

文章编号: 1000-0550(2010)03-0611-09

兰州地区新近纪地层的沉积相与古环境记录^①

张焱¹ 孙东怀¹ 韩飞¹ 王飞¹ 朱彦虎² 张月宝¹ 易治宇³ 李再军¹

(1. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室 兰州 730000 2 甘肃省地质调查院 兰州 730000 3 中国科学院地质与地球物理所 北京 100029)

摘要 兰州地区位于黄土和青藏高原的过渡带,其第三纪地层对研究风尘沉积发育和青藏高原隆升都有着特殊的意义。本研究以 0.25 m 为间距对厚度 210 m 的兰州皋兰山剖面的新近纪地层采集样品 901 个,在实验室对试验样品进行前处理后对其进行了粒度、磁化率和色度测试。用粒度分布函数的方法分离了沉积物的各成因组分,确定了风成组分和水成组分在全剖面沉积物中所占的百分比。结合色度和磁化率的实验结果分析表明,皋兰山剖面地层以风尘沉积为主,其间夹有河流相沉积的约 15 层砂岩。古环境的恢复表明,兰州地区从至少约 7 Ma 开始,沉积地层经历了由河湖相向风尘沉积转变,气候干旱化开始,与黄土高原风尘序列堆积底界 8~7 Ma 基本一致。6~5.2 Ma 构造稳定,是比较开阔的平原环境,并且气候条件比较湿热;5.2~3.5 Ma 间构造波动比较频繁,形成了间隔性的河流相砂岩沉积,而在气候表现为干冷;自 3.5 Ma 开始,兰州地区发生相对构造沉降,五泉砾岩层的发育是对青藏运动 A 幕的具体响应。

关键词 兰州地区 新近纪 风尘沉积 古环境

第一作者简介 张焱 男 1975 年出生 硕士研究生 地球化学

通讯作者 孙东怀 E-mail: dhsun@lzu.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

兰州地区位于黄土高原和青藏高原的过渡带,堆积着西部地区最厚的黄土地层,是现代季风气候变化较为敏感的区域,其第三纪地层对研究风尘沉积发育和青藏高原隆升都有着特殊的意义(图 1)。并且兰州及周边地区第三和第四系地层之间普遍发育较明显的

砾石层,上下地层之间以不整合接触为主,年代和青藏运动事件较为一致^[1,2],该地区的地质历史可能和青藏高原东北缘的地质构造活动历史有着直接对应的关系。由此看来,兰州盆地是研究西部沉积变化、季风气候演变和青藏高原分阶段隆升的理想地点。

