doi:10.7515/JEE201402011

新疆伊犁地区近地表黄土的磁化率研究

曾蒙秀1,2, 宋友桂1

(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)

关键词: 黄土; 磁化率; 影响因素; 伊犁盆地

中图分类号: P318; P532 文献标志码: A 文章编号: 1674-9901(2014)02-0135-10

Magnetic susceptibility characteristics of near-surface loess in the Ili Basin, Xinjiang

ZENG Meng-xiu^{1, 2}, SONG You-gui¹

(1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth and Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 2. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Located in the middle latitude of Central Asian, the Ili Basin has specific geology, geomorphic and geography characters, the moisture and warm water flow from the Atlantic Ocean, Caspian Sea, Balkhash Lake get into the region, thus the climate is very special in the Xinjiang. Because of the influence of the climate condition, the altitude and the nearby materials, there have some environment significance differences of the loess between the Ili Basin and the CLP. Loess magnetic susceptibility (MS) in the Chinese Loess Plateau is usually regarded as an index of East Asian Summer Monsoon intensity; however, the paleoclimatic significance of loess MS value in Central Arid Asia is still unclear. In order to break through the barriers in the application of the MS in the paleoclimate research, we must understand the constraints of the MS. Here the authors report the results of MS, sedimentology and geochemistry of 38 near-surface loess samples from different geomorphological-climatic units of the Ili Basin, Xinjiang, Central Asia, and discuss the possible effect factors of loess MS value, and point out a few remarks about the application of MS in the paleoenvironment research in the Ili basin. The results show that the MS of the near-surface loess samples are negatively correlated to clay fractions ($<2~\mu m$) and Fe₂O₃ content, but positively correlated to coarse fractions ($>63~\mu m$). Superparamagnetic particles

收稿日期: 2014-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172166); 国家重点基础研究发展规划项目(2013CB955904); 中国科学院科技创

新"交叉与合作团队"项目

通讯作者: 宋友桂, E-mail: syg@ieecas.cn

produced by pedogensis and fine fractions have limited contribution to loess MS value and coarse fractions play important role on the enhancement of MS. There is a high degree of complexity of near-surface loess susceptibility vary with temperature and precipitation in Ili basin. The loess in the Ili basin is near its dust source, the wind moving distance is shorter, resulting to the higher proportion of coarse grain particles, which causes that the susceptibility is positively correlated to coarse fractions. There is a weak negative correlation between MS and altitude, a weak positive correlation between frequency-dependent susceptibility and altitude. The possible effector factors of loess MS such as the ratio of the distal aeolian dust and regional sources, climatic conditions and altitude should be considered in the paleoenvironmental interpretation.

Key words: loess; magnetic susceptibility, affecting factors; Ili Basin

地处欧亚大陆腹地的伊犁盆地是研究高纬和 低纬气候相互作用和欧亚西风环流的关键地带之 一。近些年来不同学者对伊犁盆地地面表层土壤 开展了孢粉学(冯晓华等, 2012; Zhao and Li, 2013)、土壤养分(李有民等, 2010; 陈洪等, 2012; 刘芳和张红旗, 2012)和黄土磁化率(史 正涛等, 2007; Song et al, 2008, 2012; 魏海涛等, 2009; Guo et al, 2011; 宋友桂等, 2010; 宋友桂 和史正涛, 2010; 张俊辉等, 2013; 李传想等, 2013)的研究,取得了一些重要进展,但相对于 黄土高原地区, 伊犁盆地黄土样品磁化率研究仍 相对薄弱,将磁化率指标与其他指标结合起来的 研究仍显不足。已有研究表明(Song et al, 2008; 魏海涛等, 2009; Guo et al, 2011), 环境因子的 区域差异对黄土磁化率产生不同程度的影响, 伊 犁盆地的区域地形条件、母质、沉积条件和气候 环境等因素对伊犁黄土的磁化率具有重要影响(宋 友桂和史正涛, 2010; Guo et al, 2011; 张俊辉等, 2013)。伊犁盆地三面环山,地形起伏大,气候 的垂直地带性分异和土壤类型变化明显。在这种 相对复杂的自然环境下,磁化率变化及其环境意 义、磁化率与其他指标的相互验证等基础性研究工 作尤为重要。另外, 从物源上来说, 中亚的戈壁 沙漠为主要物源, 而新疆表土样品与伊犁黄土的 岩石磁学和矿物学研究表明, 伊犁河谷的沉积物 也可能是黄土的物源之一(叶玮, 2000, 2001; Song et al, 2010; 曾蒙秀和宋友桂, 2013a)。因 此,这种物源的复杂性也加剧了伊犁黄土磁化率 变化的复杂性。相关研究也表明,在黄土高原地 区应用广泛的包括磁化率在内的各项指标在新疆 黄土中的应用受限(Song et al, 2010; 张文翔等, 2011; 李传想和宋友桂, 2011a; 曾蒙秀和宋友桂,

