

文章编号: 1008-2786-(2019)5-649-13
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000456

武夷山脉土壤磁学特征及环境意义

何梅菊^{a,b}, 吕 镔^{a,b,c*}, 王姗姗^d, 郑兴芬^{b,c}, 陈梓炫^{b,c}

(福建师范大学 a. 地理学国家级实验教学示范中心; b. 地理科学学院;
c. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地; d. 物理与能源学院, 福州 350007)

摘 要: 中亚热带的武夷山脉山地土壤具有典型的垂直地带性, 对该地的研究有助于弥补当前亚热带地区以及垂直地带性土壤磁学研究的不足。本文以武夷山脉北段为研究区, 在不同海拔采集三个土壤剖面样品, 进行系统的环境磁学测量, 并结合色度指标, 探讨武夷山脉不同海拔山地土壤磁学特征差异和环境意义。研究结果表明: (1) 三个剖面所含磁性种类大体相同, 主要为强磁性的磁铁矿和磁赤铁矿、弱磁性的赤铁矿和针铁矿及顺磁性矿物。不同剖面、同一剖面的不同层位, 磁性矿物含量比例不同。(2) 随着海拔升高, 剖面磁颗粒变粗, 这是由于不同气候条件下磁性矿物转化途径不同。(3) 降水和气温的配置控制赤铁矿和针铁矿的含量及相对比例, 湿冷条件下, 针铁矿相对比例更高而使土体呈黄色。(4) 亚铁磁性矿物对气候的响应比反铁磁性矿物更为复杂, 局部小环境对磁性矿物也产生了较大的影响。色度指标 b^*/a^* (黄度/红度) 是具有明确意义的气候代用指标。

关键词: 山地土壤; 环境磁学; 磁性矿物; 色度; 武夷山脉

中图分类号: P318

文献标志码: A

环境磁学具有快速、经济、灵敏和对样品无损等优点, 广泛应用于地学、环境学等领域, 是近几十年来发展非常迅速的一门交叉学科^[1-2]。土壤环境磁学是其重要组成部分, 着重研究成土过程中磁学性质(主要包括磁性矿物种类、含量和颗粒大小)与成土因素的关系, 与气候因子的关系尤受关注^[2-5]。最为成功的研究实例是中国黄土环境磁学。以磁化率为代表的磁学参数在古气候研究中具有不可替代的作用^[4-6]。

黄土环境磁学的成功极大地促进了土壤磁学朝向广度和深度发展, 这使得较大范围内的对比研究成为可能。目前关于温带半干旱地区土壤磁性及其气候环境指示意义的研究已经相当成熟。大量的研究发现土壤磁性与成壤强度呈正相关^[2, 4-5], 但当

年均降水量超过某个临界值后, 磁性反而下降, 该临界值约 1000 ~ 1200 mm^[7-9]。然而最近一项研究表明, 热带地区磁化率-年均降水量关系式中的年均降水量“临界值”约为 1500 mm^[10], 比温带地区高 300 ~ 500 mm。由此可见, 温度对于土壤磁性的变化具有不可忽视的作用。从寒带到热带地区, 反映土壤中赤铁矿含量的红色程度逐渐升高, 说明温度对磁性矿物的作用逐步显现。相对于温带地区, 国内外有关热带亚热带地区土壤磁学研究较少, 且缺乏系统的区域对比, 是土壤环境磁学研究的薄弱环节。

目前我国南方土壤磁学研究主要对象是第四纪红土和风化壳型土壤(包括红壤和砖红壤等)^[11-20]。对于南方红土与红壤磁化率的环境指示意义存在着争议^[11, 21], 但反映次生弱磁性矿物的磁学参数与粒

收稿日期(Received date): 2019-04-19; 改回日期(Accepted date): 2019-07-07

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41877435); 福建省大学生创新创业训练计划(201810394069); 福建师范大学创新团队项目(IRTL1705)。[National Natural Science Foundation of China (41877435); College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program of Fujian Province(201810394069); Innovation Research Team Fund of Fujian Normal University, (IRTL1705)]

作者简介(Biography): 何梅菊(1997-), 女, 贵州岑巩人, 本科生, 地理科学专业。[HE Meiju (1997-), female, born in Cengong, Guizhou province, B. A. candidate, major in geography science] E-mail: 1282780366@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 吕镔(1985-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向: 环境磁学。[LYU Bin (1985-), male, Ph. D., research assistant, specialized in environmental magnetism] E-mail: lvbin@fjnu.edu.cn

度、色度及地球化学指标的一致变化,表明磁学参数具有作为气候变化代用指标的潜力^[18-19, 22]。然而垂直地带性山地土壤的磁性研究长期被忽视。事实上,垂直方向上的土壤磁性气候研究具有两个方面的优势:其一,不同海拔高度的土壤可能具有较为相近的母质,可减少磁学参数解释的不确定性;其二,随高度增加,降水增加而气温降低,有别于较大空间范围内的降水与温度同步变化,有助于更全面理解降水/温度与土壤磁性的关系。基于此,本文选择我国中亚热带的武夷山脉不同海拔的土壤样品,通过系统环境磁学研究,结合色度指标,分析其磁学特征变化,探讨湿润亚热带地区垂直地带性土壤磁性矿物对气候、环境条件变化的响应。

1 研究区概况与实验方法

1.1 研究区概况和样品采集

研究区位于武夷山脉北段东南侧,属福建省南

平市辖区,为闽、浙、赣三省交界地带。该区地势高、起伏大、多垭口,地貌类型呈中山-低山-高丘陵-低丘陵-浅丘陵-河谷平原的规律性排布^[23]。母岩在山体上部以火山岩为主,山体下部则以粗晶花岗岩为主^[23]。由于坡度大,山脚地带成土母质多为坡积物或残积-坡积物。气候类型为中亚热带季风气候。由于地势高低悬殊,气候的垂直变化颇为显著,区域内大部分地区年平均气温为13~19℃,年平均降水量为1600~2200 mm,年平均相对湿度在70%~85%以上。温度与降水呈现出随海拔反向变化的特点,使得该区的植被垂直分布特征明显:自下而上依次为常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、中山矮曲林和山地草甸。土壤类型也呈现了相应的变化,其垂直带谱自下而上为:红壤(海拔600 m以下)、黄红壤(600~900 m)、黄壤(900~1900 m)、山地草甸土(1900~2158 m)^[23]。

研究剖面位于浦城县(图1a),该区年均降水量为1719.8 mm,年平均气温17.7℃。选择不同海拔

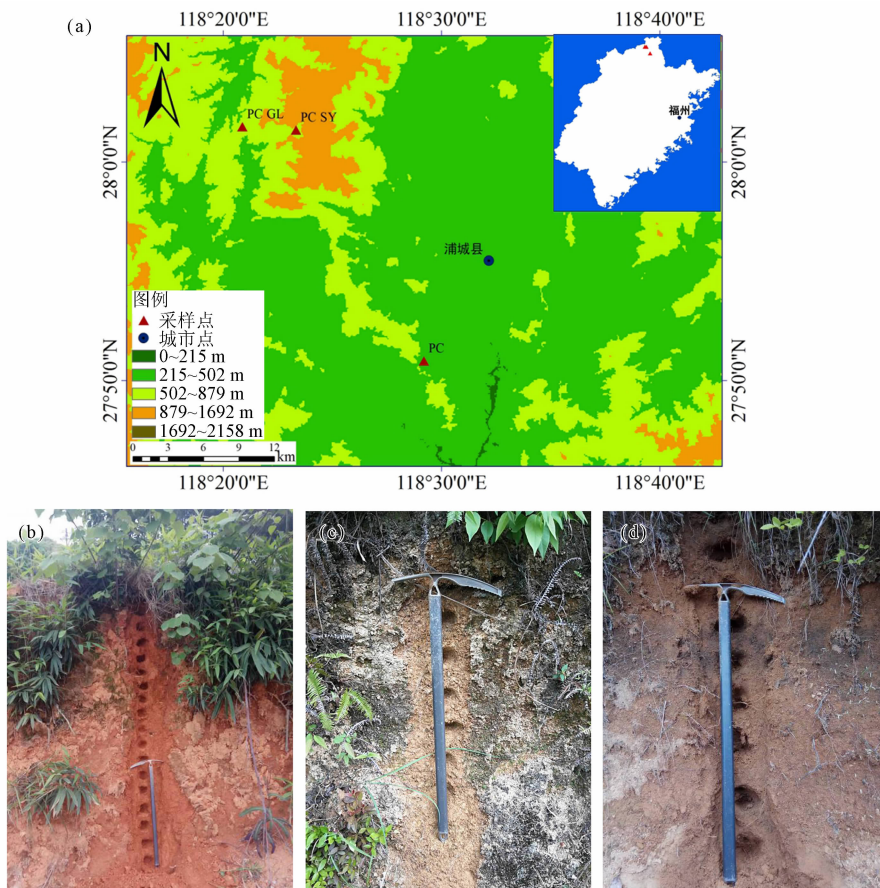


图1 研究区土壤剖面

(a) 地理位置示意图;(b) 浦城剖面;(c) 浦城古楼剖面;(d) 浦城上云剖面

Fig. 1 Three soil sections in Pucheng county, Fujian province

(a) locations map; (b) profile of Pucheng; (c) profile of Pucheng Gulou; (d) profile of Pucheng Shangyun

