

doi:10.3799/dqkx.2016.100

江汉平原东北缘麻城剖面磁化率特征及气候环境意义

张玉芬¹, 李长安^{2,3}, 孙习林³, 毛欣³, 高孟秋³, 熊德强¹, 王金鑫¹

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: 为了探讨和揭示江汉平原晚更新世以来沉积物磁学特征和该区的气候环境演变规律, 对新近发现的位于江汉平原东北缘的麻城剖面进行了磁化率样品的采集和测试与对应年代学分析, 结果表明: (1) 麻城剖面沉积物质量磁化率值偏低, 平均值为 $10.85 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 全剖面变化不大, 为 $5.76 \times 10^{-8} \sim 23.39 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 但频率磁化率波动较大, 分布于 $5.35\% \sim 50.35\%$, 平均值为 24.71% , 显示具有较高的超顺磁性颗粒(super paramagnetism, SP)含量; (2) 根据磁化率和频率磁化率曲线的旋回波动特点, 结合年代学测试结果, 将该区的古气候环境划分为 7 个不同的演化阶段. 初步认为该区晚更新世以来沉积环境经历了由湖沼相沉积—湖相沉积—泛滥平原中的沼泽沉积环境的变化. 气候经历了温湿—干冷—暖湿—干凉—干冷—温湿—干(旱)偏冷的阶段性变化过程, 与晚更新世晚期以来全球气候变化特点具有较好的一致性.

关键词: 麻城剖面; 磁化率; 气候变化; 沉积物.

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2016)07-1225-06

收稿日期: 2015-11-10

Sediment Magnetism Characteristics and Its Climatic Environment Significance of Northeast Margin of Jianghan Plain

Zhang Yufen¹, Li Chang'an^{2,3}, Sun Xilin³, Mao Xin³, Gao Mengqiu³, Xiong Deqiang¹, Wang Jinxin¹

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

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

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

Abstract: In order to reveal the sediment magnetism characteristics and its climatic environment evolution since Late Pleistocene of the Jianghan plain, we collected magnetic susceptibility samples from Macheng, the northeast margin of the Jianghan plain, for analysis. The results show that the mass susceptibility of magnetic materials in Macheng profile is relatively low ($10.85 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ on average), and the variation range of mass susceptibility is narrow ($5.76 \times 10^{-8} \sim 23.39 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$). However, the variation range of frequency susceptibility is relatively wide ($5.35\% \sim 50.35\%$ and 24.71% on average), which shows that the content of SP (super paramagnetism) particulate is high. The cyclic wave characteristics of magnetic susceptibility and frequency magnetic susceptibility data suggest that the paleoclimate environment of this region could be divided into 7 evolution phases. According to the chronological data, it is concluded that the sedimentary environment of this region has undergone limnetic facies sedimentary stage, lacustrine sedimentary stage, swamp sedimentary stage in flood plain since Late Pleistocene, whereas the climate has undergone the phased variation of humid—dry—cold—warm—wet—dry—cool—dry—cold—humid—dry (drought) and cool, which is consistent with the global climate change characteristics since Late Pleistocene.

Key words: Macheng profile; magnetice susceptibility; climate change; sediment.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41440002); 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(No. SKLLQG0908); 中国地质调查局项目(No.1212011121142).

作者简介: 张玉芬(1957—), 女, 教授, 博士, 主要从事环境地质和环境地球物理等方面的教学与研究. E-mail: zhyfcug@163.com

引用格式: 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.

