

文章编号: 1000-0550(2017)03-0516-11

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.03.010

新疆柴窝堡盆地南缘晚新生代陆源沉积物岩石磁学特征及其古环境意义

王振, 邱思静, 陈一凡, 程璐, 吕红华, 郑祥民

华东师范大学地理科学学院, 上海 200241

摘要 亚洲内陆晚新生代干旱化历史及其驱动机制是非常重要的科学问题。选择天山北麓柴窝堡盆地南缘乌鲁木齐河剖面为研究对象, 基于磁性地层年代学研究建立的时间标尺, 分析了该剖面碎屑沉积物岩石磁学特征及其控制因素, 进一步探讨了柴窝堡盆地晚新生代古气候特征。磁性地层年代学研究约束乌鲁木齐河剖面底界年龄为~6.8 Ma, 顶界年龄为~3.3 Ma。详细的岩石磁学测量及漫反射光谱分析结果表明, 乌鲁木齐河剖面沉积物中磁性矿物主要包括磁铁矿、赤铁矿等, 磁学参数 χ_{lf} 、 χ_{ARM} 、SIRM、 S_{-100mT} 、 S_{-300mT} 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 等在~6.3 Ma、~5.2 Ma存在明显变化, 揭示磁性矿物粒度、含量等存在相应变化, 如在~6.3 Ma前后, 磁性矿物颗粒逐渐变粗、含量降低; 在~5.2 Ma前后, 磁性矿物颗粒逐渐变细后趋于稳定、含量逐渐增多。基于稀土元素分析、沉积粒度与磁学参数相关性分析, 认为沉积物源与沉积物粒度不是导致乌鲁木齐河剖面磁学性质变化的主要因素, 自~6.8 Ma以来逐步干旱化的气候条件可能是导致该剖面磁学特征变化的重要原因。基于漫反射光谱分析得到的红度与亮度数据结果也揭示了同样的古气候特征。

关键词 岩石磁学; 干旱化; 晚新生代; 柴窝堡盆地; 天山北麓

第一作者简介 王振, 男, 1991年出生, 硕士研究生, 自然地理学, E-mail: zwang0925@163.com

通讯作者 吕红华, 男, 副教授, E-mail: hhlv@geo.ecnu.edu.cn

中图分类号 P584 **文献标识码** A

0 引言

随着全球气候变冷^[1-4]和青藏高原隆升^[5-7], 亚洲环境发生了深刻变化, 其中最显著的变化就是亚洲内陆干旱化^[8-12]、季风环流系统的形成和发展^[13-15]。气候系统的调整对人类生存和人类社会的发展会产生极为深刻和广泛的影响, 因此其演化历史及驱动机制备受科学界的关注^[16]。我国西北地区地处亚洲内陆, 对其晚新生代干旱化历史的认识有助于理解亚洲内陆乃至全球的气候演化历史, 是开展相关研究的一个重要区域。

近年来, 岩石磁学方法被广泛应用于古气候研究与古环境重建^[17-18]。聚焦于亚洲内陆晚新生代干旱化历史, 前人基于黄土—古土壤序列、湖泊与海洋沉积物的岩石磁学研究成功反演了晚新生代气候历史^[19-22]。亚洲内陆面积广阔, 更多的研究有助于更好地揭示该地区晚新生代气候演化的历史。基于此, 本文选择新疆天山北麓柴窝堡盆地南缘晚新生代陆源沉积物为研究对象, 基于磁性地层年代学研究建立

的时间标尺, 揭示了研究剖面陆源沉积物岩石磁学性质及其变化特征, 并基于沉积粒度分析、漫反射光谱测试等, 探讨了影响磁学性质的主要因素, 进一步探讨了研究区晚新生代古气候特征。

1 区域概况

新疆天山北麓柴窝堡盆地东起达坂城, 西至西山, 南起南天山, 北至博格达山(东天山), 东西长120 km, 南北宽20~30 km^[23]。盆地东部为中、高山, 西部为低山丘陵(图1A)。盆地内多年平均气温为6.5℃, 多年平均降水量为248.8 mm, 多年平均蒸发量为2 607.3 mm^[24]。

柴窝堡盆地是一个中、新生代都有明显构造活动的复合型盆地^[25]。盆地南北两侧均为强烈上升的挤压褶皱断块山地, 山区河流发育, 成为盆地内碎屑沉积物的运输通道。构造上, 柴窝堡盆地南以柴窝堡南缘逆断裂为界, 与依连哈比尔尕复背斜相接; 北以乌拉泊—白杨沟隐伏断裂与博格达复背斜相邻^[26]。地层上, 柴窝堡盆地的基底主要包括二叠系、三叠系和

侏罗系地层,盆地沉积则包括新生界和第四系沉积地层,其中新生界地层岩性主要以泥岩、粉砂岩和砂岩为主,其上部含有一定厚度的砾岩,而第四系地层主要为厚层的砂砾石堆积。在柴窝堡盆地南缘,由于柴窝堡盆地南缘断裂北支(即板房沟断裂)的逆冲作用,发育形成了萨尔乔克背斜^[27-28]。尽管萨尔乔克背斜的地貌表现不是特别典型,但乌鲁木齐河在此产生了强烈的下切侵蚀,从而沿河谷形成了露头条件较好的晚新生代地层剖面(下文统称为乌鲁木齐河剖

面,图 1B),笔者选择这些天然地层露头开展本文的研究工作。

2 剖面岩性特征与年代标尺

野外实测的乌鲁木齐河剖面厚度约为 303 m(图 2)。剖面岩性主要包括泥岩与砾岩,其中砾岩主要分布在 60~190 m 深度范围。剖面中泥岩主要呈现为浅棕红色,剖面上部的泥岩稍浅,略呈黄色;砾岩层呈灰色,部分层位由于含一定量的黏土而呈现为浅棕

