

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.398>



## 武汉地区 ZK145 钻孔沉积物磁性特征及对古洪水的记录

熊智秋<sup>1</sup>, 张玉芬<sup>1\*</sup>, 毛欣<sup>3</sup>, 熊友亮<sup>1</sup>, 熊德强<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 宋喆<sup>3</sup>, 李长安<sup>2,3</sup>

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 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

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 长江中游是我国洪灾最为严重的地区, 武汉江段是长江中游防洪重点。开展武汉地区长江古洪水研究, 从而延长古洪水记录具有重要意义。选择长江武汉段堤后典型湖泊钻孔——ZK145 钻孔, 在沉积物岩性及沉积相分析的基础上, 通过对岩心磁性特征和粒度特征分析, 结合 AMS <sup>14</sup>C 测年, 对长江武汉段全新世古洪水频发期进行了研究。根据质量磁化率、频率磁化率曲线, 将钻孔划分为 5 个沉积阶段。再结合中值粒径和砂含量, 识别出 9 次特大古洪水事件, 其年代为: 10 580~10 510, 10 280~10 200, 9 690~9 670, 9 530~9 500, 8 660~8 450, 7 700~7 500, 6 270~5 910, 4 850~4 800, 3 560~3 500 cal.a BP, 其中 9 700~4 800 cal.a BP 为古洪水频发期。热磁曲线分析表明, 古洪水沉积物的热磁曲线在 510 °C 附近可见较明显的峰值, 主导磁性矿物为磁铁矿。研究表明, 质量磁化率高值、频率磁化率低值和较粗粒径为长江武汉段堤后湖泊古洪水沉积的识别标志。

**关键词:** 武汉地区; 古洪水; ZK145 钻孔; 质量磁化率; 频率磁化率; 热磁曲线; 地球物理。

中图分类号: P318

文章编号: 1000-2383(2020)02-663-09

收稿日期: 2018-12-31

## Magnetic Characteristics of ZK145 Borehole Sediments in Wuhan Area and Its Records of Paleoflood

Xiong Zhiqiu<sup>1</sup>, Zhang Yufen<sup>1\*</sup>, Mao Xin<sup>3</sup>, Xiong Youliang<sup>1</sup>, Xiong Deqiang<sup>1</sup>, Li Jun<sup>1</sup>, Song Zhe<sup>3</sup>, Li Chang'an<sup>2,3</sup>

1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China

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

**Abstract:** The middle reaches of the Yangtze River are the most severely affected areas in China, and the Wuhan section is the key to flood control in the middle reaches of Yangtze River. It is of great significance to study the paleoflood of the Yangtze River in Wuhan area so as to prolong the record of the paleoflood. In this study, ZK145 borehole was selected in a typical lake behind the dam of Wuhan section of the Yangtze River. Based on the analysis of sedimentary lithology and sedimentary facies, magnetic characteristics and particle size characteristics of the core were analyzed, and AMS <sup>14</sup>C dating was used to study the occurrence period of holocene paleoflood in wuhan section of the Yangtze River. The borehole is divided into five sedimentary stages based on the mass magnetic susceptibility( $\chi$ ) and the frequency susceptibility ( $\chi_{fd}^{\%}$ ) curve. Combined with the median particle size and sand content, nine paleoflood events were identified, with the age: 10 580-10 510, 10 280-10 200, 9 690-9 670, 9 530-9 500, 8 660-8 450, 7 700-7 500, 6 270-5 910, 4 850-4 800, 3 560-3 500 cal.a BP, paleofloods occurred frequently at 9 700-4 800 cal.a BP among them. Through analysis of temperature-dependent magnetic susceptibility ( $\kappa$ -T curve), the heating curve of the paleoflood sediments shows a more obvious peak near 510 °C in paleoflood sediments, and Magnetite is the dominant magnetic mineral. The

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(Nos. 41672355, 41671011).

作者简介: 熊智秋(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事环境磁学方面的研究. ORCID: 0000-0003-2060-4111. E-mail: xiongziqiu\_cug@163.com

\* 通讯作者: 张玉芬, ORCID: 0000-0002-8940-3265. E-mail: zhyfcug@163.com

引用格式: 熊智秋, 张玉芬, 毛欣, 等. 2020. 武汉地区 ZK145 钻孔沉积物磁性特征及对古洪水的记录. 地球科学, 45(2): 663-671.

research shows that the high mass magnetic susceptibility, the low frequency susceptibility and the coarser particle size are the identification marks of the paleoflood deposition in the lakes behind the Yangtze River embankment in the Yangtze River.

**Key words:** Wuhan area; paleoflood; ZK145 borehole; mass magnetic susceptibility; frequency susceptibility; temperature-dependent magnetic susceptibility; geophysics.

## 0 引言

武汉地区是我国水患多发区和重灾区,历史记录武汉地区典型大洪水年份有:1788、1860、1870、1931、1954、1998和2016年等。史料记载,1931年洪水,武汉三镇沦为泽国,汉口全部被淹,受灾人口超过32600人。2016年7月的洪涝灾害,造成武汉市12个区75.7万人受灾、直接经济损失22.65亿元。近年来洪水发生频率还有逐渐升高的趋势。开展武汉地区洪水发生及演化规律研究是武汉地区进行防洪减灾的重点工作之一。由于具有仪器记载的洪水时间较短,对开展洪水发生的预测研究具有一定的制约影响。开展武汉地区的古洪水研究,有望弥补该区洪水记录时间较短的问题。对该区重建洪水发生序列、分析洪水周期,进行洪水发生的预测研究具有重要意义。目前长江中游流域的古洪水研究主要集中在江汉平原腹地(朱诚等,2005;谢远云等,2007;张玉芬等,2009;Wu *et al.*, 2017),以及汉江上游流域(Zhang *et al.*, 2013;Mao *et al.*, 2016),关于武汉地区的古洪水研究较少。本文基于堤后湖泊的沉积记录武汉市内的ZK145钻孔资料,主要运用沉积物的磁性特征和粒度特征对长江武汉段全新世古洪水的频发期进行了研究。

