

# 长江中下游地区第四纪红土磁学特征及其环境意义<sup>①</sup>

邓黄月 郑祥民 杨立辉 任少芳 刘飞

(华东师范大学地理科学学院 上海 200241)

**摘要** 通过采集长江中下游湖南长沙(CS)、岳阳(HN)、江西南昌(NC)、新余(XY)和浙江金华高村(GC)5个剖面不同层位的红土样品,对其粒度和多种磁学参数进行测量和分析,探讨了红土剖面随深度变化的成土作用强弱以及多磁学参数在揭示我国南方红土第四纪气候演化信息的价值。结果表明:①粒度分析显示,红黄土交接带(约28°~31°N)的CS、HN、NC、GC 4个剖面的红土粒度与北方黄土和下蜀黄土有很好的可比性,具有明显的风成特性;位置更偏南的XY剖面红土颗粒较粗,10~50 μm 粒组富集不明显,具有典型的冲积相特征。②各红土剖面的多磁学参数分析表明,成土过程中产生的磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿是红土磁性的主要载体。③同一红土剖面内,不同沉积结构的磁性矿物含量和组成具有很大差异。下部网纹红土中赤铁矿的含量较高,磁赤铁矿的含量较上覆均质红土或黄棕色土低,揭示了网纹红土形成于中国南方一个极端湿润期,长期剧烈的水分活动导致均质红土中磁赤铁矿的溶解和铁质的流失,同时较强的成土作用使强磁性的磁赤铁矿向弱磁性的赤铁矿转化,从而导致网纹红土的磁化率比上覆均质红土或黄棕色土低了一个数量级。④具有冲积相特征的XY剖面磁学特征与其他风尘成因红土(特别是NC剖面)差异甚大,可能成为它具有不同物质来源的一个佐证。

**关键词** 红土 粒度 磁性矿物 环境变化

**第一作者简介** 邓黄月 女 1991年出生 硕士研究生 第四纪环境演变 E-mail: huangyuedeng@163.com

**中图分类号** P532 **文献标识码** A

## 0 引言

沉积物中磁性矿物的种类、粒度及其相对含量往往与沉积物形成时的氧化还原环境及相应的温度、降水等气候条件相关。因此,运用沉积物的磁性特征来构建不同时间尺度下的全球气候演化历史和现代环境监测备受关注<sup>[1-11]</sup>,环境磁学这一新学科也应运而生。目前,环境磁学已成为研究现代环境监测和古环境变迁的重要方法<sup>[11-15]</sup>。

对我国北方黄土—古土壤序列的磁学特征研究发现,黄土地层的磁化率与深海氧同位素对比关系很好,并且与古气候变化的相关性也非常明显。因此,我国北方黄土磁化率可作为反映夏季风强度变化的气候代用指标<sup>[3-6,16]</sup>,并用于海陆对比,定量古气候(古降水)重建,以及古降雨量的分布再现<sup>[17-19]</sup>。

与北方黄土相对应,在我国南方长江中下游地区广泛分布的第四纪红土,其详细记录了我国南方的古地理、古气候环境变迁信息。近年来,不少学者参照黄土磁学的研究方法对南方红土磁学特征进行了大

量研究<sup>[20-23]</sup>,但大多集中于单一的磁化率上,并对磁化率的古气候意义分歧较大。杨浩等<sup>[24]</sup>在研究安徽宣城红土剖面发现,其磁化率可以很好代表2~8个大气旋回,红土磁化率可作为良好的气候代用指标。南京雨花台红土剖面自下而上磁化率逐渐升高,也反映了气候由湿热向温凉转变的总体特征<sup>[25]</sup>。然而,最新研究结果表明<sup>[26-28]</sup>,磁化率与古气候(即成土关键因素温湿条件)并非简单的线性关系,磁化率与古气候温湿条件呈正相关有一定的临界值,当超过这个临界值,强烈的成土作用使得强磁性矿物被溶解被损耗还原成弱磁性的不完整反铁磁性矿物,此时磁化率与古气候呈反相关。吕厚远<sup>[29]</sup>进一步指出这个临界值是在年均温15℃左右,年降水量在1 100 mm左右。由此可见,单一的磁化率指标很难反映我国长江中下游红土形成时的环境演化信息。鉴于此,本文拟通过对我国长江中下游多个红土剖面的多磁学参数测定以及分析,得出其磁性矿物的含量、粒度及其类型特征,并结合粒度数据,探讨长江中下游地区红土随深度变化的成土作用强弱以及网纹红土形成

<sup>①</sup>国家自然科学基金资助项目(批准号:41371032,41201008)与国家理科基地科研训练及科研能力提高项目(编号:J130028)联合资助  
收稿日期:2014-03-11;收修改稿日期:2014-06-11

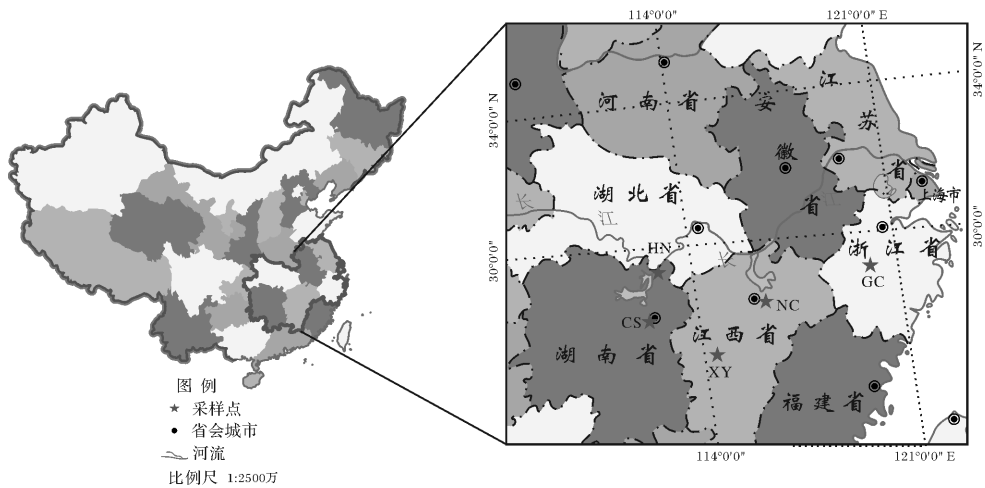


图1 我国长江中下游红土采样点分布图

Fig.1 Sampling sites of the study areas in Yangtze River Valley

时期的古气候信息。

## 1 样品与方法

### 1.1 研究区概况

本文红土样品采自长江中下游湖南长沙、岳阳、江西南昌、新余以及浙江金衢盆地的高村共5个剖面的第四纪红土典型分布区,剖面分布见图1。

长沙(CS)剖面位于长沙市城区华融湘江银行南侧500 m,处于湘江的二级阶地上( $28^{\circ}07'25.45''$  N,  $112^{\circ}56'35.55''$  E),主要由上部的黄棕色土和下部的网纹红土组成,网纹红土层多发育铁锰结核。岳阳(HN)剖面位于环洞庭湖地区( $29^{\circ}26'01.32''$  N,  $112^{\circ}59'42.51''$  E),剖面厚4.2 m,上覆下蜀黄土,厚度不均匀,约为0.7 m,但采样时该黄土层缺失。下部主要由

三部分岩性层组成:顶部为黄棕色黏土层、中部红色网纹红土层及下部为深红色网纹红土,网纹层中富含大量的铁锰胶膜。南昌(NC)剖面位于南昌市政府大楼对面,鄱阳湖湖滨地区( $28^{\circ}38'07.45''$  N,  $115^{\circ}48'49.32''$  E),岩性从上到下为均质红土和网纹红土,并且两者交界处发育了一层铁锰结核密集层。新余(XY)剖面位于南昌市西南方向约140 km,地处赣江一级支流袁水的左岸( $27^{\circ}48'31.33''$  N,  $114^{\circ}54'21.73''$  E),剖面厚2.7 m,由上覆均质红土和下部网纹红土层组成,底部含有砾石。高村(GC)剖面位于浙江金衢盆地金华高村北面高速公路旁( $29^{\circ}08.503'$  N,  $119^{\circ}38.128'$  E),剖面主体由上部薄层均质红土和下部网纹红土组成,交界处仍富集大量铁锰结核。见表1。

表1 第四纪红土采样剖面的位置和特征描述

Table 1 Geographical locations and features of the Quaternary red clay profiles in the study areas

| 剖面代号<br>Symbol of profiles | 经纬度<br>Latitude and longitude | 深度 Depth<br>/cm | 形态特征描述<br>Morphological features |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| CS                         | $28^{\circ}07'25.45''$ N      | 0~100           | 棕黄色土                             |
|                            | $112^{\circ}56'35.55''$ E     | 100~250         | 网纹红土层,大量铁锰结核                     |
| HN                         | $29^{\circ}26'01.32''$ N      | 0~150           | 棕黄色土,富含少量铁锰胶膜                    |
|                            | $112^{\circ}59'42.51''$ E     | 150~200         | 红色网纹红土,富含大量铁锰                    |
|                            |                               | 200~350         | 深红色网纹红土,含少量胶膜                    |
| XY                         | $27^{\circ}48'31.33''$ N      | 0~140           | 均质红土层                            |
|                            | $114^{\circ}54'21.73''$ E     | 140~290         | 网纹红土层,多见结核                       |
| NC                         | $28^{\circ}38'07.45''$ N      | 0~150           | 均质红土层                            |
|                            | $115^{\circ}48'49.32''$ E     | 150~280         | 网纹红土层,结核密集层                      |
| GC                         | $29^{\circ}08.503'$ N         | 0~50            | 均质红土层                            |
|                            | $119^{\circ}38.128'$ E        | 50~270          | 网纹红土层,结核密集层                      |