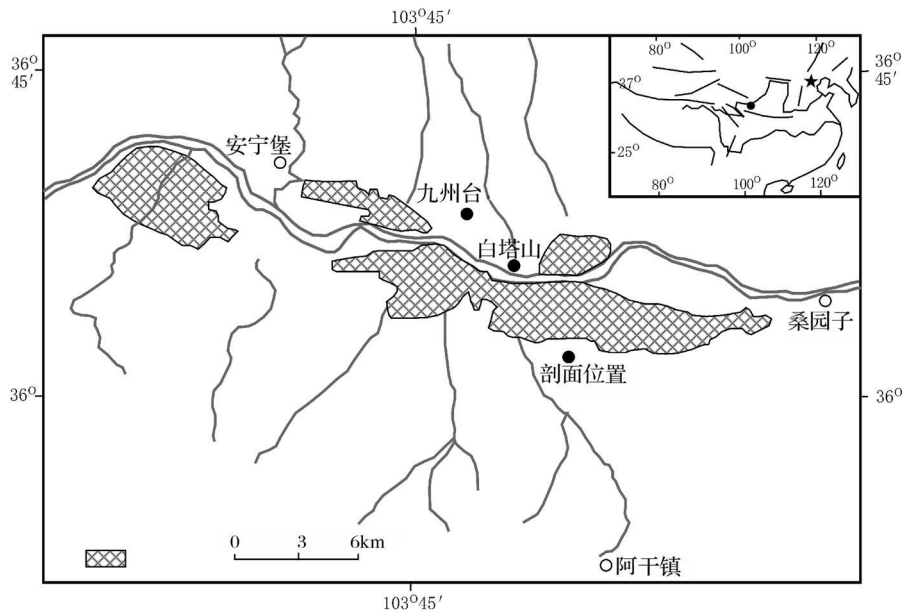


图 1 皋兰山剖面位置图

Fig 1 Location of Gaolanshan section

^①国家自然科学基金项目(批准号: 40625009 40121061),兰州大学引进人才基金(批准号: 581406)资助。

收稿日期: 2009-04-29 收修改稿日期: 2009-08-20

自 20 世纪 90 年代以来, 研究人员在该地区开展了大量的工作, 取得了丰硕的成果。然而这些工作多集中于第四纪黄土以及中新世之前的地层^[3~6], 对于介于两者之间的新近纪的长序列沉积地层开展的研究却相对较少, 尤其是对该时间段沉积物与同期在黄土高原广泛分布的第三纪红粘土之间的联系尚不清楚。本文基于对皋兰山剖面的古地磁定年^①, 通过对该剖面粒度、磁化率和色度指标的研究, 来讨论皋兰山剖面地层的沉积环境和古气候的演化过程。

1 皋兰山剖面地层

皋兰山剖面位于兰州市南郊, 底部紧邻兰州市火车站, 地层岩性变化(图 2)描述如下:

0~290 m 为皋兰山的上覆平行地层, 主要是第四纪以来的风成黄土, 与下覆的第三纪地层不整合接触;

290~320 m 发育了一层厚度达 30 m 的巨厚砾石层, 该砾石层被学者命名为五泉砾岩层^[7]。五泉砾岩层上覆第四纪黄土地层, 两者之间呈角度不整合接触。其下部为一套厚 6 m 的灰白色的砂岩与松散的粗砂或粉砂互叠层;

320~396 m 橙黄色和浅棕黄色粉砂质粘土, 较为致密, 无层理, 中间孔隙偶有石膏夹层。其中夹杂 7 层较为明显的灰白色粗质砂层, 厚度约 1 m 左右。砂层质地较为均匀, 内夹薄层灰绿色泥岩条带, 可见石膏晶体;

396~455 m 顶端为厚度 1.3 m 的褐红色细质砂岩, 往下至大砂层之上的 452 m 地层由橙黄色转变

为棕黄色, 为一套砂层和暗棕黄色粘土质粉砂层的混合堆积, 期间多处出现砂层和粗粉砂质粘土互层。砂层中未见砾石出现, 野外观测砂层两侧黄土的泥质成分明显增大, 较为疏松, 石膏和碳酸钙胶结一般较为少见。上半段底部 452 m 处发育厚度为 3 m 的大砂层, 致密, 暗棕色细砂质砂层, 具有水平层理;

455~530 m 其中自大砂层底端至中间 466.3 m 为棕红色粘土质堆积, 较为坚硬。下半部分有小段砂质粉砂土, 常见层状石膏晶体。466.3~497 m 地层颜色转深为暗红色粘土质土, 靠近底部 497~530 m 含砂量增加, 为砂质粘土, 发育垂直节理和斜层理, 质地坚硬。

从岩性变化上看, 以 455 m 处大砂层底部为界限, 剖面可以分为上下两个部分。上半段地层颜色稍浅, 以橙黄色粉砂质粘土为主体, 中间夹有较多砂层; 下半段地层以棕红—暗红色粘土堆积为主, 砂岩较少发育。

样品采集从五泉砾岩底部 320 m 开始, 至山脚红山根 530 m 处结束, 厚度为 210 m。经古地磁测量(图 3)表明, 皋兰山剖面地层的实测极性柱出现 2 个负极性大段中间夹着 4 个正极性小段, 其特点与 Gilbert 时的典型特征完全一致, 并且两端未完全出露的正极性分别与 Chron2A.3n 和 Chron3An.1n 相对应, 最终确定皋兰山剖面的年代为 6~3.5 Ma

