

DOI: 10.11766/trxb201806040188

川西地区表土磁学性质及其环境意义*

陈梓炫^{1, 2, 3} 吕 镔^{1, 2, 3†} 郑兴芬^{1, 2, 3} 马兴悦³ 何梅菊³ 赵国永⁴

(1 湿润亚热带山地生态重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

(2 福建师范大学地理研究所, 福州 350007)

(3 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

(4 信阳师范学院地理科学学院, 河南信阳 464000)

摘 要 通过对川西地区表土样品进行系统的岩石磁学分析, 并且结合气候要素探讨表土磁学性质与环境要素之间的关系。结果表明: (1) 川西表土在成土过程中生成的细粒超顺磁 (SP) 和单畴 (SD) 的亚铁磁性矿物是磁化率增强的主导因素。该地区表土磁性增强机制与黄土高原类似。(2) 在空间上, 川西高原西部和南部地区的磁性矿物含量要高于东部和北部地区, 而成都平原西部地区成土作用最强, 磁颗粒细且含有较多高矫顽力磁性矿物。(3) 川西表土的磁学参数和气候要素的研究发现年平均降水量 (MAP) 在 600~1000 mm 之间磁化率、频率磁化率与 MAP 呈正相关关系, 而磁学参数组合 χ_{fd}/HIRM 、 ARM/HIRM 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 与 MAP 在这一降雨区间也呈正相关关系, 然而这些磁学参数与 MAP 的相关系数不如黄土高原, 可能与研究区复杂的地形、相对湿润的成土条件有关。

关键词 川西地区; 表土; 磁学性质; 环境因素

中图分类号 P318 **文献标识码** A

中国黄土高原黄土-古土壤磁化率作为古气候代用指标被广泛应用于重演古环境变化, 可以很好指示东亚夏季风的强度^[1-2], 与大尺度的气候旋回有着良好的对应关系^[3]。在以往黄土高原地区黄土-古土壤序列的研究中表明黄土磁化率呈低值, 古土壤磁化率呈高值, 磁化率与成土强度呈极好的正相关关系, 并使得古气候从原来的定性描述转化为定量半定量的研究^[4]; 黄土-古土壤磁化率与古气候的关系存在多种解释, 普遍认为成壤过程中形成的细小磁铁矿和磁赤铁矿颗粒是古土壤磁化率增强的主要原因, 因此利用黄土-古土壤序列磁化率可以定量重建古降水^[4-8]。

随着磁学研究在全球各地的开展和深入, 发现并非所有的黄土与磁化率呈良好的正相关, 阿拉斯加^[9]和西伯利亚^[10]的黄土研究表明与成壤呈负相关关系; 新西兰^[11]和阿根廷^[12]的黄土研究中磁化率与成壤强度呈现不相关。磁化率应用于重演古环境变化关键在于弄清磁化率与气候要素之间的关系。现代表土磁学性质的研究是建立气候和磁化率关系的有效手段之一, 许多学者对不同地区的现代表土的磁学性质以及与现代气候的定量关系开展大量的工作^[13-20]。前人研究表明磁性矿物的形成受控于多种因素的影响, 如降水、温度、湿度、母质类型和性质以及地形条件, 其中降水量是最受

* 国家自然科学基金项目 (41402149, 41602187 和 U1405231) 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 (Nos. 41402149, 41602187, U1405231) 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: 陈梓炫 (1992—), 男, 广东潮州人, 硕士研究生, 主要从事全球变化与第四纪研究。E-mail: Chenzixuanfs@163.com

收稿日期: 2018-06-04; 收到修改稿日期: 2018-10-31; 优先数字出版日期: 2018-12-20

关注的影响因素。降水量与磁化率存在密切的相关性,但并非单一的线性关系,而是在降水区间上存在两个临界值;第一个临界值为成壤作用下亚铁磁性矿物的开始生成,第二临界值为过多降雨下成土环境开始以缺氧还原的环境占主导从而导致强磁性矿物的溶解开始。吕厚远等^[6]最初指出长江以南地区在1100 mm降水量左右磁化率发生明显的下降。Liu等^[15]的研究表明磁化率与土壤有效湿度存在两个临界值;第一个临界值前磁化率受控于源区的黄土堆积,第二个临界值前土壤环境处于干旱氧化的环境,土壤温湿状态与磁化率呈正相关,第二个临界值后土壤处于缺氧还原的环境,磁化率与成壤作用呈反相关。Long等^[21]通过海南岛的表土研究发现磁化率在年平均降水量1440 mm左右随年平均降水量的增加而减小,指示了高降雨量使成土环境转变为较为还原的环境,成土过程开始以灰化和潜育化占主导。魏海涛等^[22]研究还表明在母质、地形复杂的区域频率磁化率较磁化率可以更好指示降水量的变化。由于不同地域磁化率影响因素的组合和强度各不相同导致磁学性质出现复杂的空间变化^[16-25],这些因素使不同区域成壤强度差异明显,成壤强的区域磁化率主要受控于降水量或土壤状态的变化,但一定程度会受到区域环境因子的干扰,成壤弱的区域磁化率主要受控于源区母质类型和性质,开展不同区域表土研究,有助于深入理解磁性气候环境因素的内在联系。

位于青藏高原的东南边缘的川西地区,气候主要受印度季风、高原季风的控制。该区是我国重要的黄土分布区,气候、地形和近缘物质与黄土高原区相比差异明显,磁化率在该区的表现和环境意义可能较黄土高原复杂得多。本文选取川西地区表层土壤作为研究对象,对表土进行系统的环境磁学研究,并与其他黄土地区进行对比分析,同时结合现代气象资料探讨磁化率等磁学参数与降水量的关系,分析该区表土磁学性质的空间变化、影响因素以及变化机制,为利用环境磁学参数进行川西地区黄土古土壤古气候研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

