

张伏甜, 杨立辉, 朱敏, 刘昕禹, 赵硕. 基于漫反射光谱的铜陵红土赤铁矿定量反演与环境意义[J]. 土壤学报, 2026,
ZHANG Futian, YANG Lihui, ZHU Min, LIU Xinyu, ZHAO Shuo. Quantitative Inversion of Hematite in Tongling Red Earth
Based on Diffuse Reflectance Spectroscopy and Its Environmental Significance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

基于漫反射光谱的铜陵红土赤铁矿定量反演与环境意义*

张伏甜, 杨立辉[†], 朱敏, 刘昕禹, 赵硕

(安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽芜湖 241002)

摘要: 中国南方广泛分布的红土沉积物是记录中低纬度地区第四纪环境演变的重要载体, 其中蕴含的赤铁矿(Hm)对古气候中的干热程度具有极高的指示意义。但传统化学方法难以在复杂的土壤基质中对其进行快速、精准的定量分析。本研究基于漫反射光谱(DRS)与多元线性回归(MLR)模型, 定量提取了复杂矿物背景下的赤铁矿含量。通过对长江下游铜陵红土剖面的系统分析, 重建了该地区中更新世以来的赤铁矿含量变化记录。结果表明, 定量重建的赤铁矿含量与色度参数 a^* 之间具有良好的对应关系, 从绝对数据层面验证了色度作为赤铁矿替代指标的可靠性。此外, 该定量结果为解析网纹红土的磁性亏损机制提供了证据, 也进一步表明了 DRS 技术在南方红土古环境研究中的应用价值。

关键词: 漫反射光谱; 多元线性回归; 赤铁矿; 网纹红土; 环境磁学

中图分类号: P579 文献标志码: A

Quantitative Inversion of Hematite in Tongling Red Earth Based on Diffuse Reflectance Spectroscopy and Its Environmental Significance

ZHANG Futian, YANG Lihui[†], ZHU Min, LIU Xinyu, ZHAO Shuo

(College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002, China)

Abstract: Red earth sediments, widely distributed in southern China, are important archives of Quaternary environmental evolution in the mid-low latitudes. Hematite (Hm) within these sediments is a key indicator of dry and hot paleoclimates. However, traditional chemical methods fall short for rapid and precise quantification in complex soil matrices. Diffuse reflectance spectroscopy (DRS) combined with multiple linear regression (MLR) was used to quantify Hm content under complex mineral backgrounds. Applied to the Tongling red earth profile in the lower Yangtze River, this approach reconstructed the Hm content record since the Middle Pleistocene. The results show a good correspondence between the reconstructed hematite Hm content and the redness index (a^*), validating the reliability of a^* as a Hm proxy from an absolute data perspective. Moreover, this quantitative result provides

* 安徽省自然科学基金项目(2008085MD117)、国家自然科学基金项目(42471011)和国家级大学生创新创业项目(201410370015)共同资助 Supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province, China (No. 2008085MD117), the National Natural Science Foundation of China (No. 42471011), and the National Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students of China (No. 201410370015)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: Yanglihui@ahnu.edu.cn

作者简介: 张伏甜(2002—), 女, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要研究第四纪环境变迁。E-mail: 2421011542@ahnu.edu.cn

收稿日期: 2026-02-27; 收到修改稿日期: 2026-07-08; 网络首发日期(www.cnki.net): 2026-07-08

evidence for deciphering the magnetic depletion mechanism in vermiculated red earth and demonstrates the utility of DRS in paleoenvironmental studies of southern Chinese red earth. Thus, DRS-based quantitative inversion is an effective tool for analyzing complex multi-source sediments and improves the ability to identify multi-stage pedogenic overprinting in southern red earth.

Key words: Diffuse reflectance spectroscopy; Multiple linear regression; Hematite; Vermiculated red earth; Environmental magnetism

中国南方红土作为记录第四纪中低纬度地区气候演化与东亚季风变迁的重要陆相沉积物,其蕴含的铁氧化物组分是解析古气候、古环境演变的核心代用指标^[1-3]。其中,赤铁矿作为红土主要的致色矿物及最终风化产物,是沉积物中承载环境信息的重要载体^[4-5];赤铁矿含量及磁化率常被用作表征化学风化强度的关键指标,用于反演古气候的干湿交替变化特征^[6-7]。环境磁学方法常被用于提取风尘沉积中的环境信息,然而在南方红土研究中,长期存在一个突出问题:在强风化背景下,磁化率并未随成土增强而升高,反而在网纹红土层出现明显下降^[8]。

