

doi:10.3799/dqkx.2014.138

中国东部表层土壤磁化率特征及其指示意义

邱世藩^{1,2}, 欧阳婷萍¹, 朱照宇¹, 黄宁生¹, 李明坤^{1,2}, 田成静^{1,2}, 卞勇^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:磁化率是环境磁学研究中较常用、较易获得的指标之一,但其解释和意义又最为复杂.对采自中国东部从北到南涵盖中国主要气候带的风化—成壤成因的79个表层土壤样品进行高、低频磁化率和非磁滞剩磁测试并分析其与降水量、年均温等气候参数的关系.结果表明:(1)发育于不同类型母岩的风化—成壤成因表层土壤磁学性质之间存在显著差异,各磁化率参数与气候条件参数之间的关系大不一样,在大空间尺度进行磁学与气候条件的关系研究时,必须充分考虑地质背景与母岩类型的差异.(2)发育于花岗岩的表层土壤非磁滞剩磁磁化率与年降水量和年均温间呈显著负相关关系;而发育于玄武岩的表层土壤非磁滞剩磁磁化率与年降水量呈显著正相关关系.被广泛认可的黄土—古土壤序列磁化率与成壤的关系不一定适用于大空间尺度的其他气候区域.(3)在风化—成壤过程中,磁性颗粒有变细的趋势,但降水强度增大时,一些超细颗粒较易被搬运离开原地,单一磁学参数结果难以反映气候条件及环境变化.(4)风化—成壤成因表层土壤非磁滞剩磁磁化率能较好地反映风化成因土壤的风化程度,但风化—成壤表层土壤磁学性质变化的机制特别是对相应土壤剖面的磁性矿物迁移转化有待深入研究.

关键词:磁化率;风化—成壤;表层土壤;中国东部;环境地质.

中图分类号: P66

文章编号: 1000-2383(2014)10-1454-11

收稿日期: 2014-01-26

Magnetic Susceptibility Characteristics of Weathering-Pedogenic Topsoil along East Part of China and Its Significance

Qiu Shifan^{1,2}, Ouyang Tingping¹, Zhu Zhaoyu¹, Huang Ningsheng¹,
Li Mingkun^{1,2}, Tian Chengjing^{1,2}, Bian Yong^{1,2}

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Magnetic susceptibility is one of the most widely used and most easily to be obtained parameters of environmental magnetism. However, the meaning and interpretation of magnetic susceptibility is the most complicate. High, low frequency magnetic susceptibility and non-hysteresis remanence were measured for seventy-nine weathering-pedogenic topsoil samples collected from the east part of China, from north to south, covering the main climatic zones within China. Moreover, relationship between these magnetic parameters and climate indexes such as precipitation and annual average temperature was analyzed. The results indicate that: (1) Significant difference of magnetic properties is existed among weathering-pedogenesis topsoil that derived from different parent rocks. The relationship between all magnetic susceptibility parameters and climate indexes is much different. Difference of geological conditions and parent rocks must be taken full consideration when the relationship between magnetism and climate conditions is discussed in large spatial scale. (2) The non-hysteresis remanence magnetic susceptibility is negatively related to precipitation and annual average temperature for topsoil derived from granite. However, it is positively related to precipitation for topsoil derived from basalt. The widely recognized relationship between magnetic strength of paleosol and pedogenesis of loess-paleosol sequence from the Chinese Loess Plateau isn't always proper to apply in other climate area. (3) Magnetic particles tend to be finer during weathering and soil-forming process. However, single magnetic parameter can't reflect the climate and environmental change because some ultrafine particles are easy to be carried out in situ due to in-

基金项目:国家自然科学基金委员会广东联合基金项目(No.U1201131);国家自然科学基金项目(No.40930106);广东省产学研项目(No.2012B090400045).

作者简介:邱世藩(1975—),男,博士研究生,主要从事区域环境与第四纪地质学研究.E-mail: oyangtp@gig.ac.cn

creasing rainfall intensity. (4) Magnetic susceptibility of non-hysteresis remanence of weathering-pedogenic topsoil can reflect the weathering degree of weathering soil. The magnetic variation mechanism of weathering-pedogenic topsoil, especially magnetic mineral transformation of corresponding soil profile, is still needed further study.

Key words: magnetic susceptibility; weathering-pedogenesis; topsoil; east part of China; environmental geology.

0 引言

自 20 世纪 80 年代以来,环境磁学以其快速、便捷、无损等众多优点被广泛应用于环境、气候等众多领域(Thompson and Oldfield, 1986; Verosub and Roberts, 1995; Evans and Heller, 2003; 张玉芬等, 2005; Blaha *et al.*, 2011; Lyons *et al.*, 2012). 尤其是自发现中国黄土—古土壤序列的磁化率变化曲线可与深海氧同位素变化曲线对比(Heller and Liu, 1984)之后,国内外对中国黄土—古土壤序列的磁学性质进行了广泛而深入的研究,取得了大量卓有成效的成果(Liu *et al.*, 1995; 韩家懋等, 1997; 黄孝刚和孙继敏, 2005; 刘进峰等, 2005; 乔彦松等, 2006; 邓成龙等, 2007; 刘冬雁等, 2010; 石培宏等, 2010). 虽然中国黄土剖面中磁化率在古土壤层增强的机制仍未得到统一认识,但古土壤层磁化率普遍增强的“成壤模式”已被广泛接受和认可. 中国黄土—古土壤序列的磁化率被认为是夏季风强度的替代性指标,并用频率磁化率等磁学指标来定量估算古降水强度或表征成土强度(Kukla, 1987; Zhou *et al.*, 1990; An *et al.*, 1991; Maher and Thompson, 1995; Derbyshire *et al.*, 1998; Florindo *et al.*, 1999; Hao *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2010). 然而,越来越多的研究表明,影响土壤磁学性质的因素还有很多(谢淑云等, 2012),如母岩岩性、燃烧等都对土壤磁化率有重要影响(吕厚远和刘东生, 2001; 孙东怀等, 2001; 饶志国等, 2007; 邓少福等, 2011). 鉴于此,众多学者对全球尺度的黄土—古土壤序列以及其他土壤剖面进行了深入研究(Maher, 2011; Sun *et al.*, 2011; Warriner *et al.*, 2011; Jia *et al.*, 2012).

在全球范围一些湿润地区,黄土—古土壤序列的磁化率变化特征与中国黄土—古土壤序列呈相反的变化趋势,而其他大量研究也表明磁性在成土作用过程中有时被增强而有时被削弱,同样,磁化率与降水量等气候因素之间的关系也相对复杂,时而正相关时而负相关有时甚至没有关系(Kukla *et al.*, 1988; Begét *et al.*, 1990; Heller *et al.*, 1993; Chlachula *et al.*, 1998; Maher, 1998; Porter *et al.*, 2001; Balsam *et al.*, 2004; Yin and Guo, 2006; 刘秀铭等, 2007; Liu *et al.*, 2013). 因此,更多的研究,尤其是大空间尺度的现代过程研

究(吕厚远等, 1994; Lu *et al.*, 2008; Borges *et al.*, 2011),对理解黄土—古土壤序列磁化率变化机制、成土作用与磁化率之间的关系以及相应的古气候古环境重建具有重要意义.

