

文章编号: 1008-2786-(2011)4-385-10

# 庐山 JL 剖面红土磁化率特征及古环境记录

朱丽东<sup>1</sup>, 姜永见<sup>2</sup>, 张明强<sup>1</sup>, 叶 玮<sup>1</sup>, 李凤全<sup>1</sup>, 冯义雄<sup>1</sup>

(1. 浙江师范大学地理过程实验室, 浙江 金华 321004; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

**摘 要:** 江西九江庐山地区 JL 剖面红土磁化率测试结果表明: 1. 典型网纹红土的磁化率远小于弱网纹红土和棕黄色黄土-古土壤, 数值上, 棕黄色黄土-古土壤是网纹红土的 2.33 倍。剖面各层段频率磁化率均值变化于 10.09% ~ 13.71%, 且与磁化率显著正相关, 表明风化成土作用中形成的超顺磁性颗粒对红土磁性增强具有重要贡献。2. 湿润气候和土壤渍水的假潜育环境下铁磁性矿物易于分解、转化、淋失, 这可能是导致网纹红土磁化率异常偏小的主因。从而在剖面上磁化率与 CIA 变化趋势相反, 两者峰谷波动又基本一致。3. 结合 ESR 年代, JL 红土磁化率沿剖面自下而上分为 4 个波动式增大的阶段, 可与早更新世以来季风环流演变过程中的几个重要转折期对应, 记录了大尺度内的古环境变化信息。早更新世以来该区环境湿润程度波动式减弱, 气候自中更新世以来由湿热向干冷转变。

**关键词:** 第四纪; 加积型红土; 磁化率; 古环境记录

**中图分类号:** P532, P534.63

**文献标识码:** A

磁化率是提取古气候信息的重要代用指标。20 世纪 80 年代初, F. Heller & Liu 发现黄土剖面中古土壤的磁化率明显增大, 且黄土-古土壤序列的磁化率曲线可与深海氧同位素曲线对比<sup>[1]</sup>, 于是黄土磁学性质和古土壤磁化率增强的物理机制得到广泛讨论<sup>[2-6]</sup>, 磁化率在指示黄土高原区第四纪期间季风气候演化方面的意义得到公认<sup>[7-10]</sup>。此外, 研究者们对海洋沉积<sup>[11]</sup>、风成砂<sup>[12]</sup>、湖泊沉积<sup>[13]</sup>、湖盆碎屑沉积<sup>[14]</sup>和河流沉积<sup>[15]</sup>等沉积物的磁学性质、形成机制及其环境指示意义也进行了研究探索。近年该指标也被用于中国南方红土沉积与古气候研究。皖南宣城红土的磁化率波动揭示出 8 个沉积-成土旋回, 可与北方 S8 以上黄土-古土壤序列对照<sup>[16-17]</sup>。但胡雪峰等持不同意见<sup>[18]</sup>, 认为网纹化作用使红土磁化率与其风化程度间没有严格的相关性, 无法证实沉积-成土旋回, 难以指示红土形成时期的古气候。因此, 红土磁化率的气候意义尚无定

论。吕厚远等揭示, 长江以南年均温 15℃ 以上, 降水 1 100 mm 以上广大地区的土壤磁化率随年均温、年均降水量的增高而降低<sup>[19]</sup>。本文选取中亚热带江西九江地区 JL 红土剖面, 在磁化率测定和 ESR 年代数据的基础上, 对该剖面上红土磁化率特征及其所包含的古环境变化信息进行探讨。

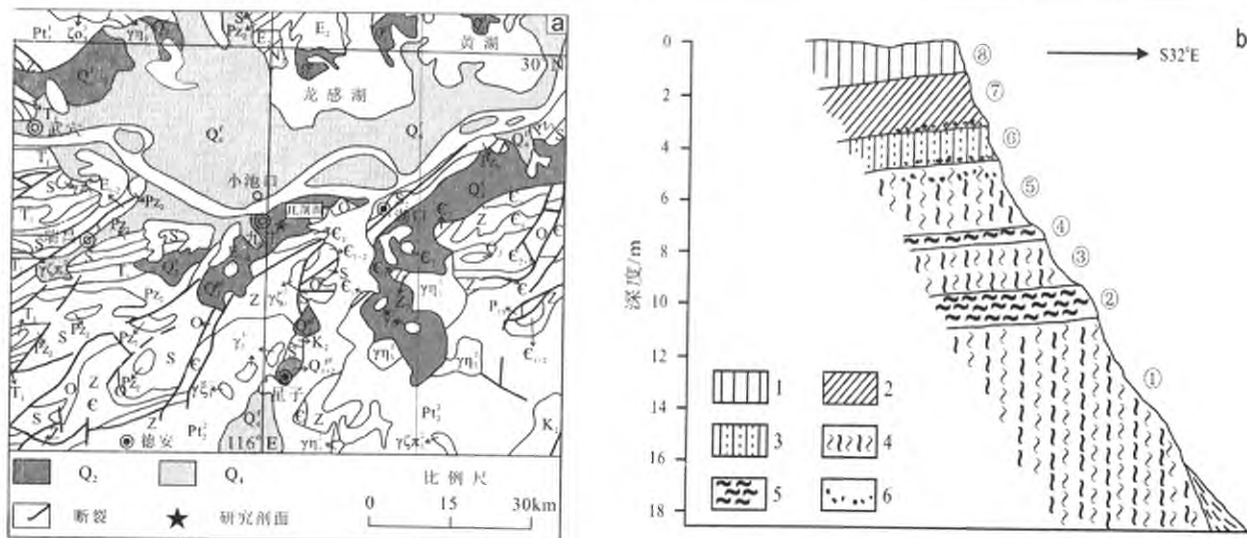
## 1 材料和方法

JL 剖面位于庐山西北麓(图 1 a), 因九(江)威(家)公路修建而出露, 地理位置 29°42'N, 116°02'E, 剖面厚度 18.46 m, 通体质地均一, 不含 > 2 mm 砾石, 未见流水作用痕迹, 其沉积地层和粒度特征均区别于残积风化红土, 可称之为加积型沉积红土, 并显示风成特性<sup>[20]</sup>, 是开展红土区第四纪环境研究的良好载体。剖面自下而上存在 8 个肉眼可辨的地层单元(图 1 b), 它们在土色、网纹形态结构、土壤发

收稿日期(Received date): 2011-02-20; 改回日期(Accepted): 2011-05-14。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41071002)、浙江省自然科学基金项目(Y5080307)共同资助。[Project Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 41071002) and Natural Science Foundation of Zhejiang Province(No. Y5080307).]

作者简介(Biography): 朱丽东(1965-), 女, 浙江新昌人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事第四纪沉积与环境研究。[Zhu Lidong(1965-), female, born in Zhejiang Province, Professor, Doctor, Master Supervisor, Major in Research on Environmental change.] E-mail: zhulidong@zjnu.cn



1. 棕黄色土, 2. 浅红色古土壤, 3. 含胶膜棕黄色土, 4. 棕红/棕褐色网纹红土, 5. 紫色网纹红土, 6. 铁锰结核淀积层

图 1 JL 剖面地理位置和地层性状

Fig. 1 The location and lithostratigraphy of the JL red earth section

育程度等方面存在差异<sup>[20]</sup>。剖面中下部①~⑤层为网纹红土,厚 14 m,基质颜色呈深浅交替,②、④两层色调较深,偏紫红色或褐色(5~7.5YR),①、③、⑤层色调略浅,偏红棕色(2.5~5YR)。剖面上部⑥~⑧层为棕黄色土,厚 4.46 m,其中第⑦层土壤发育程度相对较好,为浅红色古土壤(7.5YR),含铁锰胶膜,底部见铁锰结核淀积;⑥、⑧两层土壤发育程度较第⑦古土壤层弱,呈黄棕色(10YR),层内淋溶迹象明显,第⑥层中见大量铁锰胶膜,底部有铁锰结核淀积。①~⑤层发育大量亮红棕色铁质胶膜。根据施雅风等人早年在庐山地区的工作,剖面中下部网纹红土对应叶家垄组,剖面上部棕黄色土对应于下蜀组<sup>[21]</sup>,按照袁宝印等对中国南方红土地层的划分,剖面中下部网纹红土对应中更新统宣城组,剖面上部棕黄色土对应晚更新统下蜀组<sup>[22]</sup>。

