

吴百灵, 邓成龙, 孔艳芬等. 2018. 甘肃陇中盆地会宁关公滩剖面磁性地层年代学研究. 地球物理学报, 61(4):1390-1399, doi:10.6038/cjg2018L0203.

Wu B L, Deng C L, Kong Y F, et al. 2018. Magnetostratigraphy of the fluvio-lacustrine sequence on the Guangongtan section in Longzhong Basin, NW China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(4):1390-1399, doi:10.6038/cjg2018L0203.

甘肃陇中盆地会宁关公滩剖面磁性地层年代学研究

吴百灵^{1,2}, 邓成龙^{1,2*}, 孔艳芬^{1,2}, 刘素贞¹, 孙璐¹, 李仕虎¹,
葛俊逸³, 王元³, 金昌柱³, 朱日祥^{1,2}

1 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044

摘要 本文对陇中盆地会宁含小哺乳动物化石的关公滩剖面河湖相沉积序列进行了详细的岩石磁学和磁性地层学研究, 磁化率各向异性结果表明关公滩剖面沉积物记录了典型的原生沉积组构, 沉积物沉积以后几乎没有受到后期的扰动. 最大磁化率主轴方向与现今的古水流向基本一致, 表明区域西高东低的地貌至少在中更新世早期已经形成. 磁滞回线、等温剩磁获得曲线的矫顽力谱分析、三轴等温剩磁退磁曲线等岩石磁学结果显示: 关公滩剖面河湖相沉积物的磁性矿物有磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿, 其中磁铁矿和赤铁矿是主要的剩磁载体, 但其特征剩磁载体以赤铁矿为主. 系统退磁结果显示, 在大部分样品中, 磁铁矿和赤铁矿均记录了几乎相同的特征剩磁的方向, 整个剖面呈现单一的正极性. 另外, 关公滩剖面底部河湖相沉积物中产出丰富的小哺乳动物牙齿化石, 经初步研究包括复齿鼠兔(*Ochotonoides complicidens*)、丁氏鼯鼠(*Myospalax tingi*)、方氏鼯鼠(*Myospalax fontanieri*)、变异仓鼠(*Cricetinus varians*)、大林姬鼠(*Cricetinus varians*)、复齿旱獭(*Marmota complicidens*)等六个种类, 其中丁氏鼯鼠和复齿鼠兔是相对原始的种类, 其时代跨越早更新世至中更新世早期, 其他都是我国北方中、晚更新世常见的种类, 该小哺乳动物化石组合性质表明其时代很可能为中更新世早期. 因此, 综合磁性地层学和小哺乳动物生物年代学结果, 关公滩剖面记录了布容正极性时的沉积, 剖面底部堆积及其哺乳动物群的时代应为中更新世早期.

关键词 磁性地层学; 陇中盆地; 河湖相沉积; 生物年代学; 中更新世

doi:10.6038/cjg2018L0203

中图分类号 P318

收稿日期 2017-04-05, 2017-12-25 收修定稿

Magnetostratigraphy of the fluvio-lacustrine sequence on the Guangongtan section in Longzhong Basin, NW China

WU BaiLing^{1,2}, DENG ChengLong^{1,2*}, KONG YanFen^{1,2}, LIU SuZhen¹, SUN Lu¹,
LI ShiHu¹, GE JunYi³, WANG Yuan³, JIN ChangZhu³, ZHU RiXiang^{1,2}

1 State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China

Abstract The Huining area is located in a sub-basin of the Longzhong Basin where developed thick Neogene-Quaternary fluvio-lacustrine and aeolian sediments. Research on fluvio-lacustrine

基金项目 国家自然科学基金项目(41690112, 41621004)资助.

第一作者简介 吴百灵, 女, 博士研究生, 主要从事古地磁学研究. E-mail: wbl@mail.iggcas.ac.cn

* 通讯作者 邓成龙, 男, 研究员, 主要从事古地磁学研究. E-mail: cldeng@mail.iggcas.ac.cn

sediments in this area is relatively less due to its scattered distribution. The Quaternary fluvio-lacustrine sediments in Huining contain abundant micromammalian fossils. A solid age constraint of these fossils can improve our understanding of the diversity and evolution of terrestrial mammals during the Pleistocene. Here we present a detailed study on rock magnetism and high-resolution magnetostratigraphy of the Guangongtan section in Huining.

Small micromammalian fossils at the bottom of the Guangongtan section were examined to determine the approximate age of the fluvio-lacustrine sedimentary sequence. Six species were identified, including *Ochotonoides complicidens*, *Myospalax tingi*, *Myospalax fontanieri*, *Cricetinus varians*, *Cricetinus varians* and *Marmota complicidens*. Among them, *Ochotonoides complicidens* and *Myospalax tingi* have ages from early Pleistocene to early Middle Pleistocene, and other four species are taxa typical of middle and late Pleistocene in northern China. Therefore, these biochronologically useful species indicate an age of early Middle Pleistocene for the bottom of the Guangongtan section.

Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS), thermal demagnetization of three-axis Isothermal Remanent Magnetization (IRM), hysteresis loop, and component analysis of coercivity distributions indicate that the magnetic minerals in the sediments are mainly magnetite, maghemite and hematite, and that magnetite and hematite serve as the dominant remanence carriers. However, the characteristic remanent magnetizations are primarily carried by hematite. AMS and systematic demagnetization results show a typical undisturbed primary sediment accumulation. An eastward paleocurrent direction which is concurrent with the present was discriminated from the orientation of the maximum susceptibility axis directions. This paleocurrent direction indicates that the current geomorphology was formed no later than the early Middle Pleistocene. Combining the magnetostratigraphic and biochronologic data, we suggest that the Guangongtan section correlates to the Brunhes chron. The bottom of the Guangongtan fluvio-lacustrine sedimentary sequence and associated small micromammalian fossils can be placed in the early part of Middle Pleistocene.