0 引言

沉积物磁学特征作为反映气候和环境变化的替代性指标,已广泛应用于重建黄土堆积、海洋沉积和一些高原和干旱较封闭的湖泊沉积物的环境研究中(Heller and Liu, 1984, 1986; 安芷生等, 1990; 刘秀铭等, 1990, 1993; 朱日祥等, 1994; 方小敏等, 1998),但对于江汉盆地有关这方面的研究相对较少.近年来课题组在进行江汉—洞庭盆地第四纪地质调查时,在江汉盆地东北缘的麻城地区发现了一个出露厚度约 4.5 m 的人工开挖剖面.本文拟通过对该剖面沉积物磁学特征、剖面的岩性特征的分析,建立长江流域开放性盆地磁学参数对气候环境的指示意义.并结合年代学资料,探讨和恢复江汉平原晚更新世以来古气候和古环境演化规律.

1 剖面岩性特征及样品采集与测试

1.1 研究剖面岩性特征

本文研究的麻城剖面位于湖北省麻城市河东乡境内(地理坐标为 31°13′09N, 115°03′80E),为人工开挖剖面(图 1).剖面出露约 4.5 m 左右,岩性主要是由褐灰色、青灰色、黄色亚砂土和亚黏土及淤泥组成.依据剖面岩性野外观察从上到下分层描述如下:①灰黄色亚砂土,含植物根系,厚 25 cm;②褐黄色砂质黏土层,干色发白,厚 10 cm;③褐灰色亚黏土,顶部约 15 cm 处颜色变深为黑褐色,沉积物粒径总体偏细,以黏土为主,厚 50 cm;④褐灰色亚黏土—亚砂土层,为本剖面粒径较粗的层位.靠该层顶部约有 20 cm 厚的沉积物颜色变黑,为灰黑色,且粒径较该层下部要粗,

层厚约 65 cm;⑤整体为青灰色淤泥质黏土及粉砂层,但夹有黑灰色淤泥和较粗的细砂.顶部约 30 cm 为灰黑色黏土质粉砂,植物根系发育,下部约 50 cm 为砂质黏土.该层总厚约 260 cm;⑥灰褐色亚砂质—黏土层,中间垂直穿插黑灰条带,可能是上层黑色泥质向下沿裂缝渗入所致,厚约 40 cm.根据野外岩性描述绘制出剖面岩性柱状图如图 2 所示.

1.2 样品的采集

野外采样时剥去剖面上的表层土,自上而下按约 2.5 cm 间距连续采集频率磁化率和磁化率样品,考虑近地表有人为污染,故对近地表 30 cm 没有取样,共采集样品 172 组(图 1b).

1.3 样品的测试

1.3.1 年代学样品的测试 为了获得年代学资料,分别在据剖面顶部 1.5 m 和 3.0 m 处采集了¹⁴C 样品,样品的年龄在波兰的¹⁴C 年代学实验室(Poznań Radiocarbon Laboratory)完成,其年龄分别为 11 230±60 a BP 和 14 520±110 a BP,采用线性插值的方法求出了各采样点对应的年龄值(图 2).

1.3.2 磁化率样品的测试 首先以自然风干的方式对磁化率样品进行干燥处理,然后对样品进行碾磨,过直径为 0.1 mm 的筛,最后将过筛后的样品放入塑料薄膜内用电子秤进行称重,并装于直径 2.5 cm、高 2.2 cm 的无磁性圆柱状塑料盒内以用于测试.样品测试在中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院岩石磁学实验室内完成.使用仪器为英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率仪,工作频率选择低频(0.47 kHz)和高频(4.70 kHz),分别测出样品的低频磁化率(χ_{lf})和高频磁化率(χ_{hf}),并通过公式 $\chi_{fd}\% = (\chi_{lf}/\chi_{hf})/\chi_{lf} \times 100\%$ 计算出频率磁化率系数($\chi_{fd}\%$).为了验证测试样品的精度和可

