

澧阳平原杉龙岗遗址埋藏古水稻土磁性矿物特性^①

谭洁, 周卫军*, 陈恋, 刘沛, 曹胜, 罗思颖

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要: 为探明埋藏古水稻土磁性矿物特征, 采用环境磁学方法研究了澧阳平原杉龙岗遗址埋藏古水稻土的磁性矿物含量、组成和粒度。结果表明, 埋藏古水稻土的磁化率平均值为 $6.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 饱和等温剩磁平均值为 $16\ 338 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$, 软剩磁平均值为 $773 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$, 退磁参数 S_{300} 平均值为 72%。埋藏古水稻土亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物含量随土层深度增加不断降低, 其含量均低于现代耕作水稻土层; 埋藏古水稻土磁化率主要来源于亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物, 且亚铁磁性矿物占相对主导地位; 相对于现代耕作水稻土层, 埋藏古水稻土层中磁性矿物以较粗的磁铁矿颗粒为主。

关键词: 澧阳平原; 古水稻土; 磁性矿物; 磁性参数

中图分类号: S153.2 **文献标识码:** A

古土壤是在古环境条件下气候、生物、地形、母质、时间和人为活动等综合作用下形成的, 是反映不同地质时期的古环境、古气候、古生态以及重大地质事件的一面镜子^[1]。通过对古土壤发生和演变的系统研究, 了解历史上农业发展的历程及全球气候变化已成为国际土壤学界的研究热点^[2-3]。水稻栽培在我国已有 7 000 a 以上历史, 我国学者围绕古水稻土的时空分布特征^[4]、肥力状况^[5]、细菌和古细菌群落特性^[6]、孢粉学^[7]和有机质特征^[8-9]及黏土矿物形态分布与演变^[10-11]等方面开展了深入研究, 阐明了古水稻土的物理、化学、数学和生物地球化学的一些特性。由于土壤中存在多种磁介质, 土壤磁性可以用于评价地质、气候、植被、地形、有机质及时间等主要成土因子, 能够反映全球环境变化、气候变迁和人类活动等综合信息^[12], 将土壤磁化率作为记录古气候变迁和古季风环流变化的代用指标已广泛应用于中国北方黄土-古土壤研究^[13-16], 还有不少研究者从不同角度对红土磁化率的古环境意义进行了探讨^[17-20]。目前, 关于水稻土的磁化率研究相对较少, 针对古水稻土的磁化率研究仅见于江苏省昆山市绰墩遗址^[21]。因此, 本研究通过对位于澧阳平原的杉龙岗埋藏古水稻土剖面磁性矿物的相关特性研究, 分析埋藏古水稻土层与现代耕作水稻土层磁性矿物变化规律及差异, 旨在

为进一步揭示水稻土发生、发育过程的生物地球化学机制提供理论和实际依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采自湖南常德临澧县新安镇杉龙岗村古水稻考古点(29°40′3.97″N, 111°30′41.11″E), 土壤剖面是湖南省文物考古研究所挖掘的 2 个考古剖面, 分别为 PB(29°40′3.96″N, 111°30′41.52″E)、PC(29°40′4.61″N, 111°30′41.13″E)。根据土壤剖面特性和年代测定结论, 剖面可分为 2 个典型的层次(表 1), 其中剖面 PB(51 ~ 70 cm)和 PC(39 ~ 67 cm)为距今约 3 000 a 的埋藏古水稻土层, 剖面 PB(0 ~ 51 cm)和 PC(0 ~ 39 cm)为现代耕作水稻土层, 在进行剖面观察确定层次后, 自剖面底部向上每层采集土壤 1 kg 左右, 土壤样品在实验室自然风干后过 10 目筛, 装入密封袋备用。

1.2 分析测定方法

样品主要进行以下测量: 磁化率, 将 5 ~ 6 g 自然风干的土样, 过 16 目筛, 置于 10 ml 圆柱状聚乙烯样品盆, 压实密封, 采用 Bartington MS2 磁化率仪测定低频磁化率(χ_{lf} , 0.47 kHz)和低频磁化率(χ_{hf} , 4.7 kHz)。

