

DOI: 10.11766/trxb202008240424

刘鑫, 吕镔, 郑兴芬, 陈梓炫, 杜佳昊. 福建周宁黄红壤的磁学特征及其磁性矿物转化[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 987–998.

LIU Xin, LÜ Bin, ZHENG Xingfen, CHEN Zixuan, DU Jiahao. Magnetic Characteristics of Yellow-Red Soil and Transformation of Its Magnetic Minerals, in Zhouning, Fujian Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 987–998.

福建周宁黄红壤的磁学特征及其磁性矿物转化*

刘鑫^{1, 2}, 吕镔^{1, 2, 3†}, 郑兴芬^{1, 2}, 陈梓炫⁴, 杜佳昊^{1, 2}

(1.福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2.福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 3.福建师范大学地理研究所, 福州 350007; 4.西部环境教育部重点实验室, 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 对我国亚热带地区发育于花岗岩之上的一个黄红壤剖面进行了系统的环境磁学测量, 对土壤样品的磁化率、等温剩磁、磁滞回线等常温磁学参数进行测量, 对代表性样品进行热磁分析, 并结合色度、常量地球化学元素和漫反射光谱参数, 探讨亚热带黄红壤的磁性特征, 以及在相对湿冷的气候条件下, 黄红壤中的磁性矿物具有怎样的转化规律。结果表明: 亚热带黄红壤中强磁性矿物为亚铁磁性的磁铁矿、磁赤铁矿, 弱磁性矿物为反铁磁性的赤铁矿、针铁矿。随着成土作用/风化作用增强, 磁性矿物颗粒变细。母质和气候条件是影响区域磁性差异的重要因素, 次生磁性矿物(特别是赤铁矿与针铁矿)的含量主要受气候条件控制。在相对湿冷的气候条件下, 磁性矿物的转化以强磁性的磁铁矿与磁赤铁矿转化为弱磁性的赤铁矿与针铁矿为主。气温(而非降水)是湿润亚热带地区花岗岩风化壳上发育土壤中针铁矿和赤铁矿含量以及相对比例的主导影响因素。

关键词: 环境磁学; 针铁矿; 赤铁矿; 黄红壤; 气候

中图分类号: P318 **文献标志码:** A

Magnetic Characteristics of Yellow-Red Soil and Transformation of Its Magnetic Minerals, in Zhouning, Fujian Province

LIU Xin^{1, 2}, LÜ Bin^{1, 2, 3†}, ZHENG Xingfen^{1, 2}, CHEN Zixuan⁴, DU Jiahao^{1, 2}

(1. State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 4. Ministry of Education Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: 【Objective】 In order to explore magnetic characteristics of the yellow-red soil in the subtropical region and transformation of the magnetic minerals in the soil under relatively humid and cold climate conditions, the author selected a profile of yellow-red soil (Profile ZN) derived from granite weathering crust in Zhouning County, northeast of Fujian Province. Under a mid-subtropical monsoon mountain climate, this area had an average annual temperature of 15 °C, an average annual

* 国家自然科学基金项目(41877435)和福建师范大学创新团队项目(IRTL1705)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41877435) and Innovation Research Team Fund of Fujian Normal University (No. IRTL1705)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lvbin@fjnu.edu.cn

作者简介: 刘鑫(1995—), 男, 山东滨州市人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境磁学研究。E-mail: 1304933214@qq.com

收稿日期: 2020–08–24; 收到修改稿日期: 2020–10–17; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020–12–10

rainfall of 2 049.3 mm, and an elevation of 906.4 m counted from the bottom of the profile. The profile was about 1.9 m thick. With the floating soil on the surface removed, a total of 20 samples were collected at 10 cm intervals from the soil and weathering crust layers of the profile. 【Method】 In this study, room temperature magnetic parameters of the samples were measured, and thermomagnetic analysis conducted of representative samples, in combination of chroma, major geochemical elements and diffuse reflectance spectrum analyses. 【Result】 Results show: The profile was low in magnetic susceptibility, and relatively low in content of magnetic minerals, the upper part of the profile contained relatively more superparamagnetic particles, while the lower part did relatively more multi-domain particles. a^* , b^* and Ca^*b^* varied in the same trend, being the highest in Horizon B and the lowest in Horizon C, while b^*/a^* was high in the profile surface. The content of Fe_2O_3 increased with the degree of pedogenesis, indicating that during the soil forming process, other elements were leached while iron accumulated relatively. Iron content was not a major factor limiting magnitude of magnetic susceptibility. The profile was lower than those in the humid and hot low altitude tropical and subtropical regions in CIA (chemical index of alteration). 【Conclusion】 By comparing this profile with the three (NPN, PC-GL, PC-SY) in the adjacent area, the following conclusions were drawn: (1) Profile ZN contains relatively less magnetic minerals, which are composed of mainly ferrimagnetic mineral and small portions of maghemite, antiferromagnetic minerals hematite and goethite as well as paramagnetic minerals. Moreover, its content of goethite is higher than that of hematite. The magnetic particles in the lower part of the profile are coarser, and mainly multi-domain particles. And the particles get finer, and the portions of single-domain and superparamagnetic particles increase with decreasing soil depth. (2) Parent material and climatic conditions are two important factors contributing to the difference in magnetic characteristics between different profiles, and the climate conditions are the main ones controlling the content of secondary magnetic minerals (especially hematite and goethite). Chroma index b^*/a^* can be used to measure the content of goethite/hematite. (3) Under a relatively humid and cold climate the transformation of magnetic minerals in the soil is dominated by the transformation of strong magnetic minerals (magnetite and maghemite) into weak magnetic minerals (hematite and goethite). (4) Temperature, instead of precipitation, is the dominant factor influencing the content and relative proportion of goethite and hematite in the soil derived from granite weathering crust in humid subtropical regions.

Key words: Environmental magnetism; Goethite; Hematite; Yellow-red soil; Climate

土壤环境磁学被广泛应用于古环境演化和气候变迁的研究^[1-2]。其将成土过程中磁性变化与五大成土因素(气候、生物、母质、地形和时间)之间的关系作为研究重点^[3-4],发现气候是影响土壤磁性变化的重要因素^[3-8]。早期对温带半干旱地区土壤磁性气候关系的研究认为,降水是控制土壤磁性变化的主导因素,土壤磁性随降水量的增多而增强^[3, 5-6]。但这种关系并不是单调的,大量研究表明当降水量超过某个阈值后,磁性就会随着降水量的增多而减弱,在温带地区这个降水量阈值约为 1 200 mm^[7, 9-10]。这些研究揭示了降水对土壤磁性的影响,但对温度与磁性的关系探讨较少。近年来,一些学者提出温度也是影响土壤磁性变化的重要因素^[11],尤其是在具有更高温度和更高降水量的热带地区,降水量阈值可达 1 500 mm 左右^[12-13],这是由于旺盛的蒸发使得土壤总体上处于相对干燥透气的状态,可见温度对土壤磁性的变化同样具有重要的影响。不同地区具

有不同的降水、温度组合方式,大体可以分为干冷、湿冷、干热、湿热等四种,干冷气候条件的土壤环境磁学研究如黄土高原^[14]、新疆^[15]等,湿热气候条件的如中国南方的海南^[16-17]、福建^[18-19];同时,不同地区的温度、降水数值差异也较大。因此,开展不同地区土壤磁性气候关系的研究是土壤环境磁学的重要内容,对于更全面理解磁性对气候变化的响应具有重要意义。