川西高原位于青藏高原的东部边缘,平均海

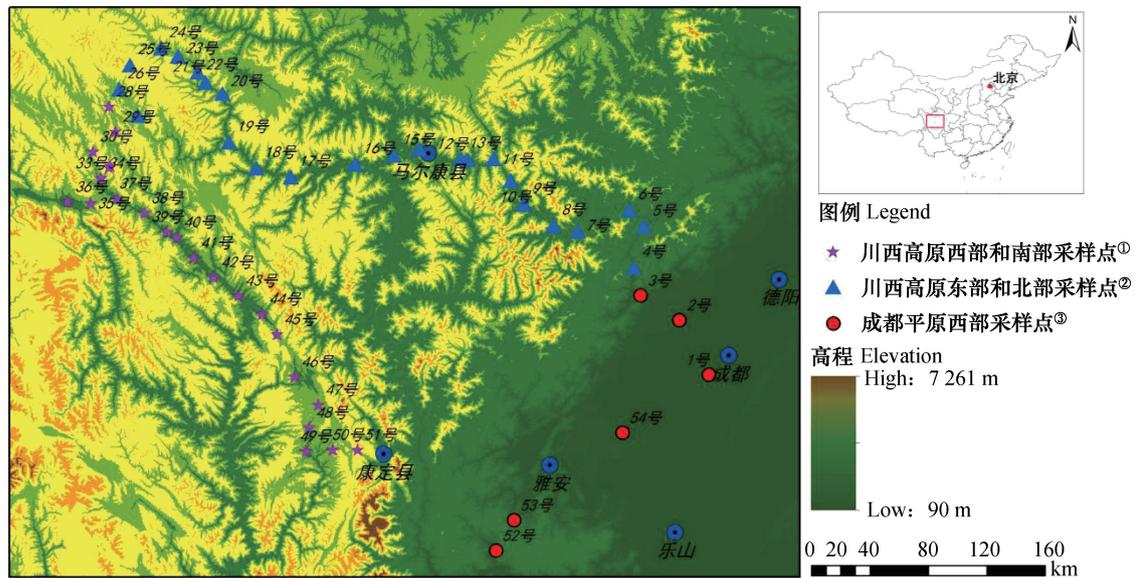
拔为3500 m左右,是青藏高原到四川盆地的过渡地带,地势西北高,东南低。该区域地形复杂,气候深受西风环流和高原季风的影响,水汽主要来自印度洋和太平洋,年均降雨量为600~750 mm,干湿季分明,夏半年温暖多雨,冬季寒冷干燥,年平均相对湿度分布范围为47%~85%,年平均气温分布范围为-0.9℃到17.8℃。川西高原东面的成都平原位于长江上游,主要受印度洋西南季风和东亚季风的影响,年平均气温为16.1℃,降雨充沛且在空间和季节上分配不均,降雨量向东南方向递减。成都平原地区的土壤类型大多为水耕人为土,淡色潮湿雏形土,铝质常湿淋溶土区;四川盆地周缘土壤类型为常湿淋溶土,钙质常湿雏形土,腐殖铝质常湿雏形土区;川西高原土壤类型为钙质干润雏形土、湿润淋溶土、草毡寒冻雏形土区。

1.2 样品采集

本文研究区纬度跨度为29°N~33°N,经度跨度为99°E~104°E。川西高原是典型的风成沉积区,但由于地形原因,厚层黄土沉积只分布在河谷阶地或断陷盆地等平坦地区,其成土母质总体上为风成沉积,含少量粗颗粒物质,同时成都平原也有大量的风成沉积。通过野外考察,在川西高原和成都平原西部地区采集了54个表土样品(如图1),表土采样深度约2~5 cm,尽量选择远离城镇村庄、收费站的区域,减少人为因素对样品的干扰,样品较大程度代表天然状况;同时选择地形相对平坦且土层较厚,排除明显发育于坡积、冲积、和残积沉积物上发育的土壤,尽量选择发育在风成沉积物(黄土)的土壤层进行采样,所属类型为常湿淋溶土。采样时使用GPS记录样品的经纬度和海拔高度。

1.3 实验方法与数据处理

样品在实验室自然晾干后,磨成粉末状,称取适量样品后用塑料膜包紧压实,放入体积为8cm³的立方体无磁性样品盒中进行低频磁化率(χ_{lf})、高频磁化率(χ_{hf}),非磁滞剩磁(ARM),等温剩磁(IRM)等参数的测量。低频(470Hz)磁化率(χ_{lf})和高频(4700Hz)磁化率(χ_{hf})用Bartington MS2型磁化率仪测试,并进行质量归一化处理以及计算出频率磁化率($\chi_{fd}=\chi_{lf}-\chi_{hf}$),百分比频率磁化率($\chi_{fd}\%$)= $\chi_{fd}/\chi_{lf}\times 100\%$,如无特别说明,下文中的磁化率(χ)指的是低频磁化率;



① Sampling sites in the western and southern parts of the West Sichuan Plateau ② Sampling sites in the eastern and northern parts of the West Sichuan Plateau ③ Sampling sites in the western part of the Chengdu Plain

图1 川西表土样点分布图

Fig. 1 Distribution of the topsoil sampling sites in West Sichuan

非磁滞剩磁 (ARM) 用 D-2000 交变退磁仪 (交流峰值为 100 mT, 直流场为 50 μ T) 与 Minispin 旋转磁力仪进行测量, 计算出非磁滞磁化率 (χ_{ARM}) = ARM/50 μ T; 等温剩磁通过 ASC IM-10-30 强磁仪进行施加磁场和 Minispin 旋转磁力仪进行测量, 测量等温剩磁 (IRM) 和饱和等温剩磁 (SIRM = IRM_{1T}) 并计算出剩磁矫顽力 (B_{cr}) 和硬剩磁 (HIRM = (SIRM + IRM_{300mT})/2) 和 S-ratio = IRM_{300mT}/SIRM \times 100%; 选择代表性的样品在可变场居里天平 (VFTB) 测量热磁曲线和磁滞回线, 并得到磁滞参数。以上样品的处理和测试均在福建师范大学地理科学学院湿润亚热带山地生态重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地完成。

本文的气象数据主要采用国家气象科学数据共享服务平台 (<http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qsjgx/>) 发布的数据, 运用 ArcGIS 软件进行协克克里格空间插值, 得出采样点的年平均降水量、年平均温度、年平均相对湿度。

