

文章编号: 1000-0550(2010)06-1190-08

# 临夏盆地黑林顶剖面沉积物在 8.6Ma 前后 岩石磁学特征及其意义<sup>①</sup>

闫晓丽<sup>1</sup> 张启波<sup>1</sup> 方小敏<sup>2,1</sup> 苗运法<sup>2</sup>  
咎金波<sup>1</sup> 孟庆泉<sup>1</sup> 宋春晖<sup>1,2</sup> 张涛<sup>1</sup> 迟云平<sup>1</sup>

(1. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室 兰州 730000;  
2. 中国科学院青藏高原研究所盆地与资源环境研究中心 北京 100085)

**摘要** 通过对临夏盆地黑林顶剖面晚新生代沉积物的岩石磁学研究,揭示在 11.8~8.6 Ma 磁化率波动较小,基本保持相对稳定的低值( $0.58 \sim 6.9/10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ );从 8.6 Ma 开始受软磁性矿物控制明显持续增加( $0.75 \sim 10.6/10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )。通过沉积物磁学性质与环境变化之间的模式分析,结合盆地周围构造条件研究,认为物源的变化可能是造成黑林顶剖面磁化率增强的主要原因。

**关键词** 临夏盆地 磁化率 物源 构造运动 晚新生代

**第一作者简介** 闫晓丽 女 1985 年出生 博士研究生 第四纪地质学 E-mail: yanxl07@lzu.cn

**中图分类号** P534.63 **文献标识码** A

环境磁学作为一门交叉学科,主要利用矿物和岩石磁学技术,研究环境中磁性颗粒的风化、剥蚀、搬运、沉积和转化受环境变化影响的过程,在各种环境研究中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。19 世纪 80 年代在 Heller 和 Liu<sup>[2]</sup> 将黄土剖面的磁化率曲线与深海沉积物的氧同位素记录进行对比之后,磁化率作为一种古气候替代性指标,在中国黄土研究中得到了广泛的应用并成为经典的气候指示曲线。同时,磁化率的研究不断向其他沉积类型拓展,尤以湖泊沉积物的研究最为深入<sup>[3]</sup>。许多研究表明湖泊沉积物的磁化率变化特征常常同孢粉学,地球化学等特征一致<sup>[4~9]</sup>,说明在物源区和沉积环境变化不大的条件下,磁化率可以作为湖泊沉积物的气候代用指标。然而有的研究则主张物源的作用,如孙继敏在对青藏高原北缘铁匠沟剖面的磁化率研究中强调磁化率的快速增强是由于 13.7~9 Ma 青藏高原持续隆升致使物源发生改变而造成的<sup>[10]</sup>。方小敏等认为临夏盆地毛沟剖面磁化率的升高可能是流域外粉尘物质的加入导致的<sup>[11]</sup>。由此可见,湖泊沉积物中磁化率的变化机制远比我们想象的要复杂,任何一个单一的模式都不能完全解释磁化率的变化,因为在湖泊沉积物中,由于流域物质的磁性特征及沉积环境对湖泊中的磁性矿物的富集、保存或自生矿物生成都有影

响,湖泊沉积物的磁学性质和环境变化之间不可能遵循简单的模式<sup>[4]</sup>。因此,关于湖相沉积物磁化率的增强机制还需要进一步的研究。

黑林顶剖面位于临夏盆地南缘,具有地层沉积完整连续、沉积厚度大、富含哺乳动物化石<sup>[12,13]</sup>,并且有可靠的年代控制。因此是探讨湖相沉积物磁化率增强的机制以及发掘古气候/构造信息的理想剖面。

## 1 研究区地质地理概况

临夏盆地位于青藏高原东北边缘(图 1),大致作西北—南东延伸,海拔一般在 2 000~2 400 m 之间,属于第三纪大型陇中盆地的西南隅,西缘和南缘分别为青藏高原东北边缘的祁连山东延余脉拉脊山向南延伸部分(雷积山)和甘南高原与西秦岭,海拔一般在 3 500~4 000 m 以上;北缘为祁连山东延余脉向陇中盆地深入的岛状山体马衔山,海拔 3 000 m 左右,拉脊山和马衔山以北即为陇中盆地西侧的两个次级盆地——西宁盆地和兰州盆地,盆地东侧与陇中盆地的主体陇西盆地相连,边界不明显。宏观地貌上是青藏高原与黄土高原衔接带上的一个新生代山前挤压拗陷盆地<sup>[14]</sup>。盆地中堆积了巨厚的新生代沉积,大致以临夏市为界,向西和向南第三纪

<sup>①</sup>国家自然科学基金项目(批准号:40771214;40872029)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号:kzcx2-yw-104)资助。  
收稿日期:2009-06-20;收修稿日期:2009-11-24