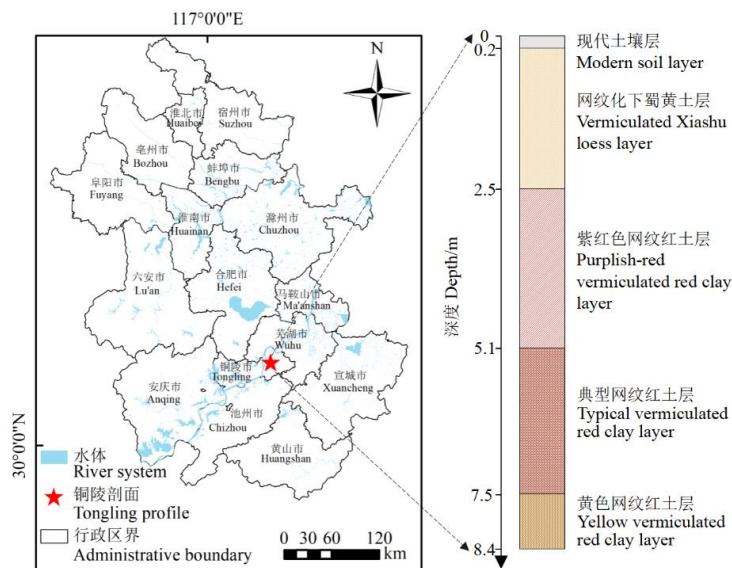
目前,学术界对第四纪红土中强风化层磁化率降低的解释多集中在磁性矿物的氧化、水化及还原、溶解等方面。由于缺乏对高矫顽力矿物(赤铁矿、针铁矿)的快速精确定量手段,传统磁学参数,如硬等温剩磁(HIRM)、饱和等温剩磁比(S-ratio)在区分物源继承与成土贡献时存在局限^[9]。与此同时,传统色度参数易受沉积基质(如黏土矿物类型、有机质含量及背景反射率)干扰,难以实现跨剖面的绝对定量比较^[10-11]。相比之下,漫反射光谱(DRS)技术对铁氧化物具有较高敏感性,且较少受到基质磁性干扰,已逐渐成为红土矿物学研究的重要补充^[12-14]。

本文以长江下游铜陵地区典型红土剖面为研究对象,通过构建漫反射光谱-多元线性回归模型(DRS-MLR),逐层定量了赤铁矿的含量。结合质量磁化率(χ)与色度参数(a^*)的系统分析,本文探讨了强风化条件下赤铁矿富集与磁性减弱的关系,评估了色度指标在高赤铁矿含量区间的响应特征,并进一步揭示了中更新世以来成土过程由原位化学风化向外源风尘堆积的转变。

1 材料与方 法

1.1 样品采集与预处理

研究剖面位于安徽省铜陵市(TL, 30°57'37"N, 117°50'13.19"E),总厚度 8.4 m(图 1)。剔除表层现代土壤后,根据网纹发育程度及基质颜色由底至顶划分为:层 I(7.5~8.4 m,黄色网纹红土层);层 II(5.1~7.5 m,典型网纹红土层);层 III(2.5~5.1 m,紫红色网纹红土层);层 IV(0.2~2.5 m,网纹化下蜀黄土层)。采样间距为 5~10 cm,共采集样品 165 件。所有样品经低温烘干后,研磨过 200 目筛,利用压片机在大于 500 kPa 压力下制成样片。光谱测试采用美国 ASD 公司 Field Spec 4 地物光谱仪(波段 350~2 500 nm),重点分析对铁氧化物敏感的 400~700 nm 可见光波段。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。Note: This figure is produced based on the standard map with the map examination approval number GS(2024)0650 downloaded from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, the base map has not been modified.

图 1 研究区与剖面位置

Fig. 1 The location of research area and the soil profile

1.2 实验试剂与标准矿物合成

实验所用硝酸铁 ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)、氢氧化钠 (NaOH)、氢氧化钾 (KOH)、碳酸氢钠 (NaHCO_3)、柠檬酸钠 ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、连二亚硫酸钠 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) 等分析纯试剂均购置于国药集团化学试剂公司；实验用水均为去离子水。

针铁矿 (Gt) 和赤铁矿 (Hm) 两种标准矿物参照前人^[15]方法采用化学沉淀法合成。针铁矿 (Gt)：将 NaOH 溶液逐滴加入 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 溶液中至 pH 达到 12，在 70 °C 条件下恒温老化 60 h，产物经洗涤至中性后冷冻干燥过 60 目筛。赤铁矿 (Hm)：在 90 °C 搅拌条件下混合 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 溶液与预热的 KOH 和 NaHCO_3 溶液，密封后置于烘箱中 90 °C 老化 60 h，产物经 60 °C 烘干并研磨备用。

采用日本理学 Smart Lab 型 X 射线衍射仪 (XRD, $\text{Cu K}\alpha$ 线, 40 kV, 100 mA, 扫描速度 $10^\circ \cdot \text{min}^{-1}$, 范围 $10^\circ \sim 70^\circ$) 验证矿物纯度。

1.3 标准样品集配制

去铁基体制备参照 Deaton 和 Balsam^[16]及 Ji 等^[17]的方法，采用连二亚硫酸钠–柠檬酸盐–碳酸氢盐法 (DCB) 去除样品中的游离铁。具体步骤为：称取 2.0 g 样品，加入 35 mL 0.3 mol·L⁻¹ 柠檬酸钠和 5 mL 1 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠溶液，于 80 °C 水浴中加入 1 g 连二亚硫酸钠反应 20 min。反应结束后，经离心洗涤至上清液澄清，再经低温烘干和研磨，获得去铁基体备用。以去铁基体为载体，定量添加高纯度人工合成赤铁矿 (Hm) 与针铁矿 (Gt)，构建标准样品体系，共制备 25 个标准样品。其中，单矿物序列包括 16 个，Hm 与 Gt 各设 8 个质量分数梯度 (0.3~6.0 g·kg⁻¹)；混合矿物序列 9 个，将 Hm 与 Gt 按不同比例混合，总含量固定为 6.0 g·kg⁻¹，以模拟自然土壤中两类矿物共存的状态。

1.4 光谱数据处理与模型构建

为提高光谱数据的可解释性，对 400~700 nm 波段进行了预处理。先计算各波段反射率积分占比以消除亮度差异，再对原始光谱进行一阶导数变换 (差分间隔 2 nm)，以增强铁氧化物的特征吸收信息。