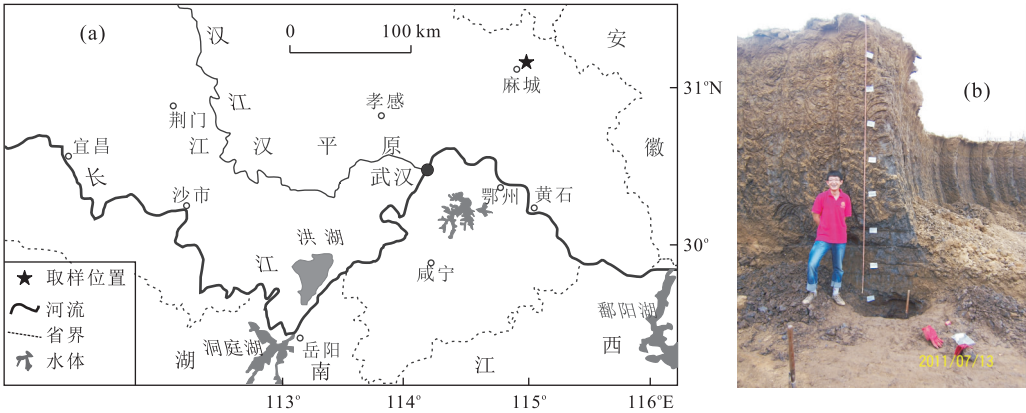


图 1 研究剖面地理位置(a)和采样剖面(b)

Fig.1 Location of studied profile (a) and sampling profile (b)

