

doi:10.3799/dqkx.2011.080

武汉天兴洲近代沉积物的磁性特征及其环境意义

李永涛¹, 顾延生^{2,3}, 曲 赞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(武汉)生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 利用多磁性参数(包括质量磁化率、频率磁化率、饱和等温剩磁、退磁系数以及热磁曲线)及磁组构分析, 以长江中游武汉天兴洲近代河流沉积物为研究对象, 探讨了近100年以来沉积物磁性参数变化特征及其对长江中上游水文变化及气候环境的指示。结果表明, 上部组合带(0.60~1.50 m)和下部组合带(2.40~3.30 m)沉积物的磁性载体以亚铁磁性矿物磁铁矿为主, 同时存在少量较稳定的不完整反铁磁性物质, 中部(1.50~2.40 m)亚铁磁性矿物相对较少, 且剖面上部沉积物的超顺磁(SP)颗粒对沉积物 χ 贡献较大。整个沉积剖面自下而上磁性矿物含量呈“C”字型变化, 反映了“软”-“硬”-“软”的磁性特性。沉积物磁组构组合带研究显示, 历史时期沉积环境水动力强度、颗粒排列有序化程度以及长江流速发生了明显的变化, 沉积环境水动力强度经历了“不稳定”-“稳定”-“不稳定”的变化过程, 反映了长江古水文状况的变化。近代沉积物磁性特征变化格局与1900年以来长江中上游“暖湿”-“温凉”-“暖湿”气候环境变化和“强降水”-“弱降水”-“强降水”以及长江汉口站流量变化过程相吻合。这一研究成果为深刻认识历史时期长江流域气候环境变迁及其对长江古水文和沉积环境的影响提供了重要的参考资料。

关键词: 沉积物; 环境磁学; 磁组构; 地球物理。

中图分类号: P736.21

文章编号: 1000-2383(2011)04-0779-10

收稿日期: 2010-10-25

Magnetic Properties of Recent Sediments at Tianxing Centralshoal of Wuhan: Implication for Sedimentary Environment Change in the Middle Reaches of the Yangtze River

LI Yong-tao¹, GU Yan-sheng^{2,3}, QU Zan¹

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

2. Key Laboratory of Geobiology and Environmental Geology (China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China

3. Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution & Ecological Restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Multi-proxy of environmental magnetism (such as mass susceptibility, frequency dependent susceptibility, saturation isothermal, demagnetizing factor and thermalmagnetic curve) and magnetic fabric parameters derived from the recent sediments at Tianxing Centralshoal of Wuhan are employed to reconstruct the history of paleo-hydrology and climate changes in the mid-upper reaches of the Yangtze River. The assemblage zones of multi-proxy of environmental magnetism indicate that both upper (0.60–1.50 m) and lower (2.40–3.30 m) zones are dominated by the ferromagnetic magnetite. The upper zone is marked by the superparamagnetic grains, which make greater contributions to the mass susceptibility. The percentage of antiferromagnetic minerals in the middle zone (1.50–2.40 m) increases in inverse proportion to the percentage of the ferromagnetic. Therefore, the depth variation of the magnetic mineral contents is like letter C reflecting the magnetic characteristics of “SOFT”, “hard” and “SOFT” throughout the section. The analysis on the magnetic fabric parameters demonstrates that hydrodynamic intensity of sedimentary environment, ordering degrees of particle arrangement, and flow velocity of the Yangtze River have undergone significant changes in the past 100 years, which is related to the paleo-hydrological change of the Yangtze River. Variation patterns of magnetic properties in the recent sediments are consistent with the climate change and discharge change at Hankou Station. Especially, hydrodynamic intensity of sedimentary environment has changed from unstable to stable, then unstable, cor-

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41072261, 40872202, 40771213); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. CUG090103).

作者简介: 李永涛(1961-), 男, 高级工程师, 主要从事地球物理学和环境磁学研究。E-mail: ytli@cug.edu.cn

responding to the temperature and precipitation changes from hot-wet to cool-dry and hot-wet. Our research has provided significant evidence for further understanding the influence of climate change on the paleo-hydrology and sedimentary environment of the Yangtze River in the historical period.

Key words: sediments; environmental magnetism; magnetic fabric parameters; geophysics.

第四纪沉积物中磁性矿物的来源分两类,即外源和内源.以陆源碎屑物形式从外界输入环境系统的磁性物质称为外源物质,主要输入途径为全球或局部的生物地球化学循环过程,具体表现为大气降尘和径流.大气降尘主要有火山灰、尘土、宇宙尘埃和人类活动释放的大气污染物等;径流带入的主要有流域内母岩风化碎屑物与地表土壤等.外源组分可以反映周围环境条件及人类活动影响,通过沉积物的磁性特征的垂向变化往往可以追溯流域沉积环境变迁历史.内源磁性矿物指“原生”铁或含铁矿物在物质形成及次生变化过程中通过化学或生物作用形成的次生磁性矿物(Thompson and Oldfield, 1986),土壤成土作用和沉积物的早期成岩作用是内源磁性物质形成的 2 个主要过程(Hilton *et al.*, 1986).环境磁学在构建不同时间尺度下的全球气候环境演化以及现代环境污染监测等方面发挥了不可替代的作用(Yang *et al.*, 2007, 2009a, 2009b, 2010; Liu *et al.*, 2009; 刘青松和邓成龙, 2009).沉积物的磁性特征由于直接反映的是磁性矿物的含量、类型和颗粒大小等信息,这些参数往往是沉积物物源、搬运和沉积动力以及沉积后次生变化等直接作用的结果,因而间接地反映了气候和人类活动的信息(张卫国等, 2007).研究表明,黄土、湖泊沉积物的磁性特征不仅可以用来进行地层对比,而且还是古环境变化的代用指标(胡守云等, 2001).然而,利用河流沉积物磁性特征进行物源识别、沉积环境信息提取和环境污染评价仍是目前环境磁学的重要研究领域之一(王辉等, 2008).

长江作为我国第一大河流,水系发育,支流众多,每年携带大量泥沙入海,年平均值达到 4.6×10^8 t(王中波等, 2006).因此,长江干流武汉段拥有众多江心洲的沉积物,是研究长江干流水文以及沉积环境变迁的良好载体.前人曾对长江干流河床沉积物的磁性特征进行过探讨(王中波等, 2007; 王辉等, 2008),但对于不同历史时期长江河道江心洲沉积物的研究相对较少.本文以长江中游武汉段天兴洲近代沉积物为研究对象,通过沉积物剖面的垂向系统采样以及环境磁学研究,分析天兴洲沉积物中磁性矿物的类型、含量及其空间分布特征,探索长江干流古水文特征以及物

源区气候环境变化的磁学记录.