与北半球同纬度的其他亚热带干旱地区不同,受季风影响的中国南方具有湿润多雨的气候特点和独特的水热组合方式,因此被称为湿润亚热带,具有独特性。该区山地受垂直地带性的影响,随着海拔升高,降水量升高而温度降低,有别于较大空间范围内温度与降水的同步变化,从而更有利于区分温度/降水对土壤磁性的影响^[20]。周宁作为福建省年平均降水量最高的地区之一,境内山地土壤受垂直地带性影响,呈现出高降水量和低温的水热组合方

式,是研究该气候条件下土壤磁性转化的理想场所。考虑到南方土壤的形成环境较北方风成黄土更为复杂,区域间磁性矿物组成差异显著,磁学参数本身也具有多解性的局限,所以采用多种磁学参数综合研究和非磁学参数对比分析更能接近事物的本质^[21]。本文选择周宁地区发育于花岗岩风化壳上的一个黄红壤剖面作为研究对象,通过系统的环境磁学研究,结合色度、地化元素和漫反射光谱,分析其土壤磁学特征,进而探讨该气候条件下亚热带山地土壤中磁性矿物的转化规律。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况与样品采集

周宁县地处福建省东北部,介于 $26^{\circ}53' \sim 27^{\circ}19' N$, $119^{\circ}07' \sim 119^{\circ}21' E$ 之间。受季风环流和地形影响,该地形成了中亚热带季风山地气候,多年平均气温(MAT) $15^{\circ}C$,多年平均降水量(MAP) $2\ 049.3\ mm$ (数据来源:中国气象局)。

周宁剖面(ZN剖面)的地理坐标为 $27^{\circ}07'0.66'' N$, $119^{\circ}20'21.38'' E$,剖面底部海拔 $906.4\ m$ (图1a)。相比于其他海拔相近地区的剖面,该剖面离周宁气象站($27^{\circ}05'24'' N$, $119^{\circ}12'36'' E$,海拔 $899.3\ m$)较近,因此采用的气象数据可较真实反映剖面的气候条件。剖面野外照片如图1b所示(红色虚线为土壤

层与风化壳的分界线)。土壤层厚薄不等,与风化壳的界线起伏不定。选择出露良好、土壤层次完整易辨、局部坡度 $<5^{\circ}$ 、厚度较大之处进行描述和取样。按发生学分类,该土壤为黄红壤。剖面厚约 $1.9\ m$,按土壤发生层次系统自上而下划分为3层:A层(腐殖质层, $0 \sim 40\ cm$)呈暗黄棕色,因含有较多有机质和植物根系而使颜色变深,质地松散且不均一;B层(淀积层, $40 \sim 100\ cm$)呈黄红色,质地黏重、较为均一,具有典型的团块状结构;C层(母质层, $100 \sim 190\ cm$)呈黄白混杂,风化裂隙发育,因其母质中含有较多洁白细腻的高岭土使得土体颜色变浅,可见少量粗颗粒石英。A层和B层为土壤,C层为风化壳上部,依据为土壤经历了较强成土作用呈土状堆积物堆积于风化壳之上,风化壳风化程度较低而保留了岩石特征。ZN土壤剖面是发育于花岗岩风化壳上的黄红壤剖面,该剖面排水良好,未见潜育化/潴育化特征。在清除表面浮土后,以 $10\ cm$ 为采样间距共收集20个土壤样品和风化壳上部样品。需要特别说明的是,本文使用的是砖红壤、赤红壤、红壤、黄红壤和黄壤这一系列土壤发生分类名称。这些以颜色命名的土壤直观地反映了赤铁矿和针铁矿的含量及相对比例。赤铁矿和针铁矿主要受控于气候条件(温度/降水),因此这一系列的土壤名称也具有气候指示意义,反映土壤的纬度地带性或垂直地带性。

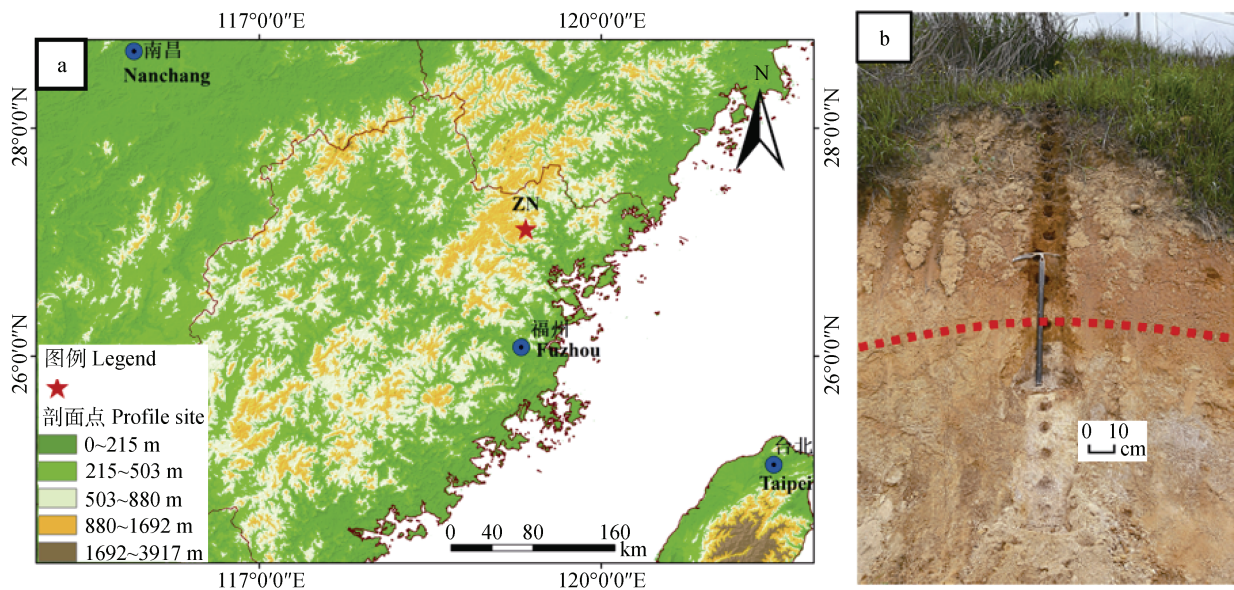


图1 周宁黄红壤剖面地理位置示意图(a)和剖面照片(b),图b中的红色虚线为B层与C层分界线
Fig. 1 Location of Profile ZN of yellow-red soil (a) and photo of the profile (b), red dotted line is the boundary of horizon B and C