本研究选取中国东部(中国陆地地形上地势最低、最易受东亚季风影响的地貌第 3 阶梯)从北到南涵盖中国主要气候带(中温带、南温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带、北热带、中热带)广泛发育的风化—成壤成因表层土壤为研究对象,分析其磁化率、频率磁化率及非磁滞剩磁磁化率与降水量、年均温等气候条件之间的关系,试图回答中国黄土—古土壤序列古土壤层磁化率普遍增强的“成壤模式”机制是否适用于大空间尺度的其他气候区域和风化—成壤作用成因的表层土壤的磁化率(包括低频磁化率、频率磁化率和非磁滞剩磁磁化率)的环境指示意义等问题.

1 材料与方 法

所研究的 79 个表层土壤样品均在 2005 年秋季(9~11 月间)采集,研究区及采样点分布如图 1 所示. 采样点的年降水量 480.8~2 458.5 mm,年均气温 $-0.1\sim 25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. 为了避免人类活动和非当地来源物质的影响,在样品采集过程中尽量选取远离城市的自然植被覆盖土壤,同时采样点都分布在丘陵坡地等正地形上,一般选取已与当地气候环境条件达到平衡的地带性土壤,采样深度视土壤发育情况而定,一般为 2~4 cm. 在样品采集过程中尽量详细记录采样点基岩岩性. 所研究样品成壤母岩岩性不一,包括玄武岩(44 个)、花岗岩(16 个)、沉积岩(10 个)、流纹岩(2 个)、碳酸岩(2 个),还有 5 个样品在采集时未见到基岩,难以确定其基岩岩性. 对所有样品结果进行初步相关分析后,选择发育于沉积岩、花岗岩和玄武岩的表层土壤样品进行详细分析.

所有样品自然晾干后去除明显可见的植物残体(包括干叶、根系等)和砂砾,用玛瑙研钵稍加研磨,准确称重后装入 $2\times 2\times 2\text{ cm}^3$ 的无磁性立方盒进行磁性测试. 低频磁化率是外场作用下物质磁化的能力,磁化率与样品中磁性矿物的种类、粒度和含量直

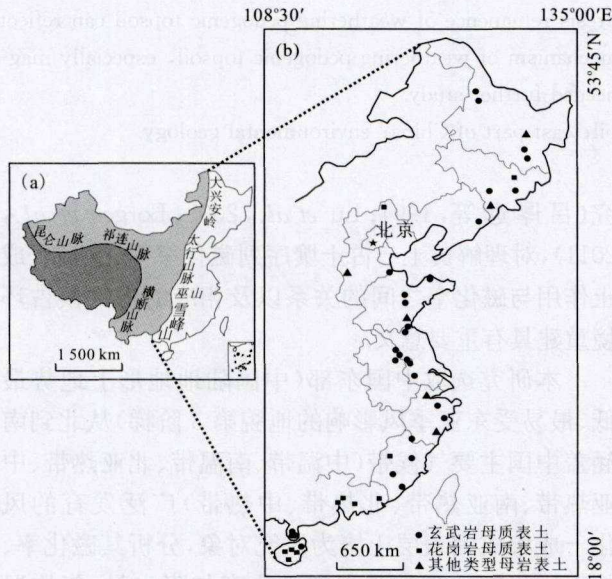


图 1 研究区域与采样点分布

Fig.1 Study area and sampling sites distribution

a. 中国版图, 其中白色部分为第 3 阶梯, 浅灰色部分为第 2 阶梯, 深灰色部分为第 1 阶梯即青藏高原; b. 本文样品的采集区域

接相关, 是磁性矿物含量的粗略反映(二者数值上正相关); 频率磁化率是样品在低频磁场和高频磁场中磁化率的相对差值, 反映样品中超顺磁颗粒(SP)含量对磁化率的贡献(二者数值正相关); 在中国黄土高原地区的黄土—古土壤序列研究中被用来指示成土作用的强度并被认为是反演古降水的有效代用指标。非磁滞剩磁磁化率是指样品在单位磁场中获得剩磁的能力, 主要反映样品中亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的含量和颗粒大小, 对稳定单畴和细小的假单畴(SD 和小的 PSD)颗粒特别敏感(Thompson and Oldfield, 1986; Verosub and Roberts, 1995; Evans and Heller, 2003)。用卡帕桥多频各向异性磁化率仪(MFK1-FA)进行低频(976 Hz)和高频(15 616 Hz)磁化率(分别用 χ_{lf} 和 χ_{hf} 表示)测试, 并根据公式 $\chi_{fd}(\%) = [(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}] \times 100$ 计算频率磁化率系数(χ_{fd})。用交变退磁仪(D2000)在 100 mT 峰值场和 0.05 mT 直流场下获得非磁滞剩磁(ARM)后用旋转磁力仪(JR6)进行测量, 本文以其磁化率的形式(χ_{ARM})表示。所有分析测试在中国科学院广州地球化学研究所环境磁学实验室完成。

2 结果与讨论

2.1 方差分析和相关分析结果

利用统计软件 SPSS16.0 对低频磁化率、非磁

滞剩磁磁化率及频率磁化率等磁学指标以母岩岩性为变化依据进行方差分析, 结果如图 2 所示。利用统计软件 SPSS16.0 对上述磁学参数数据与纬度及年降水量、年均温等气候条件数据一起进行相关分析, 结果如表 1 所示。

图 2 所示的方差分析结果表明, 发育于玄武岩与花岗岩和沉积岩的表层土壤之间在磁化率、非磁滞剩磁、频率磁化率等磁学参数方面存在显著差异, 花岗岩和沉积岩的这些结果虽有部分重合区域, 但其平均值和变化范围都存在明显区别; 而玄武岩的结果与它们截然不同。这表明母岩岩性对表层土壤的磁学性质起重要作用, 这与饶志国等(2007)对华南地区发育于不同母岩表土的低频磁化率研究结果一致。

从表 1 所列的相关分析结果来看, 不同岩性风化—成壤形成的表层土壤低频磁化率与非磁滞剩磁呈显著正相关关系、与频率磁化率呈显著的负相关关系, 表明表土土壤磁化率可能主要由单畴—假单畴等细粒物质贡献; 而以往认为的成土作用过程中产生的对磁性增强起主要作用的超顺磁颗粒不仅对磁化率的贡献有限, 并且频率磁化率的增长与磁化率的增强有反向的趋势。所有样品及发育于沉积岩、花岗岩和玄武岩 3 种母岩的样品组合低频磁化率与气候条件之间不存在明显相关关系, 频率磁化率和非磁滞剩磁磁化率具有明显的纬度效应, 频率磁化率与年降水量之间的显著正相关关系似乎表明土壤中超顺磁(SP)颗粒含量受年降水量多少控制, 而非磁滞剩磁磁化率的大小则与年均气温直接相关。所有样品及发育于沉积岩、花岗岩和玄武岩 3 种母岩的样品组合频率磁化率与年均降水量之间的正相关关系, 以及不同岩性组合表层土壤样品非磁滞剩磁磁化率与年均气温之间的显著正相关关系(表 1), 似乎表明适于我国黄土高原等干旱—半干旱地区的用频率磁化率反演降水量变化, 也适用于大空间尺度的表层土壤。同时, 土壤中单畴—假单畴磁性颗粒含量受气温控制。当将不同岩性发育而来的表层土壤样品独立分析时, 不同岩性组合样品有各自不同的与气候环境指标相关的关联度。