2013a, 2013b),因此有必要对磁化率指标进行深入研究以探明其影响因素。近地表黄土(晚更新世沉积的马兰黄土)是伊犁盆地广泛分布的黄土,对其磁化率古环境意义的研究,有利于提取伊犁黄土蕴含的古气候环境信息。本文以在伊犁地区采集的38个近地表黄土为研究载体,进行磁化率、粒度、元素地球化学测定,基于海拔高程和现代气象资料,通过与其他区域黄土进行对比分析,初步探讨了伊犁地区近地表黄土磁化率空间变化特征及其受控因子,对磁化率在伊犁黄土的古气候研究中的适用性进行了初步探讨。

1 研究区概况

伊犁盆地位于亚洲中纬度内陆,其在构造上位于新疆天山纬向构造带的西段,北部的北西一南东向的北天山和南部的北东—南西向的南天山山脉使伊犁地区形成了一个向西敞开的喇叭形地貌轮廓(图1)。其特殊的地形地貌有利于北大西洋、里海、巴尔喀什湖的温湿气流顺利进入本区,在迎风坡形成较丰富的降水,使本区成为多雨区。因此,不同于常见的干旱温带大陆性气候,伊犁地区属于较为湿润的大陆性北温带气候,年平均气温2.9~9.4℃,年平均降水量206~512 mm,河谷山区降水较多,山区达600 mm以上而平原地区年降水量为200~500 mm,降水从东南向西北逐渐减少,春季降水所占比例略高,是新疆最湿润的地区。

根据气候和地形条件差异将伊犁地区分为三个区域: (1)昭苏盆地,主要包括昭苏县和特克斯县,半干旱半湿润气候,年均温较低,为3.2~5.7℃,春秋相连,无夏季,降水量383~512 mm。有一定的成壤作用。(2)伊犁盆地西部的伊犁河洪冲积平原区,包括霍城县、伊宁县和察布察尔县,为西

风的迎风口,风大,年均温较高,为 $7.8\sim9.4$ °C,但其年降水量较低($200\sim350~\text{mm}$),一年四季分明,气候温和,属温和半干旱区。成壤作用很弱。

(3) 伊犁盆地东部,主要包括新源县、尼勒克县和

巩留县,属北温带大陆性半干旱气候区,降水量和年均温相对较高,其中年均温 5.7~9.4℃,年降水量 256~798.3 mm(气象数据整理于中国气象科学数据共享服务网: http://cdc.cma.gov.cn/)。

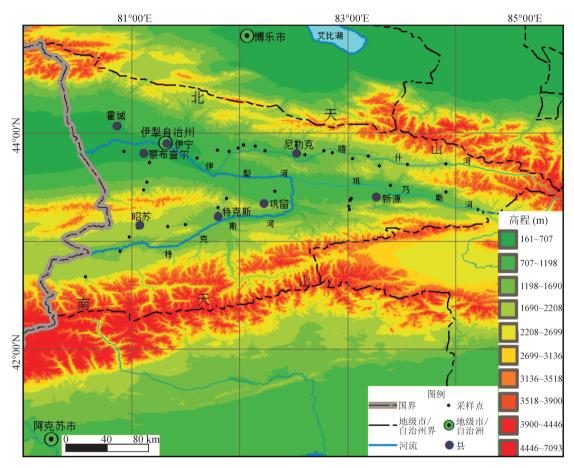


图 1 研究区地理位置和采样点分布

Fig.1 Location map of the study area and the distribution of the near-surface loess samples

2 样品采集与分析方法

课题组于 2006 年至 2013 年陆续对伊犁盆地进行了地质考察,共采集了包括现代表土样品、近地表黄土样品、戈壁样品和河流沉积物样品在内的 300 多个样品。本次分析涉及到研究区内 38个近地表黄土样品。所有采样点都尽量选取在平整、远离居民点和耕地、无明显侵蚀等现象的自然发育地块,采集距地面 50~100 cm 的黄土层(避开表土层),相当于黄土高原晚新更世的马兰黄土顶部。取样用塑料袋密封,现场记录采样点经纬度位置和海拔,并进行了土壤、地貌和植被等方面的描述。这 38 个近地表黄土基本是沿着海拔每上升 50~100 m 就采集一个样品的布点原则进行采集的,其中分布中昭苏盆地的样品有 8 个,分布中伊犁盆地西部的样品有 11 个,分布在伊犁盆

地东部的样品有 19 个,与各区域的面积大小大致 呈比例相当。

室内将样品在 50 ℃条件下烘干,然后分别进行了粒度、磁化率和地球化学元素的测定。粒度利用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000型激光粒度仪测试,测试范围为 $0.02\sim2000~\mu m$,重复测量误差 <2%。磁化率用 Bartington MS-2B型磁化率仪分别测高频 (χ_{hf}) 和低频磁化率 (χ_{lf}) ,并计算频率磁化率 $(\chi_{lf}=\chi_{lf}-\chi_{hf})$ 和频率磁化率的百分比 $(\chi_{ld}\%=((\chi_{lf}-\chi_{hf})/\chi_{lf})\times100)$ 。地球化学元素采用 XRF(X 射线荧光光谱)压片法测试,测试仪器为荷兰帕纳科公司生产的 PW4400型荧光光谱仪。所有测试工作均在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完成。