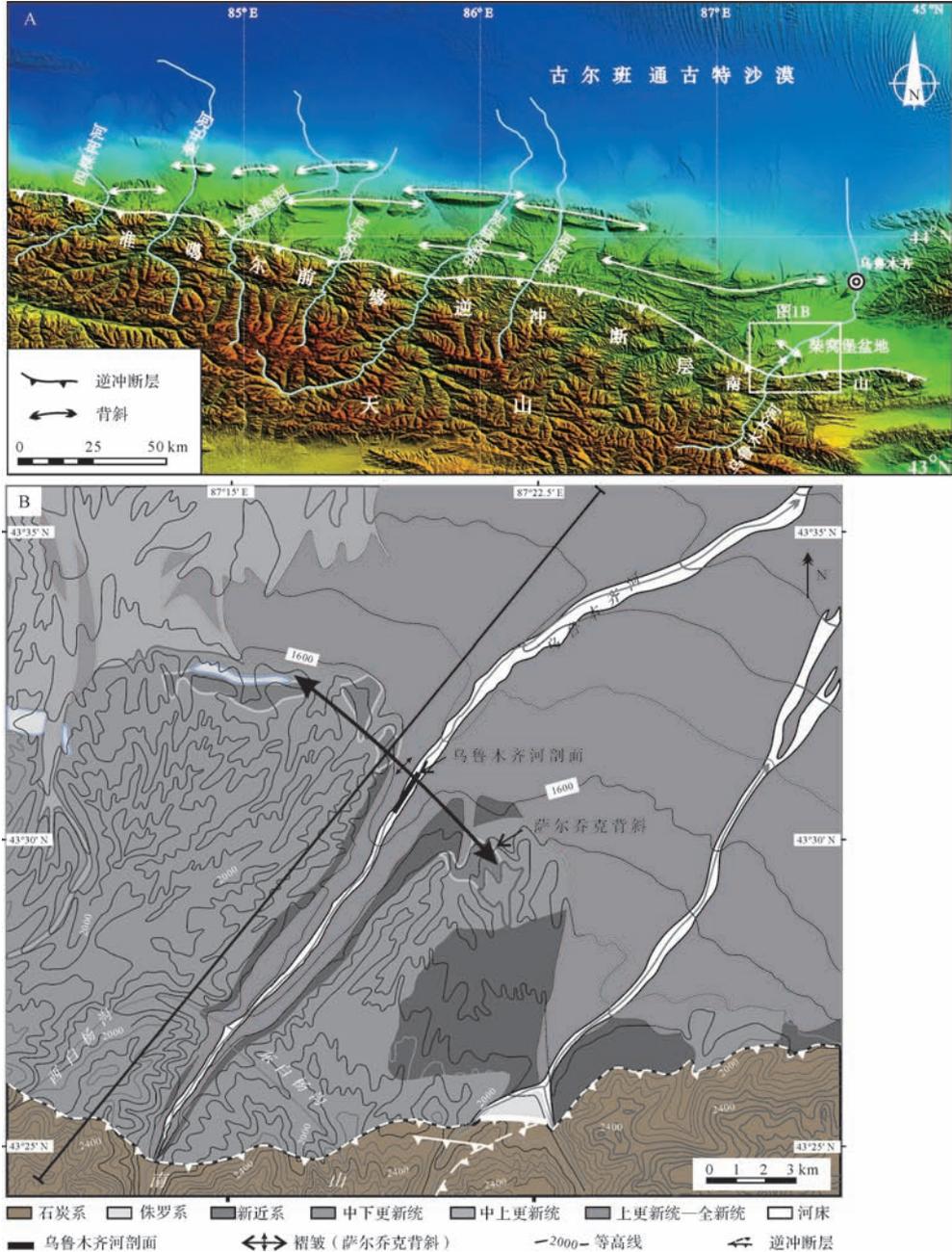


图 1 A.基于数字高程模型(DEM)的天山北麓构造与地貌特征;B.乌鲁木齐河山前地质背景与地形特征

Fig.1 A. Tectonic and geomorphic characters of the northern Chinese Tian Shan foreland based on digital elevation model (DEM); B. Geological setting and topography in the mountain front of the Urumqi River

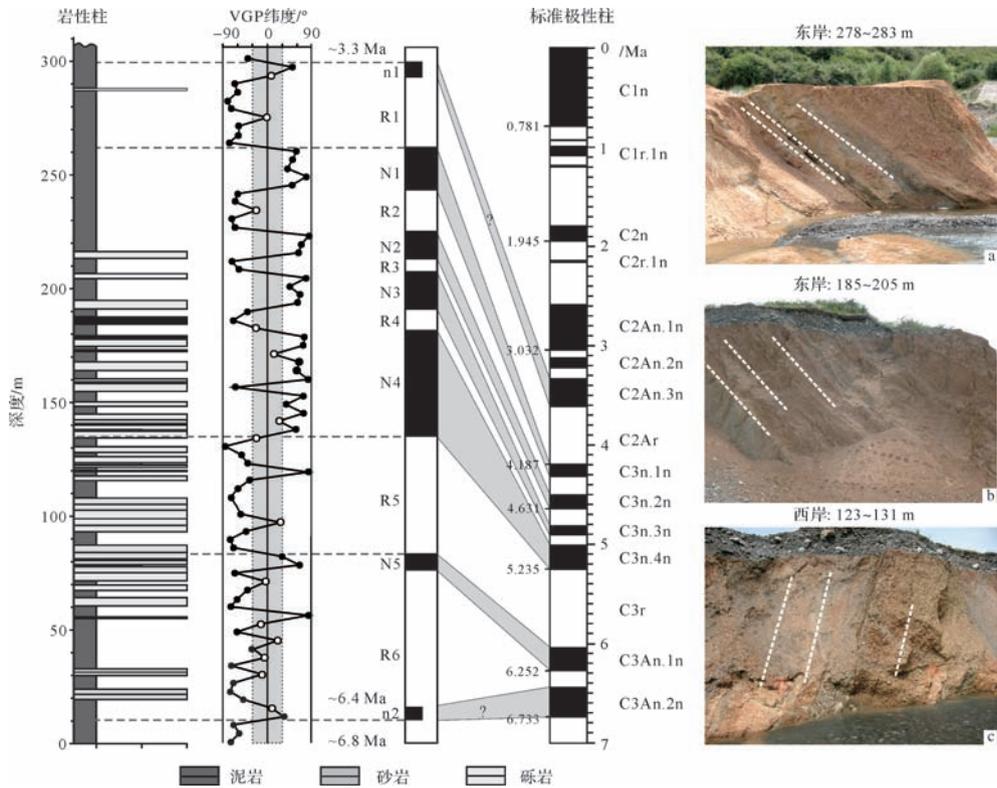


图2 乌鲁木齐河剖面岩性、磁性地层与典型地层露头 (据 Lu *et al.*^[28])

标准极性柱根据 Lourens *et al.*^[30]; 典型地层露头照片中的数字指该采样层在剖面中的深度范围

Fig.2 Lithology, magnetic polarity stratigraphy and typical outcrops of the Urumqi River section (after Lu *et al.*^[28])

红色。综合来看,剖面主要由棕黄色和浅棕红色泥岩组成,但是剖面中间部分为灰色砾岩与浅棕黄色泥岩互层(图2)。根据岩相组合特征,乌鲁木齐河剖面沉积环境应该属于冲积扇—湖泊沉积体系^[28],与天山北麓晚新生代的沉积环境一致^[29]。野外考察发现,乌鲁木齐河剖面地层产状的最大特征在于地层倾角在靠近背斜核部(北)的位置最大,向背斜翼部逐渐变小^[28]。剖面中没有明显的地层错断和不整合,剖面地层应为连续沉积所形成^[28]。

对于乌鲁木齐河剖面的地层年代, Lu *et al.*^[28]进行了详细的磁性地层学研究。在剖面中布置了82个采样点,共采集古地磁样品184个。基于热退磁结果,最终用于建立乌鲁木齐河剖面磁极性柱的样品数为64个。选用 Lourens *et al.*^[30]的标准极性柱进行对比,进一步结合乌鲁木齐河剖面上覆的冲积砾石层的年代^[28],给出了图2所示的对比结果。根据这一对比结果,确定乌鲁木齐河剖面的底界年龄为~6.8 Ma,顶界年龄为~3.3 Ma(图2)。这一磁性地层研究为探讨乌鲁木齐河剖面晚新生代陆源沉积物的岩石磁学特征及其古环境意义提供了可靠的时间标尺。

