

孙 璐, 岳乐平, 王建其等. 黄土高原北部晚新近纪“吴起古湖”的古地磁年代学与古环境记录. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1451~1462, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.023

Sun L, Yue L P, Wang J Q, et al. Palaeomagnetic chronology and paleoenvironmental records of late Neogene Wuqi paleolake in northern Chinese Loess Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6): 1451~1462, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.023

黄土高原北部晚新近纪“吴起古湖”的古地磁年代学与古环境记录

孙 璐¹, 岳乐平^{1,2}, 王建其¹, 李建星^{1,3}, 徐 永¹, 张佳音¹, 马 冀¹

1 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

2 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075

3 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054

摘 要 晚新近纪以来中国北方堆积的风成红粘土-黄土序列是古气候信息的良好载体, 在黄土高原北部的吴起地区存在一套湖相沉积物, 层位上介于第四纪黄土与晚新近纪红粘土之间, 但该古湖存在的具体时限尚不清楚. 我们利用岩石磁学及古地磁年代学方法并结合多种气候指标对代表“吴起古湖”的土佛寺剖面进行了初步研究, 结果表明湖相沉积物中特征剩磁的载体主要为磁铁矿和赤铁矿, 在此基础上得到的磁极性序列能很好地与国际地磁极性年表对比, 剖面起始于 4.28 Ma B. P. 左右, 湖相沉积层起始于 3.0 Ma B. P. 左右, 结束于 1.2 Ma B. P. 左右. 岩性、磁化率、粒度和沉积速率变化均反映出这一时期该地区环境变化的总体趋势是由暖湿向冷干发展, 期间“吴起古湖”的演化大致经历了三个阶段: 3.0~2.5 Ma B. P. 为古湖形成时期, 水体相对较深; 2.50~2.05 Ma B. P. 期间受古气候变化的影响湖水明显变浅; 2.05~1.20 Ma B. P. 时古湖中仍有一定量的水体存在, 但随后逐步缩小并最终消亡. 该地区气候条件在 1.2 Ma B. P. 左右的恶化是导致吴起古湖消亡的主要因素, 区域构造活动引起的北洛河溯源侵蚀并切穿湖盆可能也是原因之一.

关键词 吴起古湖, 古地磁年代学, 古环境, 黄土高原, 晚新近纪

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.023

中图分类号 P318

收稿日期 2009-10-23, 2010-04-12 收修定稿

Palaeomagnetic chronology and paleoenvironmental records of late Neogene Wuqi paleolake in northern Chinese Loess Plateau

SUN Lu¹, YUE Le-Ping^{1,2}, WANG Jian-Qi¹, LI Jian-Xing^{1,3},

XU Yong¹, ZHANG Jia-Yin¹, MA Ji¹

1 State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

2 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710075, China

3 Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

Abstract Aeolian red clay and loess deposited in northern China since late Neogene is an ideal palaeoclimate recorder. A profile consisting of loess, lacustrine deposits and red clay was found at Wuqi County in northern Chinese Loess Plateau. Primary investigations were carried out on the typical Tufosi section in order to provide the age constraints of the lacustrine deposits (namely

基金项目 国家自然科学基金项目(40772025), 国家重点基础研究发展计划“973”课题(2003CB214607), 大陆动力学国家重点实验室与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG0511)资助.

作者简介 孙 璐, 男, 1985 年生, 西北大学地质学系在读硕士研究生, 主要从事新生代磁性地层学研究. E-mail: l.sun1985@gmail.com

Wuqi paleolake). Rock magnetic results demonstrate that the magnetic carriers of the characteristic remanent magnetization of lacustrine deposits are mainly magnetite and hematite. The correlation between magnetic polarity sequence and Geomagnetic Polarity Time Scale is very well. The age of the bottom of the section is 4.28 Ma B. P. approximately. Wuqi paleolake formed at about 3.0 Ma B. P. and died out around 1.2 Ma B. P. The regional environment became colder and drier during this period as implied by the variations of lithology, magnetic susceptibility, grain size and sedimentation rates. The evolution history of Wuqi paleolake can be divided into three stages: the paleolake was formed during the period of 3.0~2.5 Ma B. P. and the water body was relatively deep; the lake became shallow markedly as the result of palaeoclimate change during 2.50~2.05 Ma B. P., during 2.05~1.20 Ma B. P., reduction of the water body led to the extinction of the lake. Climatic deterioration in this region around 1.2 Ma B. P. was the main reason for the end of Wuqi paleolake, and the headward erosion of North Luohe River caused by regional tectonism was probably a factor, too.

Keywords Wuqi paleolake, Palaeomagnetic chronology, Palaeoenvironment, Chinese Loess Plateau, Late Neogene

1 引言

新近纪时期,在中国北部的黄土高原地区堆积了厚达上百米的风成红粘土-黄土序列^[1~4],其中含有丰富的古气候、古环境信息,因此一直是研究东亚以及相邻地区新近纪气候变化的热点地区^[5~10].除了红粘土以及黄土-古土壤序列外,上新世至更新世时期在黄土高原及其周边还散布着一系列规模不一的古湖^[11].前人^[11~13]的研究表明,受到3.6 Ma B. P.左右的“青藏运动 A 幕”的影响^[14],黄土高原周围的山系开始隆升,其内部的古夷平面开始解体,产生了一些小的侵蚀盆地和断陷盆地,高原周围与内部高差增大,为该地区古湖的形成创造了条件.

湖泊作为研究古气候和古环境变化的一个重要资料库,蕴含丰富的来自水圈、岩石圈、大气圈以及生物圈的信息,并以其沉积连续性好、沉积速率大、时间分辨率较高、可提取的信息多等特点,倍受研究者重视.近年来随着研究程度的深入以及研究手段的更新,向高分辨率发展和多种指标综合利用已成为湖泊研究的新趋势^[15],特别是岩石磁学及磁性地层学方法在其中发挥了重要作用,并为相关领域的研究奠定了良好的基础^[16~24].因此,对黄土高原内湖泊沉积物的研究可为了解该区域古环境以及新构造运动的演化提供依据.

张宗祜等^[12, 25]认为黄土高原北部的吴起地区在“第三纪末至第四纪时期曾存在着一个面积约

200 km²的古湖”(下文称为“吴起古湖”),并在该地区建立了综合剖面,进行了初步的磁性地层学与粒度变化研究.当时古地磁与粒度样品的采集是以100 cm为间隔^[25],而且研究结果未能提供“吴起古湖”存在的具体时限,这在一定程度上限制了其他工作的展开.鉴于此,有必要对其进行新的研究.本文试图重新建立“吴起古湖”的古地磁年代序列,并综合岩性、磁化率及粒度变化描述“吴起古湖”的演化历史.

2 区域地质背景与样品采集

吴起县位于黄土高原北缘,白于山南麓,北洛河上游.白于山海拔约为1200~1800 m,主峰海拔1823 m,大致呈东西走向,是北洛河等黄河支流的分水岭,同时也是毛乌素沙地与黄土高原的分界线(图1).研究剖面位于吴起县土佛寺村白土沟(坐标:36°48′33.7″N, 108°15′34.4″E).

土佛寺剖面中湖相沉积物与下伏红粘土之间为连续沉积,与上覆风成黄土堆积之间存在不整合面.湖相沉积物的主体部分由棕红、灰绿、灰白等色的泥质、粘土质、粉砂质沉积物互层组成.剖面控制了上部部分黄土层、全部的湖相沉积层及下部的红粘土,红粘土堆积未见底,共63.5 m,下伏基岩为三叠纪紫红色砂页岩.自上而下可将剖面划分为6段:

1. 棕黄色黄土,质地较软,粉砂质成分较多;下部出现少量黑色铁锰斑点,并逐渐变为棕红-棕黄色.层厚7.7 m,累积厚度7.7 m.