在 JL 红土剖面上 2 cm 等间隔采样,共采集分析样品 920 个,另外在剖面不同深度采集 7 个样品作为控制点,用于 ESR 年代测试。样品磁化率测试完成于兰州大学西部环境教育部重点实验室,测试仪器为英国产 Bartington MS2 磁化率仪。低频( $\chi_{lf}$ )、高频( $\chi_{hf}$ )磁化率值均为手动旋转样品盒重复测量 3 次后的平均值。

主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)完成,将红土全岩样品烘干,经研磨机研磨后,压制成样片后上机测试,分析仪器为 PHILIPS 公司生产的 PW2440 型 X 射线荧光光谱仪,分析测试完成于江苏省地质调查院分析测试中心。文中所用红化率数

据由色度测定结果计算求得,样品在 60℃ 下烘干,经陶瓷研钵研磨并混合均匀后,置于标准白瓷比色板上压平,与标准土壤比色卡比色,测定基于 Munsell 颜色系统的色调(H)、明度(V)和彩度(V)值,红化率  $RR = (K - H) \times C/V$ ,K 取 12.5。

7 个 ESR 年代样品测试完成于青岛海洋所年代学实验室,测试材料为石英粉晶, $E'$ 心测试,检测环境温度 21℃,湿度 50%。测试仪器为德国 Bruker 公司的 EMX 型 ESR 谱仪。测试条件:室温、X 波段、中心磁场 348 mT、扫宽 5 mT、调制幅度 0.1 mT、转换时间 5.12 ms、时间常数 40.96 ms、微波功率 2 MW,测试结果见表 1。7 个样品 ESR 年代与深度变化间呈线性相关,相关系数  $R^2 = 0.8636$ 。JLE-01 样品年代发生倒置,但在误差范围内可以消除。鉴于该剖面沉积母质的风成特性,依据测得的 ESR 年龄,按粒度年代模型( $t_m = t_0 + (t_1 - t_0) \left( \sum_{i=1}^m C_i h_i \right) \left( \sum_{i=1}^m c_i h_i \right)^{-1}$  (其中  $t_m$  为所求层位  $i$  的年龄,  $t_0$  和  $t_1$  是始、终两控制点的年龄,  $n$  为  $t_0$  到  $t_1$  两个年龄控制点之间的样点数,  $m$  为  $t_0$  到  $t_m$  之间的总样点数,  $h$  为两样品点间的厚度,  $c$  选用 2~15  $\mu\text{m}$  粒级的粒度百分含量)内插得到相邻控制点之间的年龄,然后按 1.14~4.46 m 间的平均沉积速率外推得到剖面顶部年龄;按 1.14~9.28 m 间的平均沉积速率外推得到剖面底部的年龄。该剖面红土的沉积年龄在 2 098.4~231.3 ka 间,跨早、中更新世。网纹红土沉积年龄 2 098.4~440.4 ka,棕黄色土沉积时代

440.4 ~ 231.3 ka。

2 结果与讨论

2.1 磁化率特征

如表 2 所示,JL 剖面磁化率( $\chi_{lf}$ )值变化于 4.79 ~  $133 \times 10^{-5}$  SI。⑥ ~ ⑧棕色黄土 - 古土壤层的磁化率值较高,变化于  $22.45 \sim 133 \times 10^{-5}$  SI,三层平均值分别为  $38.64, 67.42 \times 10^{-5}$  SI,  $36.20 \times 10^{-5}$  SI,以第⑦古土壤层最高;① ~ ⑤网纹红土层的磁化率偏低,变化于  $4.79 \sim 121.4 \times 10^{-5}$  SI,除第⑤网纹层外,

其余各层磁化率均值都低于剖面平均值  $28.57 \times 10^{-5}$  SI,但第⑤网纹层磁化率均值不高于第⑦古土壤层。平均而言,棕黄色黄土 - 古土壤是网纹红土的 2.33 倍,网纹层内发生了磁化率异常。鉴于网纹红土层段与棕黄色黄土 - 古土壤层段沉积物性状一致<sup>[20]</sup>,网纹红土磁化率异常与后期成壤环境有关,这与前人在安徽、江西等地获得的研究结论一致<sup>[16-18]</sup>。

频率磁化率( $\chi_{fd}$ )有百分比频率磁化率( $\chi_{fd}/\%$ )和质量频率磁化率( $\chi_{fd}/10^{-5}$  SI)两种形式<sup>1)</sup>,表示跨越稳定单畴和超顺磁界线粒径的磁性矿物的存在,分别指示不同环境条件下超顺磁性颗粒(SP, <0.02

表 1 JL 剖面控制样点 ESR 年代测试结果

Table 1 ESR dating results for JL section

| 样品<br>编号 | 深度<br>/cm | 含水量<br>/% | U<br>/ $10^{-6}$ | Th<br>/ $10^{-6}$ | K <sub>2</sub> O<br>/% | AD<br>/Gy | ESR 年代<br>/ka | 年龄误差<br>/% |
|----------|-----------|-----------|------------------|-------------------|------------------------|-----------|---------------|------------|
| JLE-01   | 114       | 16.10     | 3.31             | 15.73             | 2.06                   | 1 594.2   | 337           | 10 ~ 15    |
| JLE-02   | 150       | 17.10     | 3.34             | 16.64             | 2.04                   | 1 410.8   | 291           | 10 ~ 15    |
| JLE-03   | 304       | 18.40     | 4.01             | 19.50             | 2.23                   | 1 834.9   | 325           | 10 ~ 15    |
| JLE-04   | 426       | 17.20     | 3.41             | 16.33             | 1.99                   | 1 750.0   | 365           | 10 ~ 15    |
| JLE-05   | 460       | 16.00     | 3.28             | 15.80             | 1.99                   | 2 286.8   | 493           | 10 ~ 15    |
| JLE-06   | 694       | 17.50     | 3.02             | 15.90             | 1.35                   | 1 024.9   | 676           | 10 ~ 15    |
| JLE-07   | 928       | 18.30     | 3.37             | 16.10             | 1.44                   | 3 208.8   | 1 138         | 10 ~ 15    |

表 2 JL 剖面磁化率( $\chi_{lf}$ )与频率磁化率( $\chi_{fd}$ )

Table 2 Magnetic susceptibility ( $\chi_{lf}$ ) and frequency-dependent magnetic susceptibility ( $\chi_{fd}$ ) of JL section

| 层<br>/样品数 | 深度<br>/cm     | 磁化率 $\chi_{lf}/10^{-5}$ SI |       |       | 频率磁化率 $\chi_{fd}/\%$ |       |       |
|-----------|---------------|----------------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
|           |               | 最大值                        | 最小值   | 平均值   | 最大值                  | 最小值   | 平均值   |
| ⑧(57)     | 0 ~ 120       | 133.00                     | 22.45 | 36.20 | 15.03                | 8.45  | 10.49 |
| ⑦(98)     | 120 ~ 316     | 119.44                     | 31.10 | 67.42 | 16.48                | 10.66 | 13.71 |
| ⑥(65)     | 316 ~ 446     | 74.03                      | 27.42 | 38.64 | 15.40                | 10.03 | 12.47 |
| ⑤(126)    | 446 ~ 698     | 121.4                      | 15.41 | 41.81 | 16.23                | 8.60  | 12.98 |
| ④(25)     | 698 ~ 748     | 18.56                      | 15.68 | 17.30 | 11.62                | 8.96  | 10.09 |
| ③(85)     | 748 ~ 918     | 35.59                      | 15.15 | 22.13 | 12.84                | 8.60  | 10.53 |
| ②(61)     | 918 ~ 1040    | 36.65                      | 13.10 | 24.40 | 13.84                | 9.20  | 11.55 |
| ①(403)    | 1 040 ~ 1 846 | 27.97                      | 4.79  | 15.06 | 13.93                | 6.55  | 11.12 |
| ①-1(135)  | 1 040 ~ 1 310 | 27.97                      | 11.41 | 19.10 | 12.86                | 7.27  | 10.73 |
| ①-2(102)  | 1 310 ~ 1 516 | 22.10                      | 9.88  | 15.17 | 12.44                | 6.55  | 10.26 |
| ①-3(166)  | 1 516 ~ 1 846 | 21.12                      | 4.79  | 11.71 | 13.93                | 7.72  | 10.80 |
| 全剖面       | 0 ~ 1 846     | 133.00                     | 4.79  | 28.57 | 16.48                | 6.55  | 11.45 |