2 样品采集与测量

皋兰山剖面上半段样品以 0.25 m 的间距采集,

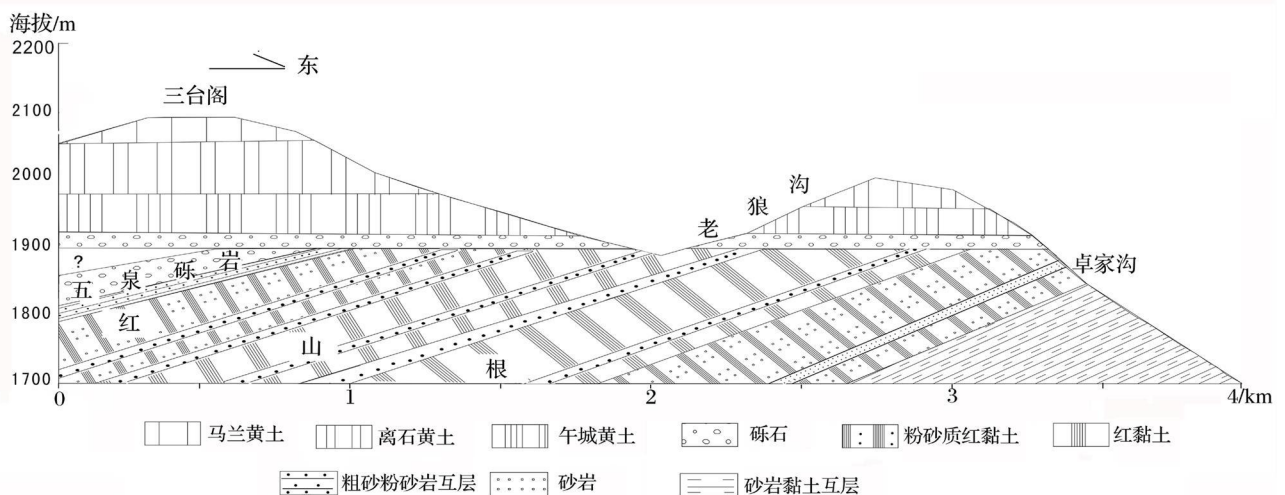


图 2 皋兰山剖面示意图
Fig 2 Schematic diagram of Gaolan Mountain section

① 韩飞, 孙东怀, 张焱, 等. 兰州地区新近纪磁性地层与古环境意义(待刊).

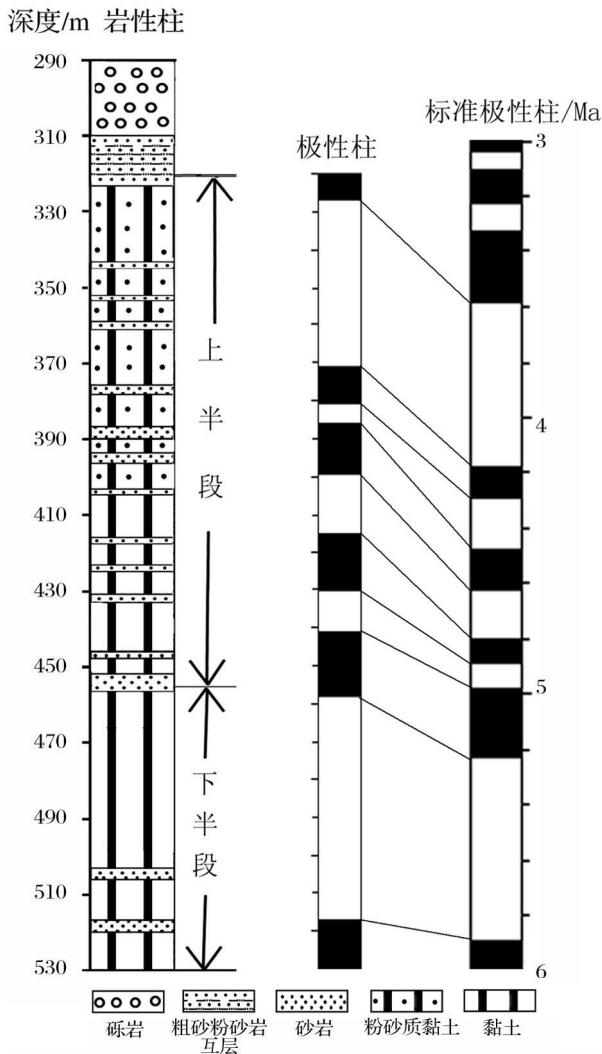


图 3 皋兰山剖面地层年代图

Fig 3 Magnetostratigraphy of Gaolanshan section

而在其下 75 m 间隔为 0.5 m。采集新鲜地层的粉末状散样用塑料自封袋密封并编号,共得样品 901 个。

粒度测量在 Mastersizer2000 激光粒度仪上完成。实验步骤是:取样品 0.2 g 放置于烧杯中,并注入 10 mL H_2O ,在电热板上加热直至无小气泡产生以去除样品中的有机质;然后加入 10 mL 浓度为 2:1 的盐酸,加热至无反应气泡产生,以去除样品中的碳酸盐杂质;停止加热,将烧杯注满纯净水后静置 12 h 使样品颗粒充分沉淀;将上层水吸出,往溶液中加入 0.05 N 的分散剂 (Na_3PO_3)。10 mL 后放置于超声振荡仪中振荡 10 min 后在粒度仪上测量。