表 1 采样剖面信息

Tab. 1 Information of sampling profile

剖面名称	位置和剖面环境	海拔; 厚度; 样品数量	分层	采样间距/cm
浦城 (PC)	27°50'42.2"N,	320.3 m; 3.7 m; 38 个	A 层 (0 ~ 30 cm): 红色偏黑, 含有较多有机质和植物根系;	10
	118°29'26.8"E;		B 层 (30 ~ 180 cm): 红色, 粘粒含量高, 质地较为均一;	
	位于浦城县城西南		C 层 (180 ~ 370 cm): 颗粒整体较粗, 出现黄白色斑块, 保留	
	方向 G205 公路旁		母岩结构	
浦城古楼 (PC-GL)	28°01'36.2"N,	552.9 m; 1.9 m; 22 个	A 层 (0 ~ 20 cm): 黑色, 含有较多有机质和植物根系;	A 层: 5 其余: 10
	118°20'52.4"E;		B 层 (20 ~ 120 cm): 黄色, 质地均一粘重;	
	位于山体西坡的山谷;		C 层 (120 ~ 190 cm): 颗粒粗大, 为花岗岩弱风化层	
	树林郁闭度高			
浦城上云 (PC-SY)	28°01'27.0"N,	920.4 m; 0.8 m; 9 个	上部颗粒较细, 下部颗粒较粗。30 ~ 40 cm 层位偏黑色, 疑	10
	118°23'20.1"E;		是堆积。土壤层次不分明, 因此下文将该剖面作为一个整	
	位于山顶, 地势开阔; 植被以		体分析。	
	草本植物为主, 木本植物稀少			

高度出露良好、微地形平坦(坡度小于 5°)的三个剖面(图 1b~d)进行采样,共获得了 69 个样品,采样剖面相关信息如表 1 所示。

1.2 实验方法

磁学测量参照文献[18]进行。样品置于室内自然风干后研磨成粉末,用塑料薄膜包紧装入磁测专用样品盒,分别测量下述各项磁学参数。使用 Bartington MS2B 型磁化率仪测量低频磁化率(χ_{lf})和 高频磁化率(χ_{hf}),频率分别为 470 Hz 和 4700 Hz,计算频率磁化率(χ_{fd})和百分比频率磁化率($\chi_{fd}\%$)为:

$$\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf} \tag{1}$$

$$\chi_{fd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf} \times 100\% \tag{2}$$

使用 D-2000 交变退磁仪和 Molspin Minispin 旋转磁力仪测量非磁滞剩磁,交变场峰值为 100 mT,直流场值为 50 μ T,计算非磁滞磁化率 χ_{ARM} 为:

$$\chi_{ARM} = ARM/50 \mu T \tag{3}$$

使用 IM-10-30 强磁仪对样品施加强磁场,等温剩磁 (*IRM*) 和 饱和等温剩磁 (*SIRM*) 在 Molspin Minispin 旋转磁力仪上测量(视 1 T 磁场下的 *IRM* 为 *SIRM*),剩磁矫顽力 (B_{cr}) 由 *IRM*_{- χ_{mT}} 线性内插获得。计算 S-ratio 和硬剩磁 *HIRM* 为:

$$S\text{-ratio} = IRM_{-300 \text{ mT}}/SIRM \times 100\% \tag{4}$$

$$(HIRM) = (SIRM + IRM_{-300 \text{ mT}})/2 \tag{5}$$

利用 VFTB 测量代表性样品的磁滞回线(最大外加磁场为 1 T)和磁化强度随温度变化曲线(*M-T*

曲线,测量环境为空气,温度范围为室温至 700 $^{\circ}$ C,加热速率 40 $^{\circ}$ C/min)。

色度测量参照文献[19]进行。采用美国 Hunter Lab 公司的 Color Flex[®] EZ 型色度仪进行色度测试。样品统一在实验室风干后研磨至 200 目以下,使土壤湿度和土壤颗粒大小对土壤颜色的影响降到最低。之后称取样品约 5 g,均匀铺满在测试皿底部,压平不起皱,随机选测 3 个表面平整的区域,仪器采用 CIELAB 色度表达系统,测量样品亮度 (L^*),红度 (a^*),黄度 (b^*) 各 3 次,并自动求取平均值。测量过程中使用仪器自带标准测试白板与黑板对仪器进行校正。

以上所有实验均在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完成。

2 实验结果

2.1 常温磁学参数

浦城剖面磁学参数随深度变化如图 2 所示。 χ_{lf} 在 $7.08 \times 10^{-8} \sim 38.75 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $20.11 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,C 层磁化率最低且变化不明显,B 层磁化率变化较大。整体上,磁性偏低。 χ_{fd} 和 $\chi_{fd}\%$ 可用来估算样品中细小的超顺磁 (SP) 颗粒的含量^[1, 24]。PC 剖面 χ_{fd} 均值为 $2.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\chi_{fd}\%$ 均值为 9.23% (图 2b、f),反映该剖面含有较多 SP 颗粒。指示单畴 (SD) 颗粒含量的 χ_{ARM} 均值为

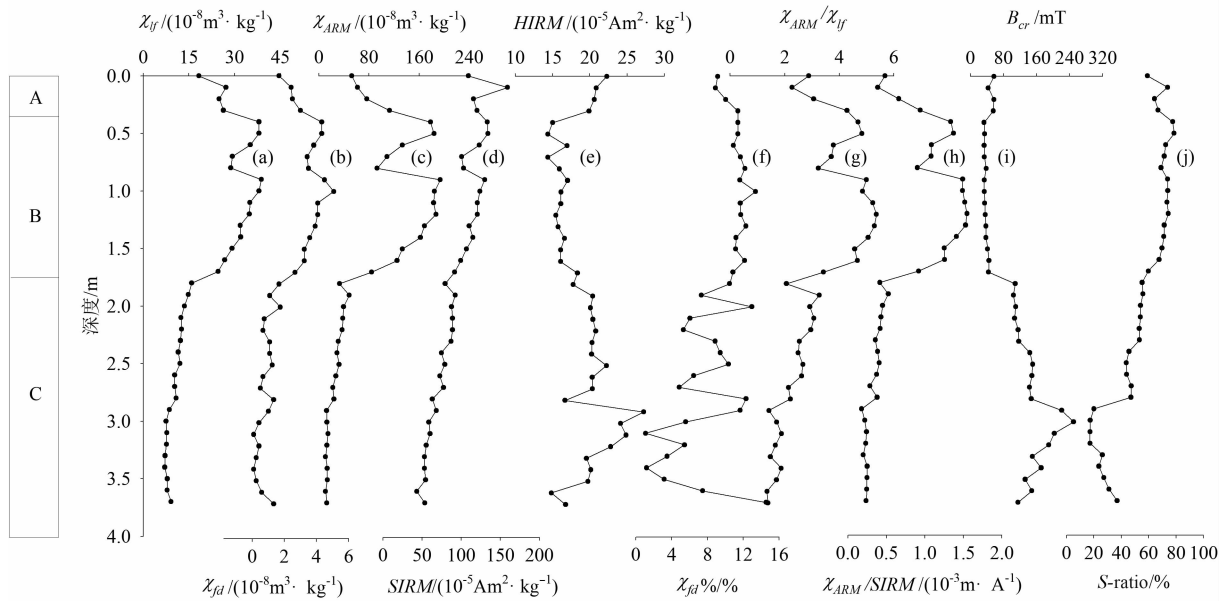


图 2 浦城剖面(PC)常温磁学参数变化曲线

Fig. 2 Change curves of magnetic parameters in PC section at room temperature

$76.18 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2c)。它和 χ_{fd} 、 $SIRM$ 及磁化率均具有良好的正相关关系,说明了 SD 颗粒和 SP 颗粒这两类细小亚铁磁性矿物含量增加是 A 层和 B 层磁化率增强的主导因素。 $HIRM$ 可以用来指示高矫顽力磁性矿物(如赤铁矿和针铁矿)的含量^[1, 2],均值为 $18.88 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, A、C 层比较高, C 层波动大(图 2e)。