## 1.2 样品采集与测试

对上述5个红土剖面(CS、HN、NC、XY、GC)进行了间距为10 cm的系统采样,分别采集分析样品25块、35块、28块、29块和27块。首先置于45°C烘箱烘干,然后各分别取两份样品进行不同的前处理。所有样品粒度测试所用仪器为英国Marvern仪器有限公司生产的Mastersizer 2000,在华东师范大学地理系测试,测试精度为0.04~2 000  $\mu\text{m}$ 。

另一份样品烘干后过1 mm筛,并用保鲜膜包好放于圆柱形小盒中,用于磁学测试。磁性测量包括:①弱磁场中的低频磁化率( $\chi_{lf}$ )和高频磁化率( $\chi_{hf}$ );②非磁滞剩磁(ARM)和饱和等温剩磁(SIRM)。根据测量结果计算了质量磁化率( $\chi = \chi_{lf}$ )、频率磁化率( $\chi_{fd}$ ,  $\chi_{fd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100$ )、饱和等温剩磁(SIRM =  $\text{IRM}_{1000\text{MT}}$ )、硬剩磁(HIRM =  $(\text{SIRM} + \text{IRM}_{-300\text{MT}}) / 2$ )、退磁参数 $S_{-100}$ ( $S_{-100} = \text{IRM}_{-100\text{MT}} / \text{SIRM}$ )和 $S_{-300}$ ( $S_{-300} = \text{IRM}_{-300\text{MT}} / \text{SIRM}$ )<sup>[30-33]</sup>。磁化率测量选用英国Bartington MS2型双频磁化率仪测定,剩磁测量采用英国D2000交变退磁仪、MMPM10脉冲磁化仪和Minispin旋转磁力仪测定。以上所有磁学测试均在华东师范大学河口海岸国家重点实验室完成。

## 2 长江中下游红土粒度特征

由表2可以看出,CS、HN、NC、GC这4个红土沉积剖面各粒级百分含量均匀,变化幅度较小,粒度组成特征表现出较好的一致性,且均不含大于2 mm的砾石。首先,4个红土剖面中的大多数样品含砂(63~2 000  $\mu\text{m}$ )量均小于5%,平均值变化范围在0.05%~2.22%。其中上覆黄棕色土的砂含量最小,平均值在0.05%~0.46%之间,而均质红土和网纹红土的砂含量较大,其平均值在0.16%~2.22%之间;第二,粗粉砂组分(10~63  $\mu\text{m}$ )是风尘的“基本粒组”<sup>[34]</sup>。由表2可知,4个剖面中10~63  $\mu\text{m}$ 粒级含量较高,富集最为明显,其含量的平均值变化范围在35.77%~43.98%之间。第三,4个红土剖面的黏粒(<2  $\mu\text{m}$ )含量平均值变化范围为23.83%~26.31%。其中,下覆网纹红土的黏粒含量最高,平均值在15.43%~26.31%之间变化;而上覆棕黄色土和均质红土黏粒含量次之,其平均值分别变化在13.14%~20.07%和18.02%~19.84%之间。根据以上分析,笔者发现该4个红土沉积剖面的各级粒度组分含量及其粒度分布特征与前人研究的安徽宣城<sup>[35]</sup>、江西九江红土<sup>[36]</sup>以及南京周家山下蜀黄土<sup>[37]</sup>有着很好的可比性,并且与北方

灵台<sup>[38]</sup>、洛川<sup>[39]</sup>的黄土粒度特征也很相似。因此,笔者认为该4个红土剖面具有类似黄土的风积成因特性,这与席承藩研究结果一致<sup>[40]</sup>。此外,叶玮等<sup>[41]</sup>通过地球化学元素的方法同样表明,我国长江中下游网纹红土与北方黄土红黏土间存在着物源联系。

然而,江西新余(XY)剖面的粒度组成特征却表现出与上述四个剖面完全不同的性状。该剖面网纹红土中含有砾石(>2 mm颗粒),砂(>63  $\mu\text{m}$ )的平均含量10.58%;黏粒和细粉砂分别为14.87%和34.46%,粗粉砂(10~63  $\mu\text{m}$ )平均含量为37.09%。新余剖面红土粒度粗颗粒含量较高,与其他四个剖面相比粒度略粗,与洛川和灵台黄土粒度组分含量缺乏可比性,但与胡雪峰等<sup>[42]</sup>研究的具有典型冲、洪积相的泰和、赣州网纹红土粒度特征有很好可比性,属河流冲积相。

研究表明,土壤中<2  $\mu\text{m}$ 的黏粒组分与土壤成土作用强度有着很好的正相关关系<sup>[43]</sup>,即黏粒含量就越高,表明成土作用越强。因此,表2所反映的网纹红土黏粒含量明显高于上覆黄棕色土和均质红土,这可能说明了我国长江中下游地区的网纹红土形成时期气候较上覆黄棕色土与均质红土更加湿热,成土作用更强。

## 3 长江中下游地区红土的磁学参数特征

### 3.1 红土的磁性矿物含量特征

沉积物的磁化率( $\chi$ )和饱和等温剩磁(SIRM)可以用来粗略估量样品中磁性矿物含量多少,但也受到磁性矿物颗粒大小和类型的影响<sup>[23,31,44]</sup>。对长江中下游5个剖面磁化率测量表明,上覆黄棕色土和均质红土与下部网纹红土磁化率相差明显,红土磁化率都随深度的增加逐渐减小,网纹红土磁化率值极低,且波动不大,比上覆黄棕色土或均质红土小了一个数量级。5个红土剖面的SIRM变化规律与 $\chi$ 随深度的变化基本一致,都是随深度的增加而降低。可见,在长江中下游红土剖面中,不同沉积层的磁化率发生了明显的分异。上述磁测结果与卢升高等人在云南、浙江西部以及钱塘江地区红土深剖面的磁测结果一致<sup>[23]</sup>,也与安徽宣城<sup>[35]</sup>、江西九江<sup>[36]</sup>典型红土剖面的磁测结果有着很好的可比性。由此可以推测长江中下游广泛分布的红土上覆黄棕色土和均质红土的磁性矿物含量远高于下部网纹红土,且亚铁磁性矿物在均质红土与网纹红土层次间存在着差异,可能是因为均质红土主要以亚铁磁性矿物为主。

表2 长江中下游红土不同沉积结构的粒度特征

Table 2 Grain size composition of Quaternary sediments in Yangtze River Valley

| 地点                 | 剖面代号 | 分层   | 黏土% (<2 μm) | 粉砂(2~63 μm)   |                | 砂% (>63 μm) |
|--------------------|------|------|-------------|---------------|----------------|-------------|
|                    |      |      |             | 细粉砂%(2~10 μm) | 粗粉砂%(10~63 μm) |             |
| 长沙                 | CS   | 棕黄色土 | 20.07       | 43.01         | 36.87          | 0.05        |
|                    |      | 网纹红土 | 20.74       | 43.73         | 34.99          | 0.54        |
| 岳阳                 | HN   | 全剖面  | 20.48       | 43.43         | 35.77          | 0.32        |
|                    |      | 棕黄色土 | 13.14       | 40.02         | 46.37          | 0.47        |
|                    |      | 网纹红土 | 15.43       | 40.15         | 43.80          | 0.62        |
| 南昌                 | NC   | 全剖面  | 15.20       | 40.35         | 43.98          | 0.47        |
|                    |      | 均质红土 | 18.20       | 39.64         | 41.99          | 0.17        |
|                    |      | 网纹红土 | 26.32       | 38.79         | 32.78          | 2.11        |
| 新余                 | XY   | 全剖面  | 21.27       | 39.37         | 38.48          | 0.88        |
|                    |      | 棕黄色土 | 15.24       | 35.47         | 36.93          | 12.36       |
|                    |      | 网纹红土 | 14.76       | 38.10         | 37.10          | 10.04       |
| 高村                 | GC   | 全剖面  | 14.88       | 37.47         | 37.10          | 10.55       |
|                    |      | 均质红土 | 19.84       | 39.88         | 38.06          | 2.22        |
|                    |      | 网纹红土 | 20.89       | 41.45         | 35.83          | 1.83        |
| 宣城 <sup>[35]</sup> | XC   | 全剖面  | 20.56       | 40.27         | 36.52          | 2.65        |
|                    |      | 黄棕色土 | 27.55       | 30.00         | 42.26          | 0.19        |
|                    |      | 网纹红土 | 30.47       | 32.52         | 36.85          | 0.16        |
| 九江 <sup>[36]</sup> | JL   | 黄棕色土 | 18.55       | 26.55         | 52.08          | 2.82        |
|                    |      | 网纹红土 | 27.27       | 35.97         | 35.93          | 0.83        |
|                    |      | 下蜀黄土 | 19.74       | 31.96         | 45.70          | 2.60        |
| 灵台 <sup>[38]</sup> | LT   | 黄土   | 16.67       | 28.77         | 50.90          | 3.66        |
| 洛川 <sup>[39]</sup> | LC   | 黄土   | 14.95       | 23.77         | 55.79          | 5.49        |

ARM 值对样品中磁性矿物的数量和颗粒大小都很敏感,可以反映样品中 SSD 磁性矿物的含量。如图 2 所示,ARM 与  $\chi$  和 SIRM 具有同样的变化趋势,即随深度增加而减小。且上述 5 个红土剖面上覆黄棕色土和均质红土 ARM 的平均值变化在  $48.51 \sim 370.62 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$  之间,下部网纹层 ARM 的平均值则在  $14.2 \sim 50.96 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$  之间变化,明显低于上覆黄棕色土和均质红土。由此表明,我国长江中下游红土剖面中的上覆黄棕色土和均质红土含有较多的 SSD 亚铁磁性矿物,而网纹红土层中却几乎不存在 SSD 亚铁磁性矿物。