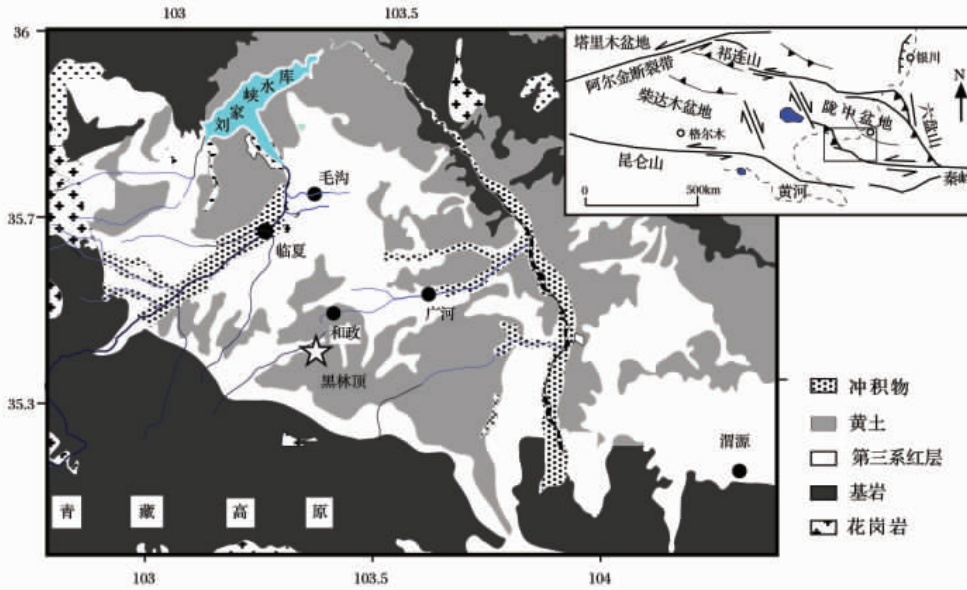


图 1 临夏盆地地质概况与黑林顶剖面位置

Fig. 1 Sketchmap of the Linxia Basin and Heilinding section

红层快速变厚, 达 1 600 m 以上, 遭受明显断裂和褶皱变形。向东北第三纪红层明显减薄, 临夏以东附近厚约 400 ~ 500 m, 地层水平, 延伸较稳定, 东乡县以东急剧减薄, 具有显著的陆内再生前陆盆地地层体空间分布特征<sup>[14]</sup>。红层堆积的晚期发生了强烈的青藏运动, 红层强烈变形和遭受剥蚀夷平, 其后上新世积石组巨砾岩层超覆其上, 形成显著的不整合面, 然后再次变形和抬升, 局部形成第四纪湖泊和近百米的湖沼与水下黄土堆积, 最后再次变形抬升, 黄河诞生并随青藏高原进一步隆升而强烈下切, 形成黄河和大夏河的 7 级阶地及其上 200 多米的厚层黄土堆积<sup>[15-19]</sup>。过去将整个盆地的第三纪红层统称为临夏组<sup>[20]</sup>, 通过详细的古生物地层和古地磁年代研究, 将盆地新生代地层进行了系统重新划分, 建立了从渐新世他拉组到晚更新世北塬组共 12 个组的完整地层序列及其年代序列<sup>[18, 19]</sup>。

在自然地理上, 临夏盆地处于东部季风区、西北干旱区及青藏高原高寒区三大自然带的交汇地带, 地貌上属于黄土高原的西南隅, 气候上恰好处于季风三角区的顶点部位, 受季风环流系统的影响, 具有较为典型的大陆性季风气候特征, 气候温凉半湿润, 区内 1 月份平均气温为 0.7 ~ 13.4℃, 7 月份平均气温 12 ~ 25℃, 年均降水量为 506.3 mm, 除盆地周围的山地有暖温带山地阔叶林及亚高山针叶林分布外, 盆地内为温带落叶阔叶林—草原景观。

## 2 研究剖面特征与样品测量

### 2.1 研究剖面岩性与沉积相特征

本次研究以临夏盆地南缘的黑林顶剖面为对象 (图 1), 该剖面地层沉积厚度 230 m 左右, 不整合于加里东花岗岩之上。地层以近水平产状的泥岩沉积为主夹有多层砂砾岩 (图 2)。纵观整个剖面, 可以 116.5 m 处为界分为两层: 下部 (230 ~ 116.5 m) 泥岩段为主要的类古土壤发育阶段, 尽管由于受到古土壤发育程度、沉积时期的侵蚀、后期的压实和石化作用使得多个古土壤的界限不是十分明显, 但土壤化的小团粒结构、锰斑、锰胶膜和碳酸钙充填体等特征依稀可见, 物质粒度相对均匀、颜色偏棕红色。说明当时以洪泛平原沉积为主, 并有相对长的时间供土壤发育, 同时偶尔有辫状河流扫过, 形成河道沉积。之上 (116.5 ~ 0 m) 沉积物质主要变成以砂岩含砾为主, 个别层位还出现了砾岩, 胶结较差; 泥岩中很少部分弱古土壤化, 颜色变淡, 以褐红色为主。沉积相以辫状河流相沉积为主, 偶有平静的湖泛平原沉积。三趾马动物群 (*Hipparion fauna*) 化石层位于柳树组上部的红粘土中 (距顶部约 30 m 处) (图 2), 种类丰富, 推测时代为晚中新世中晚期<sup>[12, 13]</sup>。总之, 整个剖面地层沉积连续完整, 沉积厚度大, 含大量哺乳动物化石, 下部发育古土壤, 上部以含砾砂岩为主。近来王九一等人对该段剖面的晚新生代地层进行了高精度、高分辨率古地磁