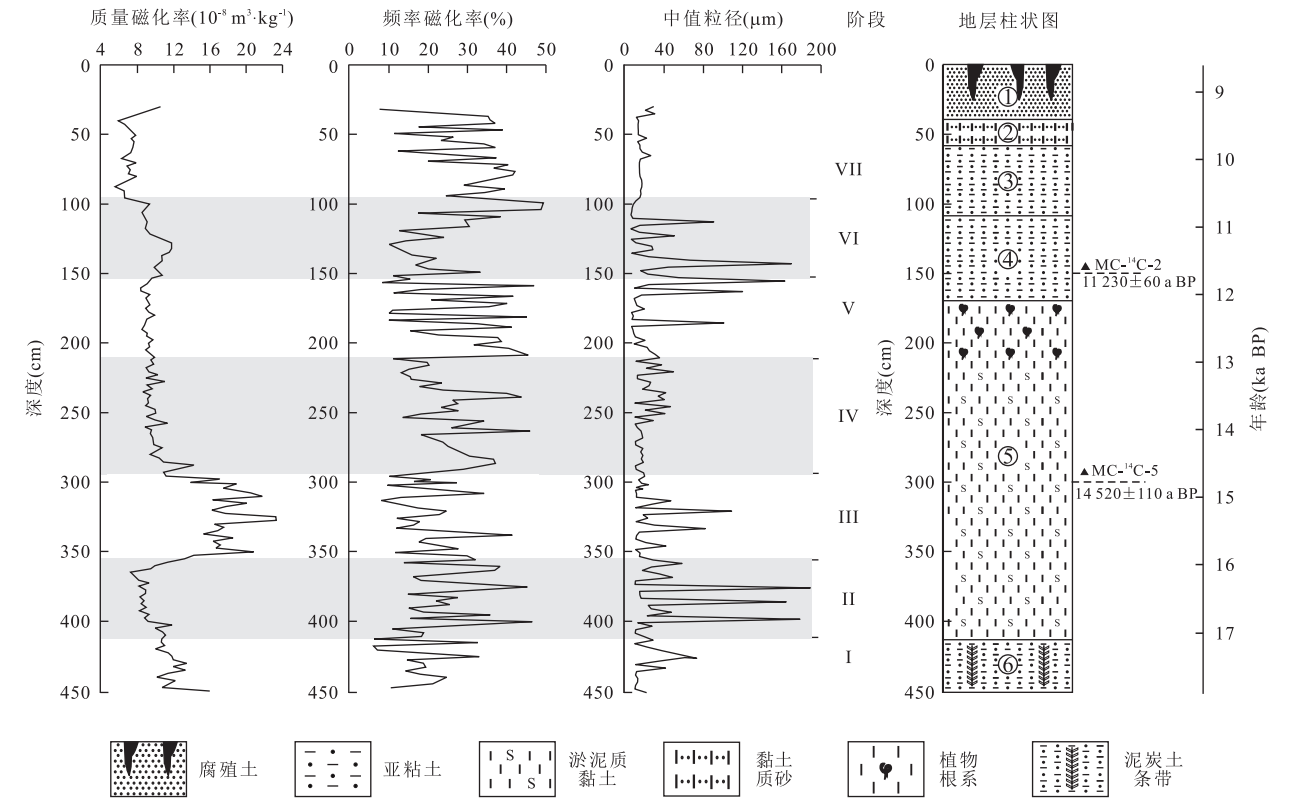


图 2 麻城剖面质量磁化率、频率磁化率、平均粒径曲线及岩性柱状图

Fig.2 Depth-varying of mass susceptibility, frequency susceptibility, average particle size, and lithological column in Macheng profile

信度,我们还对样品利用捷克产的 KLY-3S 进行了体积磁化率测试,两者吻合很好。

2 实验结果分析

2.1 磁化率及频率磁化率特征对古气候环境指示

磁化率(χ)反映了沉积物中磁性矿物种类、含量和磁颗粒的总体水平(Collinson,1983).磁化率作为表征物质磁学特征的物理量,可用于推断沉积物沉积时的环境条件、分析古气候的变化规律及其细节,为古气候、古环境研究提供可靠的磁学证据.近年来的研究表明(朱立平等,2001),当湖泊沉积具有稳定物源且连续发生时,其磁学指标能够反映沉积时形成磁性矿物的氧化还原条件.一般来讲,暖湿环境产生氧化条件,有利于磁性矿物等形成与聚集,冷干环境则产生还原条件,使得强磁性矿物向弱磁性矿物转化、磁性矿物向非磁性矿物转化.在盆地边缘湖沼相以及小的积水洼地发育地带的沉积物,磁化率高值,与沉积物粒度粗颗粒含量较高对应,指示了相对暖湿的降水增加的气候环境.磁化率的低值,与

沉积物粒度细颗粒含量较高对应,指示了相对干冷降水减少的气候环境.尤其频率磁化率对微弱的古气候波动反应更为敏感,可以作为反映古气候变化的灵敏指标(刘秀铭等,1990;王苏民等,1997;卢升高,2000;Zhang *et al.*,2012).因为,频率磁化率(系数)对样品中超顺磁性颗粒($d<0.03\ \mu\text{m}$)的含量变化比较敏感.不同气候条件下形成的超顺磁性颗粒的相对含量反映了古气候暖湿程度和降水的强弱.在水成沉积物中,当气候温暖湿润降水增多时,水动力较强,沉积物颗粒变粗,细粒的铁磁性矿物含量减少,导致频率磁化率值变小.反之,频率磁化率(系数)会随之增大.

2.2 麻城剖面沉积物磁学特征及古气候环境意义

根据野外岩性观测和磁化率、频率磁化率曲线的旋回波动变化特点,可将麻城剖面划分为 7 个不同的阶段(图 2).根据第四纪沉积物磁化率特征的古气候意义(安芷生等,1990;刘秀铭等,1990;吴瑞金,1993;Liu *et al.*,2012),其分别对应着 7 个不同的气候环境阶段.为了分析不同阶段磁化率及频率磁化率变化情况,对各阶段的磁化率及频率磁化率特征及反映的古气候环境特点进行了统计分析(表 1).下