### 3.2 红土磁性矿物粒度特征

磁性矿物的粒度对环境极为敏感,因此也可作为环境问题研究的代用指标<sup>[44]</sup>。研究表明,在风化成土过程中,成土作用产生的细颗粒磁性矿物逐渐取代了原生粗粒磁性矿物。频率磁化率( $\chi_{fd}\%$ )可作为土壤中 SP 颗粒浓度的量度。5 个剖面红土频率磁化率如表 3 所示,均质红土频率磁化率介于 12.45%~15.00%之间,黄棕色土频率磁化率介于 10.20%~13.64%之间,而网纹红土频率磁化率则介于 4.07%~10.00%。由此可见,在我国长江中下游广泛分布的红土,其上覆黄棕色土与均质红土频率磁化率一般大于

10%,而下部网纹层较低,一般小于 10%。按照 Fine 和 Singer<sup>[45]</sup>提出的 5%~6%作为 SP 颗粒存在与否的临界指标,则黄棕色土和均质红土层含有较多的 SP 颗粒,网纹红土含有一定数量的或几乎不含 SP 颗粒。进一步的上覆黄棕色土与均质红土的  $\chi$ ,  $\chi_{fd}$  和  $\chi_{ARM}$  相关分析显示, $\chi$  与  $\chi_{fd}$  和  $\chi_{ARM}$  呈显著相关,相关系数都在 0.90 以上<sup>[21]</sup>,即 SP 与 SSD 颗粒是黄棕色土层与均质红土磁化率的主要载体。

Evan 等<sup>[46]</sup>研究表明,由于 SP 颗粒对非磁滞剩磁(ARM)和 SIRM 都没有贡献,因此为避免由于 SP 组分产生的不确定性,所以通常用  $\chi_{ARM}/\text{SIRM}$  来反映亚铁磁性矿物粒度组成,其较低的比值则反映存在较粗的 PSD+MD(假单畴与多畴)颗粒。由表 3 可知,所采 5 个红土剖面的均质红土  $\chi_{ARM}/\text{SIRM}$  平均值介于  $113.70 \sim 204.96 \times 10^{-5} \text{ m/A}$ ,黄棕色土平均值介于  $116.25 \sim 177.78 \times 10^{-5} \text{ m/A}$ ,而网纹红土则介于  $61.44 \sim 117.86 \times 10^{-5} \text{ m/A}$ ,明显低于上覆均质红土和黄棕色土,由此说明网纹红土中含有较粗的磁性颗粒。这与 Hu 等<sup>[47]</sup>研究结果一致。因此,长江中下游网纹红土磁性颗粒变粗是其磁化率低于上覆均质红土或黄棕色土的一个原因。



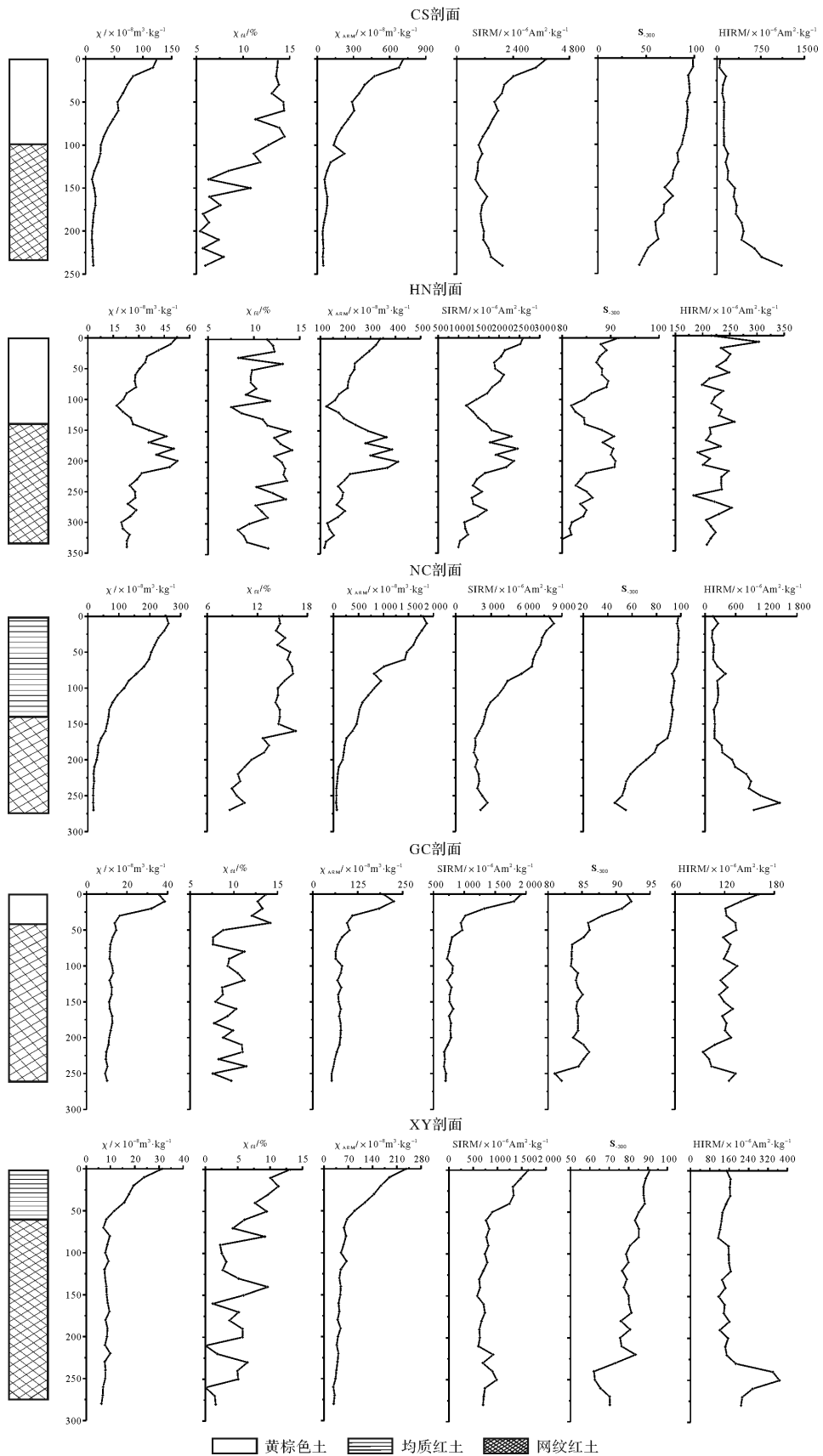


图 2 长江中下游红土剖面各磁学参数随深度变化图

Fig.2 Vertical variations of magnetic parameters of the study areas in Yangtze River Valley

### 3.3 长江中下游第四纪红土氧化铁矿物学特征

磁性矿物的类型有多种判别方法。Thompson<sup>[48]</sup>研究发现,SIRM与 $\chi$ 的散点分布图能指示磁性矿物类型的变化。他认为,当样品中只含有一种磁性矿物或以一种磁性矿物为主时,SIRM与 $\chi$ 具有较好的线性关系;但当样品中有多种磁性矿物存在时,SIRM与 $\chi$ 则不具有明显的相关性。因此,笔者通过对CS、NC、XY红土剖面的SIRM与 $\chi$ 的相关分析表明(图3),在红土剖面上部的黄棕色土或均质红土中,SIRM与 $\chi$ 高度线性相关,而到了下部网纹红土,SIRM与 $\chi$ 无线性关系。因此推测,红土剖面上部的黄棕色土或均质红土主要以一种磁性矿物为主,而下部网纹红土则含有多种磁性矿物类型。为进一步确定矿物类型,

计算了 $S_{-300}$ 和HIRM。 $S_{-300}$ 通常用来反映不完整反铁磁性矿物与亚铁磁性矿物的相对比例。即当 $S_{-300}$ 越小,则表明样品中不完整反铁磁性矿物浓度越大<sup>[49]</sup>。硬剩磁(HIRM)则反映了不完整反铁磁性矿物如赤铁矿、针铁矿的含量。Nie等<sup>[50]</sup>在研究黄土高原红黏土时进一步指出,可以通过HIRM的高低来反映沉积物中赤铁矿的含量。由图2可以看出,5个红土剖面的 $S_{-300}$ 都随深度的增加而减小,而HIRM随深度的增加而增加。再根据计算结果(如表3),长江中下游红土剖面上覆黄棕色土或均质红土 $S_{-300}$ 几乎都在90%左右,说明其磁性颗粒主要以亚铁磁性矿物为主。而网纹红土 $S_{-300}$ 明显降低,HIRM却大幅升高,说明下部网纹红土的不完整反铁磁性矿物含量大幅上升,特别

