

doi:10.7515/JEE201402008

# 天山北麓宁家河阶地上的黄土堆积及其磁学特征

吕 镔<sup>1,2</sup>, 刘秀铭<sup>2,3</sup>, 陈秀玲<sup>1</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建省湿润亚热带山地生态省部共建国家重点实验室培育基地, 福州 350007;  
2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;  
3. Department of Environment and Geography, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia)

**摘要:** 本文报道了新疆地区天山北麓宁家河阶地上的黄土堆积。研究剖面的两层黄土为河流砾石层所隔开, 这在新疆地区较为少见。通过系统的岩石磁学和粒度测量, 分析了该剖面两层黄土的磁学特征, 并初步探讨磁化率变化机制。结果表明: 黄土中的主要磁性矿物为磁铁矿和磁赤铁矿, 并含有少量赤铁矿和针铁矿。亚铁磁性矿物主要以多畴(MD)、假单畴(PSD)颗粒为主, 反映了这一地区极弱的成土作用。砾石层上下两层黄土磁学性质存在着差异, 表现为上层黄土具有较高的磁性矿物含量、较粗的磁颗粒和相对含量较高的软磁性矿物。下层黄土受到后期河水的改造可能是导致这些差异的原因。磁化率与粒度呈现较好的正相关关系, 与黄土高原的情况相反, 说明干旱地区的黄土磁学性质主要受原生磁性矿物控制。搬运风力和源区变化是磁化率变化的主导因素。

**关键词:** 天山黄土; 磁性矿物; 磁化率; 河流阶地

**中图分类号:** P318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2014)02-0111-09

## Loess deposit on the terrace of Ningjia River in the northern slope of the Tianshan Mountains and its magnetic characteristics

LÜ Bin<sup>1,2</sup>, LIU Xiu-ming<sup>2,3</sup>, CHEN Xiu-ling<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology (Ministry of Science and Technology and Fujian Province Funded), School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;  
3. Department of Environment and Geography, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia)

**Abstract:** In this paper, we report a loess section which located on the terrace of Ningjia River in the northern slope of the Tianshan Mountains. The two loess layers are separated by gravel bed of the river channel. This is rare in Xinjiang region. Samples from the two loess layers were collected and carried out rock magnetism and bulk sample grain size measurement. Base on the measurement, we analyze the magnetic characteristics of these tow loess layers and discuss the mechanism of magnetic susceptibility variation. The results show that magnetite and maghemite are the main magnetic minerals, and also, hematite and goethite are detected; the magnetic minerals domain is intermediate coarse pseudo-single domain (PSD) and multidomain (MD), indicating weak pedogenesis. The main differences of magnetic characteristics between two loess layers above and below the gravel bed are that the top loess layer had more and coarser magnetic minerals, higher proportion of soft magnetic minerals. The water of river may be the reason of these differences. There is an excellent positive relationship between magnetic susceptibility and bulk sample grain size, which is opposite to Chinese Loess Plateau, suggesting that

收稿日期: 2014-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41210002, 40830105, 41302149); 福建省科技计划项目公益类项目(K3-296)

通讯作者: 刘秀铭, E-mail: xliu@fjnu.edu.cn

magnetic properties were mainly controlled by allochthonous magnetic minerals. Magnetic susceptibility was mainly controlled by wind velocity and loess sources change.

**Key words:** Tianshan loess; magnetic minerals; magnetic susceptibility; stream terrace

中国北方是世界上风成黄土分布最为广泛、连续性最好、厚度最大的地区,其中黄土高原黄土古土壤序列以及下覆的红粘土被认为是记录古气候变化的最好陆相载体。环境磁学是解读黄土记录的古气候信息的重要手段,黄土高原黄土古土壤磁化率已经被作为夏季风的代用指标广泛应用于古气候研究中(Liu et al, 2007; 邓成龙等, 2007)。中国黄土高原环境磁学研究成为环境磁学应用于古气候研究的典范,极大促进了其他地区黄土磁学研究的展开。新疆地区是我国风成黄土重要的分布区,在天山北麓诸河流阶地上分布着厚层的黄土沉积(刘东生, 1985)。近年来,许多研究者在新疆北天山地区针对黄土及表土开展了系统的环境磁学研究,取得了一系列的进展(Song et al, 2008; 宋友桂等, 2010a, 2010b; 夏敦胜等, 2010; 郭雪莲等, 2011; 贾佳等, 2011, 2012; Jia et al, 2012; Chen et al, 2012; Liu et al, 2012; Zan et al, 2012; 魏海涛等, 2013)。上述这些研究主要利用岩石磁学方法开展了新疆黄土的磁学特征分析,基本明确了磁性矿物类型、含量及颗粒大小,并将磁学特征变化与黄土形成环境、后期作用联系,探讨了黄土磁化率变化机制,这些研究成果丰富了新疆黄土古气候研究的内容。随着研究区域的拓展和研究的深入,人们发现磁化率并不总是与土壤发育程度正相关(e.g. Begét and Hawkins, 1989; Begét et al, 1990)。已有的研究表明,天山北麓黄土磁化率变化机制与黄土高原存在着较大的差异,磁化率的增强兼有“风速论”与黄土高原成壤作用的特点(宋友桂等, 2010; 夏敦胜等, 2010; 贾佳等, 2011, 2012)。这些发现要求研究者需要利用多磁学参数以及非磁学方法,充分理解磁性特征与环境之间的关系。