1 天兴洲沉积环境背景简介

位于长江中游武汉段的天兴洲,是长江最大的江心洲之一.它四面环江,北对汉口谏家矶,南临青山工业区,距岸最近处为 700 m,系近代长江流向由北东转向南东时流速减缓、泥沙淤积而成的江心洲(图 1).天兴洲面积约 26 km^2 ,东西长 13 km,南北宽 2 km.天兴洲沉积物记录了不同历史时期长江上游沙源区的磁性特征和长江水文状况的变化,是研究沉积物物源、搬运迁移、沉积动力以及沉积后次生变化等沉积环境特征的理想载体.

2 样品采集与实验方法

天兴洲将长江河道分为南北两汉,样品采集地点位于天兴洲南汉侧, GPS 为 $30^\circ 40' 45'' \text{N}$ 、 $114^\circ 26' 48'' \text{E}$ (图 1).

沉积物主要为第四系全新统冲积相地层,为长江中上游泥沙沉积.岩性以较细颗粒的泥砂为主,沉积剖面上部为粉砂质粘土夹细砂层,中、下部为粘土质粉砂夹粉、细砂层(表 1).由于江水的冲刷,临江地层经常发生垮塌,形成多处新鲜的沉积地层露头,

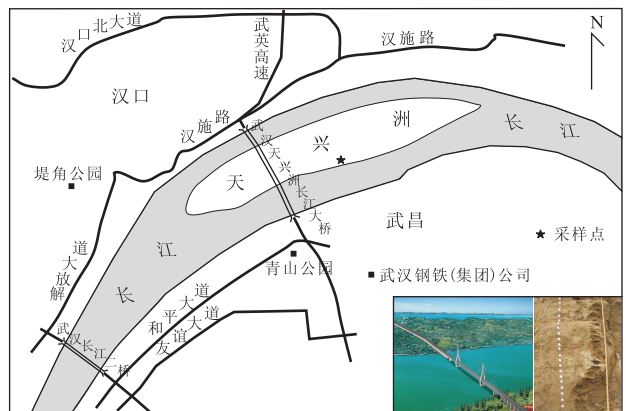


图 1 长江中游武汉天兴洲地理位置及采样地点分布
Fig. 1 Map showing the sampling site at the Tianxing Centralshoal of Wuhan, the middle reaches of Yangtze River

表1 长江中游武汉天兴洲采样剖面A岩性

Table 1 Lithology description of sampling section A at the Tianxing Central Shoal of Wuhan, the middle reaches of Yangtze River

分层	岩性	采样点数/样品数	深度(m)	层厚(m)
①	耕土	1/3	0.20~0.60	0.40
②	粉砂质粘土	6/18	0.60~0.95	0.35
③	粘土质细砂	6/17	0.95~1.25	0.30
④	粉砂质粘土	8/19	1.25~1.65	0.40
⑤	粉细砂	3/9	1.65~1.85	0.20
⑥	粘土质粉砂	2/6	1.85~1.95	0.10
⑦	粉细砂	14/40	1.95~2.65	0.70
⑧	粘土质粉砂	14/39	2.65~3.30	0.65

剖面厚度一般在3 m以上(自洲地平面至江水面)。本次采样时间为2009年4月,此时水面较低,有利于样品采集。

样品采集于2条相邻的平行剖面,剖面A用于环境磁学研究,深度3.30 m,以5 cm间隔连续采集54个样品。采样时用塑料小铲取其中央未受干扰的原始沉积物,分别置入可密封的聚乙烯塑料袋中,用于室内磁性参数测试;剖面B用于磁组构研究,剖面深度为2.85 m,该剖面采集的样品为定向样品,由于沉积物较软,用标有方向的 $\Phi 2.5 \times 2.2 \text{ cm}^3$ 无磁塑料盒直接作定向采集,以5~10 cm间隔采集33组样品,经密封后送实验室测试。

样品磁参数测试主要在中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院岩石磁学实验室完成。用于环境磁学研究的样品,在实验室测试前采用自然风干,过1 mm筛后,再装入体积为 $\Phi 2.5 \times 2.2 \text{ cm}^3$ 的无磁塑盒中进行磁性测量。质量磁化率(χ)和磁组构参量(κ_1 、 κ_1 、 κ_1 轴)测量使用捷克产的KLY-3S型卡帕桥和1‰电子天平;低频磁化率(0.47 kHz)和低频磁化率(4.7 kHz)的测量使用Bartington公司生产的MS2B频率磁化率仪;使用美国ASC公司IM-10-30型脉冲磁化仪和DSM-2旋转磁力仪测量等温剩磁IRM和在1 T磁场下获得的饱和等温剩磁SIRM;一部分SIRM样品在其反方向依次加-20 mT, -100 mT和-300 mT磁场获得相应等温剩磁 $IRM_{-x\text{mT}}$,另一部分使用GSD-5交变退磁仪进行全区间逐步退磁。经测试,可分别计算出样品的质量磁化率 χ 、频率磁化率 $\chi_{\text{fd}}\% = (\chi_{\text{lf}} - \chi_{\text{hf}}) / \chi_{\text{lf}} \times 100$ 、软剩磁SOFT($SOFT = [SIRM - IRM_{-20}] / 2$)、硬剩磁HIRM($HIRM = [SIRM - IRM_{-300}] / 2$)、退磁参数 $S_{-20 \text{ mT}}$ 、 $S_{-100 \text{ mT}}$ 和 $S_{-300 \text{ mT}}$ ($S_{-x\text{mT}} = [SIRM - IRM_{-x\text{mT}}] / [2 \times SIRM] \times 100$)(王辉等,

2008),以及各比值参数如 $SIRM/\chi$ 、饱和交变退磁 $IRM/SIRM$ 、 $SIRM - \chi_i$ 、 $SIRM-SOFT$ 相关性等。除此之外,典型样品还在KLY-4S卡帕桥及其CS3温控系统上进行磁化率随温度变化曲线的测量($\chi-T$ 实验),其最高加热温度达700 °C,为避免样品在高温状态下发生氧化反应,加热过程在氩气中进行, $\chi-T$ 实验在中国地质大学(北京)古地磁与环境磁学实验室完成。

3 结果分析

根据岩性和A剖面磁性特征的垂向变化,自上而下可将采样剖面的沉积分为4个磁性组合带(图2),即组合带I(0~0.60 m)、组合带II(0.60~1.45 m)、组合带III(1.45~2.40 m)和组合带IV(2.40~3.30 m),各组合带的磁性特征如下。