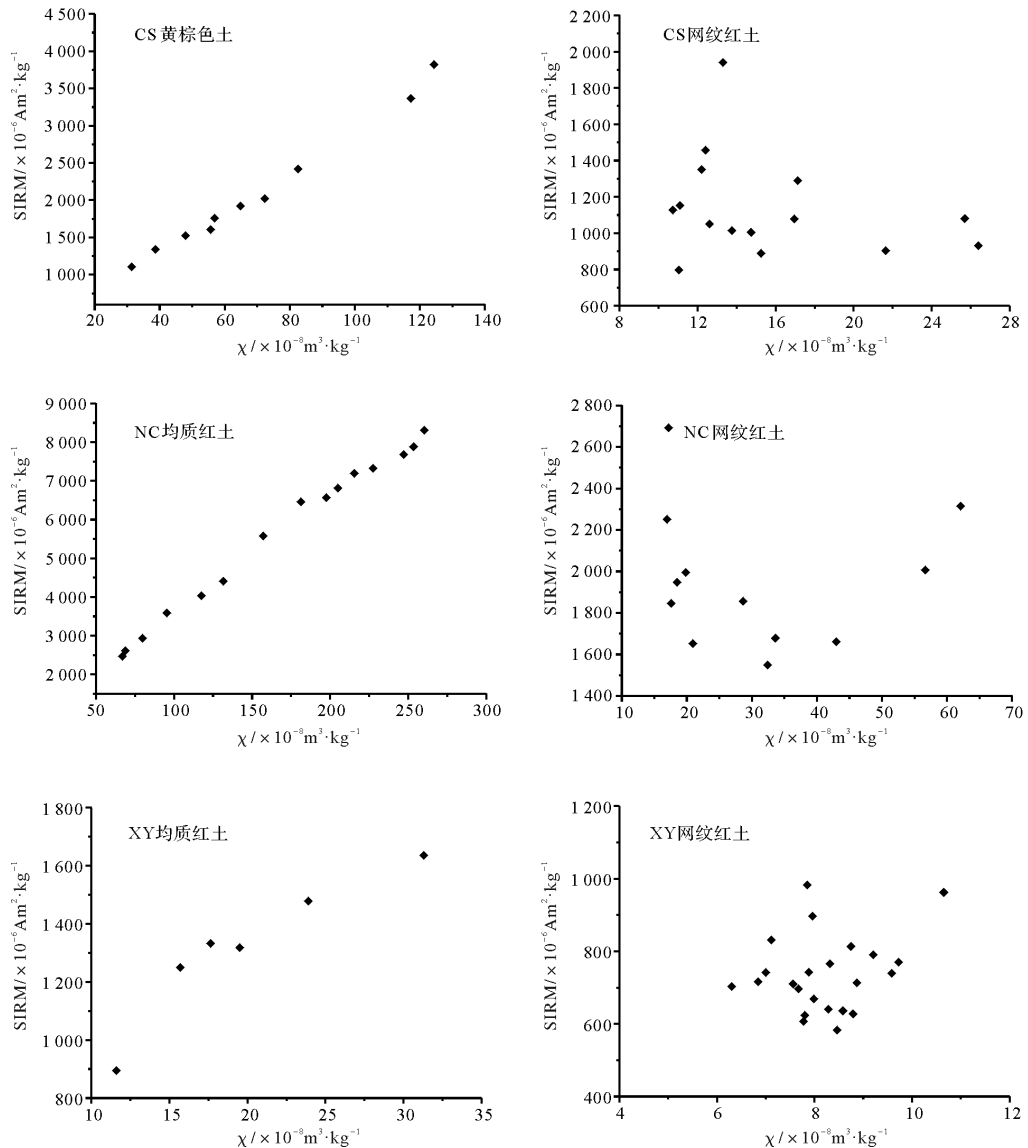


图3 长江中下游红土剖面不同层段磁学参数相关关系

Fig.3 Relationships between magnetic parameters of Quaternary sediments in Yangtze River Valley

表 3 长江中下游红土磁学参数对比表

Table 3 Magnetic parameters of the Quaternary sediments in Yangtze River Valley

| 剖面                      |     | $\chi_{lf}$                         | $\chi_{fd}\%$ | $\chi_{ARM}/\times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ | SIRM                                 | HIRM                                 | S <sub>-100</sub> | S <sub>-300</sub> | $\chi_{ARM}/\chi$ | $\chi_{ARM}/SIRM$                |
|-------------------------|-----|-------------------------------------|---------------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|
|                         |     | $/\times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ |               |   | $/\times 10^{-6} Am^2 \cdot kg^{-1}$ | $/\times 10^{-6} Am^2 \cdot kg^{-1}$ | /%                | /%                |                   | $/\times 10^{-5} M \cdot A^{-1}$ |
| CS 网纹层                  | 最大值 | 26.38                               | 12.73         | 225.31  | 1 939.48                             | 1 108.33                             | 67.00             | 87.17             | 8.77              | 208.61                           |
|                         | 最小值 | 10.74                               | 5.41          | 44.60   | 797.02                               | 119.37                               | 23.45             | 42.85             | 3.69              | 25.70                            |
|                         | 平均值 | 15.66                               | 7.99          | 80.74   | 1 137.43                             | 393.90                               | 42.77             | 67.85             | 4.91              | 76.73                            |
| HN 网纹层下                 | 最大值 | 28.49                               | 11.56         | 198.33  | 1 690.44                             | 253.78                               | 66.19             | 84.99             | 7.03              | 124.80                           |
|                         | 最小值 | 19.72                               | 8.25          | 116.18  | 994.92                               | 206.31                               | 57.32             | 79.10             | 5.08              | 111.41                           |
|                         | 平均值 | 23.46                               | 10.00         | 148.80  | 1 262.52                             | 221.73                               | 61.78             | 82.11             | 6.32              | 117.81                           |
| HN 网纹层上                 | 最大值 | 52.75                               | 14.15         | 410.33  | 2 457.45                             | 247.95                               | 77.14             | 90.97             | 7.87              | 173.45                           |
|                         | 最小值 | 24.71                               | 10.28         | 171.14  | 1 330.43                             | 183.20                               | 63.77             | 82.76             | 6.66              | 121.14                           |
|                         | 平均值 | 37.74                               | 12.77         | 279.22  | 1 851.20                             | 217.73                               | 71.11             | 87.65             | 7.30              | 147.86                           |
| NC 网纹层                  | 最大值 | 62.10                               | 16.58         | 461.14  | 2 693.20                             | 1 459.80                             | 79.38             | 91.77             | 7.43              | 199.27                           |
|                         | 最小值 | 16.97                               | 8.70          | 52.76   | 1 548.81                             | 182.12                               | 14.75             | 45.80             | 3.07              | 19.59                            |
|                         | 平均值 | 29.67                               | 11.46         | 169.47  | 1 966.15                             | 644.85                               | 43.01             | 68.20             | 5.08              | 88.97                            |
| GC 网纹层                  | 最大值 | 13.14                               | 11.43         | 81.29   | 819.69                               | 135.20                               | 63.88             | 86.03             | 6.85              | 101.53                           |
|                         | 最小值 | 9.18                                | 7.61          | 52.66   | 670.61                               | 94.01                                | 57.09             | 80.98             | 5.18              | 75.01                            |
|                         | 平均值 | 11.48                               | 9.39          | 70.37   | 751.22                               | 119.32                               | 61.86             | 84.11             | 6.13              | 93.42                            |
| XY 网纹层                  | 最大值 | 10.65                               | 9.64          | 66.09   | 983.10                               | 367.30                               | 60.69             | 85.31             | 8.05              | 86.35                            |
|                         | 最小值 | 6.30                                | 0.00          | 26.64   | 583.07                               | 114.19                               | 26.55             | 62.11             | 3.66              | 33.66                            |
|                         | 平均值 | 8.22                                | 4.07          | 44.59   | 737.47                               | 174.80                               | 45.39             | 76.53             | 5.42              | 61.44                            |
| PJ 网纹层                  | 最大值 | 33.24                               | 9.68          | 94.41   | 1 796.53                             | 948.72                               | 75.39             | 88.40             | 4.11              | 65.44                            |
|                         | 最小值 | 8.88                                | 4.51          | 33.72   | 885.45                               | 167.37                               | 19.74             | 47.19             | 2.03              | 18.77                            |
|                         | 平均值 | 16.61                               | 7.55          | 49.31   | 1 267.26                             | 419.12                               | 44.62             | 67.79             | 3.23              | 39.58                            |
| JL 网纹层                  | 最大值 | 33.42                               | 11.58         | 279.38  | 4 942.75                             | 3 234.13                             | 75.41             | 87.87             | 8.40              | 134.77                           |
|                         | 最小值 | 6.65                                | 1.77          | 19.44   | 606.04                               | 165.92                               | 10.33             | 34.57             | 2.23              | 40.60                            |
|                         | 平均值 | 17.20                               | 6.73          | 105.57  | 1 694.30                             | 603.92                               | 47.78             | 70.10             | 5.74              | 75.35                            |
| CS 黄棕色土                 | 最大值 | 124.30                              | 14.47         | 714.82  | 3 820.00                             | 152.00                               | 90.14             | 98.72             | 5.77              | 201.15                           |
|                         | 最小值 | 31.36                               | 11.34         | 159.82  | 1 104.93                             | 43.13                                | 70.81             | 88.92             | 5.10              | 144.65                           |
|                         | 平均值 | 69.19                               | 13.64         | 381.98  | 2 087.58                             | 104.35                               | 80.60             | 93.92             | 5.43              | 177.78                           |
| HN 黄棕色土                 | 最大值 | 52.19                               | 13.97         | 339.05  | 2 587.67                             | 303.63                               | 78.60             | 91.65             | 9.05              | 159.85                           |
|                         | 最小值 | 16.99                               | 7.51          | 124.02  | 1 190.96                             | 199.00                               | 58.10             | 81.85             | 6.50              | 102.31                           |
|                         | 平均值 | 30.93                               | 10.62         | 230.75  | 1 858.13                             | 234.16                               | 69.17             | 86.94             | 7.58              | 123.58                           |
| NC 均质红土                 | 最大值 | 260.40                              | 16.26         | 1 866.21                                      | 8 306.40                             | 397.52                               | 92.42             | 98.22             | 7.53              | 230.07                           |
|                         | 最小值 | 66.87                               | 14.18         | 493.54  | 2 465.87                             | 130.46                               | 80.98             | 91.98             | 5.18              | 145.98                           |
|                         | 平均值 | 167.02                              | 15.00         | 1 164.00                                      | 5 589.88                             | 208.92                               | 87.71             | 95.52             | 6.99              | 204.96                           |
| GC 均质红土                 | 最大值 | 38.61                               | 14.18         | 225.22  | 1 919.28                             | 161.53                               | 81.14             | 92.25             | 6.96              | 139.33                           |
|                         | 最小值 | 13.99                               | 8.78          | 95.34   | 944.05                               | 121.05                               | 64.63             | 85.90             | 5.53              | 100.99                           |
|                         | 平均值 | 25.22                               | 12.45         | 152.35  | 1 328.41                             | 135.33                               | 72.22             | 89.11             | 6.27              | 113.70                           |
| XY 黄棕色土                 | 最大值 | 31.30                               | 13.10         | 236.81  | 1 636.00                             | 165.70                               | 76.17             | 90.87             | 8.41              | 144.75                           |
|                         | 最小值 | 11.60                               | 7.64          | 87.94   | 895.20                               | 132.20                               | 62.88             | 85.23             | 7.52              | 94.50                            |
|                         | 平均值 | 19.94                               | 10.20         | 156.56  | 1 318.24                             | 153.30                               | 69.39             | 88.09             | 7.86              | 116.25                           |
| PJ 黄棕色土 <sup>[56]</sup> | 最大值 | 171.10                              | 11.28         | 445.34  | 7 283.64                             | 284.21                               | 88.75             | 96.48             | 3.58              | 146.03                           |
|                         | 最小值 | 55.78                               | 8.62          | 138.93  | 1 610.82                             | 120.84                               | 79.86             | 91.79             | 2.49              | 60.75                            |
|                         | 平均值 | 106.76                              | 11.19         | 327.01  | 4 587.35                             | 298.15                               | 79.92             | 94.42             | 3.06              | 100.74                           |
| JL 黄棕色土 <sup>[56]</sup> | 最大值 | 146.29                              | 13.03         | 1 183.74                                      | 10 401.59                            | 483.89                               | 87.63             | 98.20             | 10.17             | 152.58                           |
|                         | 最小值 | 23.00                               | 4.71          | 193.88  | 1 932.50                             | 156.31                               | 69.29             | 87.76             | 6.55              | 65.50                            |
|                         | 平均值 | 66.97                               | 12.55         | 553.38  | 4 549.72                             | 298.19                               | 79.54             | 92.60             | 8.32              | 121.15                           |
| 赣州均质红土 <sup>[56]</sup>  |     | 299.50                              | 10.77         | 202.34  | 1 161.56                             | 54.31                                | 86.18             | 95.32             | 6.80              | 174.19                           |