相对于黄土高原,新疆黄土研究显得较为薄弱。近年来,较为系统的研究主要集中于伊犁盆地(Song et al, 2008; 宋友桂等, 2010a, 2010b; 夏敦胜等, 2010; 李传想和宋友桂, 2011; 贾佳等, 2011, 2012; Chen et al, 2012; Liu et al, 2012)。位于天山北麓中部的沙湾、石河子一带沉积着北天山地区最厚的黄土(方小敏等, 2002),该区目前仅有东湾黄土进行了系统的环境磁学研

究(Zan et al, 2012; 李冠华等, 2013; 滕晓华等, 2013)。因此有必要加强对这一带黄土的调查和研究。我们在考察过程中,发现位于沙湾县的宁家河阶地上发育着被河流砾石层隔开的两层黄土。本文通过系统的岩石磁学和粒度测量,主要分析该剖面两层黄土的磁学特征,并初步探讨磁化率变化机制。

## 1 剖面概况与实验方法

### 1.1 剖面概况

宁家河剖面位于沙湾县。沙湾县位于天山北麓中部与古尔班通古特沙漠西南缘,属于北温带大陆性干旱气候区。沙湾地区年平均降水量为185 mm,随着海拔升高,降水量有所增加,年均温度约6.9℃,属于荒漠草原区,土壤类型为灰钙土(李冠华等, 2013)。该地区厚层黄土主要出露于河流阶地之上,这与川西黄土较为相似(欧先交等, 2012)。采样剖面(43°57.25'N, 85°36.27'E)位于宁家河阶地上,天山公路S101线约207 km处,海拔高度1323 m。宁家河黄土分为上下两部分,两部分被厚3.8 m的河流砾石层隔开(两层黄土命名为上层黄土和下层黄土,下同)。上层黄土厚6.35 m;下层黄土厚4.15 m,下覆未见底的河流砾石层。两层砾石大小均为厘米级,磨圆度为次圆状至次棱角状。上下两层颜色呈灰黄色,质地均一,土壤发育极弱,肉眼难以分辨黄土古土壤层。相对于上层黄土,下层黄土颜色较暗且粘性稍强,可能指示了沉积后受河流水作用。在清理表层浮土后,以5 cm间距对黄土层进行连续采样,共获得散样211块。

### 1.2 实验方法

样品置于室内中自然风干,将干燥后的样品轻轻研磨成粉末,用塑料薄膜包紧装入磁学专用样品盒,分别测量下述各项磁学参数:使用Bartington MS2B型磁化率仪测量低频磁化率( $\chi_{lf}$ )和高频磁化率( $\chi_{hf}$ ),频率分别为470 Hz和4700 Hz,计算出百分比频率磁化率 $\chi_{td}\% = 100 \times (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}$ ;使用DTECH交变退磁仪和Molspin Minispin旋转磁力仪测量非磁滞剩磁(ARM),交变场峰值为

100 mT, 直流场为 50  $\mu\text{T}$ , 计算出非磁滞磁化率( $\chi_{\text{ARM}}$ ), 计算公式为  $\text{ARM}/H$  ( $H$  为直流场值); 使用 MMPM10 强磁仪对样品施加强磁场, 等温剩磁 (IRM) 和饱和等温剩磁 ( $\text{SIRM}=\text{IRM}_{1000\text{mT}}$ ) 在 Molspin Minispin 旋转磁力仪上测量, 剩磁矫顽力 ( $B_{\text{cr}}$ ) 由  $\text{IRM}_{-x\text{mT}}$  线性内插获得, 并计

算获得硬剩磁 ( $\text{HIRM}=(\text{SIRM}+\text{IRM}_{-300\text{mT}})/2$ ) 和 S 比率 ( $\text{S-ratio}=-\text{IRM}_{-300\text{mT}}/\text{SIRM}$ )。代表性样品磁化率随温度变化 ( $\kappa-T$ ) 曲线由 MFK1-FA 卡帕桥磁化率仪和 CS-4 加热装置测量, 测量过程中, 样品处于氩气中, 最高加热温度为 700  $^{\circ}\text{C}$ 。