Keywords Magnetostratigraphy; Longzhong Basin; Fluvio-lacustrine sequence; Biochronology; Middle Pleistocene

0 引言

中国北方第四纪河湖相沉积物和风成沉积物中含有丰富的哺乳动物化石。在黄土高原西部地区,河湖相沉积物与风成沉积物往往是发育在不同地貌部位的同期异相堆积,而河湖相沉积物因其沉积时相对较强的水动力环境和较快的沉积速率,为小哺乳动物化石的搬运、富集和保存创造了有利条件。在黄土高原西部黄河二级和三级支流河谷地带的许多地点保存有较完好的河湖相地层剖面,它们多由粉砂与黏土质沉积物组成,局部含有丰富的小哺乳动物化石。近年来,磁性地层学在我国陆相沉积物定年方面发挥了重要作用,尤其是对于一些缺乏同位素定年材料的地层,磁性地层学与生物地层学相结合成为建立高精度地层年代框架的有效手段,为建立我国晚新生代陆生哺乳动物年代学标尺提供了重要依

据(邓涛,2006;Deng et al.,2008;Zhu et al.,2008;Li et al.,2015)。

然而,对于黄土高原西部地区(如陇中盆地)第四纪地貌演化研究相对较少。已有研究表明在中新世之后存在明显的侵蚀期,虽然在平坦高地上堆积了巨厚的黄土(Guo et al.,2002;Zhan et al.,2011),但是该区还广泛发育第四纪河湖相沉积,其中赋存了丰富的哺乳动物化石。由于对该河湖相沉积缺乏深入的地层年代学研究,制约了对于该区域地层对比、河流地貌演化及哺乳动物演化的深入认识。

本文研究的关公滩剖面位于甘肃会宁县,地处黄土高原西缘、六盘山以西的陇中盆地北部(图1),盆地内广泛发育新近纪—第四纪风成沉积和河湖相沉积(瞿毓沛和蔡体梁,1984)。近年来对陇中地区新近纪风尘堆积取得了丰富的磁性地层年代学研究成果(Guo et al.,2002;Hao and Guo,2007;Qiang et al.,2011;Zhan et al.,2011)。相对于临夏盆地

(Fang et al., 2003)、兰州盆地(Qiu et al., 2001)等巨厚的河湖相沉积,会宁地区的河湖相沉积分布和发育较多的受到地形地貌条件的影响,厚度一般较小,以浅湖相及洼地静水沉积等为主,其中含有丰富的哺乳动物化石.前人在该地区开展的地层年代学研究工作主要侧重于发育良好的风成沉积地层.由于缺乏可靠的高精度地层年代学结果,该地区河湖相沉积物及赋存的哺乳动物化石年代学资料非常缺乏,从而制约了我们对区域地层年代学的认识.

本文对陇中盆地产出哺乳动物化石的会宁关公滩剖面河湖相沉积地层开展了详细的岩石磁学和磁性地层年代学研究,以期为该剖面及其底部赋存

的哺乳动物化石提供可靠的年代学约束,并为这套地层的跨区域对比提供年代学依据.

1 研究区地质概况和样品采集

研究区域属于陇中盆地的次级盆地(图 1a)(瞿毓沛和蔡体梁,1984).区域上广泛覆盖晚更新世的疏松风成黄土,与下伏新近纪红黏土呈不整合接触,其中夹中期河湖相及冲洪积相的砂砾石层.但由于黄土的大范围覆盖,红黏土和河湖相沉积的露头比较分散,只在沟谷两侧断续可见.沿沟谷底部出露加里东中期的花岗岩基岩(图 1b)(甘肃省地质局第一

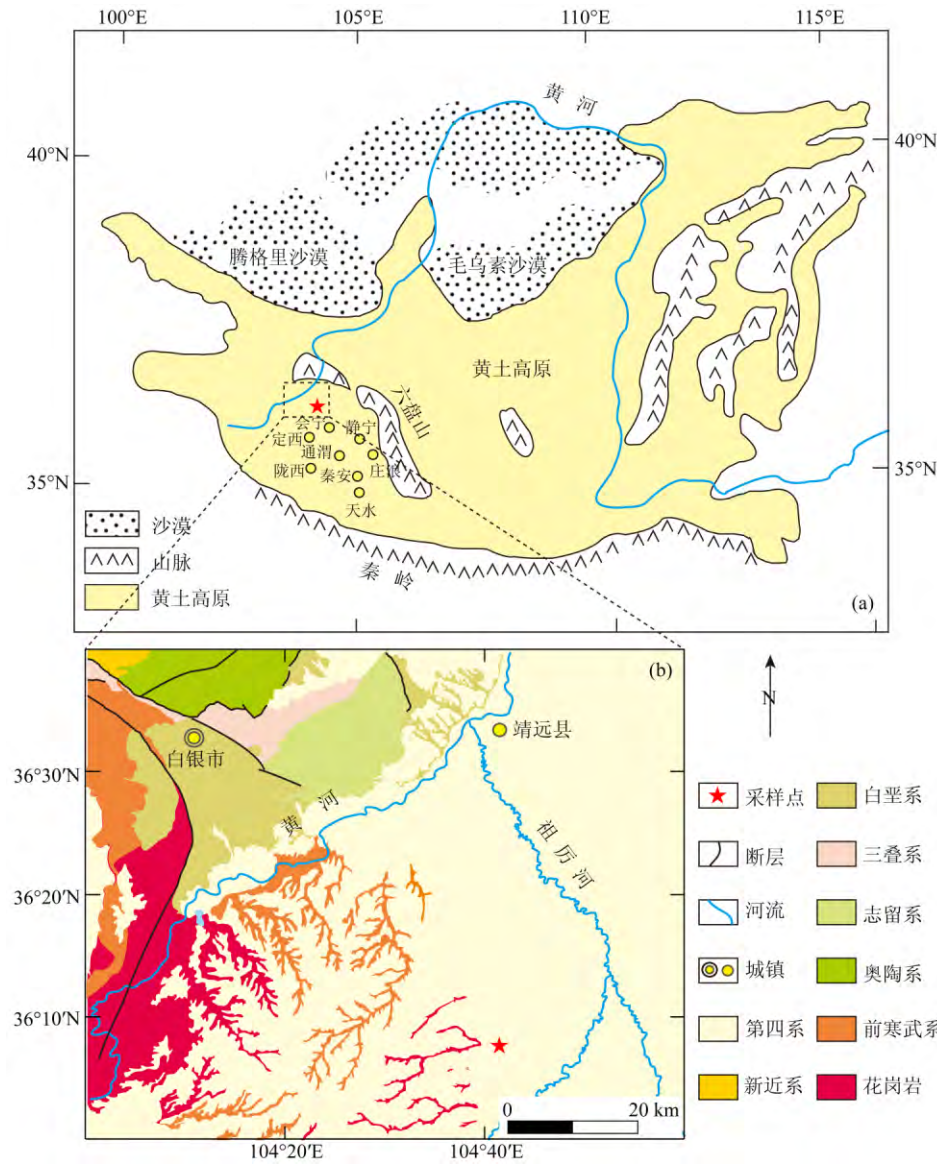


图 1 采样剖面及其邻区地质简图(改图修改自 Qiang 等(2011)和甘肃省地质局第一区域地质测量队(1972))
 Fig.1 Schematic geological map showing the Chinese Loess Plateau and sampling locality of this study (modified after Qiang et al. (2011) and the First Regional Geology Surveying Brigade of Gansu Bureau of Geology(1972))