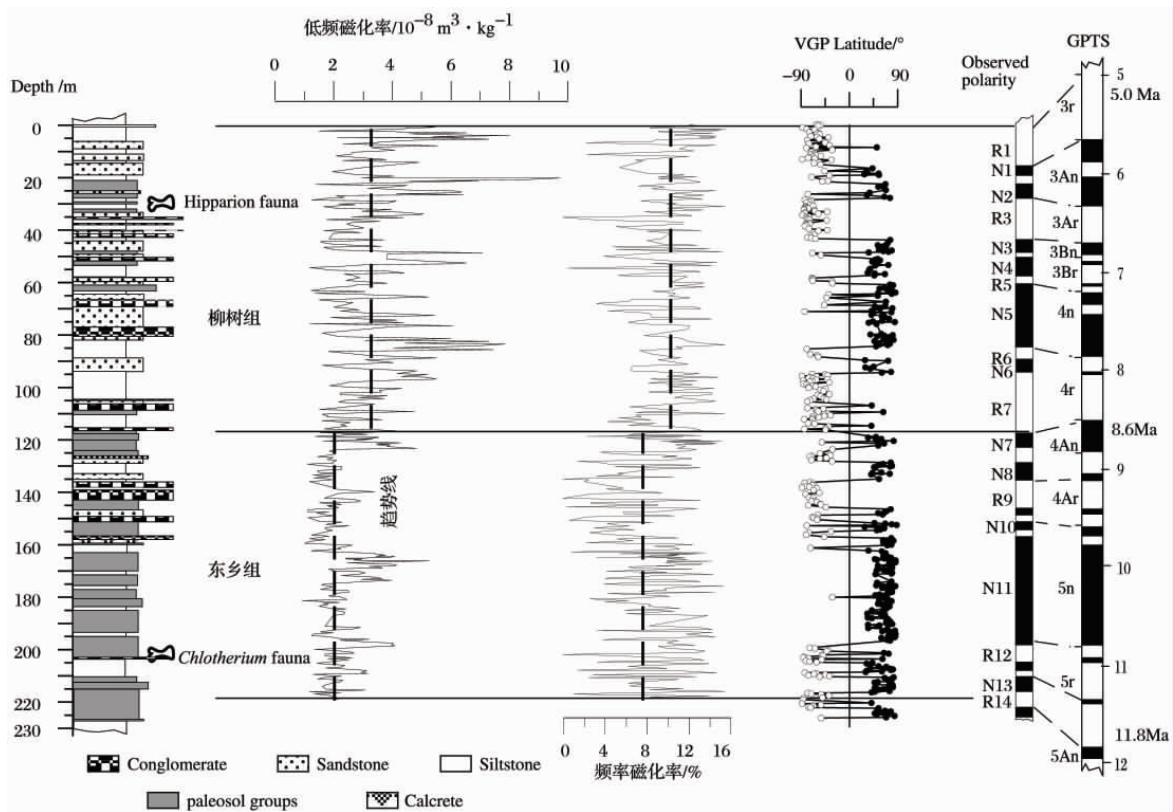


图2 黑林顶剖面磁化率结果(古地磁引自参考文献<sup>[21]</sup>)

Fig. 2 The magnetic susceptibility of the sediments and palaeomagnetic result<sup>[21]</sup> in the Heilinding Section

年代的测定<sup>[21]</sup>,测年结果为11.8~5.0 Ma,116.5 m处对应年龄为8.6 Ma。

## 2.2 样品采集与测量

对黑林顶剖面进行了0.5 m间隔连续采样,获得样品460多个,将样品在40℃烘箱内烘干,然后将干样破碎后装入2 cm<sup>3</sup>的无磁性立方体形样品测量盒内,压实称重,然后用英国Bartington公司生产的MS2型便携式磁化率仪分别对沉积物样品进行高频和低频磁化率测量。部分代表性样品使用VFTB(variable field transition balance)测量仪进行热磁曲线和磁滞回线测量。以上实验均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 磁化率和频率磁化率

磁化率结果(图2)表明,临夏盆地黑林顶剖面在116.5 m处(约8.6 Ma)发生了明显变化。在116.5 m以下,磁化率没有明显的变化,主要表现为小幅波动,范围主要为0.58~6.9/10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>之间;116.5 m以上波动持续快速增加,范围主要为

0.75~10.6/10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>之间。同磁化率的阶段性变化趋势一样,频率磁化率也有着明显的阶段性变化,130~160 m砾石层对应频率磁化率为明显的降低趋势,160 m以下频率磁化率(均值约8.5%)比130 m以上磁化率(均值约9.4%)低,整体而言频率磁化率百分比值均较大。