等温剩磁和饱和等温剩磁, 采用 Molspin 脉冲磁力仪(磁场范围在 0~300 mT)在系列磁场中磁化, Molspin

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371288)资助。

* 通讯作者(wjzh0108@163.com)

作者简介: 谭洁(1979—), 女, 湖南湘潭人, 讲师, 博士研究生, 主要从事土地/土壤环境过程及模拟研究。E-mail: 37080689@qq.com

旋转磁力仪测定等温剩磁(IRM),并在 1 T 脉冲磁化仪磁化后测定饱和等温剩磁(SIRM)。软剩磁(SOFT),在 20 mT 磁场中测定的剩磁。硬剩磁(HIRM),根据

SIRM 与 300 mT 磁场下测定的剩磁计算, $HIRM = (SIRM + IRM_{300mT})/2$ 。并根据测量结果计算 $SIRM/\chi_{LF}$ 。以上试验在浙江大学环境与资源学院磁学实验室完成。

表 1 古水稻土(PB 和 PC)剖面特征描述
Table 1 Morphological characteristics of PB and PC profiles of ancient paddy soil

剖面	土层	深度(cm)	特征描述
PB	A1 耕作层	0~25	土壤呈暗灰色,颗粒状,黏壤质地,结构疏松,网纹清晰平滑,稻根密集,铁锰斑点占 5%
	P1 犁底层	25~30	土壤呈灰白色,长块状,壤质,结构紧实,网纹渐交波状,少许稻根,模糊稻粒,铁锰斑点占 30%,铁锰结核占 5%
	W1 潜育层	30~41	土壤呈灰白色,大棱块状,壤质,结构紧实,网纹渐交波状,根系甚少,模糊稻粒胶膜,铁锰斑点占 40%,铁锰结核占 10%
	C1 母质	41~51	
	A2 耕作层	51~56	土壤呈暗灰白色,壤质,长块状紧实,网纹清晰平滑,铁锰斑点占 30%,铁锰结核占 5%,没有新鲜的根毛,有细根孔,湿色比上层略深
	P2 犁底层	56~63	
PC	W2 潜育层	63~70	土壤呈黄灰色,黏壤质地,长块状紧实,网纹渐交波状,铁锰斑点占 30%,铁锰结核占 2%
	A1 耕作层	0~16	土壤呈暗灰色,颗粒状,黏壤质地,结构疏松,网纹清晰平滑,稻根密集,铁锰斑点占 5%
	P1 犁底层	16~18	土壤呈灰白色,长块状,壤质,结构紧实,网纹渐交波状,少许稻根,模糊稻粒,铁锰斑点占 30%,铁锰结核占 5%
	W1 潜育层	18~27	土壤呈灰白色,大棱块状,壤质,结构紧实,网纹渐交波状,根系甚少,模糊稻粒胶膜,铁锰斑点占 40%,铁锰结核占 10%
	C1 母质	27~39	
	A2 耕作层	39~48	土壤呈暗灰白色,壤质,长块状紧实,网纹清晰平滑,铁锰斑点占 30%,铁锰结核占 5%,没有新鲜的根毛,有细根孔,湿色比上层略深
	P2 犁底层	48~54	
	W2 潜育层	54~61	土壤呈黄灰色,黏壤质地,长块状紧实,网纹渐交波状,铁锰斑点占 30%,铁锰结核占 2%
C2 母质	61~67	土壤呈黄色,黏质,长块状紧实,网纹清晰平滑,铁锰斑点占 5%,铁锰结核占 5%	

1.3 数据统计与分析

所有野外调查与分析测定数据均用 Excel 2003 和 PASW Statistics 18 统计软件进行数据处理分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤磁性矿物含量特征

磁化率(χ_{lf})一般用于反映磁铁矿和磁赤铁矿等亚铁磁性矿物的总量^[22]。磁学参数测定结果表明(表 2),埋藏古水稻土层剖面样品 χ_{lf} 变化范围为(5.3 ~ 7.3) $\times 10^{-8}$ m³/kg,平均值为 6.2 $\times 10^{-8}$ m³/kg,其值耕作层 > 犁底层 > 潜育层 > 母质层,表明随着深度的增加,埋藏古水稻土层中亚铁磁性矿物含量呈逐渐下降的趋势,这与淹水导致母质中原有的强磁性矿物被还原分解、水化和无定形化成弱磁性矿物和无定形氧化铁有关。PB 剖面埋藏古水稻土层 χ_{lf} 的变幅为(5.3 ~ 6.0) $\times 10^{-8}$ m³/kg,平均值为 5.8 $\times 10^{-8}$ m³/kg,变异系数 7.0%; PC 剖面埋藏古水稻土层 χ_{lf} 的变幅为(6.0 ~