## 1 研究区地质环境概况及钻孔位置

武汉市地处江汉平原东缘,北邻桐柏大别山,南接湖南幕阜山。武汉市地表水系发育,长江和汉江是流经城区的主要河流。市内河道纵横,湖泊众多,被称为“百湖之市”。其中很多湖泊位于长江天然堤之后,且与大堤分隔。长江两岸天然堤发育,天然堤后为低洼地带。由于四周雨水汇集及洪水期江水漫溢过天然堤进入形成堤后湖。研究钻孔ZK145位于长江武汉段南岸的青山船厂附近,GPS坐标为 $30^{\circ}39'41''$  N,  $114^{\circ}26'56''$  E(图1),该区原为长江天然堤后湖泊——船厂湖,后被人工填湖成为陆地。

## 2 ZK145孔岩心特征及样品采集

ZK145钻孔深度为40 m。该钻孔地层中第四纪松散沉积物达37.53 m,岩心沉积连续,沉积序列清晰完整。钻孔岩心平均取芯率为82.35%。根据岩性特征,可将岩心分为7层,各层岩性描述如下:

第1层:0~1.30 m,人工填土与耕作层;

第2层:1.30~4.30 m,褐黄色黏土质粉砂;

第3层:4.30~14.00 m,粉砂质黏土,4.89~5.01 m含少量铁锰质结合。自上而下为颜色为褐黄色-

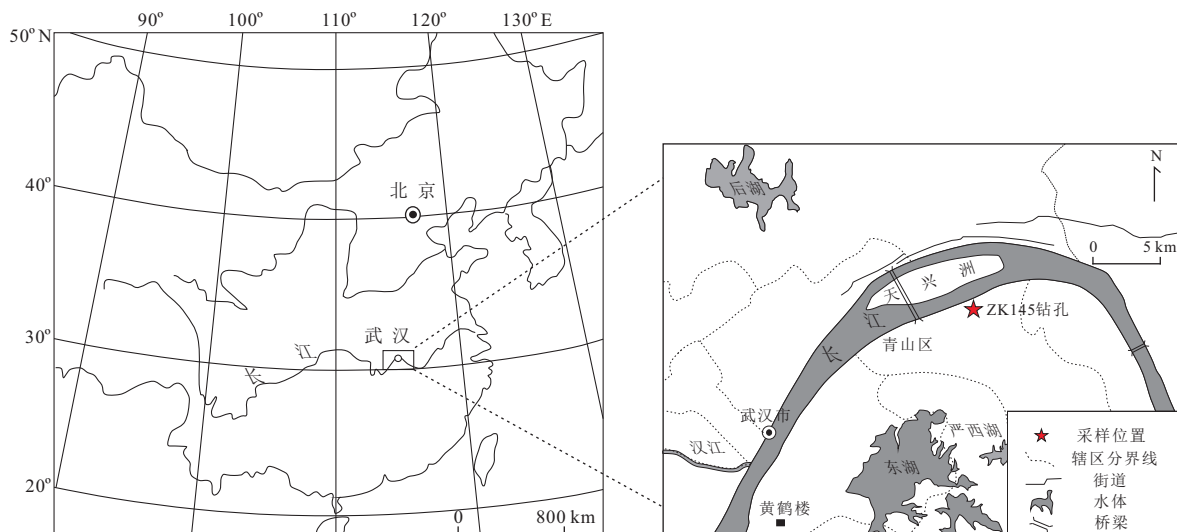


图1 武汉ZK145钻孔位置分布(左图为中国部分区域图)

Fig.1 The location distribution of ZK145 borehole in Wuhan

表1 ZK145 钻孔 AMS<sup>14</sup>C 测年及日历年龄校正Table 1 AMS <sup>14</sup>C dating and calendar calibration of chronology in the ZK145 borehole

样品编号	取样深度(m)	岩性特征	AMS <sup>14</sup> C 年龄 (a BP)	日历年龄(cal.a BP)
ZK145 <sup>14</sup> C-1	3.20	黑灰色黏土	3 380±35	3 623
ZK145 <sup>14</sup> C-2	14.00	黑灰色黏土	4 270±35	4 844
ZK145 <sup>14</sup> C-3	19.63	褐灰色黏土	8 670±40	9 614
ZK145 <sup>14</sup> C-4	24.89	褐灰色黏土	8 800±41	9 828
ZK145 <sup>14</sup> C-5	30.10	黑灰色黏土	9 480±50	10 738

灰绿色—深灰—灰绿色;

第4层:14.00~28.26 m,灰色、深灰色粉砂夹黏土,含植物残骸与云母碎片;

第5层:28.26~32.66 m,灰黑色细砂,中间夹少量黏土;

第6层:32.66~37.53 m,砾石层,砾石成分以石英质、燧石和硅质为主,含粗砂;

第7层:37.53~40.00 m,为基岩层.

除顶部为人工填土外,其沉积环境大致可划分为两部分:上部主要为褐黄、灰、灰绿色和深灰色粉砂、黏土质粉砂和黏土,为湖泊相沉积环境.下部为粉砂、细砂和砾石,构成二元结构,属河流相沉积环境.

