

# 西风区黄土-古土壤的碳酸盐含量 对磁化率影响研究

张文翔<sup>1</sup>, 史正涛<sup>1,2</sup>, 刘勇<sup>1</sup>, 苏怀<sup>1</sup>, 明庆忠<sup>1</sup>

(1. 云南师范大学 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 昆明 650500;  
2. 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)

**摘要:** 本文选择伊犁盆地塔勒德黄土-古土壤序列, 系统地开展了沉积物碳酸盐和磁化率等指标研究, 初步探讨了伊犁黄土碳酸盐含量对磁化率增减的影响机制。研究发现, 塔勒德古土壤中低频磁化率值中明显低于黄土层, 且较黄土高原古土壤值小, 频率磁化率也远小于黄土高原; 碳酸盐含量在  $S_1$  层中含量明显高于黄土, 且较黄土高原古土壤高, 与剖面磁化率负相关, 在古土壤中相关度更显著。去除碳酸盐的设计实验显示加入蒸馏水后沉积物磁化率值变化在 10% 以内; 加入醋酸 (HAc) 后样品磁化率值均增加, 其最大增幅达 12.89% (黄土), 古土壤的磁化率增加 9% 以上; 加入稀盐酸后影响程度不一, 在黄土中约在 15%, 而对古土壤影响较大, 最大可达 35%, 表明沉积物中碳酸盐含量对磁化率的影响不仅是简单的稀释作用, 还与干旱气候环境下碳酸盐化、次生碳酸盐化作用相关。

**关键词:** 磁化率; 碳酸盐含量; 塔勒德; 黄土-古土壤序列

**中图分类号:** P318; P532   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1674-9901(2014)02-0155-08

## Study on the influence of carbonate content on magnetic susceptibility of Taledo loess-paleosol sequences in westerly area of China

ZHANG Wen-xiang<sup>1</sup>, SHI Zheng-tao<sup>1,2</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>, SU Huai<sup>1</sup>, MING Qing-zhong<sup>1</sup>

(1. Yunnan Provincial Key Laboratory of Plateau Geographical Process and Environmental Change, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** Based on the analysis of carbonate content and magnetic susceptibility of Taledo loess-paleosol sequences, the influence mechanism of carbonate content on magnetic susceptibility variation of Ili basin was discussed primarily. The results show that low frequency magnetic susceptibility in paleosol was significantly lower than the value in loess of section and the Loess Plateau (LP). The frequency magnetic susceptibility of the section is far less than its in LP. In contrast, carbonate content in the paleosol  $S_1$  was higher than the content of loess of Taledo section and the same layer of LP obviously. It is negatively related to magnetic susceptibility, especially in the paleosol. The design experiment of remove carbonate interpreted that magnetic susceptibility varies within 10% after adding distilled water. The magnetic susceptibility values of all samples increased added HAc, and the increment reaches as high as 12.89%, the magnetic susceptibility of paleosol increase more than 9%. The effects of carbonate content on magnetic susceptibility of the section were different after adding HCl. The change rate of loess samples is about 15%, while it is larger influence on the paleosol samples, up to 35%. These indicate that carbonate content is not only the dilution effect on the magnetic susceptibility, also associated the

收稿日期: 2014-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871018); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目 (SKLLQG0812)

通讯作者: 史正涛, E-mail: shizhengtao@163.com

carbonation and secondary carbonatization under the arid climate environment.

**Key words:** magnetic susceptibility; carbonate content; Taledé; loess-paleosol sequences

亚洲中纬度干旱区是当今世界上最严重和最广阔的干旱区之一,其粉尘物质真实地记录了亚洲内陆粉尘源区的干旱化过程(刘东生,1985; An et al, 1990, 1991, 2000, 2001; Guo et al, 2002)。中亚黄土分布主要位于中亚干旱带核心区,与世界上最主要的三大黄土分布区(欧洲黄土区、西伯利亚黄土区、中国黄土高原)相邻,区域内的黄土沉积是联系黄土高原及中亚黄土沉积区的纽带(刘东生,1985; Song et al, 2012; Rao et al, 2013; 陈秀玲等,2013)。独特的区域环境特征以及复杂多样的地形条件使得新疆黄土沉积在结构和组成上具有鲜明的地域性,与季风影响下的黄土高原地区黄土沉积相区别(叶玮,2001; Song et al, 2010, 2014)。