χ_{ARM}/χ_{lf} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 指示了稳定单畴(SSD)颗粒的相对含量^[1]。如图 2g、h, 两者曲线的形态基本一致,指示 A、B 层含有较多的 SSD 颗粒。 B_{cr} 是使饱和等温剩磁减小到零所需要的反向直流磁场值。不同种类磁性矿物的 B_{cr} 差别很大,亚铁磁性矿物的 B_{cr} 值较低,只有几十 mT; 而反铁磁性矿物可达数百 mT 甚至更高^[1], 因此可用于衡量软硬磁的相对比例。PC 剖面 B_{cr} 的范围在 33.33 ~ 249.64 mT 之间, 均值为 97.63 mT(图 2i)。A、B 层的 B_{cr} 较小, 表明成土过程中生成了亚铁磁性矿物。 $S\text{-ratio}$ 随着硬磁性矿物含量的增加比值减少。该值介于 17.28% ~ 77.49%, 均值很低, 为 53.65%, 说明 PC 剖面亚铁磁性矿物相对含量比较低。

如图 3 所示, PC-GL 剖面磁化率在 $61.25 \times 10^{-8} \sim 250.58 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $143.67 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。剖面磁化率整体较高, 其中 B 层的磁化率低且稳定, C 层高于 A 和 B 层。 χ_{fd} 和 $\chi_{fd}\%$ (图 3b、f) 呈良好的同步变化特征。A 层 χ_{fd} 都小于

$2 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\chi_{fd}\%$ 也都基本小于 3%, 说明 A 层基本上不含 SP 颗粒; 而 B 层 $\chi_{fd}\%$ 介于 3% ~ 6%, 主要是 SP 颗粒和粗颗粒的混合。 χ_{ARM} 均值为 $205.48 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, A 层 χ_{ARM} 较高, 说明其 SD 颗粒含量高。整个剖面 $SIRM$ 均值较高, 为 $1977.79 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 且与磁化率的变化趋势一致, 表明亚铁磁性矿物含量是磁化率变化的主要因素。 $HIRM$ 在 A 层和 B 层变化小且数值小, C 层波动大数值也较, 说明母质层的硬磁矿物含量较高。 χ_{ARM}/χ_{lf} 与 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的变化趋势基本相同, A 层和 B 层的两者比值都比 C 层大, 说明 PC-GL 剖面上部的磁颗粒比较细小。C 层 χ_{ARM}/χ_{lf} 值小于 2, 表明基本不含 SSD 颗粒物。 B_{cr} 的范围在 25.81 ~ 29.19 mT 之间, 均值为 27.83 mT, 整体上偏低。 $S\text{-ratio}$ 的均值为 97.76%, 整体上偏高, 说明剖面中亚铁磁性矿物占主导。该剖面中 A 层和 C 层 B_{cr} 值略低于 B 层, $S\text{-ratio}$ 值则高于 B 层, 这说明剖面 B 层的硬磁性矿物较多。

如图 4 所示, PC-SY 剖面磁化率在 $53.00 \times 10^{-8} \sim 132.08 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $89.03 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 下部的磁化率较上部低, 且波动不大。 χ_{fd} 和 $\chi_{fd}\%$ 两曲线的形态基本一致, χ_{fd} 均值为 $1.13 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\chi_{fd}\%$ 均值为 1.58%, 说明整个剖面基本没有 SP 颗粒物。 χ_{ARM} 均值为 $84.21 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 波动较大, 说明剖面中含有一定量

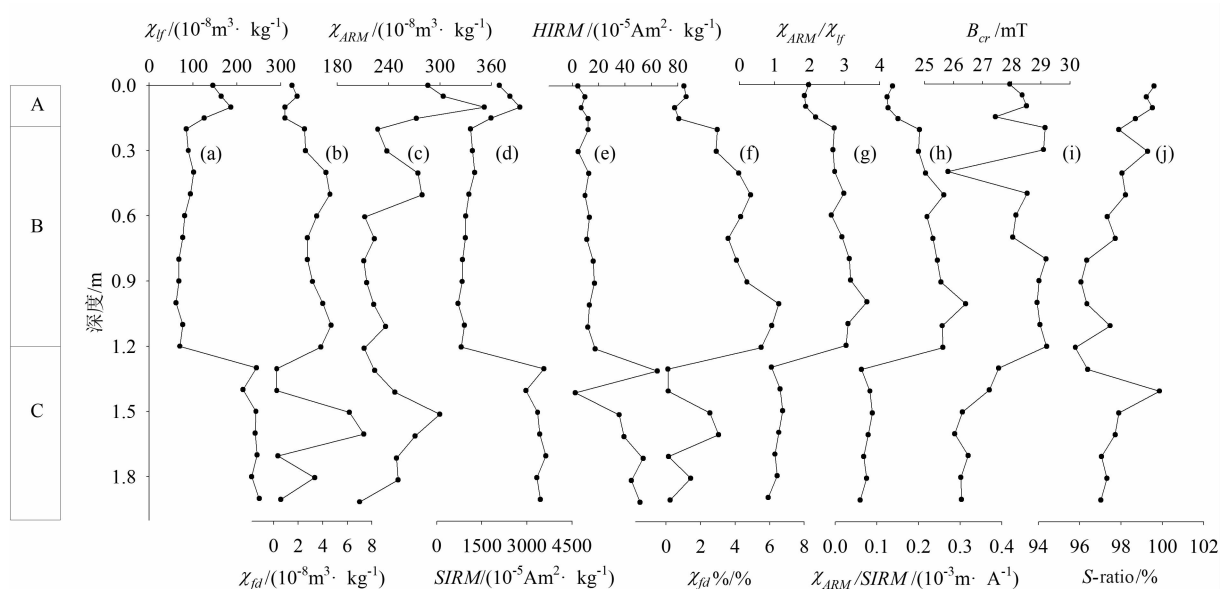


图3 浦城古楼剖面(PC-GL)常温磁学参数变化曲线

Fig. 3 Change curves of magnetic parameters of PC-GL section at room temperature

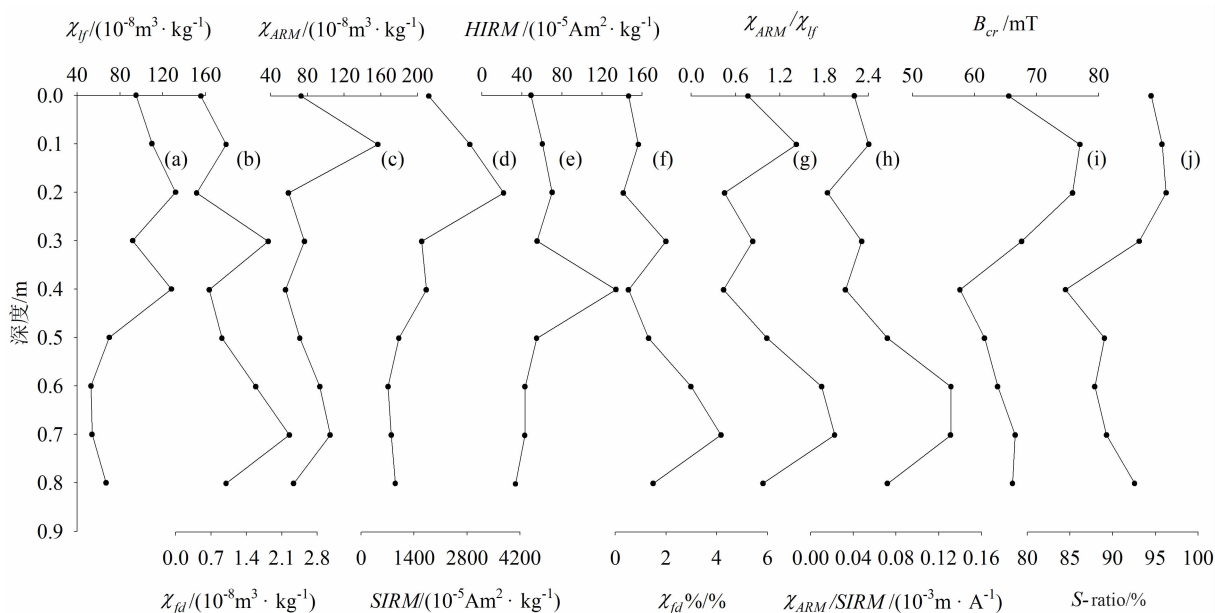


图4 浦城上云剖面(PC-SY)常温磁学参数变化曲线

Fig. 4 The change curves of magnetic parameters of PC-SY section at room temperature