3.1 沉积物磁性矿物的含量

χ 和SIRM通常反映了样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿)的含量,与 χ 不同的是,SIRM不受顺磁性和抗磁性矿物的影响(Thompson and Oldfield, 1986;张卫国等,2007)。天兴洲沉积物磁性参数 χ 与SIRM的相关性略高(图3),说明主要由亚铁磁性矿物所贡献。HIRM是样品在300 mT磁场中磁化后所保留的剩磁与饱和等温剩磁的差值,指示不完整反铁磁性矿物的含量;SOFT是样品在20 mT磁场中磁化后所保留的剩磁,指示亚铁磁性矿物尤其是MD晶粒的含量。(Thompson and Oldfield, 1986;张卫国等,2007)。天兴洲沉积物磁性参数随深度的变化特征(图2a~2d)表明,组合带I沉积物由于为上覆耕土层, χ 、SIRM、HIRM和SOFT量值普遍较高,这与人类活动干扰有关,随着深度的加大,磁性参数量值逐步减小;组合带II的 χ 、SIRM变化基本一致,呈现逐步减小的趋势,但HIRM则呈相反增大的趋势,在1.48 m左右开始急剧减小。SOFT基本围绕主轴波动;组合带III的 χ 、SIRM量值继续减小,在2.20 m左右达到最低值。而HIRM波动较大,与 χ 、SIRM呈相反略有增大的变化。SOFT变化与 χ 、SIRM相同,在2.20 m左右也达到最低值;第IV层 χ 、SIRM开始由最低点增大,而HIRM和SOFT则围绕中心轴震荡。除上覆耕土层组合带I外,整个A剖面 χ 变化范围为 $19.34 \times 10^{-8} \sim 85.57 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $52.97 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。SIRM的变化范围为 $2.332 \times 10^{-6} \sim 11.233 \times 10^{-6} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值 $6.561 \times$

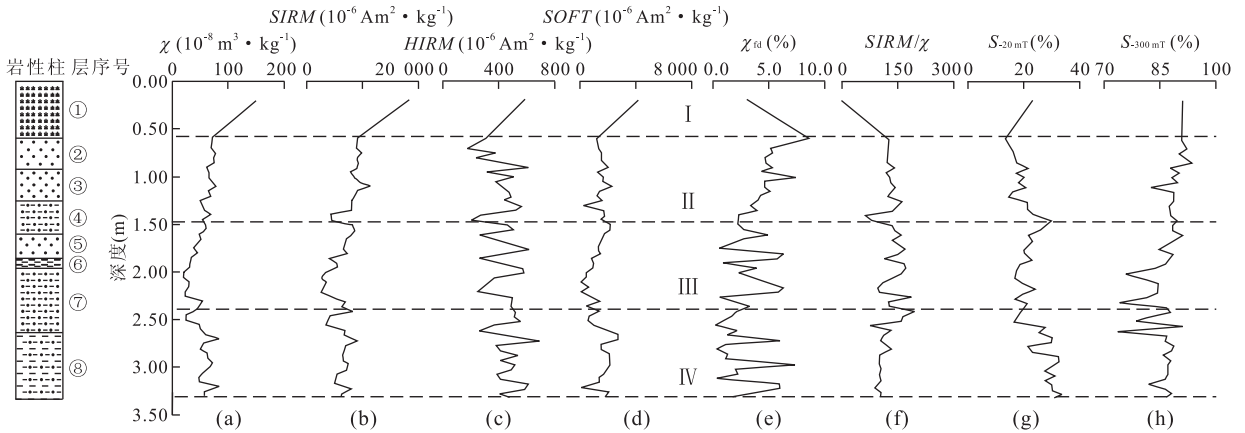


图 2 长江中游天兴洲沉积物 A 剖面磁性参数随深度变化特征

Fig. 2 Depth variation of magnetic parameters of sediments at the Tianxing Central Shoal of Wuhan, the middle reaches of Yangtze River

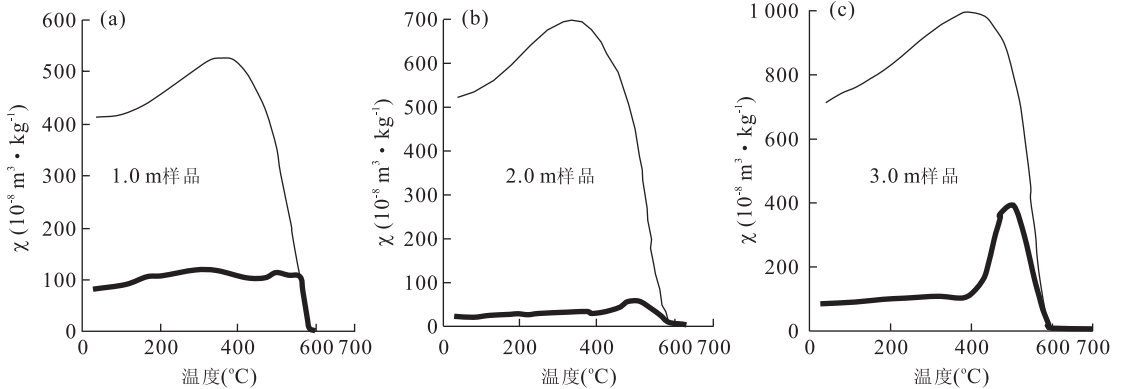


图 3 代表性样品的 χ - T 曲线

Fig. 3 χ - T variation curve of certain representative samples

粗(细)线分别代表加热(冷却)曲线

$10^{-6} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. 量值在剖面的上部和下部均较高,中间最低,呈现“C”字形分布的特征,说明沉积剖面在组合带 II、IV 两段磁性矿物含量较高,组合带 III 相对较低. $HIRM$ 的变化范围为 $24 \times 10^{-6} \sim 1453 \times 10^{-6} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值 $473 \times 10^{-6} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 除上覆耕土层外,围绕平均值附近波动,变化特征略与 χ 、 $SIRM$ 变化相反,指示样品中不完整反铁磁性矿物含量随 χ 、 $SIRM$ 的增大而减小. $SOFT$ 的变化范围为 $11.7 \times 10^{-6} \sim 4142 \times 10^{-6} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值 $1435 \times 10^{-6} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 除上覆耕土层外,总体变化比 $HIRM$ 平稳,表现为“软”磁性矿物的绝对含量比例较稳定. 组合带 III 出现了 $SOFT$ 剖面最低值,指示样品中亚铁磁性矿物含量较低.