面将对这 7 个阶段的磁化率及频率磁化率变化特点和古气候环境变化规律进行讨论。

2.2.1 第 I 阶段 对应深度为 412.5~450.0 cm, 年龄为 17.07~17.9 ka BP. 从总体上看频率磁化率上下波动变化较明显, 质量磁化率变化较小, 两者曲线变化规律为负相关特点(图 2). 该段的频率磁化率最大值为 33.03%, 最小值为 5.35%, 平均值为 17.09%, 标准差为 8.497. 基本上为本剖面的最小值阶段和数据变化范围比较大的段. 而从图 2 和表 1 来看, 质量磁化率却是本剖面中平均值较大的段, 其质量磁化率最大、最小和平均值分别为 13.57×10^{-8} 、 10.05×10^{-8} 和 $11.60 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. 这与频率磁化率的平均值总体偏高的结果是一致的. 该段总的来说质量磁化率平均值较大, 而频率磁化率的平均值却为剖面的最小值. 且该段岩性为灰褐色亚黏土、沉积物比较偏细. 由此可推测这一阶段总的来说为气候比较偏温湿, 降水较多, 是沉积环境比较稳定的时期.

2.2.2 第 II 阶段 对应深度为 352.5~410.0 cm, 年龄为 15.742~17.015 ka BP. 由图 2 可见, 该阶段的磁化率值比较稳定并具有逐渐变小的趋势. 而频率磁化率的值在该段波动幅度较大. 质量磁化率的平均值为 $9.38 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 为整个麻城剖面中的较小值. 其标准差为 1.194, 表明曲线变化比较稳定. 频率磁化率平均值为 25.5%, 标准差 11.92, 较阶段 I 明显增大. 相比第 I 阶段, 本阶段具有质量磁化率值在减小、频率磁化率值在增大的变化趋势, 推断此时的气候具有逐渐转冷、降水减少的趋势. 但粒度分析显示该层段平均粒径却为全剖面的比较粗的层段, 且粒度曲线波动很大(图 2), 表明虽然降水减少, 但强降水引发的洪水事件却经常发生, 导致磁化率曲线和平均粒径波动较大, 磁化率和频率磁化率

的方差值都较大.

2.2.3 第 III 阶段 对应深度为 297.5~350.0 cm, 年龄为 14.525~15.687 ka BP. 该阶段不论是质量磁化率曲线, 还是频率磁化率曲线的波动幅度均为本剖面较大的(图 2). 质量磁化率的平均值为 $18.33 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 标准差为 2.332, 均为全剖面的最大值. 频率磁化率平均值为 18.73%, 标准差 8.23, 基本上为全剖面的最小值. 频率磁化率量值的减少表明沉积物中粗颗粒磁性成分增多, 细颗粒磁性成分减少. 由此笔者认为, 该阶段沉积时气候为全剖面的最温暖湿润时段, 雨水丰沛, 沉积环境极不稳定, 并常有洪水发生. 沉积物平均粒径的波动变化也支持了上述推断.

2.2.4 第 IV 阶段 对应深度为 210.0~295.0 cm, 年龄为 12.643~14.469 ka BP. 质量磁化率平均值($9.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)和标准差(0.75)较上阶段均明显变小, 磁化率曲线波动较小(图 2). 频率磁化率的平均值(23.97%)和标准差(9.12)较上阶段却明显增大, 频率磁化率曲线波动幅度较大, 但波动的频率却明显变低(图 2). 这种“质量磁化率变小, 频率磁化率增大”的特点说明当时气候具有温暖向干冷、降水减少的方向发展的趋势. 沉积环境较上阶段趋于稳定, 沉积物中细颗粒磁性成分明显增多, 因此平均粒径在该阶段明显变细. 这与野外观察到的沉积物岩性以黏土为主的现象也是一致的.