2 结果

2.1 主要指示磁性矿物含量的磁学参数

磁化率 (χ) 可以用来粗略估量磁性矿物的

含量, 它的数值大小与样品中磁性矿物的种类、含量以及磁性颗粒大小有关^[26-28]。川西地区的表土样品的磁化率 (χ) 值在 6.25 ~ 136.7 $\times 10^{-8}$ m³·kg⁻¹ 之间, 均值为 42.32 $\times 10^{-8}$ m³·kg⁻¹, 宋扬等^[18]研究表明在黄土高原地区采集的表土样品磁化率的范围为 12.38 ~ 199.50 $\times 10^{-8}$ m³·kg⁻¹, 均值为 92.83 $\times 10^{-8}$ m³·kg⁻¹, 可见川西表土的磁性矿物含量要少于黄土高原地区。川西表土按照样品在空间上的分布和降雨量将其分为三个地区, 分别为川西高原的东部和北部地区 (4 ~ 27 号)、川西高原的西部和南部地区 (28 ~ 51 号)、成都平原西部地区 (1 ~ 3 号、52 ~ 54 号), 其对应的磁学参数如表 1, 从表 1 可知在川西高原东部和北部地区的磁化率均值为 35.75 $\times 10^{-8}$ m³·kg⁻¹, 西部和南部地区磁化率均值为 49.70 $\times 10^{-8}$ m³·kg⁻¹, 成都平原的西部地区磁化率均值为 44.21 $\times 10^{-8}$ m³·kg⁻¹, 表明了川西高原西部和南部的磁性矿物含量稍高。

饱和等温剩磁 (SIRM) 不受顺磁性和抗磁性物质的影响, 反映亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物的贡献^[27-28]。川西表土的 SIRM 的平均值为 233.2 $\times 10^{-5}$ A·m²·kg⁻¹, 范围为 26.42 ~ 616.2 $\times 10^{-5}$ A·m²·kg⁻¹。在空间变化上, 各个地区的 SIRM 变化趋势与磁化率的变化趋势大体一致。非磁滞剩磁磁化率 (χ_{ARM}) 可以用来反映样品中 SD 颗粒亚

表1 川西表土磁学参数和环境因素

Table 1 Magnetic parameters of the topsoil in West Sichuan and environmental factors

磁学和环境参数 Magnetic and environmental parameters	川西高原东部和北部地区 Eastern and northern parts of the West Sichuan Plateau			川西高原西部和南部地区 Western and southern parts of the West Sichuan Plateau			成都平原西部地区 Western part of the Chengdu Plain		
	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean
	$\chi/(\times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	95.92	6.25	35.75	136.67	6.33	49.70	89.67	11.33
$\chi_{fd}/(\times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	6.17	0.08	2.15	12.42	0.08	3.70	10.17	0.33	3.70
$\chi_{fd}\%$ /%	9.01	1.33	5.33	9.09	0.67	6.48	11.34	2.43	6.63
SIRM/ $(\times 10^{-5} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	600.04	26.42	212.09	633.95	33.91	255.58	488.90	75.45	237.13
$\chi_{ARM}/(\times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	345.14	9.65	84.68	355.14	8.79	132.54	148.97	42.23	104.08
S-ratio /%	96.62	65.51	88.23	96.94	73.92	95.16	90.39	49.68	80.60
HIRM/ $(\times 10^{-5} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	19.99	2.51	8.79	20.66	1.89	8.95	25.54	5.02	17.04
$\chi_{ARM}/\text{SIRM}/(\times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	0.73	0.05	0.37	0.77	0.07	0.49	0.94	0.22	0.54
χ_{ARM}/χ	4.12	0.37	2.09	3.09	0.56	2.43	4.55	1.20	3.00
Bcr/mT	101.81	26.70	37.17	33.44	23.79	30.77	94.86	27.19	45.24
MAT/ $^{\circ}\text{C}$	13.68	1.84	7.26	12.28	1.34	6.64	16.72	14.44	15.34
MAP/mm	770.57	610.52	690.66	796.90	650.40	690.32	1167.10	708.08	941.72
MARH/%	73.91	63.02	65.10	71.84	58.15	61.50	83.26	74.55	80.37

注: χ : 磁化率, χ_{fd} : 频率磁化率, $\chi_{fd}\%$: 百分比频率磁化率, SIRM: 饱和等温剩磁, χ_{ARM} : 非磁滞剩磁, S-ratio: 亚铁磁性矿物比率, HIRM: “硬”剩磁, Bcr: 剩磁矫顽力, MAT: 年平均温度, MAP: 年平均降水量, MARH: 年平均相对湿度。下同
Note: χ : Magnetic susceptibility, χ_{fd} : Frequency susceptibility, $\chi_{fd}\%$: Percentage frequency susceptibility, SIRM: Saturation isothermal remanence, χ_{ARM} : Non hysteresis remanence, HIRM: Hard isothermal remanence, Bcr: Remanence coercive force, MAT: Annual mean temperature, MAP: Annual mean precipitation, MARH: Annual mean relative humidity. The same below

铁磁性矿物的含量^[27-28]。川西地区的表土 χ_{ARM} 变化范围为 $8.80 \sim 471.20 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $108.10 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。李平原等^[20]研究表明黄土高原表土 χ_{ARM} 均值为 $222.20 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 范围为 $71.18 \sim 360.50 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 可见黄土高原的 χ_{ARM} 较川西地区表土高, 但川西地区的 χ_{ARM} 范围波动更宽, 指示川西表土单畴附近颗粒含量较黄土少, 但变化幅度相对较大。表1表明了西部和南部的 χ_{ARM} 要较成都平原西部高, 指示了西部和南部SD颗粒的磁性矿物含量对磁化率贡献较高。S-ratio主要反映了样品中亚铁磁性矿物与不完整反铁磁性矿物的相对比例, 它随着不完整反铁磁性矿物贡献的增加而下降, 而HIRM反映样品中矫顽力高的硬磁性矿物的绝对含量^[26-28]。川西表土的HIRM值最

大值为 $25.53 \times 10^{-5} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 最小值为 $1.88 \times 10^{-5} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $9.48 \times 10^{-5} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 而S-ratio最大值为96.94%, 最小值为49.69%, 均值为88.68%。从表1中HIRM和S-ratio来看, 成都平原西部的表土应含有相当多的高矫顽力磁性矿物, 而川西高原的西部和南部地区的S-ratio均值达到了95.15%, 可见西部和南部地区表土含有大量的低矫顽力亚铁磁性矿物。