3 测定结果

3.1 常量元素

伊犁地区近地表黄土常量元素成分以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 为 主。 其 中 SiO_2 含 量 变 化 于 $45.78\%\sim55.45\%$,平均含量为 50.39%; Al_2O_3 含量变化于 $10.49\%\sim14.63\%$,平均含量为 11.63%; CaO 含量变化于 $8.40\%\sim14.05\%$,平均含量为 10.79%; 三者含量之和达 72.81%。而 Fe_2O_3 、 MgO、 K_2O 和 Na_2O 的含量变化和平均含量分别为 $3.98\%\sim5.35\%$ (4.70%)、 $2.52\%\sim3.69\%$ (3.05%)、

表 1 新疆伊犁盆地近地表黄土的常量元素变化特征 Table 1 The distribution of major element from the near-surface loess samples

氧化物	昭苏盆地 (%)	伊犁盆地西部 (%)	伊犁盆地东部 (%)	伊犁盆地 (%)
SiO ₂	49.37	51.00	50.47	50.39
Al_2O_3	11.98	11.50	11.57	11.63
Fe_2O_3	4.93	4.45	4.75	4.70
MgO	3.20	3.28	2.86	3.05
CaO	11.23	11.12	10.43	10.79
Na_2O	2.10	2.29	2.05	2.13
K_2O	2.35	2.30	2.26	2.29

将伊犁地区近地表黄土元素含量与上地壳(UCC)(Rudnick and Gao, 2003)的主要常量元素进行了比较。结果表明,无论就整个区域还是分区域而言,CaO 和 K_2O 的含量相对 UCC 的元素含量明显富集,而其余常量元素的含量相对 UCC 的元素含量则是亏损的。从伊犁盆地常量元素相对于上地壳元素丰度的富集因子 EF 值来看,绝大部分元素的富集因子介于 $0.52 \sim 1.58$,富集特征不明显,反映主要为地壳来源;而 CaO、Na₂O 和 K_2O 的富集因子相对较高,其在各样品中 EF 的

平均值均大于1, 富集特征更为明显。

从表 2 中可以看出,伊犁地区近地表黄土的粒级较粗,粒度组成主要集中于粉砂。各个粒级组分的含量在各个区域的分布差异也较大,昭苏盆地中近地表黄土的粉砂含量和粘粒含量最高,但平均粒径最细;伊犁盆地西部砂含量最高而粉砂含量和粘粒含量最低,但平均粒径最粗;伊犁地区东部粘粒含量、粉砂含量和砂含量中等,平均粒径也居中。

表 2 新疆伊犁盆地近地表黄土的粒度组成特征 Table 2 The distribution of grain-size from the near-surface loess samples

地点	粘粒(<2 μm) (%)	粉砂(2~63 μm)(%)	砂 (>63 µm) (%)	Md (µm)
昭苏盆地	8.54	86.41	5.05	22.18
伊犁盆地西部	6.82	80.12	13.06	31.44
伊犁地区东部	7.80	84.04	8.17	25.86
伊犁地区	7.67	83.40	8.92	26.70

3.3 磁化率测定结果

磁化率值 (χ_{lf}) 反映了样品的磁性矿物总含量,与样品中磁性矿物的含量、组成、粒径与聚合状

态等因素有关,存在复杂性和多解性(刘青松和邓成龙,2009)。伊犁近地表黄土的磁化率值变化于 $35.3 \times 10^{-8} \sim 255.4 \times 10^{-8}$ m $^{3} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值在昭苏

盆地和伊犁盆地西部相差不大,而伊犁盆地东部该值明显偏高(见表3)。

频率磁化率值(χ_{til} %)反映其超顺磁性颗粒含量变化(Thompson and Oldfield,1986),指示了风化、成壤作用的强度。伊犁地表黄土的 χ_{til} % 非常低,变化范围为 0~10.20%,其平均值同样在伊犁盆地东部地区明显偏高(见表 3)。

频率磁化率的绝对值 χ_{fd} 反映成壤磁性颗粒组分(Liu et al, 2005),比 χ_{fd} % 更能客观反映成壤作用的指标。经计算得出伊犁盆地西部、昭苏盆地和伊犁盆地东部地区该值的平均值分别 为 0.40×10^{-8} m³·kg⁻¹、 1.20×10^{-8} m³·kg⁻¹和 2.00×10^{-8} m³·kg⁻¹,伊犁东部地区的该值同样明显偏高。

表 3 新疆伊犁盆地近地表黄土的磁化率变化特征 Table 3 The distribution of magnetic susceptibility from the near-surface loess samples