### 3.2 热磁曲线

利用磁化率随温度变化的特征,即热磁曲线,可以有效地辨别沉积物中的磁性矿物在热退磁过程中的转变规律<sup>[1]</sup>,广泛应用于样品中的磁性矿物种类分析。根据热磁曲线加热前后磁化强度 $J$ 是增加还是减少的曲线特点,可以把它们分为两类(图3): (1) 116.5~230 m: 热磁曲线不可逆,冷却曲线均位于加热曲线的下方。磁化强度在150℃,580℃和680℃附近都有不同程度的降低,其中580℃降低幅度最大,表明样品中含有磁铁矿,同时含有针铁矿和赤铁矿。此外,样品磁化强度在300~450℃间也有明显的减少,且实验前后样品饱和磁化强度也有很大的下降,表明样品中还含有较多的不稳定矿物磁赤铁矿等在加热过程中发生了转变,转变成赤铁

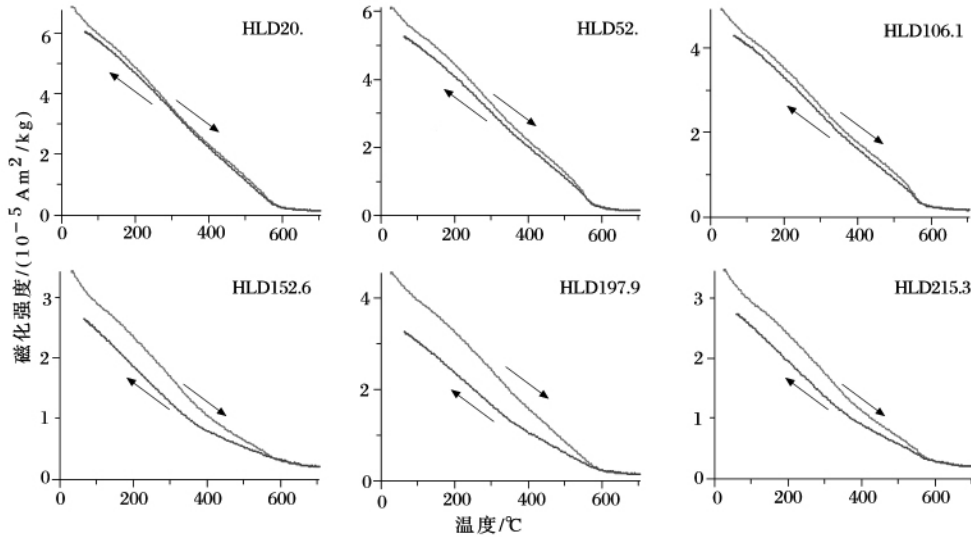


图 3 黑林顶剖面代表性样品热磁曲线

Fig. 3 Thermomagnetic (Curie) curves of Heilinding representative samples

矿; (2) 0 ~ 116.5 m: 同 116.5 ~ 230 m 间的样品相比, 尽管该段样品的磁化强度在 150°C, 580°C 和 680°C 附近也有不同程度的降低, 且以 580°C 降低幅度最大, 但该段样品的冷却曲线和加热曲线却基本可逆, 说明样品的磁赤铁矿含量急剧减少, 磁铁矿主导了该段样品的磁学性质。

### 3.3 磁滞回线

磁滞回线能够提供关于磁性矿物类型和畴态的重要信息。所有样品的磁滞回线都不同程度地具有“蜂腰”特征。0 ~ 116.5 m 样品的磁滞回线(图 4) 线形较细且陡直, 饱和磁化强度值较高, 显示出很弱的“蜂腰型”特征, 说明这些样品中低矫顽力磁性矿