1) 百分比频率磁化率  $\chi_{fd} = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100\%$

质量频率磁化率  $\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$

$\mu\text{m}$ )的相对含量和绝对含量。 $\chi_{fd}$  ( $10^{-5}\text{SI}$ )越高,风化成土作用中次生的超顺磁性态铁磁性矿物越多; $\chi_{fd}$  (%)越高,SP 颗粒浓度越高,对磁化率的贡献也越大,表明风化成土作用越强<sup>[2,23]</sup>。

JL 剖面 $\chi_{fd}$  (%)变化于 6.55% ~ 16.48%,平均值 11.45%。按照 Fine 等提出的 $\chi_{fd}$  (%) 5% ~ 6% 作为 SP 颗粒存在与否的临界指标<sup>[24-25]</sup>,棕黄色黄土-古土壤和网纹红土中都有相当数量的 SP 颗粒。沿剖面,①~⑤网纹红土层段内,第②、⑤两层的 $\chi_{fd}$  (%)略高于剖面均值,分别为 11.55%、12.98%,其余各层则小于剖面均值;⑥~⑧棕黄色黄土-古土壤层段内,⑥、⑦两层 $\chi_{fd}$  (%)均值高于剖面均值,分别达 12.47%、13.71%,第⑧层均值略低于剖面平均值。总体来看,网纹红土 $\chi_{fd}$  (%)值低于棕黄色黄土-古土壤,即网纹红土层段内 SP 超顺磁颗粒的浓度低于棕黄色黄土-古土壤层段。 $\chi_{fd}$  ( $10^{-5}\text{SI}$ )全剖面变化于 0.33 ~ 17.23  $\times 10^{-5}\text{SI}$ ,平均 3.50  $\times 10^{-5}\text{SI}$ 。⑥~⑧三层较高,平均值分别为

3.70  $\times 10^{-5}\text{SI}$ 、9.21  $\times 10^{-5}\text{SI}$ 、4.83  $\times 10^{-5}\text{SI}$ ;①~⑤网纹层内除第⑤网纹层上部外, $\chi_{fd}$  ( $10^{-5}\text{SI}$ )均很低,①~④层平均值分别为 1.61  $\times 10^{-5}\text{SI}$ 、2.85  $\times 10^{-5}\text{SI}$ 、2.35  $\times 10^{-5}\text{SI}$ 、1.74  $\times 10^{-5}\text{SI}$ 。作百分比频率磁化率 $\chi_{fd}$  (%) -  $\chi_{lf}$  散点图(图 2a)发现,绝大多数样品频率磁化率高值对应磁化率高值, $\chi_{lf}$  达到并超过 50  $\times 10^{-5}\text{SI}$  时, $\chi_{fd}$  (%)不再随 $\chi_{lf}$  增加而显著增加。棕黄色黄土-古土壤层段和网纹红土层段样品的质量频率磁化率 $\chi_{fd}$  ( $10^{-5}\text{SI}$ )与磁化率( $\chi_{lf}$ )均呈显著正相关关系(图 2 b、c),相关系数 R 分别高达 0.982 37 和 0.993 06。可见 JL 剖面红土的磁化率与频率磁化率在指示古气候意义方面的匹配程度较好,且风化成土作用中形成的超顺磁性颗粒对红土磁性增强具有重要贡献,红土磁化率与风化成土强度之间存在内在联系。

如图 3 a 所示,JL 剖面⑥~⑧层段磁化率峰谷起伏明显,呈“两谷一峰”。谷值对应⑥、⑧两个棕黄色土层,以第⑧黄色土层风化程度更弱,磁化率平

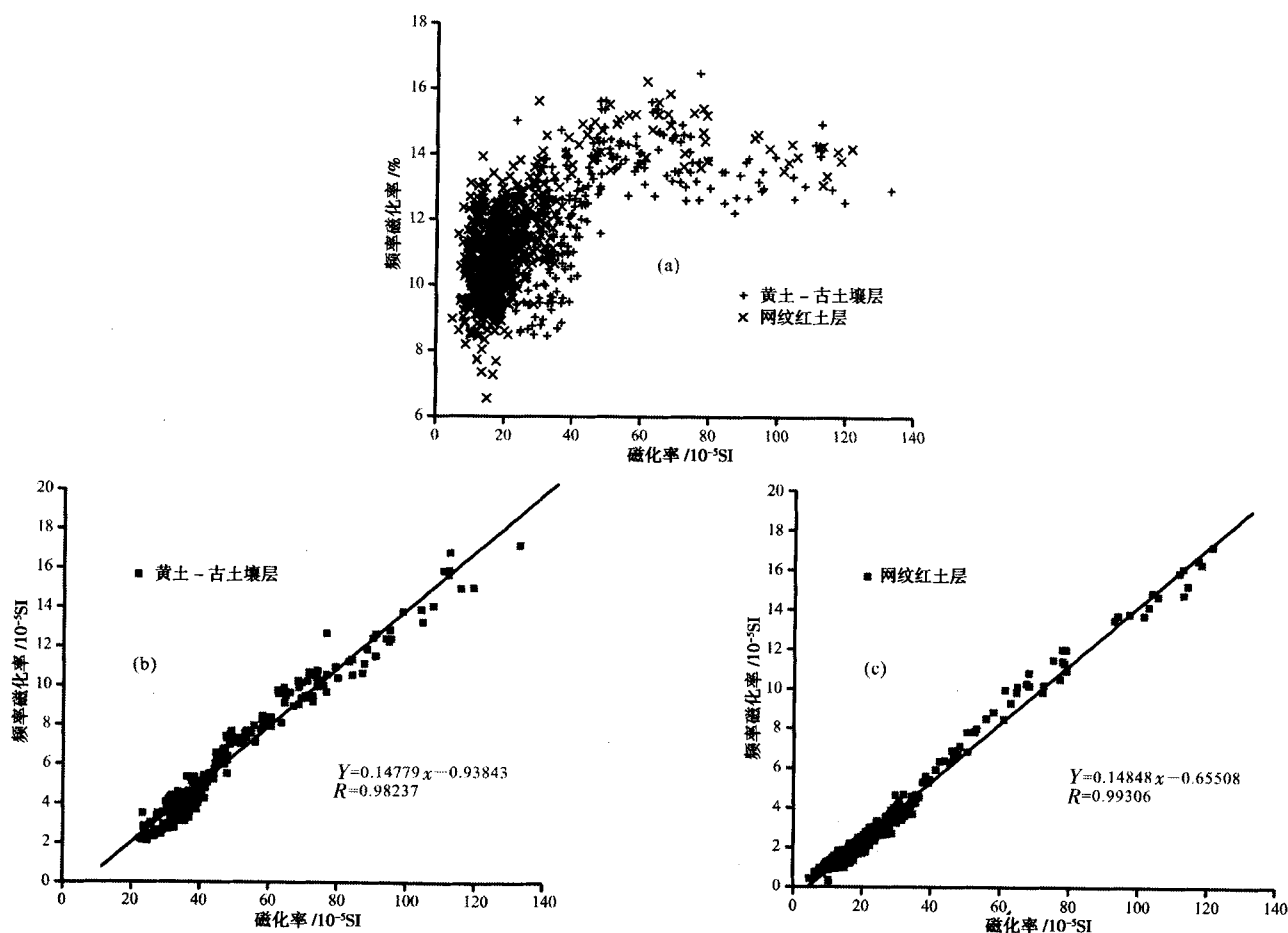


图 2 频率磁化率与磁化率间的关系

Fig. 2 Correlation between magnetic susceptibility and frequency-dependent magnetic susceptibility

均值更低;峰值对应第⑦古土壤层,也对应 CIA(化学蚀变指数)、RR(红化率)高值,与北方黄土-古土壤序列类似,磁化率高值对应成土作用较盛时期,古土壤磁化率的增强受控于成壤作用中产生的次生铁磁性矿物数量的增加。JL 剖面①~⑤层段磁化率和频率磁化率数值偏低,波幅减小,表明 SP 超顺磁颗粒的数量明显减少。吕厚远认为,中国南方过于高温高湿的环境反而不利于磁性矿物的积累<sup>[19]</sup>。网纹红土层风化成壤作用更强<sup>[26-28]</sup>,白色斑纹被认为是极端湿润气候的产物<sup>[29]</sup>,该剖面 Rb、Sr 元素测试也显示,网纹红土的 Rb/Sr 元素比值(1.65~2.46,均值 2.16)显著高于棕黄色土层和古土壤层(1.27~2.11,均值 1.80),表明网纹红土发育时期水分条件优越,网纹红土中常见的红棕色、灰黑色胶膜和铁锰结核,也是土壤季节性渍水的假潜育环境的表征<sup>[30]</sup>,而假潜育化作用能引起红土中铁磁性矿