2.2 指示磁性矿物粒度的磁性参数

百分比频率磁化率($\chi_{fd}\%$)可以反映样品中超顺磁颗粒(SP)的比例, 值越高表明整体磁颗粒越细, 根据Dearing^[28]在1999年提出的应用来估算SP颗粒的模式, $\chi_{fd}\%$ 接近0时, 样品中磁性颗粒以大颗粒为主, 不含SP颗粒。 $\chi_{fd}\%$ 小于5%表明

样品磁性颗粒的组合不以SP颗粒为主导，当 $\chi_{fd}\%$ 大于6%则表明含有较高比例的SP颗粒，当大于10%则表明样品中含有大量的SP颗粒。川西表土样品中测得的百分比频率磁化率($\chi_{fd}\%$)平均值为5.90%，最大值为11.34%，最小值为0.66%。宋扬等^[18]测得的黄土高原表土百分比频率磁化率的变化范围为2.00%~11.10%，均值为6.90%。川西地区表土与黄土高原表土相比，均值与黄土高原要小，但波动范围稍宽，指示了川西地区不同地区表土的成壤作用差异明显，且SP颗粒的含量少于黄土高原。从表1可知百分比频率磁化率($\chi_{fd}\%$)均值在成都平原西部的均值为最高，指示了成都平原西部地区SP颗粒的亚铁磁性矿物含量较高并且具有更强的成土作用。 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的比值可以指示磁性矿物颗粒大小的变化。 χ_{ARM}/χ 高值代表样品中磁性矿物以稳定单畴(SSD)为主，低值反映样品中磁性矿物以粗粒假单畴(PSD)和多畴(MD)为主^[29]。 $\chi_{ARM}/SIRM$ 较 χ_{ARM}/χ 对粒径的指示会更加明确，该比值只受永久磁化颗粒(即SSD、PSD和MD)的影响^[29]。从表1各地区的 χ_{ARM}/χ ， $\chi_{ARM}/SIRM$ 的均值来看，成都平原西部的磁性颗粒的粒径较其他地区更细，含有更多的SD附近颗粒的亚铁磁性矿物。

2.3 磁滞回线和热磁曲线

磁滞回线能够很好地指示样品中磁性矿物的类型和畴态特点^[27-28]。图2中样品的磁滞回线均

经过了顺磁校正，从图可知川西表土的大部分磁滞回线变化基本一致，总体形态呈现高而瘦，与黄土高原相似，表明大部分样品主要以低矫顽力的亚铁磁性矿物为主。15号和32号样品中的磁滞回线在300 mT左右形成闭合，表明样品中含有高比例的低矫顽力亚铁磁性矿物；11号和38号样品在500 mT没有闭合，指示了样品中含有较多的高矫顽力磁性矿物。磁性矿物在加热过程中表现出不同的磁性特征，因此利用热磁曲线可以分析样品中所含磁性矿物的种类^[27-29]。从整体上看，所有的样品中的热磁曲线加热到580 °C附近，磁化强度迅速下降，表明样品中以磁铁矿为主，并且样品的加热曲线在冷却曲线的下方，指示了在加热过程中产生大量的强磁性矿物。其中样品的热磁曲线的磁化强度在500 °C左右出现明显的峰值，这与黄土高原黄土的热磁曲线一致，指示了样品中含铁硅酸盐矿物或弱磁性矿物在加热过程中转化为磁铁矿^[30]。大部分样品的磁化强度在300~450 °C间有明显的减少，这可能是亚稳定、强磁性的磁赤铁矿受热转化成热稳定的、弱磁性的赤铁矿($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)造成的^[31]。此外，32号样品在300 °C左右出现了峰值，指示了加热过程中铁的氢氧化物(如纤铁矿)脱水生成了少量磁赤铁矿($\gamma\text{-FeOOH} \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)^[32]，表明了川西表土可能存在土壤季节性湿润的现象导致成土环境转变为相对还原环境的现象。

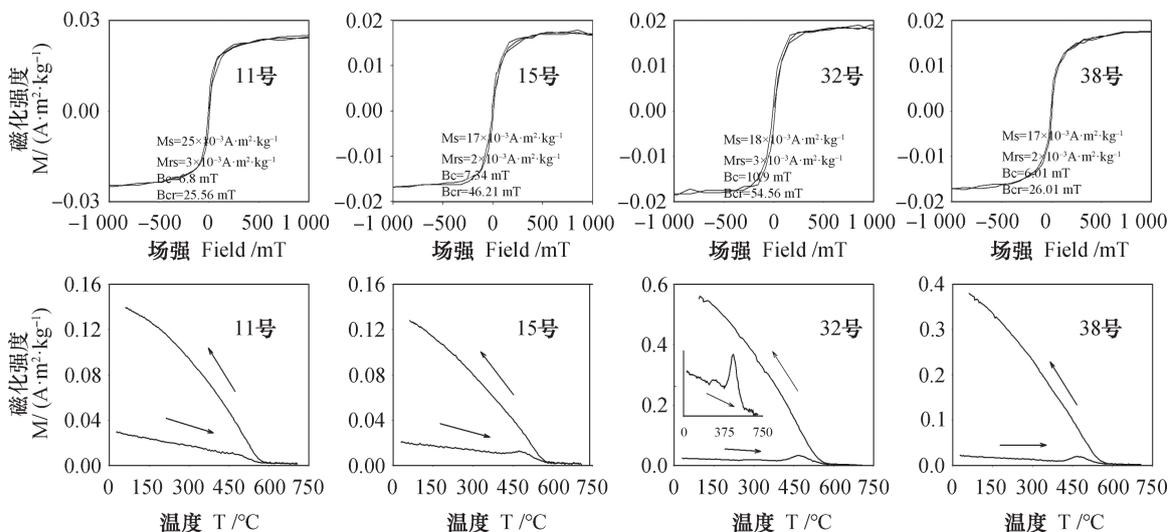


图2 表土典型样品磁滞回线和热磁曲线

Fig. 2 M-T curves and magnetic hysteresis loops of the topsoil samples

3 讨论

3.1 川西地区表土磁性特征

川西地区表土样品的磁化率均值要较黄土高原要弱得多, 指示了其磁性矿物含量较黄土高原要少, 但该地区表土含有较多的SP颗粒含量, 表明成土强度与黄土高原差异不是很大, 且该区域的年平均降雨量整体要较黄土高原高, 按以往黄土高原降水量与成壤呈正相关来分析, 该地区应该有更强的磁化率, 但事实上并不是这样的, 这可能要归因于该区域的环境因子改变了成壤的环境。此外热磁曲线可知样品中含有纤铁矿, 指示川西表土可能由于存在季节性的过度湿润从而使成土环境转变为还原缺氧的环境, 溶解了强磁性的铁氧化物, 导致成壤作用和磁化率的关系减弱。图3(a)中 χ 和SIRM具