2.2 不同母质类型的土壤磁化率特征

如前所述, 发育于不同母岩之上的表层土壤磁化率之间存在显著差异, 低频磁化率和非磁滞剩磁磁化率玄武岩组最高, 沉积岩组次之, 花岗岩组最低。与土壤中超顺磁颗粒直接相关的频率磁化率之间的差异不如上述两者大, 但其平均值明显从玄武

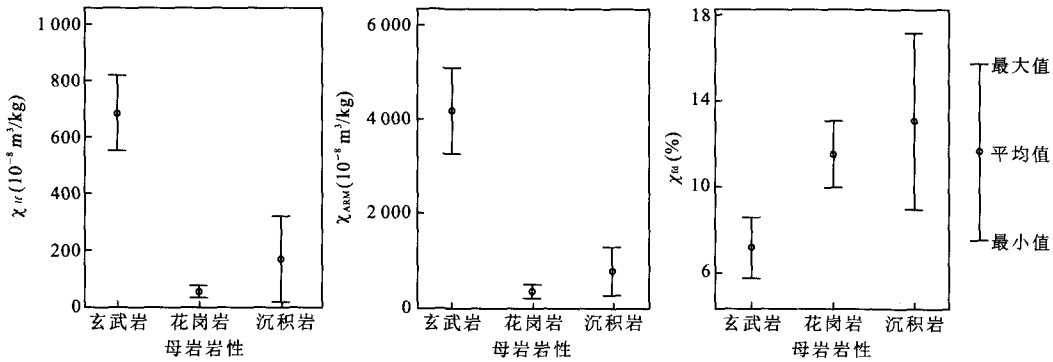


图 2 母岩岩性对表层土壤磁化率的影响

Fig.2 Impact of parent rock on magnetic susceptibility of topsoil

表 1 各类型表层土壤磁化率与纬度及气候参数之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between magnetic susceptibility and latitude and climate parameters for different type of topsoil

所有样品 79 个	纬度(°)	年均降水量(mm)	年均气温(°C)	$\chi_{if}(10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$	$\chi_{ARM}(10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg})$	$\chi_{fd}(\%)$
$\chi_{if}(10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$	-0.042	-0.086	0.063	1	—	—
$\chi_{ARM}(10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg})$	-0.233 *	0.089	0.236 *	0.806 *	1	—
$\chi_{fd}(\%)$	-0.236 *	0.414 *	0.181	-0.391 *	-0.190	1
沉积岩、花岗岩和玄武岩						
$\chi_{if}(10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$	-0.011	-0.111	0.031	1	—	—
$\chi_{ARM}(10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg})$	-0.233	0.084	0.235 *	0.796 *	1	—
$\chi_{fd}(\%)$	-0.281 *	0.451 *	0.225	-0.383 *	-0.180	1
沉积岩和花岗岩						
$\chi_{if}(10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$	0.323	-0.309	-0.276	1	0.866	-0.244
$\chi_{ARM}(10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg})$	0.294	-0.275	-0.282	0.866 *	1	-0.040
$\chi_{fd}(\%)$	-0.236	0.522 *	0.123	-0.244	-0.040	1
沉积岩						
$\chi_{if}(10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$	0.468	-0.414	-0.447	1	—	—
$\chi_{ARM}(10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg})$	0.113	-0.155	-0.105	0.857 *	1	—
$\chi_{fd}(\%)$	-0.771 *	0.946 *	0.631 *	-0.485	-0.287	1
花岗岩						
$\chi_{if}(10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$	0.713 *	-0.680 *	-0.744 *	1	—	—
$\chi_{ARM}(10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg})$	0.831 *	-0.784 *	-0.829 *	0.907 *	1	—
$\chi_{fd}(\%)$	0.300	-0.035	-0.309	0.336	0.359	1
玄武岩						
$\chi_{if}(10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$	-0.273	0.246	0.275	1	—	—
$\chi_{ARM}(10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg})$	-0.594 *	0.561 *	0.577 *	0.697 *	1	—
$\chi_{fd}(\%)$	-0.221	0.266	0.191	-0.149	0.116	1

* 注:表示相关性显著性水平大于 95%.

岩、花岗岩到沉积岩呈增大的趋势。

各组样品的低频磁化率均与非磁滞剩磁磁化率呈显著的正相关关系(表 1, 图 3), 低频磁化率与频率磁化率在玄武岩组和沉积岩组表现为负相关, 在花岗岩组表现为正相关, 但这些相关关系都不明显(表 1, 图 3). 这表明无论基岩岩性如何, 在风化—成壤过程中单畴—假单畴磁性颗粒成为成土过程中土壤磁性的主要载体, 超顺磁(SP)颗粒对磁性增强的贡献反而有限, 这与以往在黄土高原地区进行的黄土—古土壤序列磁学研究得出的结论(邓成龙等,

2007)不同。

2.3 不同母质类型的土壤环境磁学参数的纬度效应及其与气候参数的相关性

表 1 所列的不同基岩类型表层土壤磁学性质与纬度之间的相关系数表明, 不同类型母质表层土壤环境磁学参数的纬度效应存在明显差异。

沉积岩组表层土壤频率磁化率与纬度呈显著负相关关系(表 1), 随着纬度的增加, 沉积岩组表层土壤频率磁化率呈下降趋势(图 4a). 表 1 所列相关系数表明沉积岩组表层土壤低频磁化率和非磁滞剩磁