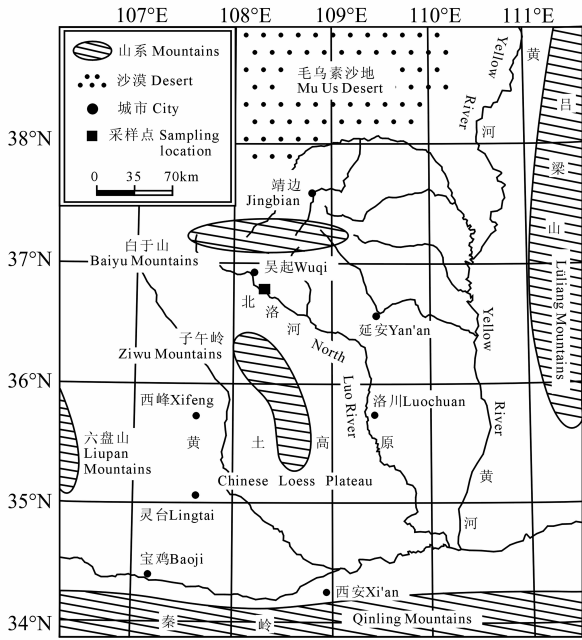


图1 土佛寺剖面在黄土高原上的位置

Fig. 1 Schematic map showing the location of Tufosi section on the Loess Plateau in northern China

-----不整合-----

2. 上部为灰白色、灰绿色泥质-粉砂质沉积物, 混有棕红、棕黄色黄土质沉积物, 10.8 m 处可见波状层理; 下部为灰绿、棕红色泥质沉积物, 质地较软, 可见波状层理, 夹有棕红色粘土质沉积层和灰白色钙质沉积层, 红色粘土质沉积物以脉状或团块状裹于其中; 含有脉状灰绿色泥质沉积物, 接触边界呈浸染状, 有少量黑色铁锰斑点. 底部为青绿色泥质沉积物, 可见棕红色粘土质沉积物以脉状、团块状分布其中, 含有黑色铁锰斑点. 层厚 15.3 m, 累积厚度 23.0 m.

3. 主要为套棕红色粘土质沉积物, 夹有两条比较明显的钙质沉积层. 粘土中含白色钙质颗粒, 为泥质和粉砂质. 可见黑色铁锰斑点. 部分层位可见波状层理. 32.9 m 处发现动物化石碎片. 层厚 10.2 m, 累积厚度 33.2 m.

4. 主要为套浅灰绿色、灰白色、青绿色泥质-粉砂质沉积物, 可见波状层理, 含白色钙质斑点. 33.3 m 附近含大量哺乳动物化石碎片. 层厚 3.7 m, 累积厚度 36.9 m.

5. 主体为一套棕红色泥质沉积物, 夹 4~5 层厚度不等的钙质沉积层. 其中可见灰白、灰绿、棕黄等色的泥质、粉砂质颗粒或团块. 部分层位含钙质结核颗粒. 39.1 m 和 41.0 m 处含哺乳动物牙齿化石. 层厚 15.8 m, 累积厚度 52.7 m.

6. 上部为棕黄、浅棕红色粘土、粉土质沉积物, 含白色钙质颗粒, 无层理. 下部为棕红色粘土质沉积物, 含有杂色泥质、钙质团块, 可见钙质结核及钙质斑点(未见底). 层厚 10.8 m, 累积厚度 63.5 m.

-----不整合-----

三叠纪紫红色砂岩、页岩

总体上看, 典型的湖相沉积主要集中于 7.7~36.9 m, 可分为三个湖相层: 第一湖相层自 36.9~33.2 m, 主要以碧绿、灰绿、灰白色泥质沉积物为主, 发育波状层理. 第二湖相层自 33.2~23.0 m, 为一段棕红色粘土质与灰白色泥质、粉砂质互层的沉积物, 钙质成分较多, 一些地方形成钙质沉积层, 可观察到波状层理. 第三湖相层从 23.0~7.7 m, 主要为灰绿、灰白、棕红色的泥质、粉砂质沉积物. 在这套湖相沉积物的下部, 即 52.7~36.9 m 为一段棕红-棕黄色泥质沉积物, 含钙质颗粒, 虽然没有明显的水成痕迹, 但与中国北方典型的红粘土堆积有所区别, 其中常夹有脉状、团块状杂色(棕红、灰白、灰绿)泥质沉积物, 且钙质成分较多, 为红粘土堆积夹少量湖相沉积, 下文称其为过渡层.

对土佛寺剖面的野外观察表明, 湖相沉积物的主体为连续沉积, 且沉积地层为水平产出, 这为磁性地层学研究提供了较好的条件. 为保证古地磁数据的可靠性, 在采样时先将剖面表面的浮土与坡积物清除掉, 直至暴露出新鲜面. 利用手标本定向的方法^[26]以 10 cm 为间隔进行系统采样, 仅在个别钙质结核层采样间隔略有增大. 共采集古地磁样品 580 块(包括上部黄土样品 24 块), 在室内加工成 2 cm×2 cm×2 cm 的立方体进行退磁实验, 选出部分代表性样品进行了岩石磁学研究. 沿剖面还以 10 cm 间隔(上部黄土样品间隔为 20 cm)采集了散样, 供磁化率及粒度分析之用.

除了土佛寺剖面外, 笔者还对吴起三道川白土沟台(位于土佛寺西北方约 15 km 处)的另一处湖相沉积物剖面(坐标: 36°53'37.1"N, 108°09'01.2"E)进行了野外观察, 该剖面主要以灰白、灰绿、黄绿色沉积物互层为特征, 上部水平层理较为明显, 主要为杂色灰质泥岩, 下部层理不明显, 含有大量石膏, 呈板片状产出, 无明显的定向性, 整套湖相沉积厚度约 40 m. 在白土沟台西侧约 4 km 处的青土沟(坐标: 36°53'12.6"N, 108°07'14.5"E), 这里湖相沉积物厚约 40~50 m, 由灰绿、灰白、灰黑色泥岩组成. 位于土佛寺东南约 5 km 处的马营(坐标: 36°47'57.1"N, 108°18'54.0"E)也有一套厚度约 25 m 的湖相沉积物, 可观察到灰白、灰绿色相间的泥质韵律层, 灰白色部分含较多钙质成分. 需特别指出的是, 这几处湖相沉积物与下伏的红粘土之间都为连续沉积, 与上覆的厚 10 余米的黄土间皆有不整合面.

3 实验内容

3.1 岩石磁学分析

可靠的岩石磁学分析是古地磁年代学研究的基础和保证. 我们从土佛寺剖面中挑选了代表性沉积物样品测量了磁化率随温度变化(χ - T)曲线, 实验在中国科学院地质与地球物理研究所的古地磁与年代学实验室完成.