3.2 沉积物磁性矿物的粒度变化特征

$\chi_{fd}\%$ 反映了超顺磁 (SP, 约 $< 0.03 \mu\text{m}$) 与单畴 (SD, $0.04 \sim 0.06 \mu\text{m}$) 界限附近的细粘滞性超顺磁

颗粒 (约 $0.03 \mu\text{m}$) 对磁化率的贡献 (王辉等, 2008), 可作为土壤中 SP 颗粒浓度的量度, 频率磁化率可以表示为 LF 值的百分比和质量频率磁化率两种形式, 本文采用百分比形式, 即 $\chi_{fd}\% = [(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}] \times 100\%$, 一般情况下, 粒径分布范围加宽, $\chi_{fd}\%$ 会减小 (王红强等, 2008). 图 2e 表明, 天兴洲沉积物频率磁化率随深度的变化曲线在 II 层位与 χ 和 $SIRM$ 随深度的变化曲线基本一致, 即 $\chi_{fd}\%$ 呈小幅震荡并逐步减少, 最大值为 8.6, 最小值为 2.0, 平均值为 4.53; 在 III、IV 沉积层位 $\chi_{fd}\%$ 波动幅度增大, 平均值分别为 3.37 和 2.49. 整个剖面自上而下超顺磁颗粒的含量在 II 层位较高, III 沉积层位次之, IV 沉积层位最小, 反映 SP 颗粒在剖面上部对沉积物的 χ 贡献较大, 表明在上部的沉积物形成过程中, 有许多次生的超顺磁性态铁磁性矿物形成, 即反映了此环境条件下超顺磁性颗粒的相对含量, 有较明确的环境

意义(卢升高等,1999).在IV层位 $\chi_{fd}\%$ 平均值 $< 3\%$,沉积物中SP颗粒对磁化率的贡献略小.

$SIRM/\chi$ 可用来粗略估计大于几十纳米的磁性颗粒的晶粒度(Thompson and Oldfield,1986).当磁性颗粒大于SP/SD边界时,该比值随着颗粒度的增大而减小.SP晶粒的特点是 χ 较高,而比值 $SIRM/\chi$ 较低.SP晶粒和SD晶粒混合体的比值 $SIRM/\chi$ 类似于MD晶粒.图2f反映磁颗粒粒度随深度变化的曲线,II~IV沉积层基本为震荡形式,反映磁颗粒粒度粗细程度不一,来回出现.但在IV沉积层位 $SIRM/\chi$ 逐步变小,反映剖面下部磁颗粒粒度逐渐变细.

$SIRM-\chi$ 的相关曲线指示了磁性矿物的变化,如果样品中存在多相磁性矿物,其 $SIRM-\chi$ 相关曲线呈散点分布,线性差;相反,如果样品中只有一种磁性矿物存在或者某一种磁性矿物的含量占绝对优势,即使磁性矿物颗粒发生变化,其相关曲线也呈一条直线;软剩磁SOFT则主要反映了亚铁磁性矿物的含量(王辉等,2008).天兴洲沉积物中 χ 和 $SIRM$ 的相关性较好($R^2=0.6274$), $SIRM$ 与SOFT的相关性较差($R^2=0.3093$),反映了 χ 的变化并非单一,存在多相磁性矿物,该结果与上述HIRM和SOFT的研究结果基本一致.

3.3 沉积物磁性矿物的类型

典型样品的磁化率随温度变化特征如图3所示,表示不同深度样品直接加热到 700°C 的 χT 曲线.剖面深度为1.0 m样品从室温至 580°C 之间磁化率随加热温度表现平稳,表明没有更多磁性较强的矿物形成,在 580°C 附近磁化率大幅降低到接近于零(图3a),显示出磁铁矿的居里温度.2.0 m样品和3.0 m样品在 $425\sim 500^\circ\text{C}$ 之间磁化率随加热温度急剧增加,表明有更多磁性较强的矿物形成,在 500°C 出现峰值,其中3.0 m样品,即位于第IV层,其磁化率随加热温度增加的幅度最大,磁化率的最大值为初始值的4倍(图3b、3c).从 $500\sim 600^\circ\text{C}$ 磁化率随加热温度的增加几乎呈线性下降,新生成的磁性矿物有可能是居里温度为 $450\sim 500^\circ\text{C}$ 的矿物,也可能是加热过程的中间产物;在 580°C 附近其磁化率大幅降低到接近于零(图3b、3c),显示出磁铁矿的居里温度.这个特征说明,在剖面上部天兴洲沉积物中主要的磁性矿物为亚铁磁性矿物磁铁矿,但由于位于III层2.0 m样品的磁化率随加热温度增加时峰值较小,也表明该层位亚铁磁性矿物磁铁矿含量较少.从 $600\sim 400^\circ\text{C}$ 的冷却过程中,磁化率呈现

了急剧增加的特点,磁化率的最大值为初始值的10倍,这表明样品中有磁性较强的新矿物生成.从 400°C 到室温的范围内磁化率表现为随温度的下降而缓慢下降,表明磁铁矿可能转变成弱磁性的赤铁矿.样品的冷却曲线形态明显高于加热曲线,表明是含铁矿物的热转变.

推断磁畴性质非常有用的方法之一是等温剩磁(IRM)的测量和交变磁场(AF)退磁实验(Worm and Banerjee,1987),单畴和多畴颗粒携带剩余磁性,后者容易被退磁,而前者不容易被退磁.

图4a和图4b分别表示样品在深度为1.0、2.0、3.0 m处的等温剩磁(IRM)获得曲线和交变磁场(AF)退磁曲线.曲线显示3样品饱和等温剩磁(SIRM)在低于1 T的外磁场中就达到饱和(图4a),表明了硬磁性矿物含量较低的存在.其中,剖面深度为1.0 m和3.0 m的样品(即II、IV层)比2.0 m样品(III层),更容易在一个相当弱的外磁场中达到饱和,其AF峰值也较低,表现出“较软”的磁性特性(图4b).而2.0 m样品表现“较硬”的磁性特性,单畴较多,这也与 $SIRM$ 的充磁曲线特征相一致.所以,沉积剖面磁性矿物表现为“软”-“硬”-“软”的磁性特性.

退磁系数 S_{-100} 和 S_{-300} 反映样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿)与不完整反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)的相对比例,它们随着不完整反铁磁性矿物的比例增加而下降(牛军利等,2008;王辉等,2008).除上覆耕土层外,在II层位 S_{-100} 和 S_{-300} 两参数变化较大, S_{-100} 随深度增大而增大,而 S_{-300} 则随深度增大而减小,在III、IV层位 S_{-100} 和 S_{-300} 两参数具有相似变化特征,呈“C”字形,显示了相对一致的磁性矿物组成(图2g、2h).可以看出大于95%出现在剖面II层位,小于95%则对应于III、IV沉积层位.表明经