是网纹红土中赤铁矿含量大量增加。

## 4 讨论

中国长江中下游广泛分布的第四纪红土是在古湿热气候条件下风化作用的产物,是第四纪以来中国南方环境变化与气候变迁的最详细记录之一<sup>[40,51]</sup>。完整的第四纪红土剖面主要由具有不同沉积结构的均质红土、黄棕色土与网纹红土组成<sup>[52]</sup>。但由于地形、新构造运动、侵蚀等原因,造成有的剖面缺失黄棕色土,而有些剖面缺失均质红土。Van<sup>[53]</sup>通过古地磁方法结合古地理数据重建红土沉积物的相对古地理位置分布时,进一步提出第四纪红土主要分布在古赤道南北纬 30°N 之间,并表明这与热带—亚热带气候条件有着很大的相关性,特别是红土层中网纹红土(以红色和白色网纹镶嵌为特征的古土壤)的形成与中更新世中国南方古气候有着密切的联系,许多学者做了很多相关的研究<sup>[54-56]</sup>。

土壤磁性取决于成土过程,而成土过程中的母岩风化和土壤发育两个过程都受温度、降水、微生物、植被等环境因子的影响。因此,近年来,环境磁学已被广泛应用于我国南北方沉积物记录古环境信息的提取。在我国北方黄土—古土壤以及现代表土的研究结果揭示,随着风化作用的增强,产生了大量的 SP 和 SD 亚铁磁性颗粒,导致磁化率增强。但是,磁化率与成土作用的强弱并不成简单的线性关系。当风化达到一定强度时,磁化率反而会降低,此现象在前人研究的江西九江红土、镇江下蜀黄土底部风化最强层次都有所表现。我国长江中下游广泛分布的红土位于亚热带地区,地理位置较北方黄土偏南,现代气候较黄土分布区湿润,风化作用强烈。因此,对我国南方红土磁学记录的解读不能简单套用黄土模式和单一地依靠磁化率指标。

### 4.1 红土剖面不同沉积层的磁学特征对比

如表 3 所示,我国长江中下游红土中均质红土的 X 比网纹红土大一个数量级,黄棕色土 X 介于两者之间,说明均质红土的磁性矿物含量最多。就磁性矿物的类型而言,长江中下游黄棕色土的 SIRM 平均值介于  $1\ 858.13 \sim 4\ 587.35 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ,  $S_{300}$  平均值介于 86.94%~94.42%;均质红土的 SIRM 平均值大都小于黄棕色土,介于  $1\ 161.56 \sim 1\ 328.41 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$  之间,  $S_{300}$  平均值介于 72.22%~87.71%,略小于黄棕色土;而网纹红土的 SIRM 和  $S_{300}$  的平均值分别介于  $737.47 \sim 1\ 694.30 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$  和 68.20%~86.25%之

间,明显低于上覆黄棕色土和均质红土。进一步说明在黄棕色土和均质红土中亚铁磁性矿物占优势,而网纹红土中亚铁磁性矿物明显减少。另一方面,长江中下游各红土剖面网纹红土的 HIRM 平均值明显高于黄棕色土与均质红土,且约为黄棕色土的两倍,说明网纹红土中以不完整反铁磁性矿物为主。此外,卢升高<sup>[57]</sup>通过中国南方红土的 XRD 衍射图谱研究表明,红土磁性的主要载体为磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿和针铁矿,网纹红土低的磁化率值是因为含有较多高矫顽力的赤铁矿和针铁矿。胡忠行<sup>[54]</sup>、刘彩彩<sup>[55]</sup>和叶玮<sup>[56]</sup>等对南方红土的热磁研究也得出相同的结论。即黄棕色土与均质红土的磁滞回线在 300mT 左右趋于闭合,网纹红土层有着较高的矫顽力和赤铁矿的居里温度,说明长江中下游红土剖面上覆黄棕色土层与均质红土层中含有较多的亚铁磁性矿物,如磁铁矿和磁赤铁矿;而网纹红土则以不完整反铁磁性矿物赤铁矿为主。

### 4.2 网纹红土低磁化率的形成及其环境意义

关于长江中下游网纹红土低磁化率的原因,纵说纷纭。早期学者认为红壤形成于潜育化过程<sup>[58]</sup>,磁化率变化反应的是地下水波动的程度,并不是成土作用的强度,网纹红土低的磁化率是由于铁迁移、铁淋失引起的,红土磁化率不能作为古气候的替代指标<sup>[59]</sup>。卢升高<sup>[11,21-23,57]</sup>对中国长江中下游广泛分布的第四纪红土做了大量环境磁学的工作,他认为网纹红土磁化率降低的主要原因是中国南方高温湿热的气候条件使强磁性矿物向弱磁性矿物转化以及 SP、SD 磁性矿物的破坏淋失。后来,随着研究的深入,学者们找到了更为详细的解释。一些学者认为网纹红土红白网纹的形成与地下水的活动有关<sup>[47,59]</sup>。由于多水而具明显干湿交替的气候环境导致地下水位的季节性升降,使红土的氧化—还原、膨胀—收缩交替进行,为铁的迁移提供了条件,从而形成网纹特征。尹秋珍和郭正堂<sup>[60]</sup>通过对红土的土壤微形态学、黏土矿物学和土壤化学等方法研究表明,中国南方网纹红土中的铁几乎全部迁移且很少再次沉淀,说明它形成于降水更充沛,土壤淋滤作用更强,排水条件更好(网纹红土剖面下部砾石层)的气候和地形地貌条件下。因此单一潜育化土壤中的磁性矿物溶解机制不能解释具有地带性分布的我国南方红土,红土磁化率对我国南方古气候有一定的指示意义。Han 等<sup>[61]</sup>也认为在高温高湿的条件下,由于风化作用的加强,亚铁磁性矿物向反铁磁性矿物转化,从而可以导致磁性



参数的降低。近年来,大量的红土热磁研究也得到同样的结果<sup>[20,55-56]</sup>,即强烈的成土作用下使得强磁性的亚铁磁性矿物向赤铁矿转化。因此,网纹红土中大量高矫顽力的赤铁矿是造成其磁化率低的一个重要原因。

根据以上的分析,笔者认为长江中下游网纹红土磁化率异常降低一方面是与阿拉斯加古土壤<sup>[26-27]</sup>以及江苏镇江 ZK 剖面下部磁化率<sup>[62]</sup>低值有着相似的成因机制,即都是处于还原环境中,由于铁的迁移、淋