1.2 实验方法

磁学测量、数据处理方法参照文献[18]。样品置于室内晾干后,挑除表层样品中肉眼可见植物根系。取适量轻轻研磨成粉末,包入塑料薄膜使之紧密压实并装入无磁性塑料样品盒,分别测量以下参数:磁化率仪的型号为 Bartington MS2 型,用其测量低频磁化率(χ_{lf})和高频磁化率(χ_{hf})(下文中磁化率 χ 指低频磁化率)。旋转磁力仪的型号为 Molspin Minispin,用其测量各类剩余磁化强度(简称“剩磁”)。交变退磁仪的型号为 ASC D-2 000 型,将其交变场峰值设为 100 mT,直流场设为 50 μ T,获得非磁滞剩磁(ARM);脉冲磁力仪的型号为 IM-10-30,用其测得正反向场、不同场强下的等温剩磁(IRM),并计算得出饱和等温剩磁(SIRM)、硬剩磁(HIRM)、剩磁矫顽力(B_{cr})和 S-ratio 等磁学参数。磁滞回线与热磁曲线采用可变场居里天平(VFTB)测定。

色度测量:色度仪的型号为 Color Flex[®] EZ 型,取适量 200 目以下的干燥样品平铺于测试皿,压平至不起皱,利用 CIELAB 表色体系,测定亮度(L^*)、红度(a^*)和黄度(b^*),并计算彩度 $Ca^*b^*=[(a^*)^2+(b^*)^2]^{1/2}$ 和 b^*/a^* 。

地化测量:用压片机将适量干燥样品(无水硼酸覆在样品周围)压制成光滑圆饼,用帕纳科 Epsilon3 台式能量色散 X 射线荧光光谱仪对其进行元素测量。

漫反射光谱测量:取适量 200 目以下的干燥样品置于测试皿中,使用岛津 UV-2 600+ISR-2 600PLUS 紫外/可见光分光光度计测量,测量波长范围为 380~700 nm,步长为 5 nm。对结果进行一阶导数处理,用其曲线特征峰峰值来衡量针、赤铁矿相对含量。

2 结果

2.1 常温磁学特征

ZN 剖面各层次磁学参数的深度变化曲线如图 2 所示。该剖面整体磁化率(χ)偏低,介于 $12.92 \times 10^{-8} \sim 86.67 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,表明亚铁磁性矿物含量较少。随着深度减小磁化率呈先降低而后升高,可能是由于颗粒较粗的原生强磁性矿物磁铁矿在成土过程中被破坏而使磁化率降低;同时,在成土作用下,含

铁硅酸盐矿物(如角闪石、辉石、黑云母)中铁的释放,细粒强磁性矿物的生成使得土壤磁性增强。饱和等温剩磁(SIRM)介于 $126.80 \times 10^{-5} \sim 1\ 074.38 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。硬剩磁(HIRM)介于 $2.41 \times 10^{-5} \sim 171.53 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,随着深度增加 HIRM 增大,表明剖面下部含有相对较多的硬磁性矿物。百分比频率磁化率($\chi_{fd}\%$)用于指示超顺磁(SP)颗粒的相对含量,其值均小于 5%,A 层和 B 层的 $\chi_{fd}\%$ 远高于 C 层,表明 A 层和 B 层含有少量 SP 颗粒,而 C 层基本没有 SP 颗粒。指示单畴(SD)颗粒绝对含量的非磁滞磁化率(χ_{ARM})随深度增加而减小,A 层 χ_{ARM} 高于 B 层和 C 层,表明剖面上部含有较多的 SD 颗粒,成土作用使磁颗粒变细。ARM/SIRM 随深度的变化曲线与 χ_{ARM} 一致。SIRM/ χ 不仅与磁性矿物类型有关,还受磁颗粒大小影响,A 层和 B 层 SIRM/ χ 低于 C 层,表明剖面上部 SP 颗粒含量相对较高,下部多畴(MD)颗粒含量相对较高,随着深度增加 SIRM/ χ 增大,进一步表明剖面下部含有相对较多的反铁磁性矿物。剩磁矫顽力(B_{cr})可用于区分磁性矿物类型,呈现与 SIRM/ χ 相似的变化趋势。S-ratio 指示软、硬磁性矿物的比重大小^[22-23],ZN 剖面 S-ratio 均值为 78.48%,C 层 S-ratio 低于 A 层和 B 层,表明该剖面以亚铁磁性矿物为主,C 层反铁磁性矿物含量相对较高。剖面各层次具有显著的磁学特征差异。

图 3 为 ZN 剖面各层样品的磁滞回线。总体而言,各层次磁滞回线形态基本一致均呈“S”型。其中 A 层(图 3a~图 3b)、B 层(图 3c~图 3d)和 C 层上部(图 3e~图 3f)未进行顺磁校正的曲线在 300 mT 之前已经闭合,并且矫顽力(B_c)低于 20 mT,表明剖面上部含有相对较多的亚铁磁性矿物;C 层下部(图 3g~图 3h)样品的磁滞回线在 400~500 mT 之间达到闭合,磁滞回线的腰相对较粗,其 B_c 仍较小,表明剖面下部同样含有较多的亚铁磁性矿物,但含有一定量的反铁磁性矿物。A 层和 B 层样品经顺磁校正后其高场部分磁化强度下降幅度远大于 C 层,表明剖面上部顺磁性矿物含量较高。整体而言,该剖面以亚铁磁性矿物为主,A 层和 B 层含有相对较多的顺磁性矿物,C 层下部含有相对较多的反铁磁性矿物。

2.2 高温磁学特征

高温磁学测量主要包括对高温磁化率和高温磁

化强度的测量，磁性矿物在加热过程中表现出不同的磁学特征，因此可以通过热磁曲线的转折温度(居里点、尼尔点或相变点)来鉴别磁性矿物^[22, 24-25]。图 4 为 ZN 剖面各层次代表性样品的磁化强度与温度相关曲线 ($M-T$ 曲线)，其随着深度增加表现出较大差别。首先，从居里点分析。A 层样品 (图 4a~图 4b) 和 C 层样品 (图 4e~图 4h) 加热曲线与冷却曲线的居里点均显示明显的 580 °C 居里点。而 B 层 0.5 m 样品 (图 4c) 加热曲线与冷却曲线的居里

点约为 580 °C，但 0.8 m 样品 (图 4d) 居里点不明显。B 层样品曲线噪点多，与磁化率低值相对应。

其次，从加热-冷却循环分析磁化强度变化。A 层样品和 0.5 m 处 B 层样品的冷却曲线位于加热曲线上方，表明加热过程中生成了强磁性矿物；并且随着深度增加，磁铁矿的生成量逐渐降低，表现为磁化强度的增加幅度呈下降趋势(图 4a~图 4c 冷却曲线 60 °C 的 M/M_0 对应数值分别为 2.293, 1.592, 1.253)。0.8 m 处 B 层样品和 C 层样品的冷却曲线均