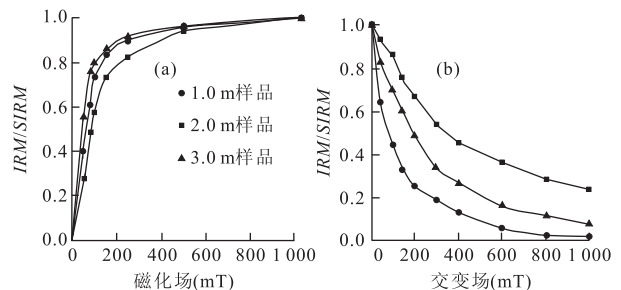


图4 代表性样品的SIRM充磁曲线(a)和AF退磁曲线(b)
Fig. 4 (a) SIRM charging magnetization curve of certain representative samples and (b) AF demagnetization curve of certain representative samples

—300 mT 磁场磁化后,在Ⅱ沉积层位样品所携剩磁已接近饱和,说明亚铁磁性矿物起主导作用,同时存在少量亚铁磁性矿物的贡献。而在Ⅲ、Ⅳ沉积层位,样品所携剩磁还未趋于饱和,此时,不完整反铁磁性矿物的比例相对有所增大,该特征也与上述他人的研究结果一致。

3.4 沉积物磁组构特征

磁组构是用磁化率量值椭球的形状与方向等参量来表示,通常用磁化率椭球体的 3 个主轴表示磁化率各向异性(AMS),即最大轴 $\kappa_{\max}(\kappa_1)$,中间轴 $\kappa_{\text{int}}(\kappa_2)$ 和最小轴 $\kappa_{\min}(\kappa_3)$ (朱日祥等,2001;张玉芬等,2009)。本文仅利用其中在沉积环境研究中较常见的磁组构参数进行探讨。

图 5 为长江中游天兴洲沉积物 B 剖面磁组构参数随深度的变化特征,根据其沉积物磁组构特征的垂向变化,自上而下可分为 3 个组合带,即组合带 I'(1.30~1.50 m)、组合带 II'(1.50~2.40 m)和组合带 III'(2.40~3.15 m)。该组合带的划分与上述 A 剖面的 I~IV 组合带具有较好的一致性,组合带 I'层对组合带 II 层,组合带 II'、III'分别对应组合带 III、IV。各组合带的磁组构特征如下。

磁化率各向异性度($P = \kappa_1 / \kappa_3$),反映沉积物中颗粒排列的有序化程度,受控于沉积动力的强度及稳定性,沉积动力强度高而稳定, P 值较大,反之, P 值较小。组合带 I'和 II' P 值波动幅度不大,围绕平均值震荡,量值大于 1.01,表明沉积物层中磁性颗粒的定向性较强。组合带 III'波动幅度较大,在

1.000~1.018 之间,说明在剖面底部沉积物的沉积动力强度及稳定性不一,颗粒排列的有序化程度有强有弱。磁线理度($L = \kappa_1 / \kappa_2$),反映沉积颗粒呈线状排列程度,受控于搬运介质流动方向的单一性及沉积动力强度,流体流动持续而稳定,颗粒排列有序度高,则 L 值大;反之, L 值小。组合带 I'、II' L 值波动幅度不大,围绕平均值震荡,与 P 值变化一致,表明沉积颗粒呈线状排列程度较稳定。但在 1.60 mL 参数出现较大的量值,表明搬运介质流动方向的单一性及沉积动力强度较强,颗粒排列有序度高。组合带 III'波动幅度较大,说明在剖面底部沉积物的沉积动力强度不稳定。磁面理度($F = \kappa_1 / \kappa_3$),反映沉积颗粒呈面状分布的程度, F 值大,沉积物中微层理构造发育得好; F 值小,反映微层理构造不发育,因而其量值大小取决于沉积动力强度及环境稳定状况。该参数在剖面中变化特征与上述参数一致,表明底部沉积颗粒呈面状分布的程度比组合带 I'、II'要大,介质流动环境不稳定。扁率($E = \kappa_2^2 / \kappa_1 \kappa_3$),反映磁化率量值椭球的形状, $E > 1$ 为压扁状, $E < 1$ 则为拉长的椭球。测量表明,整个剖面 E 值大于 1,表明磁化率量值椭球的形状为压扁状,在组合带 III'呈现由小增大的趋势,表明沉积动力可能较大,为非正常沉积。基质颗粒度 $Q = 2(\kappa_1 - \kappa_2) / (\kappa_1 + \kappa_2 - 2\kappa_3)$,反映沉积粒度的分选性,与沉积状态和介质能量衰减的幅度有关。一般 $Q < 0.5$ 时沉积物分选性好,代表能量缓慢衰减的正常沉积; $Q > 0.7$ 时沉积物分选性差,代表能量急剧衰减的事件沉

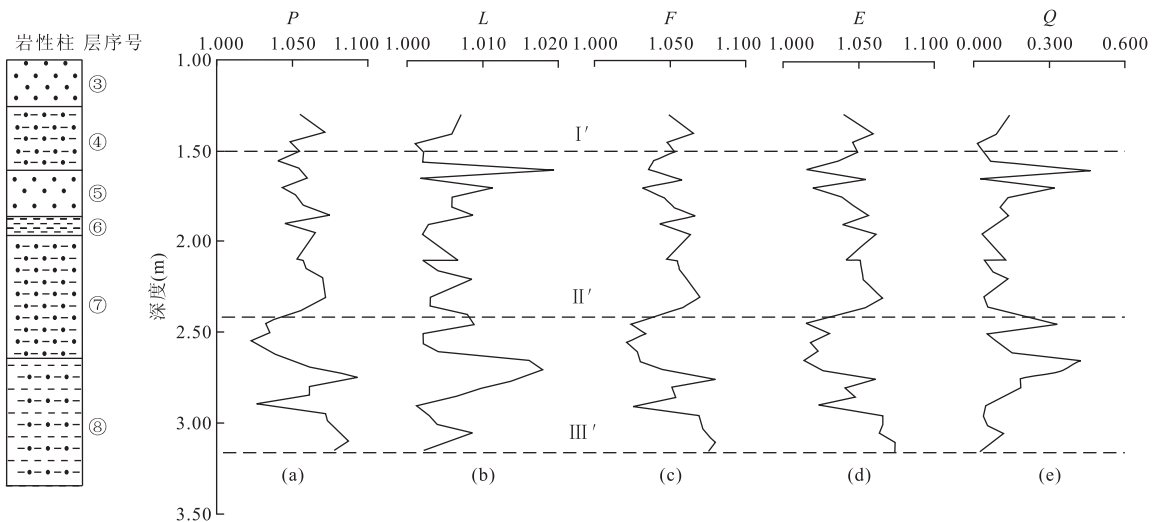


图 5 长江中游天兴洲沉积物 B 剖面磁组构参数随深度变化特征

Fig. 5 Depth variation of magnetic fabric parameters in the sediments at the Tianxing Centralshoal of Wuhan, the middle reaches of Yangtze River