2.2.5 第 V 阶段 对应深度 160.0~205.0 cm, 年龄 11.481~12.588 ka BP. 磁化率曲线变化较上阶段要稳定, 波动很小, 标准差为 0.43, 为全剖面的最小值. 质量磁化率平均值为 $9.22 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 较上阶段变化不大. 频率磁化率为 28.4%, 与阶段 IV 相比略有增加, 但幅度不大. 频率磁化率的标准差为 14.01, 为全剖面的最大值, 反映细颗粒磁性成分含量在剖

表 1 麻城剖面不同阶段磁化率和频率磁化率统计

Table 1 Statistics on magnetic susceptibility and frequency susceptibility in different phases in Macheng profile

阶段	深度(cm)	年龄(a BP)	质量磁化率($10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)				频率磁化率(%)				气候环境
			最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差	
VII	30.0~95.0	8 604~10 043	5.76	8.14	7.15	0.66	9.93	41.49	30.11	9.99	气候干冷, 降水减少
VI	100.0~157.5	10 153~11 426	8.71	11.88	10.05	1.07	7.50	31.82	18.77	8.70	气候有所转暖, 降水有所增多
V	160.0~210.0	11 481~12 588	8.6	10.11	9.27	0.43	7.94	46.83	29.23	14.01	气候寒冷, 降水减少
IV	212.5~295.0	12 643~14 469	8.74	9.77	9.89	0.75	10.00	46.47	23.97	9.12	气候温暖, 降水减少
III	297.5~350.0	14 525~15 687	14.17	23.39	18.33	2.33	6.75	39.97	18.73	8.23	气候温暖, 降水增多, 环境不稳定, 频发洪水
II	352.5~410.0	15 742~17 015	7.46	12.00	9.38	1.19	10.02	50.35	25.50	11.92	气候偏冷, 降水减少, 但环境不稳定, 洪水频发
I	412.5~450.0	17 070~17 900	10.05	13.57	11.60	1.073	5.35	33.03	17.09	8.49	气候比较温湿, 降水较多

面中变化较大,粒度分析得到平均粒径变化较大,由图2可见频率磁化率与粒度曲线波动都较大.上述特点说明此阶段气候环境总体上继承了上阶段的气候环境变化特点,即气候在逐渐变冷、降水在逐渐减少,沉积环境在逐渐趋于稳定,但其间伴有短暂的暖事件发生.

2.2.6 第Ⅵ阶段 对应深度100.0~157.5 cm,年龄10.153~11.426 ka BP.该阶段的磁化率曲线较上阶段变化幅度有所增强,但变化的频率明显变慢.磁化率值具有“逐渐变大—逐渐变小”的变化规律.质量磁化率平均值为 $10.05 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,标准差为1.068,较上阶段有所增大.频率磁化率平均值为18.77%,为剖面的较小值阶段.表明该层段具有沉积物中细颗粒的磁性物质含量在减少而粗颗粒磁性物质含量在增加的特点.另外,平均粒径也具有粒径较上阶段明显变粗、平均粒径的曲线波动较上阶段有所增强的特点.据此,推断此时段该区的气候已经在逐渐转暖,降水也逐渐在增多,洪水事件频发,导致沉积物中粗颗粒的磁性成分在逐渐增多.

2.2.7 第Ⅶ阶段 对应深度为30.0~100.0 cm,年龄为8.604~10.043 ka BP.该阶段的质量磁化率均值为 $7.15 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,频率磁化率均值为30.11%,它们分别为全剖面的最小值和最大值(表1).曲线比较稳定,波动较小(图2),磁化率的标准差为0.66,为剖面7个阶段中较小的一个.上述特点反映此时沉积环境比较稳定,气候比较干冷,随着降水减少,该沉积洼地积水逐渐干枯,沉积剖面逐渐暴露于地表.该阶段沉积物主要岩性为亚黏土和黏土质砂,顶部含有植物根系,沉积物中粗颗粒明显减少,细颗粒成分明显增加.

总体看来,麻城剖面的磁化率变化大致反映了江汉平原东北缘末次盛冰期晚期至全新世早期的气候波动变化过程.与全球(Stuiver *et al.*, 1995)及邻区湖北神农架大九湖泥炭剖面(Ma *et al.*, 2008)对比发现,其中第Ⅰ阶段—第Ⅱ阶段大致相当于末次盛冰期晚期;第Ⅲ阶段—第Ⅳ阶段大致为博令—阿勒罗德(Bolling-Allerod)暖期;第Ⅴ阶段为新仙女木(Younger Dryads)冷期;第Ⅵ阶段可能表明该区进入了冰后期.由于测年数据偏少,可能在时间对比上有一定的偏差.