野外以 10 cm 采样间距,从上至下共采集磁学和粒度样品各 257 组(下部砾石层取样间隔较大).磁学样品的采集使用无磁性小铲,选取中央未受干扰的原始沉积物.此外,还采集了 5 组 AMS<sup>14</sup>C 年龄样品.

AMS<sup>14</sup>C 年龄样品测试在波兰 Poznan Radiocarbon Laboratory 完成,并运用最新的 OxCal 4.3(Online) 软件(<https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/OxCal.html>)进行年龄校正.粒度数据在南京师范大学地理科学学院粒度分析实验室完成测试.采用仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersize 2000 激光粒度仪,粒度测试范围为 0.01~2 000 μm,重复测量误差小于 2%.样品磁参数测试均在中国地质大学(武汉)岩石磁学实验室完成.磁学样品在实验室测试前首先经过自然风干,研磨,过 0.063 mm 筛后,再装入体积为 Φ2.5×2.2 cm<sup>3</sup> 的无磁性圆柱状塑料盒进行测量.磁性参数测试包括质量磁化率( $\chi$ )、频率磁化率( $\chi_{\text{rf}}$ )和高温热磁曲线( $\kappa$ -T 曲线).采用 MFKI-FA/CS4 三频多功能磁化率仪测量低频磁化率  $\chi_{\text{rf}}$  (0.976 kHz) 和 高频磁化率  $\chi_{\text{rf}}$  (15.616 kHz). 质量磁化率由样品的低频(0.976 kHz)磁化率经质量归一

化获得,根据测量结果计算频率磁化率= $(\chi_{\text{rf}}-\chi_{\text{rf}})/\chi_{\text{rf}}\times 100\%$ .仪器精度为 ±0.1%.此外,选取代表性样品,利用 KLY-3S 型卡帕桥和温度控制系统 CS-3 在氩气环境下完成磁化率随温度变化( $\kappa$ -T) 曲线测量.

### 3 实验结果分析

#### 3.1 AMS<sup>14</sup>C 年代结果分析

AMS<sup>14</sup>C 年代测试结果和校正后获得日历年龄结果如表 1 所示.根据测年结果,采用分段线性外推和内推的方法,即可获得该钻孔各个深度处的年龄值.按此方法推测该钻孔岩心在 40 m 处的年龄约为 12.47 cal.ka BP.地质时代属于晚更新世末期.

#### 3.2 粒度数据结果分析

粒度数据共测试获得 257 组,粒度结果见下图 2 所示,中值粒径和砂含量曲线基本表现为下粗上细的特征.

#### 3.3 磁性特征分析

根据磁化率和频率磁化率曲线变化特征,将钻孔划分为 5 个沉积阶段(表 2),现结合中值粒径、地层岩性和年龄数据(图 2),将各阶段特征分析如下:

第 I 阶段:33.80~37.90 m,相应的年代为 11.38~12.10 ka B.P(据 AMS<sup>14</sup>C 年代数据线性外推).总体磁化率曲线呈逐渐增大,频率磁化率曲线呈现先增大后减小趋势.该段质量磁化率的最大值为  $64.87\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$ ,最小值为  $8.99\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$ ,平均值为  $23.38\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$ (表 2),为该钻孔磁化率值较小的阶段.频率磁化率的最大值为 2.48%,最小值为 1.23%,平均值为 1.80%,标准差为 0.49,基本是该钻孔频率磁化率值最小的阶段.说明该段沉积物的粗颗粒磁性物质含量较多.同时,该段岩性以砾石为主,推断为河床相沉积.

第 II 阶段:22.34~33.60 m,相应的年代为 9.72~11.35 ka B.P.该段质量磁化率值较大,质量

表 2 ZK145 钻孔磁化率和频率磁化率特征

Table 2 Characteristic of magnetic susceptibility and frequency susceptibility of ZK145 borehole

阶段	深度(m)	年代(ka B.P)	质量磁化率( $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ )					频率磁化率(%)				
			最大值	最小值	平均值	标准差	样品数	最大值	最小值	平均值	标准差	样品数
V	1.30~2.83	3.41~3.58	98.06	27.44	48.46	17.05	13	4.62	1.88	3.11	0.93	13
IV	3.00~10.00	3.60~4.39	33.47	5.94	13.34	6.34	58	5.36	0.40	2.52	1.30	58
III	10.13~22.23	4.41~9.72	87.63	7.16	27.75	17.77	94	8.34	0.74	4.28	1.75	94
II	22.34~33.60	9.72~11.35	173.97	12.82	43.94	20.92	87	6.63	0.77	1.92	0.86	87
I	33.80~37.90	11.38~12.10	64.87	8.99	23.38	21.25	5	2.48	1.23	1.80	0.49	5
整个钻孔		3.41~12.10	173.97	5.94	30.94		257	8.34	0.40	2.98		257