区域地质测量队,1972)。该区沉积环境多变,有典型的风成沉积,有河湖相沉积以及静水洼地沉积。整个区域基岩地形西高东低,本研究进行采样的关公滩剖面就出露于一条东西走向的沟谷侧壁,向东随海拔降低沟谷两侧出露的河湖相沉积或者红黏土也逐渐变厚。研究区属于干旱-半干旱气候,年平均气温 $6\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $180\sim 450\text{ mm}$ 。关公滩剖面所在的沟谷底部仍有季节性的流水。该剖面的岩性变化如下:

剖面顶部 $0\sim 6.7\text{ m}$ 为疏松的黄色粉砂。

剖面中部 $6.7\sim 69\text{ m}$ 为黄色粉砂与棕红色黏土质粉砂岩互层,单层厚度 $0.5\sim 3\text{ cm}$ 左右,有明显的沉积韵律。

剖面下部 $69\sim 74.4\text{ m}$ 为河流相砂砾石,砾石大小混杂,磨圆度中等。在该砂砾石层中产出小哺乳动物化石。

剖面底部出露花岗岩基岩。

对剖面进行了高分辨率的古地磁定向手标本样品的采集,采样间距 $20\sim 30\text{ cm}$,共采集古地磁定向手标本326块。在室内将手标本用无磁锯片加工为边长为 2 cm 的立方体样品用于后续的岩石磁学和古地磁学实验。

2 实验方法与实验结果

2.1 磁化率各向异性

磁化率各向异性(简称磁组构)主要反映样品中

磁性矿物的定向排列(Tarling and Hrouda,1993)。在沉积物中,磁组构主要反映沉积物沉积和搬运的动力学过程(Schieber and Ellwood,1993;吴汉宁和岳乐平,1997;Ge et al.,2014)以及沉积后所受的外界应力的情况(Borradaile and Henry,1997;Cifelli et al.,2005;Li et al.,2014)。为了确定关公滩剖面沉积物在沉积过程中和沉积后是否经历过后期扰动作用,在进行系统退磁之前,对326块样品进行了详细的磁组构研究。使用捷克AGICO公司生产的KLY-4卡帕桥多频磁化率仪(Agico Ltd.,Brno)测量样品的磁化率各向异性,磁化率测量精度为 $2\times 10^{-8}\text{ SI}$,所用磁场强度为 $300\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ 。按照Jelínek和Kropáček(1978)的方法计算得出磁化率各向异性参数。

图2a为关公滩剖面样品最大磁化率主轴(K_{\max})和最小磁化率主轴(K_{\min})的极射赤平投影图。绝大部分样品的 K_{\min} 接近垂直于沉积层面,并且分布集中,平均方向为 $D/I=78.5^{\circ}/85.1^{\circ}$; K_{\max} 倾角较浅,接近水平且平行于沉积层面,平均方向为 $D/I=277.7^{\circ}/4.7^{\circ}$ 。弗林图(图2b)显示磁线理(L)均小于磁面理(F)。这些特征表明关公滩剖面沉积物为典型的原生沉积磁组构,即该剖面沉积物沉积以后几乎没有受到后期的扰动(Vlag et al.,1996;Zhu et al.,1998)。磁化率随深度的变化曲线在整体上无明显波动(图6b),平均值为 $(22.45\pm 9.84)\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,表明关公滩剖面沉积物的物源比较稳定,这也与剖面整体比较均一的岩性相符。

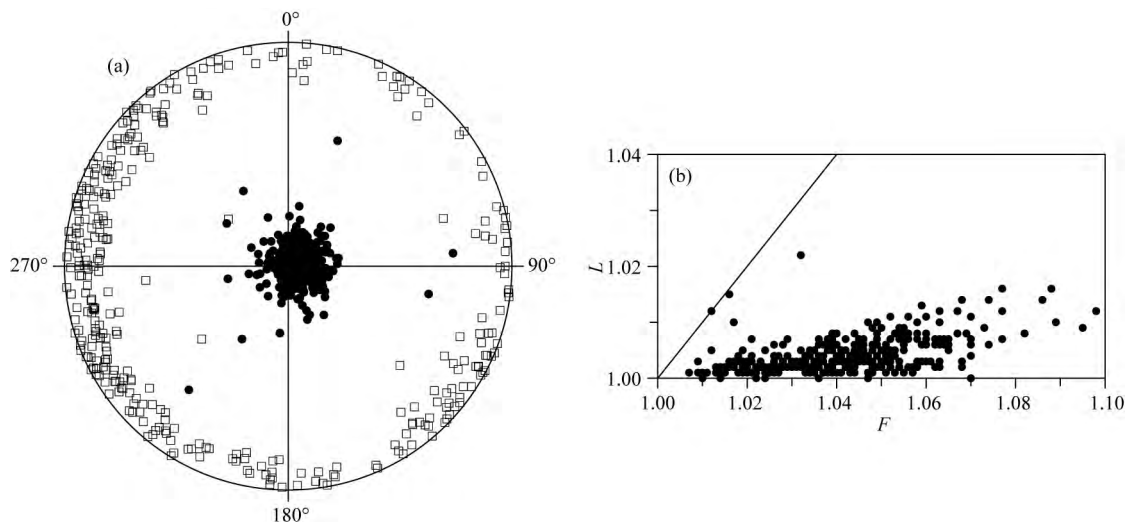


图2 关公滩剖面样品的磁化率各向异性

(a) 最大磁化率主轴 K_{\max} (空心矩形)及最小磁化率主轴 K_{\min} (实心圆形)极射赤平投影; (b) 磁线理(L)和磁面理(F)的关系。

Fig. 2 Anisotropy of magnetic susceptibility(AMS)of samples from the GGT section

(a) Stereographic projection of principal susceptibility axes of K_{\max} (open squares) and K_{\min} (solid circles);

(b) Magnetic lineation(L) versus magnetic foliation(F).

2.2 三轴等温剩磁退磁曲线

由于不同类型磁性矿物具有不同的解阻温度和矫顽力分布,因此可以利用三轴等温剩磁退磁曲线(Lowrie, 1990)来确定沉积物中的磁性矿物种类和剩磁载体(He et al., 2012; Deng et al., 2013). 为了确定关公滩剖面沉积物中的剩磁载体,本研究使用2G-660型脉冲磁力仪对代表性样品沿Z、Y和X三个方向分别施加2.7 T、0.5 T和0.05 T的脉冲直流场,然后使用ASC TD-48型热退磁炉以10~50 °C的温度间隔将样品逐步加热至685 °C,并使用2G-760低温超导磁力仪测量每一步加热后的剩磁强度.