7.3) $\times 10^{-8}$ m³/kg,平均值为 6.5 $\times 10^{-8}$ m³/kg,变异系数 9.7%,均小于现代耕作水稻土层,说明埋藏古水稻土层中亚铁磁性矿物总量低于现代耕作水稻土层。

饱和等温剩磁(SIRM)是亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物含量的近似度量^[23]。由表 2 可知, PB 和 PC 剖面埋藏古水稻土层的 SIRM 变幅分别为(13 761 ~ 20 652) $\times 10^{-5}$ Am²/kg 和(10 187 ~ 21 645) $\times 10^{-5}$ Am²/kg,平均值分别为 17 447 $\times 10^{-5}$ Am²/kg 和 15 229.5 $\times 10^{-5}$ Am²/kg,其变幅与平均值均小于现代耕作水稻土层,且耕作层 > 犁底层 > 潜育层,反映了埋藏古水稻土层中亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的含量整体低于现代耕作水稻土层,且有随着深度增加而不断降低的特点。磁化率、等温剩磁均随着土层深度的增加而下降,这与卢升高^[24]关于红壤性稻土年限越长,其磁化率降低幅度越大,以及常跃畅^[25]关于潜育型水耕人为土剖面磁化率由上至下逐渐变小的研究结论一致。软剩磁(SOFT)可以用于指示亚铁磁性矿物,

特别是低矫顽力的多畴(MD)和准单畴(PSD)磁性晶粒含量^[26];硬剩磁(HIRM)则能反映土壤中反铁磁性

表 2 土壤磁性参数统计结果
Table 2 Statistics of measured magnetic parameters

剖面	土层	$\chi_{if}(10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$	SIRM($10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$)	SOFT($10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$)	HIRM($10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$)	SIRM/ $\chi_{if}(10^{-3} \text{ Am}^{-1})$
PB	A1	33.1	168 816	19 951	24 065	5 095
	P1	10.0	37 885	4 687	7 170	3 788
	W1	8.0	26 914	1 280	8 196	3 371
	C1	7.3	24 321	1 167	7 978	3 343
	A2	6.0	20 652	929	6 708	3 449
	P2	6.0	17 928	1 054	4 761	3 000
	W2	5.3	13 761	470	4 339	2 585
PC	A1	25.3	165 473	13 642	26 486	6 545
	P1	17.9	85 082	8 227	15 478	4 746
	W1	12.0	40 450	3 821	5 134	3 371
	C1	8.0	22 773	1 172	6 748	2 864
	A2	7.3	21 645	1 151	6 455	2 952
	P2	6.0	14 930	797	3 885	2 498
	W2	6.0	14 436	547	4 182	2 416
	C2	6.7	10 187	421	2 104	1 531

矿物的含量^[27]。由表 2 可见, PB 和 PC 剖面的埋藏古水稻土层和现代耕作水稻土层 SOFT 存在明显差异, 埋藏古水稻土层 SOFT 平均值分别为 $817.7 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 和 $729.0 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$, 远远低于现代耕作水稻土层平均值 $6771.3 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 和 $6715.5 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$; HIRM 的测定结果也呈现同一特征, 表明 PB、PC 剖面埋藏古水稻土层中亚铁磁性矿物以及反铁磁性矿物含量均低于现代耕作水稻土层。这与杨用钊等^[21]在绰墩农业遗址全新世 2 个古水稻土层磁化率变化趋势一致。