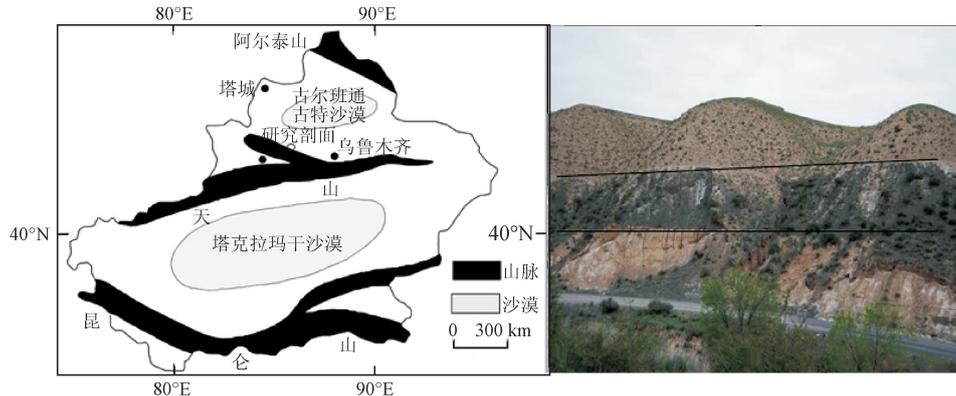


图1 宁家河剖面位置示意图及照片

Fig.1 Location and photo of Ningjia River loess section

使用 Malvern Instrument 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行粒度参数测量, 测量范围为 0.02~2000  $\mu\text{m}$ , 测量前对粒度进行前处理以去除有机质和碳酸钙。粒度前处理步骤如下: 取每个样品约 0.3 g 放入烧杯中, 加入浓度为 10% 的过氧化氢溶液 10 mL, 煮沸约 30 分钟以上以除去有机质, 然后加入 10% 的稀盐酸 10 mL 以除去碳酸盐, 再加入蒸馏水至烧杯满 (不溢出), 静置 24 小时后用橡皮管抽去上层水, 加入六偏磷酸钠作为分散剂, 在超声波振荡器上振荡 7~8 分钟, 之后放入激光粒度仪进行测量。以上实验除  $\kappa-T$  曲线在福建师范大学地理科学学院测量, 其余均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

## 2 结果

### 2.1 常温磁学参数

常温磁学参数如磁化率、频率磁化率、等温剩磁等和参数之间的比值可以用来判断磁性矿物含量、粒度等特征 (Thompson and Oldfield, 1986)。图 2 为宁家河剖面常温磁学参数。上层黄土磁化率  $\chi_{\text{f}}$  在  $40 \times 10^{-8} \sim 90 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 大部分在  $45 \times 10^{-8} \sim 60 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 均值为  $54.68 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 下层黄土磁化率  $20 \times 10^{-8} \sim 40 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 均值为  $30.76 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 整体而言, 磁化率数值波动不大。指示亚铁磁性矿物绝对含量的 SIRM (图 2b) 也表现出同样的

特征。 $\chi_{\text{ARM}}$ 、HIRM 用于指示单畴颗粒和硬磁性矿物的含量, 上层黄土的  $\chi_{\text{ARM}}$  稍高于下层, 但 HIRM 与下层黄土相当, 说明上层黄土具有较高含量的单畴颗粒, 两层黄土硬磁性矿物含量相当。 $\chi_{\text{fd}}\%$  对颗粒度接近超顺磁 (SP) 与单畴 (SD) 界线 (尤其是 20~25 nm) 的磁性颗粒敏感 (Liu et al, 2004), 通常用百分比频率磁化率 ( $\chi_{\text{fd}}\%$ ) 来估算 SP 磁性矿物的相对含量。上层黄土的  $\chi_{\text{fd}}\%$  (图 2i) 基本在 0~2%, 下层黄土小于 1%, 说明基本不存在超顺磁 (SP) 颗粒 (Dearing, 1999)。 $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  可以用来衡量 SD 颗粒的相对含量, 从图 2e 可以看出上层黄土该值明显小于下层黄土, 可以得知上层黄土磁颗粒相对较粗。这一比值在整个剖面最高不超过 3.5, 在黄土高原西北部兰州地区的风成沉积的  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  可达到 5 (贾佳等, 2011), 而黄土高原强发育土壤可达 7 以上 (Wang et al, 2006), 表明该剖面黄土中细粒磁性矿物相对含量较小。SIRM/ $\chi$  与磁颗粒以及软硬磁相对比例有关, 该参数在下层黄土介于  $16 \sim 20 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ , 比上层高出约  $4 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$  (图 2f),  $B_{\text{cr}}$  值比上层高 5 mT 左右 (图 2g), S-ratio 也是在上层获得较高值 (图 2h), 通过这三个参数可以推断下层黄土含有更高比例的硬磁性矿物 (如针铁矿和赤铁矿)。总体上, 指示磁性矿物含量的指标 (图 2 a~d) 具有较好的正相关关系, 说明亚铁磁性矿物含量是磁学性质变化的主导因素。