地区	昭苏盆地	伊犁盆地西部	伊犁盆地东部	伊犁盆地
$\chi_{\rm lf} \ (\ 10^{-8} \ {\rm m}^3 \cdot {\rm kg}^{-1})$	73.4	73.4	90.8	82.1
$\chi_{\rm fd}~(10^{-8}~{\rm m}^3{\cdot}{\rm kg}^{-1})$	1.2	0.4	2.0	1.4
$\chi_{\rm fd}\%$ (%)	1.7	0.5	2.5	1.8

4 讨论

4.1 磁化率与各项指标的关系

为探讨各具体因子与 χ_{tf} 的关系,分析了 χ_{tf} 与 砂含量、 χ_{fd} %、 Fe_2O_3 及粘粒含量, χ_{fd} %与 Fe_2O_3 、 粘粒含量的相关系数(图2)。从图2可以看出, 上述因子中只有 Fe₂O₃ 和 χ_{ff}% 呈较明显的正相关。 由于超顺磁性颗粒的粒径较细, 主要形成于成壤 过程中, 而一般认为粘粒含量更多地与成壤环境 有关,然而 χω% 与粘粒含量的正相关关系没那么 明显。因此可以认为由成壤作用生成的超顺磁颗 粒较少,可能在该粒径之外分布的原始粉尘本身 就包含有较多的超顺磁性颗粒。而 χι 和 χι % 呈显 著的负相关,与 Guo et al (2011)对新疆伊犁盆地 表土的研究结果类似。粘粒含量与χι呈显著负相 关, χ_{lf}与 Fe₂O₃ 和粘粒含量呈负相关,可能说明粘 粒含量中的磁性矿物非常少, Fe,O,构成的赤铁矿、 磁赤铁矿等磁性矿物对磁化率的贡献非常有限。 与之相反的是, χ_{lf} 与 >63 μ m 呈正相关, 虽然这种 相关性不是非常明显,但指示了 >63 µm 这个粒径 组分对磁化率有更大的贡献。伊犁地区近地表黄 \pm 38 个样品中只有 7 个样品的 χ_{ti} % 值 >3%,根据 相关研究(Dearing, 1999)及不考虑系统误差, 同样可能表明伊犁盆地样品中超顺磁颗粒的含量 较低,同样表明其对磁化率的贡献较小。因此, 综合分析可以认为粗颗粒组分对磁化率值的影响 更大, 而细颗粒组分对磁化率的影响较小, 超顺 磁颗粒有部分来自于源区的携带, 其在成壤过程 中的生成量较低。

4.2 伊犁盆地近地表黄土磁化率的影响因素分析

黄土的磁化率值包含了由母岩带来的及后期 一系列演化过程携带的大量复杂信息,如在搬运 和沉积过程中的地形差异、环境变化信息等。针 对地理位置特殊、地形地貌复杂的研究区,本文 从区域气候、局地物源、海拔效应等方面讨论伊 犁地区近地表黄土的磁化率变化特征。

4.2.1 区域气候对伊犁地区近地表黄土磁化率的 影响

气候,特别是水热组合模式的差异对成壤强 度有重要影响, 尤其是湿度在磁性矿物生成转化 及磁化率变化过程中至关重要,从而最终影响到 黄土的磁学性质。伊犁盆地的蒸发量远远大于降 水量, 在干旱时期有利于盐类矿物的保存并对对 磁化率产生稀释作用,并且这种还原环境下不利 于磁性矿物的生成;而相对有限的降水总量对研 究区磁性矿物的生成与保存至关重要。伊犁盆地 东部近地表黄土的磁化率和频率磁化率都是最高 的, χ_{td} 和 χ_{td}% 在伊犁盆地西部地区的含量明显偏 低。这似乎说明的是伊犁盆地东部地区成壤磁性 颗粒组分比伊犁盆地西部地区的更多。Fe₃O₃在伊 犁盆地西部的含量比在伊犁盆地东部的含量更低 也说明了这一点。伊犁盆地东部气温和降水都更 高,水热组合模式最佳,因此其成壤磁性颗粒较多。 从黄土高原黄土成壤磁性颗粒与降水相关性更大 (Guo et al, 2011)来说,似乎能解释伊犁盆地磁 化率分布的东西差异特征。伊犁盆地西部降水明 显偏少但气温相对较高, 昭苏盆地地区气温虽低

但降水稍多,而最终表现为两个地区的磁化率相当但 χ_{fit} 和 χ_{fit} %值在昭苏盆地明显更高。同时,伊犁盆地东部地区近地表黄土的磁化率也高于昭苏盆地近地表样品的磁化率。若不将地形差异考虑在内,也反映的是磁化率与降水相关性更大(Guo et al, 2011)。

伊犁近地表黄土与中亚黄土的粒度分布(冉敏,2012)相似,但磁化率值比中亚黄土的更高。研究区与中亚黄土分布的纬度相当,只不过伊犁盆地的经度更偏东。由于中亚地区更为干旱,而伊犁盆地的年降水量较大,从而能生成更多的铁磁性物质使磁化率值增大。