的SD颗粒。 $SIRM$ 介于 $711.57 \times 10^{-5} \sim 3769.81 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值较高,为 $1686.53 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,表明剖面含有较多的亚铁磁性矿物。 $HIRM$ 均值为 $60.31 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,具有和磁化率一致的变化趋势,说明剖面上层具有较多的高矫顽力矿物。 χ_{ARM}/χ_{lf} 与 $\chi_{ARM}/SIRM$ 曲线的变化趋势基本相同,下部的比值比上部的高,说明剖面上部的颗粒物较下部的粗。 $S\text{-ratio}$ 的波动范围在

$84.47\% \sim 96.28\%$ 之间,均值为 91.46% ,其值比PC-GL剖面小,说明和PC-GL剖面相比,PC-SY剖面的亚铁磁性矿物含量较低。 B_{cr} 介于 $57.66 \sim 76.95 \text{ mT}$ 之间,均值为 66.83 mT ,PC-SY剖面上部整体的 B_{cr} 值大于下部,说明剖面上部硬磁性矿物较多。

2.2 磁滞回线 and 高温 M-T 曲线

磁滞现象是指磁化强度变化滞后于外加磁场强

度变化的磁学现象,能够直观地指示磁性矿物的种类及含量^[1,2]。三个剖面代表性样品磁滞回线如图 5 所示。总体而言,三个剖面磁滞特征差别较大。PC 剖面顺磁性矿物相对含量最高(图 5a~c),可能与强成土作用产生的大量粘土矿物有关,PC-GL 剖面(图 5d~f)和 PC-SY 剖面(图 5g~i)则以亚铁磁性矿物为主,顺磁性矿物相对含量很低。PC-SY 剖面的磁滞回线腰最粗,即 B_r 较大,说明了反铁磁性矿物含量较高。就单个剖面而言,不同发生层次的样品磁性特征略有差异。PC 剖面的 A 层和 B 层相对于 C 层具有较高的亚铁磁性矿物含量,表明成土过程中生成了亚铁磁性矿物;PC-GL 剖面磁滞回线的腰高而窄,特别是 A 层和 C 层,与 PC 剖面具有差异,可能表明两个剖面磁性矿物转化具有明显的差别。磁化强度随温度变化曲线可以反映样品加热和冷却过程中磁性矿物相变和居里点,是鉴定样品中

磁性矿物种类的有效方法^[1,2]。与磁滞回线相对应的代表性样品热磁曲线如图 6 所示。整体上,剖面间的热磁特征差异很大。PC-10 cm 和 PC-90 cm 的居里点分别大约为 620 °C 和 580 °C,而 PC-290 cm 无明显居里点,说明前两者的主要亚铁磁性矿物分别为热稳定磁赤铁矿和磁铁矿,而 PC-290 cm 则以顺磁性矿物为主;这三个样品加热和冷却曲线的可逆程度在三个剖面中是最高的,说明样品中热不稳定的强磁性矿物(如 SP 磁赤铁矿)较少。PC-GL 剖面三个样品加热到 350 °C 左右,磁化强度急剧下降,到 400 °C 才变得较为平缓,表明样品中存在大量热不稳定的磁赤铁矿^[25];加热和冷却曲线可逆程度从 A 层到 C 层变差,表明 C 层中含有更多量的磁赤铁矿。PC-SY 剖面样品的加热曲线上表现出明显稍高于 580 °C 的居里点和 350~400 °C 的下凹,冷却曲线则表现出单一的 580 °C 居里点,表明该剖面磁性

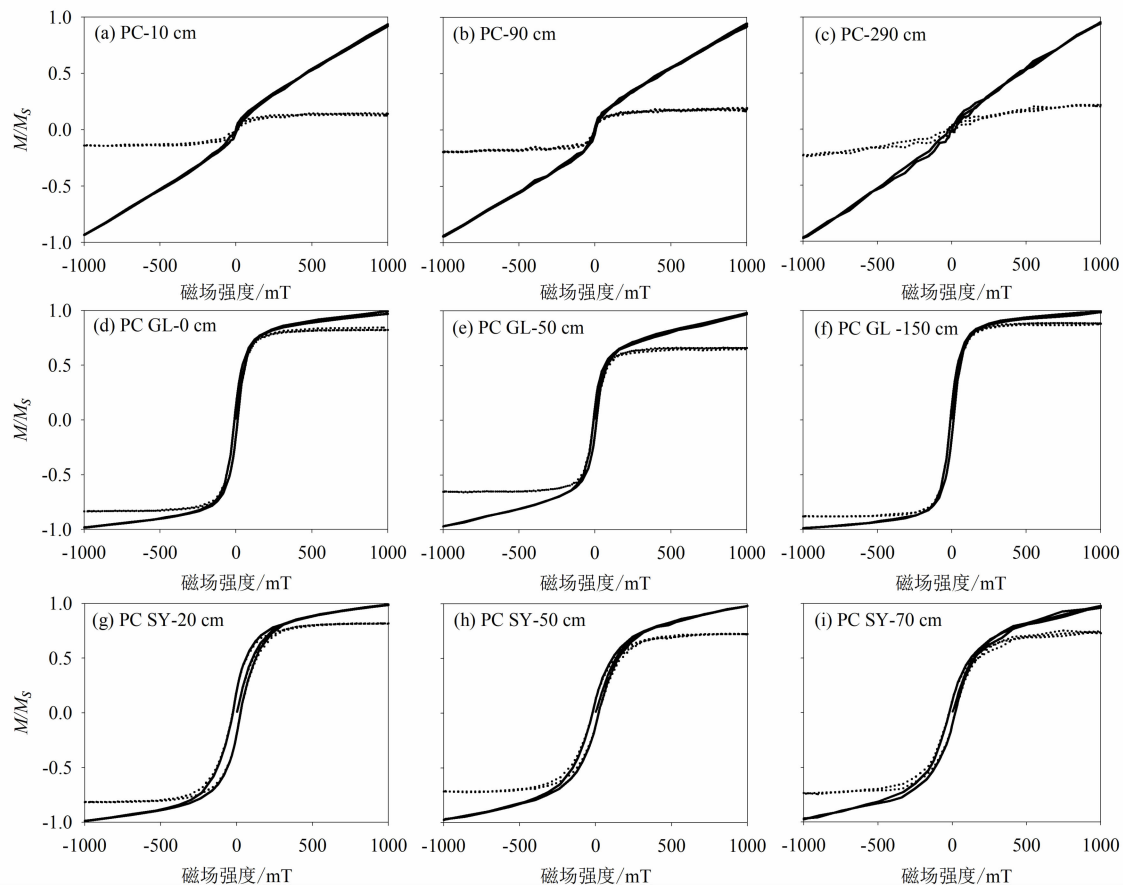


图 5 PC、PC-GL 和 PC-SY 剖面代表性样品磁滞回线

(实线表示未进行顺磁校正的磁滞回线,虚线表示顺磁校正后的磁滞回线)

Fig. 5 Hysteresis loops of representative samples from PC, PC-GL and PC-SY section (solid line: hysteresis loops without paramagnetic correction; dashed line: hysteresis loops after paramagnetic correction)

