F., Yang, L. M., 1988. A Study of Quaternary Period Geology and Neotectonic Movement in Wuhan. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 10 (2): 93—101 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q. X., Tian, W. X., Li, Q. W., et al., 2016. The Neotectonic Restricts to Quaternary Deposition Environment Evolution of Jiangnan Basin. *Journal of Geomechanics*, 22 (3): 631—641 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Z. Q., Qin, X. G., Wu, J. S., et al., 2008. Multimodal Grain-Size Distribution Characteristics and Formation Mechanism of Lake Sediments. *Quaternary Sciences*, 28 (2): 345—353 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. H., 1994. Neotectonics and Quaternary Environmental Changes in Jiangnan Basin. *Crustal Deformation and Earthquake*, 14 (1): 74—80 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Song, C. H., Yang, Y. B., et al., 2008. The Significance and Establishment of Discriminant Function with Grain Size of Stable Lacustrine Sediment and Eolian Loess. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26 (3): 501—507 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Chen, G. J., et al., 2005. Characteristics and Paleoclimatic Significance of Magnetic Susceptibility and Stable Organic Carbon Isotopes from a Bore in Zhoulaotown, Jiangnan Plain. *Earth Science*, 30 (1): 114—120 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, C. Y., Song, H. B., Qian, R. Y., et al., 2010. Research on Tectono-Thermal Evolution Modeling Method for Superimposed Basin with the Jiangnan Basin as an Example. *Chinese Journal of Geophysics*, 53 (1): 92—102. <https://doi.org/10.1002/cjg2.1476>
- Zheng, H. B., Clift, P. D., Wang, P., et al., 2013. Pre-Miocene Birth of the Yangtze River. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (19): 7556—7561. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216241110>
- Zhu, Y. X., Xue, B., Yang, X. D., et al., 1997a. Characteristics Features of the Sedimentary Samples from the Borehole M1 in Jiangnan Plain and Reconstruction of Palaeoenvironment. *Journal of Geomechanics*, 3 (4): 77—84 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. X., Wang, S. M., Wu, R. J., 1997b. Sedimentologic Evidence for Date of Southward Moving of the Yangtze River in the Jiangnan Plain since the Holocene. *Chinese Science Bulletin*, 42 (18): 1972—1974 (in Chinese).
- Zhu, Z. M., Yang, W. Q., Lin, W. J., et al., 2006. Magnetic Fabric Characteristics and Significance of Reticulate Red Earth in Xuancheng Profile, Anhui Province. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 26 (4): 105—110 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 方鸿琪, 1959. 长江中下游地区的新构造运动. *地质学报*, 39 (3): 328—343.
- 甘义群, 王焰新, 段艳华, 等, 2014. 江汉平原高碑地下水监测场地的动态变化特征分析. *地学前缘*, 21 (4): 37—49.
- 顾延生, 葛继稳, 黄俊华, 等, 2009. 2 万年来气候变化人类活动与江汉湖群演化. 北京: 地质出版社.
- 顾延生, 李颀家, 秦养民, 等, 2013. 历史时期以来人类活动与江汉湖群生态环境演变. *地球科学*, 38 (S1): 133—144.
- 顾延生, 喻建新, 谢树成, 等, 2007. 江汉平原 5 000 年来气候演变的孢粉、植硅体记录. *地球科学*, 32 (增刊): 133—141.
- 郭森, 顾延生, 丁俊傑, 等, 2017. 仙桃地区关键带生态演化与碳埋藏. *地球科学*, 42 (5): 707—715.
- 湖北省水文地质工程地质大队, 1985. 湖北省江汉平原第四纪地质调查报告. 荆州: 湖北省水文地质工程地质大队.
- 湖北省地质调查院, 2003. 长江中游荆江及江汉平原水患区环境地质调查评价成果报告. 武汉: 湖北省地质调查院.
- 李长安, 1998. 桐柏—大别山掀斜隆升对长江中游环境的影响. *地球科学*, 23 (6): 562—566.
- 林晓, 卢佳仪, 田望学, 等, 2011. 武汉东西湖区第四系钻孔的沉积环境及古气候变化. *地质科技情报*, 30 (3): 33—40.
- 刘昌茂, 刘武, 1993. 第四纪江汉平原湖群的演变. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 27 (4): 533—536.
- 施雅风, 刘晓东, 李炳元, 等, 1999. 距今 40~30 ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系. *科学通报*, 44 (14): 1475—1480.
- 施之新, 1997. 江汉平原 47 号钻孔中化石硅藻及其在古环境分析上的意义. *植物学报*, 39 (1): 68—76.
- 王焰新, 苏春利, 谢先军, 等, 2010. 大同盆地地下水神异常及其成因研究. *中国地质*, 37 (3): 771—780.
- 王妍妍, 黄爽兵, 赵龙, 等, 2017. 江汉平原沙湖地区浅层含水层第四纪沉积环境演化. *地球科学*, 42 (5): 751—760.
- 徐瑞瑚, 齐国凡, 杨礼茂, 1988. 武汉地区第四纪地质与新构造运动的研究. *湖北大学学报(自然科学版)*, 10 (2): 93—101.
- 杨青雄, 田望学, 李启文, 等, 2016. 江汉盆地新构造运动对第四纪沉积环境演化的制约. *地质力学学报*, 22 (3): 631—641.
- 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等, 2008. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究. *第四纪研究*, 28 (2): 345—353.
- 张德厚, 1994. 江汉盆地新构造与第四纪环境变迁. *地壳形变与地震*, 14 (1): 74—80.