以 25 个标准样品为对象, 取各波段反射率占比为自变量, 已知的赤铁矿和针铁矿含量为因变量, 采用 SPSS13.0 软件进行多元线性回归, 建立赤铁矿含量与各颜色波段光谱反射率之间的回归方程:

$$\text{Hm}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}) = 126.57 - 5.94 \times R_{\text{green}} + 20.69 \times R_{\text{yellow}} - 55.92 \times R_{\text{orange}} + 22.94 \times R_{\text{red}} \quad (1)$$

式中, R_{green} 、 R_{yellow} 、 R_{orange} 和 R_{red} 分别代表绿色、黄色、橙色和红色波段的相对反射率。方程中红色波段呈正相关, 绿色波段呈负相关, 符合赤铁矿反射长波、吸收短波的光谱特性; 橙色波段的负向贡献用于消除共存针铁矿的光谱干扰。

2 结果与讨论

2.1 合成矿物的表征与模型验证

合成产物的 X 射线衍射 (XRD) 结果如图 2 所示。针铁矿 (Gt) 与赤铁矿 (Hm) 均表现出典型的特征衍射峰, 其中 Gt 的主要衍射峰位于 $4.18 \text{ \AA}$, Hm 的特征峰位于 $2.70 \text{ \AA}$ 。各衍射峰与标准 PDF 卡片一致, 且未见明显杂质衍射峰, 表明合成矿物结晶度较好、纯度较高, 可满足后续光谱分析与定量建模的需求。

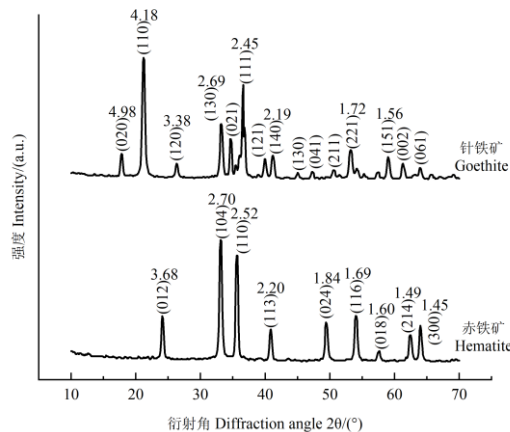
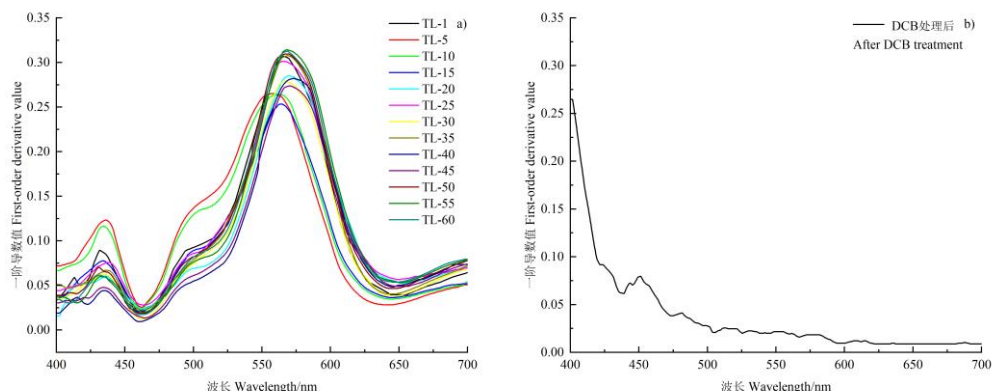


图 2 针铁矿和赤铁矿的 X 射线衍射 (XRD) 图谱

Fig. 2 The X-ray diffraction (XRD) patterns of goethite and hematite

为进一步评估模型基质的可靠性, 对样品进行了 DCB 处理, 并比较处理前后漫反射光谱一阶导数特征的变化 (图 3)。结果表明, 未经 DCB 处理的样品在 $565 \sim 575 \text{ nm}$ (赤铁矿特征区) 以及 435 nm 和 $495 \sim 505 \text{ nm}$ (针铁矿特征区) 均存在明显吸收峰; 而经过 DCB 循环处理后, 上述特征吸收峰基本消失, $500 \sim 700 \text{ nm}$ 可见光范围内光谱曲线趋于平缓。这说明 DCB 处理能够有效去除游离铁氧化物等背景干扰, 显著提高目标矿物光谱信号的独立性与可识别性, 从而为后续多元线性回归模型构建提供稳定的基质条件。

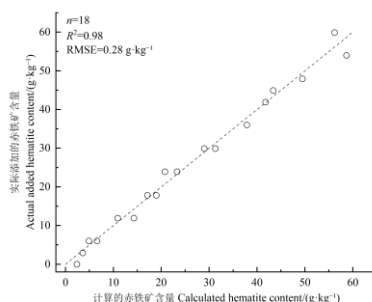


注：图 3a)中，TL 表示铜陵网纹红土样品，数字表示样品编号，不同颜色的实线表示相应样品的一阶导数光谱；图 3b)中，黑色实线表示 DCB 提取后样品的一阶导数光谱。DCB 指连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠提取法。Note: In Fig. 3a), “TL” denotes Tongling vermiculated red soil samples, the numerals indicate sample numbers, and the colored lines show their first-derivative spectra. In Fig. 3b), the black line shows the spectrum after dithionite-citrate-bicarbonate (DCB) extraction.

