

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.02.017

西部黄土高原兰州黄土磁化率增强模式及其驱动机制

于昊¹, 彭廷江¹, 李孟¹, 于凤霞¹, 叶喜艳¹, 郭本泓¹, 张军¹, 李吉均^{1,2}

1. 兰州大学资源环境学院和西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

摘要:我国黄土高原第四纪风成黄土序列为研究不同时间尺度(构造和轨道尺度)的环境演变提供了理想材料,其中轨道尺度上冰期-间冰期气候变化是第四纪以来气候周期性演变的重要特征。粒度和磁化率分别作为冬季风和夏季风指标被广泛应用于亚洲内陆干旱化和古季风演化研究。然而,磁化率作为古气候代用指标在解释区域环境演化时存在差异性,并不能将其总视为暖湿信号。以黄土高原西部地区的兰州皋兰山和西津岩心为研究对象,详细分析了倒数第二次冰期以来的粒度和磁化率特征,并与洛川剖面进行空间对比。研究表明,间冰期的磁化率总体高于冰期,但在冰期向间冰期转换的过渡期,皋兰山和西津岩心磁化率值并没有降低到冰期水平,而与弱发育古土壤磁化率水平类似。我们推测该时段兰州黄土磁化率增加并非由成壤作用增强贡献,而是源区粗颗粒磁性矿物增加所致,其磁化率增强模式可能同阿拉斯加、新疆黄土类似。由此可见,磁化率增强模式不仅在冰期时黄土高原东西部存在显著差异,而且在同一区域的不同沉积时期也存在较大差别。

关键词:磁化率;冰期-间冰期;兰州黄土;皋兰山岩心

中图分类号:P534.63

文献标识码:A

Magnetic susceptibility enhancement model and its driving mechanism of Lanzhou loess on the Western Loess Plateau

YU Hao¹, PENG Tingjiang¹, LI Meng¹, YU Fengxia¹, YE Xiyan¹, GUO Benhong¹, ZHANG Jun¹, LI Jijun^{1,2}

1. MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: The Quaternary loess-paleosol sequence provides an ideal document for studying both the tectonic and orbital scale environmental evolutions. And the Quaternary climate is characterized by the glacial-interglacial cycle on the orbital scale. Grain size and magnetic susceptibility are the classic proxies for the winter and summer monsoon respectively, which reveals the interior Asian aridification and monsoon evolution history. Actually, as the summer monsoon proxy, the magnetic susceptibility is restricted by regional climate background and can not always be used to represent the warm/humid signal. In this study, we firstly reconstructed the penultimate glacial grain size and magnetic susceptibility variations for the Gaolanshan and Xijin cores located in the western part of Chinese Loess Plateau. And then the potential reasons for the magnetic susceptibility model were discussed based on the spatial comparison between the western and eastern Chinese Loess Plateau. Our results indicate that the interglacial magnetic susceptibility of the Gaolanshan and Xijin loess is higher than the glacial one. However, during the interval of glacial-interglacial transitions (140~130ka and 22ka), the magnetic susceptibility values did not reduce to the glacial level, but similar to the weak paleosol level. We ascribe the enhanced magnetic susceptibility to the increased magnetic particles, which were derived from the source region and carried by the winter monsoon, but did not form by pedogenesis. So this enhanced model of magnetic susceptibility during the glacial-interglacial transitions is different from that of the eastern Chinese Loess Plateau, and similar to that of the Alaska loess. Therefore, the magnetic susceptibility enhancement mechanism is different in both the different part of Chinese Loess Plateau, and the different depositional stage of the Lanzhou loess.

资助项目:国家自然科学基金项目“青藏高原东北缘陇中盆地及周边晚新生代沉积、地貌及水系演化”(41330745)、“西秦岭地区上新世生态环境演变的生物标志化合物证据”(41401214)

作者简介:于昊(1992—),男,硕士,自然地理学专业, E-mail: hyu14@lzu.edu.cn

通讯作者:彭廷江, E-mail: pengtj@lzu.edu.cn

收稿日期:2017-01-17; **改回日期:**2017-04-13. 文凤英编辑

Key words: magnetic susceptibility; glacial-interglacial; Lanzhou loess; Gaolanshan core

冰期-间冰期旋回的气候变化过程及其机制研究对于深入理解第四纪气候演变过程至关重要^[1-3]。中国黄土高原地区,第四纪以来沉积了较厚且连续的黄土-古土壤序列,为研究冰期-间冰期气候演化提供了理想材料^[4-10]。一般认为,冰期时冬季风强盛,气候冷干,黄土沉积;间冰期夏季风盛行,气候暖湿,古土壤发育。粒度和磁化率分别作为冬季风和夏季风的代用指标广泛应用于亚洲内陆干旱化和东亚古季风演化的研究^[5,11-15]。其中,黄土粒度受风力强度、运移距离和源区范围影响,风力越强,搬运物质越粗,搬运距离愈远;源区愈干旱,沉积区物质粒径愈粗,其作为冬季风的代用指标已得到广泛认同^[13,16-18]。然而,磁化率作为气候指标在反演区域环境历史时尚存争议,不能简单地将其均视为暖湿信号。

目前黄土高原年平均降水量为300~1200mm,现代土壤磁化率与年平均降水量的相关系数可达0.9^[19],而年平均温度对磁化率的影响可以忽略不计^[20]。而在黄土-古土壤序列研究中,磁化率也与成壤期的古气候温湿程度呈正相关关系,可与全球深海氧同位素曲线进行很好地对比^[11,21]。在黄土高原东部,诸如洛川和西峰黄土剖面,磁化率高值对应古土壤层,低值对应黄土层,其与气候的暖湿-冷干变化有较好的对应关系^[11]。除中国黄土高原之外,在世界其他黄土分布区也存在这一现象,如捷克、奥地利、匈牙利、波兰、法国、德国和塔吉克斯坦的黄土^[22]。上述地区磁化率高值的出现均是由夏季风从海洋带来大量暖湿气流,成壤作用增强所致。但事实上,影响磁化率的因素较多,如黄土-古土壤本底值的区别、淋溶作用、有机质对磁性矿物老化的阻碍作用等^[5,23-24]。此外,研究表明在高纬度地区(比如阿拉斯加黄土^[25,26])磁化率值与成壤作用呈负相关,推测在强劲的风力作用下,靠近源区或者强风下的黄土沉积会表现出高磁化率和较粗的粒径,反之在远源黄土会有较低的磁化率值,冰期与间冰期风力强弱的相对变化导致磁化率信号产生差异,其磁化率增强与成壤作用基本无关^[25,26];也有学者认为在这些地区古土壤发育时期,较高的年降水量或有效湿度使得本地处于还原环境,加速了铁磁性矿物的分解,导致磁化率值降低^[27]。在中纬度的一些地区,如我国长江以南广大地区的土壤磁化率是随年均温、年均降水量的增高而降低的(其临界范围大致在年均温15℃左右、年降水量1100mm左右)^[28]。在西风带控制下的局部区域,黄土磁化率