张平,宋春晖,杨用彪,等,2008.稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数的建立及其意义.沉积学报,26(3): 501-507.

张玉芬,李长安,陈国金,等,2005.江汉平原湖区周老镇钻孔磁化率和有机碳稳定同位素特征及其古气候意义.地球科学,30(1): 114-120.

朱育新,薛滨,羊向东,等,1997a.江汉平原沔城 M1 孔的沉积

特征与古环境重建.地质力学学报,3(4): 77-84.

朱育新,王苏民,吴瑞金,1997b.全新世江汉平原地区长江南移年代的沉积学依据.科学通报,42(18): 1972-1974.

朱宗敏,杨文强,林文姣,等,2006.安徽宣城第四纪网纹红土的磁组构特征及其意义.海洋地质与第四纪地质,26(4): 105-110.

\*\*\*\*\*

### 《地球科学》

2018 年 12 月 第 43 卷 第 12 期 要目预告

东昆中构造混杂岩带清泉沟弧前玄武岩地质、地球化学特征及构造环境 .....	李瑞保等
东昆仑东段原特提斯洋俯冲的岩浆响应:来自晚震旦世锆石 U-Pb 年龄的证据 .....	李佐臣等
东昆仑南缘布青山复合增生型构造混杂岩带组成特征及其形成演化过程 .....	裴先治等
祁漫塔格阿确墩地区花岗岩岩石成因:来自锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素的制约 .....	王月飞等
扬子台地西北缘志留纪奥氏笔石属新种及地层对比意义 .....	王欣等
滇西北程海-宾川断裂带第四纪分段活动性的构造地貌表现与限定 .....	黄小巾等
准噶尔盆地东北缘卡拉麦里组物源区特征:碎屑岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学的制约 .....	白建科等
藏南亚东地区花岗质片麻岩 LA-ICP-MS 锆石定年及其地球化学特征 .....	吕鹏瑞等
柴北缘西段晚古生代牛鼻子梁高镁闪长岩成因机制及地球动力学过程 .....	钱兵等
东昆仑高压变质带榴辉岩、榴闪岩年代学、地球化学及其地质意义 .....	国显正等
柴达木盆地北缘全吉群皱节山组碎屑锆石年代学特征及其地质意义 .....	李猛等
东天山东段大白石头南新元古代片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及地质意义 .....	孟勇等