图 3 未经 DCB 法处理 a)和经 DCB 法处理后 b)的红土样品的反射光谱一阶导数图谱

Fig.3 First-order derivative spectra of laterite samples before a) and after b) DCB treatment

基于标准样品体系建立的 DRS-MLR 模型结果显示（图 4），赤铁矿含量的计算值与实际添加值之间呈良好的线性关系（ $n=18$ ， $R^2=0.98$ ，均方根误差 $RMSE=0.28$ ）。该结果表明模型具有较高的拟合精度与稳定性，能够有效削弱复杂红土基质效应的影响，实现对赤铁矿含量的可靠定量反演；同时也验证了漫反射光谱技术在复杂多矿物体系中提取铁氧化物信息的适用性。



注： n 表示样本数量； R^2 表示决定系数；RMSE（均方根误差）用于衡量模型预测误差。Note: n denotes the number of samples; R^2 represents the coefficient of determination; RMSE (Root mean square error) indicates the prediction error of the model.

图 4 标准样品中赤铁矿^a计算含量与实际添加含量的对比

Fig. 4 Comparison of hematite contents in calibration samples with that calculated by the linear regression equations

2.2 漫反射光谱一阶导数特征

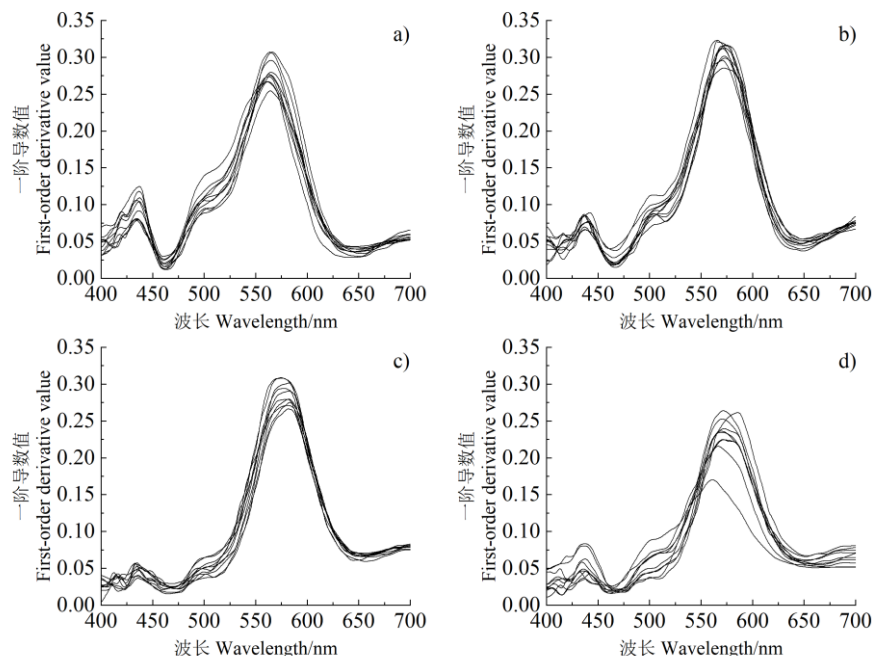
在剖面底部的黄色网纹红土层（图 5a）中，一阶导数光谱显示出针铁矿（Gt）与赤铁矿（Hm）共存的特征。435 nm 处明显的次级特征峰指示了针铁矿的相对发育；而代表赤铁矿的 565 nm 处的主峰强度中等（峰值介于 0.25~0.30），反映了在该演化初期，铁氧化物的富集程度尚处于较低水平。

向上进入典型网纹红土层(图 5b), 随着风化程度加深, 光谱响应显示出明显的赤铁矿富集与转化趋势。主峰发生明显的“红移”至 565 nm 附近, 且在 600~700 nm 波段表现出显著的长波拖尾特征。此阶段 435 nm 处的针铁矿响应逐渐被增强的赤铁矿信号掩盖, 反映了赤铁矿在矿物组分中占据了主导地位。

至紫红色网纹红土层(图 5c), 赤铁矿的光谱学信号达到峰值。主峰中心波长进一步红移至 570~575 nm, 且峰高达到全剖面最高值(0.28~0.32)。这种高度集中的强吸收特征不仅指示了赤铁矿的极高富集度, 而且也暗示了矿物结晶度的显著提升, 标志着该层位经历了最为强烈的氧化风化与成土改造。

在剖面顶部的网纹化下蜀黄土层(图 5d), 光谱特征出现明显转变。赤铁矿主峰强度显著回落(0.15~0.25), 且峰形展宽, 表示其相对含量下降, 晶体有序程度可能减弱。与此同时, 495~510 nm 附近针铁矿特征峰强度相对回升, 说明在后期淋溶作用或沉积环境转变下, 铁氧化物矿物组合发生了调整。

总体而言, 铜陵红土剖面的一阶导数光谱以赤铁矿信号占优为主要特征, 赤铁矿相关主峰强度整体高于针铁矿特征峰, 表明赤铁矿是该剖面铁氧化物矿物组合中的主要组分。针铁矿仅在底部的初期风化层与顶部的淋溶层中出现相对富集。



注: 各子图中, 每条实线均表示相应土层中一个土壤样品的一阶导数光谱。Note: In each panel, each solid line represents the first-derivative spectrum of an individual soil sample collected from the corresponding soil layer.