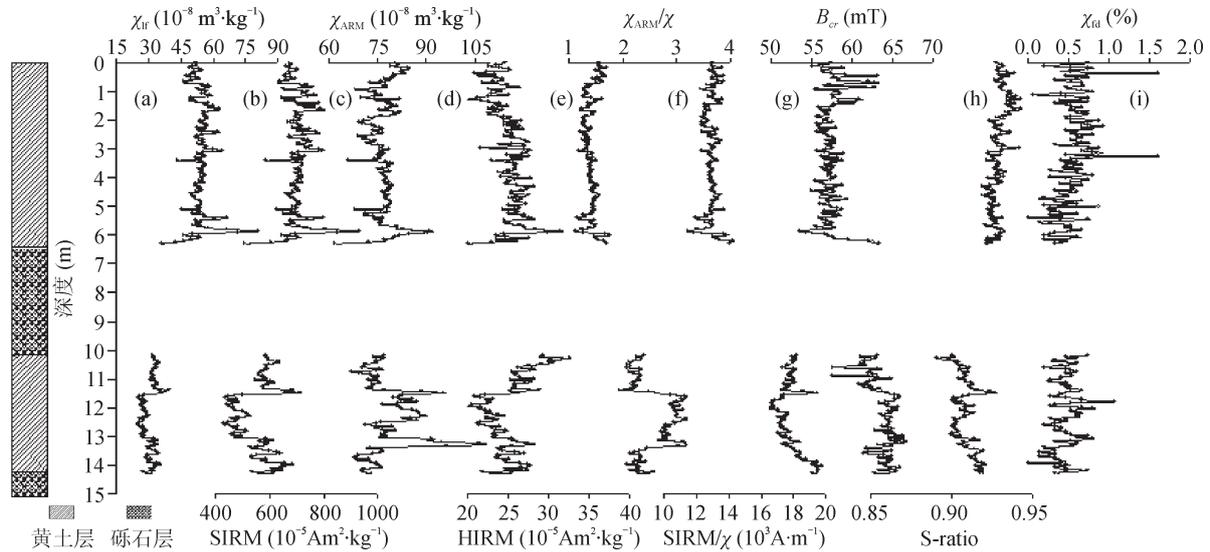


图2 宁家河剖面常温磁学参数

Fig.2 Room temperature magnetic parameters of Ningjia River loess section

宁家河剖面上下两层黄土的磁学性质差异较大(如图2所示),具体表现为:(1)磁性矿物含量方面,上层黄土高于下层黄土;(2)磁颗粒大小方面,上层黄土的磁颗粒较粗;(3)磁性矿物种类方面,上层黄土具有相对较高含量的软磁性矿物(如磁铁矿和磁赤铁矿)。结合上述三个方面差异,我们认为下层黄土的强磁性矿物可能部分被水溶解而只余留下中心的部分而使得粒径较细,可能部分被转化为不完全反铁磁性矿物,如针铁矿。造成这一变化的原因为下层黄土上部的砾石层。砾石层指示着河流的存在,砾石层孔隙较大,河水能够下渗影响下层黄土。

不同磁学参数与磁化率相关关系在图中显示出截然不同的两部分,大致以 $\chi_{ir}$ 值 $40 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 为界限,右边(黑色圆点)和左边(灰色圆点)分别对应上下层黄土(图3)。有意思的是,这两部分所表现出来的磁学规律相同。其中两部分黄土的SIRM与磁化率的相关都很较高,但两者的斜率和与Y轴的截距不同,说明磁颗粒大小和软硬磁相对比例存在着差异。下层黄土各磁学参数与磁化率的相关关系与上层并无显著差异,可能说明下层黄土不同层位后期水作用程度差别不大。结合热磁分析(见下文),上下两层黄土磁性矿物种类一致,并未出现纤铁矿这种滞水环境下的指示矿物,说明后期水作用对于磁性矿物的改造可能仅存在于磁性矿物的表面。

## 2.2 高温磁学特征

热磁分析可以有效地对样品中的磁性矿物种类进行鉴别(Thompson and Oldfield, 1986)。上下两层黄土的热磁 $\kappa-T$ 曲线如图4所示,尽管上下两层黄土的常温磁学参数存在着较大的差异,但是两者的加热曲线形态基本一致,说明所含有的磁性矿物种类相同。所有样品在加热到 $120^\circ\text{C}$ 后磁化率稍有增高,一般认为这是针铁矿转化成磁赤铁矿的特征(Oches and Bnaerjee, 1996), $300\sim 450^\circ\text{C}$ ,磁化率随温度升高快速下降,在曲线上形成谷,通常认为这是由热不稳定的强磁性矿物磁赤铁矿转化为热稳定的弱磁性矿物赤铁矿所致(Liu et al, 2005)。磁化率在 $580^\circ\text{C}$ 时基本下降到零且转折明显,指示了磁铁矿(居里点为 $580^\circ\text{C}$ )的存在。冷却曲线位于加热曲线上方且居里点为 $580^\circ\text{C}$ ,表明在还原条件下加热过程中某些磁性矿物(如赤铁矿)和含铁硅酸盐转化为磁铁矿(Liu et al, 2005)。 $10.95 \text{ m}$ 和 $14 \text{ m}$ 样品(图4 d、f)的冷却曲线不同于其他样品,原因有待进一步研究。综上所述,热磁分析表明上下两层黄土中磁性矿物种类一致:主要的磁性矿物为磁铁矿,含有磁赤铁矿以及针铁矿。

## 2.3 粒度频率分布曲线

图5为上下两层黄土代表性样品的频率分布曲线,所测样品与热磁测量的样品相同。从图中可以看出,六个样品的曲线形态基本一致,暗示两层黄土具

有相同的成因。所选的样品粒径范围为 0.3~200  $\mu\text{m}$ , 主要介于 0.5~100  $\mu\text{m}$ , 其形态与粒度范围均与伊犁昭