χ - T 曲线利用捷克 Agico 公司生产的 KLY-3 卡帕桥及其 CS3 温度控制系统测量, 仪器灵敏度为 10^{-7} SI, 温度传感器精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$ ^[27], 样品的质量控制在 0.2~0.3 g 之间, 从室温逐步加热至 700°C , 整个测量过程在氩气中完成. 结果表明样品的加热曲线均在 580°C 附近明显降低(图 2), 与磁铁矿的居里温度一致^[28]; 个别样品的加热曲线在 680°C 附近也出现略微下降(图 2a), 与赤铁矿的居里温度吻合^[28]. 此外, 少数样品(图 2d)的加热曲线在 300°C 左右出现了小的峰值, 紧接着又随温度的增加(300°C ~ 500°C)开始降低, 前者可能是由于加热过程中铁的氢氧化物发生转变造成的, 后者

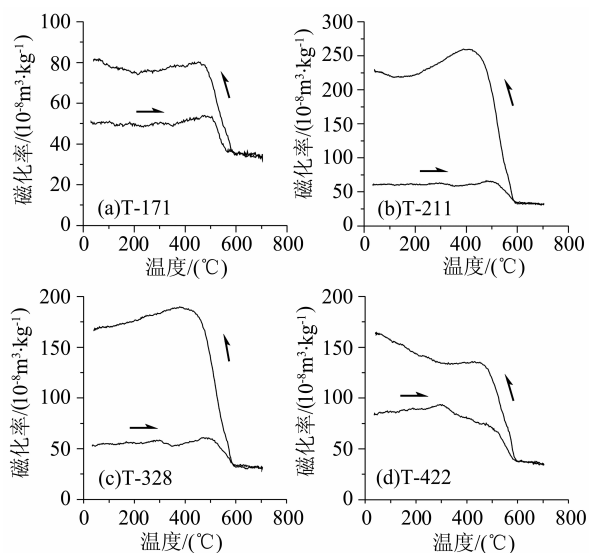


图 2 代表性样品的磁化率随温度变化(χ - T)曲线
(a) 灰绿色泥质沉积物; (b) 浅棕红色粉砂-泥质沉积物; (c) 棕红色粘土质沉积物; (d) 棕红色泥质沉积物. 箭头方向表示加热或冷却过程.

Fig. 2 Susceptibility versus temperature (χ - T) curve of representative samples

(a) Greyish-green pelitic sediments; (b) Light red-brown silty-pelitic sediments; (c) Red-brown clayish sediments; (d) Red-brown pelitic sediments. Heating and cooling curves are indicated by the direction of arrows.

则可能是亚稳定、强磁性的磁赤铁矿受热转化为稳定、弱磁性的赤铁矿的表现^[28]. 大部分样品的冷却曲线都表现出磁铁矿的特征, 并且冷却曲线明显高于加热曲线(图 2(b, c)), 这可能是由样品中某些成分(如粘土矿物)在加热过程中转变成磁铁矿造成的^[29, 30]. 综上所述, 土佛寺剖面沉积物中的载磁矿物主要为磁铁矿和赤铁矿, 此外还有一些含铁的粘土矿物, 以及少量铁的氢氧化物与磁赤铁矿.

此外我们还利用 MODEL-942 型磁化率仪测量了剖面共 591 块散样的磁化率值, 实验在西北大学大陆动力学国家重点实验室古地磁实验室完成.

3.2 退磁实验分析

经过部分代表性样品的测试对比, 并结合岩石磁学的实验结果, 认为对土佛寺样品采用热退磁的效果好于交变退磁. 556 块样品的退磁和测试过程在中国科学院地质与地球物理研究所的古地磁与年代学实验室中完成, 磁清洗过程采用英国 Magnetic Measurement 公司生产的 MMTD-80 型热退磁仪, 它能自动对 80 块标准古地磁样品进行小于 700°C 的热退磁, 炉内残留场小于 10 nT, 温控误差小于 $\pm 2^\circ\text{C}$. 测量完天然剩磁后, 分 16~18 步进行逐步热退磁, 退磁温度分别为 100°C 、 150°C 、 200°C 、 300°C 、 400°C 、 450°C 、 500°C 、 530°C 、 570°C 、 610°C 、 630°C 、 640°C 、 650°C 、 660°C 、 670°C 、 680°C , 部分样品加入了 550°C 和 590°C 两个温度点. 样品的剩磁全部在 2G-760 U-Channel 岩石超导磁力仪上进行测量, 其测量范围为 2.0×10^{-12} ~ 2.0×10^{-4} Am², 灵敏度为 2.0×10^{-12} Am², 以上步骤均在零磁环境(<300 nT)内完成^[27]. 剩余 24 块黄土样品较松散, 退磁和测试过程均在西北大学大陆动力学国家重点实验室古地磁实验室进行, 退磁选用美国的 TSD-2 型热退磁仪, 测试仪器为捷克 Agico 公司生产的 JR-6A 型旋转磁力仪, 样品的退磁和测试均在屏蔽框内进行. 结果显示(图 3), 土佛寺样品的天然剩磁(NRM, natural remanent magnetization)强度相对较弱, 大部分介于 10^{-4} ~ 10^{-3} A/m 之间, 剖面下部少数红色粘土样品可达到 10^{-2} A/m. 多数样品的粘滞剩磁在 300°C 后已基本去掉, 其高温特征剩磁的矢量强度和方向随着温度升高(400°C ~ 590°C 或 610°C ~ 680°C)稳定地趋近于原点, 推测其应为原生剩磁, 其携带矿物主要为磁铁矿和赤铁矿, 与岩石磁学的结论吻合. 退磁结果利用最小二乘法^[31]进行处理, 选择至少 3 个(一般为 4 个以上)具有稳定组分的退磁温度的剩磁矢量进行拟合, 挑

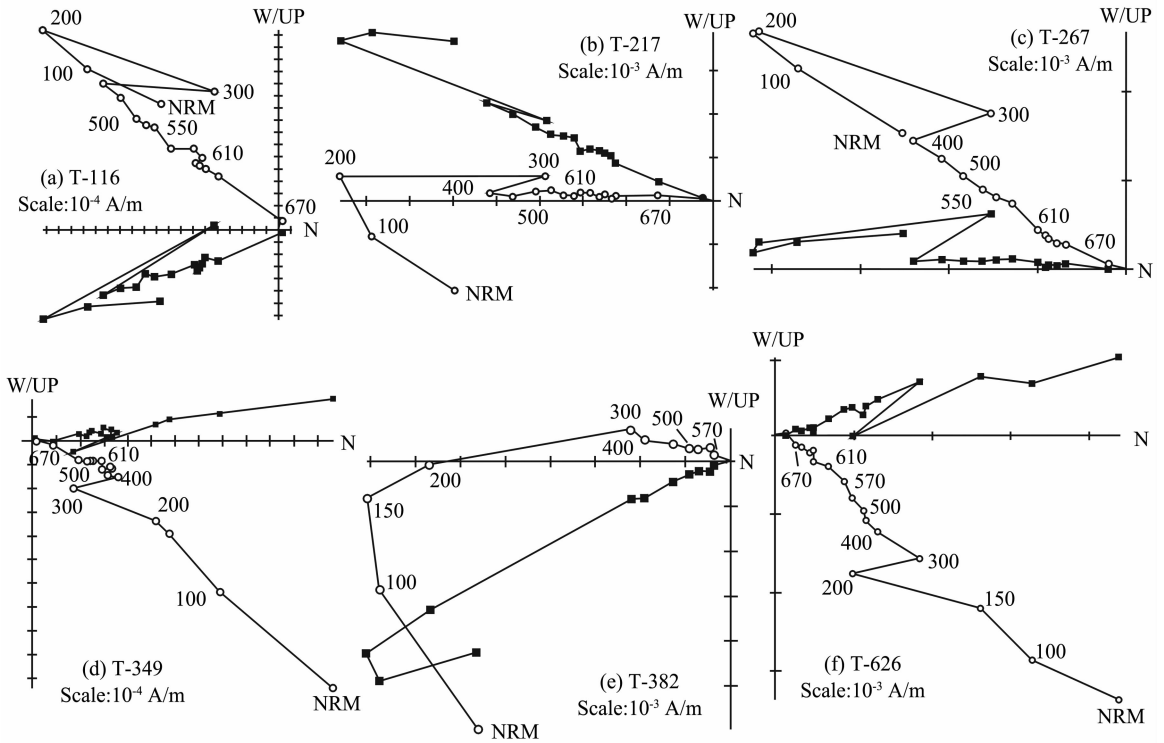


图 3 代表性样品的系统热退磁结果正交投影图

图中实心方块和空心圆圈分别表示水平面和垂直面的投影；数字表示温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)；

NRM 表示天然剩余磁化强度(natural remanent magnetization)。

(a) 灰绿色粉砂质泥岩；(b) 棕红色泥岩；(c) 棕红色粘土；(d) 灰白色泥质粉砂岩；(e) 棕红色泥质沉积物；(f) 棕红色粘土。

Fig. 3 Orthogonal projections of representative samples during thermal demagnetization

The solid squares and hollow circles represent the projection on the horizontal and vertical plane respectively.