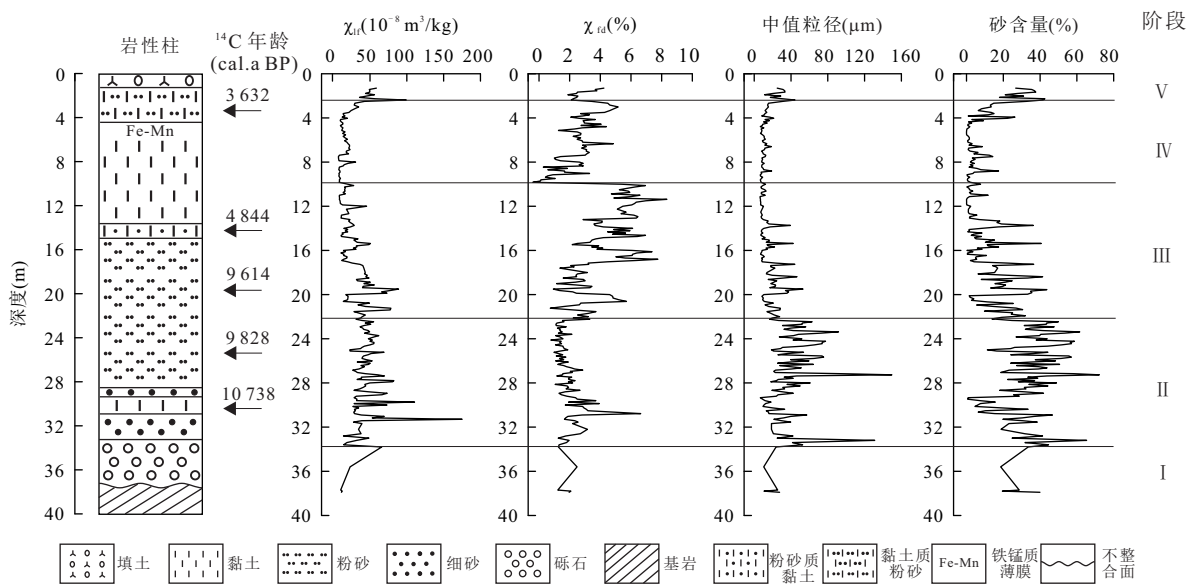


图 2 ZK145 钻孔质量磁化率、频率磁化率、中值粒径、砂含量曲线及岩性柱状图

Fig. 2 Mass magnetic susceptibility, frequency susceptibility, median particle size, sand content curve and lithologic column diagram of ZK145 borehole

磁化率最大值为  $173.97 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 最小值为  $12.82 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 平均值为  $43.94 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ . 磁化率曲线上下波动剧烈, 较第 I 阶段明显增大, 出现峰值. 频率磁化率的均值较第 I 阶段稍有增大, 但仍低于整个钻孔的频率磁化率均值. 该段的中值粒径为本钻孔其值最大的一段, 曲线波动较大, 出现极大峰值. 该段岩性为粉砂, 细砂, 中部夹少量黏土层, 推断为河湖交替相.

第 III 阶段: 10.13~22.23 m, 相应的年代为 4.41~9.72 ka B.P. 该段的质量磁化率较第 II 阶段有所减小, 并不断减小. 其最大值为  $87.63 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 最小值为  $7.16 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 平均值为  $27.75 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ . 磁化率的均值在 5 个阶段中处于中间, 在整段值较小, 但有峰值凸显. 频率磁化率值较第 II 阶段有所增大, 均值为整个钻孔中最大的阶段, 且波动强烈. 其最大值为 8.34%, 最小值为

0.74%, 平均值为 4.28%. 标准差为 1.75. 该段中值粒径曲线整体较平稳, 但峰值凸显. 对应的岩性由粉砂和黏土交互频繁, 属湖泊相沉积.

第 IV 阶段: 3.00~10.00 m, 相应的年代为 3.60~4.39 ka BP. 该段质量磁化率为整个钻孔中磁化率最小的阶段. 其最大值为  $33.47 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 最小值为  $5.94 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 平均值为  $13.34 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ . 频率磁化率值为整个钻孔较小的一段. 其最大值为 5.36%, 最小值为 0.40%, 平均值为 2.52%. 该段频率磁化率均值小于整个钻孔频率磁化率的均值, 较第 III 阶段有所减小. 该段中值粒径值很小, 岩性为黏土层, 含少量粉砂质黏土层, 为湖沼相沉积.

第 V 阶段: 1.30~2.83 m, 相应的年代为 3.41~3.58 ka BP. 该段的磁化率曲线呈现上下波动并不断增大, 质量磁化率最大值为  $98.06 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 最小值为  $27.44 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 平均值为  $48.46 \times$



$10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ . 该段磁化率均值为整个钻孔中最大的一段. 频率磁化率曲线也呈波动状态,其最大值为4.62%,最小值为1.88%,平均值为3.11%. 该段频率磁化率在整个钻孔均值中处于较大的段. 可能因为该阶段人类活动更加频繁.

## 4 ZK145孔古洪水沉积讨论

### 4.1 古洪水沉积标志

研究钻孔所在的船厂湖,属于长江武汉段堤后湖泊,是长江中游古洪水记录的良好信息库. 一是由于长江武汉段位于江汉平原东部边缘,是长江中游江汉—洞庭平原洪水的出口河段,对古洪水反映敏感;二是因为不同于平原腹地(荆江河段)河道长期游荡,长江武汉段由于受两岸基岩丘陵(龟山、蛇山、大军山、小军山等)、岗地夹持,冰消期以来长江河道相对固定,天然堤稳定且不断加积发展,在两岸平原处形成高达2 m左右的天然堤. 在这种地质环境条件下,堤后湖泊得以长期存在,使之具备较完整记录了古洪水的历史的条件. 三是船厂湖位于长江天然堤与中晚更新世网纹红土及下蜀土组成的岗地之间,无较大水系的注入. 其物源主要为湖沼内源生沉积、周缘岗地侵蚀(面流或沟谷汇入)沉积和长江洪水沉积. 由于长江武汉段天然堤高大,只有一定规模的较大洪水的泥沙方能越过天然堤进入湖泊沉积下来. 由于沉积环境和物质来源特征,堤后湖泊的洪水沉积除了粒度组成(相对较粗)特征外,还有一系列物理和化学特征的不同,本文主要基于沉积物的磁性特征讨论古洪水的沉积记录.