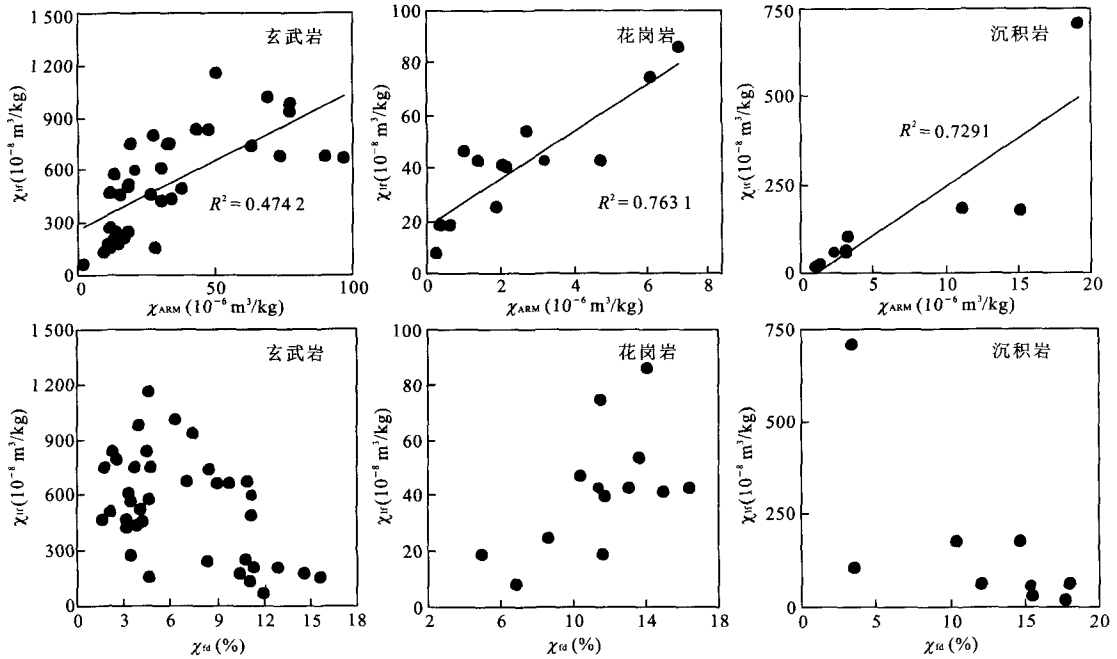


图 3 不同类型表层土壤低频磁化率与非磁滞剩磁磁化率和频率磁化率之间的相关关系
Fig.3 Relationship between χ_{lf} and χ_{ARM} , χ_{fd} for different types of topsoil

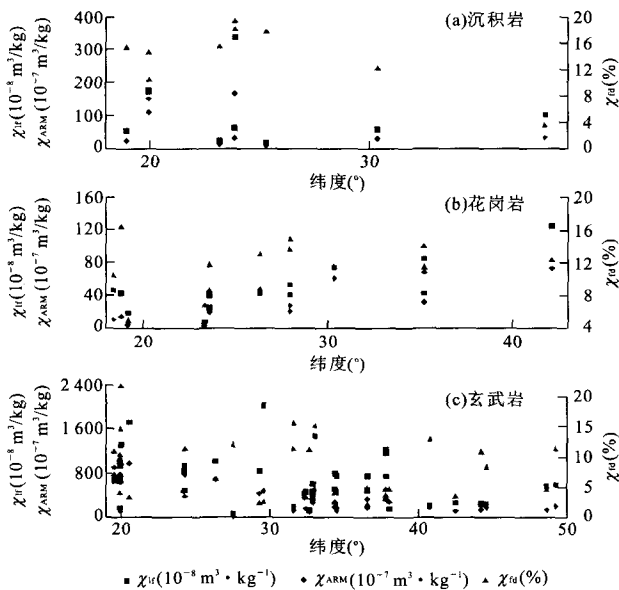


图 4 不同类型表层土壤磁化率的纬度效应

Fig.4 Latitude effect of magnetic susceptibility for different types of topsoil

磁化率与气候参数(降水量、气温)之间呈弱的负相关关系,频率磁化率与年降水量和年均气温之间的显著正相关关系与中国黄土高原地区黄土—古土壤序列的研究结果(邓成龙等,2007)基本一致。

根据上述相关关系,对沉积岩组表层土壤频率磁化率与年降水量和年均气温进行回归分析,回归

方程分别为:

$$\chi_{fd}(\%) = 0.0083P - 0.1243, R^2 = 0.8948;$$

$$\chi_{fd}(\%) = -0.2965T^2 + 11.859T - 100.72, R^2 = 0.9187.$$

图 5 为发育于沉积岩的表层土壤频率磁化率值与相应的年降水量、年均温的对应分布及回归拟合曲线。

从图 5 可以看出,发育于沉积岩的表层土壤频率磁化率值随年降水量的增高而线性增高,并未出现在中国黄土高原地区发现的在约 1200 mm 处出现的转折(Balsam *et al.*, 2011)。另一方面,发育于沉积岩的表层土壤频率磁化率值与年均温之间的二次多项式回归拟合结果离差最小、相关系数最大。从图 5 所示的回归拟合曲线看,频率磁化率随年均温的增高先快速增高后逐渐平缓,最后在年均温超过约 20 °C 后呈下降趋势。虽然受样本数量的限制,这种关系的适用范围有待进一步深入研究,但这种关系表明适用于中国黄土高原地区的频率磁化率古降水量估算模式不一定能够广泛应用于更大空间尺度、跨越不同纬度和不同气候带的表层土壤研究。

对于花岗岩组表层土壤,低频磁化率和非磁滞剩磁磁化率与纬度呈显著正相关关系(表 1),花岗岩组表层土壤低频磁化率和非磁滞剩磁磁化率随着纬度的增加而增高(图 4b)。与沉积岩组相反,花岗岩组表层土壤频率磁化率与气候参数之间呈弱的负

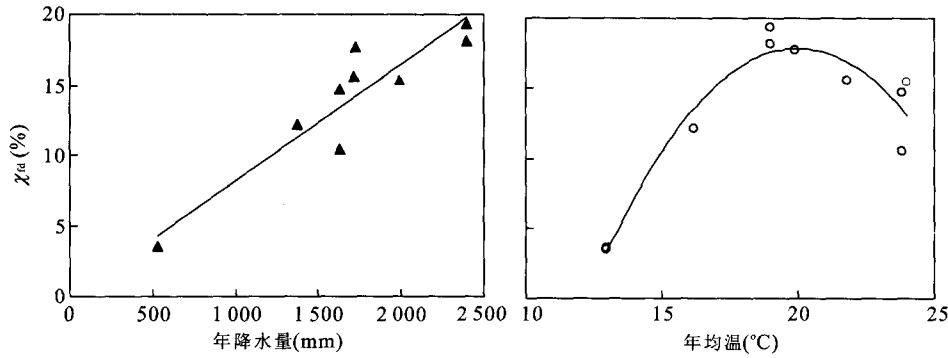


图 5 发育于沉积岩的表层土壤频率磁化率与降水量、年平均气温的对应分布及回归拟合曲线

Fig.5 Corresponding distribution and fitting curve of χ_{fd} of topsoil derived from sedimentary rock and precipitation, annual average temperature

相关关系,而低频磁化率和非磁滞剩磁磁化率都与年降水量和年均气温呈显著的负相关关系(表 1).

详细的回归分析表明发育于花岗岩的表层土壤低频磁化率和非磁滞剩磁磁化率与年降水量之间呈显著的对数负相关关系,而与年均温之间呈显著的线性负相关关系.其回归方程分别如下所示:

$$\chi_{ARM} = -4.954 \ln(P) + 39.077, (R^2 = 0.6749);$$

$$\chi_{ARM} = -0.4298T + 10.881, (R^2 = 0.8075);$$

$$\chi_{if} = -64.522 \ln(P) + 519.06, (R^2 = 0.616);$$

$$\chi_{if} = -5.9188T + 157.63, (R^2 = 0.8231).$$

发育于花岗岩的表层土壤低频磁化率和非磁滞剩磁磁化率与年降水量和年均温的对应分布及拟合曲线如图 6 所示.