物的分解与转化<sup>[31-33]</sup>,强风化成土过程中亚铁磁性矿物存在向赤铁矿等反铁磁性矿物转化的现象<sup>[34]</sup>,从而导致磁性减弱。由此推测,红土网纹化时期水分条件优越,化学风化作用强烈,铁磁性矿物发生分解、转化、淋失,SP 超顺磁颗粒浓度降低,磁性相应减弱,磁化率值降低。与此类似的磁化率异常现象在黄土高原降水量较高地区的黄土剖面中也有发现,宝鸡剖面 S5 的磁化率在 S5 以来的 5 层古土壤中反而最低<sup>[33]</sup>。镇江大港下蜀黄土剖面 L3 以下地层因受地下水影响磁化率也大大降低<sup>[35]</sup>。可见,网纹层段磁化率值的波动可能与降水或土壤季节渍水的程度有一定联系。那么,JL 剖面磁化率波动仍具气候指示意义,只是①~⑤层段和⑥~⑧层段红土磁化率的物理意义及其变化机理存在差异。

## 2.2 JL 剖面磁化率的古环境记录

根据磁化率变化特征,将磁化率沿 JL 剖面的变

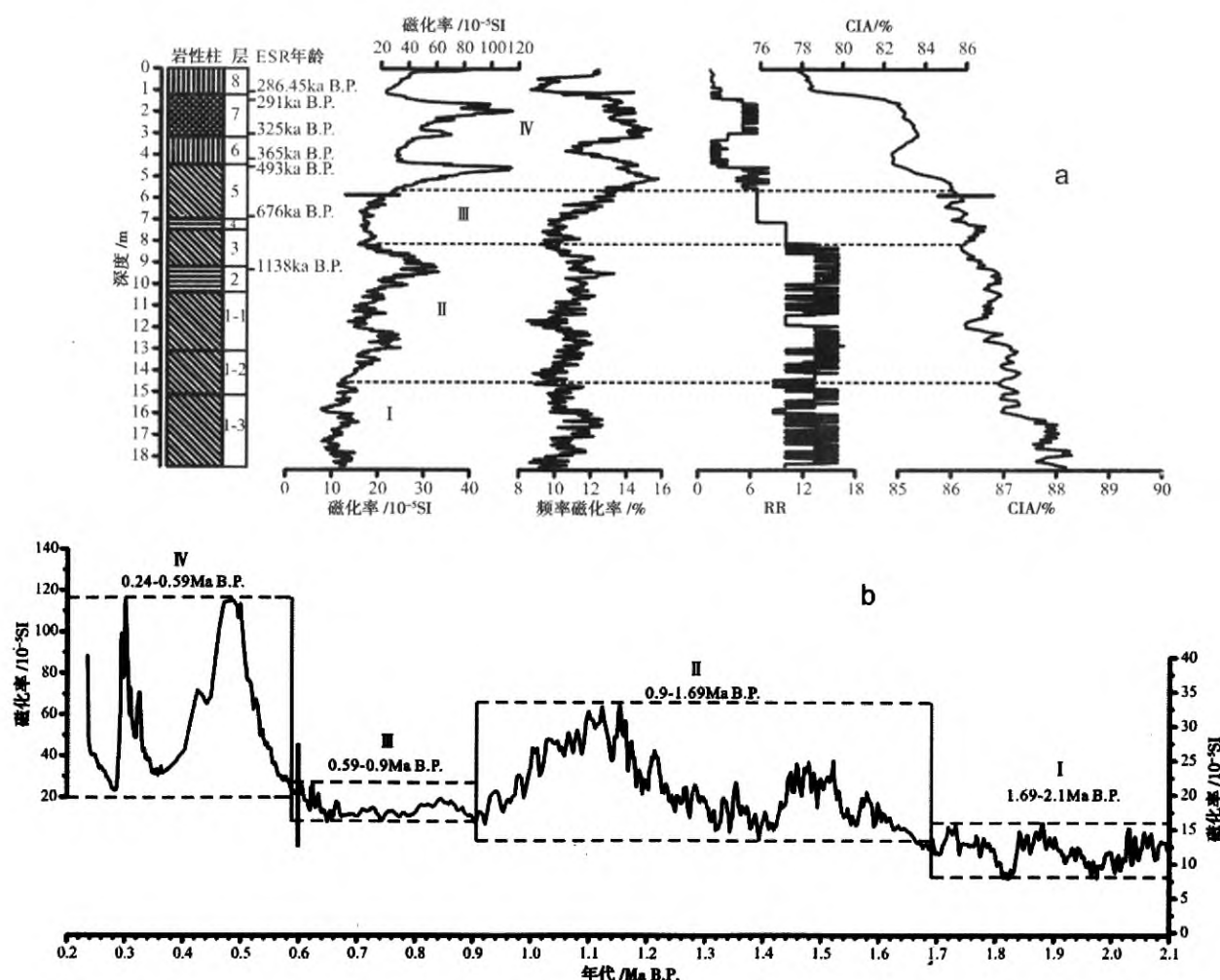


图3 JL 剖面红土磁化率、频率磁化率、红化率 RR、CIA 变化曲线

Fig. 3 Variation curves of magnetic susceptibility, frequency-dependent magnetic susceptibility, redness rating and CIA at the JL section

化划分为 I、II、III、IV 四个阶段(图 3 b,以 0.6 Ma 附近粗黑实线为界,以左参照左端标尺,以右参照右端标尺),网纹层段包括 I、II、III 阶段以及 IV 阶段下部,棕黄色土-古土壤层段对应 IV 阶段上部。I、II、III、IV 四段的沉积年龄分别为 2.1~1.69 Ma B. P.、1.69~0.9 Ma B. P.、0.9~0.59 Ma B. P.、0.59~0.24 Ma B. P.。整体上,网纹红土层段高 CIA 值和 RR 值,向上土体红化程度和风化强度渐弱,磁化率波动式增大,揭示了 JL 红土发育期间气候的阶段性变化,以及由水热条件变化而引起的成土作用强度与磁化率平衡关系的差异,虽然这种平衡关系的具体过程和规律有待于进一步研究,但早更新世以来我国江南地区气候湿润程度波动式减弱,网纹化过程渐弱直至终止的趋势是清晰可见的。土体自下而上红色铁质胶膜为主转为黑色锰质胶膜为主的事实也证实了这一趋势,因为土体由湿润趋向干旱时更有利于锰的氧化淀积<sup>[30]</sup>。I、II、III 各段内磁化率仍有起伏,高低值变化与频率磁化率一致,高值处的样品中含(或含更多)黑色胶膜,低值处则少见(或少量)黑色胶膜。IV 阶段气候整体转向干凉, CIA 值和 RR 值明显降低,网纹发育渐渐终止,土壤磁化率也不再出现类似于网纹层中的异常,随风化成土强弱而增减,指示中更新世晚期以来该地区气候的阶段性波动。

### 2.2.1 阶段 I (2.1~1.69 Ma B. P.)

红土风化淋溶作用强,红棕色铁质胶膜发育,网纹典型而密集,磁化率最低,指示降水丰裕的湿润环境,铁磁性矿物遭到分解转化或 SP 超顺磁颗粒有大量淋失。该阶段对应 2.6 Ma B. P. 青藏运动 B 幕后东亚季风始现期,气候以温湿为突出特征,是夏季风和西风带交替变化,东亚冬季风居于次要地位的暖湿期<sup>[36]</sup>。我国青藏高原、西南、西北、华北、东北等地分布着面积巨大的古湖,为“大成湖期”,江南原副热带高压控制的亚热带干燥区则得以消失,疏林草原渐为亚热带常绿林代替,长江砾石层普遍堆积<sup>[36]</sup>,强风化红土北界北移至长江北岸<sup>[37]</sup>。

### 2.2.2 阶段 II (1.69~0.9 Ma B. P.)

与阶段 I 相比,红土风化淋溶强度有所减弱,铁磁性矿物分解转化变慢,磁化率开始逐渐增大,可能指示气候湿润程度的下降。1.7 Ma B. P. 青藏高原经历青藏运动 C 幕隆升之后,古湖消亡,黄河、长江成为泱泱大川,西南季风影响范围缩小<sup>[38]</sup>。然而此时高原对大气的热力、动力效应还不足以形成高原