黄土记录的低频磁化率碳酸盐含量广泛应用于古环境研究,黄土磁性矿物来源包括原生风成输入与后期成壤改造两方面(Maher et al, 1998),而沉积物中碳酸盐常被认为对磁化率起到减弱作用。然而,在中国西北的伊犁盆地却发现黄土磁化率与成壤程度呈现出负相关关系(叶玮,2001; 史正涛等,2007; 夏敦胜等,2010; Jia et al, 2010; 李传想等,2011),特别是在 $S_0$ 之外的古土壤层某些层位磁化率变化剧减,在 $S_1$ 层中碳酸盐含量明显高于黄土,且较黄土高原古土壤高。众多学者通过对其磁学研究,发现伊犁盆地黄土、古土壤沉积物中磁性矿物的总含量低于黄土高原,但类型与黄土高原黄土基本类似。其主要载磁矿物为磁铁矿,还含有少量的纤铁矿,黄土中还含有一定量的赤铁矿,黄土、古土壤中磁性矿物的粒度要比黄土高原粗,以准单畴(PSD)和多畴(MD)为主。成壤作用产生的细粒超顺磁体对磁化率的贡献非常有限。粒径为PSD和MD的磁铁矿和磁赤铁矿为伊犁黄土磁化率的主要贡献者(Song et al, 2010; Chen et al, 2012; Liu et al, 2012),但较少涉及 $S_1$ 中碳酸盐含量异常及期对磁化率影响的分析(李传想等,2013)。

本文以塔勒德剖面为例,通过去除碳酸钙实验来研究西风区塔勒德黄土-古土壤中碳酸钙含量对磁化率的影响,以探讨沉积物中伊犁黄土的磁性增减规律,为利用磁化率研究西风环流演变及亚洲内陆气候环境特征等第四纪区域和全球环

境变化提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区伊犁盆地位于亚洲中部,常年受西风环流控制,水热不同期。其多年平均降水量257~512 mm,春季降水所占比例略高(Zhang et al, 2013)。年均降雨量分布不均,盆地东部较西部多。年均降雨量与海拔高度线性相关。年均温为2.6~9.2℃,以7月气温最高。伊犁盆地的地带性植被与土壤为荒漠草原与灰钙土(Song et al, 2010)。伊犁盆地黄土主要分布在巩留县到新源县的巩乃斯河阶地上,共发育有8级阶地,其北岸以则克台一带黄土厚度最大,南岸以塔勒德一带最厚,厚度最大可达百米(图1)。和黄土高原相比,伊犁黄土分布受地形影响显著,其沉积结构松散、黄土与古土壤区分不明显(史正涛,2005)。本次研究的探井是在第七级阶地(海拔1044 m)上人工开挖的。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

为获得可靠的、高分辨率黄土-古土壤样品,在七级阶地中部开挖了超过20 m的探井,并对探井上部17 m按5 cm间隔进行样品采集,共获得样品340个。探井剖面黄土-古土壤按其沉积特征共可分为7层(史正涛,2005)。同时在相关层位对其年代进行了测定。

### 2.2 实验方法

碳酸盐分析使用气体方法测定(即先测定加入盐酸后产生的 $CO_2$ 气体的量,然后转化成 $CaCO_3$ 含量),其重复测量的误差小于0.5%。磁化率分析使用Bartington MS2B型磁化率仪测定,分别测量样品的低频(0.47 kHz)和高频(4.7 kHz)磁化率值,并计算其质量磁化率,获得低频磁化率( $\chi_{lf}$ )和高频磁化率( $\chi_{hf}$ ),并通过 $(\chi_{lf}-\chi_{hf})/\chi_{lf}\times 100\%$ 计算样品的频率磁化率( $\chi_{fd}$ )。实验分析中对所有样品均采用相同的处理方法,每个样品做3次重复测试,以保证其准确性。

同时,为探讨碳酸盐对磁化率的影响程度,并考虑到强酸可能会对磁铁矿颗粒的影响,设计了相

关的实验(图 2)。首先用蒸馏水清洗样品, 然后用醋酸和稀盐酸分别清洗样品, 比较其磁化率变化。因样品中细小的磁性矿物会悬浮在水中, 故对清洗溶液也进行了收集, 蒸干水分, 进行磁性及矿物测定。本次实验选择了古土壤 S<sub>1</sub> 中 4 个样品、黄土