**4.1.1 洪水沉积物的磁化率特征** 古洪水沉积的磁性特征受沉积物中磁性矿物的含量、类型以及晶粒大小3个因素的控制(张卫国等,1995). 湖沼沉积与长江洪水沉积的磁性特征表现明显不同. 湖沼相淤集沉积层的磁化率一般为低值,这与有机物含量和还原环境密切相关. 因为长期滞水的还原环境可使铁磁性矿物变成弱磁性矿物(潘凤英和袁丁,1996),使其磁化率值最低. 而外源碎屑输入磁化率值相对较高,这是因为沉积物磁化率往往与粒度成正比(崔建新等,2005),较粗的碎屑物质比细粒物质蕴含更丰富的磁性矿物,磁化率值较高(Yu and Kelts, 2002; 杨小强和李华梅,2002). 由前人的研究可见,长江沉积物较岗地的下蜀土和网纹红土的磁化率值更大. 此外,频率磁化率对非常小的磁性

颗粒(如SP,  $d < 0.03 \mu\text{m}$ )反映特别灵敏(敖红和邓成龙,2007),常与磁化率呈现反相关的关系(谢建磊等,2017). 频率磁化率低值时对应沉积物粗颗粒含量较多,反之则反. 粒度反映水动力大小,已被广泛运用于古洪水识别(Zhang *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2016; Matsumoto *et al.*, 2016; Leigh, 2017). 水动力较强时,沉积物颗粒变粗,细的铁磁性矿物含量减少,导致频率磁化率值变小,可能为一次洪水事件. 因此,位于长江天然堤后湖的ZK145孔沉积物的磁化率、频率磁化率,可作为古洪水的沉积证据,结合粒度分析反映古洪水过程.

**4.1.2 洪水沉积物的磁性矿物特征** 由图3样品热磁实验的测试结果可见,所有样品的加热曲线在580 °C(即磁铁矿的居里温度)都有一明显的转折,说明所测样品的磁化率主要是由磁铁矿贡献. 部分样品的加热曲线在300 °C左右呈现微弱的峰值,推测可能是加热过程中铁的硫化物生成了磁黄铁矿(图3a, 3d, 3e). 50号样品(图3b)加热曲线无明显峰值,反映含有大量粒度较粗的磁铁矿(图3b). 129号样品(图3c)升温至400 °C以前,加热曲线无明显变化,从420 °C磁化率开始增加,在510 °C附近可见较明显的峰值. 这一峰值通常是由于加热过程中不稳定含铁硅酸盐和黏土矿物受热分解新生成磁铁矿所致(Deng *et al.*, 2000, 2004). 6号样品和254号样品的加热曲线大于冷却曲线,表明冷却过程少量磁铁矿发生转化,生成了弱磁性的磁性矿物. 其余样品,冷却曲线远高于加热曲线,说明加热过程中新生成了大量亚铁磁性矿物(如磁铁矿)(李倩等,2016).

综合热磁曲线分析,ZK145钻孔沉积物的主导磁性矿物为磁铁矿. 其中129号样品其热磁曲线与长江上游流域奔子栏附近悬浮物样品(YZ-1)和岷江悬浮物样品(MJ)热磁曲线形态能很好地对应(罗超等,2013),加热曲线在510 °C附近有一较明显的峰值,冷却曲线在400 °C左右也呈现峰值. 且铁矿物具有对气候环境演化历史的指示意义(方谦等,2018),推测该沉积物可能是长江江水携带来的洪水沉积物.

### 4.2 ZK145孔记录的古洪水期沉积

结合课题组的前期研究(李长安等,2000;张玉芬等,2004, 2016),本文将磁化率高值、频率磁化率低值以及粒度较粗结合,其中粒度参数上即为中值粒径高值和砂含量高值(Leigh, 2017),作为识别古

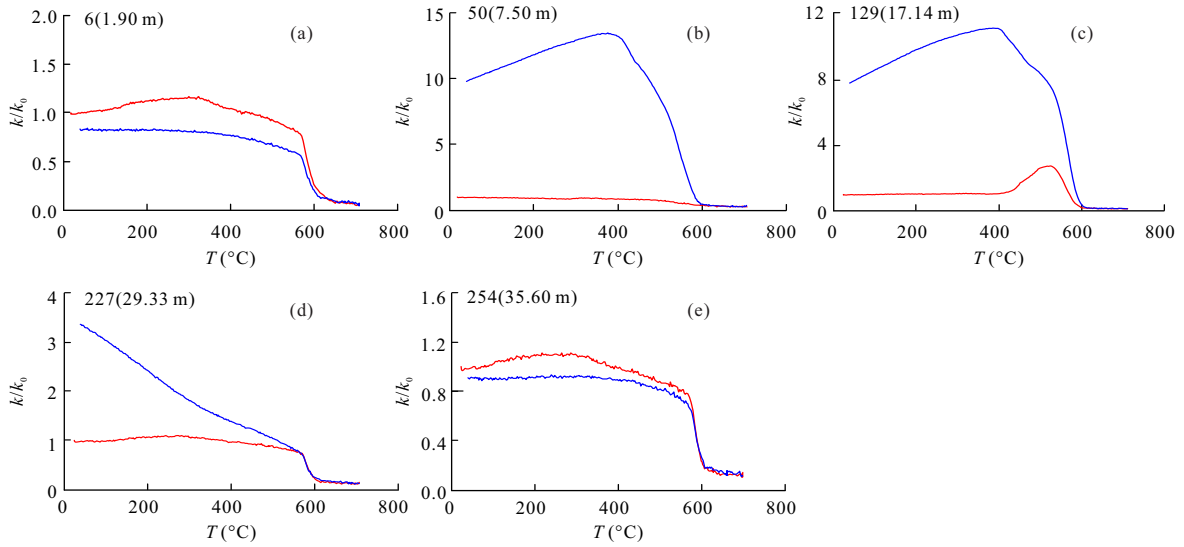


图 3 ZK145 钻孔代表性样品  $\kappa$ - $T$  曲线 (红线为加热曲线, 蓝线为冷却曲线, 各图左上角数字表示样品号和取样深度)  
Fig.3 Temperature-dependence susceptibility measurements for the typical sample of ZK145 borehole