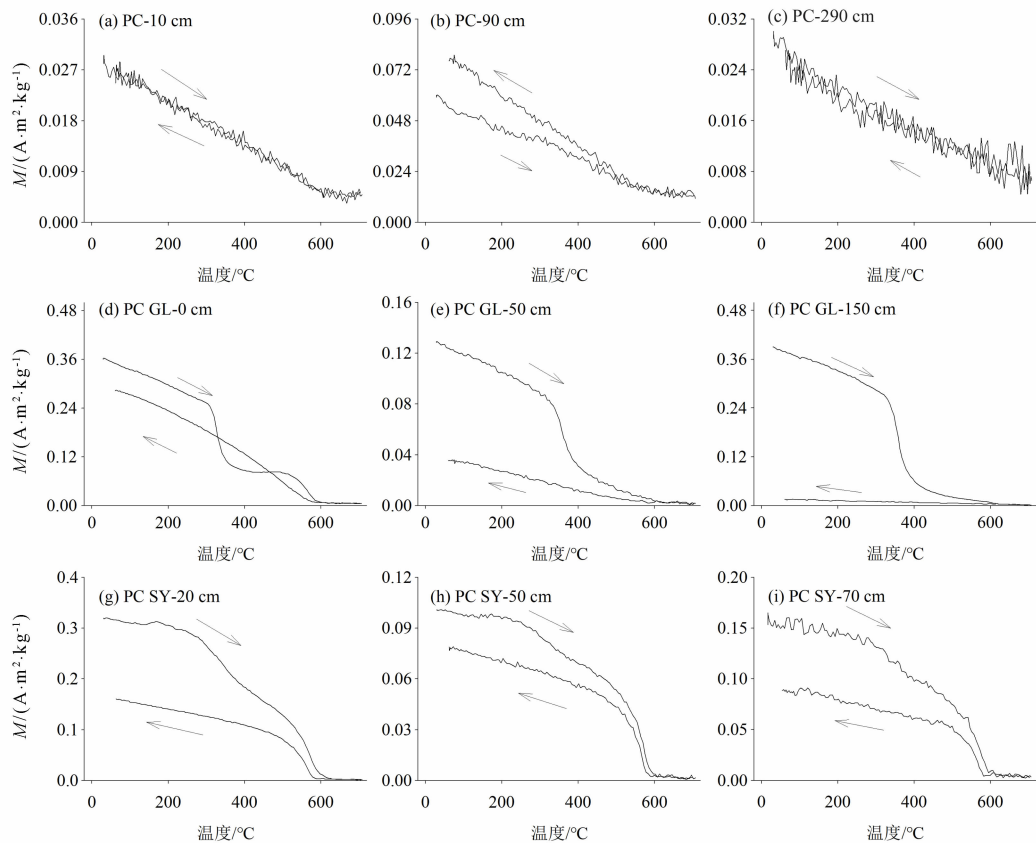


图 6 PC、PC-GL 和 PC-SY 剖面代表性样品热磁 M-T 曲线

Fig. 6 Thermal magnetic M-T curves of representative samples from PC, PC-GL and PC-SY section

矿物以磁铁矿为主,含有少量的细粒磁赤铁矿。

2.3 色度参数

土壤的颜色对环境变化反应敏感。CIELAB 表色系统是目前主要的颜色描述和测量系统之一,近年来被广泛应用于土壤研究中^[26-27],它使用 L^* 、 a^* 、 b^* 描述任何均匀连续的颜色空间: L^* 代表亮度,在暗(0)与亮(100)之间变化,主要受有机质、碳酸盐等含量影响; a^* 代表红度,在红(60)与绿(-60)之间变化,一般用来粗略指示赤铁矿; b^* 代表黄度,在黄(60)与蓝(-60)之间变化,但由于受 a^* 影响,在指示针铁矿含量上具有较大的误差。 b^*/a^* 为黄度与红度的比值, Ca^*b^* 代表彩度,是 a^* 和 b^* 的综合反映,计算公式为:

$$Ca^*b^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} \quad (6)$$

图 7 是三个剖面色度参数随深度变化图,表 2 是三个剖面色度参数均值和最值。三个剖面的表层和 PC-SY 剖面 30~40 cm 层位因具有较高的有机质含量,而使得相应的 L^* 值较低。三个剖面的 a^* 、 b^* 和 Ca^*b^* 均具有相同的变化趋势,而 b^*/a^* 与这

表 2 剖面色度参数均值和最值

Tab. 2 Average and extremum values of chromatic parameters

剖面		L^*	a^*	b^*	Ca^*b^*	b^*/a^*
PC	最大值	67.32	19.75	34.78	39.47	2.28
	最小值	54.61	13.57	30.97	33.81	1.72
	均值	63.20	17.30	33.44	37.67	1.95
PC-GL	最大值	76.97	9.79	28.78	30.40	5.05
	最小值	57.84	4.15	17.93	18.65	2.94
	均值	70.30	6.77	23.96	24.91	3.67
PC-SY	最大值	68.50	8.37	26.42	27.71	3.54
	最小值	58.98	5.18	18.28	19.00	3.16
	均值	65.61	6.56	22.59	23.52	3.46

三者呈反向变化。 b^*/a^* 在剖面表层均具有较高值,表明该指标在垂向上受水分影响较大。具体而言,不同剖面间存在着一定的差异。PC 剖面的 a^* 值最高出现在 C 层,而 PC-GL 剖面出现在 B 层。从色度参数的数值上看,不管是均值还是最值,PC 剖

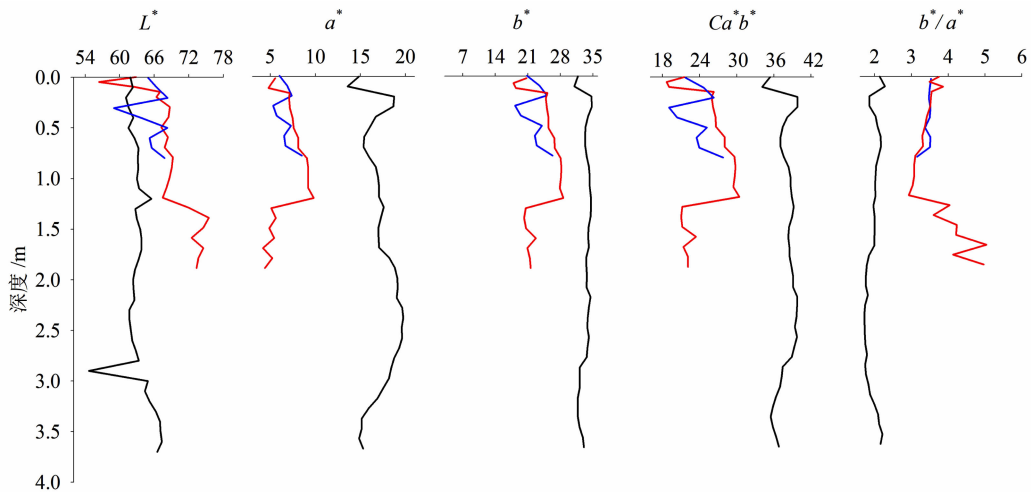


图7 PC、PC-GL 和 PC-SY 剖面色度参数对比图(PC:黑色;PC-GL:红色;PC-SY:蓝色)

Fig. 7 Color parameters comparison of PC, PC-GL and PC-SY sections (PC: black; PC-GL: red; PC-SY: blue)

面的 a^* 、 b^* 和 Ca^*b^* 均大于 PC-GL 和 PC-SY 剖面, 而 PC-GL 和 PC-SY 剖面两者相当。三个剖面中, PC-GL剖面整体最亮, 而 PC 剖面最暗。PC-GL 和 PC-SY 剖面, b^* 和 a^* 的颜色差不多, 而 PC 剖面则整体上更加偏红和偏黄, 说明次生弱磁性矿物(赤铁矿和针铁矿)较多。从 b^*/a^* 来看, PC 剖面表现出红色调, 说明赤铁矿较丰富; 而 PC-GL 和 PC-SY 剖面表现出黄色调, 说明针铁矿含量较丰富。