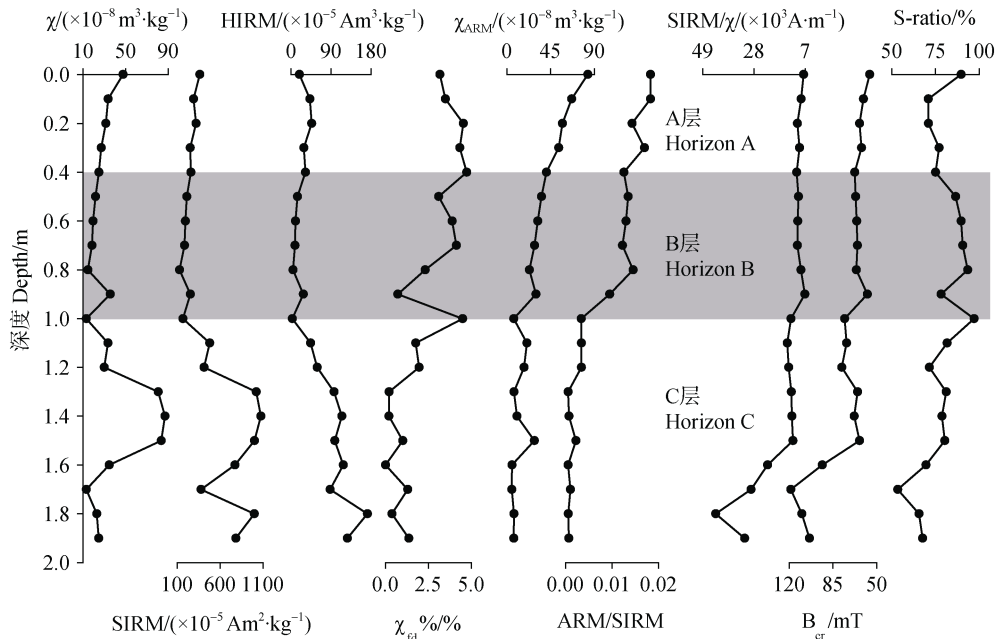


图 2 周宁剖面常温磁学参数

Fig. 2 Room temperature magnetic parameters of Profile ZN

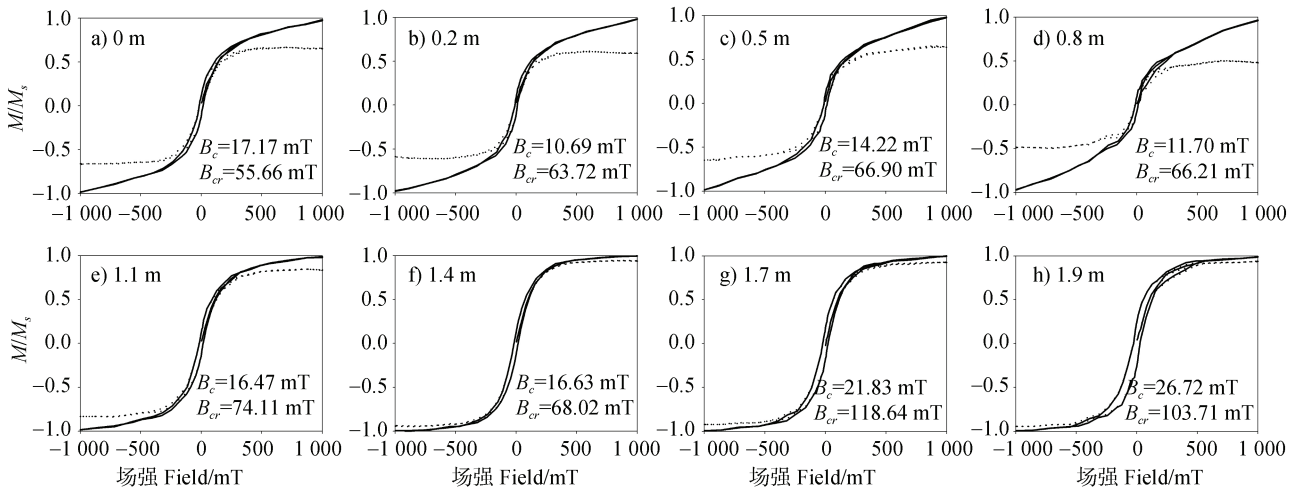


图 3 周宁剖面代表性样品磁滞回线 (实线: 未进行顺磁校正的磁滞回线, 虚线: 顺磁校正后的磁滞回线)

Fig. 3 Magnetic hysteresis loops of representative samples collected from Profile ZN (Solid line: hysteresis loop without paramagnetic correction, and dashed line: hysteresis loop after paramagnetic correction)

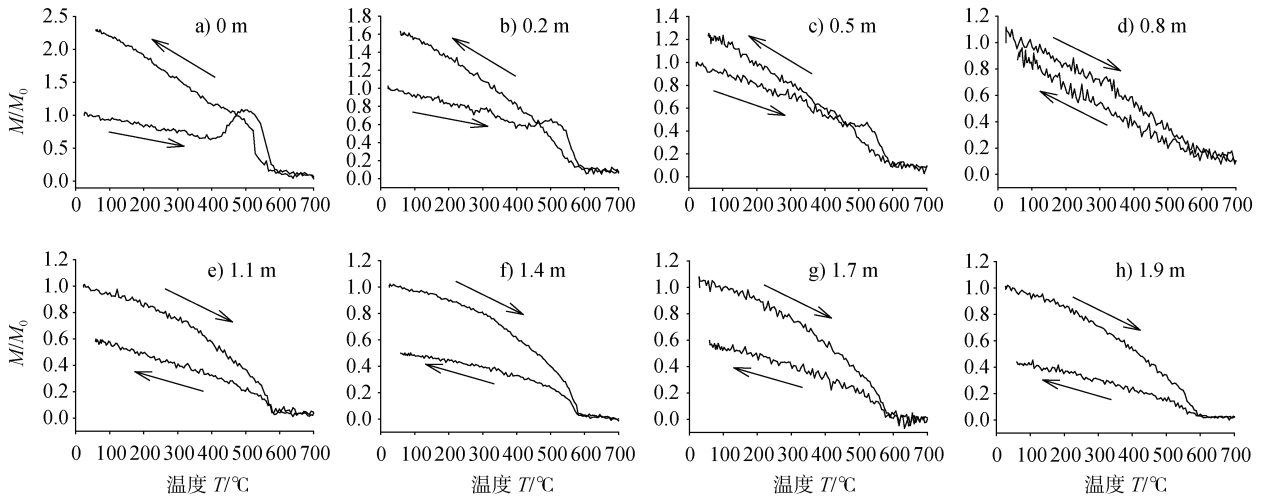


图 4 周宁剖面代表性样品 $M-T$ 曲线

Fig. 4 $M-T$ curves of representative samples collected from Profile ZN

位于加热曲线下方 (图 4d~图 4h), 表明加热过程中强磁性矿物向弱磁性矿物转变而失去了部分磁化强度, C 层样品均失去了 40% 以上的磁化强度, 表明存在大量的热不稳定矿物, 可能为热不稳定磁赤铁矿。第三, 从热磁曲线形态分析。各土壤层样品均呈现出不同的热磁曲线形态。所有样品的加热曲线从室温到 120 °C 磁化强度呈略微减小, 在 120~200 °C 略微增加, 表明针铁矿向磁赤铁矿转变^[26]; C 层样品的加热曲线在 350 °C 左右存在不明显快速下降, 为磁赤铁矿转化为赤铁矿所致^[24-25]; A 层样品和 0.5 m 处 B 层样品的加热曲线在 500 °C 左右存在磁化强度的峰值, 表明生成了大量强磁性矿物导致磁化强度大幅增加。在温度达到居里点后曲线并未

降至 0, 表明还有硬磁性矿物和/或顺磁性矿物的存在^[18]。结合 $M-T$ 曲线和磁滞回线结果, 可以确定各土壤层主要亚铁磁性矿物为磁铁矿, C 层含有磁赤铁矿, 各土壤层均含有少量的反铁磁性矿物赤铁矿和针铁矿。

