

文章编号: 1000-0550(2008) 06-1057-11

东秦岭地区黄土堆积的岩石磁学特征 及磁化率增强机制探索¹

赵 军^{1, 2, 5} 鹿化煜² 王晓勇³ 张红艳^{1, 2, 5} 王社江⁴

(1 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室 西安 710075

2 南京大学地理与海洋科学学院 南京 210093; 3 华东师范大学资源与环境学院 上海 200062;

4. La Trobe 大学历史与欧洲研究学院考古系 墨尔本 3086; 5 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 对东秦岭地区洛南盆地的上白川、刘湾和丹江上游的二龙山黄土剖面进行了岩石磁学研究。结果表明,大部分黄土和古土壤样品的磁性矿物以磁铁矿和磁赤铁矿为主,古土壤中亚铁磁性矿物的含量比黄土的多,极少数黄土样品以反铁磁性矿物为主。亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物的含量随成土作用增强而增加,成土作用形成的细粒亚铁磁性矿物包括超顺磁性和单畴(似单畴)颗粒,但以单畴和(或)似单畴为主。古土壤磁化率增强与这些土壤成因的细粒亚铁磁性矿物含量有关,显示出受气候变化控制的特点。东秦岭地区黄土岩石磁学性质与黄土高原地区的相似,但也存在一定差异,而且三个剖面之间磁化率值整体差别较大。温湿的气候和复杂的山区地形可能是导致这种差异的原因。

关键词 东秦岭 黄土堆积 岩石磁学 磁化率 成土作用

第一作者简介 赵军 男 1978 年出生 硕士研究生 黄土环境磁学 E-mail huayuk@nju.edu.cn

中图分类号 P318.4⁺1 **文献标识码** A

0 前言

中国北方广泛分布的风成黄土堆积物是记录过去环境变化的良好载体,厚层的黄土—古土壤旋回蕴藏着丰富的古气候信息^[1~5]。自从 Heller 和 Liu^[6]将黄土剖面磁化率曲线与深海氧同位素曲线进行对比以来,黄土磁学的研究发展很快。其中,磁化率增强的原因成为黄土岩石磁学研究的一个热点问题。Zhou 等^[7]发现古土壤中超顺磁性颗粒比黄土中的多,认为成壤作用是造成古土壤磁化率增强的主要原因。岩石磁学和土壤化学的研究结果^[7~14]证明,成壤作用过程中有大量超细亚铁磁性矿物生成。近年来的研究表明,磁化率增强并非仅由超顺磁颗粒的增加引起,成土作用形成的单畴和(或)似单畴颗粒的含量变化也起到了重要作用^[15~17]。虽然在古土壤磁化率增强的土壤成因说方面取得了广泛的一致,但是超顺磁颗粒(包括磁铁矿和磁赤铁矿)的起源问题仍未解决。

秦岭山脉是我国自然地理的分界线。紧邻黄土高原东南缘的东秦岭地区也广泛分布黄土堆积,受地

形和气候的影响,该区黄土主要分布于洛南盆地、南洛河流域及丹江流域等河流阶地上。已有的研究表明:该区黄土堆积具有典型的黄土—古土壤旋回,同样可以作为古环境研究的理想载体^[18~20]。但是,对该区黄土—古土壤岩石磁学的研究几乎是空白。在这种特殊地理环境下堆积的黄土—古土壤序列中剩磁的主要载体是什么?这里的黄土堆积的岩石磁学性质有何特点?磁化率是否可以作为指示环境变化的代用指标?为回答这些问题,我们选择该区三个典型的黄土剖面进行了初步岩石磁学研究,并与黄土高原的研究结果进行对比。

1 样品及方法

本次研究选择的三个黄土剖面分别是:位于洛南盆地的上白川(34°04′03″N, 110°03′06″E)、刘湾(34°08′37″N, 110°08′13″E)剖面以及丹江上游的二龙山剖面(33°52′57″N, 109°54′47″E)(图 1)。前两个剖面厚度分别是 25 m 和 13 m,其详细地理位置及地层情况见文献^[20]。二龙山剖面紧邻商州城西,海拔高度 1 061 m,剖面厚 17 m,共发育 6 层黄土和 6 层古土

¹ 澳大利亚研究理事会基金项目(ARC 编号: DP0665250)、南京大学 211 工程项目和教育部引智计划项目(111)联合资助。
收稿日期: 2007-10-19 收修改稿日期: 2008-03-31

壤,覆盖在丹江三级阶地的河流底砾层上。与前两个剖面相比,该剖面黄土和古土壤颜色更深,土壤地层界线更明显,富含更多的钙质结核。由于该区地表侵蚀严重,地层有缺失^[20],无法将黄土与古土壤地层和黄土高原地区的地层直接进行对比。

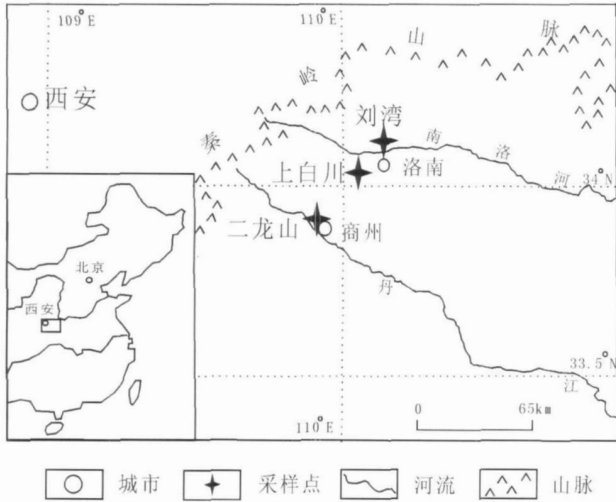


图 1 上白川、二龙山、刘湾黄土古土壤剖面的位置

Fig 1 Location of Shangbaichuan, Liuwang and Erlongshan sampling sites in Eastern Qinling Mountains, Central China

我们对上白川和二龙山剖面分别以 10 cm 和 5 cm 间距采集了粉末样品,并以 10 cm 间距对两剖面采集了古地磁样品。在实验室,所有粉末样品先在 38℃ 温度下烘干 48 h 然后进行了低场磁化率的磁量,测量仪器为 Bartington 公司生产的 MS-2 磁化率仪,测量频率为 470 Hz。该实验在中科院地球环境研究所古地磁实验室完成。

根据磁化率结果及野外地层描述,对上白川、二龙山和刘湾剖面分别挑选出 24、26、6 个代表性样品,称重后置于方形古地磁样盒内,充分压实,以防晃动,然后分别进行非磁滞剩磁 (ARM) 和等温剩磁 (IRM) 的测量。 ARM 测量方法为:将样品置于 0.04 mT 的直流场中,同时加以峰值为 100 mT 的交变场退磁而获得 ARM 。 IRM 测量方法为:将样品置于 $M_0 \sin$ 脉冲磁化仪中,施加不同大小的外加场加以磁化,然后取出在 $M_0 \sin$ 旋转磁力仪上测量其剩磁值。所有样品分别施加了 20、30、100、-20、-40、-100 和 -300 mT 这几个级别的外加场。同时,我们对上白川和二龙山剖面又分别挑选 14 个样品、刘湾剖面 6 个样品,进行了磁滞回线、热磁曲线、矫顽力曲线及等温剩磁曲线的测量。这些测量是在德国 Peterson 公司生产的 MMVFTB 多功能磁性测量系统上完成的。