L<sub>1</sub> 中 6 个样品, 在相同条件下进行对比实验。所有实验是在室温下进行, 样品烘干也控制在 40℃ 以下。全部样品的制备和测试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和兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

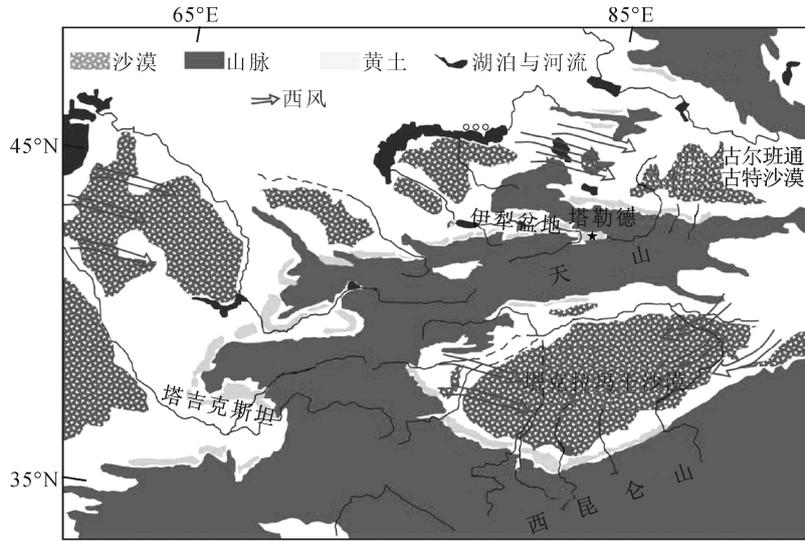


图 1 塔勒德黄土-古土壤位置

Fig.1 Location Taldede loess-paleosol sequences in Central Asia

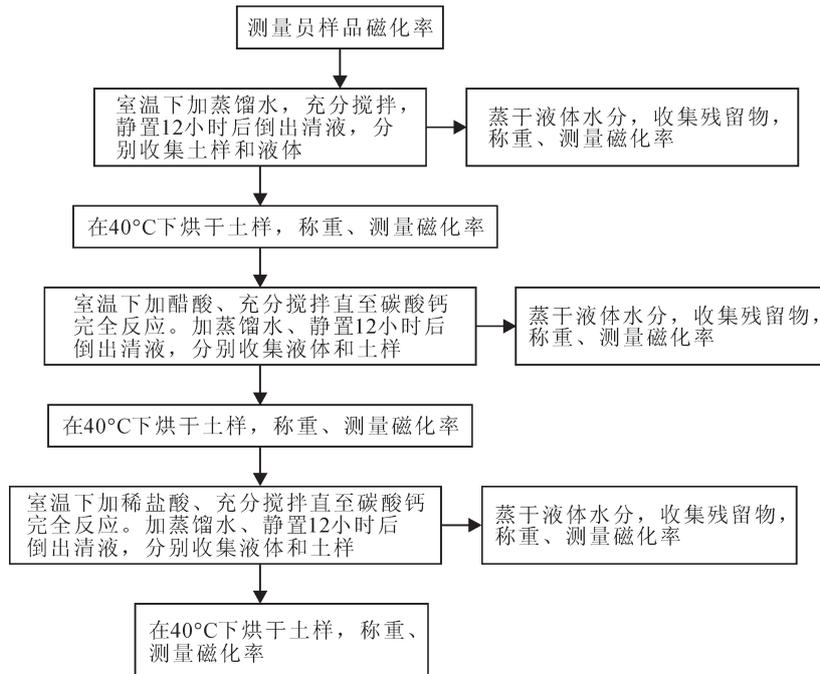


图 2 碳酸盐影响磁化率实验

Fig. 2 Design experiment of carbonate effect on magnetic susceptibility

### 3 结果与分析

#### 3.1 塔勒德探井磁化率与碳酸盐变化特征

研究塔勒德探井黄土-古土壤序列中磁化率、

碳酸盐、有机质含量的变化特征(图 3), 可以看出:  $\chi_{ir}$  的变化范围是  $46 \times 10^{-8} \sim 98 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均含量为  $73 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中古土壤 S<sub>1</sub> 层的磁化率呈明显的双峰, 且低于黄土层, 在磁化率曲