磁化率测量使用的是 Bartington MS2 磁化率仪,测量前先取出 10 g 左右的干燥样品,研磨至细颗粒状并称其质量。然后对样品分别进行了低频 (0.47

kHz) 和 高频 (4.7 kHz) 磁化率 2 个数值的测试。并由此计算出频率磁化率的数值,计算方法为: [(低频 - 高频) / 低频] $\times 100\%$ 。

色度实验前先让样品在室温下干燥 24 h 以上,以去除水分对实验结果的影响。将样品粉碎成细颗粒,每个样品取出约 2 g 后使用惠普扫描仪进行扫描。借用计算机软件^[9]读取出 R、G、B 值,并结合色谱学的原理^[10]转化为 CE_Lab 系统下的色度值 L、a、b。

以上所有的实验均在兰州大学教育部西部环境重点实验室完成。

3 皋兰山剖面地层沉积相

沉积地层在不同的沉积介质的搬运和沉积作用过程中,会在不同粒径颗粒的组分含量、磁性矿物颗粒的种类和磁化率大小以及碎屑颗粒色度值上都有不同的反映。所以,本文试图通过对沉积碎屑颗粒进行粒度、色度以及其中所含磁性矿物的磁化率进行测量和分析,从而间接的反映沉积地层形成的搬运介质、方式以及沉积相的变化。下面本文将分别对皋兰山剖面不同层段的样品数据进行分析,从而确定地层的沉积环境。

3.1 粒度

多组分组成的沉积物样品总体是各个单组分的自然累积,借用 WEBULL 分布函数^[11-13]对粒度频率曲线进行拟合,按照动力成因不同在数学上实现了粒度在 4 个粒径区间(超细粒、细粒、粗粒和砂粒)的组分百分含量的分离。样品整体的频率分布曲线在形态特征上可以分为 3 种类型,图 4 给出了几个典型样品粒度组分分离后的结果:

1) 321.6 m 砂层处样品的分布曲线(图 4a)由两部分组成,较细组分分选较差,众数粒径在 11 μm 左右,含量为 17%。粗粒组分分选较好,众数粒径在 200 μm 左右,含量为 83%。两者分布范围相差较大,重叠部分较少。在频率曲线上,粗粒端有单峰状凸起,可见搬运介质动力较强,并且两个组分由两种强度差别较大的搬运形式形成。有研究表明^[12-14],典型的河流相沉积物粒度分布主体由悬移和跃移两部分组成。跃移组分众数粒径在 200~400 μm 之间,分选较好。悬移组分众数粒径一般为 10~15 μm 分选较差,两部分重叠范围小。比较后可知,测试样品的粒度频率曲线具有明显的河流相特征,其粗、细组分分别对应于河流沉积物的跃移和悬移部分。