有良好的相关性, 指示磁化率主要由亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物所控制。图3(b)中 χ_{fd} 是与SP颗粒的含量密切相关的磁学参数, Maher^[33]表明 χ_{fd} 与 χ 轴的截距 χ_0 可以表示原生母质对土壤磁化率的稳定贡献, 黄土高原 χ_0 大约在 $20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 从图3(b)可以看出 χ 和 χ_{fd} 有良好的线性关系, R^2 为0.932, 表明磁化率的贡献很大部分来自SP颗粒的亚铁磁性矿物, χ 和 χ_{fd} 的截距 χ_0 为 $10.54 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明母质中原生磁性矿物对磁化率的稳定贡献较小。图3(c)中表征SD含量的 χ_{ARM} 随 χ 增加而增加, 趋势与图3(b)相似, 指示了SD和SP颗粒的磁性矿物与磁化率密切相关, 这与黄土高原的黄土-古土壤的研究相似, 指示了川西表土的磁化率增强机制与黄土高原相似, 即磁化率主要由成土作用生成的纳米级SP、SD的亚铁磁性矿物所贡献。

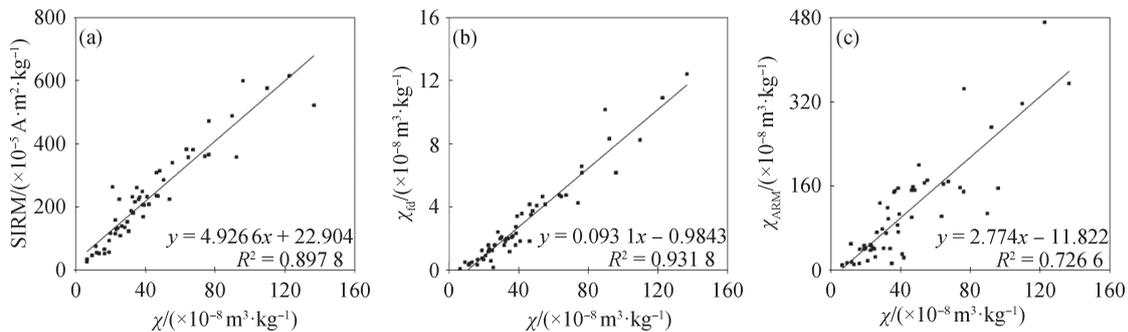


图3 表土样品典型磁学参数散点图

Fig. 3 Scattergraph of magnetic parameters of the topsoil samples

3.2 川西地区表土磁学参数空间变化

综合川西高原东部和北部, 西部和南部以及成都平原西部的磁学性质和水热条件(见表1)可以发现成都平原西部地区具有更高的降水、温度, 成土作用相对也要强, 但磁化率并未较其他地区强, 甚至小于西部和南部地区, 且含有大量的高矫顽力磁性矿物, 指示了成都平原西部的表土可能由于高温多雨的气候条件下发生强磁性矿物向弱磁性矿物转变的过程, 从而导致亚铁磁性矿物含量的降低而高矫顽力的磁性矿物含量的增高, 其中高矫顽力矿物主要为赤铁矿含量。东部和北部地区与西部和南部地区这两个地区的MAP和MAT均值, 西部和南部地区的相对湿度低, 但磁化率均值却有比较大的区别; 从西部和南部地区SP颗粒含量和S-ratio来看意味着西部和南部地区有更强的成土作用, 成土作用产生的细粒亚铁磁性矿物对磁化率的贡献很大;

值得注意的是, 西部和南部地区的HIRM较东部和北部地区高, 东部和北部地区的S-ratio却较西部和南部地区低得多且Bcr较高, 而HIRM主要由赤铁矿所贡献, 表明了东部和北部地区的不完全反铁磁性矿物的贡献可能来自于针铁矿。

3.3 川西地区表土磁学参数与环境因子之间的关系

土壤的磁学性质主要由母质类型和后期环境作用共同决定的, 母质提供铁的输出, 经风化作用下释放铁, 并形成一系列次生的含铁矿物, 这些矿物会在土壤发育过程迁移并发生转化、溶解和沉淀等过程, 造成磁性矿物在含量、种类和粒径的改变^[16-25,34-36]。土壤发育的干湿状态对土壤中磁学矿物的生成, 转变和溶解尤为重要, 而降水量是影响土壤状态的重要因素之一。图4(a~f)中可见MAP、MAT与 χ , χ_{fd} , $\chi_{fd}\%$ 的相关性较差, 较宋扬等^[18]在黄土高原测得的表土与MAP、MAT

的相关性差得多。川西表土磁化率与MAP总体呈增长的趋势，指示了磁性矿物的含量随MAP增长而增长，但在1 000 mm以上降水量磁化率趋于平缓且有下降的趋势，这与以往研究相似。MAP与 $\chi_{fd}\%$ 总体呈线性相关，指示了表土中SP颗粒的含量随MAP上升而上升，但 $\chi_{fd}\%$ 在650 mm~700 mm起伏变化非常大，可见在空间上成土作用差异明显。由于该地区的地形非常复杂，对降水和温度的分配影响很大，而且还存在季节性湿润的现象，这对土壤土体状态（有氧和缺氧状态）有很大的影响，这些情况使亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物的生成和转换变得更加复杂，从而导致磁化率与MAP的相关性变差。土壤中的磁性矿物主要由原生的磁性矿物（以粗粒PSD和MD为主）和后期成土过程中新生成的强磁性矿物（以纳米级Sp、SD和较细PSD为主）组成，土壤中次生磁性矿物的含量和粒径对气候是非常敏感^[36-38]。 χ_{fd}/HIRM 反映成土产生的细粒亚铁磁性矿物和反铁磁性矿