线中表现为在黄土中均为峰，而在古土壤中为谷，即古土壤层的低频磁化率值明显低于黄土层，较黄土高原古土壤值小1~2倍。如古土壤 $S_1$ 层中的磁化率平均值为 $59 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，远低于黄土 $L_1$ 层的 $75 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $\chi_{\text{hf}}$ 则与 $\chi_{\text{lf}}$ 表现出相同的变化特征。同时，频率磁化率 $\chi_{\text{fd}}\%$ 在整个序列中均较低（为0~3.87%），平均值为1.22%，远小于黄土高原黄土-古土壤序列的频率磁化率的均值7%（Zhou et al, 1990；刘秀铭等，1993）。而在黄土-古土

壤序列中碳酸钙含量则与磁化率相反，其在古土壤中（ $S_0$ 和 $S_1$ ）较高，表现为十分明显的峰，为6.72%~14.85%，平均值为11.23%，其特征与黄土高原相反。有机质含量则在整个剖面中含量较低，为0.09%~2.25%，平均值仅为0.30%，因而其对磁化率变化基本影响不大。而通过 $\chi_{\text{lf}}^*/(1-\text{CaCO}_3\%-\text{TOC}\%) \times 100\%$ 计算得到的 $\chi_{\text{lf}}^*$ 与 $\chi_{\text{lf}}$ 相关系数高达0.995，说明碳酸盐含量不能直接的反应其对磁化率的影响。

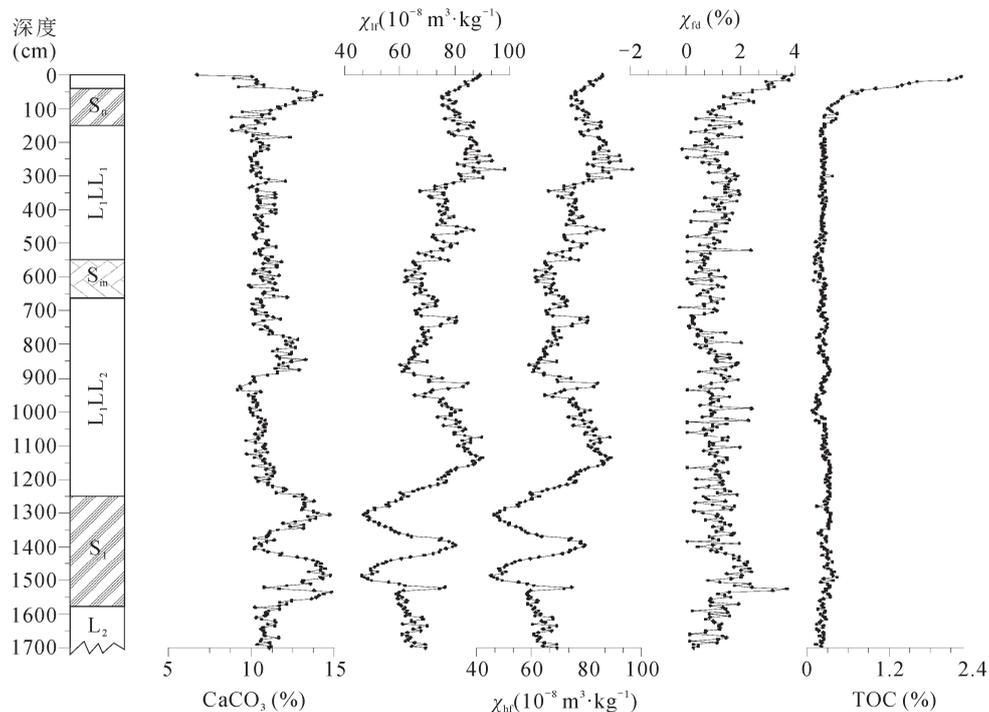


图3 塔勒德黄土-古土壤序列磁化率、碳酸盐、有机质变化特征

Fig. 3 Characteristics of magnetic susceptibility,  $\text{CaCO}_3$  and TOC of Taleda section