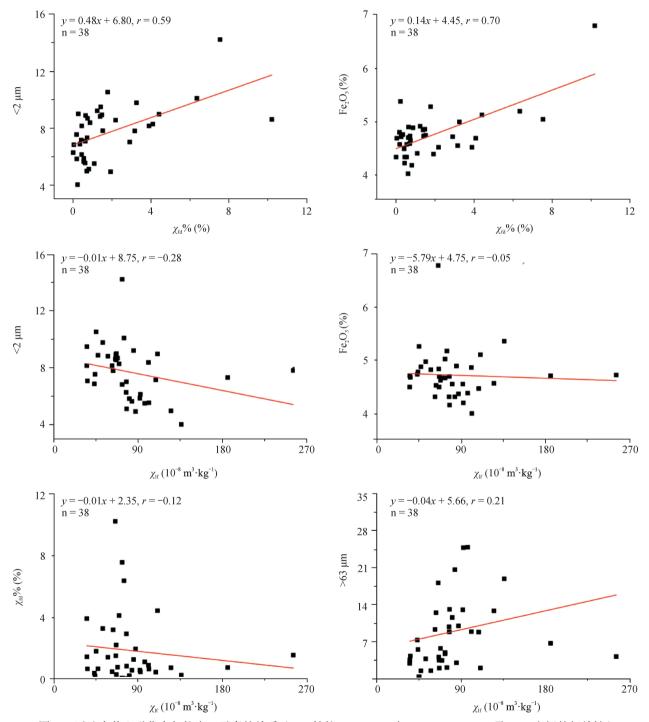


图 2 近地表黄土磁化率与粒度、元素的关系(χ_{lf}、粘粒 (<2 μm)、砂 (>63 μm)、Fe₂O₃ 及 χ_{fd}% 之间的相关性) Fig.2 Scatter plot of the parameters of near-surface loess samples from Ili Basin(Correlation between χ_{lf}, clay (<2 μm) content, sand (>63 μm) content, Fe₂O₃ content and χ_{fd}%)

4.2.2 海拔效应对伊犁地区近地表黄土磁化率的 影响

伊犁地区地形垂直高差大,微地形起伏明显,区域内年均温、年降水量及植被类型随着海拔变化而有很大差异,元素、磁化率也相应产生了海拔分异及区域分异。Na 作为较容易迁移的元素,在伊犁盆地东部样品中的含量低,而在降水最少的伊犁盆地西部地区含量高。这一方面除与降水量有关外,另一方面可能也受海拔高度的影响。因为海拔较高地区的 Na 会在淋溶过程中被带入海拔更低地区沉积,从而使得海拔较低地区的 Na 含量增加。同理,K 的含量可能也受到同样的影响。因此,海拔较低地区的难迁移物质的积累将影响到沉积物的磁性特征。研究区近地表黄土的磁化率与海拔高度的关系非常复杂(图 3),数值取对数坐标后显示其与海

拔呈微弱负相关,并且在某些高度其存在一个梯度。特别明显的是,在600~1350m和1350~2100m时,磁化率呈现的是前期的磁化率值较高然后降低;而频率磁化率与海拔高度整体上似乎呈正相关关系,即海拔越高频率磁化率值越大。砂粒级含量在各个区域的差别很大(表2),在昭苏盆地含量最少在伊犁盆地西部含量最高,似乎说明的是海拔降低砂含量升高。而昭苏盆地样品的频率磁化率的平均值比伊犁盆地西部地区样品磁化率平均值偏高3倍左右,砂含量也减少近3倍,而砂含量与磁化率呈正相关(图2),侧面反映了海拔对磁化率的影响。相对于平原地区(冉敏,2012),位于较高海拔伊犁盆地近地表黄土样品磁化率明显偏高,这种变化特征可能与降雨随着海拔的增高而增加,从而成壤作用增强有关。

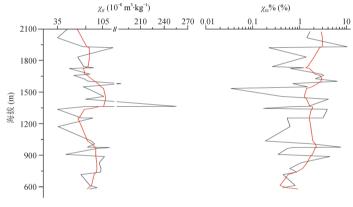


图 3 伊犁盆地磁化率、频率磁化率随海拔的变化

Fig.3 The distribution of magnetic susceptibility of near-surface loess samples in the Ili Basin under different altitude