实验结果显示:所有样品的低矫顽力组分热退磁曲线在585~600 °C存在明显的拐点,表明磁铁矿是重要的剩磁载体(图3). 大部分样品的中、高矫顽力组分在650 °C解阻,可能代表热稳定的磁赤铁矿(Özdemir and Banerjee, 1984; Özdemir, 1990; 刘秀铭等, 2010)或者较细粒赤铁矿的信号(Deng et al., 2013). 此外,所有样品的低矫顽力组分在300 °C附

近斜率发生微弱变化,可能指示了热不稳定的磁赤铁矿的存在(刘秀铭等, 2010). 部分样品的最高解阻温度出现在690 °C附近,说明赤铁矿也是重要的剩磁载体(图3d—f). 综上所述,关公滩剖面样品中的剩磁载体有磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿.

2.3 磁滞回线和矫顽力谱分析

由于沉积物中的磁性矿物往往是多种成分和粒度的组合,样品的磁滞回线形状、磁滞参数与磁性矿物的种类和粒度密切相关(Roberts et al., 1995; Dunlop, 2002; Deng et al., 2004),因此,综合样品的磁滞回线特征和等温剩磁获得曲线的矫顽力谱分析,可用以有效提取样品的矫顽力信息以鉴别剩磁载体的成分和粒度,这一方法广泛应用于区分沉积物中不同矫顽力的磁性矿物(He et al., 2012; Li et al., 2013; Liu et al., 2016).

本研究中磁滞回线和等温剩磁获得曲线均使用MicroMag3900振动样品磁力仪(VSM)测得,测量磁滞回线时外场范围为±1 T,等温剩磁获得曲线所加的最大外场为1.5 T. 结果显示样品的磁滞回线

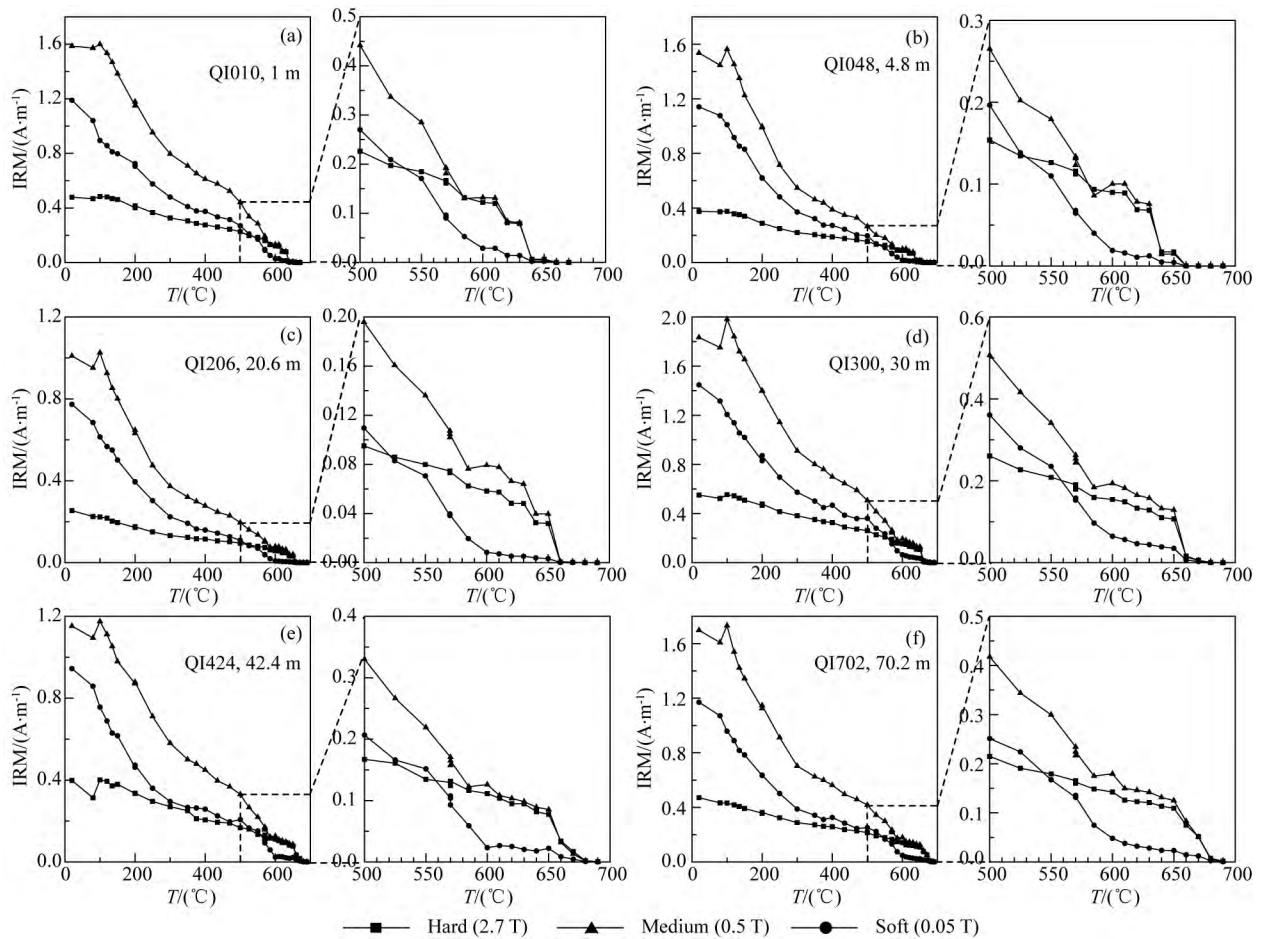


图3 代表性样品的三轴等温剩磁(IRM)逐步热退磁曲线

Fig. 3 Progressive thermal demagnetization of composite IRMs from representative samples

在 0.5 T 以上闭合(图 4a—c),表明样品的磁性矿物以软磁组分为主。为了进一步区分主要载磁矿物的贡献,我们采用 Kruiver 等(2001)的方法对代表性样品的等温剩磁获得曲线进行矫顽力谱分析(图 4d—f)。矫顽力谱分析显示样品普遍含有两种矫顽力成分的磁性矿物,其中低矫顽力成分的峰值位于 80 mT 左右,代表磁铁矿的信号,其拟合百分含量大于 90%,在样品中占主导地位;高矫顽力分量的峰值 700 mT 左右,代表赤铁矿的信号,其拟合百分含量在 7%左右。该结果也与磁滞回线无明显细腰的形态特征相印证,即虽然样品中含有两种矫顽力差别较大的组分,但是其相对含量差别较大。综合三轴等温剩磁退磁的结果,可以确定关公滩剖面沉积物剩磁载体既有低矫顽力的磁铁矿,又有高矫顽力的赤铁矿。