3 结论及讨论

(1)麻城剖面沉积物粒度的粒径总体较细,野外

观察其岩性自下向上依次为淤泥质黏土、夹有砂层的黏土、亚黏土—砂层、黏土质砂,中间有植物根系发育.为泛滥平原中的浅湖相、沼泽相沉积.

(2)麻城剖面沉积物磁性物质含量总体较低,平均值为 $10.85 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,除第Ⅲ阶段(297.5~350.0 cm),年龄(14.525~15.687 ka BP)的磁化率曲线波动变化大外,其他阶段的质量磁化率值变化都不大,为 $5.76 \times 10^{-8} \sim 13.57 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,曲线变化比较平稳.但该剖面的频率磁化率曲线却变化频繁、波动幅度较大,其值为5.35%~50.35%,平均值为24.71%.较高的频率磁化率值表明该剖面沉积物中具有较高的超顺磁性颗粒含量.

(3)剖面磁化率与平均粒径具有明显的正相关特点,磁化率高值与平均粒径的粗粒径相对应,这与洪水发生时周围的粗颗粒与磁性矿物的补给有关,该特点可作为该区古洪水识别的标志.

(4)根据磁化率、频率磁化率和平均粒径曲线的旋回波动特点,将该区划分为7个不同的古气候环境演化阶段.结合年代学测试结果,初步认为该区晚更新世以来沉积环境经历了由湖沼相沉积—湖相沉积—泛滥平原中的沼泽沉积的变化,气候经历了温湿—干冷—暖湿—干凉—干冷—温湿—干(旱)偏冷的阶段性变化过程,与晚更新世晚期以来全球气候的变化特点具有较好的一致性.

致谢:研究生赵举兴、许应石参与了野外样品的采集和整理,郭洁,熊友亮,田单,江华军,李启文,张增杰参与了样品的整理和测试.在此表示感谢.

References

- An, Z. S., Porter, S., Kukla, G., et al., 1990. Magnetic Susceptibility Evidence of Monsoon Variation on the Chinese Loess Plateau about 130 ka Ago. *Chinese Science Bulletin*, 35(7): 529—532 (in Chinese).
- Collinson, D. W., 1983. *Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism*. Chapman & Hall, London, 21—33. doi:10.1007/978-94-015-3979-1
- Fang, X. M., Li, J. J., Banerjee, S., et al., 1998. Environmental and Rock Magnetic Studies of Rapid Fluctuations of Asian Summer Monsoon during the Last Interglacial Maximum (MIS 5e). *Chinese Science Bulletin*, 43(21): 2330—2332 (in Chinese).
- Heller, F., Liu, T. S., 1984. Magnetism of Chinese Loess Deposits. *Journal of Geophysical Research*, 77: 125—141.
- Heller, F., Liu, T. S., 1986. Palaeoclimatic and Sedimentary