3 讨论

3.1 不同海拔高度山地土壤磁学特征对比

3.1.1 磁性矿物种类对比

就剖面之间对比而言, PC 剖面具有最低的 S -ratio 和最高的 B_{cr} 值(图2), 表明该剖面反铁磁性矿物相对含量较高; 磁滞回线表明该剖面顺磁性含量较高, 热磁曲线进一步确定 A 层和 B 层主要的强磁性矿物分别为热稳定的磁赤铁矿和磁铁矿、C 层主要为顺磁性矿物。PC-GL 和 PC-SY 剖面整体上具有较低的 B_{cr} 值和较高的 S -ratio 值(图3和图4), 特别是 PC-GL 剖面 B_{cr} 平均值仅为 27.83 mT, S -ratio 平均值为 97.76%, 说明这两个剖面的磁性矿物以亚铁磁性矿物为主, 含有少量的反铁磁性矿物。 Ca^*b^* 同样表明这两个剖面赤铁矿和针铁矿两者总含量低于 PC 剖面; b^*/a^* 结果表明这两个剖面中针铁矿相对含量更高。就土壤发生层次而言, PC 剖面 A、B 层具有较高的亚铁磁性矿物含量, 而 PC-GL 剖面

面 C 层亚铁磁性矿物含量最高。总体而言, 三个剖面之间、同个剖面发生层次之间所含磁性种类是相同的, 但相对比例差异较大。

3.1.2 磁性矿物含量对比

磁化率是磁性矿物种类、粒径和含量等的综合反映, 可以粗略估计亚铁磁性矿物的含量^[1]。通常磁化率越高, 磁性矿物含量也越高。表3显示: PC 剖面的磁化率最高仅 38.75×10^{-8} , 均值为 20.11×10^{-8} ; PC-GL 剖面的磁化率最高可达 250.58×10^{-8} , 均值为 143.67×10^{-8} ; PC-SY 剖面的磁化率最高可达 132.08×10^{-8} , 均值为 89.03×10^{-8} 。三个剖面中, PC 剖面磁化率最低, 可能是该剖面在强烈化学风化作用下, 强磁性的亚铁磁性矿物转化为反铁磁性矿物, 导致磁化率降低^[18, 19]。PC-GL 剖面磁化率最高, 则大致可以说明该剖面磁性矿物含量最高。结合 $SIRM$ 、 $HIRM$ 、 B_{cr} 和 S -ratio 分析, 亚铁磁性矿物含量最高的是 PC-GL 剖面, 其次是 PC-SY 剖面, PC 剖面最低; 反铁磁性矿物则相反: PC 剖面最高, PC-SY 剖面次之, PC-GL 剖面最低。同一剖面不同层次的磁性矿物含量也存在明显差异: PC 剖面的 B 层明显高于 C 层, 而 PC-GL 剖面却相反。(以上数值单位均为: $m^3 \cdot kg^{-1}$)

3.1.3 磁性矿物颗粒对比

磁颗粒粒径分布具有重要的环境意义, 通常认为细颗粒组分是后期作用形成的次生矿物, 而粗颗粒则是受后期作用影响较小的原生矿物。在 PC 剖面中, χ_{lf} 与 χ_{fd} 和 χ_{ARM} 呈较好的正相关关系

表 3 剖面常温磁学参数均值

Tab. 3 Average of room temperature magnetic parameters among sections

剖面	χ_{lf} $/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	χ_{ARM} $/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	$SIRM$ $/(\text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	$HIRM$ $/(\text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	χ_{fd} $\%$	χ_{ARM}/χ_{lf}	$\chi_{ARM}/SIRM$ $/(\text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	B_{cr} mT	S-ratio $\%$
PC	20.11×10^{-8}	76.18×10^{-8}	92.16×10^{-5}	18.88×10^{-5}	9.23	3.15	0.71×10^3	97.63	53.65
PC-GL	143.67×10^{-8}	250.48×10^{-8}	1977.79×10^{-5}	20.90×10^{-5}	2.76	2.18	0.17×10^3	27.83	97.76
PC-SY	89.03×10^{-8}	84.21×10^{-8}	1686.53×10^{-5}	60.31×10^{-5}	1.58	1.07	0.07×10^3	66.83	91.45

(图 8a、b),说明 SP 和 SD 颗粒是磁化率的主要贡献者。结合图 2 可知,淀积层的 χ_{fd} 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ_{lf} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 均高于淋溶层和母质层。整体而言,PC 剖面的淋溶层和母质层主要以较粗的多畴颗粒(MD)和假单畴(PSD)颗粒为主,而淀积层则以较细的 SP 和 SD 颗粒为主。在 PC-GL 剖面中, χ_{lf} 与 χ_{fd} 和 χ_{ARM} 的相关关系并不明显(图 8c、d),且母质层的磁化率远高于其他两层,表明了母质层的磁化率并非主要由 SP 和 SD 颗粒贡献的。但剖面的 A、B 层 χ_{lf} 与 χ_{ARM} 呈比较好的正相关(图 8d 小图),说明 A、B 层次主要以较细的单畴颗粒和假单畴颗粒为主,而 A 层和 B 层两者的 χ_{ARM}/χ_{lf} 与 $\chi_{ARM}/SIRM$ 都比 C 层大,因此上部的颗粒比下部颗粒细。在 PC-SY 剖面中, χ_{lf} 与 χ_{fd} 和 χ_{ARM} 没有呈现任何相关关系(图 8c、d)。从表 3 中可知,三个剖面中 PC 剖面的 χ_{fd} 、 χ_{ARM}/χ_{lf} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 具有最高值,并随着海拔高度的升高而降低,表明海拔越高,磁颗粒越粗。

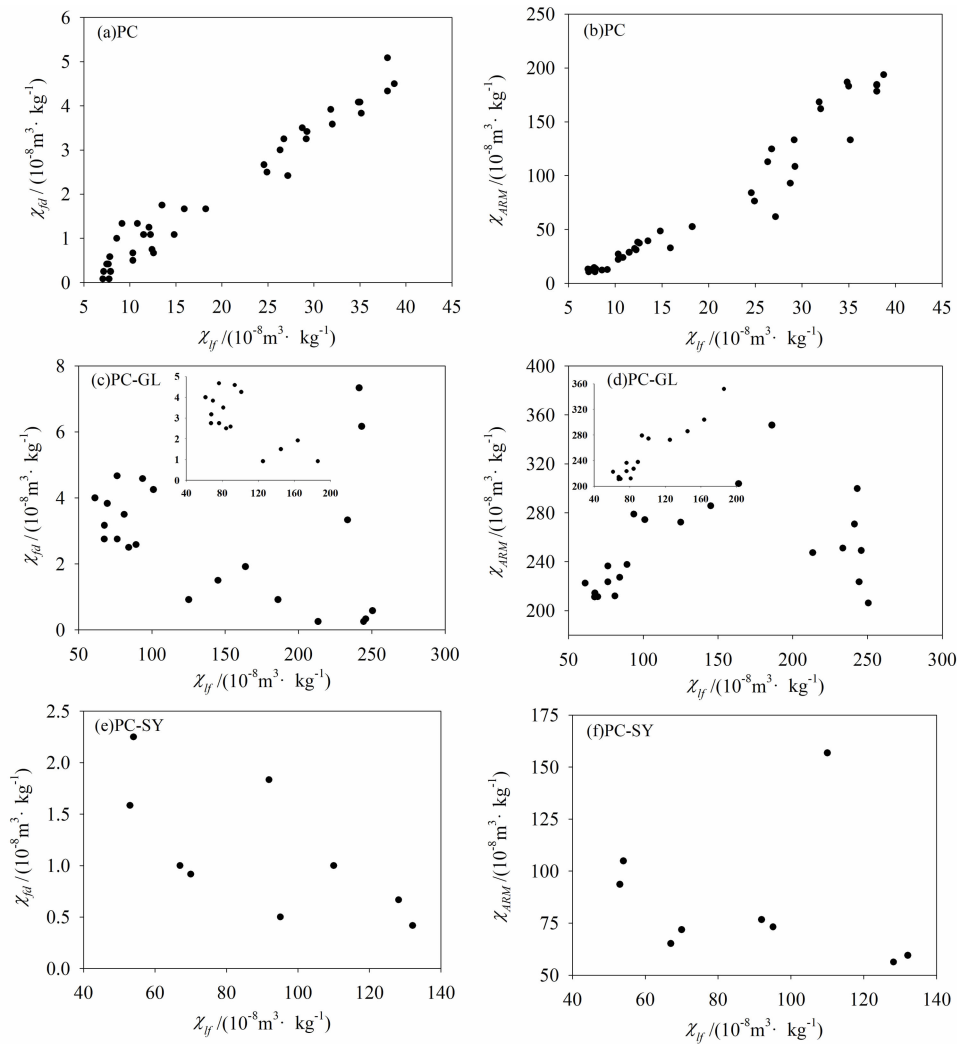
3.2 磁性差异的主导因素

土壤性质主要受五大成土因素(母质、气候、地形、生物和时间)控制^[29]。这些因素也影响着土壤的磁性^[3]。三个剖面分布在 15 km 范围内,均发育于中亚热带季风气候区的花岗岩风化壳上,局部地域的坡度都在 5°以下。由于海拔不同,三个剖面的气候(主要为降水量和气温)、生物、局部环境等存在着差异。在五个成土因素中,气候的差异是最主要的。