4.3 近源物质的加入对伊犁近地表黄土磁化率的 影响

与黄土高原黄土相比,二者物源组成不同, 其理化性质也不同,因此伊犁黄土的磁化率增强 机制有自己的特点。伊犁盆地近地表黄土平均粒 径则由西向东变小,有由粗变细的趋势(Song et al, 2014),与伊犁地区的风向相符。粒径 10~50 μm 的物质极易在空气中漂浮搬运,是风力 降尘的一个重要标志(Bagnold, 2012)。而如前 所述,2~63 μm 含量在伊犁近地表黄土中占绝对 优势,伊犁盆地西部样品的 2~63 μm 含量比东部 地区样品的更低,由西向东似乎有由细变粗的趋 势,这似乎与伊犁地区的常年盛行的风向不符。 2~63 μm 粒级组分的含量和 >63 μm 粒级组分的 含量在伊犁盆地东西部地区的分布是反相位的, 并且这两个分区域的磁化率变化与 >63 µm 含量的 正相关关系不明显,由此得出 2~63 µm 这个粒级 组分可能更多地加载局地因素,2~63 µm 这个粒 级组分对磁化率的贡献值得考虑。

Pye (1987) 认为在中等风暴条件下, >50 μm 这个粒级组分被搬运的模式主要有蠕动、跃移。 黄土高原马兰黄土 >50 μm 含量接近 10% (刘东生, 1985), 昭苏盆地近地表黄土中 >50 μm 和50~63 μm 含量分别为 8.92% 和 6.01%, 伊犁盆地东部分别为 13.91% 和 8.09%, 伊犁盆地西部的分别为 20.18% 和 11.13%, 整个伊犁地区的分别为 14.68% 和 8.53%。说明粗粒组分的变化不稳定,受近源物质的影响严重。另一方面,一般由于外

力搬运使高山碎屑物质易在低地堆积,物质组成一般由高海拔到低海拔而逐渐变细。海拔较低的伊犁盆地西部和东部地区由于河流较多,黄土易受近源物质加入的影响,特别明显的是海拔高度最低的伊犁盆地西部地区其由于近地粗颗粒的加入使 >50 µm 和 50~63 µm 含量明显偏高;而昭苏盆地内虽有特克斯河主脉但其黄土分布的海拔相对更高,使近源物质对其影响可能更小,从而 >50 µm 和 50~63 µm 含量明显偏低。事实上磁化率即同时包含碎屑成因和成壤成因磁性颗粒的贡献(Hao et al,2008)。基于以上研究,本文认为 2~63 µm 粒级组分可能受近源物质的影响,对该粒级组分的矿物组成、携带的磁性矿物种类和含量将在接下来的工作中展开。

4.4 磁化率在伊犁黄土古环境解译应用需要注意 的问题

伊犁谷地是新疆黄土地貌分布最为集中的地 区, 伊犁地区各市县均有分布(岳健等, 2013), 沉积相对稳定(宋友桂和史正涛, 2010; 李传想 和宋友桂,2011b),是中亚古环境研究的重要载 体。从本文的研究结果来看,在伊犁黄土的古环 境研究中应该更多地考虑到海拔、地貌、气候、 与物源区的距离、近地物源的分离等多方面因素。 此前的研究也表明, 磁化率、元素等相关指标并 不能很好地反映伊犁黄土地层的变化,特别是磁 化率 (Song et al, 2010; 张文翔等, 2011; 李传 想和宋友桂, 2011a; 曾蒙秀和宋友桂, 2013a, 2013b)。因此,只有对黄土层中磁化率的变化特 征与受控机制解析清楚,才能促进其在古环境研 究中的运用。第一点就是海拔效应的影响。伊犁 黄土分布的上限是 2100 m, 而我们的研究中发现 在海拔 1000 m 时开始发生变化, 在 1300 m 左右 磁化率发生了明显的变化,在2100m时近地表 黄土的磁化率值明显较低。因此解释黄土剖面和 钻孔磁化率的古环境意义时要考虑到海拔因素。 第二点则是近源物质的影响。伊犁黄土主要来自 中亚的戈壁沙漠, 伊犁河谷的沉积物也可能是黄 土的物源之一(叶玮, 2000; 宋友桂和史正涛, 2010; 曾蒙秀和宋友桂, 2013a), 但原始风尘沉 积与后期近地物质加入二者之间的比例并不清楚。 在研究中要注意区分风尘组分和近源物质组分的 比例,才能清晰辨别包括磁化率在内的各代用指 标对气候变化的敏感性。第三点则是要考虑到研究时间段内的气候模式,如当时的气候模式到底是不是西风区类型(Long et al, 2014),这种气候模式变化如何影响到磁化率的变化。

5 结论

伊犁地区近地表黄土样品的磁化率与粘粒含量、Fe₂O₃含量成负相关关系,与砂含量呈正相关关系;频率磁化率与粘粒含量、Fe₂O₃含量呈正相关;磁化率与频率磁化率呈负相关关系。在复杂的研究区里,伊犁地区近地表黄土的磁化率显示出在不同分区内、不同海拔高度内其变化特征不尽相同,并且其变化非常复杂。成壤作用形成的超顺磁颗粒对磁化率的贡献有限,粗颗粒组分对磁化率贡献较大。近地表黄土磁化率与气候、海拔高度、局地物源等多种因子有关。在黄土古气候解译中需要综合考虑这些因子对磁化率变化的可能影响。

致谢:新疆地质调查和野外采样中得到了课题组 李传想、李新新、董俊超、陈涛、李越等人的帮助, 在此表示衷心的感谢!