The numbers refer to the temperatures in $^{\circ}\text{C}$. NRM stands for natural remnant magnetization.

(a) Greyish-green silty mudstone; (b) Red-brown mudstone; (c) Red-brown clay;

(d) Offwhite pelitic siltstone; (e) Red-brown pelitic sediments; (f) Red-brown clay.

选出最大角偏差(MAD, maximum angular deviations)小于 15° 的数据计算出虚地磁极(VGP, virtual geomagnetic pole)纬度,进一步建立起土佛寺剖面的磁极性序列。

3.3 粒度分析

采用激光粒度仪法测量了土佛寺剖面 590 个样品的粒度,仪器采用英国 Malvern Instrument 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,其单量程测量范围为 $0.02\sim 2000\ \mu\text{m}$,重现率优于 0.5% ,准确率优于 1% 。前处理步骤参照对黄土及红粘土样品的处理方法^[32, 33]:称取样品 $0.3\ \text{g}$ (视样品粒度粗细可酌情增减),加入 $10\ \text{mL}$ 浓度为 10% 的 H_2O_2 并煮沸使其充分反应;冷却后加入 $10\ \text{mL}$ 浓度为 10% 的 HCl 并煮沸;待反应完全并冷却后在烧杯中注满蒸馏水,静置 $12\sim 24\ \text{h}$ 后缓慢倾出上层清液,加入 $10\ \text{mL}$ 浓度为 $0.05\ \text{mol/L}$ 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 分散剂并用超声波清洗机振荡约 $10\ \text{min}$ 后上机测量。

4 磁性地层学结果

系统热退磁实验结果显示,有 370 个样品(约占全部样品的 64%)获得了可靠的特征剩磁方向。古地磁学结果(图 4)表明,土佛寺剖面记录了 11 个磁极性带,包括 6 个正极性带和 5 个负极性带,自上而下分别记作 $\text{N1}\sim\text{N6}$ (N1 , $0\sim 7.7\ \text{m}$; N2 , $19.4\sim 21.5\ \text{m}$; N3 , $34.4\sim 36.9\ \text{m}$; N4 , $40.2\sim 40.8\ \text{m}$; N5 , $42.3\sim 49.7\ \text{m}$; N6 , $61.5\sim 63.5\ \text{m}$)和 $\text{R1}\sim\text{R5}$ (R1 , $7.7\sim 19.4\ \text{m}$; R2 , $21.5\sim 34.4\ \text{m}$; R3 , $36.9\sim 40.2\ \text{m}$; R4 , $40.8\sim 42.3\ \text{m}$; R5 , $49.7\sim 61.5\ \text{m}$)。

经过与国际地磁极性年表(GPTS, geomagnetic polarity time scale)^[34]的对比,并结合已有资料与文献,认为顶部较长的正极性带 N1 属于 Brunhes 正极性时,由于存在不整合面,因此不能确定其具体时间。上部两个较长的负极性带 R1 和 R2 属于 Matuyama 负极性时,二者之间较短的正极性带 N2

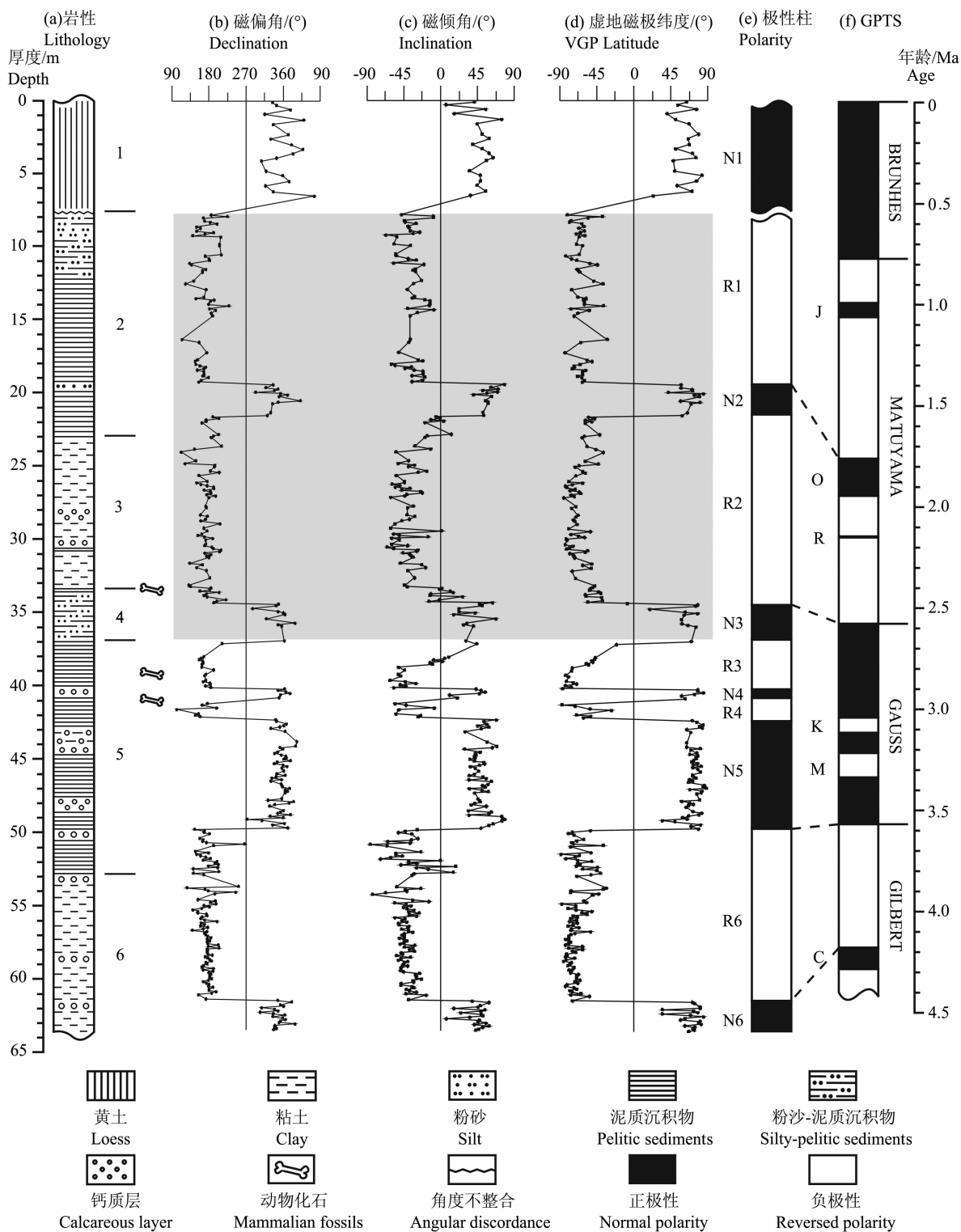


图 4 土佛寺剖面岩石地层(a)、磁极性地层(b~e)与地磁极性年表 GPTS(f)^[34] 的对比

1~6 对应于前文中的地层划分; N1~N6, R1~R5 为磁极性带编号; 灰色阴影区域为湖相沉积段. J: Jaramillo 正极性亚时; O: Olduvai 正极性亚时; R: Reunion 正极性事件; K: Kaena 负极性亚时; M: Mammoth 负极性亚时; C: Cochiti 正极性亚时.