苏黄土相似 (李传想等, 2011)。因此, 可以认为宁家河上下两层沉积物均为风成成因。

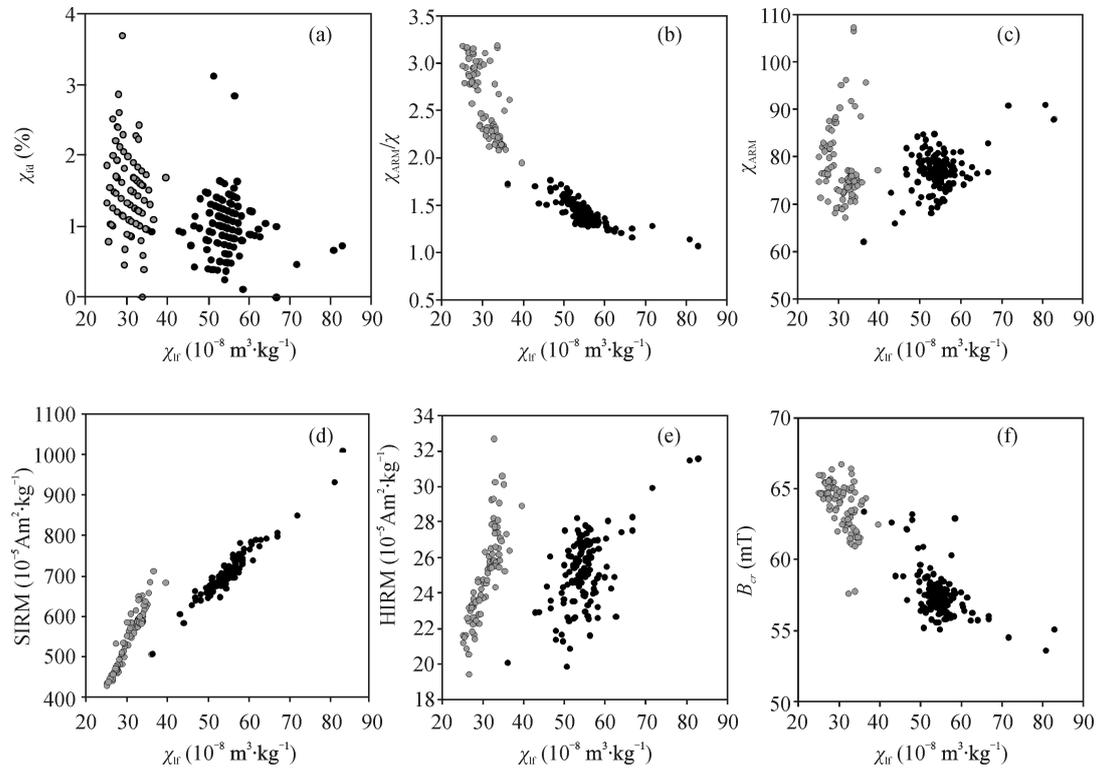


图 3 宁家河剖面常温磁学参数相关关系 (黑色圆点: 上层黄土; 灰色圆点: 下层黄土)  
 Fig.3 The relationships between magnetic parameters and magnetic susceptibility  
 (Black dot: top loess layer; grey dot: bottom loess layer)

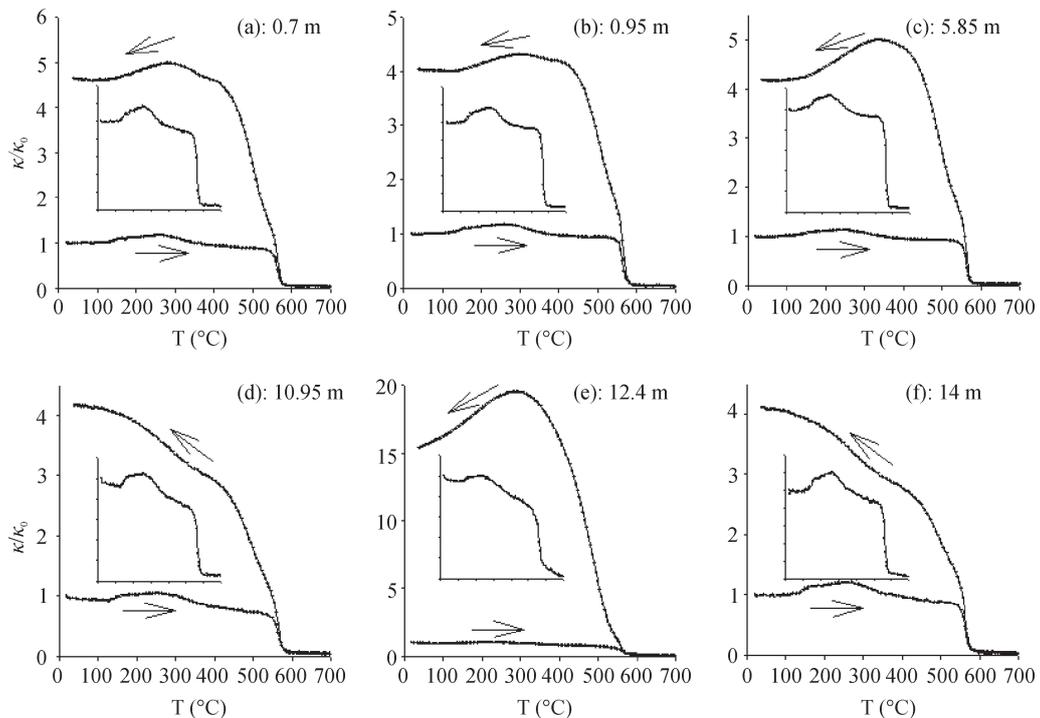


图 4 上下层黄土代表性样品的  $\kappa-T$  曲线 (上层黄土: a, b, c; 下层黄土: d, e, f)  
 Fig.4 The  $\kappa-T$  curves of typical samples (Top loess layer: a, b, c; bottom loess layer: d, e, f)