增强机制也明显不同于黄土高原东部地区。宋友桂等在对新疆伊犁黄土进行系统分析后指出本区磁化率增强既有风速论模式,又有黄土高原超细颗粒成壤模式,但以前一种模式为主导。伊犁黄土磁化率增强除与源区的原生磁性矿物有关以外,还与当地的地形气候环境和地质背景有关^[29-32]。后有学者进一步发现荒漠草原、草原环境以及沙漠边缘的黄土-古土壤的磁化率增强机制也存在差异。在荒漠草原地区次生碳酸盐化作用强,磁化率值相对较低,这可能是其黄土磁化率高于弱成壤层的原因^[33,34]。通过上述分析发现:在同一时期,不同区域由于所处环境、气候条件及相对位置的差异,磁化率增强机制明显不同。

然而,在反映气候变化过渡的冰期-间冰期转换时期,黄土高原西部地区磁化率的变化模式却未给予较多关注。兰州地区因其距离源区较近,黄土沉积速率高,沉积厚度大,相比黄土高原东部能提供更多的气候变化细节^[35]。因此本文选择黄土高原西部的兰州地区皋兰山黄土岩心(36°01'N、103°51'E)和西津黄土岩心(36°01'N、103°45'E)^[35](图1)倒数第二次冰期以来的黄土-古土壤地层为研究对象,开展高分辨率的磁化率和粒度综合研究,分析兰州地区黄土磁化率变化的特征和规律,并与黄土高原东部经典剖面——洛川剖面(35°43'N、109°25'E)^[36]进行时空对比,探讨黄土高原不同区域的磁化率模式,进而推测磁化率在冰期-间冰期转换时的变化趋势及可能原因。

1 研究区概况

兰州盆地是大型陇中盆地的次级子盆地。从区域构造上来讲,兰州盆地毗邻青藏高原东北缘(图1),受晚新生代高原隆升影响,盆地新生代红层已发生变形,红层之上不整合一套较厚的五泉砾岩,之后第四纪黄土开始堆积。从自然地理角度讲,兰州盆地地处我国三大地理区划(青藏高原高寒区、西北内陆干旱区和东部季风区)的交汇地带,同时也是“季风三角”顶点位置所在^[37],对气候变化响应较为敏感。北支西风急流又在高原北侧绕流产生了常年存在的兰州小高压,且盆地距北部沙漠粉尘源区近^[38]。同时兰州也是快行冷锋天气,诸如寒潮、沙尘暴的必经之地^[39]。因此本区沉积了较厚的第四纪风成黄土序列,这为探明兰州地区的古环境演化历史提供了理想的研究材料。

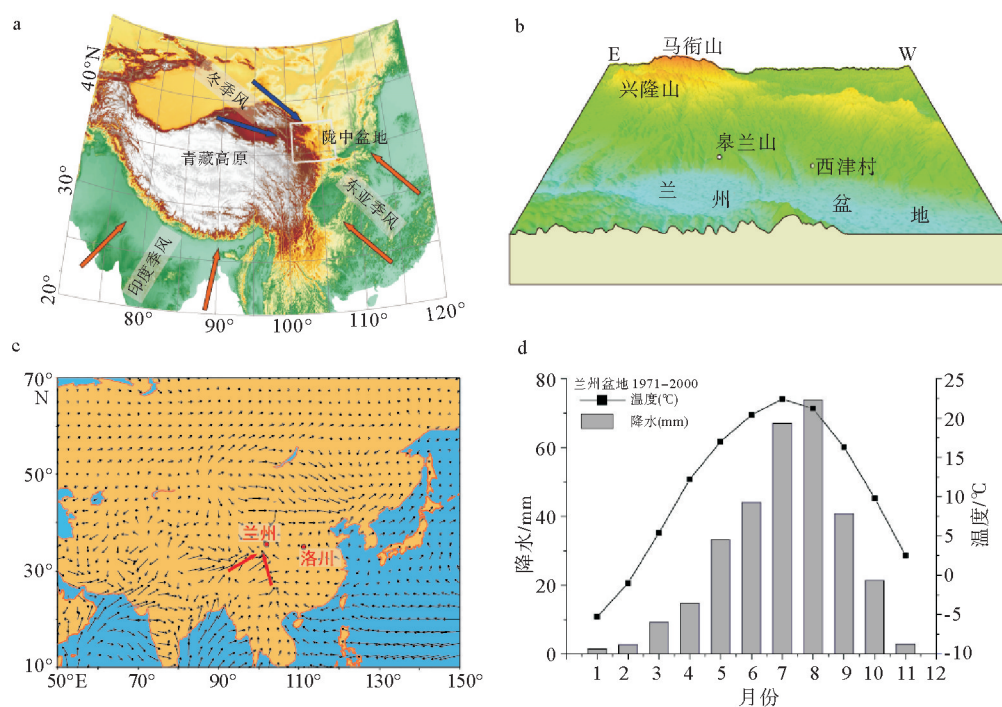


图 1 研究区、研究剖面位置及现代气候概况

- a. 陇中盆地位置(修改自文献[40]); b. 兰州盆地及皋兰山、西津黄土岩心位置;
c. 亚洲地区 1979—2011 年 4—6 月份近地表平均风速(数据来自 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/reanalysis/>);
d. 兰州市 1971—2000 年月平均降水量、月平均温度(数据来自《1971—2000 中国地面气候标准值》中国气象局, 2003)

Fig.1 Maps of the study area showing the location of research section and modern climate situation