Fig. 4 Lithostratigraphy (a) and magnetic polarity stratigraphy (b~e) of the Tufosi section and its correlation with the geomagnetic polarity time scale (GPTS) (f)^[34]

1~6 in (a) corresponding to the stratigraphic subdivision mentioned in previous part of this article. N1~N6, R1~R5 in (e) represent magnetozones. The shaded area in (b~d) indicates lacustrine deposits section. J: Jaramillo; O: Olduvai; R: Reunion; K: Kaena; M: Mammoth; C: Cochiti.

对应于 Olduvai 亚时, 缺失 Reunion 事件的记录; N3、N4 和 N5 三个距离较近的正极性带属于 Gauss 正极性时, 三者之间两个较短的负极性带 R3、R4 分别对应于 Kaena 和 Mammoth 亚时; 最后一个较长的负极性带 R5 属于 Gilbert 负极性时, 底部的正极性带 N6 对应于 Cochiti 亚时。

对应于前文中的地层划分, 土佛寺剖面起始于约 4.28 Ma B. P., 过渡层(52.7~36.9 m)的时限为 3.7~3.0 Ma B. P., 第一湖相层(36.9~33.2 m)对应的时间段为 3.0~2.5 Ma B. P.; 第二湖相层(33.2~23.0 m)的时限为 2.50~2.05 Ma B. P.; 第三湖相层(23.0~7.7 m)开始于 2.05 Ma B. P., 结束年龄利用沉积速率(按该剖面的平均沉积速率 1.8 cm/ka 计算)外推, 为 1.2 Ma B. P. 左右。野外观察与试验结果均表明, 吴起地区的湖相地层与红粘土、黄土-古土壤序列是同期异相的关系, 这与三门古湖类似^[35]。

5 讨论

土佛寺剖面的磁化率、粒度曲线(图 5)以及沉积速率(图 6)的变化能较好地与前文划分的岩性段对应。4.28~3.7 Ma B. P. (前文中的第 6 层, 63.5~52.7 m)时为风成红粘土堆积, 其磁化率和粒度各组分总体上变化都不大, 沉积速率也较为稳定, 保持在 2 cm/ka 左右, 与黄土高原其他地区的接近^[36]; 只是在该阶段的末尾, 即 3.7 Ma B. P. (54.7~52.7 m)附近上述指标出现了较明显的波动。

3.7~3.0 Ma B. P. (前文中的第 5 层, 52.7~36.9 m)时为过渡层, 相对于下部的红粘土, 该层的磁化率与沉积速率均表现出较明显的波动; 中值粒径 M_d 的变化不明显, 但 $<2 \mu\text{m}$ 和 $2\sim5 \mu\text{m}$ 组分有缓慢增加的趋势, 结合前文所述的过渡层在岩性上与风成红粘土的区别, 认为 3.7~3.0 Ma B. P.

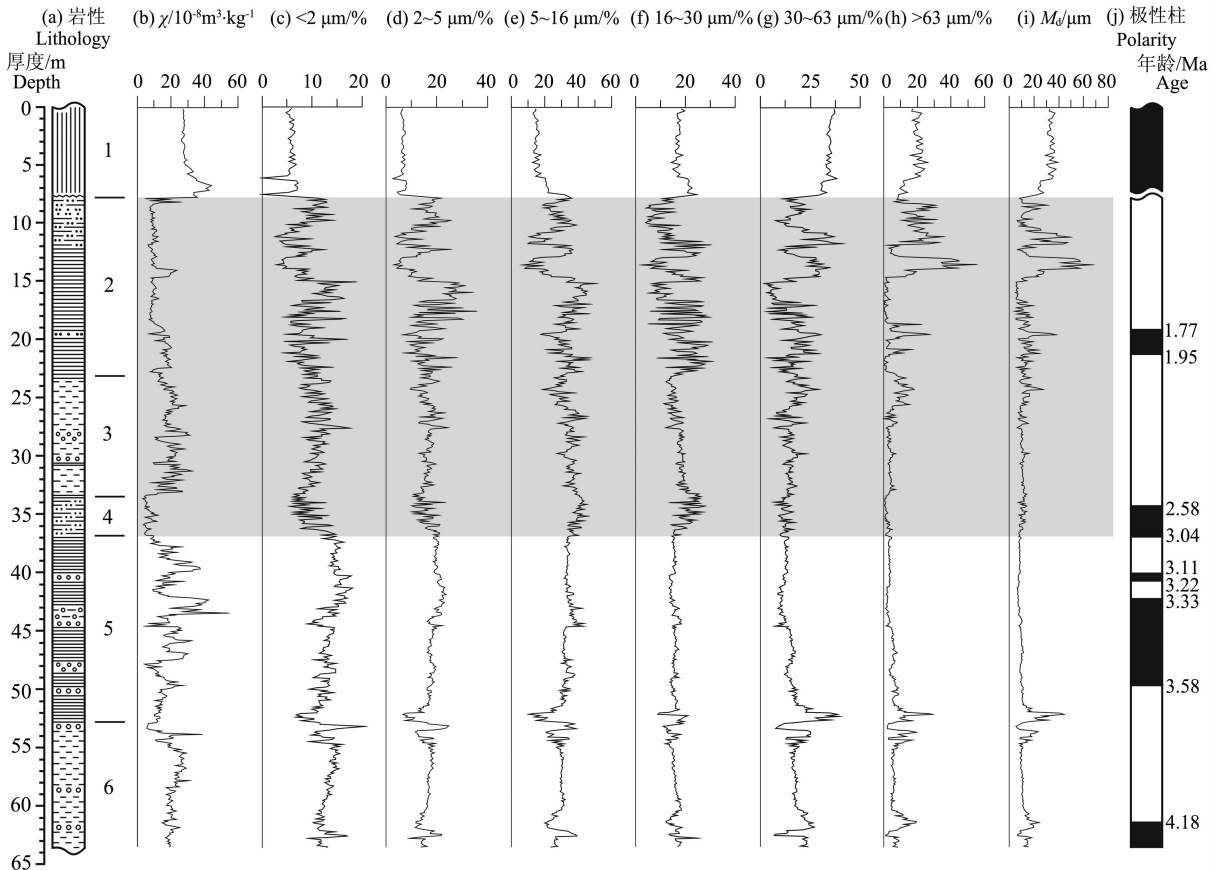


图 5 土佛寺剖面岩性(a)、磁化率(b)、各粒级组分(c~i)变化图

1~6 对应于前文中的地层划分; 灰色阴影区域为湖相沉积段。岩性图例同图 4。

Fig. 5 Variations in lithostratigraphy (a), magnetic susceptibility (b) and different grain size fractions (c~i) of Tufosi section

1~6 in (a) corresponding to the stratigraphic subdivision mentioned in previous part of this article.

The shaded area in (b~i) indicates lacustrine deposits section. See Figure 4 for lithological legend.

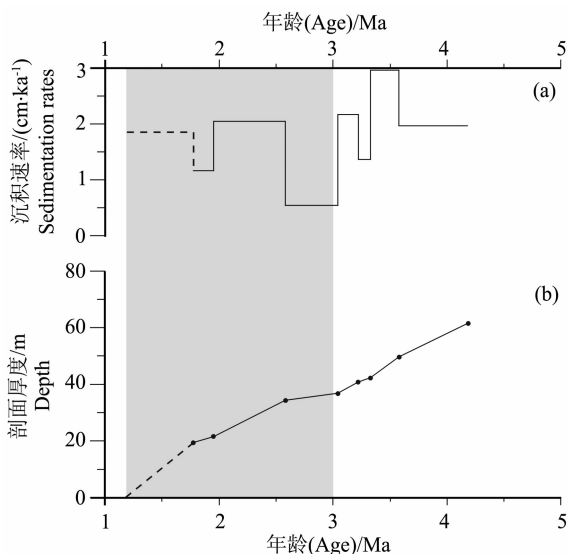


图6 土佛寺剖面的沉积速率变化图(a)及年龄-深度模式图(b)

灰色阴影区域为湖相沉积段;虚线是根据剖面平均沉积速率(按1.8 cm/ka计算)外推得到的结果.