成土因素中的时间是指土壤发育年龄。土壤磁性先随着土壤发育年龄增加而增强,但随着时间的增加,反铁磁性矿物成为最终产物^[1]。从上述磁学特征对比分析可知,三个剖面所含磁性种类以亚铁磁性矿物为主,而非反铁磁性,因此成土时间可能不是磁性差异的主要因素。母质虽然同为花岗岩风化壳,但母质中的磁性矿物、铁元素含量、铁元素的赋存形式均影响着土壤中原生磁性矿物的含量和种

类,并进一步表现在土壤次生磁性矿物性质上。简单对比三个剖面 C 层的磁学参数可以发现,PC-GL 剖面的磁化率比其它两个剖面高,表明不同地区的剖面花岗岩的本底磁性存在一定的差异。值得注意的是 PC 剖面的 C 层具有较高的赤铁矿含量,说明在湿热条件下原有的强磁性矿物转化为弱磁性矿物,这种转化在亚热带红壤中已有报道^[18-19]。因此,母质层磁性差异部分是由于气候因素引起的。此外,微地形(如坡度)影响水分在土体中的存留量和存留时间,进而影响土壤磁性。三个剖面坡度都在 5°以下,近于水平,差异很小,可以推测坡度不是磁性差异的主导因素。生物(尤其是植被)主要受气候控制,而气候通过无机或有机反应影响土壤磁性。本研究将生物归入气候因素进行讨论。

不论原来母质如何,随着时间的推移,风化物在自然条件下会形成当地基带上的土壤。在成壤过程中,气候(特别是温度、降水及水热配置)是重要的因素。降水量及季节分配控制着铁元素的表生地球化学行为,与磁性矿物生成、转化及溶解密切相关。温度一方面直接影响化学反应的速率,一般高温条件下土壤中含有更多的赤铁矿^[1, 30];另一面通过蒸发量间接决定土体中的有效水分从而影响磁性矿物生成及转化。随着海拔升高,气温逐渐降低、降水逐渐增加、土体水分含量增加。从上述磁学特征可知,随着海拔升高,颗粒变粗,磁化率大致增加。从色度参数分析上看,随着海拔升高,黄度大致增大,红度变小。在低海拔地区,成土作用强烈,原生粗颗粒被溶解,同时生成了大量的细小强磁性颗粒;温度较高,有利于赤铁矿的形成。高海拔较为湿冷,有利于针铁矿形成而使土体偏黄色。因此,气候是三个剖面磁性呈现显著差异的主导因素。不容忽视的是,PC-GL 剖面的多个参数与 PC-SY 剖面相当,因此在磁性上并没有表现出明显的垂直地带性,这主要与剖面所在地的局部环境有关。PC-GL 剖面所

图 8 三个剖面 χ 与 χ_{fd} 和 χ_{ARM} 的相关关系图Fig. 8 Relationship between χ and χ_{fd} , χ_{ARM} of three sections

在地为山谷, 树林郁闭度高, 这种局部地形和植被状况使得土壤水分含量较高, 有利于针铁矿的形成。PC-SY 剖面位置山顶, 植被覆盖度相对较低, 较为充足的光照和较强的风力使得土壤含水量较低而更利于赤铁矿形成。这说明铁氧化物可以非常灵敏地反映环境条件。因此在利用代用指标研究气候时, 需要充分考虑诸多要素的影响。

3.3 气候代用指标的探讨

在探讨气候与土壤磁性关系的基础上, 遴选出指示意义明确的参数作为气候代用指标是土壤环境磁学研究的重要目标。在温带地区的黄土高原, 土壤磁性本底值低且在较大的时空范围内比较均一, 所以磁性矿物含量主要与气候相关。因此, 磁化率被广泛地作为降水量的代用指标^[4-6], 细粒的赤铁矿则作为温度的代用指标^[30]。在亚热带地区, 一方

面, 降水量可能超过了临界值, 导致强磁性矿物溶解; 另一方面, 该区土壤发育于各种类型母质之一, 磁性本底差异较大, 不可忽略。因此需要系统研究磁性矿物转化, 以确定适合该区气候变化的代用指标。本研究的实验结果表明, 反映整体磁学性质的参数(如 χ 、 $SIRM$ 等)并无明显的垂直地带性特征, 这些参数不宜作为气候的代用指标。反映次生弱磁性矿物的参数(如 $HIRM$ 、 B_{cr} 和 S -ratio)是赤铁矿和针铁矿的综合反映, 并且一定程度上受本底磁性的影响, 也非适宜的指标。反映次生强磁性颗粒的指标, 如 χ_{fd} 、 χ_{ARM}/χ_{lf} 等, 在温带地区可以用来指示降水和温度。PC 剖面含有大量的 SP 和 SD 颗粒, 而降水较多但温度较低的 PC-GL 和 PC-SY 剖面则基本无细粒的磁性颗粒, 这是因为在一定降水量以上, 强磁性矿物转化为弱磁性矿物, 而不生成强磁性矿物,

与强磁性矿物有关的参数统统失灵,因此亚热带地区的 χ_{fd} 、 χ_{ARM}/χ_{lf} 也并非适宜的指标。

土壤次生磁性矿物赤铁矿和针铁矿分别指示干热和湿冷的土体环境。两者的磁性较弱,但具有极强的致色能力。土壤红色和黄色主要分别受赤铁矿和针铁矿含量控制。本研究通过色度测量与分析,发现 a^* 可以很好地指示赤铁矿绝对含量。然而绝对含量除气候因素影响外,也与母质本底值有一定关系。 b^* 受 a^* 数值影响^[31],对于指示针铁矿具有较大的误差。因此我们认为,色度指标 b^*/a^* 可以避免这两方面的影响,是一个更好的指标。PC-GL由于局地影响,土壤含水量最高,因此颜色最黄,这一现象得到了 b^*/a^* 数值的印证。

4 结论

通过对武夷山脉不同海拔三个山地土壤剖面进行系统的环境磁学测量,并结合色度和地化指标综合分析,得出以下几个结论:

(1)三个剖面所含磁性种类大体相同。强磁性矿物为亚铁磁性的磁铁矿和磁赤铁矿;弱磁性矿物为反铁磁性的赤铁矿和针铁矿以及顺磁性矿物。PC-GL剖面亚铁磁性矿物含量最高,其次是PC-SY剖面,PC剖面最低。但PC剖面的反铁磁性矿物含量较高。三个剖面的不同层位的磁性矿物含量也存在明显差异,且不存在统一的规律。

(2)随着海拔升高,磁颗粒逐渐变粗。PC剖面的A层和B层的亚铁磁性矿物以较细的SP和SD颗粒为主,成土过程中生成的这两类细小磁性矿物是其磁性增强的原因。PC-GL和PC-SY剖面的亚铁磁性矿物以较粗的多畴颗粒(MD)和假单畴(PSD)颗粒为主,这是由于在较为湿冷环境下,母质中的强磁性矿物转化为弱磁性矿物。

(3)色度结果进一步表明,随着海拔升高,由于化学风化速率的降低,土壤中赤铁矿和针铁矿总含量减少。相对于热向着相对湿冷条件转变下,赤铁矿减少速率高于针铁矿,因此低海拔的PC剖面表现出红色调,而高海拔的PC-GL和PC-SY剖面表现出黄色调。