季风,也不利于冬季风南下,江南地区仍然具备网纹发育的环境,只是湿润程度上减弱了。

### 2.2.3 阶段 III (0.9~0.59 Ma B. P.)

1.1 Ma B. P. 发生的昆仑黄河运动使青藏高原的平均海拔超过 3 000 m,西北地区古湖退缩,西风急流因为高原的阻挡而分流成南北两支,西南季风的影响范围进一步缩小<sup>[38]</sup>,大陆型东亚季风环流正式形成,冰期-间冰期气候反差加大<sup>[36]</sup>。此时期,北方黄土区发生重大转型事件,黄土中粗颗粒组分增加, L15 以来的离石黄土开始堆积,冬季风和夏季风显著增强,反差变大<sup>[39]</sup>。1.1 Ma B. P. 之后, JL 磁化率较之前又有所减小,可能表明该区开始进入东亚夏季风逐渐增强的湿润气候期,网纹红土典型发育,铁磁性矿物的分解转化又趋加快。至 0.9 Ma B. P., 磁化率明显下降到一个较低水平,变化幅度很小,红土风化淋溶强度再次递减,网纹化作用依然显著。0.9 Ma B. P. 前后,全球冰量突然增加 15%, 气候变化的主导周期由 41 ka 过渡到 100 ka, 气候波动幅度加大,可称为“中更新世气候转型”<sup>[40-41]</sup>。昆仑黄河运动中期,约 0.8 Ma B. P. 左右,青藏高原平均高度超过 3 000 m,山地高度超过 4 000 m<sup>[38]</sup>,其热力作用和动力作用大大增强,进一步促进了东亚季风环流的发展<sup>[42]</sup>,东亚季风迎来了稳现期,冬、夏季风均很强盛。中国南方红土区气候受夏季风影响显著,该阶段内 JL 红土磁化率的持续偏低表明该区经历了一个更为强烈的气候湿润期,网纹红土发育旺盛,正如前人研究指出的,这一时期中国南方红土区可能对应了一个东亚夏季风的异常强盛期<sup>[29]</sup>。植物硅酸体及孢粉分析表明,九江第四纪红土中更新世红土期植被具亚热带常绿阔叶落叶混交林特征,林下大量生长竹林和喜湿蕨类植物<sup>[43]</sup>,土壤环境也显示森林土壤特征<sup>[44]</sup>。

### 2.2.4 阶段 IV (0.59~0.24 Ma B. P.)

磁化率迅速增大并呈低频高幅变化特征,红化程度和 CIA 也减弱至另一个较低水平,成土作用开始显著减弱,但成土作用对磁化率的控制意义加强,表明 0.6 Ma B. P. 之后季风环流开始进入另一个变化阶段。最后一期的昆仑黄河运动(0.6 Ma B. P.) 之后,青藏高原进一步抬升,其热力作用和大气分流作用再次加强,高原夏季风和东南季风环流进入鼎盛时期<sup>[42]</sup>,黄土高原中南部黄土剖面磁性研究也显示 0.6 Ma B. P. 后剖面内部磁化率振荡幅度和剖面间磁性梯度差异均显著增大<sup>[45]</sup>。阶段 IV 下部(第



⑤网纹层上部)是网纹发育程度减弱渐止的过渡阶段,磁化率随网纹化的减弱而骤增,表明冬季风此时对该区的影响也明显加强,使得该时段网纹红土发育过程中的湿度较之前降低,铁磁性矿物的分解转化减弱,从而导致了磁化率的迅速变大,第⑤网纹层顶部密集分布的黑褐色铁锰结核,似乎也证实了较为显著的气候干湿交替过程。

0.44 Ma B. P. 后,剖面上段沉积了⑥~⑧三层棕黄色黄土-古土壤层,对应长江中下游地区第四纪中晚期的下蜀组沉积,与网纹红土层之间似假整合。该段磁化率变化模式与北方黄土-古土壤序列类似,表明季风格局进一步加强,冬季风对该区的影响进一步增强,冰期-间冰期气候反差加大,气候由湿热向干冷转变,呈现冷中见暖的波动,网纹红土的发育已基本停止。用最大熵谱法进行的频谱分析显示⑥~⑧黄土-古土壤层磁化率变化周期约为114 ka(图4),可与“复合氧同位素”和宝鸡黄土-古土壤序列磁化率记录所反映的0.5 Ma B. P. 后确立的100 ka 气候振荡周期相比<sup>[46]</sup>,指示这一时期该区的气候周期性变化特征在一定程度上已经与北方黄土区有了较好的可比性。

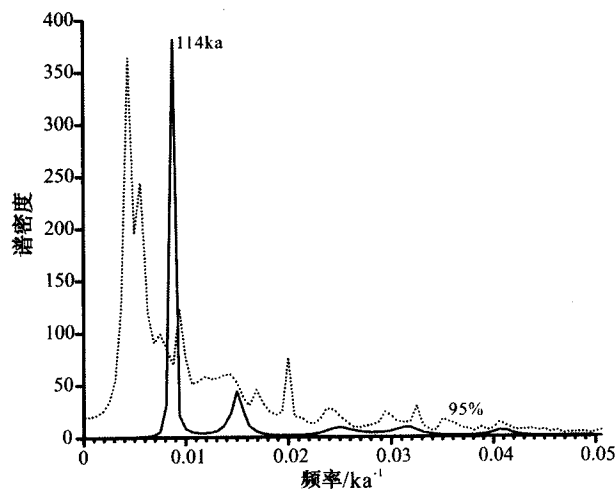


图4 0.44~0.24 Ma B. P. 磁化率频谱分析

Fig. 4 Spectrum analysis of magnetic susceptibility from 0.44 Ma B. P. to 0.24 Ma B. P.

⑥层(0.44~0.33 Ma B. P.)棕黄色黄土层对应了沉积作用加强、风化作用减弱的干冷期。⑦层(0.33~0.29 Ma B. P.)古土壤层指示了一个气候较适宜的暖期,可与北方黄土-古土壤序列中的S3对应,淋溶迹象明显,含大量黑色胶膜,但气候条件已无法与网纹红土发育期相比,前人研究也认为中

更新世后期红土的北界南移至25°N左右,长江中下游地区下蜀土中的古土壤并非真正的红土<sup>[37]</sup>。顶部的第⑧层(0.29~0.24 Ma B. P.)棕黄色黄土层,磁化率与下伏古土壤相比骤减,指示了冬季风强度的快速变化,可对应于北方黄土-古土壤序列中的L3,且其磁化率值较⑥层进一步减小,表明这一时期气候干冷程度进一步加强。鹿化煜等对洛川黄土粗颗粒的研究发现在0.28~0.24 Ma B. P. 间东亚冬季风存在几次强度加强事件<sup>[47]</sup>。前人对九江第四纪红土中植物硅酸体、孢粉和地球化学记录的研究也显示自中更新世以来存在较普遍的气候恶化趋势,气候总体向干、冷方向发展<sup>[43,48]</sup>。

### 3 结论

九江 JL 剖面红土磁化率在数值上具有鲜明的地层差异:典型网纹红土的风化淋溶强度高,磁化率偏小;弱网纹红土、棕黄色土、浅红色古土壤的风化淋溶强度低,磁化率偏高。即网纹红土磁化率发生异常。频率磁化率与磁化率具有较为一致的变化规律,相关性良好,表明红土磁化率与风化成土强度之间仍存在一定的内在联系。目前倾向于认为网纹红土磁化率偏低的异常现象与湿润气候条件和土壤渍水的假潜育环境下铁磁性矿物尤其是超顺磁颗粒的分解、转化、淋失有关。该剖面红土磁化率在数值上的地层差异仍记录了古环境变化信息,网纹层段内磁化率的变化更能反映网纹红土发育期间水分条件的变化。