Fig. 6 Variations of sedimentation rate (a) and age-depth model (b) of Tufosi section

The shaded area indicates lacustrine deposits section.

The age of the top of the lacustrine deposits (dashed line) is estimated at an average sedimentation rate of the whole profile (1.8 cm/ka).

期间该地区可能已经存在小规模的水流作用,但受地形和气候因素的约束还未形成大范围的湖盆,为过渡期.

3.0~2.5 Ma B. P. (前文中的第4层, 36.9~33.2 m)为第一湖相层,磁化率与沉积速率均降至整个剖面的最低.磁化率的降低主要是由于灰绿-碧绿色或灰白色的沉积物反映出的还原环境不利于一些磁性矿物的形成和保存^[28, 37],特别是赤铁矿^[38],推测湖相沉积层中的磁性矿物可能是由水流搬运的近源沉积物带来的.<2 μm和2~5 μm组分逐渐减小,而5~16 μm和16~30 μm组分则逐渐增多,可能暗示着此后水体逐步变浅.这一阶段古湖的沉积速率明显小于同时期的红粘土与黄土堆积^[36, 39],一方面可能是此时水体较深,主要接受沉积速率小的细粒物质;另一方面可能由于沉积物经历了较长时间的压实作用导致的.综合来看这一时期水体相对较深,“吴起古湖”从此时起初具规模.吴起地区湖相沉积层下部出现的石膏说明古湖经历了硫酸盐湖阶段,暗示着当时的夏季风虽然能带来一定量的降水并形成地表径流,但气候向半干旱-干旱转变的总体趋势导致水体逐步缩小.

值得注意的是,我国北方在晚上新世-更新世时期的许多盆地都堆积有河湖相沉积物,代表性地点有泥河湾盆地、关中盆地和榆社盆地.对泥河湾盆地的研究显示,湖相沉积物的起始年龄约为3.0 Ma B. P.左右的晚上新世^[29, 40~42]. Han等^[43]利用磁性地层学手段研究了关中盆地的 Shijiawan剖面,其下部河湖相沉积物的年龄介于3.08~1.9 Ma B. P.之间.此外榆社盆地在中-上新世时期也分布有较厚的河湖相地层,其中麻则沟组由灰绿色泥灰岩夹砂岩层组成,最近利用电子自旋共振法得出的结果表明其起止时间为3.04~2.50 Ma B. P.^[44].一方面,湖泊的广泛分布表明黄土高原地区在晚上新世-更新世时期气候相对湿润,与孢粉学的研究结论吻合^[45, 46];另一方面,风成堆积与湖相沉积共存的事实,暗示着3.6~2.6 Ma B. P.期间东亚冬季风相对于夏季风的逐步强盛,并使区域内温湿-冷干气候波动的幅度逐渐变大,这一点在已有的研究中也得到了证实^[7, 9, 47, 48].

2.50~2.05 Ma B. P. (前文中的第3层, 33.2~23.0 m)为第二湖相层,2.58 Ma B. P.左右北半球冰盖开始迅速扩张^[49~51],黄土高原的大部分地区则开始广泛接受风成黄土堆积^[1],这可能意味着大气环流模式的重组^[52].气候由温湿向冷干变化的趋势更加明显^[53],黄土-古土壤序列取代红粘土堆积,也表明气候波动幅度达到了一个新的水平^[47].第二湖相层磁化率的升高,代表高空搬运粉尘的组分(<2 μm)以及30~63 μm和>63 μm组分的增加,沉积速率的增大都暗示着水体变浅;此外,钙质成分的增多、波状层理的出现等岩性特征也表明湖水变浅,沉积物可能还暴露出过水面.气候的急剧变化对生物界也产生了显著的影响,在剖面33.3~33.2 m处发现了大量哺乳动物化石碎片,层位上正处于第一、第二湖相层接合处.野外观察还发现,该地区的哺乳动物化石主要就产出于这一层位.不过此处虽然化石材料数量丰富,但因以获取“龙骨”为目的的采集方式对化石的破坏非常大,多数已无法详细鉴定.从已有材料看,有锯齿虎类(Homotherium)、牛科(Bovidae)、羚羊类(Gazella)、鹿科(Cervidae)及啮齿类等(由西北大学地质学系张云翔教授鉴定),Xue等^[54]曾研究了黄土高原地区不同时期保存于红粘土及黄土中的哺乳动物化石组合.经过对比认为,土佛寺剖面中发现的上述古生物化石组合的时代接近于晚上新世/更新世,其反映的气候类型和古环境特点^[54]也与上文的推测一致.

2.05~1.20 Ma B. P. (前文中的第 2 层, 23.0~7.7 m)为第三湖相层, 磁化率降至较低水平, 沉积速率比第二湖相层略有下降, 总体上看 $<30 \mu\text{m}$ 组分逐渐减少, $>30 \mu\text{m}$ 组分逐渐增多, 灰白、灰绿色的泥质-粉砂质沉积物以及其中的波状层理、脉状或团块状的杂色泥质包体都表明此时的水体较浅(但应该比第二湖相层略深)。值得注意的是 14.0 m 处(对应于约 1.45 Ma B. P.)粒度组分出现了较大变化, $<16 \mu\text{m}$ 的细粒组分急剧减少而 $>16 \mu\text{m}$ 的粗粒组分显著增多, 这可能是对 1.45 Ma B. P. 左右发生在该区域的构造运动的响应^[11]。此后“吴起古湖”进入消亡期, 我们推测吴起古湖结束的时间不会晚于 1.2 Ma B. P., 除了有沉积速率的限制外(图 6), 还有其他方面的约束。黄土高原上普遍发育的砂质黄土层 L15(年龄约为 1.2 Ma B. P.^[55])表明, 当时严重干冷的气候事件导致该地区成为“恶劣的草原-荒漠草原环境”^[1]; 对白于山北侧的靖边黄土-红粘土剖面的研究也表明^[56], 毛乌素沙漠在 1.2 Ma B. P. 左右向南发生过一次扩张。此外, 洛川段北洛河发育的时代大约也在 1.20 Ma B. P. 左右^[57], 区域构造活动导致的北洛河溯源侵蚀并切穿湖盆可能也是吴起古湖消亡的原因之一。

值得注意的是, 黄土高原东南部三门古湖的部分地层也于 1.2 Ma B. P. 左右时期出现了角度不整合^[58]。朱照宇等^[11]利用遥感影像分析结合地面调绘资料提出在黄土高原地区存在着一个环状构造, 其北界就位于白于山地区, 并认为其形成时代大约为第四纪早中期(1.5±0.1 Ma B. P.)。一些大型的盆地, 如渭河盆地、三门古湖盆等多分布于环状构造带的边缘, 吴起古湖、三门古湖等的演化是否与环状构造带有关? 此外还需要指出的是, 关于吴起古湖仍然有许多问题值得继续研究, 例如古湖存在的范围、其结束的具体时间、古湖的演化全貌等等, 这些都有待于更多湖相剖面的发现以及多种研究手段的综合应用。

6 结 论

通过研究黄土高原北缘吴起地区厚 63.5 m 的土佛寺剖面, 认为其中水平产出的湖相沉积物与下伏红色粘土之间为连续沉积, 与上部黄土之间存在不整合面, 并且湖相地层与中国北方典型的红粘土、黄土-古土壤风成序列是同期异相的关系。