样品置于该仪器专用的玻璃样管中,并用玻璃丝填充压实。磁滞回线最大场为 ± 1 T,在去除了顺磁性矿物的影响后,得出饱和磁化强度 (M_s)、饱和剩磁 (M_{rs}) 和矫顽力 (B_c) 值。通过高场 (0.7~1 T) 斜率计算出顺磁性磁化率 (χ_p),亚铁磁性矿物磁化率 (χ_f) 则为低场磁化率 (χ) 与 χ_p 的差值。热磁曲线是在 34 mT 的稳定场中,在空气中从室温加热到 700℃,再自然冷却后得到的。剩磁矫顽力 (B_{cr}) 通过矫顽力曲线得到。以上实验测试在华东师范大学河口研究所环境磁学实验室完成。刘湾剖面的磁化率数据引自文献 [20]。

2 结果

2.1 磁化率、非磁滞剩磁及等温剩磁

虽然上白川与二龙山剖面相距不过 50 km,但两地的磁化率值却存在较大的差别(图 2 和图 3)。上白川最高值为 $172 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 最低值为 $7.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 古土壤平均值为 $50.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 黄土平均值为 $27.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 二龙山最高值为 $279.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 最低值为 $17.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 古土壤平均值为 $163 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 黄土平均值为 $73.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 两剖面古土壤磁化率值大约 2 倍于黄土,这与黄土高原的结果相似^[1]。二龙山剖面黄土和古土壤平均值约 3 倍于上白川,显然,二龙山剖面经受了更强的风化作用和成土过程,或者其物源区磁性较强。不过,两剖面也具有共同的特征:磁化率曲线上部变化大,下部变化很小。而且部分层位磁化率值与地层不对应,即古土壤并未显示出比相邻黄土更高的磁化率值。

由于饱和等温剩磁 ($SIRM$) 不受(超)顺磁性和抗磁性矿物的影响, $SIRM$ 值常常作为判断样品中粒径大于 SP/SD 边界的亚铁磁性矿物总含量的指标^[21]。在两个剖面中,黄土中的 $SIRM$ 值均较古土壤低(图 2c 图 3c),说明古土壤含有更多的亚铁磁性矿物。这从 $SIRM$ 与磁化率的高相关性(二龙山为 0.94 上白川为 0.86 刘湾为 0.65)(图 4a)也可得到证实。

非磁滞剩磁 (ARM) 的变化通常用 χ_{ARM} (非磁滞剩磁磁化率) 表示。 ARM 主要是由单畴 (SD) 亚铁磁性矿物引起的^[22]。因此,常被用来判断磁性矿物的粒径大小。 χ_{ARM} 变化曲线与磁化率曲线符合的很好(图 2d 图 3d),在古土壤中显示高值,黄土中为低值,表明单畴亚铁磁性矿物对磁化率增强有很好的相关性。

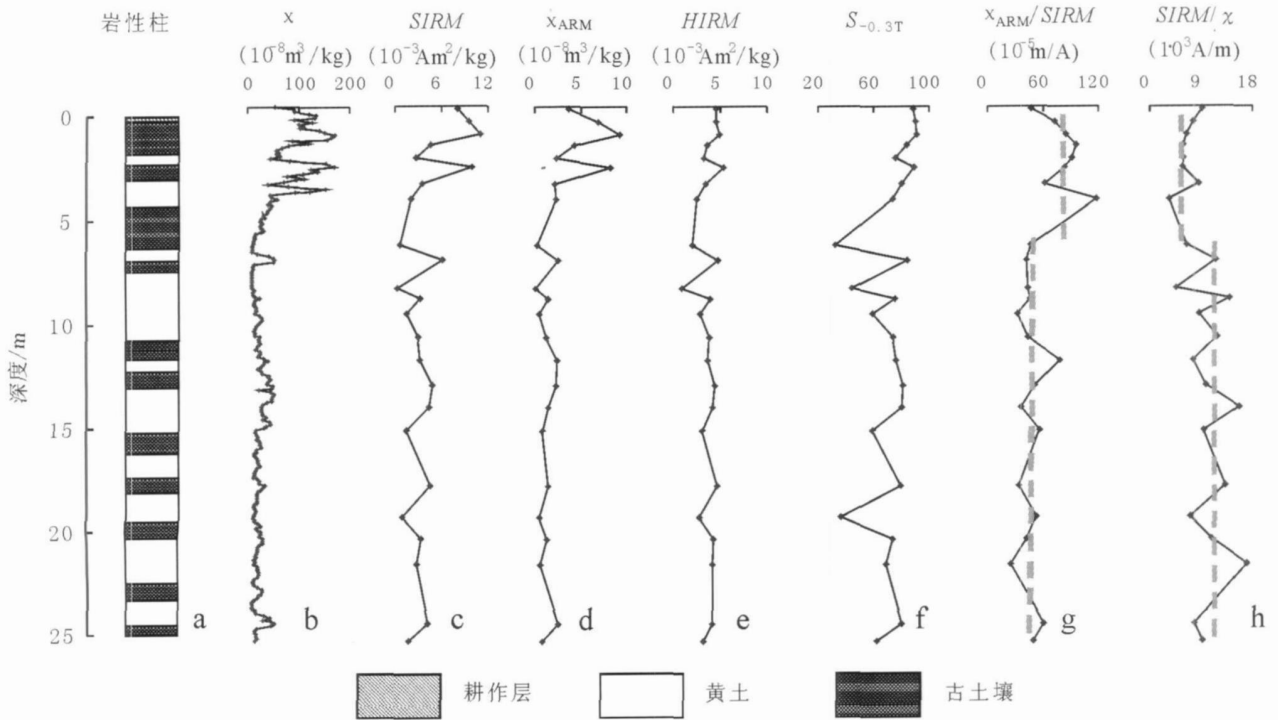


图 2 上白川剖面土壤地层及环境磁学指标随深度变化图

Fig. 2 Pedostratigraphy and magnetic parameter changes of the Shangbaichuan loess-paleosol section

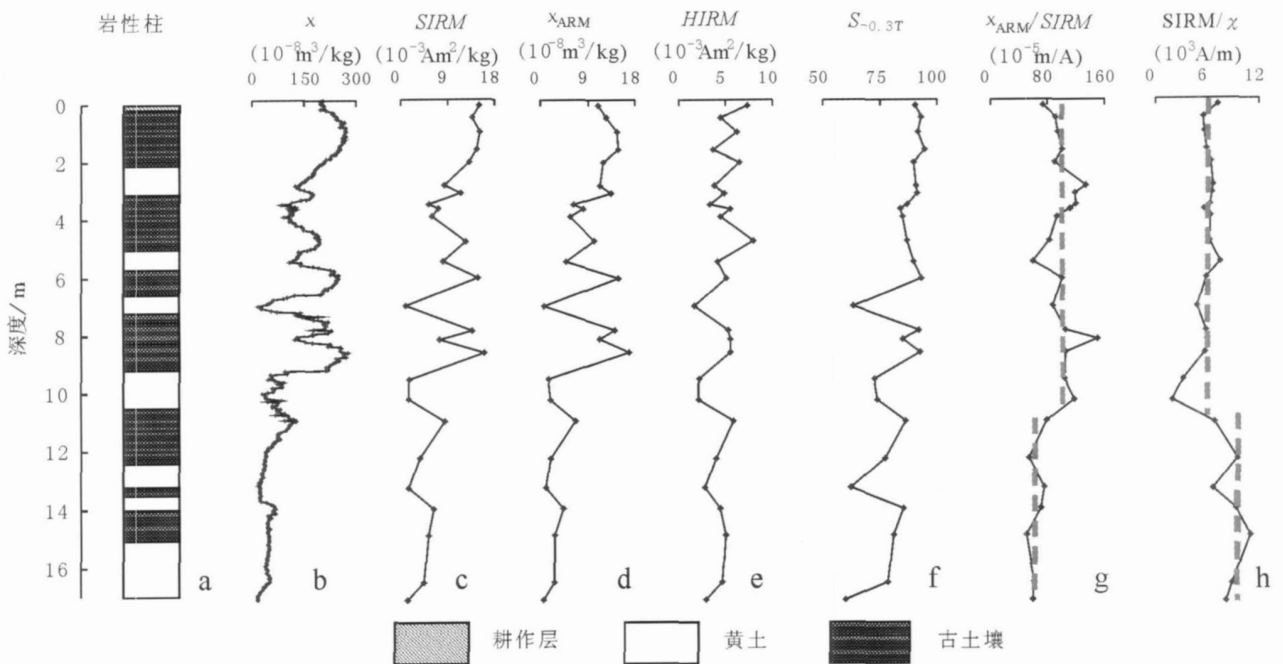


图 3 二龙山剖面地层及环境磁学指标随深度变化图

Fig. 3 Pedostratigraphy and magnetic parameter changes of the Erlongshan loess-paleosol section