- a. Geographic setting of Longzhong Basin (modified from reference[37]);
b. Gaolanshan and Xijin loess core site in the Lanzhou Basin; c. Apr-May-Jun mean surface vector winds (red arrows) based on the NCEP/DOE Reanalysis 2 data during 1979—2011 at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/reanalysis/>;
d. Mean monthly temperature and mean monthly precipitation in the Lanzhou area

皋兰山岩心(36°01'N、103°51'E)位于兰州盆地东侧的黄河南岸皋兰山气象站附近,海拔 2086m。在构造上受西侧雷坛河断裂和南侧兴隆山北缘断裂控制^[41]。皋兰山岩心倒数第二次冰期以来黄土-古土壤剖面厚约 42m(取心率在 95%以上),主要由棕黄色粉砂质的黄土和弱发育的褐色泥质古土壤组成(弱发育古土壤颜色较黄土颜色深,较典型古土壤颜色浅,铁锰斑点也较典型古土壤少),其中 S_0 厚 1.4m, L_1 厚 11.37m, S_1 厚 6.37m, L_2 厚 12.45m。

西津岩心位于皋兰山剖面西侧,黄土厚度达 416.2m(平均取心率 96.35%),是目前已知兰州盆地内最厚的黄土,底界年龄约 2.2Ma^[32]。此外,在黄土层 L_6 、 L_{10} 、 L_{24} 、 L_{26} 、 L_{27} 中还识别出新的弱发育古土壤层,这是黄土高原东部没有发现的。该岩心倒数第二次冰期以来黄土-古土壤剖面厚 54.56m, S_0 厚 1.95m, L_1 厚 27.80m, S_1 厚 9.75m, L_2 厚 15.96m。详细的地层划分和年代序列参见 Zhang 等^[35]。

洛川剖面位于黄土高原东部,主要由马兰黄土、离石黄土和午城黄土三部分组成,底部古地磁年龄约为 2.6Ma^[9,16],是我国黄土古气候变化研究的经典剖面。洛川剖面倒数第二次冰期以来的地层厚度为 14.25m,其中 S_0 厚度为 1.3m, L_1 厚度为 7.4m, S_1 厚度为 2.25m, L_2 厚度为 3.3m。本文研究的详细的地层划分和磁化率等指标引自 Hao 等^[36]。

2 实验方法与年代模型

2.1 磁化率测试

兰州黄土岩心以 5cm 间距采样,共获得 1080 个测试样品。样品在室温条件下自然风干,在不损坏自然颗粒结构前提下捣碎磨细,装入 2cm×2cm×2cm 的无磁塑料盒中,压实后称重。最后使用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型便携式双频磁化率仪进行测试。该仪器产生的交变磁场强度约为

80A/m,测试档位为0.1。在远离干扰磁场的情况下对低频(0.47kHz)和高频(4.7kHz)磁化率各测试3次,取其平均值。

2.2 粒度测试

粒度分析利用英国 Malvern Instruments 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪完成。首先对样品进行前期处理,利用10%的过氧化氢去除样品中的有机质,10%的盐酸去除无机碳(主要是钙质胶结物),然后进行分散、测试。Mastersizer 2000 激光粒度仪测量粒径范围为0.02~2000 μm ,可以保证获得完整的粒度分布曲线。

磁化率和粒度测试均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

2.3 指标选取

磁化率是观测频率的函数,观测频率越大,磁化率值愈小。一般地,频率磁化率定义为:

$\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$;百分频率磁化率其值的变化基本反映颗粒粒径的分布,其定义为 $\chi_{fd\%} = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100\%$ 。对于分母 χ_{lf} 来说,其值包含了所有颗

粒的贡献。当处于 SP/SD 临界点附近的颗粒的含量固定时,也就是 χ_{fd} 不变,此时,随着其粒径分布的加大, $\chi_{fd\%}$ 减小^[42,43]。因此选择其作为夏季风指标,以进一步探讨气候变化和输入磁性矿物粒径分布。

中值粒径 Md 是指一个样品的累计粒度分布百分数达到50%时所对应的粒径。它的物理意义是粒径大于它的颗粒占50%,小于它的颗粒也占50%,常用来表示粉体的平均粒度,是表征冬季风强度的良好替代性指标^[13-18]。

2.4 年代模型

为确定皋兰山、西津黄土岩心和洛川黄土剖面的准确年代,我们采用了粒度-年龄模型^[13]建立年代序列,并对3个剖面进行了年代-深度转换(图2)。本文重点选取了黄土高原东西部倒数第二次冰期以来的磁化率和粒度资料,以此来探讨剖面之间的差异性。

$$T_m = T_1 + (T_2 - T_1) \left(\sum_{i=1}^m A_i^{-1} \right) \left(\sum_{i=1}^n A_i^{-1} \right)^{-1}$$