2.3 色度特征

CIELAB 表色系统被广泛用于土壤研究^[18, 27-29]。ZN 剖面色度参数的深度变化曲线如图 5 所示。剖面整体 L^* 随深度增加而增大, 主要指示有机质含量。 a^* 、 b^* 与 Ca^*b^* 具有相同的变化趋势, 三者在本层具有最高值, C 层具有最低值。 b^*/a^* 与 L^* 具有相反的变化趋势, 在剖面表层具有高值表明该指标在垂直方向上受水分影响较大。

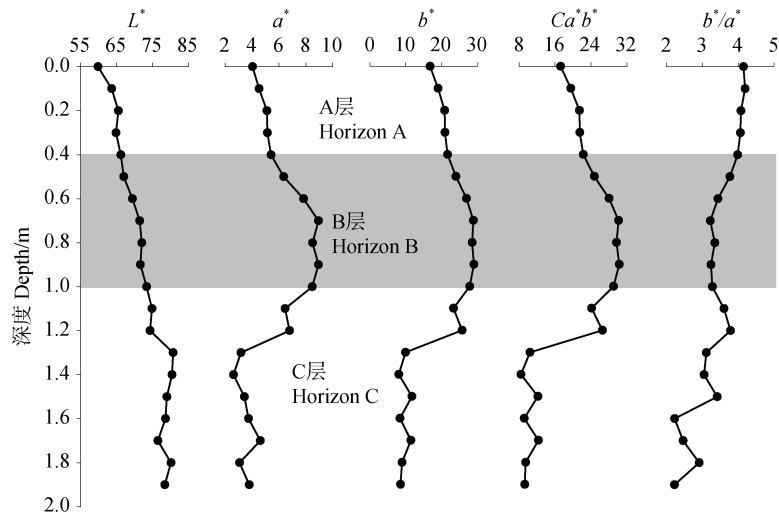


图 5 周宁剖面色度参数

Fig. 5 Chromatic parameters of Profile ZN

2.4 常量地球化学元素特征

元素组成可以反映土壤淋溶程度和风化程度^[21, 30]。铁元素在地表较为常见,在成土过程中,来自含铁矿物中的 Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+} , 最终产物为赤铁矿,这也是南方大范围地区红壤显示红色的原因^[31]。研究表明,化学蚀变指数(CIA)等元素氧化物的分子比可以衡量风化程度^[30, 32]。

ZN 剖面地化参数随深度变化曲线如图 6 所示。其中 Fe_2O_3 随成土作用的增强而增加,表明在成土过程中,其他元素相对淋溶而铁元素相对富集。CIA 是由 CaO 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 等四种氧化物计算得出,数值介于 85~100 指示湿热气候条件下经历较强风化,65~85 指示经历中等程度风化。该剖面 CIA 与 Fe_2O_3 的变化趋势基本一致,其均值低于热带亚热带低海拔地区湿热气候条件下的 CIA 值^[21],表明在较高海拔地区的气候条件下的风化程度较弱。剖面 B 层 CIA 值高于 A 层和 C 层。A 层位于土壤顶部,理应风化程度最高并获得最高的 CIA 值,然而实际情况并非如此。对此可能的解释是 A 层在风化过程形成的细粒物质(如黏土矿物)向下迁移,并在 B 层淀积。

2.5 漫反射光谱特征

漫反射光谱是衡量针铁矿(Gt)、赤铁矿(Hm)相对含量的有效方法。通常在漫反射光谱的一阶导数图谱中,代表针铁矿含量的特征峰峰值在 435 nm 左右,代表赤铁矿含量的特征峰峰值在 565 nm 左右^[29]。图 7 为 ZN 剖面代表性样品的漫反射光谱和土壤层

(A 层和 B 层)色度参数与漫反射光谱参数的相关关系。由图 7a 可以看出,除了 0.9 m 处样品外,其余样品的 435 nm 处峰高均大于 565 nm 处峰高。图 7b~图 7d 则显示剖面上部土壤层(A 层和 B 层)中 Gt (435 nm 处峰高)与 b^* 、Hm (565 nm 处峰高)与 a^* 、Gt/Hm (435 nm 与 565 nm 处峰高之比)与 b^*/a^* 具有良好的相关性(R^2 分别为 0.885 9, 0.906 6, 0.919 4),表明 ZN 剖面的色度参数与漫反射光谱一致,可以良好地反映剖面中针、赤铁矿的相对含量。

3 讨论

磁学参数的多解性、风化/成土过程中磁性矿物生成、转化途径的复杂性以及影响因素的多样性使得对土壤磁性定量研究非常困难。在湿润亚热带地区,土壤中磁性矿物的变化既有次生磁性矿物的生成,也有原生磁性矿物的破坏^[18]。磁化率是磁学信息的综合反映,目前还难以如黄土高原地区一样进行原生和次生磁信号的分离。当前,该地区的土壤环境磁学研究还处于起步阶段,大部分研究通过选择主要受单一因素影响的土壤剖面系列探讨磁性矿物生成的转化机制。本文在上述分析基础上,选取该区邻近已经发育的花岗岩风化壳土壤剖面进行对比分析,主要探讨磁性矿物对气候条件的响应。对比剖面分别是南平北站红壤剖面(NPN)^[18]、浦城古楼(PC-GL)和浦城上云(PC-SY)剖面^[20]。四个剖面均位于福建省北部,详细参数如表 1 所示。