3 研究方法

本文基于在古地磁采样点获得的样品,进行了岩石磁学、漫反射光谱、沉积粒度以及稀土元素等方面的测试与分析。

所有样品经研磨后在烘箱中烘干,温度控制在35℃。称取7.0 g烘干样并用塑料保鲜膜包紧,装入磁学专用盒并压实。利用 Bartington MS2 双频磁化率仪测量低频(0.47 kHz)和低频(4.7 kHz)磁化率(χ_{lf} , χ_{hf}),计算频率磁化率 $\chi_{fd}\% = [(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}] \times 100$ 。利用 Molspin 交变退磁仪(交变磁场峰值100 mT,直流磁场0.04 mT)产生非磁滞剩磁(ARM),以 Minispin 旋转磁力仪测定 ARM(本文表达为其磁化率形式 χ_{ARM})。随后利用 Molspin 脉冲磁化仪获得样品在1 T, -100 mT 和 -300 mT 磁场下的等温剩磁(IRM),并利用旋转磁力仪测定。本文中将1 T 磁场中获得的IRM称为饱和等温剩磁(SIRM),并计算退磁参数 $S_{-100mT} = [(SIRM - IRM_{-100mT}) / (2 \times SIRM)] \times 100$ 、 $S_{-300mT} = [(SIRM - IRM_{-300mT}) / (2 \times SIRM)] \times 100$ ^[31],以及 χ_{ARM} / χ_{lf} 和 $\chi_{ARM} / SIRM$ 。岩石磁学测试在

华东师范大学河口海岸学国家重点实验室完成。

所有样品进行漫反射光谱测试。将烘干样置于玛瑙研钵中研磨,之后将粉末状样品压进直径4 cm的圆塑料环中。样品漫反射光谱测试所用仪器为Perkin Elmer Lambda 900 spectrophotometer,测量光谱范围为400~700 nm,步长为0.5 nm,扫描速度为300 nm/min,对实验数据进行一阶导数分析。通常,一阶导数的波峰指示分析样品中是否存在黏土矿物及磁性矿物^[32]。根据Ji *et al.*^[32]的方法,进一步计算每个样品的红度值,其为样品在波长630~700 nm间的漫反射强度总和与波长400~700 nm间的漫反射强度总和的比值,常用来指示沉积物中铁氧化物的含量^[32]。漫反射光谱测试在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室完成。

对剖面中所有样品进行了沉积粒度分析。先用5% H₂O₂和0.2 g/mol HCl去除样品中的有机质和碳酸盐,之后向样品中加入0.5 g/mol (NaPO₃)₆并进行超声波震荡分散。充分震荡过后的样品用于粒度测试,测试仪器为Mastersizer 2000激光粒度仪,测量范围0.04~2 000 μm,测试误差小于1%。测试过程中样品浓度控制在10%~15%,通常为13%~14%。粒度测试在华东师范大学地理科学学院完成。

为探讨沉积物源对乌鲁木齐河剖面磁学特征的可能影响,基于磁学测量结果,本文选择部分样品进行了稀土元素分析,测试分析在同济大学海洋地质国家重点实验室完成,分析步骤详见邵磊等^[33]。测试仪器为VGX7型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),

标准样GSR5、GSR6和GSR9用来控制测试精度,测试误差小于2%。

4 结果

如图3所示,岩石磁学参数分别在~6.3 Ma、~5.2 Ma发生了明显的变化。根据这种变化,将乌鲁木齐河剖面划分为三层:第一层(0~64 m)、第二层(64~141 m)、第三层(141~303 m),各层的磁学特征如下所述。

4.1 磁性矿物粒度

χ_{fd} (%)反映超顺磁(SP)与单畴(SD)颗粒界限附近细黏滞性超顺磁颗粒对磁化率的贡献^[34]。当 χ_{fd} <5%时,SP颗粒对磁化率的贡献较小;当 χ_{fd} >5%时,SP颗粒对磁化率的贡献较大^[35]。如图3d所示,乌鲁木齐河剖面中 χ_{fd} 基本上都小于5%,表明SP颗粒对磁化率的贡献较小。

χ_{ARM}/χ_{lf} 常被用作指示磁性矿物晶粒大小,高值反映较细的单畴颗粒,低值指示较粗的多畴颗粒。若样品中含有大量的SP颗粒,也可能造成 χ_{ARM}/χ_{lf} 的低值^[36]。而 $\chi_{ARM}/SIRM$ 也常被用来指示磁性矿物的晶粒大小,但是该参数不受SP颗粒的影响^[37]。在乌鲁木齐河剖面中, χ_{fd} 值较低(图3d),表明该剖面中SP颗粒含量较低,因此SP颗粒对于 χ_{ARM}/χ_{lf} 的影响不大。在第一层到第二层间, χ_{ARM}/χ_{lf} 随深度变深,呈现减小趋势,说明磁性矿物颗粒变粗。在0~78 m之间, χ_{ARM}/χ_{lf} 的值相当大,表明该层位磁颗粒相对较细。在第三层, χ_{ARM}/χ_{lf} 的值相对来说比较稳定,总体

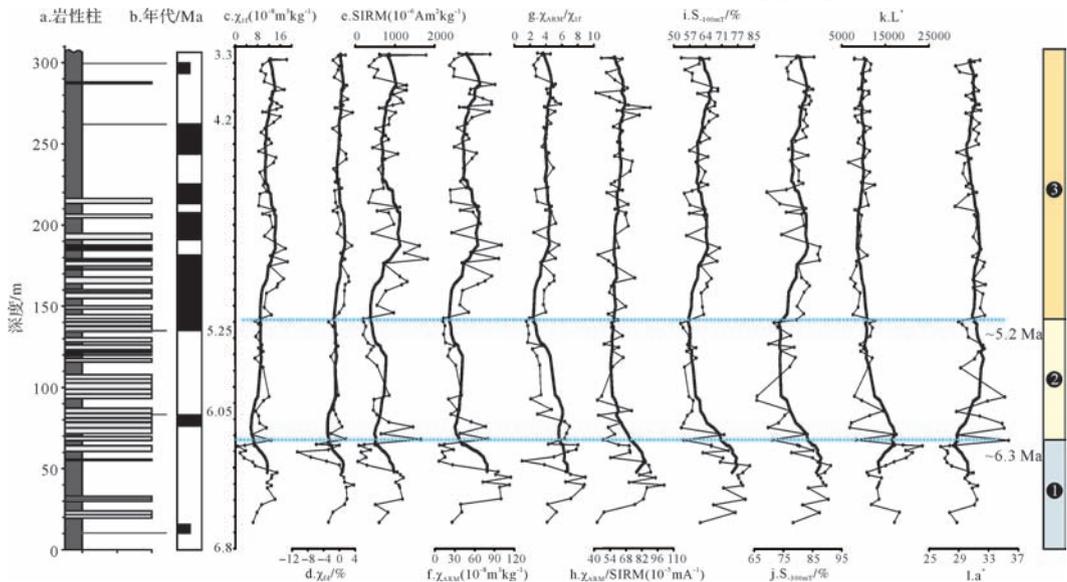


图3 乌鲁木齐河剖面磁学参数及亮度(L*)、红度(a*)变化曲线

Fig.3 The variations of magnetic properties, lightness (L*), redness (a*) of the Urumqi River section