- History from Magnetic Susceptibility of Loess in China. *Geophysical Research Letters*, 13(11):1169—1172. doi: 10.1029/gl013i011p01169
- Liu, Q. S., Roberts, A. P., Larrasoana, J. C., et al., 2012. Environmental Magnetism: Principles and Applications. *Reviews of Geophysics*, 50(4): RG4002. doi: 10.1029/2012rg000393
- Liu, X. M., Liu, D. S., Heller, F., et al., 1990. Frequency-Dependent Susceptibility of Loess and Quaternary Paleoclimate. *Quaternary Sciences*, 10(1): 42—50 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Liu, D. S., Shaw, J. S., 1993. Magnetic Mineral Characteristics of Chinese Loess and Its Palaeoclimatic Significance. *Quaternary Sciences*, 13(3): 281—287 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. G., 2000. Relationship between Frequency Magnetic Susceptibility and Ferrimagnetic Mineral Grain Size in Soils and Its Environmental Implications. *Journal of Basic Science and Engineering*, 8(1): 9—15 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. M., Zhu, C., Zheng, C. G., et al., 2008. High-Resolution Geochemistry Records of Climate Changes since Late-Glacial from Dajiuhu Peat in Shennongjia Mountains, Central China. *Chinese Science Bulletin*, 53(S1): 28—41. doi: 10.1007/s11434-008-5007-6
- Stuiver, M., Grootes, P. M., Braziunas, T. F., 1995. The GISP2 $\Delta^{18}\text{O}$ Climate Record of the Past 16 500 Years and the Role of the Sun, Ocean, and Volcanoes. *Quaternary Research*, 44(3): 341—354. doi: 10.1006/qres.1995.1079
- Wang, S. M., Xue, B., Xia, W. L., 1997. Lake Record of Climatic Change in the Past 2 000 Years of Ximen Cu (Lake). *Quaternary Sciences*, 17(1): 62—69 (in Chinese with English abstract).
- Wu, R. J., 1993. Magnetic Susceptibility (χ) and Frequency Dependent Susceptibility (χ_{fd}) of Lake Sediments and Their Paleoclimatic Implication—The Case of Recent Sediments of Qinghai Lake and Daihai Lake. *Journal of Lake Sciences*, 5(2): 128—135 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Zhou, Y., et al., 2012. Frequent Magnetic Susceptibility Characteristics of the Wushan Loess and Its Paleoclimatic, Paleoenvironmental Significance in Wushan Area. *Near-Surface Geophysics and Environment Protection*. Science Press USA Inc., Changsha, 409—413.
- Zhu, L. P., Chen, L., Zhang, P. Z., et al., 2001. Cold/Warm Fluctuations of the Last 1 300 Years Reflected by Environmental Magnetism in the Chencuo Area, Southern Tibet. *Quaternary Sciences*, 21(6): 520—527 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Li, C. J., Wu, H. N., et al., 1994. Magnetic Properties of Chinese Loess and Its Paleoclimatic Significance. *Science in China (Series B)*, 24(9): 992—997 (in Chinese).

附中文参考文献

- 安芷生, Porter, S., Kukla, G., 等, 1990. 最近 13 万年黄土高原季风变迁的磁化率证据. *科学通报*, 35(7): 529—532.
- 方小敏, 李吉均, Banerjee, S., 1998. 末次间冰期 5e 亚阶段夏季季风快速变化的环境岩石磁学研究. *科学通报*, 43(21): 2330—2332.
- 刘秀铭, 刘东生, Heller, F., 等, 1990. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换. *第四纪研究*, 10(1): 42—50.
- 刘秀铭, 刘东生, Shaw, J., 1993. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义. *第四纪研究*, 13(3): 281—287.
- 卢升高, 2000. 土壤频率磁化率与矿物粒度的关系及其环境意义. *应用基础与工程科学学报*, 8(1): 9—15.
- 王苏民, 薛滨, 夏威夷, 1997. 希门错 2 000 多年来气候变化的湖泊记录. *第四纪研究*, 17(1): 62—69.
- 吴瑞金, 1993. 湖泊沉积物的磁化率、频率磁化率及其古气候意义——以青海湖、岱海近代沉积为例. *湖泊科学*, 5(2): 128—135.
- 朱立平, 陈玲, 张平中, 等, 2001. 环境磁学反映的藏南沉错地区 1 300 年来冷暖变化. *第四纪研究*, 21(6): 520—527.
- 朱日祥, 李春景, 吴汉宁, 等, 1994. 中国黄土磁学性质与古气候意义. *中国科学(B 辑)*, 24(9): 992—997.