同时，碳酸盐与磁化率各指标间存在一定的相关性，特别是在古土壤 $S_0$ （图4A）和 $S_1$ （图4B）中具有较高的负相关性，相关系数达-0.789和-0.645，在黄土 $L_1$ （图4C）和 $L_2$ （图4D）中相关系数仅为-0.446和-0.154。

### 3.2 沉积物中碳酸盐含量对磁化率的影响

一般认为，碳酸钙和有机质含量的增加会对沉积物中的磁化率值起到稀释作用，同时古土壤中碳酸盐淋失和压实作用会使其磁性增强（Heller et al, 1982），并且碳酸盐最多能使磁化率增加25%（韩家懋等，1991；刘东生，1997；邓成龙等，2000；旺罗等，2000）。

因此，我们研究了塔勒德黄土-古土壤序列中碳酸盐含量对磁化率值变化的定量关系（表1），

研究表明：碳酸盐含量的多少与实验结果间无明显规律性。在加入蒸馏水后，塔勒德沉积物磁化率值变化都在10%以内，样品中磁化率值减小的最大为10.06%，其余磁化率增大的样品其增幅较小，最大仅为6.30%，说明塔勒德黄土、古土壤结果改变对磁化率值影响不大。在加入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HAc后，所有样品磁化率值均增加，其最大增幅达12.89%（黄土），古土壤的磁化率增加9%以上，增加值与样品中碳酸盐的含量基本相当，说明碳酸钙可以降低黄土、古土壤的磁化率值约15%左右。而再加入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl后，样品总体变化在-2.09%~8.10%，仅有部分样品磁化率发生明显变化，其中有两个黄土样品磁化率值分别变化约13%，而一个古土壤的磁化率值却增大了35%。