图 6 所示的发育于花岗岩的表层土壤低频磁化率和非磁滞剩磁都与降水量、年均温等气候指标之间呈显著的负相关关系,说明暖湿的气候条件虽然促进了花岗岩的风化深度和强度,但它同时导致了

土壤中磁性矿物的流失,这是因为花岗岩的风化壳和表层土壤中仍然含有大量难以风化的石英颗粒,而由于降雨强度增大导致的水土流失使细粒的颗粒(包括磁性颗粒)易于流失,而残留原地的土壤的颗粒就相对较粗.发育于花岗岩母质之上的表层土壤磁化率与气候参数之间的这种关系与黄土高原地区黄土—古土壤序列研究出的结果(王丽霞等,2005)大不相同,再次证明了在利用土壤磁学性质进行古环境古气候重建时需特别注意研究对象所处区域及其地质背景等因素.

发育于玄武岩的表层土壤低频磁化率和频率磁化率与纬度呈弱的负相关关系,而其非磁滞剩磁磁化率则与纬度呈显著的负相关关系(表 1),随着纬度的增加,玄武岩组表层土壤非磁滞剩磁磁化率呈下降趋势(图 4c).发育于玄武岩的表层土壤低频磁化率和频率磁化率与降水量、年均温之间不存在明显的相关关系,但其非磁滞剩磁与降水量和年均温都呈显著的正相关关系(表 1).说明这种土壤中亚铁

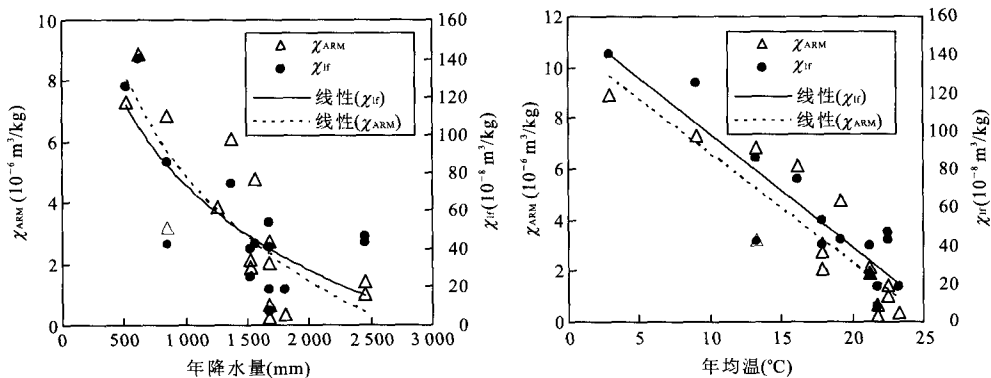


图 6 发育于花岗岩表层土壤低频磁化率、非磁滞剩磁磁化率与降水量、年均温的对应分布及拟合曲线

Fig.6 Corresponding distribution, regression equation and fitting curve of χ_{if} and χ_{ARM} of topsoil derived from granite and precipitation, annual average temperature

磁性矿物含量独立于气候条件,但气候条件的变化可直接影响土壤中单畴—假单畴细粒磁性颗粒的多少。

回归分析结果表明,发育于玄武岩的风化—成壤表层土壤非磁滞剩磁磁化率与降水量和年均温之间都呈显著的对数正相关关系(图 7),回归方程分别为:

$$\chi_{\text{ARM}} = 448.68 \ln(P) - 540.06, R^2 = 0.5021;$$

$$\chi_{\text{ARM}} = 6.942 \ln(T) - 8.9812, R^2 = 0.5127.$$

图 7 所示,发育于玄武岩的表层土壤频率磁化率与年降水量之间不存在明显的相关关系,但笔者经深入分析后发现在年降水量小于 900 mm 时,发育于玄武岩的表层土壤频率磁化率与降水量之间呈显著的负相关关系(图 7)。也就是说,当年降水量小于 900 mm 时,玄武岩在风化—成壤过程中土壤中超顺磁颗粒含量减少。这与前人针对中国黄土—古土壤序列的大量研究结果(邓成龙等,2007;魏海涛等,2008)相悖,表明直接发育于母岩的土壤磁学机制与黄土—古土壤序列可能不一样。究其原因,很有可能是在一定范围内,降水强度增大时,土壤中的超细颗粒被搬运离开原地,留在原地的以较粗颗粒为主。

2.4 发育于玄武岩的表层土壤环境磁学性质与风化程度的关系

前人根据风化过程中元素的迁移转化规律研究发现 Ba/Nb、Sr/Nb、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 等比值可以反映风化程度,随着风化作用的加剧, Ba/Nb 和 Sr/Nb 降低而 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 增大(黄成敏和龚子同,2002)。

本文以发育于玄武岩的表层土壤为例对磁学参数与反映风化程度的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 、Ba/Nb 比值、Sr/Nb 比值(Ba/Nb、Sr/Nb、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 等比值数据来源于中国科学院博士学位论文(杨恬,2008))的相关

分析发现,发育于玄武岩的表层土壤非磁滞剩磁与 Ba/Nb 和 Sr/Nb 呈负相关关系(相关系数分别为 -0.413 和 -0.396,显著性水平都在 95% 以上),而与 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 呈正相关关系(相关系数为 0.444,显著性水平超过 95%)。说明随着风化作用的增强,玄武岩风化成因土壤的非磁滞剩磁增强,表明玄武岩风化成因的表层土壤中磁性颗粒以单畴—假单畴等细颗粒为主。相反,低频磁化率和频率磁化率与风化程度(成土作用)之间不存在明显的相关性。这与黄土—古土壤序列的古土壤层磁化率普遍增强的被广泛认可的“成壤模式”(邓成龙等,2007)大不相同。

在上述相关分析结果的基础上,对发育于玄武岩的表层土壤非磁滞剩磁磁化率与 3 个反映风化强度的比值指标进行回归分析,回归方程如下:

$$\chi_{\text{ARM}} = 1.0676 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.0048, R^2 = 0.6574;$$

$$\chi_{\text{ARM}} = 0.029(\text{Ba}/\text{Nb})^3 - 0.2785(\text{Ba}/\text{Nb})^2 - 2.1802\text{Ba}/\text{Nb} + 23.056, R^2 = 0.3141;$$

$$\chi_{\text{ARM}} = 0.0782(\text{Sr}/\text{Nb})^3 - 1.1406(\text{Sr}/\text{Nb})^2 + 2.7457(\text{Sr}/\text{Nb}) + 11.198, R^2 = 0.4619.$$

如上述回归方程和图 8 所示,非磁滞剩磁磁化率与反映风化强度的 Ba/Nb、Sr/Nb 及 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 之间存在显著的相关关系,其与前两者之间的多项式回归效果较好,而与 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 之间的线性回归方程离差最小、相关系数最大,拟合结果较理想。与此同时,与非磁滞剩磁磁化率显著正相关的低频磁化率与上述反映风化程度的比值指标间却不存在显著的相关关系,更难以得到理想的回归拟合结果。这可能与风化成土过程的产物有关,遭受极度风化形成的表层土壤中的铁主要以 Fe(III) 的形式存在。虽然本研究涉及的风化—成壤成因的表层土壤中磁性矿物组合尚待深入研究,前人的一些研究表明玄武