物的含量比值，从图4（g）可知MAP在1 000 mm以下 χ_{fd}/HIRM 比值随MAP同步上升，表明亚铁磁性矿物的含量占主导位置，在1 000 mm以上反铁磁性矿物含量逐渐占主导地位，而ARM/HIRM同样可以表示成土作用产生的亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物的含量比值，图4（g）与图4（h）趋势一致。 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 $\chi_{fd}\%$ 均可以表征成土作用下生成的细粒/超细粒在磁性矿物中的含量，可以重建夏季风强度和降水量^[36,37]。从图4（i）可见磁学参数 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 随MAP的上升而上升，与图7f相似，指示了在成土作用下磁性矿物的粒径整体上随MAP上升而变细。整体上表征粒径相关参数 $\chi_{fd}\%$ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 可以更好指示降水量的变化，事实上亚铁磁性矿物与反铁磁性矿物的含量比值由于该区相对湿润的土壤状态会导致成土生成部分亚铁磁性矿物被溶解产生弱磁性矿物，而表征成土作用产生的磁性颗粒粒径的磁学参数不容易受到土壤状态的影响。

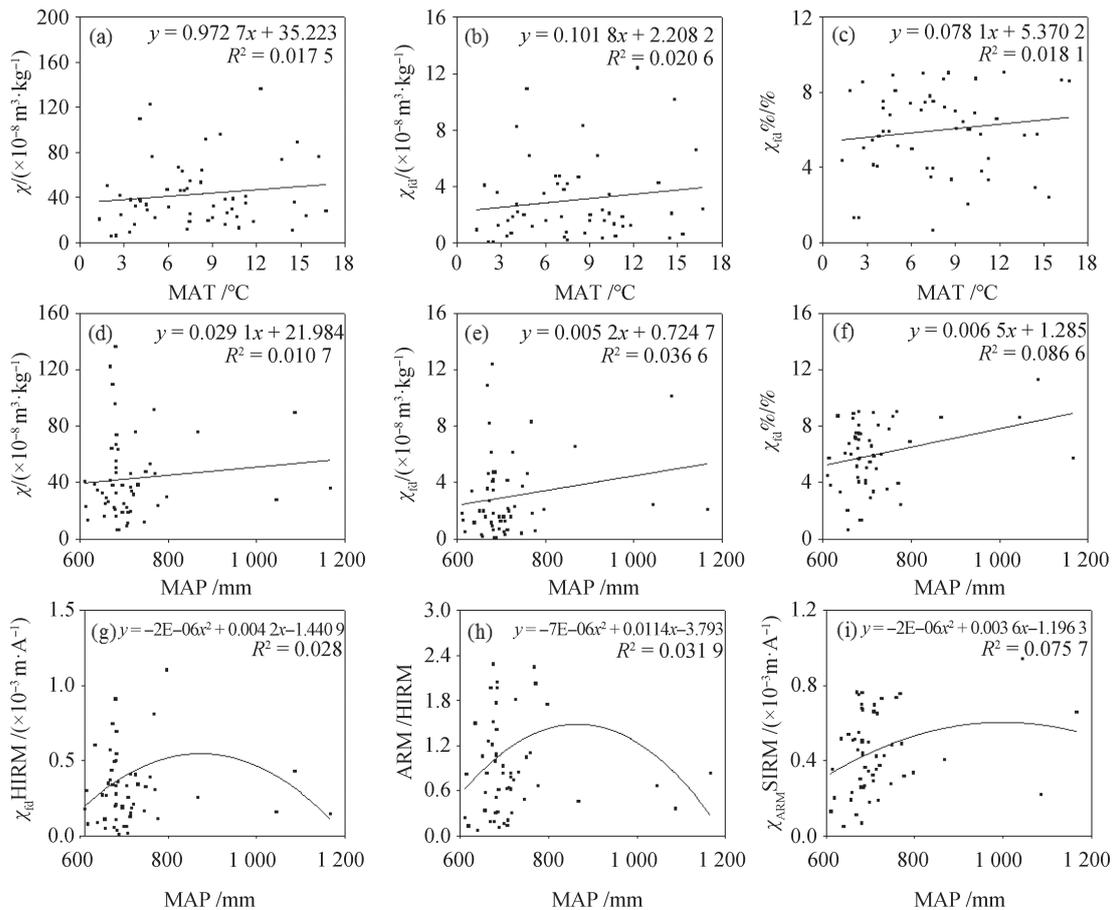


图4 磁学参数与环境参数的相关性

Fig. 4 Diagram of the relationships between magnetic parameters and environmental parameters

4 结 论

(1) 川西表土以亚铁磁性的磁铁矿为主, 并含有少量的磁赤铁矿和弱磁性的赤铁矿; 磁性矿物的粒度相对较细, 含有大量的超顺磁 (SP) 和单畴 (SD) 磁颗粒; 川西表土的磁化率增强机制与黄土高原相似, 主要受成土作用产生的细SP和SD的磁铁矿和磁赤铁矿所控制。(2) 川西高原的西部和南部的磁性矿物含量相对川西其他地区较高, 表土含有大量的低矫顽力亚铁磁性矿物, SD附近的磁性颗粒对磁化率具有很大的贡献; 川西高原的东部和北部磁性矿物含量、SP和SD颗粒含量均不及西部和南部, 这两个地区的差异可能受控于湿度; 成都平原西部地区成土作用最强, SP含量较高, 磁性颗粒的粒径较其他地区更细, 但表土含有较多高矫顽力磁性矿物, 显然发生了强磁性矿物向弱磁性矿物转换的过程。(3) 川西地区表土的磁学参数与MAP的趋势与以往研究相似, 但相关性不及黄土高原。磁化率与MAP并不呈现单一的线性关系, 但整体上随MAP呈上升趋势, 1000 mm以上降水量磁化率趋于平缓且有下降的趋势; MAP在1000 mm以下磁性矿物的含量, 粒径总体上随MAP逐渐变细。表征粒径相关的参数 $\chi_{rd}\%$, $\chi_{ARM}/SIRM$ 较表征成土产生的亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物的含量比值在该地区更适合指示降水量的变化。