失,这时较强磁性的磁铁矿和磁赤铁矿被溶解从而导致磁化率与成壤作用强度呈负相关;另一方面,笔者认为单一的磁铁矿和磁赤铁矿被溶解难以解释网纹红土高的 HIRM。Liu 等<sup>[49]</sup>提出,当 L-ratio 与 HIRM 不存在相关性时,HIRM 可以用来反映样品中赤铁矿和针铁矿的含量。如图 4 所示,长江中下游各红土剖面中的网纹红土 L-ratio 与 HIRM 相关性并不显著,因此,我国长江中下游网纹红土中高的 HIRM 值可以反映含有大量赤铁矿的存在。

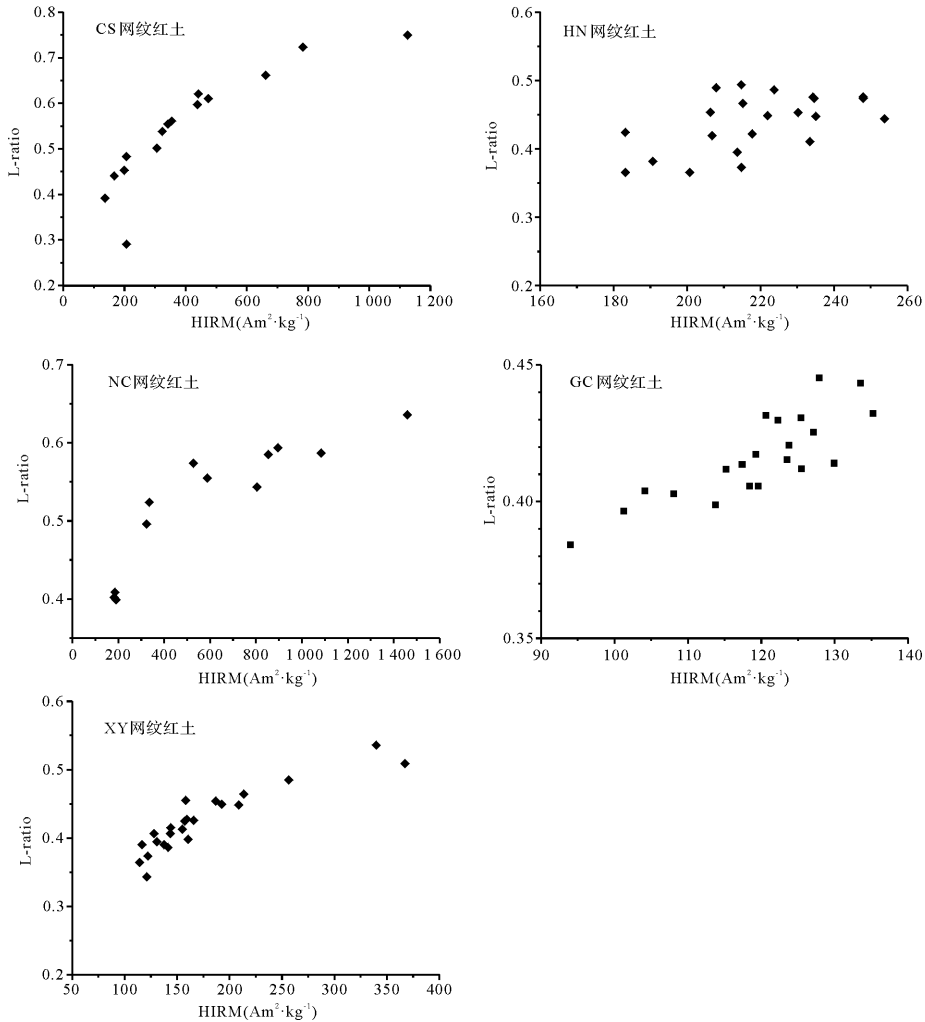


图 4 长江中下游网纹红土 HIRM 与 L-ratio 的相关关系

Fig.4 Relationships between HIRM and L-ratio of Vermicular Red Earth in Yangtze River Valley

据此,我们可以认为网纹红土是在高湿或滞水还原条件下铁的迁移、淋失以及转化(即强磁性的亚铁磁性矿物还原成弱磁性矿物)共同形成的。首先,假潜育化满足了这种高湿或滞水的还原条件。但是假潜育化这一土壤过程并不具备地带性,它只与水文条件和局部地形有关,而我国长江中下游地区广泛分布

的网纹红土则表现为一种强烈的地带性特征,说明高湿或滞水的现象应该是降水量增加所导致的。如果某个时期降水丰富,那么就可能造成这个时期的网纹红土中强磁性的亚铁磁性矿物溶解还原成弱磁性的不完整反铁磁性矿物,并且铁矿物发生强烈的迁移、淋失。因此,在这个意义上说,中国南方地区网纹红

土中磁化率的降低和含量较高的高矫顽力矿物可能代表中国南方一个降水比较丰富的时期,此时网纹红土的成土作用强于上覆黄棕色土和均质红土,这与前文网纹红土中黏粒含量所反映成土作用强的结论是一致的。尹秋珍等<sup>[60]</sup>也从地球化学元素和黏土矿物学方面证明的这一点,即中国南方网纹红土形成于东亚夏季风环流一个极端强盛期。并且这一气候事件在北半球其他地区也有相似的记录。例如:赤道印度洋有孔虫氧同位素<sup>[63]</sup>也显示了当时强盛的非洲季风和印度洋季风;贝加尔湖在 MIS 15a-11 段存在连续的间冰期生物组合<sup>[64]</sup>。

#### 4.3 不同成因红土剖面磁性特征对比

新余(XY)剖面位于南昌(NC)剖面西南 140 km 处,两剖面都位于鄱阳湖地区,年平均气温在 17℃ 左右,年降雨量 1 400 mm 左右,都属亚热带湿润气候,温湿条件没有本质的区别,但是两者磁性特征却相差甚远。并且,XY 红土剖面的磁化率与其他红土剖面的磁化率也具有明显的差异,其磁化率平均值也是最低的。如表 3 所示,NC 剖面均质红土磁化率介于  $66.87 \sim 260.40 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  之间,平均值为  $167.02 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,网纹层磁化率介于  $16.97 \sim 62.10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,平均值为  $29.67 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ;新余剖面上覆黄棕色土磁化率介于  $11.6 \sim 31.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  之间,平均值为  $11.6 \sim 19.64 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,下部网纹层磁化率介于  $6.3 \sim 10.65 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,平均值为  $8.22 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。可以看出,无论是均质红土层,还是下覆网纹层,新余红土磁化率都远小于比南昌红土。因此,我们初步判定可能有两个方面的原因:一是 XY 剖面上部无黄棕色土层,均质红土由于侵蚀而层次薄;二是因为 XY 剖面颗粒较粗,具有与 NC 不同的物质来源。当然,关于该方面的推论有待更加深入的地球化学元素指标的研究。

## 5 结论

前人对中国南方红土的形成、地球化学以及环境变化等方面进行了研究,并取得了一些认识和成果。本文通过对我国长江中下游多个红土剖面的多磁学参数测定和分析,得出其磁性矿物的含量、粒度以及类型特征,以及同一红土剖面不同沉积结构所代表的环境意义。

(1) 5 个红土剖面的粒度分析结果显示,长沙、岳阳、南昌和高村 4 个红土剖面的物质组成整体较细,“风尘基本粒组”富集,与洛川、灵台黄土以及江

苏镇江下蜀黄土在组成上具有很好的相似性,是风成成因的红土。而位置偏南的新余剖面(27° N 左右),粗颗粒含量较高,含有大量砾石,具有流水作用的痕迹,是水成成因的红土。

(2) 5 个红土剖面的岩石磁学结果显示,成土过程中产生的磁性矿物(包括磁铁矿、磁赤铁矿)是红土磁性的主要载体。同一红土剖面中,网纹红土磁化率比上覆黄棕色土或均质红土低一个数量级。

(3) 红土的多磁学参数及其相关关系表明,网纹红土磁化率低有两方面的原因。一是网纹红土在还原条件下铁的大量淋失和迁移;二是在高温湿热的条件下,较强磁性的亚铁磁性矿物被还原成弱磁性的赤铁矿(网纹红土中 HIRM 值较高)。这可能说明了我国长江中下游广泛分布的红土形成于一个东亚季风异常强盛的极端湿润期,较湿热的条件导致较强的成土作用使得强磁性磁赤铁矿向弱磁性赤铁矿转化,同时充沛的降水导致红土中铁大量迁移和淋失,从而导致网纹红土磁化率比上覆黄棕色土或均质红土低了一个数量级。

(4) 新余剖面磁学特征与其他具有风成成因的红土剖面相差甚大,特别是与其相近的南昌剖面。一方面是因为新余剖面无黄棕色土层,由于侵蚀等原因造成均质红土层薄的缘故;另一方面可能是因为新余具有不同的物质来源。因此磁化率可以作为新余红土与其他剖面具有不同物质来源的佐证,进一步的证明还需地球化学元素指标的研究。

致谢 感谢本文审稿专家和编辑提出的宝贵意见;感谢磁学测试过程中华东师范大学河口海岸所重点实验室给予的支持和帮助;感谢在成文和修改过程中课题组的其他同学提出的宝贵意见。

#### 参考文献 (References)

- Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China[J]. *Nature*, 1982, 300(5891): 431-433.
- Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese Loess[J]. *Nature*, 1990, 346(6286): 737-739.
- 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.
- 安芷生, Porter S, Kukla G, 等. 最近 13 万年黄土高原季风变迁的磁化率证据[J]. *科学通报*, 1990, 35(7): 529-532. [An Zhisheng, Porter S, Kukla G, et al. Magnetic susceptibility evidence of season winds changes on loess plateau during the late 139kyr[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(7): 529-532.]