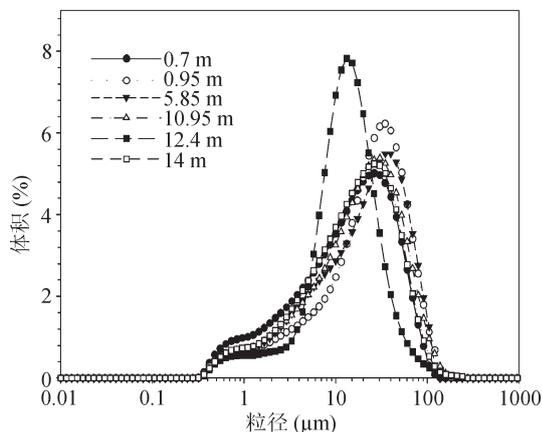


图5 代表性样品的频率分布曲线

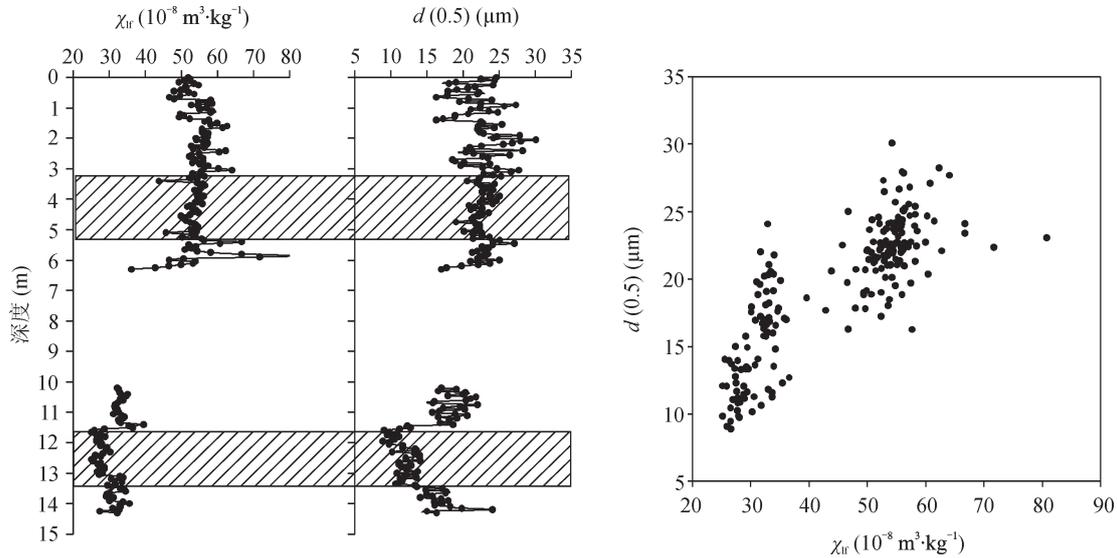
Fig.5 Grain size frequency distribution of the typical samples

### 3 讨论

磁化率在黄土古气候研究中起了非常重要的作用,已被广泛地应用为古气候变化研究的代用指标,过去几十年的研究,证实黄土高原中部黄土磁化率总体上可以反映过去的降水量,磁化率与成壤强度显示出很好的正相关关系(Liu et al, 2007; 邓成龙等, 2007)。随着研究区域的拓展,人们发现黄土古土壤磁化率与成壤强度并非总是正相关,如阿拉斯加黄土磁化率与成壤强度反相关(Begét and Hawkins, 1989; Begét et al, 1990)。黄土中的磁性矿物按成因可以划分为原生和次生两部分。前者由风力携带而来,反映了搬运风力、过程和源区变化的信息;后者是沉积后期形成,蕴含着沉积区环境演化信息,成土作用形成的磁性矿物特征可用来反映降水量。磁化率是两者的综合体现,受源区形成、搬运、后期作用各方面的影响。不同地区不同环境条件下,控制磁化率变化的主导因素存在差异。黄土古土壤磁化率增强机制是黄土环境磁学研究的核心内容,也是利用磁学参数研究古气候变化的前提,关系到磁学参数作为代用指标的可靠性和对古气候准确精细的解释。扩展到世界各地的黄土,这一问题也相应扩展为磁化率变化机制。控制磁化率变化的因素有哪些?不同地区的黄土古土壤磁化率与成壤强度对应关系不同,是磁化率变化机制的不同,还是同一规律在不同地区表现不同?黄土磁化率在多大程度上可以反演过去的环境变化?要解答这些问题需要对磁化率变化机制进行深入研究。

粉尘一旦沉积固定后,便开始后期的风化成壤。风化作用包括物理风化、化学风化和生物化学风化。通过野外观察发现北天山黄土成壤强度远远低于黄土高原中部,也低于黄土高原西北部九州台剖面的末次冰期黄土。因此北天山黄土所受的后期作用以物理风化为主,化学风化微弱。物理风化不能改变矿物的成分、颜色,可以推断北天山黄土的磁性矿物以原生风成因为主。本文研究剖面的磁学参数上表现为低 $\chi_{fd}\%$ 和 $\chi_{ARM}/\chi$ 值,表明SP和SD亚铁磁性矿物含量十分有限。次生磁性矿物通常具有较小的粒径,因此磁学结果也支持宁家河剖面黄土中磁性矿物以原生组分为主的结论。磁性矿物种类是影响磁化率大小的重要方面。宁家河剖面黄土中含有赤铁矿和针铁矿,但是这两种矿物的质量磁化率较磁铁矿和磁赤铁矿低三个数量级(Thompson and Oldfield, 1986),因此影响该区黄土磁化率大小的主要因素是原生亚铁磁性矿物。通过热磁分析(图4),可以得知主要的磁性矿物为磁铁矿和磁赤铁矿,所以磁性矿物种类上的差别对磁化率影响不大。