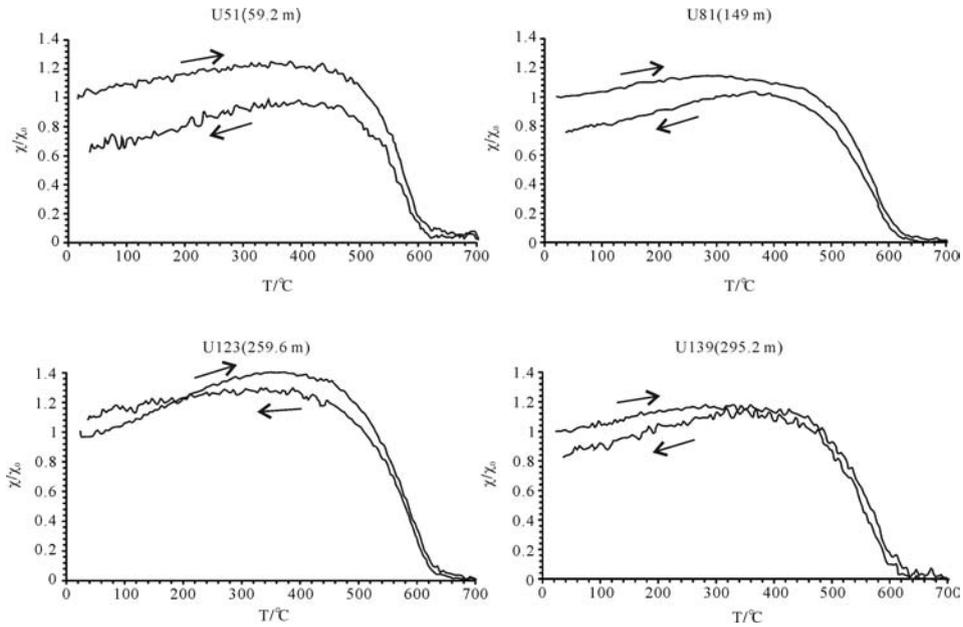


图4 乌鲁木齐河剖面典型样品的热磁曲线

Fig.4 Typical thermomagnetic curves of sediments in the Urumqi River section

上有增大的趋势,表明了磁性矿物颗粒变细。

4.2 磁性矿物类型和组合

热磁分析被广泛用于区分磁性矿物相^[38-39]。本文中典型样品的热磁曲线如图4所示。由图可知,不同深度样品的热磁曲线特征具有很高的相似性,表明各地层所含的磁性矿物种类基本一致。所有样品在约580℃时,样品磁化率明显降低,表明样品中含有磁铁矿;当加热至约680℃时,样品的磁化率仍有少许下降,指示样品中存在赤铁矿。

漫反射光谱分析(DRS)可以检测沉积物中是否存在针铁矿(Gt)和赤铁矿(Hm)等磁性矿物。前人研究表明^[20,32,40],在漫反射光谱一阶导数图中,针铁矿具有典型的双峰,即在535nm处有一个主峰,在435nm处还有一个次峰;赤铁矿的特征反射峰则在555~575nm之间,其具体位置取决于赤铁矿含量或者成土型赤铁矿中铝的取代度^[32,40]。12个样品的漫反射光谱一阶导数图显示(图5),所有样品在565nm和435nm左右存在两个明显的峰,说明样品中存在赤铁矿和针铁矿。

S_{-100mT} 和 S_{-300mT} 通常反映不完整反铁磁性矿物(硬磁性矿物)和亚铁磁性矿物(软磁性矿物)的相对比例^[34,41],随着不完整反铁磁性矿物含量的增加而减小。如图3j所示,样品中 S_{-300mT} 在65%~92%之间变化,平均值为80%,表明亚铁磁性矿物在磁性矿物组份中占主导地位,但存在反铁磁性矿物的贡献。在

第一层中, S_{-300mT} 呈增加趋势;第二层中, S_{-300mT} 中呈递减趋势;第三层中, S_{-300mT} 在141~285m呈波动增加,在285~303m逐渐减小(图4j)。如图3i、3j所示, S_{-100mT} 在这三层中与 S_{-300mT} 具有相似的变化趋势,而如图3c所示, χ_{ir} 呈现出与 S_{-100mT} 一致的趋势,说明反铁磁性矿物对于磁化率的贡献并不占主导地位。

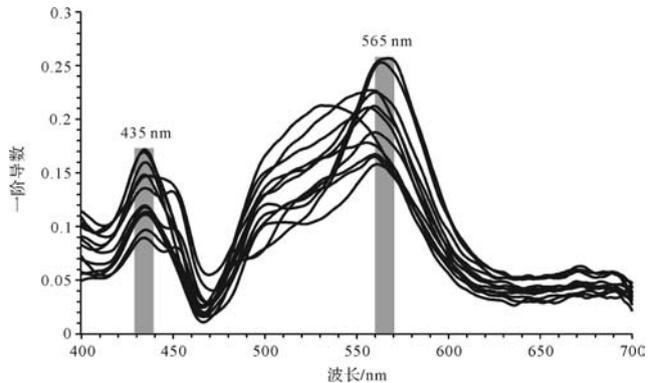


图5 乌鲁木齐河剖面典型样品的漫反射光谱一阶导数图

Fig.5 First derivative spectral patterns of representative samples of the Urumqi River section

4.3 磁性矿物含量

χ_{ir} 和SIRM通常反映了样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿)的含量^[34],与 χ_{ir} 不同的是,SIRM不受顺磁性和抗磁性矿物的影响。如图6a所示, χ_{ir} 和SIRM呈现出了高度的相关性,表明了 χ_{ir} 主要是由亚铁磁性矿物所控制。从乌鲁木齐河剖面来看,如图3c所示,

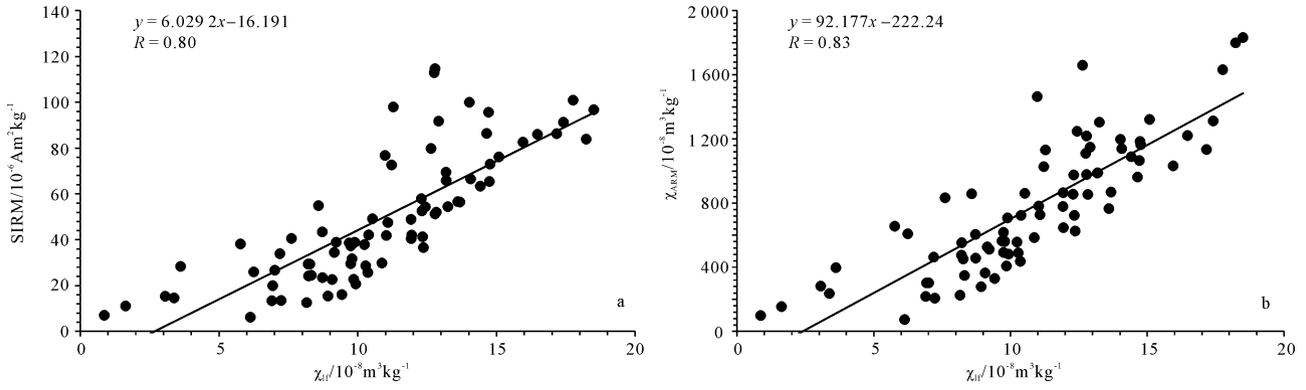


图6 乌鲁木齐河剖面磁学参数之间的相互关系

Fig.6 Relationships between magnetic parameters of the Urumqi River section

χ_{if} 最大值 $18.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 最小值 $0.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 平均值 $10.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 在第一层到第二层, χ_{if} 逐渐减小, 在第三层, 逐渐呈现出一个递增的趋势。如图 3e 所示, 与 χ_{if} 一样, SIRM 在第一层到第二层逐渐减小, 在第三层呈现出逐渐增加的趋势。