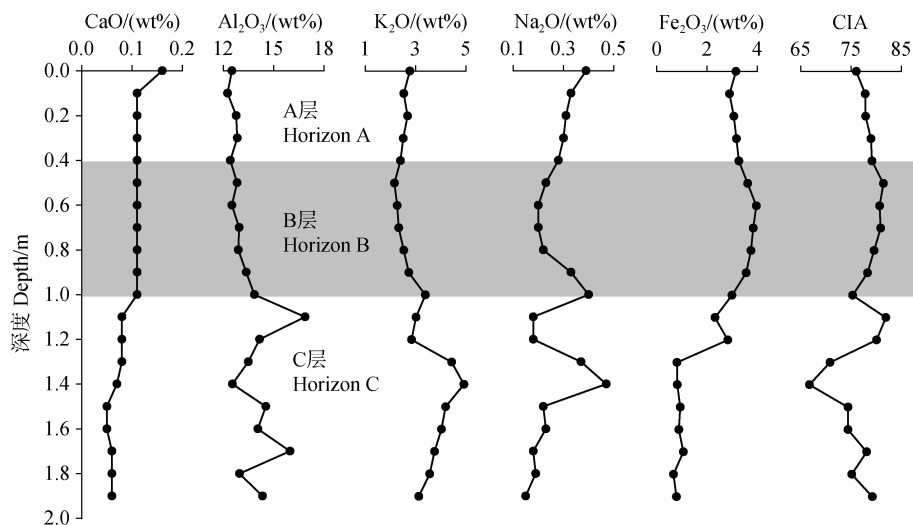


图 6 周宁剖面地球化学参数

Fig. 6 Geochemical parameters of Profile ZN

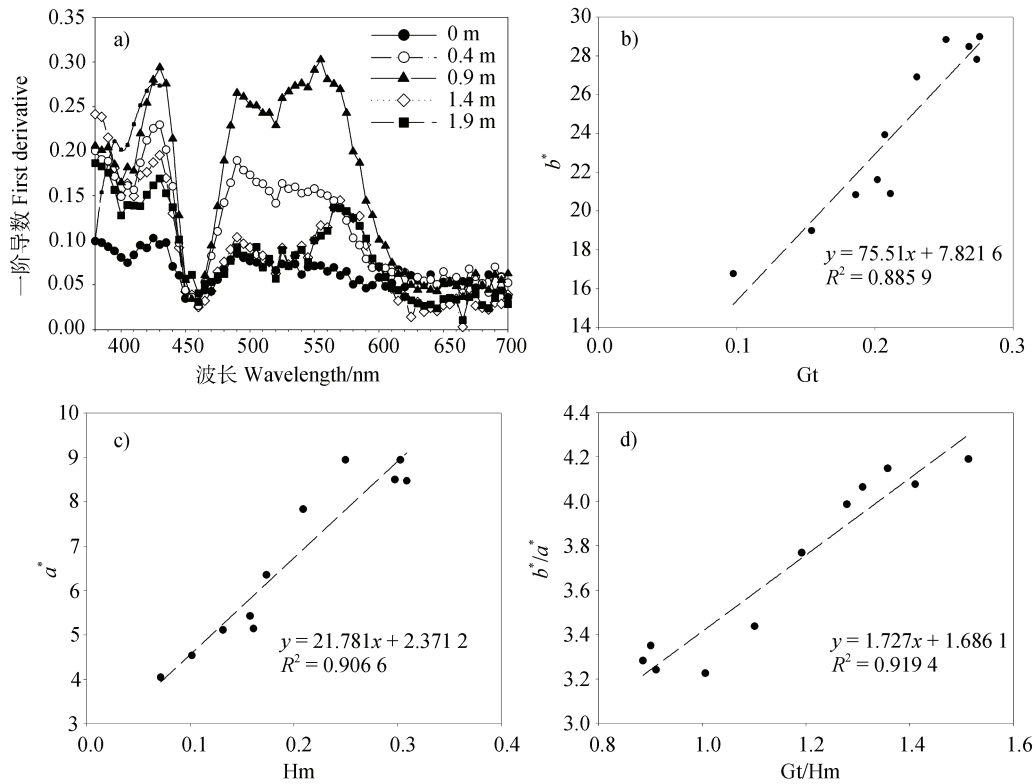


图 7 代表性样品漫反射光谱和土壤层 (A 层和 B 层) 色度参数与漫反射光谱参数的相关关系
 Fig. 7 Correlations of the diffuse reflectance spectrum parameters with the diffuse reflectance spectra of the representative samples and chromatic parameters of soil horizons (horizon A and B)

表 1 不同剖面常温磁学和色度特征值均值

Table 1 Mean room temperature magnetic and chromaticity characteristic values of different profiles

剖面代码 Profile code	χ / $(\times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	χ_{ARM} / $(\times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	$\chi_{\text{rd}}\%$ /%	L^*	a^*	b^*	Ca^*b^*	b^*/a^*
福建周宁 ZN	34.72	28.26	2.35	72.39	5.55	18.98	19.80	3.38
南平北站 NPN	85.23	122.06	5.21	67.55	16.90	31.36	35.65	1.86
浦城古楼 PC-GL	143.67	250.48	2.76	70.30	6.77	23.96	24.91	3.67
浦城上云 PC-SY	89.03	84.21	1.58	65.61	6.56	22.59	23.52	3.46

3.1 磁性差异的主导因素

四个剖面均发育于中亚热带季风气候区的花岗岩风化壳上,受海拔影响,剖面的气候(主要为温度和降水量)、生物和局部环境等存在差异。四个剖面的气候条件与海拔高度不同:ZN 剖面年均温度 15 °C,年均降水量 2 049 mm,剖面底部海拔 906 m;NPN 剖面年均温度为 19.3 °C,年均降水量为 1 660 mm,剖面底部海拔为 109 m;PC-GL 与 PC-SY 剖面所在的浦城县(海拔为 276.9 m)年均温度 17.7 °C,

年均降水量 1 720 mm,PC-GL 剖面底部海拔 553 m,PC-SY 剖面底部海拔为 920 m。总体上,这四个剖面所在地区为湿热气候。但由于地形因素,福建较高海拔地区气温低降水多,较低海拔地区气温高降水少。为便于对比,用“相对湿冷”来描述较高海拔地区的气候状况。从对 ZN 剖面的磁学特征分析可知,ZN 剖面以亚铁磁性矿物为主,与其余三个剖面的主导磁性矿物一致,因此成土时间不是磁性差异的主因。母质虽同为花岗岩风化壳,但其中磁性

矿物、铁元素的含量及赋存形式均对原生磁性矿物存在影响，并进一步影响次生磁性矿物。在四个剖面中，ZN 剖面 C 层的磁化率最低，约为 PC-GL 剖面磁化率的 1/5，由此可知不同区域母质的本底磁性强弱有较大差别。此外，ZN 剖面 C 层土壤 Fe_2O_3 的含量仅为 1.24%，显著低于 A 层与 B 层，说明初始铁元素含量并不一定是磁化率升高的抑制因素。四个剖面的局地坡度均在 5° 以下，表明地形并不是影响磁性强弱的主导因素。生物（动植物与微生物）的生存和活动主要受气候条件的制约，因此暂将其纳入气候因素讨论。

气候（主要为温度和降水量）是影响土壤磁性变化的一个重要因素。降水量影响着细粒强磁性矿物的生成、转化和溶解。温度既能影响化学反应速率，又通过改变土体中的有效水分而影响磁性矿物。随着海拔升高，温度呈降低趋势，而降水量反之，土壤中的水分含量也明显升高。从四个剖面的磁学特征对比可知，海拔越高，磁颗粒越粗，因其母质本底磁性强弱不同，磁化率变化并无明显规律。对比四个剖面的色度结果，ZN 剖面具有最低的 a^* 、 b^* 、 Ca^*b^* ，NPN 剖面恰好与其相反，表明较高降水量和较低温度不利于反铁磁性矿物赤铁矿和针铁矿的形成。在低海拔地区，温度较高有利于赤铁矿的形成，土体呈红色；在高海拔地区，气候条件更为冷湿，有利于针铁矿的形成而使土体呈黄色。 b^*/a^* 反映了针铁矿与赤铁矿的比值^[18, 33]，ZN 剖面、PC-GL 剖面 and PC-SY 剖面 b^*/a^* 的均值分别为 3.38、3.67 和 3.46。考虑到 PC-GL 剖面 and PC-SY 剖面的海拔，其实际的年均温度和年均降水量可能与 ZN 剖面比较接近。三个剖面的 b^*/a^* 也较为接近，而与 NPN 剖面（1.86）相差较大。表明次生的弱磁性矿物赤铁矿和针铁矿主要受气候影响。