参考文献

- 陈 洪,邓 睿,特拉津,等. 2012. 伊犁河流域土壤中 As, Hg 环境地球化学基线及环境现状研究 [J]. *中国农学通报*, 28(26): 217–223. [Cheng H, Deng R, Te L J, et al. 2012. Environmetnal geochemical baseline and the present situation of As, Hg in soil from Ili River Basin [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(26): 217–223.]
- 冯晓华, 阎 顺, 倪 健. 2012. 基于孢粉的新疆全新世植被重建 [J]. *第四纪研究*, 32(2): 304–317. [Feng X H, Yan S, Ni J. 2012. Pollen-based reconstruction of vegetation in Xinjiang during the Holocene [J]. *Quaternary Science*, 32(2): 304–317.]
- 李传想, 宋友桂. 2011a. 新疆伊犁黄土磁化率增强机制差异性分析 [J]. *地球学报*, 32(1): 80-86. [Li C X, Song Y G. 2011a. Differences in magnetic susceptibility enhancement in Ili loess, XInjiang [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(1): 80-86.]
- 李传想, 宋友桂. 2011b. 粒度年龄模型在伊犁昭苏黄土地层中的初步应用 [J]. *地球环境学报*, 2(5): 613-618. [Li C X, Song Y G. 2011b. Application of grain-size age models on Zhaosu loess stratigraphy in Ili region [J]. *Journal of*

- Earth Environment, 2(5):613-618.]
- 李传想, 宋友桂, 强小科. 2013. 伊犁风成黄土不同组分对磁化率的影响 [J]. *地球物理学进展*, 28(2), 747-753. [Li C X, Song Y G, Qiang X K. 2013. Effects of different components on magnetic susceptibility of the Ili eolian loess [J]. *Progress in Geophysics*, 28(2): 747-753.]
- 李有民,周华荣,侯海生. 2010. 新疆伊犁皮里其河流域 表层土壤养分特征 [J]. *干旱区研究*, 27(2): 126-130. [Li Y M, Zhou H R, Hou H S. 2010. Characteristics of topsoil nutrients in the Pirichy River Basin [J]. *Arid Zone Research*, 27(2): 126-130.]
- 刘东生 . 1985. 黃土与环境 [M]. 北京 : 科学出版社 . 44-300. [Liu T S. 1985. Loess and environment [M]. Beijing: Science Press, 44-300.]
- 刘 芳, 张红旗. 2012. 伊犁新垦区土地利用和地形对表层 土壤养分变异性的影响 [J]. *资源科学*, 34(4): 758-768. [Liu F, Zhang H Q. 2012. Effects of land use and topographic factors in the variability of soil nutrients in newly reclaimed area in Yili [J]. *Resources Science*, 34(4): 758-768.]
- 刘青松,邓成龙. 2009. 磁化率及其环境意义 [J]. 地球物理学报, 4(52): 1041–1048. [Liu Q S, Deng C L. 2009. Magnetic susceptibility and its environmental significance [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 4(52): 1041–1048.]
- 再 敏. 2012. 中亚干旱区黄土记录的过去 5 万年以来古气候变化历史 [D]. 兰州: 兰州大学. [Ran M. 2012. Paleoclimatic changes in Central Asian arid area during past 50000 years based on loess records [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 宋友桂, NIE Jun Sheng, 史正涛, 等. 2010. 天山黄土磁化率增强机制初步研究 [J]. 地球环境学报, 1(1): 66-72. [Song Y G, Nie J S, Shi Z T, et al. 2010. A preliminary study of magnetic enhancement mechanisms of the Tianshan Loess [J]. Journal of Earth Environment, 1(1): 66-72.]
- 宋友桂, 史正涛. 2010. 伊犁盆地黄土分布与组成特征 [J]. 地理科学, 30(2): 267–272. [Song Y G, Shi Z T. 2010. Distribution and compositions of loess sediments in the Yili Basin, Central Asia [J]. Scientia Geographica Sinaca, 30(2): 267–272.]
- 魏海涛,夏敦胜,陈发虎,等.2009.新疆表土磁学性质及 其环境意义[J]. 于旱区地理,32(5):676-683. [Wei H T,