原生磁性矿物为风力从源区搬运而来,全岩粒度可以指标风力大小或源区远近。如图6所示,磁化率与中值粒径 $d(0.5)$ 基本上具有同步变化的规律,在某些层位上甚至可以良好地对应。两者的散点图也显示出粒度较粗,磁化率也较高的规律。博乐黄土中也发现磁化率与中值粒径 $d(0.5)$ 存在着这一关系,且两者的相关系数更高(吕镛等, 2012)。全岩粒度与磁化率具有良好的正相关关系,这一现象可以解释为,当风力变大或源区扩张,搬运至沉积区的黄土磁颗粒变粗,导致磁化率变大。值得指出的是,SIRM与磁化率表现出良好的正相关(图2 a、b),若仅是磁颗粒变粗,则SIRM将降低,因为粗颗粒携带剩磁能力较弱。因此,风力变大或源区扩张,不但使黄土中磁颗粒变粗,也使其含量增加。两者的叠加共同导致磁化率升高。该剖面磁化率增强机制与黄土高原西北部基本相似(强小科等, 2012),说明干旱区黄土磁化主要受源区和风力控制。因此北天山黄土的磁化率变化机制可以简要概括如下:当源区扩张或搬运风力增强,更多更粗的原生亚铁磁性矿物被带到沉积区,使黄土的磁化率增强。由此可知,在干旱区,磁化率与降水量基本无关。

图6 磁化率与中值粒径  $d(0.5)$  关系Fig.6 The relationship between magnetic susceptibility and medium diameter  $d(0.5)$ 

#### 4 结论

通过对宁家河黄土详细的岩石磁学研究和全岩粒度的对比分析, 本文得出以下主要结论:

(1) 宁家河黄土磁性矿物以磁铁矿、磁赤铁矿为主; 亚铁磁性矿物以粗粒 (PSD 和 MD) 为主, 基本不含细粒组分 (SP 和 SD)。原生磁性矿物主导剖面磁学性质。

(2) 宁家河黄土磁化率主要受源区和风力影响, 磁化率增强是磁颗粒变粗和含量增加的结果。干旱区黄土磁化率不能作为降水的代用指标。

(3) 被河流砾石层隔开的上下两层黄土磁学性质上存在差异的可能原因是下层黄土受过后期河水作用。

**致谢:** 郭雪莲、陈渠、毛学刚和陈家胜参与了野外采样, 在此一并致谢!

#### 参考文献

- 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 2007. 中国黄土环境磁学 [J]. *第四纪研究*, 27(2): 193–209. [Deng C L, Liu Q S, Pan Y X, et al. 2007. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences [J]. *Quaternary Sciences*, 27(2): 193–209.]
- 方小敏, 史正涛, 杨胜利, 等. 2002. 天山黄土和古尔班通古特沙漠发育及北疆干旱化 [J]. *科学通报*, 47(7): 1381–1387. [Fang X M, Shi Z T, Yang S L, et al. 2002. Loess in Tianshan and its implications for the development of the

Gurbantungut Desert and drying of northern Xinjiang [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(7): 1381–1387.]

- 郭雪莲, 刘秀铭, 吕 兵, 等. 2011. 天山黄土区与黄土高原表土磁性特征对比及环境意义 [J]. *地球物理学报*, 54(7): 1854–1862. [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 Geophysics*, 54(4): 1854–1862.]
- 贾 佳, 刘现彬, 夏敦胜, 等. 2011. 坎苏剖面记录的西天山地区黄土磁学性质及其控制因素初探 [J]. *干旱区地理*, 34(1): 124–131. [Jia J, Liu X B, Xia D S, et al. 2011. Magnetic property and its dominant fact of loess strata in western Tangshan area recorded by Kansu section [J]. *Arid Land Geography*, 34(1): 124–131.]
- 贾 佳, 夏敦胜, 王 博, 等. 2012. 黄土高原与伊犁黄土磁学特征对比及启示 [J]. *第四纪研究*, 32(4): 749–760. [Jia J, Xia D S, Wang B, et al. 2012. The comparison between Loess Plateau and Ili loess magnetic properties and their implication [J]. *Quaternary Sciences*, 32(4): 749–760.]
- 贾 佳, 夏敦胜, 魏海涛, 等. 2010. 黄土高原西部典型古土壤与黄土的磁学特征及其古气候意义 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 46(6): 26–31. [Jia J, Xia D S, Wei H T, et al. 2010. Magnetic properties of typical paleosol and loess stratum of western loess plateau and its signification to paleoclimatic [J]. *Journal of Lanzhou University*