致 谢 新建辉博士、周子博、温昌辉和侯顺民参与了野外采样, 在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] Kukla G, An Z S. Loess stratigraphy in Central China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1989, 72 (89): 203—225
- [2] 郝青振, 郭正堂. 1. 2Ma以来黄土-古土壤序列风化成壤强度的量化研究与东亚季风演化. *中国科学 (D 辑)*, 2001, 31 (6): 520—528
Hao Q Z, Guo Z T. Quantitative studies on the weathering intensity of the loess-solid sequences and evolvment East Asia monsoon during past 1. 2Ma (In Chinese). *Science in China (Series D)*, 2001, 31 (6): 520—528
- [3] Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W, et al. Towards an orbital time scale for Chinese Loess depositions. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13 (1): 39—70
- [4] Maher B A, Roy T. Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese Loess and Paleosols. *Quaternary Research*, 1995, 44 (3): 383—391
- [5] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. *Nature*, 1990, 346 (6286): 737—739
- [6] 吕厚远, 韩家懋, 郭正堂, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义. *中国科学 (B 辑)*, 1994, 24 (12): 1290—1297
Lü H Y, Han J M, Guo Z T, et al. Magnetic susceptibility of the modern soils in China and paleoclimatic significance (In Chinese). *Science in Chinese (Series B)*, 1994, 24 (12): 1290—1297
- [7] Evans M E, Rokosh C D, Rutter N W. Magneto climatology and paleo precipitation: Evidence from a north-south transect through the Chinese Loess Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29 (8): 1271—1274
- [8] Bloemendal J, Liu X M. Rock magnetism and geochemistry of two plio-pleistocene Chinese loess-palaeosol sequences-implications for quantitative palaeoprecipitation reconstruction. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2005, 226 (2): 149—166
- [9] Begét J E, Stone D B, Hawkins D B. Paleoclimatic forcing of magnetic susceptibility variations in Alaskan loess during the late Quaternary. *Geology*, 1990, 18 (1): 40—43
- [10] Matasova G, Petrovský E, Jordanova N, et al. Magnetic study of Late Pleistocene loess/palaeosol sections from Siberia: Palaeo environmental implications. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2010, 147 (2): 367—380
- [11] Pillans B, Wright I. 500000-Year paleo magnetic record from New Zealand loess. *Quaternary Research*, 1990, 33 (2): 178—187
- [12] Orgeira M J, Walther A M, Vásquez C A. Mineral magnetic record of paleoclimate variation in loess and paleosol from the Buenos Aires formation (Buenos Aires, Argentina). *Journal of South American Earth Sciences*, 1998, 11 (6): 561—570
- [13] Gao X B, Hao Q Z, Wang L, et al. The different climatic response of pedogenic hematite and ferromagnetic minerals: Evidence from particle-sized modern soils over the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 179: 69—86
- [14] Balsam W L, Ellwood B B, Ji J F, et al. Magnetic

- susceptibility as a proxy for rainfall: Worldwide data from tropical and temperate climate. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30 (19/20): 2732—2744
- [15] Liu X M, Liu Z, Lü B, et al. The magnetic properties of Serbian loess and environmental significance. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58 (3): 353—363
- [16] 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. *第四纪研究*, 2007, 27 (2): 210—220
- Liu X M, Xia D S, Liu D S, et al. Discussion on two model of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaska and Chinese loess (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2007, 27 (2): 210—220
- [17] 胥金波, 方小敏, 聂军胜, 等. 塔里木盆地风积物表土磁学特征及其与物源物质、气候条件的关系. *科学通报*, 2011, 56 (2): 153—160
- Zan J B, Fang X M, Nie J S, et al. Magnetic properties of surface soils across the southern Tarim Basin and their relationship with climate and source materials (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56 (2): 153—160
- [18] 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. *第四纪研究*, 2012, 32 (4): 679—690
- 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 (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2012, 32 (4): 679—690
- [19] 温昌辉, 刘秀铭, 王涛, 等. 澳大利亚中部 AliceSpring红色表土磁学特征分析. *第四纪研究*, 2015, 35 (4): 1041—1050
- Wen C H, Liu X M, Wang T, et al. Magnetic analysis of red topsoil in Alice Spring (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2015, 35 (4): 1041—1050
- [20] 李平原, 刘秀铭, 郭雪莲, 等. 西北戈壁沙漠-黄土高原区表土磁化率特征及其意义. *第四纪研究*, 2013, 33 (2): 360—367
- Ling P Y, Liu X M, Guo X L, et al. The magnetic susceptibility properties of top soil's in GoBi-Loess Plateau, northwest China (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2013, 33 (2): 360—367
- [21] Long X, Ji J, William B. Rainfall-dependent transformations of iron oxides in a tropical saprolite transect of Hainan Island, South China: Spectral and magnetic measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116 (F3): 239—255
- [22] 魏海涛, 夏敦胜, 陈发虎, 等. 新疆表土磁学性质及其环境意义. *干旱区地理*, 2009, 32 (5): 676—683
- Wei H T, Xia D S, Chen F H, et al. Magnetic characteristics of surface soil in arid region of Central Asia and their paleoenvironmental significance in Xinjiang, China (In Chinese). *Arid Land Geography*, 2009, 32 (5): 676—683
- [23] 张俊辉, 夏敦胜, 张英, 等. 阿勒泰地区表土磁学特性及变化机制研究. *第四纪研究*, 2013, 33 (5): 889—899
- Zhang J H, Xia D S, Zhang Y, et al. Study on the magnetic characteristics and variable mechanism of surface soils in Aletai area, Xinjiang China (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2013, 33 (5): 889—899
- [24] 郭雪莲, 刘秀铭, 吕镔, 等. 天山黄土区与黄土高原表土磁性特征对比及环境意义. *地球物理学报*, 2011, 54 (7): 1854—1862
- Guo X L, Liu X M, Lü B, et al. Comparison of topsoil magnetic properties between the loess region in Tianshan Mountains and Loess Plateau, China, and its environmental significance (In Chinese). *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54 (7): 1854—1862
- [25] 李珊, 胡雪峰, 杜艳, 等. 上海嘉定区表土磁性强度的空间分异及环境指示意义. *土壤学报*, 2012, 49 (1): 9—17
- Li S, Hu X F, Du Y, et al. Spatial variation of magnetic intensity of topsoils in JiaDing district, Shanghai and its environmental implication (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (1): 9—17
- [26] Evans M E, Heller F. *Environmental magnetism: Principles and applications of enviromagnetics*. New York: Academic Press, 2003: 1—299
- [27] Thompson R, Oldfield F. *Environmental magnetism*. London: Allen & Unwin, 1986: 1—227
- [28] Dearing J A. *Magnetic susceptibility*. London: Quaternary Research Association, 1999: 35—62
- [29] Dearing J A, Bird P M, Dann R J L, et al. Secondary ferrimagnetic minerals in Welsh soils: A comparison of mineral magnetic detection methods and implications for mineral formation. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1997, 130 (3): 727—736
- [30] Hunt C P, Banerjee S K, Han J M, et al. Rock-magneticproxiesof climate change in the loess-palaeosol sequences of the western Loess Plateau of China. *Geophysical Journal International*, 1995, 123 (1): 232—244
- [31] Dunlop D J, Ozdemir Ö. *Rock magnetism*:

- Fundamentals and frontiers. New York: Cambridge University Press, 1997
- [32] Deng C L, Zhu R Y, 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. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2004, 109 (1) : 241—262
- [33] Maher B A. Palaeoclimatic records of the loess/paleosol sequences of the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 154: 23—84
- [34] 韩光中, 黄来明, 李山泉, 等. 水耕人为土磁性矿物的生成转化机制研究回顾与展望. *土壤学报*, 2017, 54 (2) : 309—318
Han G Z, Huang L M, Li S Q, et al. Review and prospect of researches on production and transformation of magnetic minerals in paddy soils during pedogenesis (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (2) : 309—318
- [35] 黄来明, 邵明安, 陈留美, 等. 水耕人为土时间序列铁氧化物与磁化率演变特征. *土壤学报*, 2017, 54 (1) : 1—13
Huang L M, Shao M A, Chen L M, et al. Evolution characteristics of iron oxides and magnetic susceptibility in stagnic anthrosols along chronosequences (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1) : 1—13
- [36] Geiss C E, Egli R, Zanner C W. Direct estimates of pedogenic magnetite as a tool to reconstruct past climates from buried soils. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2008, 113: B11102
- [37] Nie J, Song Y, King J W, et al. Six million years of magnetic grain-size records reveal that temperature and precipitation were decoupled on the Chinese Loess Plateau during ~ 4. 5-2. 6 Ma. *Quaternary Research*, 2013, 79 (3) : 465—470
- [38] 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. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 368—378

Topsoil Magnetic Properties and Its Environmental Significance in West Sichuan

CHEN Zixuan^{1,2,3} LÜ Bin^{1,2,3†} ZHENG Xingfen^{1,2,3} MA Xingyue³ HE Meiju³ ZHAO Guoyong⁴
(1 Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology (Ministry of Science and Technology and Fujian Province Funded) , Fuzhou 350007, China)

(2 Institute of Geography , Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

(3 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

(4 School of Geographical Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract 【 Objective 】 To clarify the relationship between magnetic susceptibility and climatic factors is the key to applying magnetic susceptibility to inversion of paleoenvironmental evolution. Therefore the study on magnetic properties of the modern topsoil is one of the effective means to establish the relationship between climate and magnetic susceptibility. As far little has been reported in the literature on magnetic properties of surface rock in West Sichuan, and the research in this field will sure help provide a theoretical basis for inversion of paleoclimate and establishment of climate models for the region. 【 Method 】 This study was oriented to analyze variation of the topsoil magnetic properties of the region and its influencing factors and mechanism and to explore relationships between the topsoil magnetic properties and environmental factors by taking into account the environmental information, so as to provide scientific data for the study on paleosol and paleoclimate of the West Sichuan loess region, through analysis of topsoil samples for room temperature magnetism and high temperature magnetism. 【 Result 】 The magnetic hysteresis loop shows that the ferrimagnetic mineral in coercivity was the dominaral magnetic mineral in the soil sample, while M-T curve analysis shows that ferrimagnetic mineral was, in addition to a small amount of magnetite hematite and weakly magnetic hematite, and some lepidocrocite in quite a number

of the samples. 【 Conclusion 】 (1) The fine-grained superparamagnetic (SP) and single domain (SD) ferromagnetic minerals formed during *in-situ* pedogenic processes in the topsoil of West Sichuan is the dominant factor leading to higher magnetic susceptibility. The mechanism for magnetic enhancement of the topsoil in this area is similar to that in the Loess Plateau. (2) In terms of spatial distribution, the western and southern parts of the West Sichuan Plateau are higher than the eastern and northern parts in magnetic mineral content and in SP and SD particle content, too. Pedogenesis is the strongest in the western part of the Chengdu Plain, where the SP content is higher and the magnetic particles in the topsoil lower in average particle size than those all the other parts of the region. In addition, the topsoil in the area contains relatively more magnetic minerals high in coercivity, which demonstrates that the process of strongly magnetic minerals converting to weakly magnetic minerals did once occur. (3) The influence of climatic factors (especially precipitation) soil magnetic properties is the highest. Through the exploration of topsoil magnetic parameters and climatic factors in West Sichuan, it is found that in the region where the mean annual precipitation (MAP) varies in the range of 600 ~ 1000 mm, χ_{lf} and χ_{fd} is positively related with MAP in a whole and so are the magnetic parameters, i.e. χ_{fd}/HIRM , ARM/HIRM , $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ in rainfall interval, but the correlation coefficients of these magnetic parameters with MAP are lower than those in the Loess Plateau, which may be attributed to the complex topography and relatively humid soil forming conditions in the study area.

Key words West Sichuan; Topsoil; Magnetic properties; Environmental factor

(责任编辑：檀满枝)