2.4 系统退磁

根据上述岩石磁学实验结果,会宁关公滩剖面沉积中的磁性矿物有磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿。这三种磁性矿物都是剩磁载体,但以磁铁矿和赤铁矿为主。我们采用热退磁或者热退磁与交变退磁相结合的混合退磁法,对所有样品进行了系统退磁。对于热退磁实验,使用 TD-48 型热退磁炉进行,以 10~50 °C 间隔逐步加热至 680 °C;对于交变退磁实验,以 5~10 mT 的间隔逐步增加至 60 mT。所有退磁实验均在磁屏蔽空间(<300 nT)中进行。

用 2G-760 低温超导磁力仪测量每一步热退磁或者交变退磁后样品的剩磁。系统退磁的结果用正交矢量投影图(Zijderveld,1967)表示,并使用最小二乘法(Kirschvink,1980)拟合每个样品的特征剩磁方向。

关公滩剖面样品的天然剩磁强度在 $3.05 \times 10^{-2} \sim 2.14 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 之间,代表性样品的系统退磁曲线如图 5 所示。通过系统退磁实验,成功分离出了 321 个(98.5%)样品的特征剩磁方向。大部分样品显示双分量的特征,其低温分量一般在 150 °C 或 5 mT 之前获得,少部分样品显示单分量的特征。选取特征剩磁数据点时,保证至少四个连续的退磁步骤且最大角偏差(MAD)小于 15 °C。绝大多数样品的特征剩磁分量在 550~630 °C 之间获得(图 5b, 5c, 5h, 5i),部分样品(图 5d, 5g, 5j, 5k)的高温分量到 680 °C 时依然保持稳定,这部分样品的特征剩磁分量在 610~680 °C 之间获得。前者的特征剩磁分量由磁铁矿与赤铁矿或者磁赤铁矿共同携带,而后的特征剩磁分量则主要由赤铁矿携带,这两类样品在图 6 中统一用空心菱形表示,它们占有分离出特征剩磁样品的 85.7%。剩余 14.3%的样品的特征剩磁分量在 350~585 °C 温度段分离得到(图 5e),这类样品主要是由磁铁矿载磁,在图 6 中统一用实心圆表示。利用所得到的 321 个样品的特征剩磁方向确定虚地磁极纬度,并建立会宁关公滩剖面的磁极性序列(图 6)。

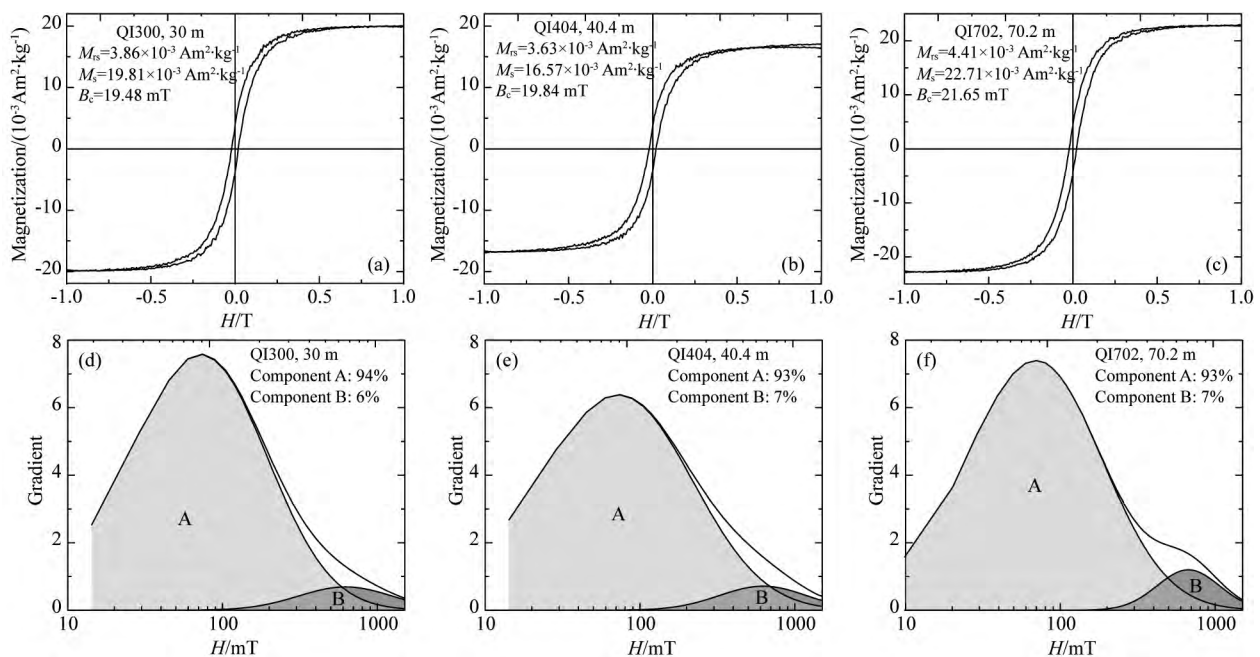


图 4 代表性样品顺磁校正后的磁滞回线(a—c)以及矫顽力谱分析示意图(d—f)

Fig. 4 Hysteresis loops after slope correction for paramagnetic contribution(a—c) and component analysis of coercivity distributions(d—f) for representative samples