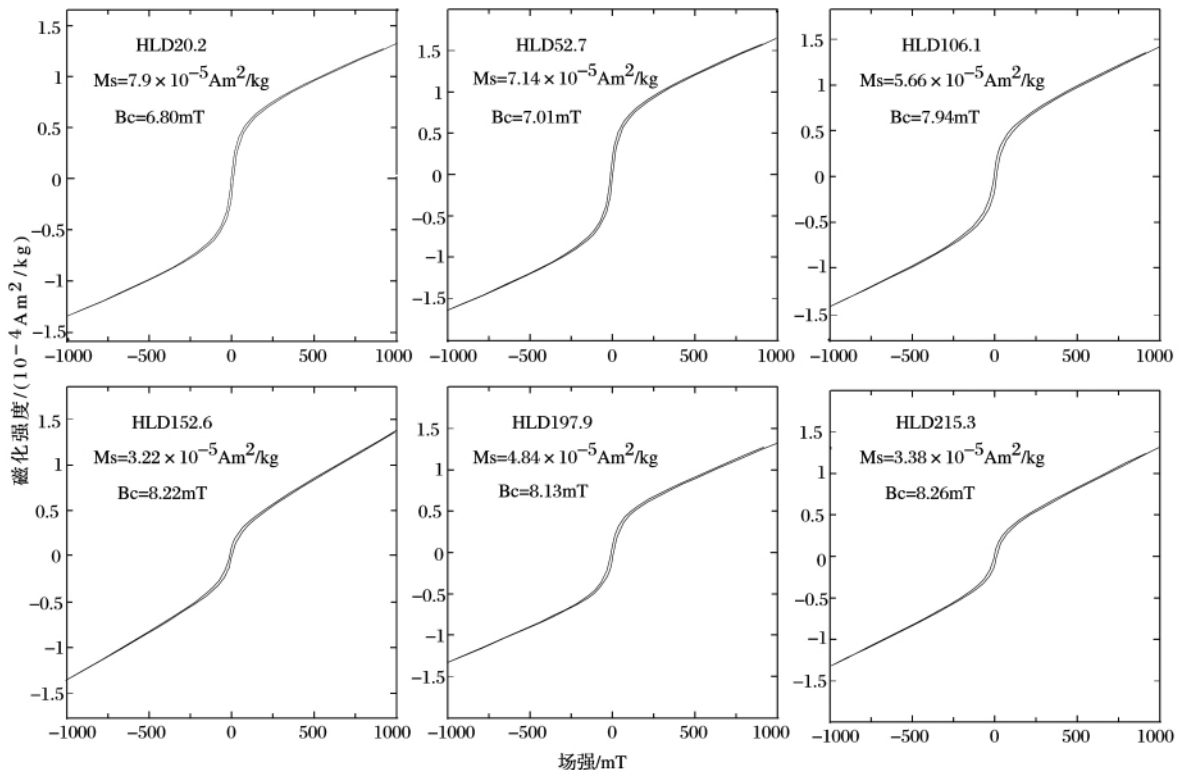


图 4 黑林顶剖面代表性样品磁滞回线

Fig. 4 Hysteresis loops of Heilinding representative samples

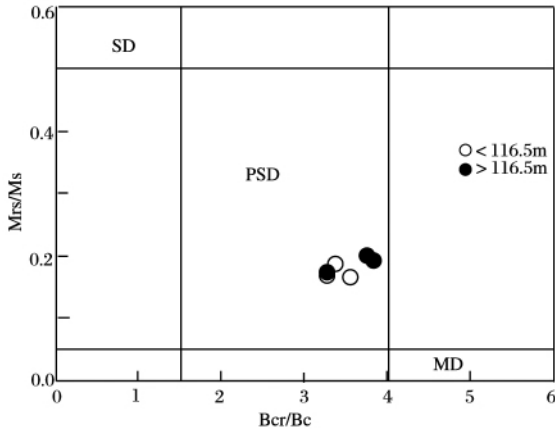


图5 黑林顶剖面代表性样品 Day 氏图

Fig. 5 Hysteresis ratios plotted on a Day diagram of Heilinding representative samples

物(主要是磁铁矿)占据主导地位。而大于 116.5 m 样品的线形形态相对宽缓扁平,“蜂腰”更加明显,说明其磁性矿物尽管也以低矫顽力矿物为主,但高矫顽力矿物的含量有所增加。

利用这六个样品的磁滞参数  $M_{rs}/M_s$  比值和  $B_{cr}/B_c$  比值作 Day-plot 图(图 5),对样品的磁性矿物粒径进行分析<sup>[22]</sup>。图 5 所示全部样品都集中在假单畴区域内,说明这些样品中的磁性矿物粒径没有太大变化,同时也表明样品磁滞回线显示的“蜂腰型”特征主要是由高矫顽力与低矫顽力矿物混合所致<sup>[23]</sup>,不同粒径低矫顽力矿物混合的影响可以忽略<sup>[22]</sup>。

## 4 讨论

岩石磁学分析结果表明,8.6 Ma 以前磁化率保持相对低值,波动幅度小;8.6 Ma 以来磁化率骤然变大,频率磁化率虽然变化不很明显,但和磁化率具有类似的变大趋势(图 2)。热磁曲线特征显示 8.6 Ma 以后样品中磁赤铁矿含量急剧减少,磁滞回线的弱“蜂腰型”特征表明样品中的低矫顽力磁性矿物占主导地位,二者结合说明 8.6 Ma 以来磁化率增高主要由软磁性矿物磁铁矿含量的增加所引起。

传统认为,在室温条件下磁化率大致反映了样品中亚铁磁性矿物的富集程度<sup>[1]</sup>,值越高样品中的亚铁磁性矿物越富集;频率磁化率则可以用来估计样品中超顺磁性物质的含量<sup>[1]</sup>,值越高说明样品中的超顺磁颗粒越多,而且频率磁化率所反映出的超顺磁颗粒通常被认为是在成壤作用中形成的<sup>[24]</sup>。黑林

顶剖面的岩性特征显示,116.5 m 以下主要发育类古土壤,以上虽然仍有古土壤发育但岩性开始变得以砂岩含砾为主,如果仅考虑成壤作用对磁化率的影响,整个剖面的磁化率和频率磁化率变化趋势应为一个下降趋势,然而事实则相反,显然说明本剖面成壤作用对磁化率的增高没有关系,磁性矿物的来源另有他因。