公式 T_m 中是要计算 m 点的年龄, T_1 和 T_2 分别是通过黄土地层界限与深海沉积物氧同位素曲线

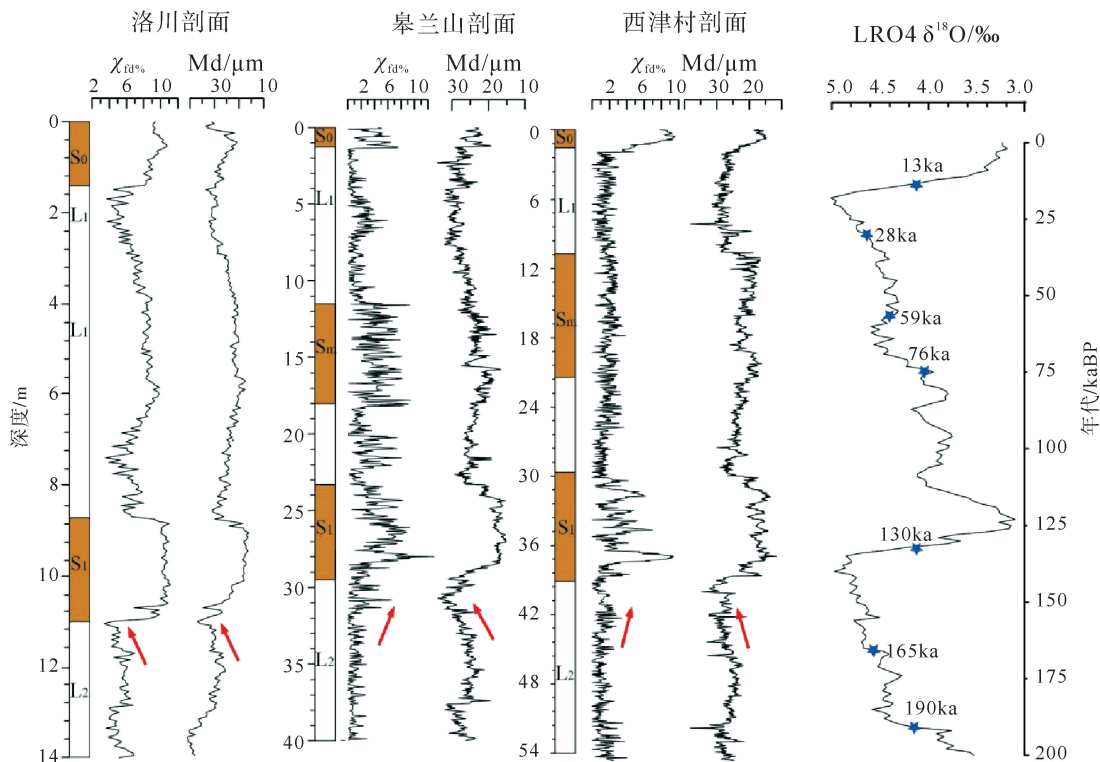


图2 黄土高原洛川剖面、皋兰山和西津岩心沉积记录与深海氧同位素曲线对比

(西津数据来自文献[35];洛川数据来自文献[36];深海氧同位素数据来自文献[44])

Fig.2 Detailed Comparison among the Gaolanshan loess, Xijin loess, Luochuan section and the marine oxygen isotope (Xijin Data from Zhang et al. (2016); Luochuan data from Hao et al. (2012); LR04 data cited from Lisiecki and Raymo (2005))

对比获得的年龄控制点, A_i 是第 i 点的沉积速率, 以中值颗粒的百分含量表示, n 是 T_1 和 T_2 之间的计算点。分别内插得到每个测试样品的年龄, 从而建立倒数第二次冰期以来 3 个黄土剖面时间序列。

3 结果

如图 3 所示, 粒度 $<2\mu\text{m}$ 组分与 M_d (中值粒径) 和 $>63\mu\text{m}$ 组分的波动趋势大体一致。 $>63\mu\text{m}$ 组分与 M_d 的相关系数为 0.87, $<2\mu\text{m}$ 组分与 M_d 和 $>63\mu\text{m}$ 组分的相关系数较差, 均为 0.51 左右。总体来说, $<2\mu\text{m}$ 百分比波动幅度大致为 4%~10%。在黄土中变化范围约为 5%~8%, 但在古土壤中波动剧烈, 变化幅度大致为 4%~11%。兰州皋兰山黄土低频磁化率值相对较低, 为 $8\times 10^{-8}\sim 50\times 10^{-8}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ (图 3), 与黄土高原东部磁化率的最低值相近。低频磁化率在黄土层中多在 $15\times 10^{-8}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ 以下, 在古土壤层中约为 $(20\sim 30)\times 10^{-8}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$, 两者差距较大, 是划分黄土-古土壤序列的良好依据。百分频率磁化率值总体较低, 基本都小于 10%, 古土壤层多在 6% 左右波动, 黄土层中多在 2% 左右波动。

皋兰山岩心倒数第二次冰期以来的黄土粒度与磁化率在大部分层位呈反相位关系, 但在约 31m

处, 粗粒组分与频率磁化率和低频磁化率同时增加。此外, 磁化率参数之间仍有差异。如低频磁化率逐渐增大, 而频率磁化率却呈两峰夹一谷的特征, 且在粒度最粗时频率磁化率降低, 磁化率仍然增大。这表明成壤作用生成的超细颗粒含量减少, 磁化率主要受风力搬运的粗颗粒磁性矿物控制。在 7m 左右, 粒度指标呈平稳变化, 频率磁化率上升, 低频磁化率变化较小。为了进一步确定频率磁化率和低频磁化率的关系, 我们对其进行了相关统计分析。如图 4d 和 4e 所示: 在黄土高原东部的洛川剖面, 随着低频磁化率的升高, 无论是频率磁化率还是百分频率磁化率均升高, 其中频率磁化率同低频磁化率呈线性正相关关系, 百分频率磁化率同低频磁化率呈指数相关^[45]。而黄土高原西部的皋兰山剖面 (图 4), 黄土低频磁化率同频率磁化率的相关性较差, 仅为 0.12, 但古土壤中两者相关性较好, 为 0.83。总体来看, 低频磁化率同频率磁化率相关系数为 0.55。

4 讨论

本文选取黄土高原东西部 3 个黄土剖面进行空间对比研究, 其中皋兰山岩心和西津岩心均位于兰州盆地, 直线距离仅 10km。洛川剖面位于黄土

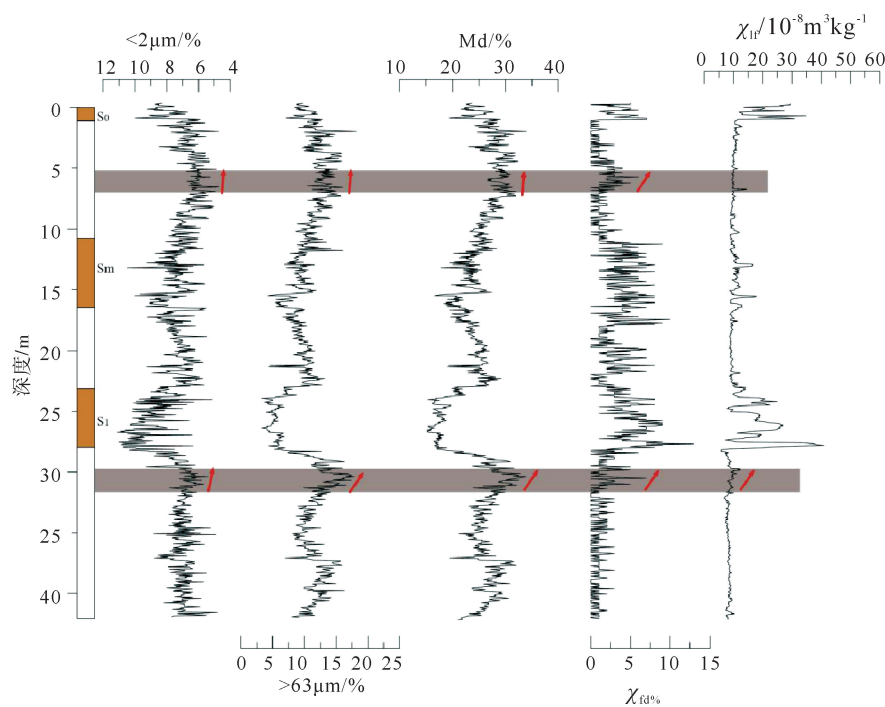


图 3 兰州皋兰山岩心黄土粒度和磁化率变化特征

Fig.3 The Grain size and Magnetic susceptibility records from the Gaolanshan core loess