图 5 铜陵网纹红土样品漫反射光谱的一阶导数图 (a. 黄色网纹红土层; b. 典型网纹红土层; c. 紫红色网纹红土层; d. 网纹化下蜀黄土层)

Fig. 5 First-order derivative curves of diffuse reflectance spectra for the Tongling vermiculated red clay samples(a. Yellow vermiculated red clay layer; b. Typical vermiculated red clay layer; c. Purplish-red vermiculated red clay layer; d. Vermiculated Xiashu loess layer)

2.3 赤铁矿含量的定量重建与成土意义

基于 DRS-MLR 模型的反演结果(图 6)显示, 铜陵红土剖面赤铁矿(Hm)含量为 15.9~79.4 g·kg⁻¹, 平均值为 49.9 g·kg⁻¹。为验证所建 DRS-MLR 模型在天然红土样品中的适用性, 并评估 Hm 含量与替代指标联合反演古环境信息的有效性, 本文将铜陵剖面的 Hm 含量结果与王彩霞^[18]获得的红度(a*)和磁化率(χ)曲线进行了对比分析(图 6)。结果

表明, Hm 含量曲线与红度 (a^*) 在整个剖面上的变化趋势总体一致, 说明模型反演结果能够较好地响应天然红土样品中色度变化所指示的赤铁矿富集过程。

层 I (8.4~7.5 m, 黄色网纹红土层): Hm 含量处于全剖面最低水平, 范围为 15.9~33.2 g·kg⁻¹, 均值为 25.4 g·kg⁻¹。该层 a^* 与 χ 同步处于低值区, 表明赤铁矿化作用较弱, 铁氧化物富集和磁性增强均不显著。在温凉湿润环境中, 针铁矿 (Gt) 的热力学稳定性高于赤铁矿 (Hm), Gt 向 Hm 的脱水重结晶转化受到温度条件的限制^[19-21]。该层位对应中更新世气候转型期 (MPT) 初始阶段 (约 0.9 Ma BP)^[18, 22], 此时东亚季风系统处于调整阶段, 研究区总体维持温凉湿润的环境特征^[23]。因此, 尽管该层位已发生一定程度的化学风化, 但温度条件可能不足以支撑针铁矿向赤铁矿的大规模转换。Hm 含量的低值及其波动, 反映了该时期成土环境的不稳定性。

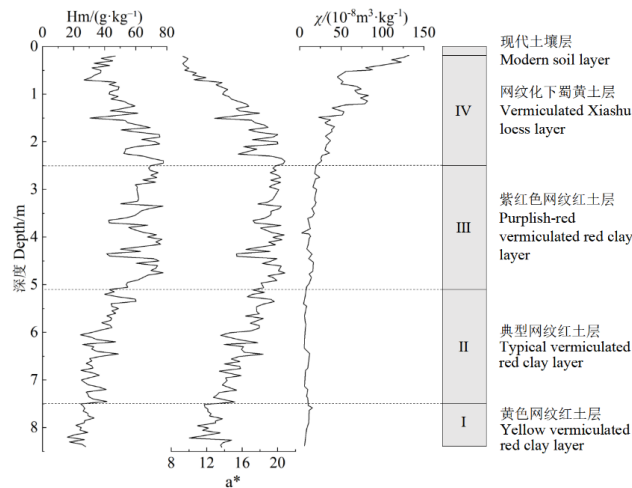
层 II (7.5~5.1 m, 典型网纹红土层): Hm 含量与 a^* 曲线均呈现显著的波动上升趋势, 而 χ 虽略有起伏, 但整体维持在较低水平。该层位包含布容-松山极性界限 (B/M 界限, 约 0.78 Ma), 标志着区域地层由早更新世向中更新世过渡^[24]。本层 Hm 均值超过 50 g·kg⁻¹, 且 a^* 与 Hm 含量同步升高, 表明红土红化程度明显增强, 反映出成土环境中水热条件的显著改善, 其矿物演化特征与中更新世气候转型 (MPT) 以来区域气候趋于暖湿化的趋势基本一致。在强夏季风背景下, 高温多雨的气候加速了原生矿物的风化分解和铁元素的释放^[25-27]。强烈的成土作用一方面促进含铁矿物向赤铁矿等稳定铁氧化物转化, 使 Hm 含量和 a^* 值持续升高; 另一方面, 强烈淋溶与氧化还原过程可能导致亚铁磁性矿物发生溶解、迁移或向弱磁性矿物转化, 从而造成 χ 整体偏低, 体现了该层位对暖湿气候条件的磁学响应^[28]。此外, 降水增加导致地下水位频繁波动。由于地下水位对降水变化具有一定滞后性, 且东亚夏季风在 MPT 之后仍存在年际至年代际尺度波动, 区域地下水位可能发生周期性升降^[23]。作为包气带与饱水带的过渡区域, 地下水位波动带内的水分条件、氧化还原电位及化学组分随水位升降发生周期性变化^[29-30]。这种干湿交替过程可促进铁氧化物的还原性溶解、迁移与再沉淀, 并在后续氧化脱水过程中向赤铁矿等稳定铁氧化物转化^[31]。Hm 含量的增加与 χ 的持续低值共同表明, 该阶段成土作用已进入以赤铁矿富集为主要特征的强风化演化期。