$HIRM$ 值 $[= (SIRM + IRM_{-0.3T}) / 2]$ 可用来粗略估计反铁磁性矿物的含量^[23]。 $HIRM$ 在黄土和古土壤中的变化幅度不大, 说明反铁磁性矿物在黄土和古

土壤中的含量差别不太大。其值在整个剖面从上到下比较稳定, 可能反映了反铁磁性矿物主要来源于风尘源区。同时, 我们注意到, 古土壤比相邻黄土仍然

显示了更高的 H_{IRM} , 说明成土过程中不仅生成了较多细粒亚铁磁性矿物, 反铁磁性矿物的含量也有所增加^[24]。

$S_{-0.3T}$ 比值 ($= -IRM_{-0.3T} / SIRM * 100$) 反映样品中低矫顽力磁性矿物 (磁铁矿, 磁赤铁矿) 的富集程度^[23-25]。当样品中低矫顽力矿物含量较高时, $S_{-0.3T}$ 的值较高。从图 2f 图 3f 可以看出, 二龙山和上白川剖面中大部分样品的 S 比值都较高, 达到了饱和值的 55% 以上。另外, 从 S 比值与磁化率的关系 (图 4b) 可以看出, 磁化率值大于 $30 \times 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{kg}$ 的样品, S 比值都介于 75~95 之间。说明样品以低矫顽力矿物为主, 但都不同程度地含有高矫顽力矿物。而对于两剖面磁化率小于 $30 \times 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{kg}$ 的样品来说, S 比值大多低于 65, 反映出样品中高矫顽力磁性矿物相对富集。上白川剖面所有样品的 S 比值平均值 (72.56) 低于二龙山剖面 (84.07)。尤其是在 4 m 以下, 多数层位的 S 比值都不高, 显示了该剖面下部各层位中高矫顽力磁性矿物占据了比较重要的地位。

通过等温剩磁曲线与矫顽力曲线 (图 5), 我们同

样可以看出 S 比值反映的特征。对于两剖面几个典型的黄土和古土壤样品, 并非都能在 300 mT 前达到饱和值的 90%。部分样品需要到 500 mT 甚至 800 mT 后才能基本饱和。说明这些样品中低矫顽力磁性矿物虽然对剩磁起主导作用, 但高矫顽力磁性矿物的贡献也非常重要^[14]。

$X_{ARM} / SIRM$ 比值的大小反映了样品中亚铁磁性矿物的粒径, 在单畴范围内 (SSD - PSD) 其值最高^[22-26]。因此可以将它作为成土强度的指标^[23-27]。同样, 由于超顺磁性颗粒对剩磁没有贡献, 但能产生很高的磁化率值, 所以 $SIRM / \chi$ 也能够反映样品中细粒亚铁磁性矿物的多少, 从而指示成土作用的强弱^[27]。从图中可以看出 (图 2g, h 图 3g, h): 二龙山剖面在 9.2 m 以上, $SIRM / \chi$ 值较下部要低, 而 $X_{ARM} / SIRM$ 值则较下部高, 表明在 9.2 m 以上地层中含有较多的细粒磁性矿物, 成土作用相对较强。同样, 上白川剖面在 4 m 以上, $SIRM / \chi$ 值较下部要低, 而 $X_{ARM} / SIRM$ 值则较下部高, 表明在 4 m 以上地层中含有更多的细粒 (SP, SD) 磁性矿物, 成土作用较强, 而下

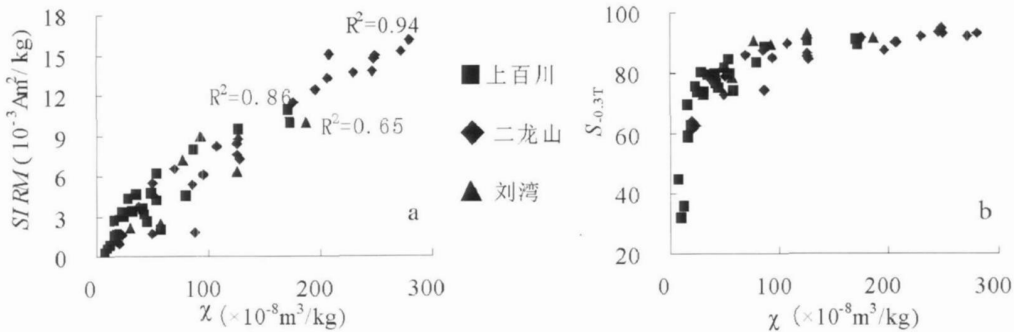


图 4 上白川、二龙山和刘湾剖面 $SIRM$ 、 $S_{-0.3T}$ 比值与磁化率 (χ) 的相关图

Fig. 4 Variations of $SIRM$ and S ratio versus magnetic susceptibility (χ) for the samples of the Shangbaichuan, Erlongshan and Liowan sections

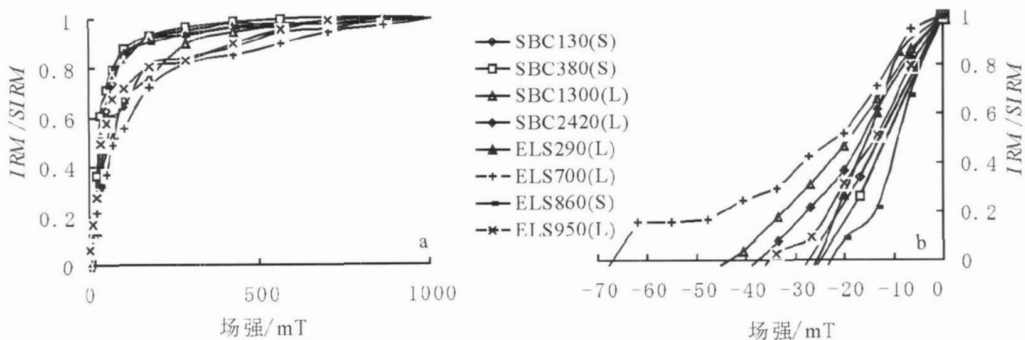


图 5 上白川和二龙山剖面部分样品的等温剩磁曲线和矫顽力曲线

Fig. 5 The IRM and demagnetization curves for the representative samples of the Shangbaichuan and Erlongshan sections

部地层成土作用整体较弱。但是,在个别层位也存在不相符的情况,例如二龙山剖面 10 2 处的黄土样品, $SIRM / \chi$ 值很低,而 $\chi_{ARM} / SIRM$ 值较高。这可能是由于该层黄土经历的化学风化作用非常弱,磁性矿物来自物源区的碎屑反铁磁性矿物(赤铁矿或针铁矿)为主。