高原东侧,距离兰州盆地约500km(图1)。如图5所示,3个剖面磁化率和粒度指标总体记录了轨道时间尺度上东亚季风的演变规律。冰期时,由于冬季风加强,气候冷干,植被稀疏,成壤作用弱,表现为

粗颗粒组分增加,磁化率值较低,堆积黄土,如 L_1 (76~13ka)和 L_2 (165~130ka)阶段;间冰期时,夏季风加强,气候暖湿,植被茂密,成壤作用强,表现为细粒组分增加,磁化率值明显高于冰期水平,发育

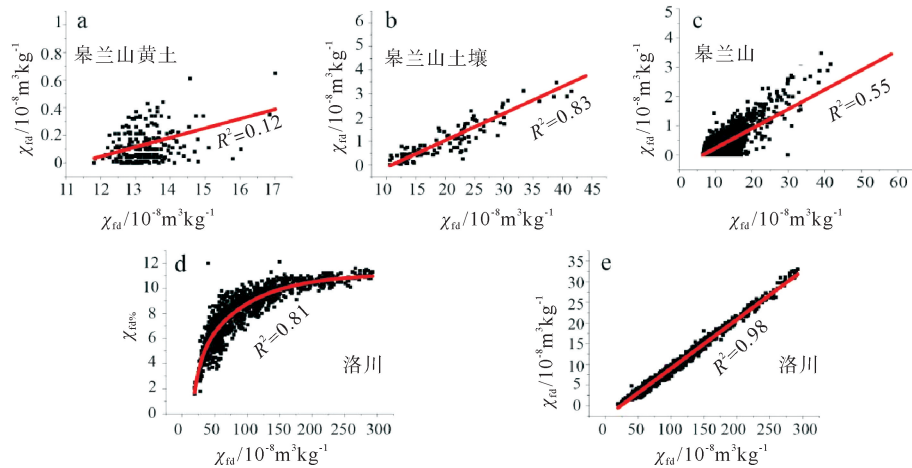


图4 皋兰山岩心和洛川剖面磁学参数关系

(洛川剖面数据来自文献[36])

Fig.4 The relationship between the χ_{if} and $\chi_{fd}\%$ from the Gaolanshan core and Luochuan section

(Luochuan data from reference[36])

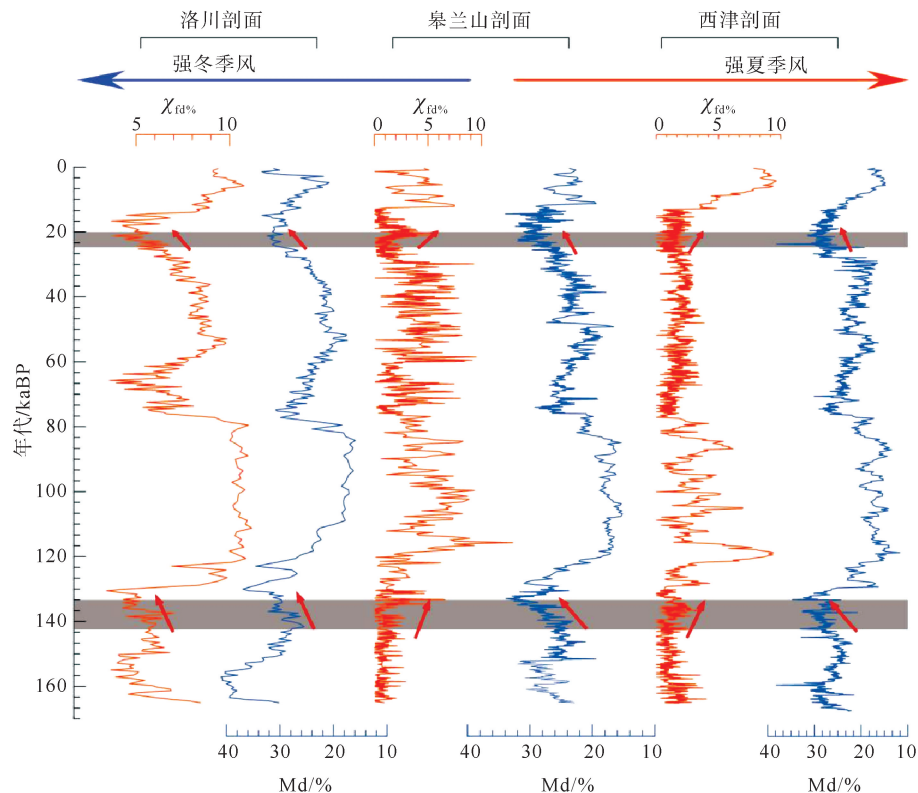


图5 洛川剖面、皋兰山和西津岩心磁化率和粒度指标

(洛川剖面数据来自文献[36];西津岩心数据来自文献[35])

Fig.5 The detailed variations in the grain size and magnetic susceptibility from the Gaolanshan core,

Xijin core, Luochuan section(Xijin Data from [36]; Luochuan Data from [35])