层 III (5.1~2.5 m, 紫红色网纹红土层): Hm 含量在该层达到全剖面峰值, 均值为 65.5 g·kg⁻¹, 而 χ 处于极低水平, 为揭示南方红土中强风化与弱磁性并存的现象提供了矿物学证据。值得注意的是, 尽管该层位 Hm 含量存在显著波动, 但 a^* 始终维持较高水平且变化幅度有限, 表明高赤铁矿背景下, 色度响应已趋于饱和。该现象主要受暖湿气候与局地水文条件共同控制。暖湿气候加速了硅酸盐矿物的分解与铁元素的释放, 而局地地下水位的频繁波动则创造了周期性的氧化-还原交替环境。在氧化阶段, 游离铁发生脱水重结晶并转化为热力学稳定但磁性极弱的赤铁矿^[32]; 在还原环境下, 超顺磁性 (SP) 与单畴 (SD) 等细粒亚铁磁性矿物发生还原性溶解、迁移与淋失, 导致磁化率持续降低^[21, 31]。此外, 红土与其他土壤类型在微形态结构、成土过程及铁氧化物赋存特征上的差异, 也可能影响铁氧化物的迁移、保存与空间分异^[33]。在上述多重因素共同作用下, 铁元素随水分迁移并发生分异, 最终形成典型的红白网纹结构。磁性矿物损耗与赤铁矿显著富集并存, 构成了网纹红土强风化、弱磁性的特征。

层 IV (2.5~0.2 m, 网纹化下蜀黄土层): Hm 含量回落至 55.7 g·kg⁻¹, 并与 a^* 呈现同步下降趋势, 但 a^* 的下降幅度更为明显; 与此同时, χ 却异常升高并达全剖面最高值。由此推测, Hm 含量与 a^* 下降并非仅由成土作用减弱引起, 还可能受到外源风尘输入的物理稀释效应影响^[34]。下蜀黄土底部年龄约为 0.9 Ma, 对应 MPT 初始阶段, 其沉积过程持续至晚更新世, 期间冬季风逐渐增强^[35]。随着青藏高原持续隆升, 冬季风强度进一步增强, 大量远源风尘被输送至长江中下游地区沉积, 该过程已被南京地区下蜀黄土地球化学与磁学

记录所证实^[36-37]。粒度端元分析进一步表明,下蜀黄土包含远源风尘与近源粉尘等多种组分,其中远源组分在晚更新世冰期阶段贡献显著^[38],为该层位磁化率升高提供了重要物源解释。该物源与成土机制的转变也得到了磁学参数的支持。王彩霞^[18]的磁滞回线结果显示,该层饱和等温剩磁(SIRM)与饱和等温剩磁比(S-ratio)较高,且矫顽力明显低于下伏网纹红土层,表明低矫顽力亚铁磁性矿物贡献增强,可能与风尘输入携带的磁性矿物增加有关。这种从早期成土化学改造向晚期风尘物理叠加的转变,说明定量反演在区分物源贡献和后期成土改造方面具有一定优势,可弥补传统单一指标在解析多源信息时的不足。

对比层 I~层 III 可知,尽管 Hm 含量与 a^* 在这些层位中呈现显著波动, χ 始终维持低值且变幅有限(图 6)。该特征可从三个方面理解:其一,稳定的风尘补给维持了较低的磁性背景值^[39];其二,暖湿背景下的干湿循环驱动强磁性矿物向赤铁矿等弱磁性铁氧化物转化^[4];其三,赤铁矿本身的单位磁化率极低,难以补偿亚铁磁性矿物溶解带来的磁损耗。因此,即便 Hm 含量大幅波动, χ 曲线仍维持低值水平。总体而言,铜陵红土剖面铁氧化物的演化受区域气候与局地水文环境的共同控制。其中,层 II 和层 III 记录了高频干湿交替环境下铁元素持续迁移、脱水结晶并向赤铁矿富集的过程;而顶部的层 IV 则记录了成土作用减弱与外源风尘输入增强的叠加效应,反映了沉积环境与物源背景的转变。



注: χ 表示磁化率; a^* 表示红色。I~IV 表示土层分层,虚线表示不同土层界限。Note: χ represents magnetic susceptibility; a^* represents redness. I-IV indicate soil layers I-IV, and dashed lines show boundaries between soil layers.

图 6 铜陵红土剖面赤铁矿 (Hm) 含量与环境磁学参数随深度变化特征 (磁化率和色度数据引用自文献 [18])

Fig. 6 Depth-dependent variations of hematite (Hm) content and environmental magnetic parameters in the Tongling red earth profile (Magnetic susceptibility and color data are cited from Ref.[18])

3 结论

本研究构建的 DRS-MLR 定量模型拟合精度较高 ($R^2=0.98$), 可为强风化地层中赤铁矿含量的定量重建及矿物演化识别提供有效手段。模型反演的赤铁矿含量与色度参数 a^* 具有良好的对应关系, 从定量角度验证了色度指标指示赤铁矿富集程度的可靠性。研究结果表明, 铜陵剖面典型网纹红土层主要形成于地下水位波动驱动的干湿交替环境, 其发育过程与铁元素迁移、再沉淀及脱水重结晶密切相关。剖面顶部的下蜀黄土层则记录了从成土化学改造向外源风尘输入增强的转变, 风尘物质的加入可能对赤铁矿含量和色度信号产生

一定稀释效应。定量反演结果进一步说明, 铜陵红土的“高赤铁矿含量-低磁化率”现象主要与强风化条件下亚铁磁性矿物的溶解、迁移、淋失及其向弱磁性或反铁磁性铁氧化物转化有关。由于赤铁矿本身磁性较弱, 其富集难以补偿亚铁磁性矿物损耗造成的磁化率降低, 该结果为解释磁化率指标在强风化红土体系中的适用性受限提供了直接的矿物学证据。因此, DRS 定量反演不仅能有效解析南方红土复杂的成土过程, 也可多旋回成土叠加背景下的古气候信息提取提供关键的矿物学支撑。