χ_{ARM} 是对稳定单畴亚铁磁性矿物颗粒极为敏感的参数^[37]。如图 3f 所示, 从第一层到第二层, 随着深度的加深, χ_{ARM} 呈现出递减的趋势, 但在 47 m 左右出现一个快速的下降。在第三层, χ_{ARM} 呈现逐渐增加的趋势, 并且明显可以看出, χ_{ARM} 与 SIRM 的变化趋势是极其相似的。如图 6b 所示, χ_{ARM} 与 χ_{if} 呈现出明显的相关性, 也说明了 χ_{if} 主要受控于亚铁磁性矿物。

5 讨论

5.1 磁学性质控制因素

陆源沉积物的磁学性质主要受沉积物的物源、粒度、沉积后期成岩作用等因素影响^[34,42-44], 而这些因素往往受构造背景、气候条件等控制。

稀土元素在表生环境中的化学性质非常稳定, 其组成及分布模式受风化作用、搬运过程、以及沉积和成岩作用的影响相对较小, 主要受母岩控制, 因而常被用作物源示踪剂^[45]。14 个样品的测试结果显示 (图 7), 分析样品的稀土元素配分模式明显一致。这可能表明乌鲁木齐河剖面晚新生代沉积的物源应该没有发生显著调整。因此, 沉积物源不太可能解释所观察到的乌鲁木齐河剖面磁学性质的变化。

沉积物粒度也可用来解释陆源沉积物磁性特征的变化。由上可知, 从第一层到第二层, 磁性矿物颗粒逐渐变粗; 在第三层, 磁性矿物颗粒逐渐变细。乌鲁木齐河剖面磁学参数与粒度参数的相关性分析显

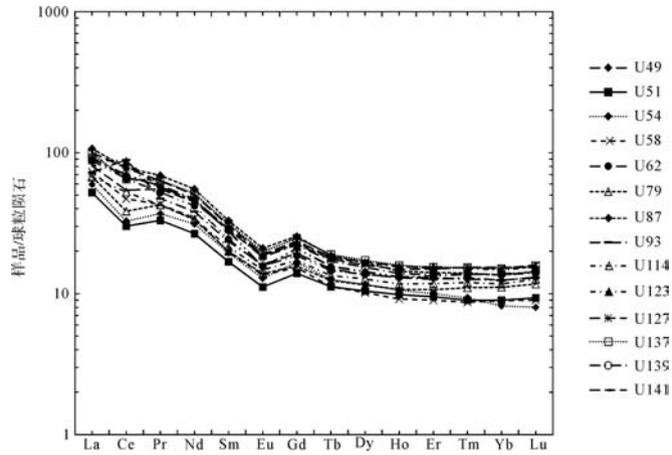


图7 乌鲁木齐河剖面沉积物稀土元素配分模式

Fig.7 Chondrite-normalized patterns of rare earth elements (REEs) of the Urumqi River section

示 (表 1), χ_{if} 与中值粒径、黏粒组份 ($<4 \mu\text{m}$) 分别呈现出明显的负相关关系和正相关关系, 而 χ_{ARM}/χ_{if} 与这两个粒度参数分别呈现出一定的正相关关系与负相关关系。这表明乌鲁木齐河剖面陆源沉积物中磁性颗粒主要富集在较细的粒度组份中。但 SIRM、 χ_{ARM} 、 $S_{-100\text{mT}}$ 、 $S_{-300\text{mT}}$ 等磁学参数 (反映磁性矿物类型与组合等) 与沉积粒度组份之间并没有显著的相关关系 (表 1)。上述相关分析表明, 沉积粒度并不能解释乌鲁木齐河剖面晚新生代陆源沉积物磁学性质的所有变化。

既然沉积物源与粒度不能解释乌鲁木齐河剖面陆源沉积物磁学性质的所有变化, 与构造和气候因素相关的成土过程、搬运与沉积过程中矿物相的变化就不容忽视。沉积物中有机质的降解可导致沉积后磁性矿物发生还原作用^[46]。有机质往往存在于较细的

表1 乌鲁木齐河剖面沉积粒度与磁学参数相关性分析

Table 1 The correlations between sediment particle size and rock magnetic parameters of the Urumqi River section

	χ_{if}	χ_{fd}	SIRM	χ_{ARM}	χ_{ARM}/χ_{if}	$\chi_{ARM}/SIRM$	S_{-100mT}	S_{-300mT}
<4 μm	0.436 *	0.254	0.088	0.157	-0.281 *	0.214	-0.026	-0.002
4~63 μm	0.004	-0.05	-0.045	-0.017	0.079	-0.003	0.184	0.124
>63 μm	-0.260	-0.108	-0.014	-0.08	0.099	-0.127	-0.148	-0.109
中值粒径	-0.425 *	-0.030	-0.108	-0.084	0.34 *	-0.02	0.14	0.044

注: * 表示在 0.01 水平显著相关。

沉积物中,且成岩作用会导致沉积物呈现灰色、指示还原环境。而乌鲁木齐河剖面整体上呈现棕黄色和棕红色(指示氧化环境),且在二、三层主要由砾石和砂组成(图 2a, b, c)。因此,还原环境下成岩作用对乌鲁木齐河剖面磁性矿物的影响可能相对较小。 χ_{fd} %通常指示成土作用(与化学风化作用相关)形成的超细铁磁性 SP 颗粒的含量^[34,44]。中国黄土磁学研究结果表明^[47], χ_{fd} %值越大指示成土作用越强,对应的气候也更加温暖湿润。在天山北麓, χ_{fd} %已被用于重建古气候历史^[21]。对于乌鲁木齐河剖面, χ_{fd} %整体较小,表明剖面中化学风化作用相对较弱,与柴窝堡盆地目前干旱少量、温差大的气候特征相一致。但干旱气候条件下的亚铁磁性矿物的氧化作用相对较强。如图 3i 所示,整体偏小的 S_{-100mT} 指示乌鲁木齐河剖面含有相对多的磁赤铁矿,而磁赤铁矿是水铁矿向赤铁矿或磁铁矿向赤铁矿转变过程中的中间产物^[32,40]。鉴于柴窝堡盆地化学风化作用相对较弱,推断乌鲁木齐河剖面中磁赤铁矿可能由于干旱气候条件下磁铁矿氧化产生。相似气候条件下的磁铁矿氧化成为磁赤铁矿已经被用来解释磁化率的变化^[44]。本文因此认为,气候干旱化的逐渐增强可能加剧了磁铁矿氧化作用,从而使得乌鲁木齐河剖面中 S_{-100mT} 逐渐减小。