2.2 热磁曲线

根据热磁曲线可以得到磁性矿物的居里温度从而判别矿物类型,也能识别出矿物相之间的转化^[9 28 29]。从图 6 可以看出:所有样品的加热曲线都显示出 580°C 左右的居里温度,表明磁铁矿占据主导地位。加热曲线在 200°C 左右均有一个转变,磁化强度在此之后的快速降低可能有两个原因:一是样品中含有较多的磁赤铁矿,二是样品中一些磁铁矿已经发生了部分磁赤铁矿化^[28]。磁赤铁矿的热不稳定性导致向赤铁矿转变,而转变温度如此低的原因则可能是样品中磁赤铁矿和(或)磁铁矿的粒径较大^[30]。

磁化率值最高(如 SBC130 和 ELS860)和中等(如 ELS1640 和 LW 440)的样品的加热曲线相似(图 6a b),但后者在 200~250°C 之间出现了一个明显的峰值。磁化强度在此温度范围的短暂增加可能是因为样品中有机质的存在,在加热过程中形成了一个局

部还原环境,导致非铁磁性的铁矿物向亚铁磁性矿物的转变^[21]。而磁化率值最低的样品(如 SBC240 ELS700)的磁化强度在加热过程中一直缓慢下降(图 6c)。说明第一种类型(图 6a)以磁铁矿占主导地位,而第二种类型(图 6b)除了磁铁矿以外,还显示了少量赤铁矿的存在。第三种类型(图 6c)则显示出赤铁矿的含量显著增高。

三种类型的冷却曲线也大不相同。磁化率值最高和中等(图 6a b)的冷却曲线与加热曲线在 700~200°C 之间几乎完全重合,而 200°C 以后则冷却曲线高于加热曲线。磁化率值最低的黄土样品(图 6c)的冷却曲线在 700~500°C 之间与加热曲线是重合的,但在 500°C 以后冷却曲线急剧升高,在室温下显示出比加热前高出几倍甚至接近 10 倍的磁化强度。显然,加热过程中有新的磁性矿物形成^[31]。这可能与含铁(铝)硅酸盐粘土矿物(如绿泥石)^[12 14 32]等非磁性矿物在加热过程中转变成亚铁磁性矿物有关。由于绿泥石很容易被风化、分解^[33],因此在成土过程中,其分解出的铁离子在各种生物化学作用下就很容易形成新的磁性矿物^[14 34]。由此,我们可以看出:黄土比古土壤含有更多的粘土矿物,其受到的成土作用比古土壤要弱。

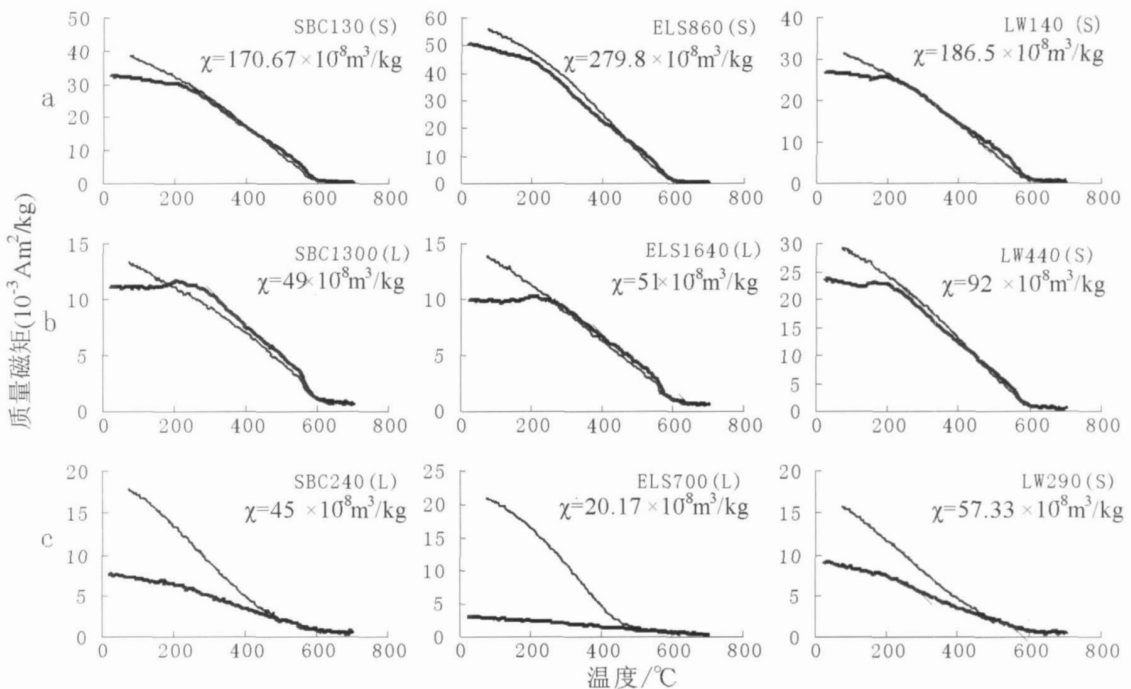


图 6 上白川、二龙山和刘湾剖面部分样品的热磁曲线
(粗线为加热曲线,细线为冷却曲线)

Fig 6 The thermomagnetic curves for the representative samples of the Shangbaichuan, Erlongshan and Liuwan sections
Thick (thin) lines represent heating (cooling) curves

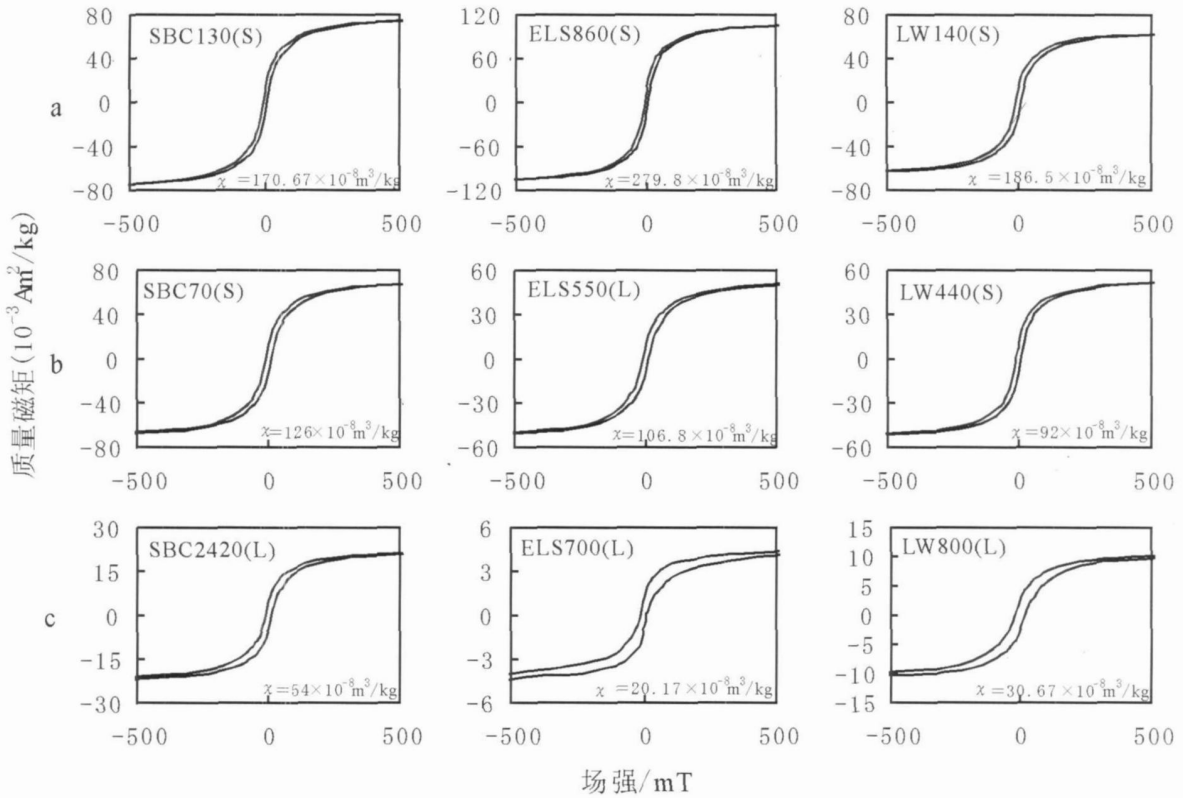


图 7 上白川、二龙山和刘湾剖面部分样品的磁滞回线

Fig 7 Hysteresis loops for the representative samples of Shangbaichuan, Erlongshan and Liwan loess-paleosol sections