参考文献 (References)

- [1] Zhang D Q, Duan Z G, Chen J, et al. Characteristics and paleoclimate significance of authigenic ferrimagnetic minerals in the Xuancheng red earth, Southern China[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 3457.
- [2] Chen Z X, Lü B, Zheng X F, et al. Semi-quantitative study on hematite and goethite in soils based on diffuse reflectance spectrum and chroma[J]. *Soils*, 2020, 52(5): 1083-1091. [陈梓炫, 吕兵, 郑兴芬, 等. 基于漫反射光谱和色度的土壤中赤铁矿和针铁矿半定量探讨[J]. *土壤*, 2020, 52(5): 1083-1091.]
- [3] Gong Y L, Hu Z X, Li W, et al. Magnetic properties of weathering laterite derived from basalt, Zhejiang, and its responses to soil-forming processes[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(1): 51-62. [龚亚玲, 胡忠行, 李文, 等. 浙江玄武岩风化壳红土磁性特征及其对成土过程的响应[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(1): 51-62.]
- [4] Deng C L, Liu Q S, Pan Y X, et al. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 193-209. [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.]
- [5] Yu X C, Lu H Y, Lü H Z, et al. Paleoclimate variations during middle to late Eocene at the Weihe basin, Central China, revealed by high-resolution magnetic susceptibility[J]. *Quaternary Sciences*, 2024, 44(2): 325-337. [郁晓春, 鹿化煜, 吕恒志, 等. 中-晚始新世渭河盆地古气候变化的红河组磁化率记录[J]. *第四纪研究*, 2024, 44(2): 325-337.]
- [6] Yin K, Hong H L, Algeo T J, et al. Fe-oxide mineralogy of the Jiujiang red earth sediments and implications for Quaternary climate change, Southern China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 3610.
- [7] Roberts A P, Zhao X, Heslop D, et al. Hematite (α -Fe₂O₃) quantification in sedimentary magnetism: Limitations of existing proxies and ways forward[J]. *Geoscience Letters*, 2020, 7(1): 8.
- [8] Ma Z Z, Zhu L D, Zhang H J, et al. Late Quaternary aridification recorded by red earth in southern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(6): 1501-1516. [马桢桢, 朱丽东, 张杭佳, 等. 中国南方红土记录的晚第四纪干旱化[J]. *第四纪研究*, 2022, 42(6): 1501-1516.]
- [9] Meng X Q, Li G K, Long X Y, et al. Quantifying soil goethite/hematite ratios: A new method based on diffuse reflectance spectra[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(8): e2022GL102280.
- [10] Guan Y X, Lu J M, Ma R J, et al. Research on the cross-coloration effect of iron oxides and humus in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(1): 138-150. [管艳霞, 陆金妹, 马榕均, 等. 土壤铁氧化物与腐殖质的交叉染色效应研究[J]. *土壤学报*, 2023, 60(1): 138-150.]
- [11] Ji J F, Chen J, Liu L W, et al. Quantitative analysis of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequences and its implication for dry and humid variability[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 221-229. [季峻峰, 陈骏, 刘连文, 等. 黄土剖面中赤铁矿和针铁矿的定量分析与气候干湿变化研究[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(2): 221-229.]
- [12] Zhu M Y, Lü B, Guo Y. Comparison of haematite and goethite contents in aeolian deposits in different climate zones based on diffuse reflectance spectroscopy and chromaticity methods[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(6): 1684-1690. [朱梦园, 吕兵, 郭滢. 不同气候带风成沉积中赤铁矿和针铁矿含量对比——基于漫反射光谱和色度方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(6): 1684-1690.]
- [13] He W, Yang Z J, Li H W. Identifying the color and absorption band properties of Fe oxides in Danxia red beds by the visible diffuse reflectance spectrum[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 4217.
- [14] Li J W, Lü B, Chen T Y, et al. A new perspective on the applicability of diffuse reflectance spectroscopy for determining the hematite content of Fe-rich soils in the tropical margins of China[J]. *Minerals*, 2024, 14(3): 242.