2.2 土壤磁性矿物组成

PB 和 PC 剖面土壤样品 χ_{if} 与 SIRM 之间的相关性分析表明(图 1A、B), PB 和 PC 剖面 χ_{if} 与 SIRM 之间存在显著正相关(PB 剖面 $R^2 = 0.999 1$, $P < 0.01$; PC 剖面 $R^2 = 0.970 8$, $P < 0.01$), 反映出样品中对 χ_{if} 的贡献主要来源于亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物。由图 2A、B 可见, PB 和 PC 剖面 χ_{if} 与 SOFT 亦存在极显著的正相关性(PB 剖面 $R^2 = 0.992 1$, $P < 0.01$; PC 剖面 $R^2 = 0.993 8$, $P < 0.01$), 更进一步证明了 χ_{if} 主要受亚铁磁性矿物的主导。HIRM 主要用于估计高矫顽力的不完全反铁磁性矿物^[28]。从图 3A、B 可以看出, χ_{if} 与 HIRM 也存在正相关性(PB 剖面 $R^2 = 0.972 9$, $P < 0.01$; PC 剖面 $R^2 = 0.922 3$, $P < 0.01$), 但低于 χ_{if} 与 SIRM 和 SOFT 相关性, 表明不完全反铁磁性矿物对 χ_{if} 的贡献度低于亚铁磁性矿物。

退磁参数(S_{300})反映了样品中亚铁磁性矿物和不

完整反铁磁性矿物的相对比例, 高值表明样品中亚铁磁性矿物居多, 其值随着不完整反铁磁性矿物比例的增多而下降^[29]。由图 4 可见, PB 和 PC 剖面埋藏古水稻土层 S_{300} 变幅为 68.52% ~ 79.30%, 平均值为 72%, 均低于现代耕作水稻土层, 这反映出埋藏古水稻土层中亚铁磁性矿物低于现代耕作水稻土层, 且不完全反铁磁性矿物相对比例有增高趋势。

2.3 土壤磁性矿物粒度分析

频率磁化率(χ_{FD})可大致反映超顺磁性(SP)-稳定单畴(SSD)过渡态颗粒的含量^[30]。由于澧阳平原杉龙岗遗址埋藏古水稻土磁化率过低, 导致频率磁化率过高, 故不宜采用频率磁化率作为古水稻土粒度分析依据。SIRM/ χ_{if} 可用于分辨样品中磁性矿物类型和铁磁晶粒特征, 当磁性颗粒的粒径大于 SP 时, SIRM/ χ_{if} 值越大, 粒径小的磁性颗粒含量越大^[22]。由表 2 可知, PB 和 PC 剖面埋藏古水稻土层 SIRM/ χ_{if} 低于现代耕作水稻土层, 且随着深度的增加呈现下降趋势, 表明埋藏古水稻土层中磁性颗粒以粗颗粒为主, 粒径大的磁性颗粒含量高于现代耕作水稻土层, 且随着土层深度增加, 铁磁晶粒平均粒径也不断增大。该结论与卢升高^[24]认为红壤性水稻土中基本不存在超顺磁性和稳定单畴态铁磁性矿物一致。

3 结论

1) 磁化率、等温剩磁均随着土层深度的增加而下

降,说明澧阳平原埋藏古水稻土在地表淹水和地下水双重影响下,土壤中的强磁性矿物不断转化成弱磁性矿物和无定形氧化铁,从而使得亚磁性和不完全反铁磁性矿物的含量随深度增加不断降低。埋藏古水稻土层的磁化率、饱和等温剩磁、软剩磁和硬剩磁明显低于现代耕作水稻土层,表明埋藏古水稻土层亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的含量均低于现代耕作水稻土层。

2) 磁化率与饱和等温剩磁、软剩磁、硬剩磁之

间存在显著正相关关系,但磁化率与硬剩磁相关性低于其与饱和等温剩磁、软剩磁的相关性,说明土壤磁化率主要来源于亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物,且亚铁磁性矿物占相对主导地位;退磁参数的变化亦反映了磁铁矿、磁赤铁矿等亚铁磁性矿物在埋藏古水稻土层中的相对含量低于现代耕作水稻土层,且埋藏古水稻土层中针铁矿、赤铁矿等不完全反铁磁性矿物的相对比例有所增多。