通过设计实验表明，塔勒德黄土-古土壤序

列中碳酸钙对磁化率总体具有影响,但在黄土、古土壤中影响程度不一,其中黄土约在 15%,而对古土壤影响较大,可达到 35%。此研究结果中,

黄土的碳酸盐影响与碳酸盐最多能使磁化率增加 25% 的前人研究结果一致,但古土壤中碳酸盐对磁化率的影响更大。

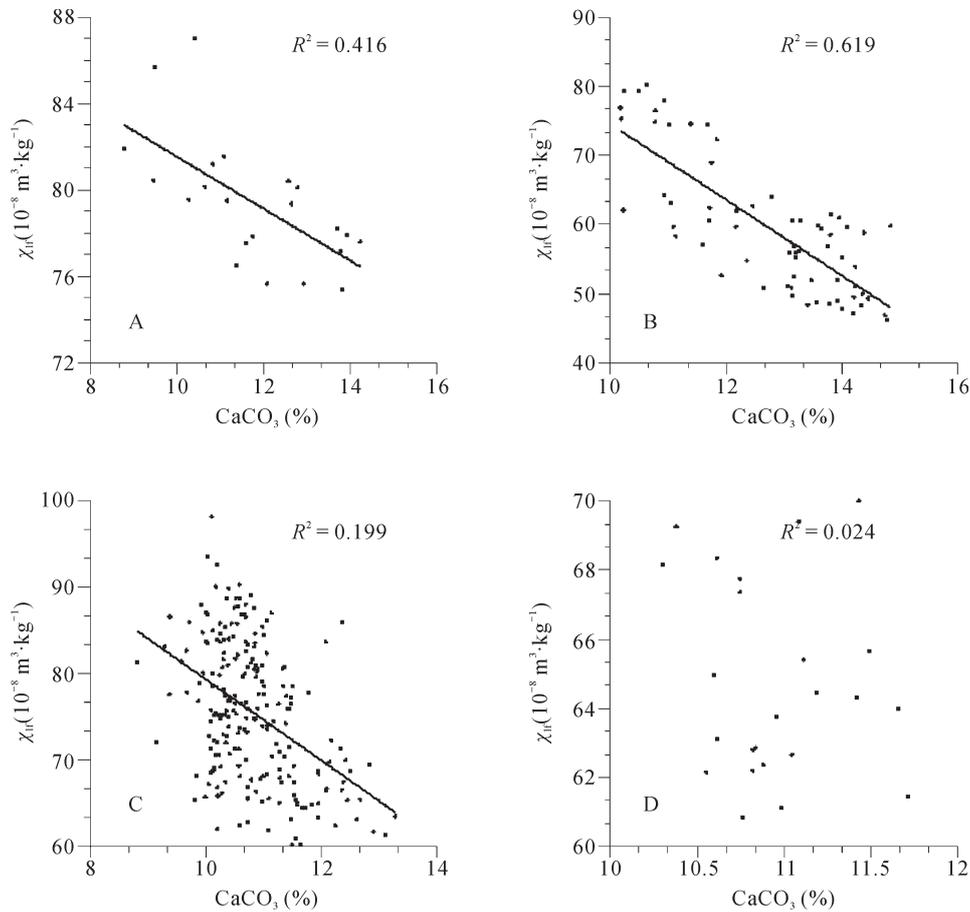


图 4 塔勒德黄土-古土壤层 CaCO<sub>3</sub> 与 χ<sub>lf</sub> 相关性

Fig.4 The correlation of CaCO<sub>3</sub> and χ<sub>lf</sub> in paleosol (S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub>) and loess (L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>)

表 1 碳酸盐含量影响磁化率实验结果

Table 1 Results of magnetic susceptibility influenced by CaCO<sub>3</sub>

样品编号	地层	碳酸盐 (%)	原磁化率 (10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	加蒸馏水后 (10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	变化率 (%)	加 HAc 后 (10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	变化率 (%)	加盐酸后 (10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	变化率 (%)
270	黄土	10.03	81.8	76.2	<b>-6.85</b>	89	8.80	71.3	<b>-12.84</b>
310	黄土	11.06	77.6	80.3	3.48	87.6	12.89	87.5	12.76
615	黄土	11.09	60	62	3.33	66.2	10.33	64.7	7.83
1035	黄土	10.09	74.6	79.3	6.30	79	5.90	76.4	2.41
1215	黄土	10.99	70.4	66.9	<b>-4.97</b>	76.2	8.24	76.1	8.10
1245	古土壤	13.10	59.3	54.5	<b>-8.09</b>	65	9.61	61.9	4.38
1275	古土壤	13.20	52.7	47.4	<b>-10.06</b>	57.7	9.49	51.6	<b>-2.09</b>
1305	古土壤	14.74	44	44.2	0.45	49.4	12.27	59.5	35.23
1575	古土壤	11.76	59.6	61	2.35	65.1	9.23	60.2	1.01
1645	黄土	10.60	62.6	59.4	<b>-5.11</b>	66.4	6.07	65.7	4.95

### 3.3 塔勒德磁化率特征及影响分析

一般认为磁化率变化主要受控于物源及气候环境的影响,而在气候环境因素中降水对黄土磁学性质有关键性影响(Maher et al, 1994, 2003),而气温可能对黄土的磁化率成壤增强不起重要作用(Nie et al, 2009)。因此,在物源较为稳定的情况下,引起塔勒德古土壤 $S_1$ 层磁化率值小于黄土的原因应与气候环境密切相关。在较为干旱的气候环境下,塔勒德古土壤和黄土中的碳酸钙淋滤作用均较弱(史正涛等, 2006),土壤中富含碳酸盐的水份沿毛细管向地表运动,随着水份的失去,盐份在地表被富集,导致土壤碳酸盐含量增多,加之冰期温度较冰期高,蒸发作用更为强烈,从而表现出古土壤层碳酸盐含量显著高于黄土。在间冰期,干旱环境下塔勒德古土壤在碱性环境中发育,使得土壤磁化率没有得到增强,而且在积盐的这种碱性环境中,粉尘中的部分强磁性矿物磁铁矿、磁赤铁矿等在生物地球化学作用下被氧化成了弱磁性矿物赤铁矿、褐铁矿等,因而古土壤的磁化率值不但低于剖面中的黄土,而且远远低于黄土高原古土壤。其变化机制可以用阿拉斯加的“风速论”来解释。