JL 剖面的磁化率的阶段变化指示了早更新世以来江南地区气候湿润程度的阶段性变化。2.1~1.69 Ma B. P.,东亚季风始现,西南季风和西风带的交替变化占主导地位,气候温湿,不利于铁磁性矿物保留,磁化率为剖面最低。1.7 Ma B. P.,青藏运动C幕隆升之后,西南季风的影响开始减弱,但东亚季风环流格局尚未稳定建立,气候湿润程度有所减弱,磁化率开始增大。1.1 Ma B. P.之后,西南季风的影响进一步减弱,逐步强盛的东南夏季风使气候湿度再次加强,红土磁性再次减弱,至0.9 Ma B. P.,磁化率明显降至较低水平。0.9~0.59 Ma B. P.间磁化率整体偏小,波动较弱,对应了东南夏季风异常强盛期。0.59~0.24 Ma B. P.,东亚季风环流稳定建立,冬季风对江南红土区的影响加强,冰期-间冰期气候反差变大,气候干湿交替明显,有利于磁性矿物

的保留,磁化率快速增大,约 0.4 Ma B. P. 后,网纹红土不再发育,代以棕黄色下蜀组沉积,磁化率高低对应成土作用强弱,东亚季风环流对该区气候变化已具有了较强的控制意义,气候渐趋干冷。

综上所述, JL 红土磁化率所揭示的古环境变化与青藏高原的阶段隆升、季风环流的演变具有一定的耦合性。由此看来,加积型红土磁化率中仍存在较显著的大尺度古环境变化信息。

## 参考文献 (References)

- [1] Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China[J]. *Nature*, 1982, 300: 431-433
- [2] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic susceptibility variations in Chinese loess[J]. *Nature*, 1990, 346: 737-739
- [3] Han Jiamao, Hus J J, Liu Tungsheng, et al. Magnetic properties of the Malan and Lishi formations[J]. *Quaternary Sciences*, 1991, (4): 310-325 [韩家懋, Hus J J, 刘东生, 等. 马兰黄土和离石黄土的磁学性质[J]. 第四纪研究, 1991, (4): 310-325]
- [4] Maher B A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 137(1-2): 25-54
- [5] Hu Xuefeng. Influence of iron oxides and organic matter on magnetic susceptibility in the loess-paleosol sequence[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 7-12 [胡雪峰. “黄土-占土壤”序列中氧化铁和有机质对磁化率的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 7-12]
- [6] Zhao Jun, Lu Huayu, Wang Xiaoyong, et al. Magnetic properties of loess deposit in Eastern Qinling Mountains and an investigation on the magnetic susceptibility enhancement[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(6): 1052-1062 [赵军, 鹿化煜, 王晓勇, 等. 东秦岭地区黄土堆积的岩石磁学特征及磁化率增强机制探索[J]. 沉积学报, 2008, 26(6): 1052-1062]
- [7] Liu X M, Shaw J, Liu T S, et al. Magnetic mineralogy of Chinese loess and its significance[J]. *Geophysical Journal*, 1992, 108(1): 301-308
- [8] An Z S, Kukla G J, Porter S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of central China during the last 130,000 years[J]. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36
- [9] Zhu Rixiang, Li Chunjing, Wu Hanning, et al. Magnetic property of Chinese loess and its paleoclimate significance[J]. *Science in China: Series B*, 1995, 38(2): 238-244
- [10] Sun Y B, Clemens S C, An Z S, et al. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(1-2): 33-48
- [11] Liu Jian, Li Shaoquan, Wang Shengjie, et al. A rock magnetic study of the last deglacial to Holocene sedimentary sequence in the YSDP 105 core on the northeast shelf of the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1997, 17(4): 13-24 [刘健, 李绍全, 王圣洁, 等. 南黄海东北陆架 YSDP 105 孔冰消期以来沉积层序的磁学特征研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(4): 13-24]
- [12] Li Mingqi, Jin Heling, Zhang Hong, et al. Climate change revealed by Magnetic susceptibility and organic matter during the Holocene in Hunshandak Desert[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 683-689 [李明启, 靳鹤龄, 张洪, 等. 浑善达克沙地磁化率和有机质揭示的全新世气候变化[J]. 沉积学报, 2005, 23(4): 683-689]
- [13] Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Wang Sumin. Implication of magnetic frequency dependent susceptibility on environmental variation from lacustrine sediment in Daihai Lake[J]. *Geographical research*, 1998, 17(3): 297-302 [张振克, 吴瑞金, 王苏民. 岱海湖泊沉积物频率磁化率对历史时期环境变化的反映[J]. 地理研究, 1998, 17(3): 297-302]
- [14] Shu Qiang, Li Jijun, Zhao Zhijun, et al. A correlation between magnetic susceptibility and the content of different grain sizes of XH-1# core in North Jiangsu Basin and its significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(2): 276-281 [舒强, 李才林, 赵志军, 等. 苏北盆地浅钻沉积物磁化率与粒度记录的末次冰消期以来的环境变化[J]. 沉积学报, 2006, 24(2): 276-281]
- [15] Zhou Xiaohong, Zhao Jingbo. Climate change was indicated by the magnetic susceptibility in Gaoling Weihe River Floodplain near 120 years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 196-200 [周晓红, 赵景波. 近 120 年来高陵渭河河漫滩沉积物磁化率指示的气候变化[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 196-200]
- [16] Yang Hao, Xia Yingfei, Zhao Qiguo, et al. Magnetic susceptibility characteristic of series red earth profiles and their paleoclimatic changes[J]. 1995, 32(Suppl.): 195-200 [杨浩, 夏应菲, 赵其国, 等. 红土系列剖面的磁化率特征与古气候冷暖变换[J]. 土壤学报, 1995, 32(增刊): 195-200]
- [17] Li Xusheng, Yang Dayuan, Han Huiyou, et al. A preliminary study on the magnetic susceptibility of aeolian dust deposition sequence in the south of Anhui Province[J]. *Journal of Anhui Normal University: Natural Science*, 1998, 21(1): 64-69 [李徐生, 杨达源, 韩辉友, 等. 皖南风尘堆积-古土壤序列磁化率初步研究[J]. 安徽师大学报: 自然科学版, 1998, 21(1): 64-69]
- [18] Hu Xuefeng, Cheng Tianfan, Wu Hexin. Do multiple cycles of aeolian deposit-pedogenesis exist in the reticulate red clay sections in southern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(9): 969-975 [胡雪峰, 程天凡, 巫和听. 南方网纹红土内是否存在多个“沉积-成土”过程的旋回? [J]. 科学通报, 2003, 48(9): 969-975]
- [19] Lü Houyuan, Han Jiamao, Wu Naiqin, et al. Analysis on magnetism and paleoclimate meaning in modern soil of China[J]. *Science in China: Series B*, 1994, 24(12): 1290-1297 [吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. 中国科学: B 辑, 1994, 24(12): 1290-1297]
- [20] Zhu Lidong. Aggradation red earth sediments in mid-subtropics of China and their recorded environmental changes during Quaternary[D]. Gansu: Lanzhou University, 2007 [朱丽东. 中亚热带加积