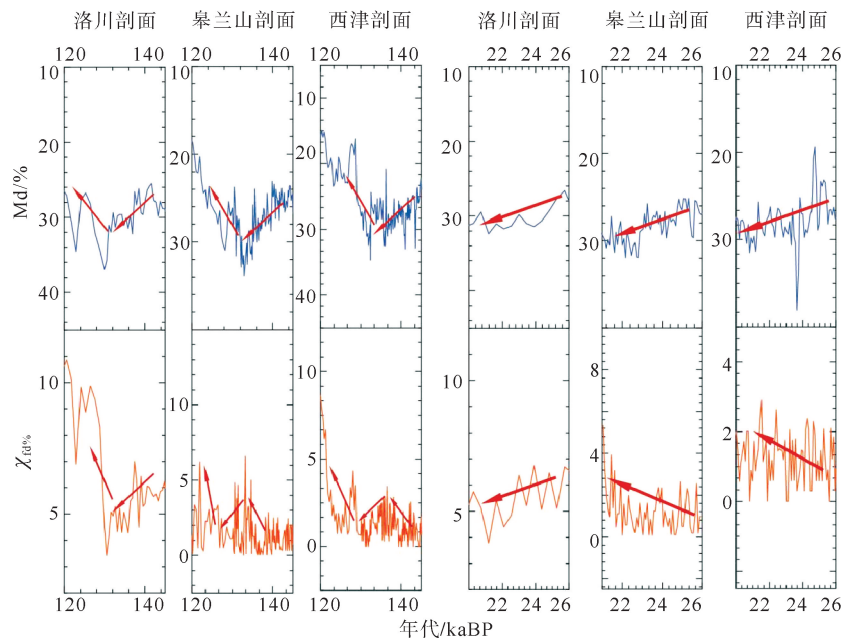


图 6 黄土高原皋兰山、西津岩心和洛川剖面粒度和磁化率在 140~120ka 和 26~22ka 时段的详细对比

(洛川剖面数据引自 Hao 等(2012);西津岩心数据引自 Zhang 等 2016)

Fig.6 Detailed comparison of grain size and magnetic susceptibility among the Gaolanshan core, Xijin core,

Luochuan section during the interval of 140~120ka and 26~22ka

(Luochuan Data from Hao et al. (2012); Xijin Data from Zhang et al. 2016)

古土壤,如 S_1 (130~76ka) 时期。然而在冰期向间冰期转变时,3 个剖面粒度变化相同,但磁化率变化存在明显差异。

具体来讲,在末次间冰期的 S_1 和全新世 S_0 时段(图 5),粒径较细,冬季风减弱,夏季风较强,成壤作用加强,生成更多超细粒磁性矿物,从而使得磁化率增大^[12]。因此,兰州地区的磁化率指标在古土壤发育的间冰期也主要受控于成壤强度,与夏季风强度成正相关,其与黄土高原东部黄土磁化率增强模式一致。同时也注意到,黄土高原西部 S_1 磁化率周期性波动幅度明显大于东部地区,且具有整体减弱趋势,表明夏季风在黄土高原西部地区的敏感变化,可能与兰州位于季风三角的顶点位置有关^[37]。

然而,在冰期向间冰期过渡时期,西部黄土高原黄土磁化率与粒度表现出脱耦关系。在末次冰盛期(26~20ka),3 个剖面粗颗粒组分占绝对优势,洛川剖面因成壤作用减弱而使磁化率降低,但皋兰山和西津岩心的磁化率值并没有像洛川剖面那样达到最低值(图 5 和 6),反而处在连续波动之中,且有增加的趋势,尤其是皋兰山岩心在 20ka 左右出现了明显峰值。在倒数第二次冰期时,黄土高原东部洛川剖面在约 140~130ka 粒度增大,冬季风增强,成壤作用减弱,超细粒磁性矿物减少,频率磁化率减小。与此同时,黄土高原西部的兰州黄土粒度在 140~

130ka 左右同样增大,表明黄土高原东西部地区冬季风的一致性。但是频率磁化率不减反增,这与黄土高原东部洛川剖面相反,其磁化率增强模式表现出黄土高原东西部差异。

为讨论冰期向间冰期转换期磁化率变化的可能原因,我们首先讨论了频率磁化率和低频磁化率之间的关系。研究表明,百分频率磁化率($\chi_{fd}\%$)可以有效地反映超顺磁(SP)和单畴(SD)颗粒界线附近的细粒磁性矿物的含量^[45]。皋兰山岩心和西津岩心中古土壤样品的 $\chi_{fd}\%$ 值明显高于黄土地层的 $\chi_{fd}\%$ (图 5),表明间冰期的成壤过程中生成新的细粒磁性矿物;而在黄土地层中大部分样品的 $\chi_{fd}\%$ 都位于 2% 左右,说明成壤作用极弱或基本没有成壤作用^[46],且几乎没有新的超顺磁颗粒生成。统计分析还发现:当低频磁化率大于 $15 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 时,频率磁化率与低频磁化率呈显著正相关关系(如图 4b 所示),这表明成壤作用强弱对磁化率值有显著影响,原生磁性矿物对黄土地层磁学性质的影响减弱,而成壤作用新生成的单畴和超顺磁颗粒对黄土磁学性质的影响显著,磁化率能较好地反映黄土沉积后的成壤环境。当磁化率小于 $15 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 时(图 4a),频率磁化率与低频磁化率相关性较差,这可能是由于成壤作用较弱或基本无成壤作用,同时也没有新生成磁性矿物贡献,而原生磁性矿物对黄土磁

性矿物占主导,磁化率更多的是反映物源区的信号^[25,26,47]。

比如,26~22ka左右的末次冰盛期,皋兰山黄土低频磁化率值低于 $15 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,基本无成壤作用,理论上来说不会引起频率磁化率增大。然而实际结果显示皋兰山末次冰盛期时频率磁化率不降反升,表明使得频率磁化率值增大的“额外”超顺磁颗粒或单畴颗粒可能来自于源区;同样的规律也出现在倒数第二次冰期-末次间冰期过渡期(140~130ka左右),140ka之前频率磁化率一直较为稳定,整体都低于2%,表明整个冰期成壤作用微弱。考虑到冰盛期(140~130ka左右)的成壤作用为倒数第二次冰期最弱期,成壤贡献的频率磁化率可忽略不计。事实上,140~130ka左右粒度逐渐变粗,低频磁化率逐渐增大,频率磁化率也呈整体增大趋势,表明风力搬运的源区超细磁性矿物增加。细节上讲,低频磁化率峰值段呈两峰夹一谷特征,且在粒度最粗时频率磁化率降低,磁化率仍然增大,这表明风力搬运的粗颗粒磁性矿物亦同时增加。