- (*Natural Sciences*), 46(6): 26–31.]
- 李传想, 宋友桂, 2011. 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, 2011. 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, 千琳勃, 等. 2011. 中亚昭苏黄土剖面粒度记录的末次冰期以来气候变化历史 [J]. *沉积学报*, 29(6): 1170–1179. [Li C X, Song Y G, Xian L B, et al. 2011. History of Climate Change Recorded by Grain Size at the Zhaosu Loess Section in the Central Asia since the Last Glacial Period [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(6): 1170–1179.]
- 李冠华, 夏敦胜, 温仰磊, 等. 2013. 天山北麓典型黄土沉积序列的磁学特征及主控因子初探 [J]. *第四纪研究*, 33(5): 900–910. [Li G H, Xia D S, Wen Y L, et al. 2013. Rock magnetism of the loess/paleosol sequences in north of the Tianshan Mountains, northwest China [J]. *Quaternary Sciences*, 33(5): 900–910.]
- 刘东生. 1985. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社. 1–481. [Liu T S. 1985. Loess and Environmental [M]. Beijing: Science Press, 1–481.]
- 吕 斌, 刘秀铭, 赵国永, 等. 2012. 新疆博乐黄土岩石磁学特征及环境意义 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 48(5): 1–8. [Lü B, Liu X M, Zhao G Y, et al. 2012. Rock magnetic properties of Bole loess in Xinjiang and its environmental significances [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 48(5): 1–8.]
- 欧先交, 曾兰华, 周尚哲, 等. 2012. 四川西部黄土沉积与环境演变研究综述 [J]. *地球环境学报*, 3(1): 692–704. [Ou X J, Zeng L H, Zhou S Z et al. 2012. A review on research of loess and environmental change in west Sichuan Plateau of the eastern Qinghai–Tibetan Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 3(1): 692–704.]
- 强小科, 孙玉芳, 陈 艇, 等. 2012. 末次冰期以来黄土高原粉尘沉积的岩石磁学空间特征 [J]. *地球环境学报*, 3(2): 810–818. [Qiang X K, Sun Y F, Chen T., et al. 2012. Mineral magnetism and the spatial comparison of the loess sediments in Loess Plateau since the last glacial period [J]. *Journal of Earth Environment*, 3(2): 810–818.]
- 宋友桂, Nie Jun-sheng, 史正涛, 等. 2010a. 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. 2010a, 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, 方小敏, 等. 2010b. 伊犁黄土的磁学性质及其与黄土高原对比 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 40(1): 61–72. [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]. *Sciences in China (Series D)*, 40(1): 61–72.]
- 滕晓华, 张志高, 彭文彬, 等. 2013. 天山黄土岩石磁学特征及其磁化率增强机制 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 33(5): 147–154. [Teng G H, Zhang Z G, Peng W B, et al. 2013. Rock-magnetic characteristics of the Tianshan loess and the mechanism for enhancing magnetic susceptibility [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(5): 147–154.]
- 魏海涛, Banerjee S K, 夏敦胜, 等. 2013. 天山北麓黄土环境磁学特征及其古气候意义 [J]. *地球物理学报*, 56(1): 150–158. [Wei H T, Banerjee S K, Xia D S, et al. 2013. Magnetic characteristics of loess-paleosol sequences on the north slope of the Tianshan Mountains, northwest China and their paleoclimatic implications [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 56(1): 150–158.]
- 夏敦胜, 陈发虎, 贾 佳, 等. 2010. 新疆伊犁地区典型黄土磁学特征及其环境意义初探 [J]. *第四纪研究*, 30(5): 902–910. [Xia D S, Chen F H, Jia J, et al. 2010. Magnetic characteristics of loess in the Ili area and their environmental implication [J]. *Quaternary Sciences*, 30(5): 902–910.]
- Begét J, Hawkins D. 1989. Influence of orbital parameters on Pleistocene loess deposition in central Alaska [J]. *Nature*, 337: 151–153.
- Begét J, Stone D, Hawkins D. 1990. Paleoclimate forcing of magnetic susceptibility variations in Alaskan loess [J]. *Geology*, 18: 40–43.
- Chen Q, Liu X M, Heller F, et al. 2012. Susceptibility variations of multiple origins of loess from the Ily Basin (NW China) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57 (15): 1844–1855.
- Dearing J. 1999. Magnetic susceptibility In Environmental Magnetism: A Practical Guide, Technical Guide [M], Walden J, Oldfield F, Smith J P(eds)[J]. *Quaternary Research Association: London*, 35–62.

- Jia J, Xia D S, Wang B, et al. 2012. Magnetic investigation of Late Quaternary loess deposition, Ili area, China [J]. *Quaternary International*, 250(1–2): 84–92.
- Liu Q S, Deng C L, Torrent J, et al. 2007. Review of recent developments in mineral magnetism of the Chinese loess [J]. *Quaternary Science Reviews*, 26(3–4): 368–385.
- Liu Q S, Deng C L, Yu Y J, et al. 2005. Temperature dependence of magnetic susceptibility in an argon environment: implications for pedogenesis of Chinese loess/palaeosols [J]. *Geophysical Journal International*, 161 (1): 102–112.
- Liu Q S, Jackson M J, Banerjee S K, et al. 2004. Mechanism of magnetic susceptibility enhancements of the Chinese loess [J]. *Journal of Geophysics Research*, 109(B12): B12107.
- Liu Y, Shi Z T, Deng C L, et al., 2012. Mineral magnetic investigation of the Taledo loess–palaeosol sequence since the last interglacial in the Yili Basin in the Asian interior [J]. *Geophysical Journal International*, 190: 267–277.
- Oches E A, Banerjee S K. 1996. Rock-magnetic proxies of climate change from loess-paleosol sediments of the Czech Republic [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 40(3): 287–300.
- Song Y G, Shi Z T, Dong H M, et al. 2008. Loess magnetic susceptibility in Central Asia and its paleoclimatic significances [J]. *IGARSS*, 2: 1227–1230.
- Thompson R, Oldfield F. 1986. *Environmental Magnetism* [M]. London: Allen and Unwin, 1–166.
- Wang X S, Yang Z Y, Reidar L, et al. 2006. Environmental magnetism and paleoclimatic interpretation of the Sanmenxia loess-paleosol sequence in the southeastern extremity of the Chinese Loess Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51 (22): 2755–2762.
- Zan J B, Fang X M, Nie J S, et al. 2012. Rock magnetism in loess from the middle Tian Shan: Implications for paleoenvironmental interpretations of magnetic properties of loess deposits in Central Asia [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(10): doi: 10.1029/2012GC004251.