3.2 相对湿冷气候条件下土壤磁性矿物的转化

图 8 显示了 ZN 剖面磁学、地化、色度参数的对比。ZN 剖面的 CIA 和 Ca^*b^* 随深度变化相同，而磁化率相反，从数据曲线变化趋势上看，ZN 剖面与相对低海拔的 NPN 剖面^[18]和 FZ 剖面相似^[21]，表明随着化学风化作用的增强，母质中的原生强磁性矿物（如磁铁矿、磁赤铁矿）转化为赤铁矿、针铁矿等弱磁性矿物，表现为 Ca^*b^* 的增加和磁化率的降低。CIA 和 Ca^*b^* 分别为化学风化程度、赤铁

铁与针铁矿总含量的反映，从数值上看，ZN 剖面与 NPN 剖面 and FZ 剖面相差较大。ZN 剖面的 CIA 均值为 77.35，指示中等程度风化；而 FZ 剖面的 CIA 均值为 90.76，指示强烈程度风化。ZN 剖面的 Ca^*b^* 均值为 19.80；NPN 剖面 and FZ 剖面的 Ca^*b^* 均值分别为 35.65^[18]和 35.82^[21]，两者相当。相比之下，低海拔地区相对高温和低湿条件下生成的赤铁矿和针铁矿总量比较高。这表明在湿润亚热带地区，气温（而非降水）主导化学风化强度，进而影响次生铁氧化物/铁氢氧化物的总生成量。 b^*/a^* 可反映针铁矿和赤铁矿的相对比例。ZN 剖面的 b^*/a^* 均值为 3.38，NPN 剖面 and FZ 剖面的 b^*/a^* 均值分别为 1.86^[18]和 1.79^[21]，表明 ZN 剖面针铁矿比例更高。相对低温和高湿的气候条件更有利于针铁矿的生成和保存。最近，一项关于福建戴云山垂直地带性山地土壤环境磁学的研究表明，针铁矿和赤铁矿随海拔呈现出非常显著的规律性变化，且 MAT 约 13°C 以下和 MAP 约 1 900 mm 以上，赤铁矿消失，该水热条件下发育的土壤呈黄色^[34]。ZN 剖面的 MAT 为 15°C ，MAP 为 2 049 mm，在此条件下，土壤呈黄红色。这些特征表明，气温和降水应该有互补的作用，较高气温有利于蒸发而减少土体水分含量。

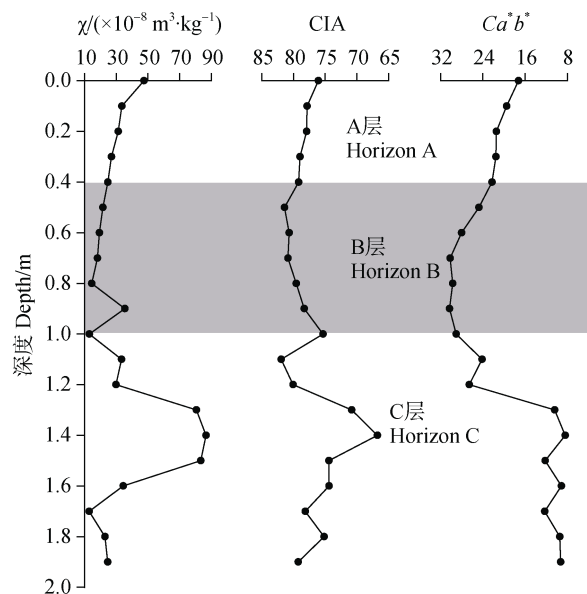


图 8 周宁剖面磁学、地球化学、色度参数对比
Fig. 8 Comparison of magnetic, geochemical, and chromatic parameters of Profile ZN

ZN剖面中磁学、地化、色度等参数相互之间可以进行较好的比对,表明这些参数能够较为准确地指示亚热带地区花岗岩母质上土壤的风化。因此,本研究认为相对低温高湿地区的土壤发生层次之间的磁性差异主要受气候控制,体现在以下几个方面:(1)就磁性矿物种类而言,低温高湿的气候条件使土体处于较为湿润的环境,生成的次生磁性矿物更多的是针铁矿。亚铁磁性矿物如磁铁矿转化成弱磁性矿物甚至溶解;(2)就磁性矿物含量而言,由于较低的气温,化学风化强度较低,弱磁性矿物(针铁矿和赤铁矿)的总体含量低于低海拔的高气温地区;(3)就磁性矿物颗粒而言,原生磁性矿物受强烈的风化作用而使颗粒变细,新生成的次生磁性矿物也以细颗粒为主。

4 结论

ZN剖面磁性矿物含量相对较少,从对磁性影响大小而言,以磁铁矿为主,同时含有少量的磁赤铁矿、赤铁矿和针铁矿、顺磁性矿物。从质量分数而言,针铁矿含量最高,赤铁矿次之,磁铁矿和磁赤铁矿含量极低。剖面下部磁颗粒较粗,以多畴颗粒为主,随着深度减小磁颗粒变细,单畴和超顺磁颗粒增多。母质和气候条件是不同剖面间总体磁学特征差异的两个重要影响因素。次生磁性矿物(特别是赤铁矿和针铁矿)的含量主要受气候条件控制。色度指标 b^*/a^* 可用于衡量针/赤铁矿含量。相对湿冷气候条件下土壤中磁性矿物的转化以强磁性矿物磁铁矿和磁赤铁矿转化为弱磁性矿物赤铁矿和针铁矿为主。成土作用/风化作用使磁颗粒变细。气温(而非降水)是湿润亚热带地区花岗岩风化壳上发育土壤中针铁矿和赤铁矿含量以及相对比例的主导影响因素。

参考文献 (References)

- [1] 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.]
- [2] Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China[J]. *Nature*, 1982, 300 (5891): 431—433.
- [3] Liu Q S, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. Environmental magnetism: Principles and applications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50 (4): RG4002.
- [4] Hu P X, Liu Q S. The production and transformation of magnetic minerals during pedogenesis and its paleoclimate significance[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34 (3): 458—473. [胡鹏翔, 刘青松. 磁性矿物在成土过程中的生成转化机制及其气候意义[J]. 第四纪研究, 2014, 34 (3): 458—473.]
- [5] Maher B A. Palaeoclimatic records of the loess/paleosol sequences of the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 154: 23—84.
- [6] Maxbauer D P, Feinberg J M, Fox D L. Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 155: 28—48.
- [7] Song Y, Hao Q Z, Ge J Y, et al. Quantitative relationships between modern soil magnetic susceptibility and climatic variables of the Chinese loess plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(4): 679—689. [宋扬, 郝青振, 葛俊逸, 等. 黄土高原表土磁化率与气候要素的定量关系研究[J]. 第四纪研究, 2012, 32 (4): 679—689.]
- [8] Hyland E G, Sheldon N D, van der Voo R, et al. A new paleoprecipitation proxy based on soil magnetic properties: Implications for expanding paleoclimate reconstructions[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015, 127 (7/8): 975—981.
- [9] Lü H Y, Han J M, Wu N Q, et al. Magnetic susceptibility Analysis of modern soils in China and its paleoclimatic significance[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.]
- [10] Liu Z F, Liu Q S, Torrent J, et al. Testing the magnetic proxy χ_{FD}/HIRM for quantifying paleoprecipitation in modern soil profiles from Shaanxi Province, China[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 368—378.
- [11] Gao X B, Hao Q Z, Wang L, et al. The different climatic response of pedogenic hematite and ferrimagnetic minerals: Evidence from particle-sized modern soils over the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 179: 69—86.
- [12] Long X Y, Ji J F, Balsam W, et al. Grain growth and transformation of pedogenic magnetic particles in red Ferralsols[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42 (14): 5762—5770.
- [13] Long X Y, Ji J F, Barrón V, et al. Climatic thresholds for pedogenic iron oxides under aerobic conditions Processes and their significance in paleoclimate reconstruction[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016,