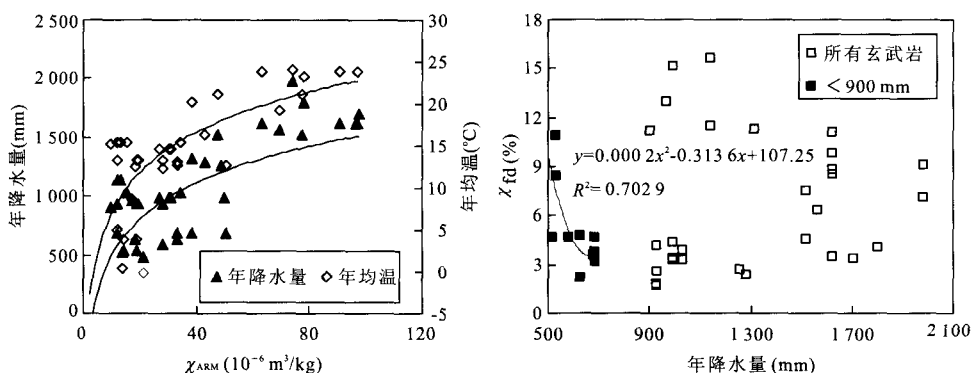


图 7 发育于玄武岩的表层土壤磁学性质与降水量、年均温的对应分布及回归拟合曲线

Fig.7 Corresponding distribution and fitting curve of magnetic properties of topsoil derived from basalt and precipitation, annual average temperature

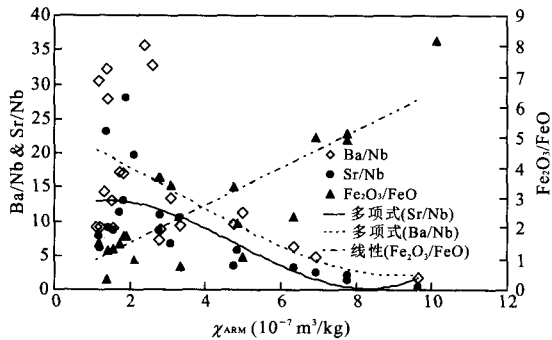


图 8 发育于玄武岩表层土壤非磁滞剩磁磁化率与风化强度指标之间的对应分布及回归拟合曲线

Fig.8 Corresponding distribution and fitting curve of χ_{ARM} of topsoil derived from basalt and weathering intensity dependent parameters

岩的风化产物有赤铁矿化的趋势 (Koch *et al.*, 1995; Soubrand-Colin *et al.*, 2009). 由于赤铁矿类反铁磁性矿物对低频磁化率的贡献相当有限, 但携带剩磁 (尤其是非磁滞剩磁) 的能力相当强, 因此, 风化—成壤成因的表层土壤非磁滞剩磁磁化率能较好地反映土壤风化程度 (相当于成壤强度), 即玄武岩风化程度越高可能其风化产物的非磁滞剩磁磁化率也相应地增强。

3 结论

(1) 发育于不同类型母岩的风化—成壤成因表层土壤磁学性质之间存在显著差异. 发育于不同类型母岩的表层土壤磁学参数与气候条件参数之间的关系大不一样, 在大空间尺度进行磁学与气候条件的关系研究时, 必须充分考虑地质背景与母岩类型的差异。

(2) 虽然沉积岩风化—成壤表层土壤频率磁化率与年降水量和年均气温之间的显著正相关关系与中国黄土高原地区黄土—古土壤序列的研究结果基本一致, 但发育于花岗岩和玄武岩的表层土壤磁化率性质与降水量和年均温等气候参数之间的关系则与中国黄土高原地区黄土—古土壤序列的研究结果大不相同. 发育于花岗岩的表层土壤非磁滞剩磁磁化率与年降水量和年均温间呈显著负相关关系; 而发育于玄武岩的表层土壤非磁滞剩磁磁化率与年降水量呈显著正相关关系. 因此, 被中国黄土—古土壤序列古土壤层磁化率普遍增强的被广泛认可的“成壤模式”机制不一定适用于大空间尺度的其他气候

区域。

(3) 一般来说, 在风化—成壤过程中, 磁性颗粒有变细的趋势, 但降水强度增大时, 一些超细颗粒较易被搬运离开原地, 因此, 单一磁学参数结果难以反映气候条件及环境变化。

(4) 风化—成壤成因表层土壤非磁滞剩磁磁化率能较好地反映风化成因土壤的风化程度. 但发育于不同类型母岩的风化—成壤表层土壤磁学性质变化的机制特别是对相应土壤剖面的磁性矿物迁移转化尚待深入研究。

致谢: 感谢饶志国、韩江伟、周厚云、徐瑞松、苗莉、付淑清等在中国东部大范围的表土样品采集。

References

- An, Z.S., Kukla, G.J., Porter, S.C., et al., 1991. Magnetic Susceptibility Evidence of Monsoon Variation on the Loess Plateau of Central China during the Last 1 300 000 Years. *Quaternary Research*, 36 (1): 29–36. doi: 10.1016/0033-5894(91)90015-W
- Balsam, W.L., Ellwood, B.B., Ji, J.F., et al., 2011. Magnetic Susceptibility as a Proxy for Rainfall: Worldwide Data from Tropical and Temperate Climate. *Quaternary Science Reviews*, 30(19–20): 2732–2744. doi: 10.1016/j.quascirev.2011.06.002
- Balsam, W.L., Ji, J.F., Chen, J., 2004. Climatic Interpretation of the Luochuan and Lingtai Loess Sections, China, Based on Changing Iron Oxide Mineralogy and Magnetic Susceptibility. *Earth and Planetary Science Letters*, 223: 335–348. doi: 10.1016/j.epsl.2004.04.023
- Begét, J.E., Stone, D.B., Hawkins, D.B., 1990. Paleoclimatic Forcing of Magnetic Susceptibility Variations in Alaskan Loess during the Late Quaternary. *Geology*, 18(1): 40–43. doi: 10.1130/0091-7613(1990)018<0040:PFOMSV>2.3.CO;2
- Blaha, U., Basavaiah, N., Deenadayalan, K., et al., 2011. Onset of Industrial Pollution Recorded in Mumbai Mudflat Sediments, Using Integrated Magnetic, Chemical, ^{210}Pb Dating, and Microscopic Methods. *Environmental Science & Technology*, 45 (2): 686–692. doi: 10.1021/es1025905
- Borges, J.F.M., Hneda, M.L., Brinatti, A.M., et al., 2011. Mössbauer Analysis of High-Energy Mechanical-Milled Sand Fraction of a Magnetic Soil Developing on Basalt. *Hyperfine Interact*, 203: 9–15. doi: 10.1007/s10751-011-0364-y
- Chlachula, J.M., Evans, M.E., Rutter, N.W., 1998. A Magnetic Investigation of a Late Quaternary Loess/Palaeosol