2.3 磁滞特征

2.3.1 磁滞回线

磁滞回线能够提供关于磁性矿物类型和畴态的重要信息。所有样品的磁滞回线都不同程度地具有“蜂腰”特征。对于强发育的古土壤样品(图 7a),在 0.3 T 时就饱和了,线形很细,显示出很弱的“蜂腰型”特征,说明这些样品中低矫顽力磁性矿物占据主导地位^[35]。其微弱的“蜂腰”主要是由磁铁矿或磁赤铁矿的不同粒径相混合引起的;弱发育的古土壤样品(图 7b)在 0.3 T 时未饱和,但 0.5 T 时已饱和,线形稍宽,“蜂腰”更加明显。说明其磁性矿物也以低矫顽力矿物为主,但高矫顽力矿物的含量有所增加。其蜂腰特征产生的原因则比较复杂,可能是高矫顽力与低矫顽力矿物的混合,也可能是不同粒径的低矫顽力矿物的混合,或者是两种情况都有。黄土样品(图 7c)在 0.5 T 时仍未饱和,线形很宽,蜂腰很明显。表明样品中含有相当数量的高矫顽力磁性矿物,其蜂腰主要是由高矫顽力矿物与低矫顽力矿物相混合引起的,而且以高矫顽力矿物的贡献占主导地位。这种“蜂腰”特征随磁化率减小而逐渐增强的现象与以往

的研究^[14-36]存在一定差异,这种现象的环境意义将在下文详细讨论。

2.3.2 磁滞参数

利用三个剖面黄土与古土壤的 M_{rs}/M_s 比值和 B_{cr}/B_c 比值作出 Day-plot^[37-38](图 8)。可以看

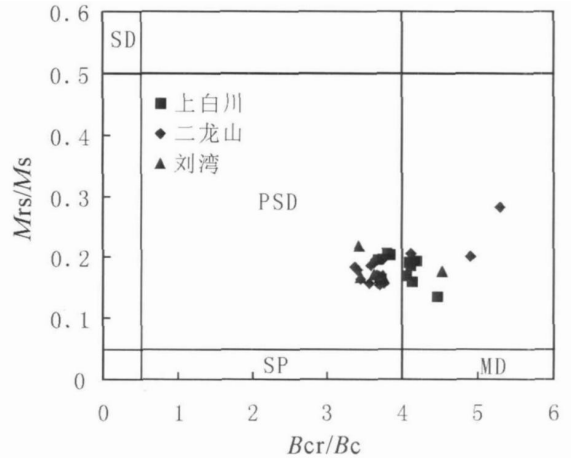


图 8 上白川、二龙山和刘湾剖面样品的 Day 氏图
Fig 8 Hysteresis ratios plotted on a Day diagram of the samples of Shangbaichuan, Erlongshan and Liwan loess-paleosol sections

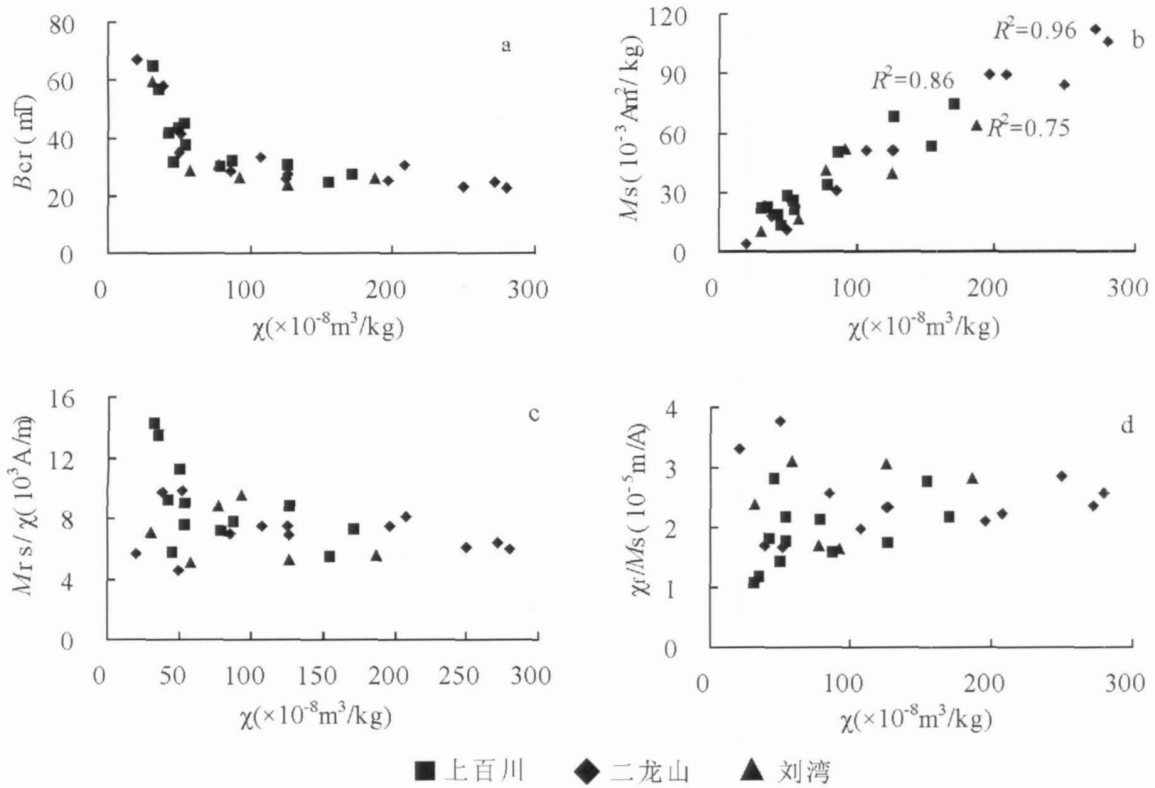


图 9 上白川、二龙山和刘湾剖面 B_{cr} 、 M_s 、 M_{rs}/χ 和 χ_f/M_s 与磁化率 (χ) 相关图
 Fig. 9 Variations of B_{cr} , M_s , M_{rs}/χ ratio and χ_f/M_s ratio versus magnetic susceptibility (χ) for the samples of Shangbaichuan, Erlongshan and Liuwan loess-paleosol sections

出,大部分样品都落在似单畴 (PSD) 的区域内, 但仍有相当数量的样品超出了这个范围, 显示出更高的 B_{cr}/B_c 比值。由于 B_c 的大小主要由软磁性矿物决定, B_{cr} 主要由硬磁性矿物决定^[37]。 B_{cr}/B_c 比值越高, 其高矫顽力矿物 (赤铁矿或针铁矿) 的相对含量越高。另外, B_{cr} 随着磁化率增大而降低^[39] (图 9a), 但磁化率大于 $50 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 后, B_{cr} 值就接近于一稳定值, 变化很小。