- 型红土及其所记录的第四纪环境变化探讨[D]. 甘肃:兰州大学,2007]
- [21] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Li Jijun. The Quaternary Glaciations and environmental variations in eastern China[M]. Beijing: Science Press, 1989: 321 - 325 [施雅风, 崔之久, 李吉均, 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 321 - 325]
- [22] Yuan Baoyin, Xia Zhengkai, Li Baosheng, et al. chronostratigraphy and stratigraphic division of red soil in southern china[J]. Quaternary sciences, 2008, 28(1): 1 - 13 [袁宝印, 夏正楷, 李保生, 等. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 1 - 13]
- [23] Lu Shenggao, Yu Jinyan, Zhang Mingkui, et al. Environmental magnetism of magnetic enhancement for soils formed on Quaternary sediments in Yangtze River Valley [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 336 - 340 [卢升高, 俞劲炎, 章明奎, 等. 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]
- [24] Fine P, Singer M J, Verosub K L, et al. New evidence for the origin of ferrimagnetic susceptibility in Loess from China[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 57: 1537 - 1542
- [25] Fine P, Singer M J, Verosub K L. Use of magnetic susceptibility measurements in assessing soil uniformity in chronosequence studies[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 1195 - 1199
- [26] Zhu Lidong, Ye Wei, Li Fengquan, et al. Climatic implication of the chroma of JL red earth section in the Lushan Mountain[J]. Tropical Geography, 2007, 27(3): 193 - 197, 202 [朱丽东, 叶玮, 李凤全, 等. 庐山 JL 红土剖面的色度气候意义[J]. 热带地理, 2007, 27(3): 193 - 197, 202]
- [27] Zhu Lidong, Zhou Shangzhe, Li Fengquan, et al. Geochemical behavior of major elements of Pleistocene red earth in South China [J]. Geochimica, 2007, 36(3): 295 - 302 [朱丽东, 周尚哲, 李凤全, 等. 南方更新世红土氧化物地球化学特征[J]. 地球化学, 2007, 36(3): 295 - 302]
- [28] Jiang Yongjian, Zhu Lidong, Ye Wei, et al. Grain-size volume fractal features and its paleoenvironmental significance for JL red earth section, Lushan area [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(1): 36 - 44 [姜永见, 朱丽东, 叶玮, 等. 庐山 JL 剖面红土粒度体积分形特征及其环境意义[J]. 山地学报, 2008, 26(1): 36 - 44]
- [29] Yin Qiuzhen, Guo Zhengtang. Mid-Pleistocene vermiculated red soils in southern China as an indication of unusually strengthened East Asian monsoon [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(2): 186 - 193 [尹秋珍, 郭正堂. 中国南方的网纹红土与东亚季风的异常强盛期[J]. 科学通报, 2006, 51(2): 186 - 193]
- [30] Huang Li, Hong Jun, Tan Wenfeng, et al. Micromorphology and Element distribution characteristics of iron-manganese cutan in several subtropic soils in Central China[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(9): 1122 - 1129 [黄丽, 洪军, 谭文峰, 等. 我国几种亚热带土壤铁锰胶膜的微形貌和元素分布特征[J]. 自然科学进展, 2006, 16(9): 1122 - 1129]
- [31] Liu X M, Paul Hesse, Tim Rolph, et al. Properties of magnetic mineralogy of Alaskan loess: evidence for pedogenesis[J]. Quaternary International, 1999, 62(1): 93 - 102
- [32] E. I. Virina, S. S. Faustov and F. Heller. Magnetism of loess-palaeosol formations in relation to soil-forming and sedimentary processes[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2000, 25(5): 475 - 478
- [33] Liu Xiuming, Xia Dunsheng, Liu Tungsheng, et al. Discussion on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaskan and Chinese loess [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(2): 210 - 220 [刘秀铭, 夏敦胜, 刘东生, 等. 中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 210 - 220]
- [34] Sheng Gao Lu, Qing Fengxue, Lei Zhu, et al. Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China[J]. Catena, 2008, 73(1): 23 - 33
- [35] Zhang Jianjun, Yang Dayuan, Li Xusheng. Comparative study on the magnetic susceptibility of the Xiashu Loess in the middle and lower Changjiang River region [J]. Journal of East China Geological Institute, 1999, 22(2): 124 - 129 [张建军, 杨达源, 李徐生. 长江中下游地区下蜀黄土磁化率曲线比较研究[J]. 华东地质学院学报, 1999, 22(2): 124 - 129]
- [36] [Wang Naiang. On forming times of east Asia monsoon [J]. Scientia Geographica Sinica, 1994, 14(1): 81 - 89 [王乃昂. 论东亚季风的形成时代[J]. 地理科学, 1994, 14(1): 81 - 89]
- [37] Huang Zhenguo, Zhang Weiqiang, Chen Junhong, et al. Red residuum in south China [M]. Beijing: Ocean Press, 1996: 279 - 303 [黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿, 等. 中国南方红色风化壳[M]. 北京: 海洋出版社, 1996: 279 - 303]
- [38] Li Jijun. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(1): 1 - 11 [李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 1 - 11]
- [39] Li Li, An Zhisheng. Pectrum evolution of summer monsoon recorded on loess plateau during the last 6 Ma and its possible forcing [J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(2): 134 - 146 [李力, 安芷生. 过去 600 万年黄土高原夏季季风周期的阶段性演化及其强迫因子初探[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 134 - 146]
- [40] Ruddiman W F, Raymo M E, Martinson D G, et al. Pleistocene evolution: Northern hemisphere ice sheets and North Atlantic Ocean [J]. Paleogeography, 1989, 4(4): 353 - 412
- [41] Berger W H, Yasuda M K, Bickert T, et al. Quaternary timescale for the Ontong Java Plateau: Milankovitch template for ocean drilling program site 806 [J]. Geology, 1994, 22(5): 463 - 467
- [42] Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: a driver and amplifier of the global climatic change—Ⅲ. The effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on climatic changes [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 1996, 32(1): 108 - 115 [潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器—Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1996, 32(1): 108 - 115]
- [43] Huang Fei, Xiong Shangfa. Phytolith and pollen records of Quater-

- nary red earth in Jiujiang City, Jiangxi province [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2001, 18(2): 203–210 [黄翡,熊尚发. 江西九江第四纪红土中的植物硅酸体及孢粉[J]. 微体古生物学报, 2001, 18(2): 203–210]
- [44] Xiong Shangfa, Ding Zhongli, Liu Dongsheng. The worm-shaped veins in the red earth of South China—Pedological evidence for root traces of past forest [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(12): 1317–1321 [熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 南方红土网纹: 古森林植物根系的土壤学证据[J]. 科学通报, 2000, 45(12): 1317–1321]
- [45] Bloemendal J, Liu X M, Sun Y B, et al. An assessment of magnetic and geochemical indicators of weathering and pedogenesis at two contrasting sites on the Chinese Loess plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 257(1–2): 152–168
- [46] Ding Zhongli, Liu Dongsheng. Climatic correlation between Chinese loess and deep-sea cores in the last 1.8 Ma [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37: 217–220
- [47] Lu Huayu, Huissteden K V, An Zhisheng, et al. Rapid changes in east Asia winter monsoon in early and middle Pleistocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 75–83 [鹿化煜, Huissteden K V, 安芷生, 等. 早、中更新世东亚冬季风强度的快速变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 75–83]
- [48] Xiong Shangfa, Liu Tungsheng, Ding Zhongli. The weathering sequence of the red earth over southern China [J]. *Journal of Mountain Research*, 2000, 18(1): 7–12 [熊尚发, 刘东生, 丁仲礼. 南方红土的剖面风化特征[J]. 山地学报, 2000, 18(1): 7–12]

## Characteristics of Magnetic Susceptibility and Its Paleoenvironmental Records from JL Red Earth Section, Lushan Area

ZHU Lidong<sup>1</sup>, JIANG Yongjian<sup>2</sup>, ZHANG Mingqiang<sup>1</sup>, YE Wei<sup>1</sup>, LI Fengquan<sup>1</sup>, FENG Yixiong<sup>1</sup>

(1. *Geography Process Lab, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China;*

2. *Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China)*

**Abstract:** Magnetic susceptibility is one of the most remarkable indices in researches on Quaternary environment. 920 samples were collected from JL red earth section, Lushan area, Jiangxi province, and susceptibility was measured on all these samples. The results indicate that: (1) The magnetic susceptibility of weak plinthitic red earth and loess-paleosol is rather higher than typical plinthitic red earth, loess-paleosol is 2.88 times the value of plinthitic red earth. The average values of frequency-dependent magnetic susceptibility in different layers varies from 10.09% to 13.71%. Notable positive correlation exists between magnetic susceptibility and frequency-dependent magnetic susceptibility, which shows that superparamagnetic grains formed in pedogenesis contribute significantly to the enhancement of magnetic susceptibility. (2) Pedogenic ferromagnetic minerals are prone to dissolve, transform and leach in pseudogleyization environment caused by damp and soil waterlogging, which results in the abnormality of magnetic susceptibility from plinthitic red earth, so compared with CIA, the variety of magnetic susceptibility along the section displays a reverse trend, but the fluctuation of high and low values is relatively coincident. (3) Based on ESR chronology, generally speaking, the magnetic susceptibility of JL red earth increases by four phases from bottom to top, which reflects the evolution of East Asian monsoon and large-scale paleoenvironmental changes from the early Pleistocene to the late Mid-Pleistocene in Lushan area. The degree of wetness had weakened in fluctuation since early Pleistocene and the climate in Lushan area had transferred from humid-hot to dry-cold since Mid-Pleistocene.