5.2 乌鲁木齐河剖面记录的古气候历史

乌鲁木齐河剖面陆源沉积物磁学性质的变化主要受控于气候干旱化。气候干旱化可以得到岩石磁学结果的印证。由上可知,气候干旱化可促进磁铁矿的氧化,从而导致 S_{-100mT} 减小。从乌鲁木齐河剖面来看(图 3i, j),在~6.8~6.3 Ma 间,特别是在~6.3 Ma, S_{-100mT} 与 S_{-300mT} 都快速下降,表明磁性矿物组合发生变化,存在较多的中高矫顽力矿物。~6.3~5.2 Ma 间, S_{-100mT} 与 S_{-300mT} 呈现一个稳定的趋势,而 SIRM(图 3e)却呈现一个明显的增长趋势,表明亚铁磁性矿物增加。本文因此认为,在 6.3 Ma 附近发生气候干旱化,导致磁学性质发生变化。在~6.3~5.2 Ma 时期,

如图 3g 与 3h 所示, χ_{ARM}/χ_{if} 与 $\chi_{ARM}/SIRM$ 呈现降低的趋势,而在~5.2~3.3 Ma 间,比值参数 χ_{ARM}/χ_{if} 与 $\chi_{ARM}/SIRM$ 明显增大,表明磁性矿物颗粒变细。如图 3c、3e 所示,在~5.2~3.3 Ma 间, χ_{if} 与 SIRM 呈现增长趋势,表明亚铁磁性矿物的含量进一步增多。天山北麓广泛分布第四纪风成黄土。方小敏等^[19]在临夏盆地通过高分辨率岩石磁学记录来反演亚洲内陆干旱化的过程时认为,流域外风成物质含有较细的磁性矿物,它们的加入可能导致了研究区磁学性质发生变化。由上可知,在~5.2~3.3 Ma 间磁性矿物颗粒变细,由此推断,在 5.2 Ma 时增强的气候干旱化导致乌鲁木齐河剖面可能有风成物质的汇入,从而造成~5.2~3.3 Ma 间磁性矿物颗粒变细,磁学性质相应变化。

乌鲁木齐河剖面磁学参数记录的气候历史与该剖面色度指标分析结果一致。沉积物色度指标可以用于古气候研究^[48-49]。宋春晖等^[49]在研究临夏盆地湖相沉积物色度指标的古气候意义后发现,沉积物色度指标红度(a^*)、黄度(b^*)和彩度($C_{a^*b^*}$)的低值或亮度(L^*)高值可以反映气候干旱化程度,红度(a^*)、黄度(b^*)和彩度($C_{a^*b^*}$)的高值或亮度(L^*)低值可以反映气候湿润程度;这些参数变幅的大小可能代表气候的波动幅度或稳定程度。在乌鲁木齐河剖面中(图 3k, l),亮度(L^*)和红度(a^*)可明显分为三个阶段,分别为~6.8~6.3 Ma、~6.3~5.2 Ma 和~5.2~3.3 Ma。在~6.8~6.3 Ma 时期,亮度值(L^*)呈现递增趋势,但整体相对较小,变幅相对较小。随后,亮度值(L^*)变幅突然变大,整体相对增大。至 5.2 Ma 后,亮度(L^*)变幅变小,数值整体上相对稳定。红度(a^*)在变幅上与亮度(L^*)相当,但在数值整体上变化则相反。由此认为,乌鲁木齐河剖面在~6.3~5.2 Ma 以干旱为主,至 5.2 Ma 后气候干旱化程度进一步增强。

乌鲁木齐河剖面陆源沉积物记录的柴窝堡南缘古气候历史也在我国西部其他区域被揭示。孙有斌

和安芷生^[50]通过对黄土高原灵台剖面风尘序列的容重和碳酸盐含量测定,建立了最近7 Ma黄土高原风尘沉积通量变化时间序列,发现亚洲内陆粉尘源区~7 Ma以来存在阶段性增强的干旱化趋势,其中~3.6~2.6 Ma的粉尘通量增加最为显著,表明源区干旱程度增强。方小敏等^[19]根据对临夏盆地毛沟剖面河湖相沉积物的高分辨率岩石磁学研究推断,我国西北内陆现代干旱气候可能从~8.6 Ma开始,~7.4~6.4 Ma后急剧变干,~5.3 Ma后再次加速变干。Sun *et al.*^[51]则根据对塔里木盆地北部库车剖面湖相沉积物色度指标及可溶性盐分析推断,我国西北内陆存在两个气候干旱化阶段,第一个出现在~7.0~5.3 Ma之间,第二个极端干旱事件出现在~5.3 Ma。

6 结论

本文通过系统的岩石磁学测量、沉积粒度分析、稀土元素与漫反射光谱分析,得到以下主要认识:

(1) 岩石磁学和漫反射光谱表明,柴窝堡盆地南缘陆源沉积物磁性矿物主要包括磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿等。

(2) 一致的稀土元素配分模式、沉积粒度与磁学参数的相关性分析表明,乌鲁木齐剖面晚新生代陆源沉积物磁学特征不受物源与沉积粒度的控制,气候干旱化可能是导致该剖面磁学性质变化的主要原因。

(3) 磁学特征与基于漫反射光谱分析得到的色度指标表明,新疆柴窝堡盆地在6.3 Ma、5.2 Ma左右环境发生了显著变化,气候呈逐渐干旱化的趋势。

致谢 张卫国教授和刘晋嫣同学在实验过程中给予了帮助,评审专家和编辑为改进本文提出了诸多建议,在此一并表示深深的感谢!

参考文献 (References)

- [1] Miller K G, Fairbanks R G, Mountain G S. Tertiary oxygen isotope synthesis, sea level history, and continental margin erosion[J]. *Paleoceanography*, 1987, 2(1): 1-19.
- [2] Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686-693.
- [3] 刘冰,靳鹤龄,孙忠. 中晚全新世科尔沁沙地沉积物化学特征及其气候变化[J]. *沉积学报*, 2012, 30(3): 536-546. [Liu Bing, Jin Heling, Sun Zhong. Chemical characteristics of sediments in Horqin Desert and climatic change during the Middle and Late Holocene[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(3): 536-546.]
- [4] 李传想,宋友桂,千琳勃,等. 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*, 2011, 29(6): 1170-1179. [Li Chuanxiang, Song Yougui, Qian Linbo, et al. 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*, 2011, 29(6): 1170-1179.]
- [5] Molnar P. Mio-Pliocene growth of the Tibetan Plateau and evolution of East Asian climate[J]. *Palaeontologia Electronica*, 2005, 8(1): 1-23.
- [6] 安芷生,张培震,王二七,等. 中新世以来我国季风—干旱环境演化与青藏高原的生长[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 678-693. [An Zhisheng, Zhang Peizhen, Wang Erqi, et al. Changes of the monsoon-arid environment in China and growth of the Tibetan Plateau since the Miocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 678-693.]
- [7] 王修喜,李吉均,宋春晖,等. 青藏高原东北缘西秦岭新生代抬升—天水盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录[J]. *沉积学报*, 2006, 24(6): 783-789. [Wang Xiuxi, Li Jijun, Song Chunhui, et al. Cenozoic uplift of West Qinling, northeast margin of Tibetan Plateau: the record of detrital apatite fission track data in Tianshui Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(6): 783-789.]
- [8] Manabe S, Broccoli A J. Mountains and arid climates of middle latitudes[J]. *Science*, 1990, 247(4939): 192-195.
- [9] Rea D K, Snoeck H, Joseph L H. Late Cenozoic Eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the Northern Hemisphere[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(3): 215-224.
- [10] 弓虎军,张云翔,黄雷. 甘肃临夏盆地新近纪红粘土粒度组成的古环境意义[J]. *沉积学报*, 2005, 23(2): 260-267. [Gong Hujun, Zhang Yunxiang, Huang Lei. Paleoenvironment significance of grain-size composition of Neogene red clay in Linxia Basin, Gansu province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(2): 260-267.]
- [11] 宋春晖,孟庆泉,夏维民,等. 青藏高原北缘古近纪石英砂表面特征及其古环境意义[J]. *沉积学报*, 2009, 27(1): 94-103. [Song Chunhui, Meng Qingquan, Xia Weimin, et al. The Eocene surface texture of quartz sand and paleoclimatic change in northern margin of Tibetan Plateau[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 94-103.]
- [12] 滕晓华,张志高,韩文霞,等. 塔里木盆地南缘黄土粒度特征及其环境意义[J]. *沉积学报*, 2015, 33(5): 941-950. [Teng Xiaohua, Zhang Zhigao, Han Wenxia, et al. Grain-size characteristics and its environmental significance of loess from southern Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(5): 941-950.]
- [13] 安芷生,吴国雄,李建平,等. 全球季风动力学与气候变化[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(6): 341-381. [An Zhisheng, Wu Guoxiong, Li Jianping, et al. Global monsoon dynamics and climate change[J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(6): 341-381.]
- [14] Wang P X, Clemens S, Beaufort L, et al. Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(5/6): 595-629.
- [15] 汪品先. 低纬过程的轨道驱动[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5):