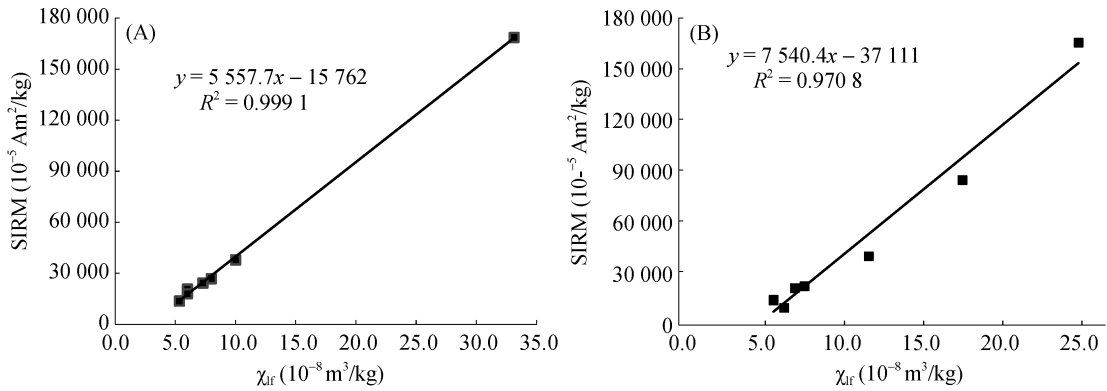


图 1 PB(A)、PC(B)剖面 χ_{lf} 与 SIRM 关系

Fig.1 Correlation between χ_{lf} and SIRM in PB(A) and PC(B) profile

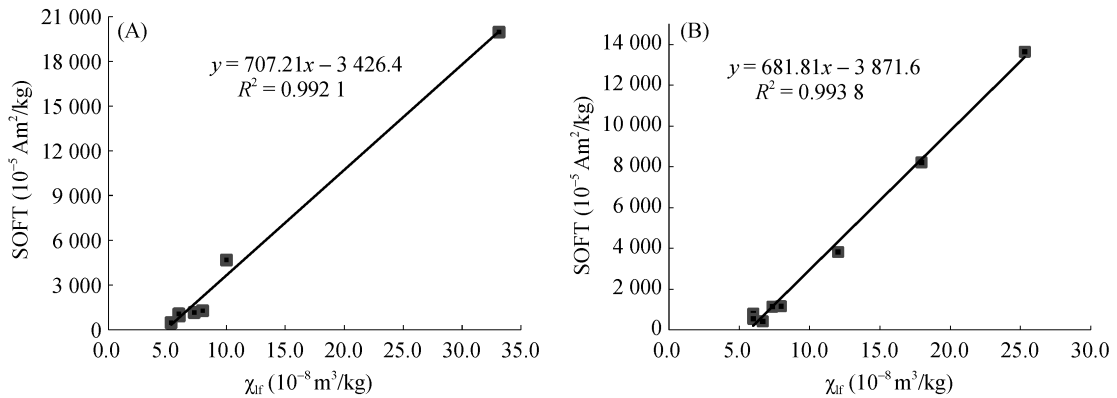


图 2 PB(A)、PC(B)剖面 χ_{lf} 与 SOFT 关系

Fig.2 Correlation between χ_{lf} and SOFT in PB(A) and PC(B) profile

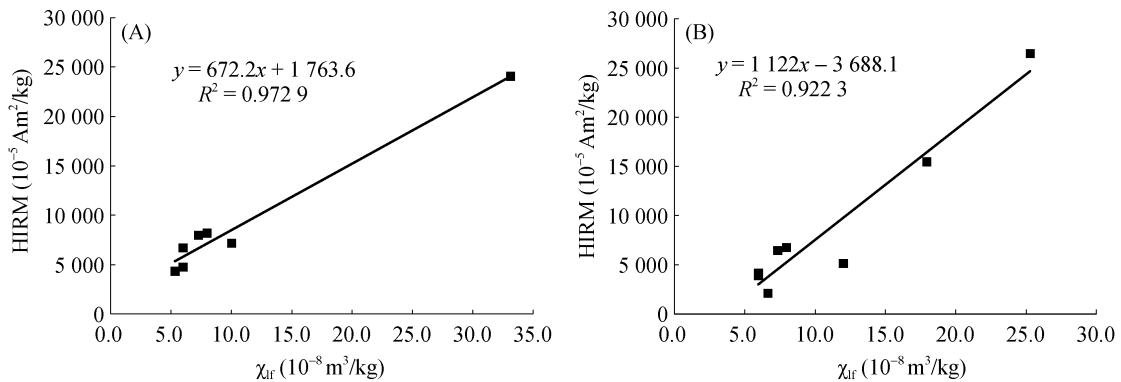


图 3 PB(A)、PC(B)剖面 χ_{lf} 与 HIRM 关系