- Record in Siberia. *Geophysical Journal International*, 132(1): 128–132. doi: 10.1046/j.1365-246x.1998.00399.x
- Deng, C. L., Liu, Q. S., Pan, Y. X., et al., 2007. Environmental Magnetism of Chinese Loess-Paleosol Sequences. *Quaternary Sciences*, 27(2): 193–209 (in Chinese with English abstract).
- Deng, S. F., Yang, T. B., Qin, H. Y., et al., 2011. Magnetic Susceptibility and Its Influencing Factors from Loess-Paleosol in Tacheng, Xinjiang, China. *Journal of Desert Research*, 31(4): 848–854 (in Chinese with English abstract).
- Derbyshire, E., Meng, X. M., Kemp, R. A., 1998. Provenance, Transport and Characteristics of Modern Aeolian Dust in Western Gansu Province, China, and Interpretation of the Quaternary Loess Record. *Journal of Arid Environments*, 39(2): 497–516. doi: 10.1006/jare.1997.0369
- Evans, M. E., Heller, F., 2003. Environmental Magnetism: Principles and Application of Environmagnetics. Academic Press, San Diego.
- Florindo, F., Zhu, R., Guo, B., 1999. Low-Field Susceptibility and Palaeorainfall Estimates, New Dat along a N-S Transect of the Chinese Loess Plateau. *Phys. Chem. Earth (A)*, 24(9): 817–821. doi: 10.1016/S1464-1895(99)00120-9
- Han, J. M., Jiang, W. Y., Chu, J., 1997. Grain Size Distribution of Magnetic Minerals in Loess and Paleosol. *Quaternary Sciences*, 3: 281–287 (in Chinese with English abstract).
- Hao, Q. Z., Oldfield, F., Bloemendal, J., et al., 2008. The Magnetic Properties of Loess and Paleosol Samples from the Chinese Loess Plateau Spanning the Last 22 Million Years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 260(3–4): 389–404. doi: 10.1016/j.palaeo.2007.11.010
- Heller, F., Liu, T. S., 1984. Magnetism of Chinese Loess Deposits. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 77(1): 125–141. doi: 10.1111/j.1365-246X.1984.tb01928.x
- Heller, F., Shen, C. D., Beer, J., et al., 1993. Quantitative Estimates of Pedogenic Ferromagnetic Mineral Formation in Chinese Loess and Paleoclimatic Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 114(2–3): 385–390. doi: 10.1016/0012-821X(93)90038-B
- Huang, C. M., Gong, Z. T., 2002. Study on Genesis of Soils Derived from Basalt in Northern Hainan Island III. Element Geochemistry. *Acta Pedologica Sinica*, 39(5): 643–652 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X. G., Sun, J. M., 2005. Study of the Magnetic Fabrics in Chinese Loess-Paleosols since the Last Interglacial: Implication of the Paleowind Direction. *Quaternary Sciences*, 25(4): 516–522 (in Chinese with English abstract).
- Jia, J., Xia, D. S., Wang, B., et al., 2012. Magnetic Investigation of Late Quaternary Loess Deposition, Ili Area, China. *Quaternary International*, 250: 84–92. doi: 10.1016/j.quaint.2011.06.018
- Koch, C. B., Morup, S., Madsen, M. B., et al., 1995. Iron-Containing Weathering Products of Basalt in a Cold, Dry Climate. *Chemical Geology*, 122(1–4): 109–119. doi: 10.1016/0009-2541(95)00002-4
- Kukla, G., 1987. Loess Stratigraphy in Central China. *Quaternary Science Reviews*, 6(3–4): 191–207. doi: 10.1016/0277-3791(87)90004-7
- Kukla, G., Heller, F., Liu, X. M., 1988. Pleistocene Climates in China Dated by Magnetic Susceptibility. *Geology*, 16(9): 811–814. doi: 10.1130/0091-7613(1988)016<0811:PCICDB>2.3.CO;2
- Liu, D. Y., Li, W. R., Qiao, Y. S., et al., 2010. The Periodicity of the Southwest Monsoon Revealed by the Magnetic Susceptibility of the Garzê a Loess-Paleosol Sequence Using EMD Method. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4): 533–541 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. F., Guo, Z. T., Hao, Q. Z., et al., 2005. Magnetostratigraphy of the Miziwan Miocene Eolian Deposits in Qin'an County (Gansu Province). *Quaternary Sciences*, 25(4): 503–509 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Liu, Z., Lü, B., et al., 2013. The Magnetic Properties of Serbian Loess and Its Environmental Significance. *Chinese Science Bulletin*, 58(3): 353–363. doi: 10.1007/s11434-012-5383-9
- Liu, X. M., Rolph, T., Bloemendal, J., 1995. Quantitative Estimates of Paleoprecipitation at Xifeng, in the Loess Plateau of China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 113(2–4): 243–248. doi: 10.1016/0031-0182(95)00053-0
- Liu, X. M., Xia, D. S., Liu, T. S., et al., 2007. Discussion on Two Models of Paleoclimatic Records of Magnetic Susceptibility of Alaskan and Chinese Loess. *Quaternary Sciences*, 27(2): 210–220 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. G., Xue, Q. F., Zhu, L., et al., 2008. Mineral Magnetic Properties of a Weathering Sequence of Soils Derived from Basalt in Eastern China. *Catena*, 73(1): 23–33. doi: 10.1016/j.catena.2007.08.004