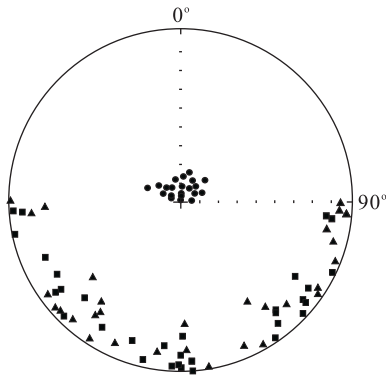


图6 长江中游天兴洲沉积物磁化率张量主方向的赤平投影
Fig. 6 Equatorial plane projection map of major direction of magnetic susceptibility tensor in the sediments at the Tianxing Centralshoal of Wuhan, the middle reaches of Yangtze River

方块、三角、圆点分别表示 κ_1 、 κ_2 、 κ_3 的主方向

积。由于剖面 Q 参数均小于 0.5, 说明整体颗粒分选性较好, 主要为动力强度稳定的沉积。

图6为 κ_1 、 κ_2 、 κ_3 轴的磁组构赤平投影图, 其主轴方向数据表明, κ_3 轴的倾角大多接近 90° , 其中大于 70° 的样品数占总数的 85%; κ_1 轴倾角普遍较低, 其中倾角小于 20° 的样品数占总数的 93%。 κ_3 轴主要分布在投影图的中心部位, 而 κ_1 轴主要分布在投影图的边缘。因此, 可以用这部分样品的 κ_1 、 κ_3 轴方向进行介质流动方向和沉积动力强度分析。

4 讨论

4.1 天兴洲近代沉积物磁性特征及其气候意义

长江上游流域, 地形复杂, 既受东南季风和西南季风影响, 又受青藏高原影响, 是气候变化的脆弱地区。每年夏半年, 特别是汛期, 旱涝、高温等气候灾害频繁发生(王辉等, 2008)。特别在全球变暖的气候背景下, 长江上游流域表现出不同的区域响应特征, 这将会对区域环境生态产生巨大的影响(王艳君等, 2005)。

剖面磁性特征的变化与沉积物的物源、沉积动力以及沉积后的次生变化等因素有关, 这些因素的变化往往又受气候、人类活动等所控制(王哲等, 2007)。研究剖面 A 沉积物磁性矿物的类型与含量、磁性矿物的粒度特征表明, 磁性组合带 II (0.6~1.5 m)、III (1.5~2.4 m) 和 IV (2.4~3.2 m) 的波动反映出长江上游曾经经历“暖湿”—“冷干”—“暖湿”的气候变化过程以及出现的“强降水”—“弱降水”—

“强降水”的降水天气, 指示出长江上游流域的气温、降水及灾害的变化特征。这是因为在长江上游, 特别是川西和青藏高原地区分布有大量中生代岩浆岩(杨守业等, 2007), 有的岩体含有大量的铁磁性矿物, 中下游以沉积岩发育为主, 长江上游岩石的铁磁矿物含量明显大于三峡以下各支流。上游带来的河流沉积物的磁性强于中下游地区河流沿岸带来的沉积物, 所以磁性强度呈现向河口下降趋势(王辉等, 2008)。因此, 长江上游气候的变化可引起河流沉积物磁性变化。

图7d为近80年来长江上游降水曲线(A)和温度曲线(B)(陈家其等, 2006), 从图中可以看出, 在近80年长江上游呈现出2次温暖湿润的强降水气候, 1次干冷的弱降水气候, 该气候的变化直接影响长江中下游沉积物的物源和特征。经有关资料查证, 长江中游天兴洲沉积物系19世纪的产物(周龙才和刘士和, 2005), 该沉积物磁性呈现的“C”字变化特征也与图7d中1900—1970年的长江上游降水曲线(A)和温度曲线(B)变化特征具有较好的一致性, 表明长江中游沉积物的物源与长江上游的气候环境关系密切。沉积物磁性的增强表明上游气候处在温暖湿润的强降水期。反之, 为干冷的弱降水期。等温剩磁(IRM)变化规律也显示其物源矿物具有“软”—“硬”—“软”的变化特征, 同样也指示长江上游气候的波动性。

所以, 影响长江中上游干流河底沉积物磁性差异的主导因素不仅与长江上游地区分布的大量中生代岩浆岩的物源有关, 也与来源于上游及长江支流的大量的铁磁性矿物(物源)不稳定性有关。由于受气候环境和一些大型水利工程的影响, 来源于长江上游的铁磁性矿物往往具有一定的波动变化特征, 具有反映古环境的意义。

4.2 天兴洲沉积剖面磁组构特征及其沉积环境意义

剖面磁组构变化特征表明, 组合带 II' (1.50~2.40 m) 表现为搬运介质流动方向单一, 沉积动力强度和流体流动持续而较稳定, 颗粒排列有序度较高。组合带 III' (2.40~3.15 m) 则与 II' 相反(组合带 I' 因剖面较短, 未作分析)。组合带 II'、III' 磁组构特征与组合带 III、IV 磁性参数特征相对应, 由此可以推断长江上游“温凉”—“暖湿”气候环境与天兴洲沉积环境水动力强度“稳定”—“不稳定”有关(图7)。

在一般流水的沉积环境中, 由于水动力的作用, 岩矿石颗粒的长轴有一定的趋向性, 当水的流动为

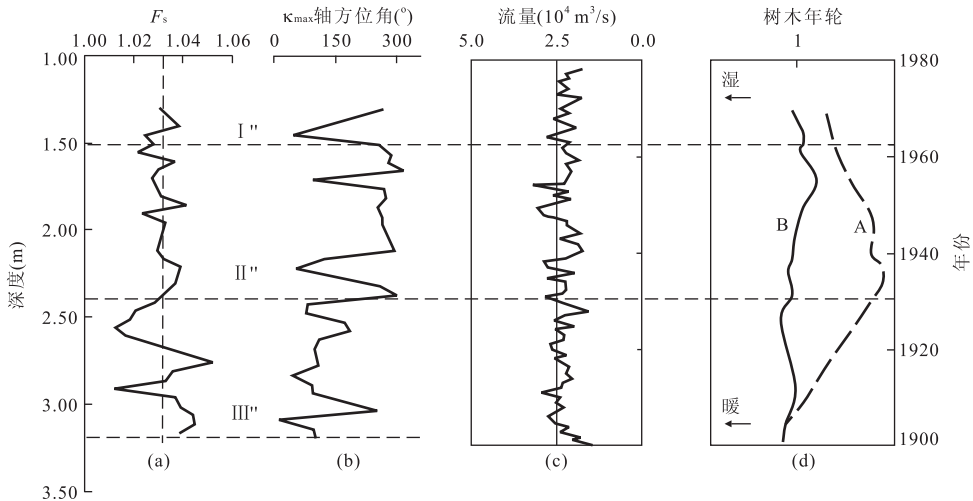


图 7 F_s 、 κ_1 轴方位角随深度的变化与汉口站流量(Chen *et al.*, 2001)和近 100 年长江上游降水(图 7d, A)与温度(图 7d, B)曲线(陈家其等, 2006)对比(图 7a 中虚线为现代流速)