大量的研究表明,在湖泊沉积物中,磁性矿物不仅受物源影响,而且沉积后在一定条件下原生磁性矿物的溶解和次生磁性矿物的生成也是重要的影响因素<sup>[8,9,25]</sup>。磁性矿物的种类、含量和磁性颗粒的大小首先与流域碎屑物磁性特征和沉积环境密切相关,但在沉积物物源和沉积环境基本相同的情况下,磁性矿物的含量和其颗粒的大小直接与水动力大小相关,而水动力大小则与气候相关<sup>[26]</sup>。因为气候变化直接影响了风化作用和沉积作用过程,当气候较为暖湿时,流域内的地表物质成土作用加强,使得沉积物中细粒磁性矿物增多,同时水动力增大使得地表碎屑物质向湖泊的输入量增多,最终导致湖泊沉积物磁化率增大,反之则磁化率降低,简而言之就是说气候变湿会促使磁化率升高。位于临夏盆地中心的毛沟剖面是最为理想的高磁化率物质的接收区,事实也证明磁化率在 8.6 Ma 以来确有变大的趋势<sup>[11]</sup>。然而将气候解释为磁化率增强机制却与同期大范围变干的事实相矛盾。因为,在临夏盆地毛沟剖面中,对于干旱气候环境敏感的碳酸钙含量和氯离子浓度在约 8 Ma 开始明显增加,到 6.2 Ma 增加至最高峰<sup>[15,27]</sup>; 13.0 ~ 8.5 Ma 的针阔混交林植被在 8.5 Ma 之后被干草原环境所替代<sup>[28]</sup>。拓展到临夏盆地周边地区,西北酒西盆地的孢粉中草本植物急剧扩张<sup>[29]</sup>; 东南的秦安地区粉尘通量急剧增加<sup>[30]</sup>,黄土高原黄土—古土壤的  $\delta^{13}C$  值记录了 8 ~ 7 Ma 时  $C_4$  植被的扩张<sup>[31]</sup>。这些指标的变化均指示了在 8 ~ 7 Ma,东亚陆地生态系统发生了重大变化,亚洲干旱化加剧<sup>[31,32]</sup>。因此,在干旱背景下,黑林顶磁化率的增强不可能是气候造成的。

排除成壤作用和气候变化对磁化率增高的可能原因后,我们认为物源的变化可能是造成黑林顶剖面磁化率增强的主要原因。早期的湖泊沉积物环境磁学研究已经表明,沉积物的磁性特征一般都与特定的源区相关,在特定流域内,高磁化率曾被当作是侵蚀作用的标志,磁化率值越高反映流域内原生磁性矿物的输入量越大<sup>[1]</sup>。临夏盆地是一个挤压挠

曲型的前陆盆地<sup>[13]</sup>,盆地内发育多条与积石山垂直的横向河流,因此积石山是临夏盆地最直接的物源供应区<sup>[33]</sup>。碎屑颗粒裂变径迹热年代学<sup>[34]</sup>和构造地质学<sup>[35]</sup>研究表明积石山受青藏高原扩展和隆升的影响在 8 Ma 左右开始发生岩体隆升,当山体隆升到一定高度后,地形侵蚀加剧,山体切割迅速,进而把山体上风化破碎的岩石搬运到临夏盆地中,使得盆地沉积物在 8 Ma 前后由于二次循环物质的加入发生了变化<sup>[34,36]</sup>。纵观整个黑林顶剖面(图 2),以 116.5m 处为界从洪泛平原过渡到辫状河流沉积为主,岩性下细上粗,说明盆地此时的物质搬运和沉积受地形的巨大变化已经发生了明显的改变,高能量的粗颗粒物被搬运到盆地中心附近。综上所述,本文认为黑林顶剖面在 8.6 Ma 物源确实发生了改变。

## 5 结论

临夏盆地黑林顶剖面晚新生代沉积物的岩石磁学研究表明在 11.8 ~ 8.6 Ma,磁化率基本稳定在  $0.58 \sim 6.9/10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  之间; 8.6 Ma 以后基本稳定在  $0.75 \sim 10.6/10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,软磁性矿物明显增加。这一结果与成壤作用和气候变化不符合,结合盆地周围构造条件和研究结果,认为物源的变化可能是造成黑林顶剖面磁化率增强的主要原因。