- 5 邓成龙,刘青松,潘永信,等. 中国黄土环境磁学[J]. 第四纪研究, 2007,27(2):193-209. [Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxing, et al. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(2): 193-209.]
- 6 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. [Wei Haitao, Banerjee S K, Xia Dunsheng, et al. Magnetic characteristics of loess-paleosol sequences on the north slope of the Tianshan Mountains, northwestern China and their paleoclimatic implications[J]. Chinese Journal Geophysics, 2013, 56(1): 150-158.]
- 7 安芷生, 张培震, 王二七, 等. 中新世以来我国季风—干旱环境演化与青藏高原的生长[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 678-693. [An Zhisheng, Zhang Peizhen, Wang Erqi, et al. Changes of the monsoon-arid environment in China and growth of the Tibetan Plateau since the Miocene[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(5): 678-693.]
- 8 吴翼, 朱照宇, 邱世藩, 等. 1.95~0.40 Ma 黄土高原东南部风成沉积记录的亚洲冷干化进程[J]. 科学通报, 2013, 58(27): 2823-2831. [Wu Yi, Zhu Zhaoyu, Qiu Shifan, et al. A rock magnetic record of Asian cooling and aridification processes during 1.95~0.40 Ma in the southeastern Chinese Loess Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(27): 2823-2831.]
- 9 朱立平, 陈玲, 张平中, 等. 环境磁学反映的藏南沉错地区 1300 年来冷暖变化[J]. 第四纪研究, 2001, 21(6): 520-527. [Zhu Liping, Chen Ling, Zhang Pingzhong, et al. Cold/warm fluctuations of the last 1300 years reflected by environmental magnetism in the Chen Co area, southern Tibet[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(6): 520-527.]
- 10 李永涛, 顾延生, 曲赞. 武汉天兴洲近代沉积物的磁性特征及其环境意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2011, 36(4): 779-788 [Li Yongtao, Gu Yansheng, Qu Zan. Magnetic properties of recent sediments at Tianxing central shoal of Wuhan: implication for sedimentary environment change in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2011, 36(4): 779-788]
- 11 卢升高, 白世强. 杭州城区土壤的磁性与磁性矿物学及其环境意义[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 762-769. [Lu Shenggao, Bai Shiqiang. Magnetic characterization and magnetic mineralogy of the Hangzhou urban soils and its environmental implications[J]. Chinese Journal Geophysics, 2008, 51(3): 762-769.]
- 12 田庆春, 杨太保, 张述鑫, 等. 青藏高原腹地湖泊沉积物磁化率及其环境意义[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 143-150. [Tian Qingchun, Yang Taibao, Zhang Shuxin, et al. Magnetic susceptibility and its environmental significance of lake sediments in Tibet Plateau[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 143-150.]
- 13 王心源, 吴立, 张广胜, 等. 安徽巢湖全新世湖泊沉积物磁化率与粒度组合的变化特征及其环境意义[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 548-553. [Wang Xinyuan, Wu Li, Zhang Guangsheng, et al. Characteristics and environmental significance of magnetic susceptibility and grain size of lacustrine sediments since Holocene in Chaohu Lake, Anhui province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(4): 548-553.]
- 14 伏捷, 李永化, 张华, 等. 辽东半岛晚新生代沉积物磁化率特征及初步解释[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(3): 135-141. [Fu Jie, Li Yonghua, Zhang Hua, et al. Characteristic of magnetic susceptibility and its primary interpretation of Late Cenozoic sediments in Liaodong Peninsula[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(3): 135-141.]
- 15 张英, 夏敦胜, 赵瑞瑞, 等. 新疆博斯腾湖湖滨沉积物的磁学特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(4): 93-102. [Zhang Ying, Xia Dunsheng, Zhao Ruirui, et al. Magnetic properties of the lakeshore sediments of the Bosten Lake, Xinjiang China and their environmental implications[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 33(4): 93-102.]
- 16 Hao Qingzhen, Guo Zhengtang. Spatial variations of magnetic susceptibility of Chinese loess for the last 600 kyr: implications for monsoon evolution[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005, 110(B12): B12101, doi: 10.1029/2005JB003765.
- 17 刘志锋, 刘青松. 陕西延安两个坡度不同土壤剖面磁学性质及其在古降雨量重建中的意义[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2013, 43(12): 2037-2048. [Liu Zhifeng, Liu Qingsong. The magnetic properties of different soil profiles and its significance in ancient rainfall reconstruction in Shannxi Xi'an[J]. Science China (Series D): Earth Sciences, 2013, 43(12): 2037-2048.]
- 18 Liu Zhifeng, Liu Qingsong, Torrent J, et al. Testing the magnetic proxy  $X_{FD}/HIRM$  for quantifying paleoprecipitation in modern soil profiles from Shanxi Province, China[J]. Global and Planetary Change, 2013, 110(Part C): 368-378.
- 19 魏海涛, 夏敦胜, 陈发虎, 等. 黄土高原及相邻地区表土磁化率与降水量的关系[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 433-439. [Wei Haitao, Xia Dunsheng, Chen Fahu, et al. Relationship between the magnetic susceptibility of surface soil and precipitation of Loess Plateau and adjacent area[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(3): 433-439.]
- 20 朱丽东, 姜永见, 张明强, 等. 庐山 JL 剖面红土磁化率特征及古环境记录[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 385-394. [Zhu Lidong, Jiang Yongjian, Zhang Mingqiang, et al. Characteristics of magnetic susceptibility and its paleo-environmental records from JL red earth section, Lushan area[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(4): 395-394.]
- 21 卢升高. 中国南方红土环境磁学[J]. 第四纪研究, 2008, 27(6): 1016-1022. [Lu Shenggao. Environmental magnetism of Quaternary red Earth in the southern China[J]. Quaternary Sciences, 2008, 27(6): 1016-1022.]
- 22 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. [Lu Shenggao. Characterization of magnetism and iron oxide minerals of Quaternary red earth and its paleo-environmental implications[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(2): 182-191.]
- 23 卢升高, 董瑞斌, 俞劲炎, 等. 中国东部红土的磁性及其环境意义[J]. 地球物理学报, 1999, 42(6): 764-771. [Lu Shenggao, Dong Ruibin, Yu Jinyan, et al. Magnetic measurement characterisation of red earth profile in eastern China and its environmental implications[J]. Chinese Journal Geophysics, 1999, 42(6): 764-771.]

- 24 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2):195-200. [Yang Hao, Xia Yingfei, Zhao Qiguo, et al. The character of magnetic susceptibility of red earth profile in South China and palaeo-climate changes[J]. Acta Pedologica Sinica, 1995, 32(Suppl. 2): 195-200.]
- 25 袁大刚,张甘霖.雨花台红土的磁化率特征及其古环境意义[J].土壤,2008,40(1):110-113. [Yuan Dagang, Zhang Ganlin. Characterization of magnetic susceptibility of red Earth at Yuhuatai and its paleo-environmental implications [J]. Soils, 2008, 40(1): 110-113.]
- 26 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. [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.]
- 27 刘秀铭,刘东生,夏敦胜,等.中国与西伯利亚黄土磁化率古气候记录—氧化和还原条件下的两种成土模式分析[J].中国科学(D辑):地球科学,2007,37(10):1382-1391. [Liu Xiuming, Liu Tungsheng, Xia Dunsheng, et al. Two pedogenic models for paleoclimatic records of magnetic susceptibility from Chinese and Siberian Loess [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2007, 37(10): 1382-1391.]
- 28 Dearing J A, Livingstone I P, Bateman M D, et al. Palaeoclimate records from OIS 8.0-5.4 recorded in loess-palaeosol sequences on the Matmata Plateau, southern Tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating[J]. Quaternary International, 2001, 76-77: 43-56.
- 29 吕厚远,韩家懋,吴巧琴,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. [Lü Houyuan, Han Jiamao, Wu Qiaoqin, et al. Analysis on magnetism and paleo-climate meaning in modern soil of China[J]. Science China (Seri. B), 1994, 24(12): 1290-1297.]
- 30 钱鹏,郑祥民,王晓勇,等.江苏南通黄泥山黄土粒度与环境磁学特征及其成因[J].海洋地质与第四纪地质,2010,30(1):109-114. [Qian Peng, Zheng Xiangmin, Wang Xiaoyong, et al. Particle sizes, magnetic properties and origins of loess deposits from Huangnihan Hill in Nantong, Jiangsu province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(1): 109-114.]
- 31 李勇,李海燕,白凌燕,等.发育于石英岩之上的表土磁学性质及其环境磁学意义[J].土壤,2009,41(1):60-66. [Li Yong, Li Haiyan, Bai Lingyan, et al. Magnetic property and environmental magnetism significance of surface soil derived from quartzite [J]. Soils, 2009, 41(1): 60-66.]
- 32 贾松伟,韦方强.利用磁性参数诊断泥石流沟道沉积物来源——以云南蒋家沟流域为例[J].泥沙研究,2009(1):54-59. [Jia Songwei, Wei Fangqiang. Tracing sediment sources using magnetic measurements—A case study of Jiangjiagou valley, Yunnan province [J]. Journal of Sediment Research, 2009(1): 54-59.]
- 33 王辉,郑祥民,王晓勇,等.长江中下游干流河底沉积物环境磁性特征[J].第四纪研究,2008,28(4):640-648. [Wang Hui, Zheng Xiangmin, Wang Xiaoyong, et al. Environmental magnetic properties of sediments from middle and lower reaches of Changjiang River [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 640-648.]
- 34 刘东生,等.黄土与环境[M].北京:科学出版社,1985:191-208. [Liu Dongsheng, et al. Loess and the Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985: 191-208.]
- 35 胡雪峰,龚子同,夏应菲,等.安徽宣州黄棕色土和第四纪红土的比较研究及其古气候意义[J].土壤学报,1999,36(3):301-307. [Hu Xuefeng, Gong Zitong, Xia Yingfei, et al. Comparative study of Yellow-Brown Earth and Quaternary red clay in Xuanzhou, Anhui province and its palaeo-climate significance[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(3): 301-307.]
- 36 李敬卫,乔彦松,王燕,等.江西九江红土堆积的粒度特征及成因研究[J].地质力学学报,2009,15(1):95-104. [Li Jingwei, Qiao Yansong, Wang Yan, et al. Aeolian origin of the red Earth formation in Jiujiang city of Jiangxi province, China; evidence from grain-size analysis [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(1): 95-104.]
- 37 李徐生,杨达源,鹿化煜.镇江下蜀黄土粒度特征及其成因初探[J].海洋地质与第四纪地质,2001,21(1):25-32. [Li Xusheng, Yang Dayuan, Lu Huayu. Grain-size features and genesis of the Xishu loess in Zhenjiang [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1): 25-32.]
- 38 蔡方平,胡雪峰,杜艳,等.安徽郎溪黄棕色土—红土二元结构土壤剖面的成因与长江流域第四纪晚期古气候演变[J].土壤学报,2012,49(2):220-229. [Cai Fangping, Hu Xuefeng, Du Yan, et al. Pedogenesis of Yellow-Brown Earth-Red Clay profile in Langxi county, Anhui province and paleoclimatic change in the Yangtze River Valley Southeast China in the Late Quaternary Period [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2): 220-229.]
- 39 鹿化煜,安芷生.洛川黄土粒度组成的古气候意义[J].科学通报,1997,42(1):67-69. [Lu Huayu, An Zhisheng. Palaeo-climatic implication of grain-size composition record in Luochuan Loess [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(1): 67-69.]
- 40 席承藩.关于中国红色风化壳的几个问题[J].第四纪研究,1965,4(2):42-54. [Xi Chengfan. Some problems of Chinese red residuum [J]. Quaternary Sciences, 1965, 4(2): 42-54.]
- 41 叶玮,杨立辉,朱丽东,等.中亚热带网纹红土的稀土元素特征与成因分析[J].地理科学,2008,28(1):40-44. [Ye Wei, Yang Lihui, Zhu Lidong, et al. Characteristics and origin of rare earth elements of vermicular red earth in middle sub-tropic zone [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(1): 40-44.]
- 42 胡雪峰,龚子同.江西九江泰和第四纪红土成因的比较研究[J].土壤学报,2001,38(1):1-8. [Hu Xuefeng, Gong Zitong. Comparative study of the origin of Quaternary Red Earth in Jiujiang and Taihe, Jiangxi province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 1-8.]
- 43 Bronger A, Heinkele T. Micromorphology and genesis of paleosols in the Luochuan loess section, China; Pedostratigraphic and environmental implications [J]. Geoderma, 1989, 45(2): 123-143.
- 44 卢升高.中国土壤磁性与环境[M].北京:高等教育出版社,2003:240. [Lu Shengao. Magnetism of Soils in China and Its Environment Implication [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 240.]