Fig. 7 Azimuth angle variation of F_s and κ_1 axle with depth and its correlation with discharge volumes at Hankou station (from Chen *et al.*, 2001), and precipitation (Fig. 7d, A) and temperature (Fig. 7d, B) curves (from Chen *et al.*, 2006), in the upper reaches of the Yangtze River during the past 100 years (Dashed line in Fig. 7a represents current flow velocity)

中、低速时,其长轴与水流方向相一致,但水流为急速时,其长轴垂直于水流方向(阎桂林, 1996). Ellwood *et al.* (1979)对 Vema 海峡的深海沉积物的磁化率各向异性进行了大量研究,认为磁化率量值椭球的 κ_{\max} 轴向垂直与海底流流向,用 $F_s = \kappa_1 / (\kappa_2 \kappa_3)^{1/2} = P/F^{1/2}$ 参数可以反映海底流速的变化, F_s 参数对磁性颗粒长轴的方向定向性反映灵敏, F_s 值大,则长轴的定向性好,反映了此时河底流速较大,否则相对较小(阎桂林, 1996). 因此,沉积物的磁组构特征还具有指示水流方向和流速特征的作用.

长江中游天兴洲主河道最大流速为 3.06 m/s, 平均流速 2.70 m/s, 最大流量达 76 100 m^3/s , 最小流量为 4 830 m^3/s . 由于长江主河道流速较快,类似于大西洋等海底的流速特征,所以, F_s 参数指标可用来研究河底流速变化. 图 7a 为天兴洲沉积物 F_s 参数随深度变化的结果,剖面自下而上,可以分为组合带 I''、II''和 III''. 图中垂直虚线代表了 F_s 的平均值,相当于现代流速. 在深度为 2.4 m 以上,当时河底流速与现代流速差距不大, F_s 主要在虚线附近小幅度波动,但在 2.4~3.0 m 深度,河底流速发生明显变化,呈现大幅度的快慢交替状态,反映了长江河床水文状况的改变. 将该组合带 II''、III''与图 2 的组合带 III、IV 以及图 7c、7d 相比较,表明河流水文变化可能与流域气候,特别是降水变化有关. 图 7c 为长江汉口水文站年平均流量统计(Chen *et al.*, 2001),表明组合带 II''时期长江中游流量大多小于

$2.5 \times 10^4 m^3/s$, 组合带 III''略高,一般为 $2.5 \times 10^4 m^3/s$,与 F_s 的变化特征对比,表明天兴洲沉积物 F_s 参数反映的河底流流速和水动力强度的变化与长江水文变化吻合. 组合带 II''中 κ_{\max} 轴方向近于南北向(图 6、图 7b),指示河流流向为与长轴(κ_{\max})方向垂直的近东西向,这与长江目前实际流向相同(图 1).

上述结果表明,自 1900 年以来,长江中上游气候经历了“暖湿”—“凉干”—“暖湿”的环境变化,出现了“强降水”—“弱降水”—“强降水”的气候变化过程. 流域气候变化对长江水文和天兴洲河道的沉积环境产生了重大的影响.

5 结论

长江中游武汉天兴洲沉积物剖面从上到下磁性矿物含量呈“C”字型变化的趋势. 矿物类型并非单一,由多相磁性矿物组成. 亚铁磁性矿物磁铁矿在上下层位含量较多,中部减少. 同时,剖面存在少量较稳定的不完整反铁磁性物质. 剖面上部和下部 SP 颗粒对沉积物的 χ 贡献较大,表明在上部沉积物形成过程中,有许多次生的超顺磁性态铁磁性矿物形成,反映了此环境条件下超顺磁性颗粒的相对含量,有比较明确的环境意义. 磁颗粒粒度基本表现为震荡形式,但在剖面底部的沉积层位则反映出磁颗粒粒度逐渐变细.

研究剖面磁性矿物表现“软”—“硬”—“软”的磁

性特性与1900年以来的长江上游降水曲线和温度曲线变化相比具有较好的一致性,表明长江中游沉积物的磁性特征与长江上游的气候环境有密切的关系,沉积剖面的磁性变化与长江上游曾经的“暖湿”—“冷干”—“暖湿”的环境变化相对应。

由于磁化率各向异性量值椭球的长轴(κ_1)的取向反映了河底流速变化和水动力作用变化的特征。研究表明,天兴洲沉积物是在20世纪中叶磁性颗粒的定向性较强而稳定的环境下形成的,但在局部还存在波动现象。在剖面深度为2.40 m的上方,流速与现代流速差别不大,但在2.4 m以下流速发生明显快慢交替变化,这可能与上游的气候和降水变化有关。从长江上游降水曲线和温度曲线以及长江汉口水文站年平均流量值上也充分证明了这一点。另外,通过椭球的长轴方向研究,还发现在沉积剖面上部河流流向接近东西向,该流向与目前实际流向相比结果一致。

长江天兴洲沉积物磁性矿物的类型、含量以及空间分布特征的研究表明,长江中游天兴洲沉积物的磁性特征能够指示长江中上游环境气候的变化,这对进一步研究长江流域物源和第四纪古环境变化具有重要意义。