致谢 张伟林、王九一、杨一博等参加了部分野外采样工作,在此表示感谢。

### 参考文献(References)

- Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism [M]. London: Allen Unwin, 1986
- Heller F, Liu T S. Magnetism of Chinese loess deposits [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1984, 77: 125-141
- Oldfield F. Environmental magnetism: a personal perspective [J]. Quaternary Science Reviews, 1991, 10: 73-85
- 刘椿, 刘东生, 金增信, 等. 北京颐和园昆明湖近代沉积物的环境磁学初步研究及意义 [J]. 科学通报, 1994, 39(21): 1989-1991 [Liu Chun, Liu Dongsheng, Jin Zengxin, et al. A preliminary study on environmental magnetism of recent sediments in Kunming lake of summer palace, Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(21): 1989-1991]
- Thouveny N, de Beaulieu J L, Bonifay E, et al. Climate variations in Europe over the past 140 kyr deduced from rock magnetism [J]. Nature, 1994, 371: 503-506
- Bernasconi S M, Dobson J, McKenzie J A, et al. Preliminary isotopic and paleomagnetic evidence for Younger Dryas and Holocene climate evolution in NE Asia [J]. Terra Nova, 1997, 9: 246-250
- Williamson D, Jelinowska A, Kissel C, et al. Mineral-magnetic proxies of erosion/oxidation cycles in tropical maar-lake sediments (Lake Tritrivakey, Madagascar): paleoenvironmental implications [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 155: 205-219
- 胡守云, 王苏民, Appel E, 等. 呼伦湖湖泊沉积物磁化率变化的环境磁学机制 [J]. 中国科学: D 辑, 1998, 28(4): 334-339 [Hu Shouyun, Wang Sumin, Appel E, et al. Magnetic susceptibility of the lacustrine sediments and its influence factors in Lake Hulun. Science in China: Series D, 1998, 28(4): 334-339]
- Lanci L, Hirt A M, Lowrie W, et al. Mineral-magnetic record of Late Quaternary climatic changes in a high Alpine lake [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 170: 49-59
- Sun Jimin, Zhu Rixiang, An Zhisheng. Tectonic uplift in the northern Tibetan Plateau since 13.7 Ma ago inferred from molasses deposits along the Altyn Tagh Fault [J]. Sciencedirect, 2005: 641-652
- 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, (06): 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, (06): 989-1000]
- 梁忠, 邓涛. 甘肃临夏盆地晚中新世大唇犀化石的年龄结构与生活环境 [J]. 古脊椎动物学报, 2005, 7(3): 219-230 [Liang Zhong, Deng Tao. Age structure and habitat of the rhinoceros Chilotherium during the late Miocene in the Linxia basin, Gansu, China [J]. Vertebrata Palasiatica, 2005, 7(3): 219-230]
- 邓涛, 王晓鸣, 倪喜军, 等. 临夏盆地的新生代地层及其哺乳动物化石证据 [J]. 古脊椎动物学报, 2004, 42(1): 45-66 [Deng Tao, Wang Xiaoming, Ni Xijun, et al. Cenozoic stratigraphic sequence of the Linxia Basin in Gansu, China and its evidence from mammal fossils [J]. Vertebrata Palasiatica, 2004, 42(1): 45-66]
- Fang Xiaomin, Garzione C, van der Voo R, et al. Flexural subsidence by 29Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin, China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 210(3-4): 545-560
- Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou, et al. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the Late Cenozoic [J]. Science in China: Series D, 1996, 39(4): 380-390
- Li Jijun, Fang Xiaomin, van der Voo R, et al. Late Cenozoic magnetostratigraphy (11-0Ma) of the Dongshanding and Wangjiashan sections in the Longzhong Basin, Western China [J]. Geologie en Mijnbouw, 1997, 76: 121-134
- Li Jijun, Fang Xiaomin, van der Voo R, et al. Magnetostratigraphic dating of river terraces: Rapid and intermittent incision by the Yellow River of the northeastern margin of the Tibetan Plateau during the Quaternary [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (D10): 10121-10132
- Li Jijun. Uplift of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and Global Change [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1995: 38-39
- 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 甘肃临夏盆地新生代地层绝对年代