- [15] Wang X M. Structures, formation and transformation, and surface physicochemical properties of several meta-stable iron oxides[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. [王小明. 几种亚稳态铁氧化物的结构、形成转化及其表面物理化学特性[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.]
- [16] Deaton B C, Balsam W L. Visible spectroscopy-A rapid method for determining hematite and goethite concentration in geological materials[J]. Journal of Sedimentary Research, 1991, 61(4): 628-632.
- [17] Ji J F, Balsam W, Chen J, et al. Rapid and quantitative measurement of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequence by diffuse reflectance spectroscopy[J]. Clays and Clay Minerals, 2002, 50(2): 208-216.
- [18] Wang C X. Weathering characteristics and environmental significance of Quaternary reticulate red clay in Tongling[D]. Jinhua, Zhejiang: Zhejiang Normal University, 2017. [王彩霞. 铜陵第四纪网纹红土的风化特征及其环境意义[D]. 浙江金华: 浙江师范大学, 2017.]
- [19] Hu X F, Wei J, Xu L F, et al. Magnetic susceptibility of the Quaternary Red Clay in subtropical China and its paleoenvironmental implications[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 279(3/4): 216-232.
- [20] Liu X, Lü B, Liu X M, et al. Different types of maghemite and their genesis in humid subtropical red soil derived from granite weathering crust[J]. Quaternary Sciences, 2021, 41(1): 63-77. [刘鑫, 吕斌, 刘秀铭, 等. 湿润亚热带花岗岩风化壳发育红壤中不同类型磁赤铁矿及其成因[J]. 第四纪研究, 2021, 41(1): 63-77.]
- [21] Lu S G. Environmental magnetism of quaternary red earth in Southern China[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(6): 1016-1022. [卢升高. 中国南方红土环境磁学[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1016-1022.]
- [22] Xiong W T, Zhu L D, Zhang X, et al. Middle Pleistocene transition and its environmental effects revealed by red earth of South China[J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(6): 1441-1452. [熊文婷, 朱丽东, 张晓, 等. 中国南方红土记录的中更新世气候转型及其环境效应[J]. 第四纪研究, 2020, 40(6): 1441-1452.]
- [23] Sun Y B, Yin Q Z, Crucifix M, et al. Diverse manifestations of the mid-Pleistocene climate transition[J]. Nature Communications, 2019, 10: 352.
- [24] Lao J X, Yang Z L, Yu J J, et al. Quaternary multistratigraphic study of borehole ZK10, Xinghua, Jiangsu Province[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(10): 1705-1714. [劳金秀, 杨祝良, 于俊杰, 等. 江苏兴化 ZK10 孔第四纪多重地层研究[J]. 地质通报, 2016, 35(10): 1705-1714.]
- [25] Yuan D G, Zhang G L. Characterization of magnetic susceptibility of red earth at Yuhuatai and its paleo-environmental implications[J]. Soils, 2008, 40(1): 110-113. [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.]
- [26] Chen Z X, Tang J M, Liu X, et al. Characteristics of the iron mineralogy of farmland and red soils in eastern Guangdong and their pedogenetic implications[J]. Journal of Geographical Sciences, 2025, 35(9): 2015-2036.
- [27] Zhang X, Zhu L D, Huang Y, et al. The reticulated mechanism and its climatic implication of aggradation red earth[J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(1): 214-228. [张晓, 朱丽东, 黄颖, 等. 加积型网纹红土网纹化机制及形成环境[J]. 第四纪研究, 2020, 40(1): 214-228.]
- [28] Lu S G. Characterization of magnetism and iron oxide minerals of quaternary red earth and its paleoenvironmental implications[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(2): 182-191. [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.]
- [29] Wang P Y, Tong M, Zhang P. Patterns and mechanisms of sediment charging and discharging driven by groundwater level fluctuations[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(2): 240-248. [王培源, 童曼, 张鹏. 地下水位波动驱动的沉积物充放电规律与机制[J]. 地质科技通报, 2026, 45(2): 240-248.]
- [30] Wang Y, Song X Q, Wang F, et al. Response characteristics of groundwater level dynamics to precipitation based on continuous wavelet - cross correlation analysis: A case study of the Guiyang Karst basin[J]. Carsologica Sinica, 2024, 43(4): 843-853. [汪莹, 宋小庆, 王飞, 等. 基于连续小波-互相关分析的降雨-地下水水位动态响应特征研究--以贵阳岩溶盆地为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 843-853.]

- [31] Schulz K, Notini L, Grigg A R C, et al. Contact with soil impacts ferrihydrite and lepidocrocite transformations during redox cycling in a paddy soil[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2023, 25(12): 1945-1961.
- [32] Jiang Z X, Liu Q S, Roberts A P, et al. The magnetic and color reflectance properties of hematite: From Earth to Mars[J]. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60(1): e2020RG000698.
- [33] Yin Q Z, Guo Z T, Fang X M. Micromorphology of latosols in Hainan and differences between vermiculated red soils and latosols in environmental significance in South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 353-361. [尹秋珍, 郭正堂, 方小敏. 海南砖红壤的微形态特征以及南方网纹红土与砖红壤环境意义的差异[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 353-361.]
- [34] Hu X F, Wei J, Du Y, et al. Regional distribution of the Quaternary Red Clay with aeolian dust characteristics in subtropical China and its paleoclimatic implications[J]. *Geoderma*, 2010, 159(3/4): 317-334.
- [35] Feng L L, Chen T. Progress and prospect in the study of aeolian loess in the Yangtze River Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(2): 16-32. [冯柳柳, 陈艇. 长江流域风成黄土研究进展与展望[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(2): 16-32.]
- [36] Wu C, Zheng X M, Qian P, et al. Provenances of the oldest Xiashu loess and Xuancheng loess in southern China: Implications for dust transport and dust proxies of the East Asian winter monsoon[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 614: 111440.
- [37] Cheng X Y, Zhu X Y, Pu Y, et al. Xiashu loess deposits in the lower reaches of the Yangtze River and their paleoclimatic significance[J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(6): 1049-1058. [程星宇, 朱晓雨, 蒲阳, 等. 长江下游地区中更新世下蜀黄土沉积的古气候意义[J]. *热带地理*, 2023, 43(6): 1049-1058.]
- [38] Liu M H, Li X S, Han Z Y, et al. Parametric end-member analysis of the grain size distribution of the Xiashu loess and its provenance tracing[J]. *Journal of Earth Environment*, 2021, 12(5): 510-525. [刘梦慧, 李徐生, 韩志勇, 等. 下蜀黄土参数化粒度端元分析及其物源示踪[J]. *地球环境学报*, 2021, 12(5): 510-525.]
- [39] Guo Z T. Loess Plateau attests to the onsets of monsoon and deserts[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2017, 47(4): 421-437. [郭正堂. 黄土高原见证季风和荒漠的由来[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(4): 421-437.]

(责任编辑: 陈荣府)