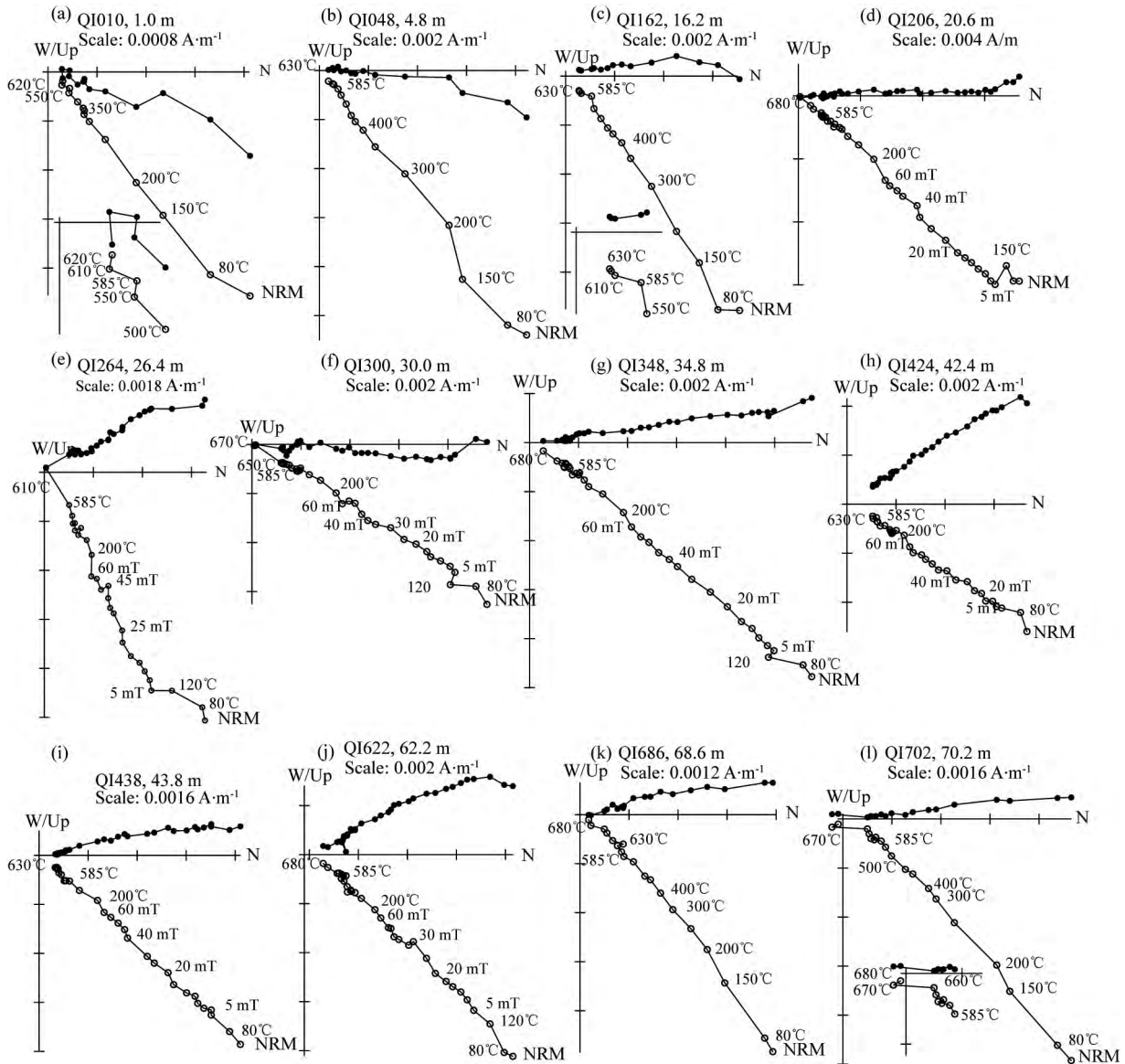


图 5 典型样品的退磁结果正交投影图

实心圆和空心圆分别表示在水平面和垂直面的投影;热退磁温度用 $^{\circ}\text{C}$ 标注;交变退磁强度用 mT 标注;NRM 为天然剩磁。

Fig. 5 Orthogonal vector plots of thermal and/or mixed thermal and AF demagnetizations of NRM of representative samples from the Guangongtan section

The solid(open)circles represent the horizontal(vertical)planes. Thermal treatment levels are marked in $^{\circ}\text{C}$, and the AF demagnetization levels are marked with mT. NRM is the natural remanent magnetization.

2.5 小哺乳动物化石

关公滩剖面河湖相堆积的底部层位经系统筛选,采集到丰富的小哺乳动物牙齿化石,经初步研究包括复齿鼠兔(*Ochtonoides complicidens*)、丁氏鼯鼠(*Myospalax tingi*)、方氏鼯鼠(*Myospalax fontanieri*)、变异仓鼠(*Cricetinus varians*)、大林姬鼠(*Cricetinus varians*)、复齿旱獭(*Marmota complicidens*)等六个种类。

3 讨论

关公滩剖面底部产出较为丰富的小哺乳动物化石,目前已鉴定出的六个种类当中,丁氏鼯鼠和复齿鼠兔是相对原始的种类,其时代跨越早更新世至中更新世早期,其他四个都是我国北方中、晚更新世常见的种类。该小哺乳动物化石组合性质表明其时代