- 150: 264—277.
- [14] Liu X B, Xia D S, Jia J, et al. Magnetic properties of Jiuzhoutai loess in Lanzhou and its significance of palaeoclimate[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32 (4) : 761—770. [刘现彬, 夏敦胜, 贾佳, 等. 兰州九州台黄土磁性特征及其古气候意义研究[J]. *第四纪研究*, 2012, 32 (4) : 761—770.]
- [15] Lü B, Liu X M, Zhao G Y, et al. Rock magnetic properties of Bole loess in Xinjiang and its environmental significance[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, 48 (5) : 1—8. [吕宾, 刘秀铭, 赵国永, 等. 新疆博乐黄土岩石磁学特征及环境意义[J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2012, 48 (5) : 1—8.]
- [16] Liu Z F, Ma J L, Wei G J, et al. Magnetism of a red soil core derived from basalt, northern Hainan Island, China: Volcanic ash versus pedogenesis[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122 (3) : 1677—1696.
- [17] Ouyang T P, Tang Z H, Zhao X, et al. Magnetic mineralogy of a weathered tropical basalt, Hainan Island, South China[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 2015, 240: 105—113.
- [18] Zheng X F, Lü B, Chen Z X, et al. A comparative analysis of magnetic properties of subtropical red soil derived from different weathering crusts[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62 (9) : 3509—3523. [郑兴芬, 吕宾, 陈梓炫, 等. 亚热带地区发育于不同母岩风化壳上的红壤磁学特征对比及其环境意义[J]. *地球物理学报*, 2019, 62 (9) : 3509—3523.]
- [19] Lü B, Liu X M, Wang T, et al. Rock magnetic properties of subtropical red soils developed on granite[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34 (3) : 504—515. [吕宾, 刘秀铭, 王涛, 等. 花岗岩上发育的亚热带红土岩石磁学特征[J]. *第四纪研究*, 2014, 34 (3) : 504—515.]
- [20] He M J, Lü B, Wang S S, et al. Magnetism characteristics of soils in the Wuyi Mountains and their environmental significance[J]. *Mountain Research*, 2019, 37 (5) : 649—661. [何梅菊, 吕宾, 王姗姗, 等. 武夷山脉土壤磁学特征及环境意义[J]. *山地学报*, 2019, 37 (5) : 649—661.]
- [21] Lü B, Liu X M, Zhao G Y, et al. Mechanism of magnetic minerals transformation of subtropical red soils derived from granite weathering crust: Comprehensive analysis base on non-magnetic indicators and rock magnetism[J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36 (2) : 367—378. [吕宾, 刘秀铭, 赵国永, 等. 亚热带地区花岗岩风化壳上发育红土的磁性矿物转化机制——基于非磁学指标和岩石磁学的综合分析[J]. *第四纪研究*, 2016, 36 (2) : 367—378.]
- [22] Thompson R, Oldfield F. *Environmental magnetism*[M]. London: Allen and Unwin, 1986: 1—227.
- [23] Wu Y, Zhu Z Y, Rao Z G, et al. Mid-Late Quaternary loess-paleosol sequence in Lantian's Yushan, China: An environmental magnetism approach and its paleoclimatic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (26) : 2989—3000.
- [24] Liu X M, Lü B, Li P Y, et al. Effects of heating environments on thermomagnetic behaviors of synthetic maghemite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56 (5) : 1560—1567. [刘秀铭, 吕宾, 李平原, 等. 加热环境对人工合成磁赤铁矿热磁行为的影响[J]. *地球物理学报*, 2013, 56 (5) : 1560—1567.]
- [25] Deng C L, Zhu R X, Jackson M J, et al. Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese Loess Plateau: A pedogenesis indicator. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26 (11/12) : 873—878.
- [26] Ao H, Deng C L. Review in the identification of magnetic minerals[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22 (2) : 432—442. [敖红, 邓成龙. 磁性矿物的磁学鉴别方法回顾[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22 (2) : 432—442.]
- [27] Yang S L, Fang X M, Li J J, et al. Studies on the qualitative and semi-quantitative relationship research between the topsoil color and climate[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31 (Suppl. 1) : 175—181. [杨胜利, 方小敏, 李吉均, 等. 表土颜色和气候定性至半定量关系研究[J]. *中国科学 (D 辑)*, 2001, 31 (Suppl. 1) : 175—181.]
- [28] Shi P H, Yang T B, Tian Q C, et al. Chroma characteristics in the loess-paleosol at Jingyuan section and its signification to paleocliamate[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, 48 (2) : 15—23. [石培宏, 杨太保, 田庆春, 等. 靖远黄土-古土壤色度变化特征分析及古气候意义[J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2012, 48 (2) : 15—23.]
- [29] Lü B, Liu X M, Guo H, et al. Magnetic properties of the Cretaceous Shaxian Formation Stratum in Fujian Province and their environmental significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37 (3) : 519—531. [吕宾, 刘秀铭, 郭晖, 等. 福建白垩系沙县组地层磁学特征及其环境意义[J]. *沉积学报*, 2019, 37 (3) : 519—531.]
- [30] Xiong P S, Wang P, Zhang Y, et al. Geochemistry of elements and its paleoenvironmental implications from the red earth profile in the Hengyang basin[J]. *Mountain Research*, 2019, 37 (5) : 693—701. [熊平生, 王鹏, 张忆, 等. 衡阳盆地红土剖面元素地球化学特征及其古环境意义[J]. *山地学报*, 2019, 37 (5) : 693—701.]
- [31] Wen Q Z, Diao G Y, Jia R F, et al. Geochemical indicators and their significance in paleoclimatic changes in Weinan loess section since the last interglacial[J]. *Geochimica*, 1996, 25 (6) : 529—535. [文启忠, 刁

- 桂仪, 贾蓉芬, 等. 末次间冰期以来渭南黄土剖面地球化学指标所反映的古气候变化[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 529—535.]
- [32] Feng L J, Chu X L, Zhang Q R, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the neoproterozoic clastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 539—544. [冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数 (CIA) 及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 539—544.]
- [33] Zheng X F, Lü B, Chen Z X, et al. Latitudinal variation characteristics of soil color in different spatial extents and their climatic significance[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1186—1196. [郑兴芬, 吕宾, 陈梓炫, 等. 不同空间范围土壤色度的纬向变化特征及其气候意义[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1186—1196.]
- [34] Shi Y H, Mao X G, Liu X M, et al. Magnetic characteristics and environmental responses of vertical zonal soils in the subtropical mountains[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(9): 3420—3430. [师永辉, 毛学刚, 刘秀铭, 等. 亚热带山地垂直地带土壤的磁性特征及其环境响应[J]. 地球物理学报, 2020, 63(9): 3420—3430.]

(责任编辑: 檀满枝)