- 694-701. [Wang Pinxian. Orbital forcing of the low-latitude processes[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 694-701.]
- [16] 李吉均,方小敏,潘保田,等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J]. 第四纪研究,2001,21(5):381-391. [Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian, et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 381-391.]
- [17] 柯学,季军良,宋博文,等. 柴达木盆地大红沟剖面新生代地层岩石磁学特征与环境演变[J]. 地质通报,2013,32(1):111-119. [Ke Xue, Ji Junliang, Song Bowen, et al. The Cenozoic rock magnetic characteristics of the Dahonggou section in Qaidam Basin and the climate change[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(1): 111-119.]
- [18] 张鹏,敖红,安芷生,等. 兰州盆地渐新世沉积物岩石磁学性质探究[J]. 地球物理学报,2015,58(7):2445-2459. [Zhang Peng, Ao Hong, An Zhisheng, et al. Rock magnetism properties of Oligocene sediments in the Lanzhou Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(7): 2445-2459.]
- [19] 方小敏,徐先海,宋春晖,等. 临夏盆地新生代沉积物高分辨率岩石磁学记录与亚洲内陆干旱化过程及原因[J]. 第四纪研究,2007,27(6):989-1000. [Fang Xiaomin, Xu Xianhai, Song Chunhui, et al. High resolution rock magnetic records of Cenozoic sediments in the Linxia Basin and their implications on drying of Asian Inland[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 989-1000.]
- [20] Zhang Weiguo, Yu Lizhong, Lu Min, et al. East Asian summer monsoon intensity inferred from iron oxide mineralogy in the Xiashu Loess in southern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(3/4): 345-353.
- [21] 闫晓丽,张启波,方小敏,等. 临夏盆地黑林顶剖面沉积物在8.6 Ma前后岩石磁学特征及其意义[J]. 沉积学报,2010,28(6):1190-1197. [Yan Xiaoli, Zhang Qibo, Fang Xiaomin, et al. Rock magnetic characteristics of the sediments from Heilinding section in the Linxia Basin at 8.6 Ma and their implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1190-1197.]
- [22] Chang Hong, An Zhisheng, Liu Weiguo, et al. Magnetostratigraphic and paleoenvironmental records for a Late Cenozoic sedimentary sequence drilled from Lop Nor in the eastern Tarim Basin [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 80-81: 113-122.
- [23] 马龙,吴敬禄,吉力力·阿不都外力. 新疆柴窝堡湖沉积物中环境敏感粒度组分揭示的环境信息[J]. 沉积学报,2012,30(5):945-954. [Ma Long, Wu Jinglu, Jilili Abuduwalil. Environmental changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records in Chaiwopu Lake, Xinjiang[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(5): 945-954.]
- [24] 殷秀兰,李文鹏,王俊桃,等. 新疆柴窝堡盆地地下水化学及稳定同位素研究[J]. 地质学报,2010,84(3):439-448. [Yin Xiulan, Li Wenpeng, Wang Juntao, et al. Hydro-chemical and isotopic research in Chaiwopu Basin, Ürtimqi River Catchment[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(3): 439-448.]
- [25] 陈建波,宋和平,李帅,等. 新疆柴窝堡盆地南缘断层盐湖段晚第四纪变形特征[J]. 防灾减灾工程学报,2014,34(增刊1):59-65. [Chen Jianbo, Song Heping, Li Shuai, et al. Later Quaternary deformation characteristics of salt lake segment of southern margin fault in Chaiwopu Basin, Xinjiang Region[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2014, 34(Suppl. 1): 59-65.]
- [26] 陈兰,伊海生,木合塔尔·扎日. 新疆柴窝堡盆地新构造运动对地下水的影响[J]. 成都理工学院学报,2002,29(5):555-560. [Chen Lan, Yi Haisheng, Muhetaer Zari. Effects of neotectonic movement on groundwater in the Chaiwobao Basin of Xinjiang [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2002, 29(5): 555-560.]
- [27] Lu Honghua, Zhang Tianqi, Zhao Junxiang, et al. Late Quaternary alluvial sequence and uplift-driven incision of the Urumqi River in the north front of the Tian Shan, northwestern China[J]. *Geomorphology*, 2014, 219: 141-151.
- [28] Lu Honghua, Wang Zhen, Zhang Tianqi, et al. Latest Miocene to Quaternary deformation in the southern Chaiwopu Basin, northern Chinese Tian Shan foreland[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(12): 8656-8671.
- [29] Lu Honghua, Burbank D W, Li Youli, et al. Late Cenozoic structural and stratigraphic evolution of the northern Chinese Tian Shan foreland[J]. *Basin Research*, 2010, 22(3): 249-269.
- [30] Lourens L, Hilgen F, Shackleton N J, et al. The Neogene period [M]//Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G. *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 409-440.
- [31] Torrent J, Liu Qingsong, Bloemendal J, et al. Magnetic enhancement and iron oxides in the upper Luochuan Loess-Paleosol sequence, Chinese Loess Plateau[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1570-1578.
- [32] Ji Junfeng, Shen Ji, Balsam W, et al. Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau Since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1/2): 61-70.
- [33] 邵磊,李昂,吴国瑄,等. 琼东南盆地沉积环境及物源演变特征[J]. 石油学报,2010,31(4):548-552. [Shao Lei, Li Ang, Wu Guoxuan, et al. Evolution of sedimentary environment and provenance in Qiongdongnan Basin in the northern South China Sea[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 31(4): 548-552.]
- [34] Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*[M]. London: Allen and Unwin, 1986: 1-227.
- [35] Dearing J. *Magnetic susceptibility*[M]//Walden J, Oldfield F, Smith J P. *Environmental Magnetism: a Practical Guide*. Technical Guide No.6. London: Quaternary Research Association, 1999: 35-62.
- [36] Banerjee S K, King J, Marvin J. A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 1981, 8(4): 333-336.
- [37] Mather B A. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites[J]. *Geophysical Journal International*, 1988, 94(1): 83-