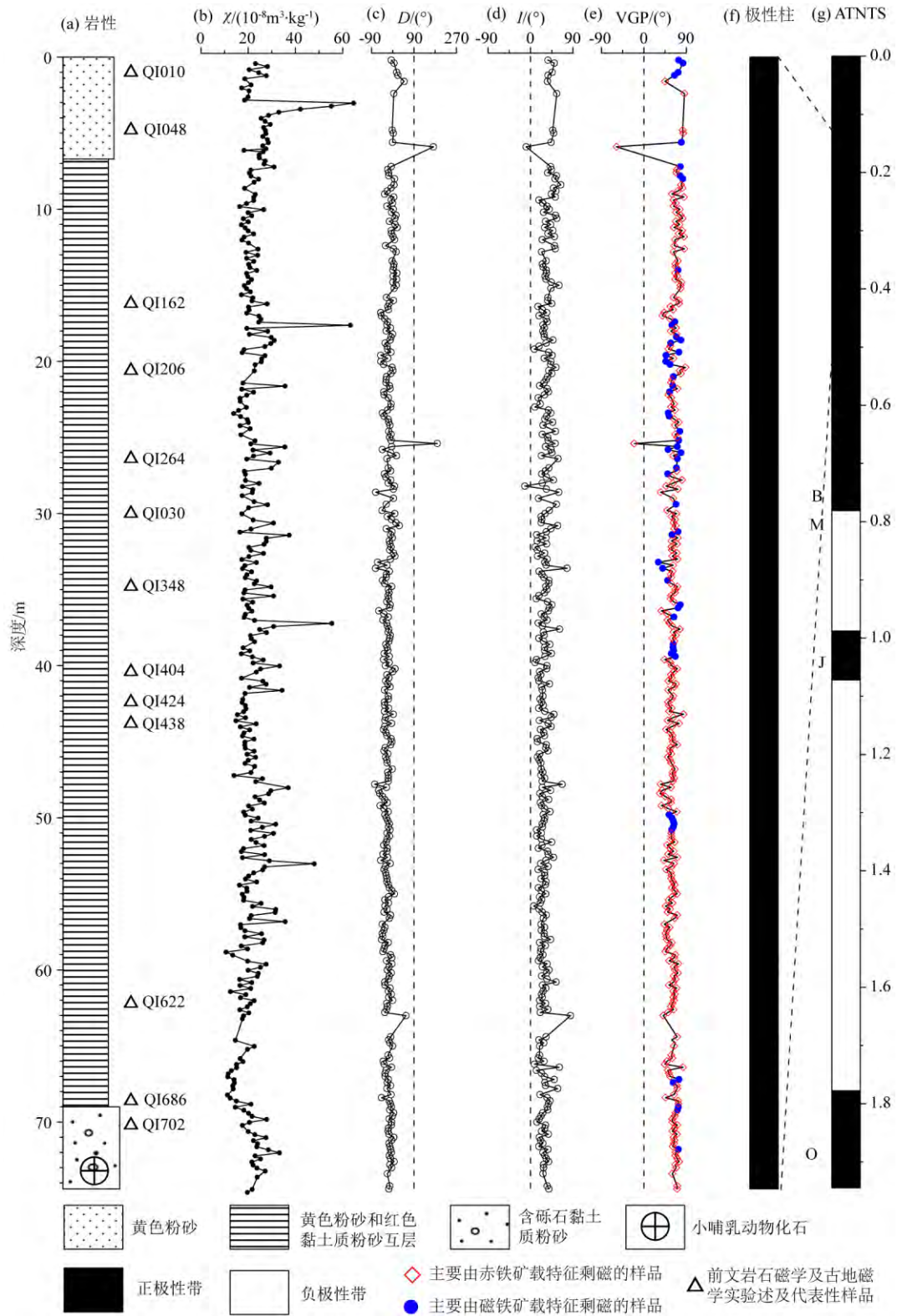


图 6 关公滩剖面的岩性(a)、磁化率 χ (b)、磁偏角 D (c)、磁倾角 I (d)、虚地磁极纬度(e)、磁极性地层(f)及其与地磁极性年表 ATNTS2012(g)(Hilgen et al., 2012)的对比

Fig. 6 Lithostratigraphy (a), magnetic susceptibility (b), declination (c), inclination (d), VGP latitude (e) and polarity stratigraphy (f) for the GGT section and its correlation with the Astronomically Tuned Neogene Time Scale of Hilgen et al., (2012)(g)

很可能为中更新世早期。因此,从生物地层的角度,关公滩剖面底部堆积的时代无疑应该是中更新世早期。

关公滩剖面的磁组构显示原生沉积组构的特征,同时磁化率最大主轴显示出近西—东的优选方向,最小磁化率主轴向东倾斜,这些特征表明关公滩剖面磁化率的最大主轴可能反映了古水流的方向(Tauxe, 2010),即由西向东的方向。这一流向与该区域西高东低的基岩地形,以及沟谷底部现今季节性流水自西向东的方向一致,表明剖面所在地区西高东低的地形在关公滩剖面沉积时既已形成。此外,通过岩石磁学研究,该剖面沉积物的主要载磁矿物为磁铁矿和赤铁矿并可能含有磁赤铁矿。矫顽力谱分析显示磁铁矿的相对含量要远大于赤铁矿。样品的系统退磁实验表明,磁铁矿和赤铁矿共同携带但以前者为主的特征剩磁(300~630 °C)方向与赤铁矿携带的特征剩磁(610~690 °C)方向基本一致,表明磁铁矿和赤铁矿这两种矿物所携带的剩磁方向均为样品沉积时或者刚沉积后所获得的剩磁。上述特征表明关公滩剖面的沉积物记录了沉积时的地磁场信息,通过系统退磁获得的特征剩磁是可靠的原生剩磁分量。

根据样品的特征剩磁方向所建立的磁极性变化序列表明,关公滩剖面只记录了一个正极性(图6)。结合剖面底部产出中更新世早期小哺乳动物化石这一重要生物年代学制约,我们将关公滩剖面记录的正极性对应于布容正极性时,即剖面沉积时间晚于0.78 Ma。更新世以来,由于受全球气候变化的影响,我国西北地区的气候呈现冰期—间冰期旋回的特征,黄土高原发育良好的黄土—古土壤序列即是冰期—间冰期旋回的重要沉积记录。结合关公滩剖面明显的沉积旋回特征,即该剖面主体岩性为黄色的粉砂与浅红色的黏土质粉砂互层,可能意味着中更新世时期黄土高原地区的气候特征与关公滩剖面的沉积特征反映出的气候变化趋势是一致的。其中黄色粉砂层可能对应于径流量较小的干凉环境,而红色的黏土质粉砂可能对应于水动力较强、同时对下伏新近纪红黏土地层剥蚀作用较强的温湿时期。另外,剖面底部产出小哺乳动物化石的沉积物为河流阶地砂砾层,其年龄为中更新世早期,研究区河流阶地发育时期正值中更新世气候周期转型(Mid-Pleistocene Transition, 简称MPT)前后,因此,我们推测,陇中盆地中更新世早期河流阶地发育可能与MPT时期的大幅度气候波动有关。本文得到的年代学结果将为

进一步开展区域地层对比以及气候—环境变化研究提供可靠的年代学制约。

4 结论

本文通过对黄土高原西缘会宁关公滩剖面74.4 m河湖相沉积序列进行详细的岩石磁学和古地磁学研究,并结合小哺乳动物化石的生物年代学结果,得出以下主要结论:关公滩剖面沉积物的主要磁性矿物有磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿,其中磁铁矿和赤铁矿是主要剩磁载体,但特征剩磁主要由赤铁矿携带;磁组构和系统退磁的结果显示该剖面沉积物记录了未经后期扰动的原生剩磁,并记录了与现今一致的古水流流向;关公滩剖面的沉积时间为晚于0.78 Ma的中更新世,对应于黄土高原河流最为发育的时期;剖面所在地区西高东低的地貌至少在中更新世早期已经形成。

References

- Borradaile G J, Henry B. 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Science Reviews*, 42(1-2): 49-93.
- Cifelli F, Mattei M, Chadima M, et al. 2005. The origin of tectonic lineation in extensional basins: Combined neutron texture and magnetic analyses on “undeformed” clays. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1-2): 62-78.
- Deng C L, He H Y, Pan Y X, et al. 2013. Chronology of the terrestrial Upper Cretaceous in the Songliao Basin, northeast Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 44-54.
- Deng C L, Zhu R X, Verosub K L, et al. 2004. Mineral magnetic properties of loess/paleosol couplets of the central loess plateau of China over the last 1.2 Myr. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 109: B01103, doi: 10.1029/2003JB002532.
- Deng C L, Zhu R X, Zhang R, et al. 2008. Timing of the Nihewan formation and faunas. *Quaternary Research*, 69(1): 77-90.
- Deng T. 2006. Chinese Neogene mammal biochronology. *Vertebrata Palasiatica* (in Chinese), 44(2): 143-163.
- Dunlop D J. 2002. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 107(B3): EPM5-1-EPM 5-15.
- Fang X M, Garzone C, Van der Voo R, et al. 2003. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(3-4): 545-560.
- Ge J Y, Guo Z T, Zhao D A, et al. 2014. Spatial variations in paleowind direction during the last glacial period in North China reconstructed from variations in the anisotropy of magnetic susceptibility of loess deposits. *Tectonophysics*, 629: 353-361.
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. 2002. Onset of Asian

- desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159-163.
- Hao Q Z, Guo Z T. 2007. Magnetostratigraphy of an early-middle Miocene loess-soil sequence in the western Loess Plateau of China. *Geophysical Research Letters*, 34(18): L18305, doi: 10.1029/2007GL031162.
- He H Y, Deng C L, Wang P J, et al. 2012. Toward age determination of the termination of the Cretaceous Normal Superchron. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(2): Q02002, doi: 10.1029/2011GC003901.
- Hilgen F J, Lourens L J, Van Dam J A. 2012. The neogene period. // Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al., eds. *The Geologic Time Scale*. The Netherlands: Amsterdam, 923-978.
- Jelinek V, Kropáček V. 1978. Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 22(1): 50-62.
- Kirschvink J L. 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal International*, 62(3): 699-718.
- Kruiver P P, Dekkers M J, Heslop D. 2001. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth and Planetary Science Letters*, 189(3-4): 269-276.
- Li S H, Deng C L, Dong W, et al. 2015. Magnetostratigraphy of the Xiaolongtan Formation bearing *Lufengpithecus keiyuanensis* in Yunnan, southwestern China: Constraint on the initiation time of the southern segment of the Xianshuihe-Xiaojiang fault. *Tectonophysics*, 655: 213-226.
- Li S H, Deng C L, Paterson G A, et al. 2014. Tectonic and sedimentary evolution of the late Miocene-Pleistocene Dali Basin in the southeast margin of the Tibetan Plateau: Evidences from anisotropy of magnetic susceptibility and rock magnetic data. *Tectonophysics*, 629: 362-377.
- Li S H, Deng C L, Yao H T, et al. 2013. Magnetostratigraphy of the Dali Basin in Yunnan and implications for late Neogene rotation of the southeast margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 118(3): 791-807.
- Liu S Z, Deng C L, Xiao J L, et al. 2016. High-resolution enviromagnetic records of the last deglaciation from Dali Lake, Inner Mongolia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 454: 1-11.
- Liu X M, Shaw J, Jiang J Z, et al. 2010. Analysis on variety and characteristics of maghemite. *Science China: Earth Sciences*, 53(8): 1153-1162.
- Lowrie W. 1990. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties. *Geophysical Research Letters*, 17(2): 159-162.
- Özdemir Ö. 1990. High-temperature hysteresis and thermoremanence of single-domain maghemite. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 65(1-2): 125-136.
- Özdemir Ö, Banerjee S K. 1984. High temperature stability of maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). *Geophysical Research Letters*, 11(3): 161-164.
- Qiang X K, An Z S, Song Y G, et al. 2011. New eolian red clay sequence on the western Chinese Loess Plateau linked to onset of Asian desertification about 25 Ma ago. *Science China-Earth Sciences*, 54(1): 136-144.
- Qiu Z X, Wang B Y, Qiu Z D, et al. 2001. Land mammal geochronology and magnetostratigraphy of mid-Tertiary deposits in the Lanzhou Basin, Gansu Province, China. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 94(3): 373-385.
- Qu Y P, Cai T L. 1984. The tertiary system of Gansu province. *Gansu Geology* (in Chinese), 1-40.
- Roberts A P, Cui Y L, Verosub K L. 1995. Wasp-waisted hysteresis loops: Mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems. *Journal of Geophysical Research*, 100(B9): 17909-17924.
- Schieber J, Ellwood B B. 1993. Determination of basinwide paleocurrent patterns in a shale succession from anisotropy of magnetic susceptibility (AMS); a case study of the mid-proterozoic newland formation, montana. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 63(5): 874-880.
- Tarling D, Hrouda F. 1993. *Magnetic Anisotropy of Rocks*. London: Springer.
- Tauxe L. 2010. *Essentials of Paleomagnetism*. Berkeley: University of California Press.
- The First Regional Geology Ssurveying Brigade of Gansu Bureau of Geology. 1972. 1:200,000 scale geologic map and report of the Jingyuan sheet (in Chinese).
- Vlag P, Thouveny N, Williamson D, et al. 1996. Evidence for a geomagnetic excursion recorded in the sediments of Lac St. Front, France: A link with the Laschamp excursion? *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 101(B12): 28211-28230.
- Wu H N, Yue L P. 1997. The anisotropy of magnetic susceptibility of aeolian dust sediment: the paleowind field in Chinese Loess Plateau. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 40(4): 487-494.
- Zhan T, Guo Z T, Wu H B, et al. 2011. Thick Miocene eolian deposits on the Huajialing Mountains: The geomorphic evolution of the western Loess Plateau. *Science China-Earth Sciences*, 54(2): 241-248.
- Zhu R X, Coe R S, Zhao X X. 1998. Sedimentary record of two geomagnetic excursions within the last 15,000 years in Beijing, China. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 103(B12): 30323-30333.
- Zhu R X, Potts R, Pan Y X, et al. 2008. Early evidence of the genus *Homo* in East Asia. *Journal of Human Evolution*, 55(6): 1075-1085.
- Zijderveld J D A. 1967. A. C. demagnetization of rocks; analysis of results. // Collinson D W, Creer K M, Runcorn S K, eds. *Methods in Palaeomagnetism*. New York: Elsevier, 254-286.

附中文参考文献

- 邓涛. 2006. 中国新近纪哺乳动物生物年代学. *古脊椎动物学报*, 44(2): 143-163.
- 刘秀铭, Shaw J, 蒋建中等. 2010. 磁赤铁矿的几种类型与特点分析. *中国科学: 地球科学*, 40(5): 592-602.
- 甘肃省地质局第一区域地质测量队. 1972. 1:20万靖远幅地质图及报告.
- 瞿毓沛, 蔡体梁. 1984. 甘肃的第三系. *甘肃地质*, 1-40.
- 吴汉宁, 岳乐平. 1997. 风成沉积物磁组构与中国黄土区第四纪风向变化. *地球物理学报*, 40(4): 487-494.

(本文编辑 张正峰)