Fig.3 Correlation between χ_{lf} and HIRM in PB(A) and PC(B) profile

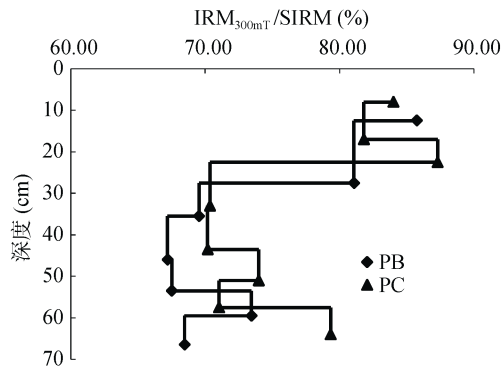


图 4 土壤磁学参数 $IRM_{300mT}/SIRM$ 随剖面深度变化

Fig.4 Changes of $IRM_{300mT}/SIRM$ in soil profile

3) 现代耕作水稻土层和埋藏古水稻土层磁化率及 $SIRM/\chi_{LF}$ 的变化及差异, 表明了埋藏古水稻土层中以较粗的多畴颗粒为主, 且随着深度增加, 粒径大的晶粒越加占主导地位。

4) 由于水稻土受到人类活动、自然气候、生物作用等各种因素的影响, 磁化率信息发生了非常复杂的变化, 而导致埋藏古水稻层与现代耕作水稻土层磁性矿物特征差异的因素及其作用机制还有待进一步深入分析。

参考文献:

- [1] 吴克宁, 王文静, 查理思, 等. 文化遗址区古土壤特性及古环境研究进展[J]. 土壤学报, 2014(6): 1169–1182
- [2] 赵其国. 第十八届国际土壤学大会综述[J]. 土壤, 2007, 39(1): 2–18
- [3] Lanczont M, Madeyska T, Bogucki A, et al. Stratigraphic position and natural environment of the oldest Middle Palaeolithic in central Podolia, Ukraine: New data from the Velykyi Glybochok site[J]. Quaternary International, 2014, 326/327: 191–212
- [4] 龚子同, 陈鸿昭, 袁大刚, 等. 中国古水稻的时空分布及其启示意义[J]. 科学通报, 2007, 52(5): 562–567
- [5] 卢佳, 胡正义, 曹志洪, 等. 长江三角洲绰墩遗址埋藏古水稻土肥力特征研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 109–117
- [6] 申卫收, 尹睿, 林先贵, 等. 绰墩山遗址古水稻土细菌与古菌群落的 PCR-DGGE 分析[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2916–2924
- [7] 李春海, 章钢娅, 杨林章, 等. 绰墩遗址古水稻土孢粉学特征初步研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 452–460
- [8] 肖彦资, 周卫军, 顾海滨, 等. 澧阳平原埋藏古水稻土不同形态有机碳的分布特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1644–1649
- [9] 刘沛, 周卫军, 李娟, 等. 澧阳平原古水稻土有机质红外光谱特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 901–908
- [10] 程月琴, 杨林章, 曹志洪. 绰墩遗址古今水稻土黏土矿物特征比较研究[J]. 土壤, 2011, 43(4): 617–622
- [11] 刘沛, 周卫军, 顾海滨, 等. 澧阳平原古水稻土铁形态演变特征[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1151–1156
- [12] 李勇. 安徽凤阳石英岩发育土壤的磁学性质及环境磁学意义[J]. 土壤, 2013, 45(1): 172–176
- [13] Liu Q S, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. Environmental magnetism: Principles and applications[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(4), doi: 10.1029/2012rg000393
- [14] 魏海涛, Banerjee S K, 夏敦胜, 等. 天山北麓黄土环境磁学特征及其古气候意义[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 150–158
- [15] Liu Z F, Liu Q S, Torrent J, et al. Testing the magnetiproxy XFD/ HIRM for quantifying paleoprecipitation in modern soil profiles from Shanxi Province, China[J]. Global and Planetary Change, 2013, 110(Part C): 368–378
- [16] 赵艳雷, 庞奖励, 黄春长, 等. 郟县前坊村剖面黄土—古土壤序列风化成壤及古气候研究[J]. 沉积学报, 2014, 32(5): 840–845
- [17] 卢升高. 第四纪红土的磁性与氧化铁矿物学特征及其古环境意义[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 182–191
- [18] 胡忠行, 朱丽东, 张卫国, 等. 江西九庐公路红土剖面的磁学特征及其反映的风化成土作用[J]. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1319–1326
- [19] 邓黄月, 郑祥民, 杨立辉, 等. 长江中下游地区第四纪红土磁学特征及其环境意义[J]. 沉积学报, 2015, 33(2): 285–298
- [20] 杨立辉, 叶玮, 郑祥民, 等. 亚热带第四纪沉积型红土与风化壳型红土的磁学特征对比[J]. 地理科学, 2015, 35(11): 1475–1481
- [21] 杨用钊, 李福春, 金章东, 等. 绰墩农业遗址中存在中全新世水稻土的新证据[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 864–871
- [22] Evans M, Heller F. Environmental magnetism: Principles and applications of environmental magnetism[M]. Oxford (UK): Academic Press, 2003
- [23] Thompson R, Oldfield F. Environmental magnetism[M]. London: Allen and Unwin, 1986
- [24] 卢升高. 红壤与红壤性水稻土中磁性矿物特性的比较研究[J]. 科技通报, 1999(6): 409–413
- [25] 常跃畅. 福建省代表性土壤的氧化铁组成与磁化率及其发生学意义(学位论文)[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
- [26] 杨涵, 熊黑钢, 陈学刚. 石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究[J]. 环境科学, 2014(9): 3537–3545
- [27] Lourenco A M, Rocha F, Gomes C R. Relationships between magnetic parameters, chemical composition and clay minerals of topsoils near Coimbra, central Portugal[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2012, 12(8): 2545–2555
- [28] 陈学刚, 魏疆, 孙慧兰, 等. 乌鲁木齐市土壤环境磁学特征及其空间变化研究[J]. 干旱区地理(汉文版), 2014, 37(2): 265–273
- [29] 陈曦, 张卫国, 俞立中. 赤铁矿与磁铁矿混合比例对磁性参数的影响[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 82–88
- [30] 卢升高, 俞劲炎, 章明奎. 长江中下游第四纪沉积物发育土壤磁性增强的环境磁学机制[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 336–340

Magnetic Mineral Characteristics of Buried Ancient Paddy Soil in Shanlonggang Site of Liyang Plain

TAN Jie, ZHOU Weijun*, CHEN Lian, LIU Pei, CAO Sheng, LUO Siying

(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Environmental magnetism method was applied in this study to discuss the content, composition and granularity of the magnetic minerals of the buried ancient paddy soil in Shanlonggang Site in Liyang Plain in order to disclose the characteristics of magnetic minerals. The results showed that the average MS, SIRM, 'soft' IRM, S300 ratios were $6.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, $16338.3 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$, $773.35 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ and 71.99%, respectively. It also showed that the frequency dependent susceptibility χ_{lf} was over 10%. Furthermore, the magnetic susceptibility was mainly derived from ferrimagnetic mineral and the imperfect antiferromagnetic mineral, especially from ferrimagnetic mineral. Meanwhile, the contents of ferrimagnetic and the imperfect antiferromagnetic minerals decreased with the depth, and were lower than those of current paddy soils. Finally, the results of SIRM/ χ_{lf} and magnetic susceptibility, which could be used as an indicator of the magnetic grain size, indicated that the sizes of magnetic particles of the buried ancient paddy soil may be larger than those of current paddy soils.

Key words: Liyang Plain; Ancient paddy soil; Magnetic parameters; Magnetic mineral