- Xia D S, Cheng F H, et al. 2009. Magnetic characteristics of surface soil and its significance in Xinjiang, China [J]. *Arid Land Geography*, 32(5): 676–683.]
- 夏敦胜,魏海涛,马剑英,等. 2006. 中亚地区现代表土磁学特征及其古环境意义 [J]. *第四纪研究*, 26(6): 937–946. [Xia D S, Chen F H, Ma J Y, et al. 2010. Magnetic characteristics of surface soil in arid region of central Asian and their paleoenvironmental significance [J]. *Quaternary Sciences*, 26(6): 937–946.]
- 时 玮. 2000. 新疆伊犁地区黄土矿物特征与沉积环境 [J]. 于 早 区 研 究, 17(4): 1–10. [Ye W. 2000. The mineral characteristics of loess and depositing environment in Yili area, Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 17(4): 1–10.]
- 时 玮. 2001. 新疆西风区黄土与古土壤磁化率变化特点 [J]. *中国沙漠*, 21(4): 380–386. [Ye W. 2010. Study on magnetic susceptibility of loess and paleosol sequences in Westerly region of Xinjiang [J]. *Journal of Desert Research*, 21(4): 380–386.]
- 岳 健,穆桂金,杨发相,等. 2013. 新疆黄土地貌的遥感 判读问题 [J]. *干旱区地理*, 36(3): 491–501. [Yue J, Mu G J, Yang F X, et al. 2013. Remote sensing interpretation of loess landform in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 36(3): 491–501.]
- 曾蒙秀, 宋友桂. 2013a. 新疆伊犁昭苏黄土剖面中的矿物组成及其风化意义 [J]. 地质论评, 59(3): 575-586. [Zeng M X, Song Y G. 2013a. Mineral composition and their weathering significance of Zhaosu loess-paleosol sequence in the Ili Basin, Xinjiang [J]. *Geological Review*, 59(3): 575-586.]
- 曾蒙秀, 宋友桂. 2013b. 西风区昭苏黄土剖面中碳酸盐矿物组成及其古环境意义辨识 [J]. *第四纪研究*, 33(3): 424–436. [Zeng M X, Song Y G. 2013b. Carbonate minerals of Zhaosu loess section in westerly area and their paleoenvironmental significance [J]. *Quaternary Sciences*, 33(3): 424–436.]
- 张俊辉, 夏敦胜, 张 英, 等. 2013. 阿勒泰地区表土磁学特性及变化机制研究 [J]. *第四纪研究*, 33(5): 889-899. [Zhang J H, Xia D S, Zhang Y, et al. 2013. Study on the magnetic characteristics and variable mechanism of surface soils in Altay area, Xinjiang, China [J]. *Quaternary Sciences*, 33(5): 889-899.]
- 张文翔, 史正涛, 张虎才, 等. 2011. 中国西风区伊犁盆地塔勒德黄土-古土壤元素地球化学特征及环境意义 [J].

- 第四纪研究, 31(5): 812-821. [Zhang W X, Shi Z T, Zhang H C, et al. 2011. Geochemical characteristics and environmental significance of the Talede loess-paleosol sequence in westerly area of China [J]. *Quaternary Sciences*, 31(5): 812-821.]
- Bagnold R A. 2012. The physics of blown sand and desert dunes [M]. Courier Dover Publications: 1–90.
- Dearing J. 1999. Magnetic susceptibility. Environmental magnetism: A practical guide[J]. *Quaternary Research Association, Technical Guide*: 35–62.
- Guo X L, Liu X M, LÜ B, et al. 2011. Comparison of topsoil magnetic properties between the loess region in Tianshan Mountains and Loess Plateau, China, and its environmental significance [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(4): 485–495.
- Hao Q Z, Oldfield F, Bloemendal J, et al. 2008. Particle size separation and evidence for pedogenesis in samples from the Chinese Loess Plateau spanning the past 22 my [J]. *Geology*, 36(9): 727–730.
- Liu Q S, Torrent J, Maher B A, et al. 2005. Quantifying grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess and its significance for pedogenesis [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978—2012), 110(B11), doi: 10.1029/2005JB003726.
- Long H, Shen J, Tsukamoto S, et al. 2014. Dry early Holocene

- revealed by sand dune accumulation chronology in Bayanbulak Basin (Xinjiang, NW China) [J]. *The Holocene*, 24: 614-626.
- Pye K. 1987. Aeolian dust and dust deposits [M]. London: Academic Press.
- Rudnick R, Gao S. 2003. Composition of the continental crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 659(3): 1-64.
- Song Y G, Shi Z T, Fang X M, et al. 2010. Loess magnetic properties in the Ili Basin and their correlation with the Chinese Loess Plateau [J]. *Science China Earth Sciences*, 53(3): 419–431.
- Song Y G, Shi Z T, Dong H M, et al. 2008. Loess magnetic susceptibility in Central Asia and its paleoclimatic significance [C]. IGARSS, 2: 1227–1230.
- Song Y G, Chen X L, Qian L B, et al, 2014. Distribution and composition of loess sediments in the Ili Basin, Central Asia [J]. *Quaternary International*, 334–335: 61–73.
- Song Y G, 2012. Paleoclimatic implication of temperaturedependence of susceptibility of Tianshan loess, Central Asia[J]. *Advance Science Letters*, 6, 167–172.
- Thompson R, Oldfield F. 1986. Environmental magnetism [M]. Springer.
- Zhao K L, Li X Q. 2013. Modern pollen and vegetation relationships in the Yili Basin, Xinjiang, NW China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58: 4143–4142.