- 45 Fine P, Singer M J. Contribution of ferrimagnetic minerals to oxalate and dithionite extractable iron [J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(1):191-196.
- 46 Evans M E, Heller F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics [M]. London: Academic Press, 2003: 69-74.
- 47 Hu Xuefeng, Wei Ji, Xu Liangfeng, et al. Magnetic susceptibility of the Quaternary red clay in subtropical China and its paleoenvironmental implications [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 279 (3/4): 216-232.
- 48 Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism [M]. London: Allen and Unwin, 1986:76.
- 49 Liu Qingsong, Jackson M J, Banerjee S K, et al. Mechanism of the magnetic susceptibility enhancements of Chinese loess [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109 ( B12): , doi: 10.1029/2004JB003249.
- 50 Nie Junsheng, Song Yougui, King J W, et al. HIRM variations in the Chinese red-clay sequence: Insights into pedogenesis in the dust source area [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 38(3/4): 96-104.
- 51 朱景郊. 网纹红土的成因及其研究意义 [J]. 地理研究, 1988, 17(4):12-20. [Zhu Jingjiao. Genesis and research significance of the plinthitic horizon [J]. Geographical Research, 1988, 17(4): 12-20.]
- 52 朱丽东, 叶玮, 周尚哲, 等. 中亚热带第四纪红粘土的粒度特征 [J]. 地理科学, 2006, 26(5): 5586-5591 [Zhu Lidong, Ye Wei, Zhou Shangzhe, et al. Grain-size features of red earth in mid-subtropics [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(5): 5586-5591]
- 53 Van Houten F B. Origin of red beds: a review—1961-1972 [J]. Annual Review of Earth and Planetary Science, 1973, 1: 39-61.
- 54 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. [Hu Zhongxing, Zhu Lidong, Zhang Weiguo, et al. Magnetic properties of red clay section along the Jiu-Lu highway at Jiujiang, Jiangxi and implications for pedogenesis [J]. Chinese Journal Geophysics, 2011, 54(5): 1319-1326.]
- 55 刘彩彩, 邓成龙. 南方红土的磁性矿物组成及其区域性差异 [J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 626-634. [Liu Caicai, Deng Chenglong. Magnetic mineralogy of the red soil sequences in Southern China and its variety [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(4): 626-634.]
- 56 叶玮, 朱丽东, 李凤全, 等. 中国亚热带风尘沉积物磁学特征对比研究 [J]. 第四纪研究, 2013, 33(5): 911-924. [Ye Wei, Zhu Lidong, Li Fengquan, et al. Magnetic properties of the Quaternary sediments with aeolian dust characteristics in present subtropical China and their implications for climate [J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(5): 911-924.]
- 57 卢升高. 亚热带富铁土的磁学性质及其磁性矿物学 [J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 498-504. [Lu Shengga. Magnetic properties of subtropical ferrisols and its magnetic mineralogical study [J]. Chinese Journal Geophysics, 2000, 43(4): 498-504.]
- 58 俞劲炎. 土壤磁学—土壤学研究的新领域 [J]. 土壤学进展, 1979(4):1-12. [Yu Jinyan. Soil magnetism—New field of soil science research [J]. Progress in Soil Science, 1979(4): 1-12.]
- 59 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? [J]. 科学通报, 2003, 48(9): 969-975. [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.]
- 60 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. [Yin Qiuzhen, Guo Zhentang. Mid-Pleistocene vermiculated red soils in Southern China as an indication of unusually strengthened East Asia monsoon [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(2): 186-193.]
- 61 Han Jiamao, Liu Houyuan, Wang Naiqin, et al. The magnetic susceptibility of modern soils in China and its use for paleoclimate reconstruction [J]. Studia Geophysica et Geodaetica, 1996, 40(3): 262-275.
- 62 韩志勇, 李徐生, 陈英勇, 等. 矫顽力组分定量分析揭示下蜀黄土磁化率异常降低的原因 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1835-1843. [Han Ziyong, Li Xusheng, Chen Yiyong, et al. Quantification of magnetic coercivity components reveals the cause of anomalous decrease of magnetic susceptibility of the Xiashu loess [J]. Chinese Journal Geophysics, 2008, 51(6): 1835-1843.]
- 63 Bassinot F C, Labeyrie L D, Vincent E, et al. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes Matuyama magnetic reversal [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 126(1/2/3): 91-108.
- 64 Alexander A, Douglas P, Williams F, et al. Muted climate variations in continental Siberia during the mid-Pleistocene epoch [J]. Nature, 2002, 418: 65-68.

# Magnetic Properties of Quaternary Red Earth Profile in Yangtze River Valley and Its Paleo-environmental Implications

DENG HuangYue ZHENG XiangMin YANG LiHui REN ShaoFang LIU Fei

(Faculty of Earth Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241)

**Abstract:** The Quaternary red earth is widespread in the present Yangtze River Valley. Like the Loess-palesol sequences in north of China, the red earth provides detailed records of Quaternary environmental and climatic change. The typical red earth profiles usually consists of homogenous red earth range in the upper part and reticular red earth horizons in the lower part. In this study, we have investigated magnetic properties and particle-size distribution of two red earth sections (CS and HN) at Hunan Province, two sections (NC and XY) at Jiangxi Province, and a section (GC) at Zhejiang Province, with the purpose to investigate the feasibility of magnetic properties in paleo-climate reconstruction.

The results suggest:1) The Quaternary red earth in CS, HN, NC and GC, located in the transitional zone between red earth and Xiashu loess, was aeolian origin, as it shared many aeolian features with Xiashu loess and Chinese North loess; however, the Quaternary red clay in Xinyu is significantly different from the other four areas in particle-size composition. It often has gravels and a relatively high content of sands, demonstrating diluvial or alluvial properties.2) Multiple magnetic parameters show that maghemite, hematite and goethite of pedogenic origin make dominant contributions to the enhanced magnetic susceptibility of the red earth.3) The relative content of these minerals are various in different regions and different weathering stages. However, magnetic susceptibility and S-ratio declines while Hard Isothermal Remanent Magnetization (HIRM) increases significantly in the lower strongly weathering reticulate red clay layer, which results from the enrichment of antiferromagnetic minerals and the dissolution of the maghemite. Therefore, we conclude that the anomalous decrease of the magnetic susceptibility is the result of the reducing action, which might be the production within a period of enhanced precipitation.4) Magnetic characteristics of Xinyu far different from other four sections may be a reason that material source is not identical with other four dust caused clay. Further work is needed to provide more evidence.

**Key words:** red earth; grain-size; magnetic minerals; environment