- 96.
- [38] 张志高,迟云平,脱世博,等. 塔里木盆地西北缘库孜贡苏剖面晚白垩世—早中新世沉积物岩石磁学研究[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 919-927. [Zhang Zhigao, Chi Yunping, Tuo Shibo, et al. Rock-magnetic characteristics of the Late Cretaceous-Early Miocene sediments on the Kuzigongsu section of the northwestern Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(5): 919-927.]
- [39] Deng C, Zhu R, Jackson M J, et al. Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese loess plateau: a pedogenesis indicator[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(11/12): 873-878.
- [40] Deaton B C, Balsam W L. Visible spectroscopy—a rapid method for determining hematite and goethite concentration in geological materials[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1991, 61(4): 628-632.
- [41] Bloemendal J, Liu Xiuming. Rock magnetism and geochemistry of two Plio-Pleistocene Chinese loess-palaeosol sequences—implications for quantitative palaeoprecipitation reconstruction[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 226(1/2): 149-166.
- [42] 潘永信,朱日祥. 环境磁学研究现状和进展[J]. 地球物理学进展, 1996, 11(4): 87-99. [Pan Yongxin, Zhu Rixiang. The progress of environmental magnetism [J]. *Progress in Geophysics*, 1996, 11(4): 87-99.]
- [43] 张卫国,戴雪荣,张福瑞,等. 近7000年巢湖沉积物环境磁学特征及其指示的亚洲季风变化[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1053-1062. [Zhang Weiguo, Dai Xuerong, Zhang Furui, et al. Magnetic properties of sediments from the Chaohu Lake for the last 7000 years and their implications for the evolution of Asian Monsoon[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 1053-1062.]
- [44] Zhang Weilin, Appel E, Fang Xiaomin, et al. Paleoclimatic implications of magnetic susceptibility in Late Pliocene-Quaternary sediments from deep drilling core SG-1 in the western Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B6): B06101, doi: 10.1029/2011JB008949.
- [45] 蒋富清,周晓静,李安春,等. δEu_N - ΣREEs 图解定量区分长江和黄河沉积物[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2008, 38(11): 1460-1468. [Jiang Fuqing, Zhou Xiaojing, Li Anchun, et al. Quantitatively distinguishing sediments from the Yangtze River and the Yellow River using δEu_N - ΣREEs plot[J]. *Science China(Seri. D): Earth Sciences*, 2008, 38(11): 1460-1468.]
- [46] 张江勇,高红芳,彭学超,等. 南海陆坡晚第四纪沉积物磁化率的对比及其古海洋学意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 151-164. [Zhang Jiangyong, Gao Hongfang, Peng Xuechao, et al. Comparison of magnetic susceptibility of Late Quaternary sediment derived from slopes in the south China Sea and implication for paleoceanography[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 151-164.]
- [47] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess[J]. *Nature*, 1990, 346(6286): 737-739.
- [48] 孟昌,孟庆泉,杜芳芳,等. 塔里木盆地西北缘海相白垩系—古近系界线沉积物环境指标研究[J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 245-254. [Meng Chang, Meng Qingquan, Du Fangfang, et al. Study on environmental proxies of the marine Cretaceous-Paleogene boundary from Wuqia area in the northwestern Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 245-254.]
- [49] 宋春晖,白晋锋,赵彦德,等. 临夏盆地13~4.4 Ma湖相沉积物颜色记录的气候变化探讨[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 507-513. [Song Chunhui, Bai Jinfeng, Zhao Yande, et al. The color of lacustrine sediments recorded climatic changes from 13 to 4.5 Myr in Linxia Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 507-513.]
- [50] 孙有斌,安芷生. 最近7Ma黄土高原风尘通量记录的亚洲内陆干旱化的历史和变率[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2001, 31(9): 769-776. [Sun Youbin, An Zhisheng. History and variability of Asian interior aridity recorded by Eolian flux in the Chinese Loess Plateau during the past 7 Ma [J]. *Science China(Seri. D): Earth Sciences*, 2001, 31(9): 769-776.]
- [51] Sun Jimin, Gong Zhijun, Tian Zhonghua, et al. Late Miocene stepwise aridification in the Asian interior and the interplay between tectonics and climate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 421: 48-59.

Rock Magnetic Properties and Paleoclimate Implications of Late Cenozoic Terrigenous Succession from the Southern Chaiwopu Basin, Xinjiang

WANG Zhen, QIU SiJing, CHEN YiFan, CHENG Lu, LÜ HongHua, ZHENG XiangMin

School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: The history and mechanism of aridification in the Asian interior during the late Cenozoic have been an important scientific issue. This study presents the terrigenous deposits from the ~303 m-thick Urumqi River section (URS) in the southern Chaiwopu Basin of the northern Chinese Tian Shan foreland. Based on the results of magnetostratigraphic chronology and rock magnetic characteristics, we discussed the magnetic enhancement mechanism of the URS sediments and paleo-climatic implications during the late Cenozoic in this region. The magnetostratigraphic chronology constrains the time spans from about 6.8 Ma to about 3.3 Ma. The results of rock magnetic and diffuse reflection spectrum (DRS) measurements show that the magnetic minerals in the URS sediments are mainly magnetite and hematite, and some magnetic parameters, such as χ_{lf} , χ_{ARM} , SIRM, S_{-100mT} , S_{-300mT} , $\chi_{ARM}/SIRM$, changed obviously at ~6.3 Ma and ~5.2 Ma. These changes reveal that the measured samples contain coarser magnetic grains with less magnetic grains (after ~6.3 Ma). In contrast, the magnetic grains became finer steadily before ~5.2 Ma, with the content increasing. By the analysis of rare earth elements (REEs), we know that the distribution patterns of rare earth elements (REEs) are consistent obviously. The analysis of rare earth elements (REEs) is likely to indicate a stable source area of the URS deposits. The sediment grain size can also be used to explain variations of terrigenous deposits magnetic characteristics. There are significant correlation relationships between the sediment grain size parameters and χ_{lf} , χ_{ARM}/χ_{lf} , the insignificant correlation relationships between the magnetic parameters, such as χ_{ARM} , SIRM, S_{-100mT} , S_{-300mT} , $\chi_{ARM}/SIRM$, χ_{fd} , and the sediment grain size parameters indicate that the observed variations of magnetic characteristics may not be mainly caused by the sediment grain size parameters. The continuous aridification in the present study area is more likely to be the main cause of the variations of magnetic characteristics. The continuous aridification can contribute to the oxidation of magnetite, which can be used to explain variations of terrigenous deposits magnetic characteristics. In order to verify the results, we make the DRS analysis. The results show that the study region occurred aridification obviously at ~6.3 Ma and ~5.2 Ma. The results of the DRS analysis show the similar paleo-climatic change.

Key words: rock magnetism; aridification; Late Cenozoic; Chaiwopu Basin; the north piedmont of the Tian Shan