同时,通过设计实验分析可知塔勒德沉积物中含有易溶矿物,其对磁化率具有一定的影响。稀HAc在实验中未改变沉积物中大部分磁性矿物的结构与特征,其改变值与碳酸盐含量基本一致,此结论也得到了伊犁盆地黄土、古土壤沉积物磁学研究的证明,即沉积物主要载磁矿物为磁铁矿,几乎不含超细粒超顺磁颗粒物,且颗粒整体较粗(Liu et al, 2012)。但改变值与碳酸盐含量间较小的差异也说明碳酸盐作为反磁性物质,其在土壤成壤过程中存在抑制磁化率增强的作用。因氯离子的强配位作用,HCl不仅能溶解沉积物中的次生碳酸盐物质,而且对含铁的硅酸盐矿物也有较大的分解作用,从而使得沉积物磁化率变化存在去碳酸盐的增大和磁性矿物分解的削弱的相互竞争过程,塔勒德剖面各沉积物磁化率值在加入HCl后表现出增大或减小的趋势。而更好了解伊犁黄土的磁性增减规律,沉积物中各组分对磁化率的影响还需要对样品做进一步分析研究。

## 4 结论

通过对西风区塔勒德黄土-古土壤沉积物磁

化率变化特征及影响分析,本文得出以下基本认识:塔勒德黄土-古土壤序列中低频磁化率值在古土壤层( $S_0$ 除外)中明显低于黄土层,且较黄土高原古土壤值小1~2倍。频率磁化率也远小于黄土高原,其特征与伊犁盆地其他剖面研究结果一致。碳酸钙含量在 $S_1$ 层中含量明显高于黄土,且较黄土高原古土壤高,且与剖面磁化率负相关,在古土壤中相关度更显著。间冰期的干旱气候环境是形成其磁化率、碳酸盐分布特征的主要原因。通过设计实验表明,塔勒德沉积物中碳酸钙对磁化率的影响程度不一,在黄土中约在15%,而对古土壤影响较大,最大可达35%。HAc的添加未改变沉积物中大部分磁性矿物的结构与特征,这与沉积物中载磁矿物为磁铁矿,不含超细粒超顺磁颗粒物,且颗粒整体较粗研究一致。而HCl对沉积物磁化率的去碳酸盐的增大和磁性矿物分解的削弱作用的相互竞争过程,使得沉积物磁化率值表现出增大或减小的趋势。而更好了解伊犁黄土的磁性增减规律,沉积物中各组分对磁化率的影响还需要对样品做进一步分析研究。