黄土磁化率增强机制目前还没有达成共识,在不同时间,不同区域磁化率值大小受到物源、沉积过程和沉积后风化成壤和生物作用的影响,会导致其增强机制存在差异^[48]。目前来看,磁化率增强存在两种主要模式,一种为成壤模式,磁化率增强受控于古气候的温湿程度^[12],这是黄土高原磁化率增强的一般模式。除此之外磁化率增强还同风速有关,这种模式被称为阿拉斯加模式^[25,26],磁化率大小主要反映风力的大小,在风力较强的冰期,靠近源区的黄土沉积其磁化值处于高值且粒径较粗。总体而言,在古土壤发育时期及黄土大部分沉积时期,其磁化率增强模式同古气候温湿程度成正比,这与黄土高原其他地区的成壤模式是一致的。但在冰期-间冰期过渡时期,成壤作用对磁化率贡献并不强烈,且此时粒度处于最大值,表明风力较强,加之兰州距沙漠较近(直线距离不过200km),在盛冰期时可能距离更近^[49,50],兰州黄土在此时含有较多的近源物质,从而导致其磁化率值增加。西北戈壁沙漠-黄土高原表土磁化率现代过程研究表明,当平均降水量低于200~300mm时,磁化率与气候之间的相关性减弱,其磁化率值增加是由风积磁性颗粒增加所导致的^[51,52]。兰州地区目前的降水量是300mm左右,在盛冰期时,气候更为干燥,降水量明显低于相关阈值300mm,说明磁化率与气候基本不相关。基于以上分析,我们认为风速论能较好地解释兰州黄土在冰期向间冰期过渡时期磁化率值增加的现象。

5 结论

倒数第二次冰期以来,黄土高原西部地区的兰州黄土磁化率增强模式较为复杂,不完全等同于东部黄土高原地区的成壤增强模式。在古土壤发育的间冰期,其磁化率增强同黄土高原大部分地区一样,主要是由于成壤作用生成的超细磁性颗粒增加,从而使得磁化率和古气候成正比。但在冰期向间冰期转换的过渡时期,皋兰山和西津岩心磁化率值并没有降低到冰期水平,而与弱发育古土壤磁化率水平类似。推测冰期-间冰期转型期的磁化率值增加不是由成壤作用增强造成的,而是风成源区磁性矿物增加所致,其磁化率增强模式同阿拉斯加黄土的风速模式相类似。因此,兰州地区黄土磁化率用于古气候重建时需要谨慎,与其他古气候指标的综合应用有利于获得更为全面准确的古环境信息。

参考文献 (References)

- [1] Cheng H, Edwards R L, Sinhai A, et al. The Asian monsoon over the past 640000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 534(7609): 640-646.
- [2] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2002, 294(5550): 2345-2348.
- [3] Ruddiman W F. Orbital insolation, ice volume, and greenhouse gases[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(15-17): 1597-1629.
- [4] Heller F, Liu T S. Palaeoclimatic and sedimentary history from magnetic susceptibility of loess in China[J]. *Geophysical research letters*, 1986, 13(11): 1169-1172.
- [5] Kukla A G, Heller F, Liu X M, et al. Pleistocene climates in china dated by magnetic susceptibility[J]. *Geology*, 1988, 16(9): 811-814.
- [6] Banerjee S K, Hunt C P, Liu X M. Separation of local signals from the regional paleomonsoon record of the Chinese Loess Plateau: A rock - magnetic approach[J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(9): 843-846.
- [7] Maher B A, Thompson R. Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(3): 383-391.
- [8] An Z S, Porter S C. Millennial-scale climatic oscillations during the last interglaciation in central China[J]. *Geology*, 1997, 25(7): 603-606.
- [9] Liu T S, Ding Z L, Rutter N. Comparison of Milankovitch periods between continental loess and deep sea records over the last 2.5 Ma[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(10-11): 1205-1212.

- [10] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): 5-1-5-21.
- [11] Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China[J]. *Nature*, 1982, 300(5891): 431-433.
- [12] 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.
- [13] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation[J]. *Nature*, 1995, 375(6529): 305-308.
- [14] 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(1): 67-69. [LU Huayu, AN Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 28(3): 278-283.]
- [15] Sun Y B, Lu H Y, An Z S. Grain size of loess, palaeosol and Red Clay deposits on the Chinese Loess Plateau: Significance for understanding pedogenic alteration and palaeomonsoon evolution[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 241(1): 129-138.
- [16] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [LIU Tunsheng. *Loess and Environment* [M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [17] An Z S, Kukla G, Porter S C, et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese loess plateau[J]. *Catena*, 1991, 18(2): 125-132.
- [18] Ding Z, Yu Z, Rutter N W, et al. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13(1): 39-70.
- [19] 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[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(19-20): 2732-2744.
- [20] Maher B A. Palaeoclimatic records of the loess/palaeosol sequences of the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 154: 23-84.
- [21] Heller F, Liu T S. Magnetism of Chinese loess deposits[J]. *Geophysical Journal International*, 1984, 77(1): 125-141.
- [22] Evans M E, Heller F. Magnetism of loess/palaeosol sequences: recent developments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2001, 54(1-3): 129-144.
- [23] Sun J M, Liu T S. Multiple origins and interpretations of the magnetic susceptibility signal in Chinese wind-blown sediments[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2000, 180(3-4): 287-296.
- [24] 李志文, 李保生, 孙丽, 等. 影响中国黄土磁化率差异的多因素评述[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(2): 231-237. [LI Zhiwen, LI Baosheng, SUN Li, et al. Evaluation of Multifactors that affect the susceptibility of China's loess[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(2): 231-237.]
- [25] Begét J E, Hawkins D B. Influence of orbital parameters on Pleistocene loess deposition in central Alaska[J]. *Nature*, 1989, 337(6203): 151-153.
- [26] Begét J E, Stone D B, Hawkins D B. Paleoclimatic forcing of magnetic susceptibility variations in Alaskan loess during the late Quaternary[J]. *Geology*, 1990, 18(1): 40-43.
- [27] 刘秀铭, 刘东生, 夏敦胜, 等. 中国与西伯利亚黄土磁化率古气候记录-氧化和还原条件下的两种成土模式分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37(10): 1382-1391. [LIU Xiuming, LIU Tunsheng, XIA Dunsheng, et al. Two pedogenic models for paleoclimatic records of magnetic susceptibility from Chinese and Siberian loess[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(2): 284-293.]
- [28] 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. *中国科学: 化学*, 1994, 24(12): 1290-1297. [LV Houyuan, HAN Jiamao, WU Naiqin, et al. The magnetic susceptibility of modern soils in China and its use for paleoclimate reconstruction[J]. *Science in China (Series B)*, 1996, 40(3): 262-275.]
- [29] Song Y G, Shi Z T, Fang X M, et al. Loess magnetic properties in the Ili Basin and their correlation with the Chinese Loess Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(3): 419-431.
- [30] Chen Q, Liu X M, Heller F, et al. Susceptibility variations of multiple origins of loess from the Ily Basin (NW China)[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(15): 1844-1855.
- [31] 李传想, 宋友桂. 新疆伊犁黄土磁化率增强机制差异性分析[J]. *地球学报*, 2011, 32(1): 80-86. [LI Chuanxiang, SONG Yougui. Differences in magnetic susceptibility enhancement in Ili loess[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(1): 80-86.]
- [32] 史正涛, 董铭, 方小敏. 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*, 2007, 43(2): 7-10. [SHI Zhengtao, DONG Ming, FANG Xiaomin. The characteristics of later pleistocene loess-paleosol magnetic susceptibility in Yili Basin[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2007, 43(2): 7-10.]
- [33] 叶玮. 新疆西风区黄土与古土壤磁化率变化特点[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(4): 380-386. [YE Wei. Study on magnetic susceptibility of loess and paleosol sequences in westerly region of Xinjiang[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(4): 380-386.]
- [34] 胥金波, 杨胜利, 方小敏, 等. 西昆仑山黄土的岩石磁学特征及其磁化率增强机制[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(1): 46-53. [ZAN Jinbo, YANG Shili, FANG Xiaomin, et al. Rock-magnetic characteristics and the enhancing mechanism of magnetic susceptibility for west Kunlun mountains loess[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 46-53.]
- [35] Zhang J, Li J J, Guo B H, et al. Magnetostratigraphic age and monsoonal evolution recorded by the thickest Quaternary loess deposit of the Lanzhou region, western Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 139: 17-29.
- [36] Hao Q Z, Wang L, Oldfield F, et al. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400, 000-year minima in insolation