除了 ELS700 这个样品外, 所有样品的 M_{rs}/M_s 比值都局限在很小的范围内。二龙山剖面古土壤的平均值为 0.17, 黄土为 0.2, 上白川剖面古土壤的平均值为 0.18, 黄土为 0.2。古土壤与黄土的 M_{rs}/M_s 比值差别很小, 表明成土过程中不仅有超顺磁颗粒形成, 还有单畴和 (或) 似单畴颗粒的存在^[14]。二龙山黄土的 M_s 平均值为 $26.83 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$, 而 ELS700 的 M_s 却只有 $4.08 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 还不到平均值的 1/6 说明该黄土层的亚铁磁性矿物含量较低。 M_s 与 χ 的相关性很好 (图 9b), 随着磁化率的增加, 亚铁磁性矿物的含量也在增加。

χ_f/M_s 和 M_{rs}/χ 的比值通常被用作估计样品中超顺磁性矿物的相对含量, 从而反映成土强度的指标^[8, 12, 14, 22, 36, 40]。二龙山和上白川古土壤样品的 M_{rs}/χ 平均值 ($6.63 \times 10^3 \text{ A/m}$ 和 $8.56 \times 10^3 \text{ A/m}$) 均稍微小于黄土样品的平均值 ($7.48 \times 10^3 \text{ A/m}$ 和 $9.61 \times 10^3 \text{ A/m}$), 而 χ_f/M_s 平均值 ($2.46 \times 10^{-5} \text{ m/A}$ 和 $1.96 \times 10^{-5} \text{ m/A}$) 则略大于黄土样品的平均值 ($2.45 \times 10^{-5} \text{ m/A}$ 和 $1.87 \times 10^{-5} \text{ m/A}$)。显示了古土壤中超顺磁颗粒的存在, 但数量可能不多, 对磁性增强的贡献很少。从 χ_f/M_s 和 M_{rs}/χ 的比值与低场磁化率的关系图 (图 9c, d) 可以看出: 三个剖面的 χ_f/M_s 和 M_{rs}/χ 比值与磁化率并未显示出良好的相关性, 对于磁化率大于 $50 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 的样品, χ_f/M_s 和 M_{rs}/χ 比值均局限在很窄的范围内, 并未随着磁化率的增加而继续增加和降低。反映出高磁化率值并非由较多的超顺磁性矿物 (SP) 引起, 而可能是由单畴和 (或) 似单畴矿物引起。这说明成土过程中新生成的细粒磁性矿物既有超顺磁颗粒, 也有单畴和 (或) 似单畴颗粒, 但可能以单畴和 (或) 似单畴矿物为主。

3 讨论

3.1 黄土磁性矿物与磁化率增强的机制

已有对黄土高原黄土的岩石磁学研究表明: 黄土和古土壤中的磁性矿物主要包括亚铁磁性矿物(磁铁矿、磁赤铁矿)和反铁磁性矿物(赤铁矿、针铁矿), 以亚铁磁性矿物占主导地位^[41, 42]。而古土壤中的亚铁磁性矿物相对含量比黄土高。顺磁性矿物由于对磁性增强贡献很少, 通常都不予考虑。

对东秦岭地区三个剖面的 $SIRM$ 、 $S_{-0.3T}$ 比值、 $HIRM$ 及热磁曲线的分析结果表明, 所有样品既含有亚铁磁性矿物(磁铁矿、磁赤铁矿), 也含有反铁磁性矿物(如赤铁矿)。对于绝大多数样品来说, 均以亚铁磁性矿物为主。而且古土壤中含有更高比例的亚铁磁性矿物。这与黄土高原的研究结果是一致的。

但值得注意的是, 等温剩磁曲线(图 5a)和热磁曲线(图 6)都清楚地表明, 少量样品中反铁磁性矿物对样品的磁性起更为重要的作用, 因而表现出明显不同的磁学特征。如 ELS700 这个样品, M_s 值仅为 $4.08 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 而 B_{cr}/B_c 比值却高达 5.3 显然, 反铁磁性矿物在该样品中占据主导地位。

以往的研究证明了成壤过程中形成的细粒磁性矿物主要是处于超顺磁和单畴(SP+SD)区域的磁赤铁矿^[43~46]。Zhou 等^[7]认为这些超顺磁性(SP)磁赤铁矿的形成导致了古土壤磁化率增强。我们选择 X_{ARM} 、 $X_{ARM}/SIRM$ 、 X_r/M_s 和 M_{rs}/X 比值作为判断磁性矿物粒径的指标。研究发现: 古土壤确实含有比黄土更多的细粒亚铁磁性矿物, 但超顺磁性颗粒显示的磁性信号不明显, 说明这些细粒亚铁磁性矿物并非以超顺磁性颗粒为主, 而可能以单畴和(或)似单畴为主。单畴和(或)似单畴颗粒对磁化率增强起更重要的作用^[15, 17, 47]。

3.2 成壤强度对磁滞回线的影响

Fukuma 等^[36]对黄土高原洛川剖面的磁滞回线的研究发现: 黄土和古土壤样品中存在“蜂腰型”的磁滞回线, 回线的宽度和约束度与磁化率的大小相关。磁化率值中等的样品“蜂腰”特征最明显, 磁化率最低的样品“蜂腰”较弱, 而磁化率最高的样品“蜂腰”几乎看不到。Deng 等^[14]也得到了类似的结果, 但指出在发育最好的古土壤(S5)中, “蜂腰”特征又重新出现。Florindo 等^[40]在黄土高原南缘的段家坡剖面却并未发现“蜂腰型”磁滞回线。

我们对东秦岭地区三个黄土剖面的磁滞特征研

究表明: 所有样品均不同程度地显示了“蜂腰型”磁滞回线的特征。而且, “蜂腰”的明显程度远大于 Fukuma 等^[36]和 Deng 等^[14]的结果。与 Fukuma 等^[36]和郭斌等^[48]的结果不同的是, 回线的宽度与约束度随磁化率的增大而减小。如上文所述, 磁化率值最低的黄土样品(图 7a)蜂腰特征最明显。Roberts 等^[35]对天然和合成样品的研究表明: 对于亚铁磁性和反铁磁性矿物混合存在的样品, 反铁磁性矿物的含量必须很大, 才可能产生“蜂腰型”磁滞回线。由此推断, 这些“蜂腰”最明显的样品中赤铁矿的相对含量很高。这与其较高的 B_{cr}/B_c 比值和低 S 比值是一致的; 磁化率中等的样品(图 7b)蜂腰特征不如前者明显, 而且线形较细, 表明随着成土作用的加强, 更多的细粒亚铁磁性矿物形成, 赤铁矿相对含量降低, 其对磁滞回线约束度的贡献随之减弱; 磁化率值最高的古土壤样品(图 7c)蜂腰特征很弱。加强的成土作用导致样品中细粒亚铁磁性矿物占主导地位, 虽然赤铁矿的含量也有所增加, 但由于相对含量较低, 无法对“蜂腰”特征有贡献。样品显示的较弱的蜂腰特征可能是由亚铁磁性矿物的不同粒径相混合引起的。

3.3 磁化率与环境关系分析

本次研究的三个剖面虽然同属于东秦岭地区, 且相距不远, 但由于地处山区, 受复杂地形影响, 现代气候存在一定差别。上白川与刘湾剖面位处洛南盆地, 年均温 11.5°C , 年平均降水量 770 mm 。二龙山剖面年均温 12.9°C , 年平均降水量 715 mm ^[49]。二龙山剖面比前两个剖面更靠南, 降水却比洛南盆地要低。