**致谢:** 在分析研究过程中得到了南京师范大学杨胜利、兰州大学高红山和李琼的帮助与支持,在此特致谢意!

### 参考文献

- 陈秀玲,李志忠,贾丽敏,等. 2013. 新疆伊犁河谷沙漠沉积的稀土元素特征及其环境意义[J]. *第四纪研究*, 33(2): 368-375. [Chen X L, Li Z Z, Jia L M, et al. 2013. Rare earth element characteristics of and their environmental implication [J]. *Quaternary Sciences*, 33(2): 368-375.]
- 邓成龙,袁宝印,胡守云,等. 2000. 环境磁学某些研究进展评述[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 20(2): 93-101. [Deng C L, Yuan B Y, Hu S Y, et al. 2000. Environmental magnetism: a review [J]. *Marine geology & quaternary geology*, 20(2): 93-101.]
- 韩家懋,Has J J,刘东生,等. 1991. 马兰黄土和离石黄土的磁学性质[J]. *第四纪研究*, 11(4):310-325. [Han J M, Has J J, Liu T S, et al. 1991. Magnetic properties of the malan and lishi formations [J]. *Quaternary Sciences*, 11(4): 310-325.]
- 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.]
- 李传想, 宋友桂. 2011. 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. 2011. Differences in magnetic susceptibility enhancement in Ili Loess, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(1): 80–86.]
- 刘东生. 1997. 第四纪环境 [M]. 北京: 科学出版社. [Liu T S. 1997. Quaternary environment [M]. Beijing: Science Press.]
- 刘东生. 1985. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社. [Liu T S. 1985. Loess and the environment [M]. Beijing: Science Press.]
- 刘秀铭, 刘东生, Shaw J. 1993. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义 [J]. *第四纪研究*, (3): 281–287. [Liu X M, Liu T S. 1993. Magnetic mineral characteristics of Chinese loess and its palaeoclimatic significance [J]. *Quaternary Sciences*, (3): 281–287.]
- 史正涛, 董 铭, 方小敏. 2007. 伊犁盆地晚更新世黄土-古土壤磁化率特征 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 43(2): 7–10. [Shi Z T, Dong M, Fang X M, et al. 2007. The characteristics of Later Pleistocene loess-paleosol magnetic susceptibility in Ili basin [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 43(2): 7–10.]
- 史正涛, 宋友桂, 安芷生. 2006. 天山黄土记录的古尔班通古特沙漠形成演化 [J]. *中国沙漠*, 26(5): 675–679. [Shi Z T, Song Y G, An Z S. 2006. Evolution of Gurbantunggut Desert recorded by Tianshan Loess [J]. *Journal of Desert Research*, 26(5): 675–679.]
- 史正涛. 2005. 新疆伊犁黄土地层形成时代及环境研究 [R]. 西安: 中国科学院地球环境研究所博士后出站报告. [Shi Z T. 2005. Age of Yili loess in Xijiang and its paleoenvironmental implications [R]. Xi'an: The report of postdoctoral workstation in Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences.]
- 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 Yili Basin, Central Asia [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 30(2): 267–272.]
- 旺 罗, 刘东生, 韩家懋. 2000. 中国第四纪黄土环境磁学研究进展 [J]. *地球科学进展*, 15(3): 335–341. [Wang L, Liu T S, Han J M, et al. 2000. Environmental magnetism of Chinese Quaternary loess: A brief review [J]. *Advance in Earth Sciences*, 15(3): 335–341.]
- 夏敦胜, 陈发虎, 马剑英, 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): 902–909. [Xia D S, Chen F H, Ma J Y, et al. 2010. Magnetic characteristics of loess in the Ili area and the environmental implication [J]. *Quaternary Science*, 30(5): 902–909.]
- 叶 玮. 2001. 新疆西风区黄土沉积特征与古气候 [M]. 北京: 海洋出版社. [Ye W. 2001. The loess deposition features and paleoclimate in Westerly Region of Xinjiang [M]. Beijing: Ocean Press.]
- 叶 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. 2001. Study on Magnetic Susceptibility of Loess and Paleosol Sequences in Westerly Region of Xinjiang [J]. *Journal of Desert Research*, 21(4): 380–386.]
- An Z S, Kukla G, Porter S C, et al. 1991. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of China over last 130, 000 years [J]. *Quaternary Research*, 36: 29–36.
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L et al. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 411: 62–66.
- An Z S, Liu D S, Lu Y C, et al. 1990. Long term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in Central China [J]. *Quaternary International*, 7–8: 91–95.
- An Z S. 2000. The history and variability of East Asian monsoon climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 19: 171–187.
- 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.
- Guo Z T, William F R, Hao Q Z, et al. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 416: 159–163.
- Jia J, Xia D S, Wei H T, et al. 2010. A magnetic investigation of a loess/paleosol sequences record in Ili area [J]. *Front*

- Earth Sciences*, 4: 259–268.
- Liu Y, Shi Z T, Deng C L, et al. 2012. Mineral magnetic investigation of the Talede loess-palaeosol sequence since the last interglacial in the Yili basin in the Asian interior [J]. *Geophysical Journal International*, 190 (1): 267–277.
- Maher B A, Alekseev A, Alekseeva T. 2003. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: Climatic dependence of pedogenic magnetite formation [J]. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 201: 321–341.
- Maher B A, Thompson R, Zhou L P. 1994. Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian palaeomonsoon: A new mineral magnetic approach [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 125: 461–471.
- Maher B A. 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: Paleoclimatic implications [J]. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 37: 25–54.
- Nie J S, Song Y G, John W et al. 2009. Consistent grain size distribution of pedogenic maghemite of surface soils and Miocene loessic soils on the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Quaternary Science*, 25: 261–266.
- Rao Z G, Xu Y B, Xia D S. 2013. Variation and paleoclimatic significance of organic carbon isotopes of Ili loess in arid Central Asia [J]. *Organic Geochemistry*, 63: 56–63.
- 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, Li C X, Zhao J D, et al. 2012. A combined luminescence and radiocarbon dating study of the Ili loess, Central Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 10(7): 2–7.
- Song Y, Shi Z, Fang X, et al. 2010. Loess magnetic properties in the Ili Basin and their correlation with the Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 53: 419–431.
- Zhang W, Shi Z T, Chen G J, et al. 2013. Geochemical characteristics and environmental significance of Talede loess-paleosol sequences of Ili Basin in Central Asian [J]. *Environmental Earth Sciences*, 70(5): 2191–2202.
- Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. 1990. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess [J]. *Nature*, 346: 737–739.