- variability[J]. *Nature*, 2012, 490(7420): 393-396.
- [37] Li J J, Feng Z D, Tang L Y. Late Quaternary monsoon patterns on the Loess Plateau of China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13(2): 125-135.
- [38] 罗思维. 冬季我国高原东侧切变线形成的分析[J]. *气象学报*, 1963, 33(3): 14. [LUO Siwei. Analysis of shear line formation on the east side of Plateau in winter[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1963, 33(3): 14.]
- [39] 戴雪荣, 李吉均, 俞立中, 等. 兰州风尘沉积的粒度分布模式及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 2000, 18(1): 36-42. [DAI Xuerong, LI Jijun, YU Lizhong, et al. Model of Grain-size distribution of the Eolian deposits in Lanzhou area and its paleoclimatic significances [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(1): 36-42.]
- [40] Liu J, Li J J, Song C H, et al. Palynological evidence for late Miocene stepwise aridification on the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Climate of the Past*, 2016, 12(7): 1473-1484.
- [41] Yuan D Y, Wang L M, He W G, et al. New progress of seismic active fault prospecting in Lanzhou city[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(1): 236-249.
- [42] Liu Q S, Deng C L. Magnetic susceptibility and its environmental significances [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(4): 1041-1048.
- [43] 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 中国黄土环境磁学[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(2): 193-209. [DENG Chenglong, LIU Qinsong, PAN Yongxin, et al. Environmental magnetism of Chinese Loess-Paleosol sequences[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 193-209.]
- [44] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Paleoceanography and paleoclimatology*, 2005, 20(1): PA1003.
- [45] 刘现彬, 夏敦胜, 贾佳, 等. 兰州九州台黄土磁性特征及其古气候意义研究[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(4): 761-770. [LIU Xianbing, XIA Dunsheng, JIA Jia, et al. Magnetic properties of Jiuzhoutai Loess in Lanzhou and its significance of palaeoclimate[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(4): 761-770.]
- [46] Worm H U. On the superparamagnetic—stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility[J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 133(1): 201-206.
- [47] 吕镔, 刘秀铭, 赵国永, 等. 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*, 2012, 48(5): 1-8. [LV Bin, LIU Xiumin, ZHAO Guoyong, et al. Rock magnetic properties of Bole loess in Xinjiang and Its environmental significance[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2012, 48(5): 1-8.]
- [48] 强小科, 孙玉芳, 陈艇, 等. 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*, 2012, 3(2): 810-818. [QIANG Xiaoke, SUN Yufang, CHEN Ting, et al. Mineral magnetism and the spatial comparison of the loess sediments in loess Plateau since the last glacial period[J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, 3(2): 810-818.]
- [49] 陈发虎, 潘保田, 陈国荣, 等. 兰州地区晚更新世古风成砂的发现及环境变化[J]. *中国沙漠*, 1990, 10(2): 1-84. [CHEN Fahu, PAN Baotian, CHEN Guorong, et al. The discovery of Palaeo-Eolian sand and environmental changes of the late Pleistocene in Lanzhou area[J]. *Journal of Desert Research*, 1990, 10(2): 1-84.]
- [50] 冯哈, 鹿化煜, 弋双文, 等. 末次盛冰期和全新世大暖期中国季风区西北缘沙漠空间格局重建初探[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 252-259. [FENG Han, LU Huayu, YI Shangwen, et al. The border changes of the deserts/sand field in the East Asina monsoon marginal region during the last glacial maximum and Holocene optimum [J]. *Quaternary Research*, 2013, 33(2): 252-259.]
- [51] 夏敦胜, 魏海涛, 马剑英, 等. 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*, 2006, 26(6): 937-946. [XIA Dunsheng, WEI Haitao, MA Jianying, et al. Magnetic characteristics of surface soil in arid region of central Asia and their paleoenvironmental significance [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 937-946.]
- [52] 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[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 360-367. [LI Pingyuan, LIU Xiuming, Guo Xuelian, et al. The magnetic susceptibility properties of top soil's in Gobi-Loess plateau, northwest China[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 360-367.]