三剖面黄土和古土壤的磁化率结果显示, 上白川磁化率最大值与刘湾剖面接近, 而二龙山的磁化率最大值远远大于前两个剖面, 与黄土高原南缘的段家坡剖面^[40, 50]和东南缘的三门峡剖面^[17]相近。此外, 二龙山剖面磁化率值与地层对应较好, 即古土壤显示高值, 而黄土则为低值。刘湾剖面磁化率值与地层的对应关系稍差^[20]。而上白川剖面的磁化率值与地层则很难对应, 尤其是在 4 m 以下, 磁化率值很低, 而且比较稳定, 未能反映出黄土—古土壤的交替变化(图 2b)。根据刘秀铭等的研究结果^[31], 磁化率与成壤强度的相关性有效降水量有关。当有效降水量高于某临界值时, 积水的成壤环境可以形成一个还原条件, 铁磁性矿物就会被分解, 导致磁化率值降低。洛南盆地年蒸发量平均 779.5 mm ^[51], 仅高于年降水量 1.23% 。而黄土高原地区年蒸发量约 3 倍于年降水量^[31]。洛南盆地如此高的有效降水量使该区成壤

环境非常湿润,利于形成还原条件,发生潜育化作用,从而使亚铁磁性矿物被溶解或分解,产生较低的磁化率值。上白川剖面 7.6~8.4 m 处的黄土呈灰白—浅灰绿色,磁化率值低于 $10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 显然是土壤潜育化作用的结果。另外,山地地形和较多的降水导致地层被侵蚀也是磁化率与地层对应不好的可能原因^[20]。

4 结论

我们对东秦岭地区的黄土堆积进行了岩石磁学分析,发现该区黄土—古土壤的磁学性质既与黄土高原的类似,但也存在着区别。

(1) 绝大部分黄土和古土壤样品以亚铁磁性矿物为主,但少量样品显示出反铁磁性矿物含量占主导地位的特征。上白川与刘湾剖面反铁磁性矿物含量整体要比二龙山剖面高,可能原因是: 1) 洛南盆地降雨量较大,风化作用比较强,从而产生更多反铁磁性矿物。2) 物质来源受到了盆地边缘山体岩石风化物的影响。三个剖面虽然相距不远,但略有不同的磁学特征表明局地环境对黄土—古土壤的磁学性质有影响。

(2) 成壤作用既生成细粒亚铁磁性矿物,也形成了少量反铁磁性矿物。其中,细粒亚铁磁性矿物包括超顺磁性和单畴(似单畴)颗粒,但超顺磁性颗粒很少,对磁化率增强起主要作用的是成土过程中形成的单畴和(或)似单畴亚铁磁性矿物。

(3) 洛南盆地黄土剖面磁化率值与地层不能完全对应,可能与当地特定的地形和气候条件有关,表明在将磁化率作为古气候指标时,还必须考虑到局地环境的影响。

致谢 感谢张小兵、赵存法、Richard Cosgrove 魏鸣、强小科、王先彦、李郎平、张卫国和孙东怀等在野外和实验室工作中给予的帮助。

参考文献 (References)

- 刘东生,等. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985 1-481 [Liu Tunsheng *et al.* Loess and the Environment [M]. Beijing Science Press, 1985 1-481]
- Liu T S, Ding Z L. Chinese loess and the paleomonsoon [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 1998, 26: 111-145
- An Z S. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 171-187
- Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, *et al.* Staked 2.6 m grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record [J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): 1033 doi 10.1029/2001PA000725
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, *et al.* Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416: 159-163
- Heller F, Liu T S. Magnetism of Chinese loess deposits [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1984, 77: 125-141
- Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, *et al.* Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess [J]. *Nature*, 1990, 346: 737-739
- Banerjee S K, Hunt C P, Liu X M. Separation of local signals from the regional paleomonsoon record of the Chinese loess plateau: A rock-magnetic approach [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20: 843-846
- Evans M E, Heller F. Magnetic enhancement and paleoclimate: a study of a loess/paleosol couplet across the Loess Plateau of China [J]. *Geophysical Journal International*, 1994, 117: 257-264
- Liu X M, Bloemendal J, Rolph T. Comments on pedogenesis and paleoclimate interpretation of the magnetic susceptibility record of Chinese loess/paleosol sequences [J]. *Geology*, 1994, 22: 858-859
- Heller F, Evans M E. Loess magnetism [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33: 211-240
- Hunt C P, Banerjee S K, Han J M, *et al.* Rock-magnetic proxies of climate change in the loess-paleosol sequences of the western Loess Plateau of China [J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 123: 232-244
- Bloemendal J, Liu X M, Rolph T C. Correlation of the magnetic susceptibility stratigraphy of Chinese loess and the marine oxygen isotope record: chronological and paleoclimatic implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 131: 371-380
- Deng C L, Zhu R X, Verosub K L, *et al.* Mineral magnetic properties of loess/paleosol couplets of the central loess plateau of China over the last 1.2 Myr [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: B01103 doi 10.1029/2003JB002532
- Liu Q S, Jackson M J, Banerjee S K, *et al.* Mechanism of the magnetic susceptibility enhancements of the Chinese loess [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: B12107, doi 10.1029/2004JB003249
- Deng C L, Vidale R J, Verosub K L, *et al.* Mineral magnetic variation of the Jiaodao Chinese loess/paleosol sequence and its bearing on long-term climatic variability [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: B03103 doi 10.1029/2004JB003451
- 王喜生, 杨振宇, L'vlie R, 等. 黄土高原东南缘黄土—古土壤序列的环境磁学结果及其古气候意义 [J]. *科学通报*, 2006, 51(13): 1575-1583 [Wang Xisheng, Yang Zhenyu, L'vlie R, *et al.* Environmental magnetism and paleoclimatic interpretation of the Shanxi loess-paleosol sequence in the southeastern extremity of the Chinese Loess Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(22): 2755-2762]
- 雷祥义. 商州黄土记录的最近六十万年来东秦岭古环境变迁 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 63-73 [Lei Xiangyi. Paleoenvironmental changes recorded by Shangzhou loess-paleosol sequences