**Key words:** Quaternary; aggradation red earth; magnetic susceptibility; paleoenvironmental records

作者: [朱丽东](#), [姜永见](#), [张明强](#), [叶玮](#), [李凤全](#), [冯义雄](#), [ZHU Lidong](#), [JIANG Yongjian](#), [ZHANG Mingqiang](#), [YE Wei](#), [LI Fengquan](#), [FENG Yixiong](#)

作者单位: [朱丽东, 张明强, 叶玮, 李凤全, 冯义雄, ZHU Lidong, ZHANG Mingqiang, YE Wei, LI Fengquan, FENG Yixiong \(浙江师范大学地理过程实验室, 浙江金华, 321004\)](#), [姜永见, JIANG Yongjian \(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京, 210008\)](#)

刊名: [山地学报](#) **ISTIC** **PKU**

英文刊名: [Journal of Mountain Science](#)

年, 卷(期): 2011, 29(4)

## 参考文献(48条)

1. [Heller F;Liu T S](#) [Magnetostatigraphical dating of loess deposits in China](#)[外文期刊] 1982
2. [Zhou L P;Oldfield F;Wintle A G](#) [Partly pedogenic origin of magnetic susceptibility variations in Chinese loess](#)[外文期刊] 1990
3. [韩家懋;Hus J J;刘东生](#) [马兰黄土和离石黄土的磁学性质](#)[期刊论文]-[第四纪研究](#) 1991(04)
4. [Maher B A](#) [Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols:paleoclimatic implications](#) 1998(1-2)
5. [胡雪峰](#) [“黄土-古土壤”序列中氧化铁和有机质对磁化率的影响](#)[期刊论文]-[土壤学报](#) 2004(01)
6. [赵军;鹿化煜;王晓勇](#) [东秦岭地区黄土堆积的岩石磁学特征及磁化率增强机制探索](#)[期刊论文]-[沉积学报](#) 2008(06)
7. [Liu X M;Shaw J;Liu T S](#) [Magnetic mineralogy of Chinese loess and its significance](#)[外文期刊] 1992(01)
8. [An Z S;Kukla G J;Porter S C](#) [Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of central China during the last 130,000 years](#)[外文期刊] 1991(01)
9. [Zhu Rixiang;Li Chunjing;Wu Hanning](#) [Magnetic property of Chinese loess and its palaeoclimate significance](#) 1995(02)
10. [Sun Y B;Clemens S C;An Z S](#) [Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau](#)[外文期刊] 2006(1-2)
11. [刘健;李绍全;王圣洁](#) [南黄海东北陆架YSDP 105孔冰消期以来沉积层序的磁学特征研究](#) 1997(04)
12. [李明启;靳鹤龄;张洪](#) [浑善达克沙地磁化率和有机质揭示的全新世气候变化](#)[期刊论文]-[沉积学报](#) 2005(04)
13. [张振克;吴瑞金;王苏民](#) [岱海湖泊沉积物频率磁化率对历史时期环境变化的反映](#)[期刊论文]-[地理研究](#) 1998(03)
14. [舒强;李才林;赵志军](#) [苏北盆地浅钻沉积物磁化率与粒度记录的末次冰消期以来的环境变化](#)[期刊论文]-[沉积学报](#) 2009(01)
15. [周晓红;赵景波](#) [近120年来高陵渭河河漫滩沉积物磁化率指示的气候变化](#)[期刊论文]-[水土保持学报](#) 2007(03)
16. [杨浩;夏应菲;赵其国](#) [红土系列剖面的磁化率特征与古气候冷暖变换](#) 1995(增刊)
17. [李徐生;杨达源;韩辉友](#) [皖南风尘堆积-古土壤序列磁化率初步研究](#) 1998(01)
18. [胡雪峰;程天凡;巫和听](#) [南方网纹红土内是否可能存在多个“沉积-成土”过程的旋回](#)[期刊论文]-[科学通报](#) 2003(09)
19. [吕厚远;韩家懋;吴乃琴](#) [中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义](#) 1994(12)
20. [朱丽东](#) [中亚热带加积型红土及其所记录的第四纪环境变化探讨](#)[学位论文] 2007
21. [施雅风;崔之久;李吉均](#) [中国东部第四纪冰川与环境问题](#) 1989
22. [袁宝印;夏正楷;李保生](#) [中国南方红土年代地层学与地层划分问题](#)[期刊论文]-[第四纪研究](#) 2008(01)
23. [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](#)[期刊论文]-[沉积学报](#) 2000(03)
24. [Fine P;Singer M J;Verosub K L](#) [New evidence for the origin of ferrimagnetic susceptibility in Loess from China](#) 1991
25. [Fine P;Singer M J;Verosub K L](#) [Use of magnetic susceptibility measurements in assessing soil uniformity in chronosequence studies](#)[外文期刊] 1992
26. [朱丽东;叶玮;李凤全](#) [庐山JL红土剖面的色度气候意义](#)[期刊论文]-[热带地理](#) 2007(03)
27. [朱丽东;周尚哲;李凤全](#) [南方更新世红土氧化物地球化学特征](#)[期刊论文]-[地球化学](#) 2007(03)
28. [姜永见;朱丽东;叶玮](#) [庐山JL剖面红土粒度体积分形特征及其环境意义](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2008(01)

29. 尹秋珍;郭正堂 [中国南方的网纹红土与东亚季风的异常强盛期](#)[期刊论文]-[科学通报](#) 2006(02)
30. 黄丽;洪军;谭文峰 [我国几种亚热带土壤铁锰胶膜的微形貌和元素分布特征](#)[期刊论文]-[自然科学进展](#) 2006(09)
31. Liu X M;Paul Hesse;Tim Rolph [Properties of magnetic mineralogy of Alaskan loess:evidence for pedogenesis](#)[外文期刊] 1999(01)
32. E. I. Virina;S. S. Faustov;F. Heller [Magnetism of loesspalaeosol formations in relation to soil-forming and sedimentary processes](#) 2000(05)
33. 刘秀铭;夏敦胜;刘东生 [中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨](#)[期刊论文]-[第四纪研究](#) 2007(02)
34. Sheng Gao Lu;Qing Fengxue;Lei Zhu [Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China](#)[外文期刊] 2008(01)
35. 张建军;杨达源;李徐生 [长江中下游地区下蜀黄土磁化率曲线比较研究](#)[期刊论文]-[华东地质学院学报](#) 1999(02)
36. 王乃昂 [论东亚季风的形成时代](#) 1994(01)
37. 黄镇国;张伟强;陈俊鸿 [中国南方红色风化壳](#) 1996
38. 李吉均 [青藏高原的地貌演化与亚洲季风](#)[期刊论文]-[海洋地质与第四纪地质](#) 1999(01)
39. 李力;安芷生 [过去600万年黄土高原夏季风周期的阶段性演化及其强迫因子初探](#)[期刊论文]-[第四纪研究](#) 2001(02)
40. Ruddiman W F;Rgymo M E;Martinson D G [Pleistocene evolution:Northern hemisphere ice sheets and North Atlantic Ocean](#)[外文期刊] 1989(04)
41. Berger W H;Yasuda M K;Bickert T [Quaternary timescale for the Ontong Java Plateau:Milankovitch template for ocean drilling program site 806](#)[外文期刊] 1994(05)
42. 潘保田;李吉均 [青藏高原:全球气候变化的驱动力与放大器-III. 青藏高原隆起对气候变化的影响](#)[期刊论文]-[兰州大学学报\(自然科学版\)](#) 1996(01)
43. 黄翡;熊尚发 [江西九江第四纪红土中的植物硅酸体及孢粉](#)[期刊论文]-[微体古生物学报](#) 2001(02)
44. 熊尚发;丁仲礼;刘东生 [南方红土网纹:古森林植物根系的土壤学证据](#)[期刊论文]-[科学通报](#) 2000(12)
45. Bloemendal J;Liu X M;Sun Y B [An assessment of magnetic and geochemical indicators of weathering and pedogenesis at two contrasting sites on the Chinese Loess plateau](#)[外文期刊] 2008(1-2)
46. Ding Zhongli;Liu Dongsheng [Climatic correlation between Chinese loess and deep-sea cores in the last 1.8Ma](#) 1992
47. 鹿化煜;Huissteden K V;安芷生 [早、中更新世东亚冬季风强度的快速变化](#)[期刊论文]-[海洋地质与第四纪地质](#) 1999(02)
48. 熊尚发;刘东生;丁仲礼 [南方红土的剖面风化特征](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2000(01)

#### 引证文献(1条)

1. 叶玮. 朱丽东. 李凤全. 陈渠. 胡忠行. 王天阳. 滕飞. 杨萍. 张珊珊 [中国亚热带风尘沉积物磁学特征对比研究](#)[期刊论文]-[第四纪研究](#) 2013(5)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sdx201104001.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201104001.aspx)