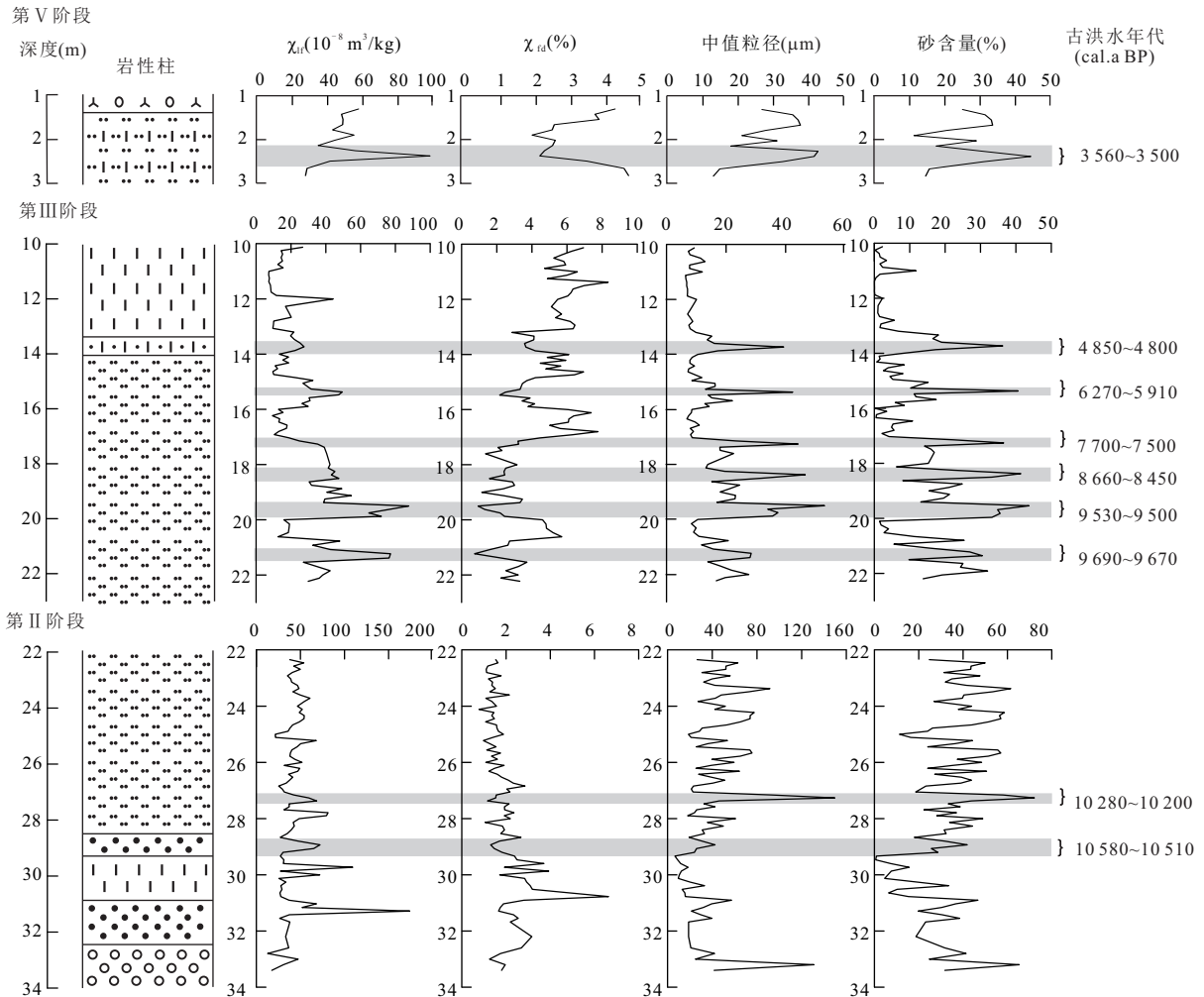


图 4 ZK145 钻孔第 V、III 和 II 阶段的古洪水层识别  
Fig.4 Identification of paleoflood layers in stages V, III and II of ZK145 borehole

洪水沉积标志. 据此,ZK145钻孔沉积中可识别出9期古洪水沉积层(图4). 其中,第V阶段2.14~2.67 m,第III阶段13.60~14.00 m,15.26~15.68 m,17.14~17.37 m,18.25~18.50 m,19.50~19.90 m和21.08~21.38 m以及第II阶段27.05~27.47 m,28.80~29.20 m为古洪水沉积层. 通过AMS<sup>14</sup>C测年数据线性插值,可确定9期古洪水事件的年代分别为3 560~3 500 cal.a BP,4 850~4 800 cal.a BP,6 270~5 910 cal.a BP,7 700~7 500 cal.a BP,8 660~8 450 cal.a BP,9 530~9 500 cal.a BP,9 690~9 670 cal.a BP,10 280~10 200 cal.a BP,10 580~10 510 cal.a BP(图4). 其中,第III阶段(即9 720~4 410 cal.a BP)共识别出6个古洪水多发期,其中9 700~4 800 cal.a BP古洪水期集中. 从岩心的沉积环境看该段沉积相由湖沼相逐渐变成河、湖频繁交互,沉积环境不稳定,洪水事件频发. 这与长江流域全新世洪水研究的结果基本一致. 张玉芬等人(2009)基于磁组构对江陵剖面研究,共识别出9 874±100~4 600±80 a BP古洪水事件17次. 葛兆帅等人(2004)对长江上游三峡河段的研究中,共记录该时段发生3次洪水事件. 朱宗敏等人在研究和尚洞石笋的磁性矿物时,识别出9 000~8 400,7 500~7 200和5 500~5 000 a BP共3次洪水事件(Zhu et al., 2017). 朱诚等人对长江三峡及江汉平原地区研究中,发现8 000~5 500 a BP共发生9次特大洪水事件(朱诚和卢春成,1997).