- 测定与划分[J]. 科学通报, 1997, 42 (14): 1457-1471 [ Fang Xiaomin, Li Jijun, Zhu Junjie, *et al.* Absolute age determination and division of Cenozoic stratigraphy in the Linxia Basin of Gansu Province, China[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(14): 1457-1471 ]
- 20 甘肃省区调队. 1:20 万中华人民共和国地质图说明书—临夏幅[M]. 北京: 地质出版社, 1965 [Regional Geological Team of Gansu Province. Introduction to the Geological Map of the P. R. China, Scale 1: 2000000, Linxia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1965 ]
- 21 王九一, 方小敏. 临夏盆地黑林顶部剖面哺乳动物化石磁性地层学及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 待刊 [Wang Jiuyi, Fang Xiaomin. Magnetostratigraphy of fossil mammals in Heilinding section of Linxia Basin and their implication[J]. Marine Geology and Quaternary Geology 2010, in press ]
- 22 Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1977, 13: 260-267
- 23 Roberts A P, Cui Y L, Verosub K L. Waspwaisted hysteresis loops: Mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100, B9: 17909-17924
- 24 刘秀铭, 安芷生, 强小科, 等. 甘肃第三季红粘土磁性性质初步研究及古气候意义[J]. 中国科学: D 辑, 2000, 30(3): 192-205 [Liu Xiuming, An Zhisheng, Tim Rolph, *et al.* Magnetic properties of the Tertiary Red Clay from Gansu Province, China and its paleoclimatic significance[J]. Science in China: Series D, 2001, 44(7): 635-651 ]
- 25 陈发虎, 王苏民, 李吉均, 等. 青藏高原若尔盖湖芯磁性地层研究[J]. 中国科学: B 辑, 1995, 25(7): 772-777 [Chen Fahu, Wang Sumin, Li Jijun, *et al.* A magnetostratigraphical study on the Ruergai basin of east Tibetan Paleau[J]. Science in China: Series B 1995(7): 772-777 ]
- 26 张振, 宋春晖, 张平, 等. 青藏高原昆仑山垭口盆地晚上新世以来沉积物磁化率与气候变化[J]. 资源调查与环境, 2007(3): 205-213 [ Zhang Zhen, Song Chunhui, Zhang Pin, *et al.* Magnetic susceptibility of lacustrine sediments and climatic change in Kunlun Mountains pass basin since the late Pliocene [J]. Resources Survey and Enviroment, 2007(3): 205-213 ]
- 27 方小敏, 奚晓霞, 李吉均, 等. 中国西部晚中新世气候变干事件的发现及其意义[J]. 科学通报, 1997, 42 (23): 2521-2524 [ Fang Xiaomin, Xi Xiaoxia, Li Jijun, *et al.* Late Miocene drying of Western China [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42 (23): 2521-2524 ]
- 28 马玉贞, 李吉均, 方小敏. 临夏地区 30.6-5.0Ma 红层孢粉植物群与气候演化记录[J]. 科学通报, 1998, 43 (3): 301-304 [ Ma Yuzhen, Li Jijun, Fang Xiaomin. Pollen-spores in the red bed during 30.6-5.0Ma in the Linxia Basin and climatic evolution[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43 (3): 301-304 ]
- 29 Ma Yuzhen, Fang Xiaomin, Li Jijun, *et al.* The vegetation and climate change during Neocene and Early Quaternary in Jiuxi Basin, China[J]. Science in China: Series D, 2005, 48(5): 676-688
- 30 Guo Zhentang, Ruddiman W F, Hao Qingzhen, *et al.* Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. Nature, 2002, 416: 159-163
- 31 An Zhisheng, Huang Yongsong, Liu Weiguo, *et al.* Multiple expansions of C<sub>4</sub> plant biomass in East Asia since 7Ma coupled with strengthened monsoon circulation [J]. Geology, 2005, 33(9): 705-708
- 32 安芷生, 张培震. 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. 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 ]
- 33 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 构造、气候与砾岩—以积石山和临夏盆地为例[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 63-69 [ Zheng Dewen, Zhang Peizhen, Wan Jinglin, *et al.* Tectonic events, climate and conglomerate: Example from Jishi Mountain and Linxia Basin [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 63-69 ]
- 34 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 青藏高原东北边缘晚新生代构造变形的时序—临夏盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33 (增刊): 190-198 [ Zheng Dewen, Zhang Peizhen, Wan Jinglin *et al.* Late Cenozoic deformation subsequence in northeastern margin of Tibet Detrital AFT records from Linxia Basin [J]. Science in China: Series D, 2003, 46( Suppl.): 266-275 ]
- 35 An Zhisheng, Kutzbach J E, Prell W L, *et al.* Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times[J]. Nature, 2001, 411: 62-66
- 36 张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代的扩展与隆升的讨论[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 5-13 [ Zhang Peizhen, Zheng Dewen, Yin Gongming, *et al.* Discussion on late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 5-13 ]

## Rockmagnetic Characteristics of the Sediments from Heilinding Section in the Linxia Basin at 8.6 Ma and Their Implications

YAN Xiao-li<sup>1</sup> ZHANG Qi-bo<sup>1</sup> FANG Xiao-Min<sup>2,1</sup> MIAO Yun-Fa<sup>2</sup> ZAN Jin-bo<sup>1</sup>  
MENG Qing-Quan<sup>1</sup> SONG Chun-Hui<sup>1,2</sup> ZHANG Tao<sup>1</sup> CHI Yun-Ping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education of China & College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000;

2. Center for Basin Resource and Environment, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

**Abstract** The Linxia Basin is a key place to study the paleoclimate change and the Tibetan Plateau uplift for its special place at the Asian monsoon margin and the northeastern Tibetan Plateau. Variations of the magnetic susceptibility and rockmagnetic characteristics from the Heilinding sediments in the Linxia Basin revealed a huge change occurred at the about 8.6 Ma based on a ideal palaeomagnetic dating (11.8-5.0 Ma). During 11.8-8.6 Ma, the value of the magnetic susceptibility was stably low ( $0.58-6.9/10^{-8} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ ). After 8.6 Ma, it became very high ( $0.75-40.6/10^{-8} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ ) for the soft mineral magnetic properties. We argued such change was mainly caused by the change of the material origin driven by the uplift of the Tibetan Plateau. The magnetic susceptibility in the lake sediments is different from the loess-paleosol layers in the explanation of the environment and climate change.

**Key words** magnetic susceptibility; origin; uplift; Late Cenozoic