- Lü, H. Y., Han, J. M., Wu, N. Q., et al., 1994. Magnetic Susceptibility Analysis of Modern Soils in China and Its Palaeoclimatic Significance. *Science in China (Series B)*, 24(12): 1290—1297 (in Chinese).
- Lü, H. Y., Liu, D. S., 2001. The Effect of C3 and C4 Plants for the Magnetic Susceptibility Signal in Soils. *Science in China (Series D)*, 31(1): 43—53 (in Chinese).
- Lyons, R., Oldfield, F., Williams, E., 2012. The Possible Role of Magnetic Measurements in the Discrimination of Sahara/Sahel Dust Sources. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(6): 594—606. doi: 10.1002/esp.2268
- Maher, B. A., 1998. Magnetic Properties of Modern Soils and Quaternary Loessic Paleosols: Palaeoclimatic Implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137: 25—54. doi: 10.1016/s0031—0182(97)00103—x
- Maher, B. A., 2011. The Magnetic Properties of Quaternary Aeolian Dusts and Sediments, and Their Palaeoclimatic Significance. *Aeolian Research*, 3(2): 87—144. doi: 10.1016/j.aeolia.2011.01.005
- Maher, B. A., Thompson, R., 1995. Paleorainfall Reconstructions from Pedogenic Magnetic Susceptibility Variations in the Chinese Loess and Paleosols. *Quaternary Research*, 44(3): 383—391. doi: 10.1006/qres.1995.1083
- Porter, S. C., Hallet, B., Wu, X. H., et al., 2001. Dependence of Near-Surface Magnetic Susceptibility on Dust Accumulation Rate and Precipitation on the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research*, 55(3): 271—283. doi: 10.1006/qres.2001.2224
- Qiao, Y. S., Zhao, Z. Z., Wang, Y., et al., 2006. Magnetostratigraphy and Its Palaeoclimatic Significance of a Loess-Soil Sequence from Ganzi Area, West Sichuan Plateau. *Quaternary Sciences*, 26(2): 250—256 (in Chinese with English abstract).
- Rao, Z. G., Zhu, Z. Y., Wu, Y., et al., 2007. Magnetic Susceptibility Characteristics of Topsoil Developed from Different Parent Rocks and Its Significance, South China. *Quaternary Sciences*, 27(4): 651—652 (in Chinese).
- Shi, P. H., Yang, T. B., Xu, S. Y., et al., 2010. Magnetic Susceptibility Variations and Influence Factors at Jingyuan Loess Section, Northwestern China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(4): 193—200 (in Chinese with English abstract).
- Soubrand-Colin, M., Horen, H., Courtin-Nomade, A., 2009. Mineralogical and Magnetic Characterization of Iron Titanium Oxides in Soils Developed on Two Various Basaltic Rocks under Temperate Climate. *Geoderma*, 149(1—2): 27—32. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.11.018
- Sun, D. H., Bloemendal, J., Yi, Z. Y., et al., 2011. Palaeomagnetic and Palaeoenvironmental Study of Two Parallel Sections of Late Cenozoic Strata in the Central Taklimakan Desert: Implications for the Desertification of the Tarim Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 300(1—4): 1—10. doi: 10.1016/j.palaeo.2010.11.015
- Sun, D. H., Su, R. X., Chen, F. H., et al., 2001. Composition, Susceptibility and Input Flux of Present Aeolian Dust over Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 56(2): 171—180 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. B., An, Z. S., Clemens, S. C., et al., 2010. Seven Million Years of Wind and Precipitation Variability on the Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 297(3—4): 525—535. doi: 10.1016/j.epsl.2010.07.004
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986. Environmental Magnetism. Allen & Imwin, London.
- Verosub, K. L., Roberts, A. P., 1995. Environmental Magnetism: Past, Present, and Future. *Journal of Geophysical Research*, 100(B2): 2175—2192. doi: 10.1029/94JB02713
- Wang, L. X., Wang, W. G., Li, X. Q., et al., 2005. Correlation between the Carbon Isotope of Organic Matter and Magnetic Susceptibility in Topsoil and the Annual Precipitation in Arid and Semiarid Regions in North China. *Arid Land Geography*, 28(3): 311—315 (in Chinese with English abstract).
- Warrier, A. K., Sandeep, K., Harshavardhana, B. G., et al., 2011. A Rock Magnetic Record of Pleistocene Rainfall Variations at the Paleolithic Site of Attirampakkam, Southeastern India. *Journal of Archaeological Science*, 38(12): 3681—3693. doi: 10.1016/j.jas.2011.08.039
- Wei, H. T., Xia, D. S., Chen, F. H., et al., 2008. Relationship between the Magnetic Susceptibility of Surface Soil and Precipitation of Loess Plateau and Adjacent Area. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(3): 433—439 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. Y., Jiao, Y., Yan, M., et al., 2012. Geochemical Vertical Transportation along Soil Profiles in Baiyinnuoer Pb-Zn Deposit Areas, Mongolia, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(6): 1140—1148 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., 2008. Geochemical Characteristics of Topsoil and Weathering Crust from East China and Its Environmental Significance (Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Guangzhou (in Chinese with English ab-

stract).

- Yin, Q. Z., Guo, Z. T., 2006. Mid-Pleistocene Vermiculated Red Soils in Southern China as an Indication of Unusually Strengthened East Asian Monsoon. *Chinese Science Bulletin*, 51(2): 213–220. doi: 10.1007/s11434-005-0490-5
- Zhang, Y.F., Li, C.A., Chen, G.J., et al., 2005. Characteristics and Paleoclimatic Significance of Magnetic Susceptibility and Stable Organic Carbon Isotopes from a Bore in Zhoulaotown, Jiangnan Plain. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 114–120 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. P., Oldfield, F., Wintle, A. G., et al., 1990. Partly Pedogenic Origin of Magnetic Variations in Chinese Loess. *Nature*, 346 (6286): 737–739. doi: 10.1038/346737a0
- 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等, 2007. 中国黄土环境磁学. 第四纪研究, 27(2): 193–209.
- 邓少福, 杨太保, 秦宏毅, 等, 2011. 新疆塔城黄土—古土壤—古土壤磁化率特征及其影响因素. 中国沙漠, 31(4): 848–854.
- 韩家懋, 姜文英, 褚骏, 1997. 黄土和古土壤中磁性矿物的粒度分布. 第四纪研究, 3: 281–287.
- 黄成敏, 龚子同, 2002. 海南岛北部玄武岩上土壤发生研究 III. 元素地球化学特征. 土壤学报, 39(5): 643–652.
- 黄孝刚, 孙继敏, 2005. 末次间冰期以来黄土—古土壤序列的磁组构特征及其指示的古风向. 第四纪研究, 25(4): 516–522.
- 刘冬雁, 李巍然, 乔彦松, 等, 2010. 基于 EMD 分解的甘孜黄土磁化率记录的西南季风演化周期性. 地球科学——中国地质大学学报, 35(4): 533–541.
- 刘进峰, 郭正堂, 郝青振, 等, 2005. 甘肃秦安糜子湾剖面中新世风尘堆积的磁性地层学研究. 第四纪研究, 25(4): 503–509.
- 刘秀铭, 夏敦胜, 刘东生, 等, 2007. 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. 第四纪研究, 27(2): 210–220.
- 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等, 1994. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义. 中国科学 (B 辑), 24(12): 1290–1297.
- 吕厚远, 刘东生, 2001. C₃, C₄ 植物及燃烧对土壤磁化率的影响. 中国科学 (D 辑), 31(1): 43–53.
- 乔彦松, 赵志中, 王燕, 等, 2006. 川西甘孜黄土磁性地层学研究及其古气候意义. 第四纪研究, 26(2): 250–256.
- 饶志国, 朱照宇, 吴翼, 等, 2007. 华南地区发育于不同母岩之上的表土磁化率特征及其意义. 第四纪研究, 27(4): 651–652.
- 石培宏, 杨太保, 许善洋, 等, 2010. 靖远黄土—古土壤—古土壤上部磁化率变化及其影响因素. 海洋地质与第四纪地质, 30(4): 193–200.
- 孙东怀, 苏瑞侠, 陈发虎, 等, 2001. 黄土高原现代天然降尘的组成、通量和磁化率. 地理学报, 56(2): 171–180.
- 王丽霞, 汪卫国, 李心清, 等, 2005. 中国北方干旱半干旱区表土的有机质碳同位素磁化率与年降水量的关系. 干旱区地理, 28(3): 311–315.
- 魏海涛, 夏敦胜, 陈发虎, 等, 2008. 黄土高原及相邻地区表土磁化率与降水量的关系. 冰川冻土, 30(3): 433–439.
- 谢淑云, 焦杨, 燕敏, 等, 2012. 白音诺尔矿区土壤地球化学纵向迁移特征. 地球科学——中国地质大学学报, 37(6): 1140–1148.
- 杨恬, 2008. 中国东部表土与风化壳地球化学特征及其环境意义 (博士学位论文), 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 29–83.
- 张玉芬, 李长安, 陈国金, 等, 2005. 江汉平原湖区周老镇钻孔磁化率和有机碳稳定同位素特征及其古气候意义. 地球科学——中国地质大学学报, 30(1): 114–120.