## 5 结论

(1)通过对ZK145钻孔岩心磁性特征和粒度特征分析,根据质量磁化率高值、频率磁化率低值和较粗粒径(中值粒径高值、砂含量高值),共识别出9次特大古洪水事件. 其年代分别为:10 580~10 510,10 280~10 200,9 690~9 670,9 530~9 500,8 660~8 450,7 700~7 500,6 270~5 910,4 850~4 800,3 560~3 500 cal.a BP,其中9 700~4 800 cal.a BP为古洪水频发期.

(2)质量磁化率高值、频率磁化率低值和较粗粒径可作为长江武汉段堤后湖古洪水沉积的识别标志. 热磁曲线分析表明ZK145钻孔沉积物主导磁性矿物为磁铁矿,129号古洪水沉积样品加热曲线在510℃附近可见较明显的峰值,冷却曲线在400℃左右也呈现峰值. 热磁曲线这一特征可作为识别长江古洪水事件的标志.

致谢:感谢研究生连伟航,江华军,黄丽娟,常国瑞,徐蕾,张增杰,赵举兴,高孟秋,郭洁,李启文,杨伟,陈辰等人对钻孔岩心的编录和样品的采集以及部分样品的测试工作.

## References

- Ao, H., Deng, C. L., 2007. Review in the Identification of Magnetic Minerals. *Progress in Geophysics*, 22(2): 432–442(in Chinese with English abstract).
- Cui, J. X., Zhou, S. Z., Han, H. T., 2005. Fluvial-Lacustrine Sediments and Holocene Climatic and Hydrologic Events in the Renqiu Section, China. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 25(4): 107–113 (in Chinese with English abstract).
- Deng, C. L., Zhu, R. X., Verosub, K. L., et al., 2000. Paleoclimatic Significance of the Temperature-Dependent Susceptibility of Holocene Loess along a NW-SE Transect in the Chinese Loess Plateau. *Geophysical Research Letters*, 27(22): 3715–3718. <https://doi.org/10.1029/2000gl008462>
- Deng, C. L., Zhu, R. X., Verosub, K. L., et al., 2004. Mineral Magnetic Properties of Loess/paleosol Couplets of the Central Loess Plateau of China over the last 1.2 Myr. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109 (B1): 1–13. <https://doi.org/10.1029/2003jb002532>
- Fang, Q., Hong, H. L., Zhao, L. L., et al., 2018. Climatic Implication of Authigenic Minerals Formed during Pedogenic Weathering Processes. *Earth Science*, 43(3):753–769(in Chinese with English abstract).
- Ge, Z. S., Yang, D. Y., Li, X. S., et al., 2004. The Paleoflooding Record along the Up-Reaches of the Changjiang River since the Late Pleistocene Epoch. *Quaternary Sciences*, 24(5):555–560(in Chinese with English abstract).
- Leigh, D. S., 2017. Vertical Accretion Sand Proxies of Gaged Floods along the Upper Little Tennessee River, Blue Ridge Mountains, USA. *Sedimentary Geology*, 364: 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.09.007>.
- Li, C. A., Yin, H. F., Yu, L. Z., et al., 2000. Silt Transform Characteristics and Latent Effect on Fluvial System Environment in Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*. 9(4): 504–509 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Yi, L., Liu, S. Z., et al., 2016. Rock Magnetic Properties of the Lz908 Borehole Sediments from the Southern Bohai Sea, Eastern China. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(5):1717–1728(in Chinese with English abstract).
- Luo, C., Zheng, Y., Zheng, H. B., et al., 2013. Magnetic