(4)气候是三个剖面磁性差异的主导因素,局部小环境对磁性矿物的影响也不容忽视。相对于反铁磁性的赤铁矿和针铁矿,亚铁磁性的磁铁矿和磁

赤铁矿对于气候的响应更为复杂。色度指标 b^*/a^* 可以有效减小指标本身和母质本底的影响,是指示意义明确的气候代用指标。

参考文献(References)

- [1] THOMPSON R, OLDFIELD F. Environmental magnetism [J]. London: Allen and Unwin, 1986, 1-227.
- [2] LIU Qingsong, ROBERTS A P, LARRASOÑA J C, et al. Environmental magnetism: principles and applications [J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(4): 1-50.
- [3] 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. [HU Pengxiang, LIU Qingsong. The prouduction and transformation of magnetic minerals during pedogenesis and its paleocimate significance [J]. Quaternary Science, 2014, 34(3): 458-473]
- [4] MAHER B A. Palaeoclimatic records of the loess/palaeosol sequences of the Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 154:23-84.
- [5] MAXBAUERD P, FEINBERG J M, FOX D L. Magnetic mineral assemblages in gills and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: a review of magnetic methods and challenges [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 155:28-48.
- [6] HELLER F, LIU Tungsheng. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China [J]. Nature, 1982, 300:431-433.
- [7] 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. [LV Houyuan, HAN Jiamao, WU Naiqin, 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]
- [8] 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. [SONG Yang, HAO Qingzhen, GE Junyi, et al. Quantitative relationships between modern soil magnetic susceptibility and climatic variables of the Chinese loess plateau [J]. Quaternary Science, 2012, 32(4): 679-689]
- [9] LIU Zhifeng, LIU Qingsong, 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.
- [10] LONG Xiaoyong, JI Junfeng, BARRON 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.
- [11] 卢升高. 中国南方红土环境磁学[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1016-1022. [LU Shenggao. Environmental magnetism of quaternary red earth in southern China [J]. Quaternary Science, 2007, 27(6): 1016-1022]
- [12] LU SG, CHEN DJ, WANG SY, et al. Rock magnetism investigation of highly magnetic soil developed on calcareous rock

- in Yun-Gui Plateau, China; evidence for pedogenic magnetic minerals [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, **77**: 39–50.
- [13] LU Shenggao, XUE Qingfeng, ZHU Lei, et al. Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China [J]. *Catena*, 2008, **73**(1): 23–33.
- [14] 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 Zhonghang, 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 of Geophysics*, 2011, **54**(5): 1319–1326]
- [15] 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 Science*, 2012, **32**(4): 626–634]
- [16] 邓黄月, 郑祥民, 杨立辉, 等. 长江中下游地区第四纪红土磁学特征及其环境意义[J]. *沉积学报*, 2015, **33**(2): 285–298. [DENG Huangyue, ZHENG Xiangmin, YANG Lihui, et al. Magnetic properties of quaternary red earth profile in Yangtze river valley and its paleo-environmental implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, **33**(2): 285–298]
- [17] 杨立辉, 叶玮, 郑祥民, 等. 亚热带第四纪沉积型红土与风化壳型红土的磁学特征对比[J]. *地理科学*, 2015, **35**(11): 1475–1481. [YANG Lihui, YE Wei, ZHENG Xiangmin, et al. The magnetic characteristics comparison of sedimentary red clay and laterite weathering crust in subtropical China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, **35**(11): 1475–1481]
- [18] 吕镔, 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. [LV Bin, LIU Xiuming, WANG Tao, et al. Rock magnetic properties of subtropical red soils developed on granite [J]. *Quaternary Science*, 2014, **34**(3): 504–515]
- [19] 吕镔, 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. [LV Bin, LIU Xiuming, ZHAO Guoyong, 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]
- [20] 黄雨振, 陈秀玲, 吕镔, 等. 福建北部闽江流域第四纪红土的磁学特征及其环境意义[J]. *山地学报*, 2018, **36**(4): 527–535. [HUANG Yuzhen, CHEN Xiuling, LYU Bin, et al. Magnetic characteristics of quaternary red earth sequence from the minjiang drainage basin in northern Fujian and its environmental significance [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(4): 527–535]
- [21] HU Xuefeng, WEI Ji, XU Lingfeng, 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.
- [22] HYLAND E G, SHELDON N D, VAN DER VOO ROB, 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.
- [23] 陈松林. 武夷山土壤地理实习指导[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1–69. [CHEN Songlin. Wuyi mountain Soil geography practice guide [M]. Beijing: Science Press, 2016: 1–69]
- [24] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义[J]. *地球物理学报*, 2009, **52**(4): 1041–1048. [LIU Qingsong, DENG Chenglong. Magnetic susceptibility and its environmental significances [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, **52**(4): 1041–1048]
- [25] DENG Chenglong, ZHU Rixiang, JACKSON M J, et al. Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese Loess Plateau: a pedogenesis indicator [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part a: Solid Earth and Geodesy*, 2001, **26**(11): 873–878.
- [26] 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: 地球科学)*, 2001, **31**(Suppl. 1): 175–181. [YANG Shengli, FANG Xiaomin, LI Jijun, et al. Studies on the qualitative and semi-quantitative relationship research between the topsoil color and climate [J]. *Science China (Series D)*, 2001, **31**(Suppl. 1): 175–181]
- [27] 彭淑贞, 郭正堂. 西峰晚第三纪红土记录的亮度学特征[J]. *第四纪研究*, 2003(1): 110. [PENG Shuzhen, GUO Zhengtang. Characteristic of luminosity of the Late Tertiary red earth in Xifeng area [J]. *Quaternary Science*, 2003(1): 110–110]
- [28] 朱芸, 陈晔, 舒强, 等. 苏北盆地 XH1 钻孔中更新世以来的彩度指标记录及其气候环境变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, **27**(2): 23–31. [ZHU Yun, CHEN Ye, SHU Qiang, et al. Chroma index record of core XH1 at northern Jiangsu basin and the climate since mid-pleistocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, **27**(2): 23–31]
- [29] JENNY H. Factors of Soil formation: a system of quantitative pedology[Z], 1941: 1–281.
- [30] GAO Xinbo, HAO Qingzhen, WANG Luo, 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.
- [31] HU Xuefeng, DU Yan, GUAN Chunlei, et al. Color variations of the Quaternary Red Clay in southern China and its paleoclimatic implications [J]. *Sedimentary Geology*, 2014, **303**(6): 15–25.

Magnetism Characteristics of Soils in the Wuyi Mountains and Their Environmental Significances

HE Meiju^{a, b}, LYU Bin^{a, b, c*}, WANG Shanshan^d, ZHENG Xingfen^{b, c}, CHEN Zixuan^{b, c}

(*a. National Demonstration Center for Experimental Geography Education; b. School of Geographical Sciences;*

c. State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology and Fujian Province;

d. College of Physics and Energy, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The soils in the subtropical Wuyishan Mountains have typical vertical zonality. The associated research would be helpful to understand the relationship between soil magnetism characteristics and environment. In this study, the northern section of the Wuyi Mountains was targeted as research area. The soil profiles (69 representative samples) at three sites with different altitudes in Pucheng county, Fujian province, China, were sampled separately. The magnetic parameters and chromaticity of all samples were measured at room temperature to explore the difference of soil magnetic characteristics and environmental significance in different elevations of the Wuyishan Mountains. By the study, it found that: (1) the magnetic types in the three soil sections were basically the same, mainly consisted of ferromagnetic magnetite and maghemite, weakly magnetic hematite and goethite, as well as paramagnetic minerals. The proportion of magnetic mineral content was varied at different soil profiles, and varied in different horizons of the same section; (2) With increasing altitudes, magnetic particles became coarser, which could be due to different transformation paths of magnetic minerals under different climatic conditions; (3) Hydrothermal configuration controlled the content and relative proportion of hematite and goethite in soil profiles. Under wet and cold conditions, the relative proportion of goethite was higher, making the soil yellow; (4) The response of ferrimagnetic minerals to climate was more complicated than that of antiferromagnetic minerals, and local small environment also had great influence on magnetic minerals. The chromaticity index b^*/a^* was a definite representative indicator for climate identification.

Key words: mountainous soils; environmental magnetism; magnetic mineral; chromaticity; Wuyi Mountains