References

- Chen, J. Q., Shi, Y. F., Zhang, Q., et al., 2006. Climatic background for historical flood of 1860, 1870 during past 500 years in the Upper Yangtze River basin. *Journal of Lake Sciences*, 18(5): 476—483 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. Y., Li, J. F., Shen, H. T., et al., 2001. Yangtze River of China: historical analysis of discharge variability and sediment flux. *Geomorphology*, 41(2—3): 77—91. doi:10.1016/S0169-555X(01)00106-4
- Hilton, J., Lishman, J. P., Chapman, J. S., 1986. Magnetic and chemical characterization of a diagenetic magnetic mineral formed in the sediments of productive lakes. *Chemical Geology*, 56(3—4): 325—333.
- Hu, S. Y., Deng, C. L., Appel, E., et al., 2001. Environmental implication of magnetic property on lacustrine sediments. *Chinese Science Bulletin*, 46(17): 1491—1494 (in Chinese).
- Liu, Q. S., Deng, C. L., 2009. Magnetic susceptibility and its environmental significances. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(4): 1041—1048 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. S., Zeng, Q. L., Yang, T., et al., 2009. Magnetic properties of street dust from Chibi city, Hubei Province, China: its implications for urban environment. *Journal of Earth Science*, 20(5): 848—857. doi:10.1007/s12583-009-0071-7
- Lu, S. G., Dong, R. B., Yu, J. Y., et al., 1999. Magnetic measurement characterisation of red earth profile in eastern China and its environmental implications. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(6): 764—771 (in Chinese with English abstract).
- Niu, J. L., Yang, Z. S., Li, Y. H., et al., 2008. The characteristics of the environmental magnetism in sediment from the river mouths of the Changjiang River and the Huanghe River and their comparison study. *Marine Sciences*, 32(4): 24—30 (in Chinese with English abstract).
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986. Environmental magnetism. Allen and Unwin, London.
- Wang, H., Zheng, X. M., Wang, X. Y., et al., 2008. Environmental magnetic properties of sediments from middle and lower reaches of Changjiang River. *Quaternary Sciences*, 28(4): 640—648 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Q., Zhang, S. H., Li, H. Y., 2008. The rock magnetic behaviors and its environmental implication of surface sediments in Beianhe, Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 53(13): 1589—1597 (in Chinese).
- Wang, Y. J., Jiang, T., Shi, Y. F., 2005. Changing trends of climate and runoff over the upper reaches of the Yangtze River in 1961—2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(5): 709—714 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z., Chen, Z. Y., Shi, Y. F., et al., 2007. The conformation of underlying bed sand wave and its dynamic mechanism in Wuhan-Hekou section, upper and middle water of Yangtze River. *Science in China (Series D)*, 37(9): 1223—1234 (in Chinese).
- Wang, Z. B., Yang, S. Y., Li, P., et al., 2006. Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 570—578 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. B., Yang, S. Y., Wang, R. C., et al., 2007. Magnetite compositions of Changjiang River sediments and their tracing implications. *Geochimica*, 36(2): 176—184 (in Chinese with English abstract).
- Worm, H. U., Banerjee, S. K., 1987. Rock magnetic character in Cretaceous-Tertiary boundary. *Geophysical Research Letter*, 14(11): 1083—1086. doi:10.1029/GL014i011P01083

- Yan, G. L., 1996. The application of rock magnetic susceptibility anisotropy in geology. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1—20 (in Chinese).
- Yang, S. Y., Jiang, S. Y., Ling, H. F., et al., 2007. Sr-Nd isotopic compositions of the Changjiang sediments: implications for tracing sediment sources. *Science in China (Series D)*, 50(10): 1556—1565. doi: 10. 1007/s11430-007-0052-6
- Yang, T., Liu, Q. S., Chan, L. S., et al., 2009a. Magnetic investigation of heavy metals contamination in urban topsoils around the East Lake, Wuhan city, China. *Geophysical Journal International*, 171(2): 603—612. doi: 10. 1111/j. 1365-246X. 2007. 03558. x
- Yang, T., Liu, Q. S., Zeng, Q. L., et al., 2009b. Environmental magnetic responses of urbanization processes: evidence from the lake sediments in East Lake, Wuhan, China. *Geophysical Journal International*, 179(2): 873—886. doi: 10. 1111/j. 1365-246X. 2009. 04315. x
- Yang, T., Liu, Q. S., Li, H. X., et al., 2010. Anthropogenic magnetic particles and heavy metals in the road dust: magnetic identification and its implications. *Atmospheric Environment*, 44(9): 1175—1185. doi: 10. 1016/j. atmosenv. 2009. 12. 028
- Yuan, X. C., 1991. The principle of palaeomagnetism and its application. Geological Publishing House, Beijing, 34—50 (in Chinese).
- Zhang, W. G., Dai, X. R., Zhang, F. R., et al., 2007. Magnetic properties of sediments from the Chaohu Lake for the last 7 000 years and their implications for the evolution of Asian monsoon. *Quaternary Sciences*, 27(6): 1053—1062 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Chen, L., et al., 2009. Magnetic fabric characters of sand-dune sediments and its paleowind field in the middle reaches of Yangtze River. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(1): 150—156 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. C., Liu, S. H., 2005. 2-D numerical simulation of flow field in Tianxingzhou reach on Yangtze River. *Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition)*, 38(1): 30—33 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈家其, 施雅风, 张强, 等, 2006. 从长江上游近 500 年历史气候看 1860、1870 年大洪水气候变化背景. *湖泊科学*, 18(5): 476—483.
- 胡守云, 邓成龙, Appel, E., 等, 2001. 湖泊沉积物磁学性质的环境意义. *科学通报*, 46(17): 1491—1494.
- 刘青松, 邓成龙, 2009. 磁化率及其环境意义. *地球物理学报*, 52(4): 1041—1048.
- 卢升高, 董瑞斌, 俞劲炎, 等, 1999. 中国东部红土的磁性及其环境意义. *地球物理学报*, 42(6): 764—771.
- 牛军利, 杨作升, 李云海, 等, 2008. 长江与黄河河口沉积物环境磁学特征及其对比研究. *海洋科学*, 32(4): 24—30.
- 王红强, 张世红, 李海燕, 2008. 北京北安河地表沉积物的岩石磁学特征及环境意义. *科学通报*, 53(13): 1589—1597.
- 王辉, 郑祥民, 王晓勇, 等, 2008. 长江中下游干流河底沉积物环境磁性特征. *第四纪研究*, 28(4): 640—648.
- 王艳君, 姜彤, 施雅风, 2005. 长江上游流域 1961—2000 年气候及径流变化趋势. *冰川冻土*, 27(5): 709—714.
- 王哲, 陈中原, 施雅风, 等, 2007. 长江中下游(武汉—河口段)底床沙波型态及其动力机制. *中国科学(D辑)*, 37(9): 1223—1234.
- 王中波, 杨守业, 李萍, 等, 2006. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义. *沉积学报*, 24(4): 570—578.
- 王中波, 杨守业, 王汝成, 等, 2007. 长江河流沉积物磁铁矿化学组成及其物源示踪. *地球化学*, 36(2): 176—184.
- 阎桂林, 1996. 岩石磁化率各向异性在地学中的应用. 武汉: 中国地质大学出版社, 1—20.
- 杨守业, 蒋少涌, 凌洪飞, 等, 2007. 长江河流沉积物 Sr-Nd 同位素组成与物源示踪. *中国科学(D辑)*, 37(5): 682—690.
- 张卫国, 戴雪荣, 张福瑞, 等, 2007. 近 7000 年巢湖沉积物环境磁学特征及其指示的亚洲季风变化. *第四纪研究*, 27(6): 1053—1062.
- 张玉芬, 李长安, 陈亮, 等, 2009. 长江中游砂山沉积物磁组构特征及其指示的古风场. *地球物理学报*, 52(1): 150—156.
- 周龙才, 刘士和, 2005. 长江天兴洲河段平面二维流场数值模拟. *武汉大学学报(工学版)*, 38(1): 30—33.