- Properties of Suspended Sediment in the Yangtze River and Its Provenance Implications. *Quaternary Sciences*, 33(4):684—696 (in Chinese with English abstract).
- Mao, P. N., Pang, J. L., Huang, C. C., et al., 2016. A Multi-Index Analysis of the Extraordinary Paleoflood Events Recorded by Slackwater Deposits in the Yunxi Reach of the Upper Hanjiang River, China. *Catena*, 145: 1—14. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.016>
- Matsumoto, D., Sawai, Y., Yamada, M., et al., 2016. Erosion and Sedimentation during the September 2015 Flooding of the Kinu River, Central Japan. *Scientific Reports*, 6(1): 1—10. <https://doi.org/10.1038/srep34168>
- Pan, F. Y., Yuan, D., 1996. Floodwater Depositional Marks of Lake Facies Deposit in Wujindan Lake within Xinghua City. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 3:78—84 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L., Zhu, C., Ma, C. M., et al., 2017. Mid-Holocene Palaeoflood Events Recorded at the Zhongqiao Neolithic Cultural Site in the Jiangnan Plain, Middle Yangtze River Valley, China. *Quaternary Science Reviews*, 173: 145—160. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.08.018>
- Xie, J. L., Zhang, K. X., Ma, X. L., et al., 2017. Magnetostratigraphy and Astronomically Tuned Time Scale of Yangtze Delta since Pliocene. *Earth Science*, 42(10): 1760—1773 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. Y., Li, C. A., Wang, Q. L., et al., 2007. Sedimentary Records of Paleoflood Events During the Last 3 000 Years in Jiangnan Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 27(1):81—84 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Q., Li, H. M., 2002. The Correlation between the Content of the Different Grain Size and Magnetic Susceptibility in Lacustrine Sediments, Nihewan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4):675—679 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. Q., Kelts, K. R., 2002. Abrupt Changes in Climatic Conditions across the Late-Glacial/Holocene Transition on the N. E. Tibet-Qinghai Plateau: Evidence from Lake Qinghai, China. *Journal of Paleolimnology*, 28: 195—206. <https://doi.org/10.1023/A:1021635715857>.
- Zhang, W. G., Yu, L. Z., Xu, Y., 1995. Brief Reviews on Environmental Magnetism. *Progress in Geophysics*, 10(3): 95—105 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Yan, G. L., et al., 2004. A Comparative Study of Magnetic Fabric Characters Between Flooded Sediments and Normal River Sediments. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(4): 639—645 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Cheng, L., et al., 2009. Magnetic Fabric of Holocene Palaeo-Floods Events in Jiangnan Plain. *Earth Science*, 34(6):985—992 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Sun, X. L., 2015. Sediment Magnetism Characteristics and Its Climatic Environment Significance of Northeast Margin of Jiangnan Plain. *Earth Science*, 41(7):1225—1230 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Z., Huang, C. C., Pang, J. L., et al., 2013. Holocene Paleofloods Related to Climatic Events in the Upper Reaches of the Hanjiang River Valley, Middle Yangtze River Basin, China. *Geomorphology*, 195: 1—12. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.032>
- Zhu, C., Lu, C. C., 1997. The Study of Holocene Environmental Archaeology and Extreme Flood Disaster in the Three Gorges of the Changjiang River and the Jiangnan Plain. *Acta Geographica Sinica*, 52(3): 268—278 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, C., Zheng, C. G., Ma, C. M., et al., 2005. Study on Identification of Strata Paleoflood Deposits in the Zhongba Site in the Three Gorges Reservoir Area of the Yangtze River. *Chinese Science Bulletin*, 50(20): 2240—2250 (in Chinese).
- Zhu, Z. M., Feinberg, J. M., Xie, S. C., et al., 2017. Holocene ENSO-Related Cyclic Storms Recorded by Magnetic Minerals in Speleothems of Central China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(5): 852—857. <https://doi.org/10.1073/pnas.1610930114>

#### 附中文参考文献

- 敖红, 邓成龙, 2007. 磁性矿物学的磁学鉴别方法回顾. *地球物理学进展*, 22(2): 432—442.
- 崔建新, 周尚哲, 韩海涛, 等, 2005. 河北任丘剖面河湖相沉积及全新世水文气候事件. *海洋地质与第四纪地质*, 25(4):107—113.
- 葛兆帅, 杨达源, 李徐生, 等, 2004. 晚更新世晚期以来的长江上游古洪水记录. *第四纪研究*, 24(5):555—560.
- 方谦, 洪汉烈, 赵璐璐, 等, 2018. 风化成土过程中自生矿物的气候指示意义. *地球科学*, 43(3): 753—769.
- 李倩, 易亮, 刘素贞, 等, 2016. 渤海南部莱州湾 Lz908 孔沉积物的岩石磁学性质. *地球物理学报*, 59(5): 1717—1728.
- 李长安, 殷鸿福, 俞立中, 2000. 长江流域泥沙特点及对流域环境的潜在影响. *长江流域资源与环境*, 9(4): 504—509.
- 罗超, 郑妍, 郑洪波, 等, 2013. 长江流域悬浮物磁性特征及其物源指示意义. *第四纪研究*, 33(4):684—696.
- 潘凤英, 袁丁, 1996. 兴化市乌巾荡湖相沉积层中鉴别洪水沉积标志的研究. *南京师大学报(自然科学版)*, (3): 78—84.
- 谢建磊, 张克新, 马小林, 等, 2017. 长江三角洲上新世以来



- 磁性地层及天文调谐年代标尺.地球科学,42(10):1760—1773.
- 谢远云,李长安,王秋良,等,2007.江汉平原近3000年来古洪水事件的沉积记录.地理科学,27(1):81—84.
- 杨小强,李华梅,2002.泥河湾盆地沉积物粒度组分与磁化率变化相关性研究.沉积学报,20(4):675—679.
- 张卫国,俞立中,许羽,1995.环境磁学研究的简介.地球物理学进展,10(3):95—105.
- 张玉芬,李长安,阎桂林,等,2004.长江中游地区洪泛沉积物与正常河流沉积物磁组构特征对比研究.地球物理学报,47(4):639—645.
- 张玉芬,李长安,陈亮,等,2009.基于磁组构特征的江汉平原全新世古洪水事件.地球科学—中国地质大学学报,34(6):985—992.
- 张玉芬,李长安,孙习林,等,2016.江汉平原东北缘麻城剖面磁化率特征及气候环境意义.地球科学,41(7):1225—1230.
- 朱诚,卢春成,1997.长江三峡及江汉平原地区全新世环境考古与异常洪涝灾害研究.地理学报,52(3):268—278.
- 朱诚,郑朝贵,马春梅,等,2005.长江三峡库区中坝遗址地层古洪水沉积判别研究.科学通报,50(20):2240—2250.