- on the Eastern Qinling Mountains during the last 0.6 Ma [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology* 1999, 19(1): 63-73
- 19 雷祥义. 秦岭黄土—古土壤发育时的植被与环境 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(1): 73-79 [Lei Xiangyi. Vegetation and environment during period of loess-paleosol development in the Qinling mountains. 2000, 20(1): 73-79]
- 20 鹿化煜, 张红艳, 王社江, 等. 东秦岭南洛河上游黄土地层年代的初步研究及其在旧石器考古中的意义 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(4): 559-567 [Lu Huayu, Zhang Hongyan, Wang Shejiang, et al. A preliminary survey on loess deposit in Eastern Qinling Mountains (central China) and its implication for estimating age of the Pleistocene lithic artifacts [J]. *Quaternary Sciences* 2007, 27(4): 559-567]
- 21 Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism* [M]. London: Allen and Unwin, 1986: 1-227
- 22 Evans M E, Heller F. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmental Magnetism* [M]. San Diego: Academic Press, 2003: 1-299
- 23 Bloemendal J, Liu X M. Rock magnetism and geochemistry of two Pliocene Chinese loess-paleosol sequences: implications for quantitative paleoprecipitation reconstruction [J]. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 226: 149-166
- 24 王晓勇, 鹿化煜, 李珍, 等. 青藏高原东北部黄土堆积的岩石磁学性质及其古气候意义 [J]. *科学通报*, 2003, 48(15): 1693-1699 [Wang Xiaoyong, Lu Huayu, Li Zhen, et al. Paleoclimatic significance of mineral magnetic properties of loess sediments in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48: 2126-2133]
- 25 Akram H, Yoshida N, Ahmad M N. Rock magnetic properties of the Late Pleistocene loess-paleosol deposits in Haro River area: A tectonic Basin. Pakistan: is magnetic susceptibility a proxy of paleoclimate [J]. *Earth Planets Space*, 50: 129-139
- 26 Maher B A. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites [J]. *Journal of Geophysical Research* 1988, 94: 83-96
- 27 Zhang W G, Yu L Z, Lu M, et al. Magnetic properties and geochemistry of the Xishu Loess in the present subtropical area of China and their implications for pedogenic intensity [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2007, 260: 86-97
- 28 Liu X M, Hesse P, Rolph T. Origin of magnetite in Chinese loess deposits: aeolian or pedogenic [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 1999, 112: 191-201
- 29 刘秀铭, 安芷生, 强小科, 等. 甘肃第三系红粘土磁学性质初步研究及古气候意义 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2001, 31(3): 192-205 [Liu Xiuming, An Zhisheng, Qiang Xiaoke, et al. Magnetic properties of the Tertiary red clay from Gansu Province, China and its paleoclimatic significance [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(7): 635-651]
- 30 Bando Y, Kiyama M, Takada T, et al. The effect of particle size of γ - Fe_2O_3 on the transformation from γ -form to α -form [J]. *Japanese Journal of Applied Physics* 1965, 4: 240-241
- 31 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 Dongsheng, 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]
- 32 Kahn V E, Rutter N W, Rokosh C D. Clay minerals and their paleoenvironmental interpretations in the Baoji loess section, southern Loess Plateau, China [J]. *Catena* 1996, 27: 49-61
- 33 Righi D, Vekle B, Meunier A. Clay stability in clay-dominated soil systems [J]. *Clay Minerals* 1995, 30: 45-54
- 34 季峻峰, 陈骏, 刘连文, 等. 洛川黄土中绿泥石的化学风化与磁化率增强 [J]. *自然科学进展*, 1999, 9(7): 619-623 [Ji Junfeng, Chen Jun, Liu Lianwen, et al. Chemical weathering of chlorite and enhancement of magnetic susceptibility in Luochuan loess section [J]. *Progress in Natural Science* 1999, 9(7): 619-623]
- 35 Roberts A P, Cui Y L, Verosub K L. Wash-waisted hysteresis loops: Mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100, B9: 17909-17924
- 36 Fukuma K, Torii M. Variable shape of magnetic hysteresis loops in the Chinese loess-paleosol sequence [J]. *Earth Planets Space*, 1998, 50: 9-14
- 37 Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 1977, 13: 260-267
- 38 Dunlop, D J. Theory and application of the Day plot (M_r/M_s versus $H_c/H_c(0)$): 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107, B3: 2076 doi: 10.1029/2001JB000486
- 39 Evans M E, Heller F. Magnetism of loess/paleosol sequences: recent developments [J]. *Earth Science Reviews* 2001, 54: 129-144
- 40 Florindo F, Zhu R X, Guo B, et al. Magnetic proxy climate results from the Dunjiao Loess section: southernmost extremity of the Chinese loess plateau [J]. *Journal of Geophysical Research* 1999, 104: 645-659
- 41 Vandenberghe R E, de Grave, Hus E, et al. Characterization of Chinese loess and associated paleosol by Mn^{2+} Mossbauer spectroscopy [J]. *Hyperfine Interactions* 1992, 70: 977-980
- 42 Maher B A, Thompson R. Paleoclimatic significance of the mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols [J]. *Quaternary Research* 1992, 37: 155-170
- 43 Verosub K L, Fine P, Singer M J, et al. Pedogenesis and paleoclimate: Interpretation of the magnetic susceptibility record of Chinese loess-paleosol sequences [J]. *Geology* 1993, 21: 1011-1014
- 44 Deng C L, Zhu R X, Verosub K L, et al. Paleoclimatic significance of the temperature-dependent susceptibility of Holocene loess along a NW-SE transect in the Chinese loess plateau [J]. *Geophysical Research Letters* 2000, 27: 3715-3718
- 45 Liu Q S, Banerjee SK, Jackson M J, et al. An integrated study of the grain-size-dependent magnetic mineralogy of the Chinese loess-paleosol and its environmental significance [J]. *Journal of Geophysical*

- Research 2003, 108 (B9), 2437, doi 10.1029/2002JB002264
- 46 Chen T H, Xu H F, Xie Q Q, *et al*. Characteristics and genesis of magnetite in Chinese loess and paleosols: mechanism for magnetic susceptibility enhancement in paleosols [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2005, 240: 790-802
- 47 Liu Q S, Jackson M J, Yu Y, *et al*. Grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess/paleosols [J]. *Geophysical Research Letters* 2004, 31, doi: 10.1029/2004GL021090
- 48 郭斌, 朱日祥, 白立新, 等. 黄土沉积物的岩石磁学特征与土壤化作用的关系 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2001, 31 (5): 377-386 [Guo Bin, Zhu Rixiang, Bai Lixin, *et al*. Rock magnetic properties of a loess-paleosol couple along an N-S transect in the Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44 (12): 1099-1109]
- 49 许兰州, 王希珍. 陕西省地图册 [M]. 西安: 西安地图出版社, 2006: 1-268 [Xu Lanzhou, Wang Xizhen. Shaanxi Atlas [M]. Xi'an Xinan Map Press, 2006: 1-268]
- 50 贾蓉芬, 刘东生, 林本海. 陕西西田段家坡黄土剖面有机质磁性的初步研究 [J]. *地球化学*, 1992, 3: 234-242 [Jia Rongfen, Liu Dongsheng, Lin Benhai. A preliminary study on magnetism of organic matter in Duanjiaopo loess section (Q₂-Q₃) at Lantian, Shaanxi province, China [J]. *Geochemistry* 1992, 3: 234-242]
- 51 《洛南县志》编纂委员会. 洛南县志 [M]. 北京: 作家出版社, 1999: 1-78 [The Compilation Committee of the Luonan County Annals. The Annals of the Luonan County [M]. Beijing: Writers Press, 1999: 1-78]

Magnetic Properties of Loess Deposit in Eastern Qinling Mountains and An Investigation on the Magnetic Susceptibility Enhancement

ZHAO Jun^{1, 2, 5} LU Hua-yu² WANG Xiao-yong³

ZHANG Hong-yan^{1, 2, 5} WANG She-jiang⁴

(1 SKLLQG, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075;

2 School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093;

3 School of Resources and Environment, Eastern China Normal University, Shanghai 200062;

4 Archaeology Program, School of Historical and European Studies, La Trobe University, Victoria 3086, Australia;

5 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract We have carried out a relatively complete rock magnetism investigation on loess deposit in the eastern Qinling Mountains, central China. 251 and 341 samples were obtained from Shangbaichuan (SBC) and Erlongshan (ELS) loess-paleosol sections at 10 cm and 5 cm intervals, respectively. Magnetic susceptibility was measured on all these samples. Isothermal Remanent Magnetization (IRM) and Anhysteretic Remanent Magnetization (ARM) were measured on 24, 26 and 6 samples selected from SBC, ELS and Liwan (LW) sections, respectively. The thermal properties and hysteresis properties were measured on 14, 14 and 6 samples from SBC, ELS and LW sections. The results indicate that most of loess and paleosol samples are dominated by ferrimagnetic minerals (magnetite and maghemite) and the paleosols have more ferrimagnetic minerals than that in the loess, but there are still some cases that antiferromagnetic minerals (hematite) play a more important role in the magnetic properties. Both of the concentration of ferrimagnetic minerals and antiferromagnetic minerals systematically increase with the intensified degree of pedogenesis. The fine-grained ferrimagnetic minerals, which were formed in pedogenesis, are dominated by single domain and/or pseudo-single domain grains which contribute significantly to the magnetic susceptibility enhancement. The results reveal a strong linkage between the magnetic properties and the palaeoclimate. The rock magnetic properties of the three loess-paleosol sections are generally similar to that in the Loess Plateau, but with a minor difference. In addition, the rock magnetic properties among the three loess-paleosol sequences are slightly different, this may be caused by a warmer and more humid climate in this region.

Key words Eastern Qinling Mountains, loess deposit, rock magnetism, magnetic susceptibility, pedogenic process