岩石磁学结果表明, 该剖面沉积物中的载磁矿

物主要是磁铁矿与赤铁矿, 此外还有一些含铁的粘土矿物以及少量铁的氢氧化物与磁赤铁矿; 沉积物的天然剩磁普遍较弱, 结合岩性特征分析, 推测这是由于吴起古湖处于一个较为还原的环境造成的。

古地磁年代学结果显示, 剖面底部年龄为 4.28 Ma B. P. 左右, 吴起古湖开始于 3.0 Ma B. P., 结束于 1.2 Ma B. P. 左右。结合岩性特征、磁化率、粒度变化及沉积速率的变化, 可将湖相沉积物分为三段: 第一湖相层时限为 3.0~2.5 Ma B. P., 这一时期吴起古湖水体相对较深, 区域内虽然仍有相对较多的降水并能形成地表径流, 但气候向半干旱-干旱转变的总体趋势导致水体逐步缩小; 第二湖相层起止于 2.50~2.05 Ma B. P., 这一阶段湖水明显变浅, 沉积物甚至还可能暴露出过水面; 第三湖相层起始于 2.05 Ma B. P., 于 1.2 Ma B. P. 左右消失, 这一阶段吴起古湖仍有一定量的水体存在, 且比上一阶段略深, 但“生存”环境的恶化使得它最终在气候变化与构造运动的双重影响下消失。“吴起古湖”虽然具有独特的演化历史, 但其所反映出的古气候、古环境变化特点与黄土高原上典型的红粘土-黄土剖面所反映出的总体趋势是一致的。

致 谢 作者在实验过程中得到了中国科学院地质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室朱日祥教授、周灿芬老师以及刘成英、李震宇、李仕虎等的帮助, 两位匿名审稿人对本文提出了宝贵的建设性意见, 在成文过程中本文第一作者还与西北大学地质学系的段亮进行了有益探讨, 在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- [1] 刘东生等. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 50~55, 109
Liu T S, et al. Loess and Environment (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 50~55, 109
- [2] 丁仲礼, 孙继敏, 杨石岭等. 灵台黄土-红粘土序列的磁性地层及粒度记录. 第四纪研究, 1998, 1: 86~94
Ding Z L, Sun J M, Yang S L, et al. Magnetostratigraphy and grain size record of a thick red clay-loess sequence at Lingtai, the Chinese Loess Plateau. *Quat. Sci.* (in Chinese), 1998, 1: 86~94
- [3] Ding Z L, Xiong S F, Sun J M, et al. Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai, Loess Plateau, north-central China and the implications for paleomonsoon evolution. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 1999, 152: 49~66
- [4] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in

- China. *Nature*, 2002, **416**:159~163
- [5] Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature*, 1982, **300**: 431~433
- [6] Kukla G, Heller F, Liu X M, et al. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, 1988, **16**: 811~814
- [7] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere. *Paleoceanography*, 1998, **13**(3):215~224
- [8] Sun D H, Shaw J, An Z S, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2 Ma Late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(1): 85~88
- [9] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature*, 2001, **411**: 62~66
- [10] Sun Y B, Clemens S C, An Z S, et al. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau. *Quat. Sci. Rev.*, 2006, **25**: 33~48
- [11] 朱照宇, 丁仲礼. 中国黄土高原第四纪古气候与新构造演化. 北京: 地质出版社, 1994. 53~59, 74~75, 99~102, 123~127
- Zhu Z Y, Ding Z L. Paleoclimate in Quaternary and Neotectonic Evolution in Loess Plateau, China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1994. 53~59, 74~75, 99~102, 123~127
- [12] 张宗祜, 张之一, 王芸生. 中国黄土. 北京: 地质出版社, 1989. 45~57, 180~187
- Zhang Z H, Zhang Z Y, Wang Y S. Loess in China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989. 45~57, 180~187
- [13] 刘池洋, 赵红格, 桂小军等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. *地质学报*, 2006, **80**(5): 617~638
- Liu C Y, Zhao H G, Gui X J, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin. *Acta Geol. Sinica* (in Chinese), 2006, **80**(5): 617~638
- [14] 李吉均, 方小敏, 马海洲等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, **26**(4): 316~322
- Li J J, Fang X M, Ma H Z, et al. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the Late Cenozoic. *Sci. China Ser. D* (in Chinese), 1996, **26**(4):316~322
- [15] 沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望. *湖泊科学*, 2009, **21**(3): 307~313
- Shen J. Progress and prospect of palaeolimnology research in China. *J. Lake Sci.* (in Chinese), 2009, **21**(3): 307~313
- [16] Thompson R, Battarbee R, O'sullivan P, et al. Magnetic susceptibility of lake sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 1975, **20**(5): 687~698
- [17] 敖红. 泥河湾盆地大长梁剖面河湖相沉积物的岩石磁学性质. *地球物理学报*, 2008, **51**(4):1029~1039
- Ao H. Rock magnetic properties of the fluvio-lacustrine sediments from the Dachangliang section in the Nihewan Basin, northern China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4):1029~1039
- [18] 岳乐平, 张云翔, 王建其等. 中国北方陆相沉积 5.30Ma 磁性地层序列. *地质论评*, 1999, **45**(4): 444~448
- Yue L P, Zhang Y X, Wang J Q, et al. Magnetostratigraphic sequence of Continental Deposits in northern China since 5.30 Ma. *Geol. Rev.* (in Chinese), 1999, **45**(4): 444~448
- [19] 岳乐平, 邓涛, 张睿等. 西藏吉隆-沃马盆地龙骨沟剖面古地磁年代学及喜马拉雅山抬升记录. *地球物理学报*, 2004, **47**(6):1009~1016
- Yue L P, Deng T, Zhang R, et al. Paleomagnetic chronology and records of Himalayan uplift on the Longgugou section of Gyirong-Oma basin in Xizang (Tibet). *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(6):1009~1016
- [20] Zhu R X, Potts R, Xie F, et al. New evidence on the earliest human presence at high northern latitudes in northeast Asia. *Nature*, 2004, **431**: 559~562
- [21] Wang X S, Yang Z Y, Lovlie R, et al. High-resolution magnetic stratigraphy of fluvio-lacustrine succession in the Nihewan Basin, China. *Quat. Sci. Rev.*, 2004, **23**:1187~1198
- [22] Fang X M, Yan M D, Van der Voo R, et al. Late Cenozoic deformation and uplift of the NE Tibetan Plateau: Evidence from high-resolution magnetostratigraphy of the Guide Basin, Qinghai Province, China. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2005, **117** (9/10): 1208~1225
- [23] Li H M, Yang X Q, Heller F, et al. High resolution magnetostratigraphy and deposition cycles in the Nihewan Basin (North China) and their significance for stone artifact dating. *Quat. Res.* 2008, **69**: 250~262
- [24] Zhu R X, Potts R, Pan Y X, et al. Paleomagnetism of the Yuanmou Basin near the southeastern margin of the Tibetan Plateau and its constraints on late Neogene sedimentation and tectonic rotation. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 2008, **272**: 97~104
- [25] 张宗祜. 中国黄土高原中几个剖面的岩性、地层分析. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, **3**(3):1~15
- Zhang Z H. Lithological and stratigraphical analysis on the loess profiles of the Loess Plateau in China. *Mar. Geol. Quat. Geol.* (in Chinese), 1983, **3**(3): 1~15
- [26] Johnson N M, Opdyke N D, Lindsay E H. Magnetic polarity stratigraphy of Pliocene-Pleistocene terrestrial deposits and vertebrate faunas, San Pedro Valley, Arizona. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1975, **86**: 5~12
- [27] 朱日祥, 黄宝春, 潘永信等. 岩石磁学与古地磁实验室简介. *地球物理学进展*, 2003, **18**(2): 177~181
- Zhu R X, Huang B C, Pan Y X, et al. A brief guide to the laboratory of rock magnetism and paleomagnetism at the institute of geology and geophysics, Chinese academy of sciences. *Progr. Geophys.* (in Chinese), 2003, **18**(2): 177~181
- [28] Thompson R, Oldfield F. 环境磁学. 严尧基等编译. 北京: 地质出版社, 1995. 9~17

- Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism (in Chinese). Yan R J, et al. translation. Beijing: Geological Publishing House, 1995. 9~17
- [29] 朱日祥, 邓成龙, 潘永信. 泥河湾盆地磁性地层定年与早期人类演化. 第四纪研究, 2007, **27**(6): 922~944
Zhu R X, Deng C L, Pan Y X. Magnetostratigraphy of the fluvio-lacustrine sequences in the Nihewan basin and its implications for early human colonization of northeast Asia. *Quat. Sci.* (in Chinese), 2007, **27**(6): 922~944
- [30] 邓成龙, 刘青松, 潘永信等. 中国黄土环境磁学. 第四纪研究, 2007, **27**(2): 193~209
Deng C L, Liu Q S, Pan Y X, et al. Environmental Magnetism of Chinese Loess-Paleosol Sequences. *Quat. Sci.* (in Chinese), 2007, **27**(2): 193~209
- [31] Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1980, **62**: 699~718
- [32] Lu H Y, An Z S. Pretreated methods on loess-paleosol samples granulometry. *Chinese Sci. Bull.*, 1998, **43**(3): 237~240
- [33] 鹿化煜, 苗晓东, 孙有斌. 前处理步骤与方法对风成红粘土粒度测量的影响. 海洋地质与第四纪地质, 2002, **22**(3): 129~135
Lu H Y, Miao X D, Sun Y B. Pretreatment methods and their influences on grain-size measurement of aeolian "red clay" in north China. *Mar. Geol. Quat. Geol.* (in Chinese), 2002, **22**(3): 129~135
- [34] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 6093~6095
- [35] 岳乐平. 黄土高原黄土、红色粘土与古湖泊沉积物关系. 沉积学报, 1996, **14**(4): 148~153
Yue L P. Depositional relation between the loess, red clay and sedimentation of the lakebasin in the Loess Plateau. *Acta Sediment. Sinica* (in Chinese), 1996, **14**(4): 148~153
- [36] Wen L J, Lu H Y, Qiang X K. Changes in grain-size and sedimentation rate of the Neogene Red Clay deposits along the Chinese Loess Plateau and implications for the palaeowind system. *Sci. China Ser. D*, 2005, **48**(9): 1452~1462
- [37] Hu S Y, Deng C L, Appel E, et al. Environmental magnetic studies of lacustrine sediments. *Chinese Sci. Bull.*, 2002, **47**(7): 613~616
- [38] Tucker M E. Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks. London: Blackwell Science, 2001. 97
- [39] 孙东怀, 鹿化煜. 晚新生代黄土高原风尘序列的粒度和沉积速率与中国北方大气环流演变. 第四纪研究, 2007, **27**(2): 251~262
Sun D H, Lu H Y. Grain-size and dust accumulation rate of late Cenozoic aeolian deposits and the inferred atmospheric circulation evolution. *Quat. Sci.* (in Chinese), 2007, **27**(2): 251~262
- [40] 陈茅南. 泥河湾层的研究. 北京: 海洋出版社, 1988. 118~123
Chen M N. Study on the Nihewan Beds (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 1988. 118~123
- [41] 袁宝印, 朱日祥, 田文来等. 泥河湾组的时代、地层划分和对比问题. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, **26**(1): 67~73
Yuan B Y, Zhu R X, Tian W L, et al. Magnetostratigraphic dating on the Nihewan Formation. *Sci. China Ser. D* (in Chinese), 1996, **26**(1): 67~73
- [42] Deng C L, Zhu R X, Zhang R, et al. Timing of the Nihewan formation and faunas. *Quat. Res.*, 2008, **69**: 77~90
- [43] Han J, Fyfe W S, Longstaffe F J, et al. Pliocene-Pleistocene climate change recorded in fluvio-lacustrine sediments in central China. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 1997, **135**: 27~39
- [44] 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚等. 山西榆社地区新近纪地层时代讨论. 中国地质, 2009, **36**(2): 300~313
Zhu D G, Meng X G, Shao Z G, et al. A discussion on the age of the Neogene strata in Yushe area, Shanxi Province. *Geol. China* (in Chinese), 2009, **36**(2): 300~313
- [45] Liu G W, Leopold E B, Liu Y, et al. Palynological record of Pliocene climate events in North China. *Rev. Palaeobot. Palynol.*, 2002, **119**: 335~340
- [46] Wu F L, Fang X M, Ma Y Z, et al. Plio-Quaternary stepwise drying of Asia: Evidence from a 3-Ma pollen record from the Chinese Loess Plateau. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 2007, **257**: 160~169
- [47] 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性. 第四纪研究, 1998, **3**: 194~204
Liu T S, Zheng M P, Guo Z T. Initiation and evolution of the Asian Monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia. *Quat. Sci.* (in Chinese), 1998, **3**: 194~204
- [48] Qiang X K, Li Z X, Powell C McA, et al. Magnetostratigraphic record of the Late Miocene onset of the East Asian monsoon, and Pliocene uplift of northern Tibet. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 2001, **187**(1/2): 83~93
- [49] Shackleton N J, Backman J, Zimmerman H, et al. Oxygen isotope calibration of the onset of ice-rafting and history of glaciation in the North Atlantic region. *Nature*, 1984, **307**: 620~623
- [50] Raymo M E, Ruddiman W F, Backman J, et al. Late Pliocene variations in northern hemisphere ice sheet and North Atlantic Deep Water circulation. *Paleoceanography*, 1989, **4**: 413~446
- [51] Prueher L M, Rea D K. Rapid onset of glacial conditions in the subarctic North Pacific region at 2.67 Ma: Clues to causality. *Geology*, 1998, **26**(11): 1027~1030
- [52] Ding Z L, Rutter N W, Sun J M, et al. Re-arrangement of atmospheric circulation at about 2.6 Ma over northern China: evidence from grain size records of loess-paleosol and red clay sequences. *Quat. Sci. Rev.*, 2000, **19**: 547~558
- [53] Deng C L, Shaw J, Liu Q S, et al. Mineral magnetic variation of the Jingbian loess/paleosol sequence in the northern Loess Plateau of China: Implications for Quaternary development of Asian aridification and cooling. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 2006, **241**: 248~259

- [54] Xue X X, Zhang Y X, Yue L P. Paleoenvironments indicated by the fossil mammalian assemblages from red clay-loess sequence in the Chinese Loess Plateau since 8.0 Ma B. P. *Sci. China Ser. D*, 2006, **49**(5): 518~530
- [55] 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. *Paleoceanography*, 2002, **17**(3): 5-1~5-21
- [56] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stepwise expansion of desert environment across northern China in the past 3.5 Ma and implications for monsoon evolution. *Earth. Plan. Sci. Lett.*, 2005, **237**: 45~55
- [57] 岳乐平, 雷祥义, 屈红军. 黄河中游水系的阶地发育时代. 地质论评, 1997, **43**(2): 186~192
- Yue L P, Lei X Y, Qu H J. The age of terrace development in the middle reaches of the Yellow River. *Geol. Rev.* (in Chinese), 1997, **43**(2): 186~192
- [58] Wang S M, Wu X H, Zhang Z K, et al. Sedimentary records of environmental evolution in the Sanmen Lake Basin and the Yellow River running through the Sanmenxia Gorge eastward into the sea. *Sci. China Ser. D*, 2002, **45**(7): 595~608

(本文编辑 胡素芳)