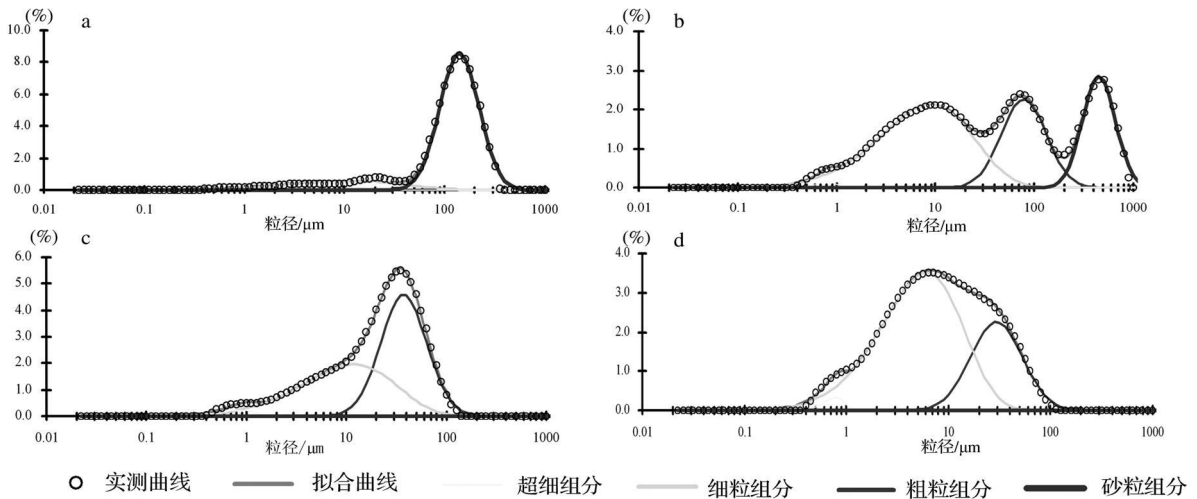


图 4 典型样品粒度频率分布曲线的拟合 (a 321.6m b 354m c 355m d 491.6m)

Fig 4 Grain-size fitting curves of typical samples (a 321.6m b 354m c 355m d 491.6m)

2) 354 m 处样品分布曲线 (图 4b) 呈现多峰态, 砂粒级组分众数粒径高达 400 μm 百分含量为 23.7%。细粒组分和粗粒组分的众数分别为 10 μm 和 90 μm 含量为 50.7% 与 25.7%。通过以上分析可以看出, 样品的粒度分布由多个动力成因的组分构成, 形成过程比较复杂。较多的砂粒成分表明有流水改造过的痕迹, 可认为是次生的混合相沉积物。

3) 355 m (图 4c) 和 491.6 m (图 4d) 处粘土样品在频率曲线上呈双峰形式分布, 在分布曲线上有细尾延伸。经分离后可见粗粒组分粒径集中在粗粉砂区间, 众数为 22 μm 和 37 μm 百分含量为 29% ~ 53%。细粒组分粒径从粘土级颗粒直到粗粉砂, 跨度较大, 众数为 6 ~ 10 μm 百分含量分别为 46% 和 71%。粒度分布特征与河流沉积物有较大的差别, 粗粒和细粒组分的重叠范围较大, 表明沉积物可能是由强度有所差异的两种相似搬运力共同作用产生的。在季风性气候背景下, 会很容易的想到黄土高原的风尘黄土的堆积过程, 强大的低空季风系统为粗颗粒组分的主要搬运者, 而细粒部分则代表着动力稍弱的高空西风气流带来的持续性背景降尘^[15]。对比黄土粒度分布, 粒度曲线多为双峰态^[11, 12], 分离后可以得到两个主要组分, 其分布范围和形态与样品一致, 由此可以判断该处样品为风尘相沉积物。可能是后来风化成壤作用所致^[16], 皋兰山剖面多数粘土样品在

0.7 μm 左右的细粘土级组分中存在一个平台, 含量在 2% 左右。

通过剖面地层样品的频率分布曲线 4 个组分的分离, 可以得到皋兰山剖面沉积序列风成和水成两个主要组分的百分含量和平均粒径的变化曲线 (图 5)。图中自五泉砾岩底部之下, 水成部分的百分含量 (曲线 f) 和平均粒径 (曲线 g) 基本为 0 并且变化一致, 仅在 345 m、352 m、359 m、378 m、396 m、418 m、432 m、443 m、452 m、504 m 等砂层位置变化明显, 呈针状凸起。而风成组分的变化正好反相关, 百分含量 (曲线 h) 主体在 100% 上下轻微波动。平均粒径 (曲线 i) 变动幅度不大, 主要分布区间为 10 ~ 40 μm 。经计算, 风成组分在整体中所占比重高达 95.5%, 而水成组分百分含量仅占 4.4%, 并且主要集中在上段地层 (320 ~ 455 m) 中。

结合粒度频率曲线初步可以判定, 皋兰山剖面以风尘沉积为主, 其间经历过多次河流发育, 经流水改造过的次生粘土仅分布于砂层两侧的过渡区域, 含量较少。整个地层在沉积环境上有一定差异, 上段地层 (320 ~ 455 m) 表现为典型的风成粘土和河流相砂层叠覆出现, 在其间发育水流改造的次生粘土; 下段地层 (455 ~ 530 m) 则以风成粘土为主体, 河流相砂层的发育较少。

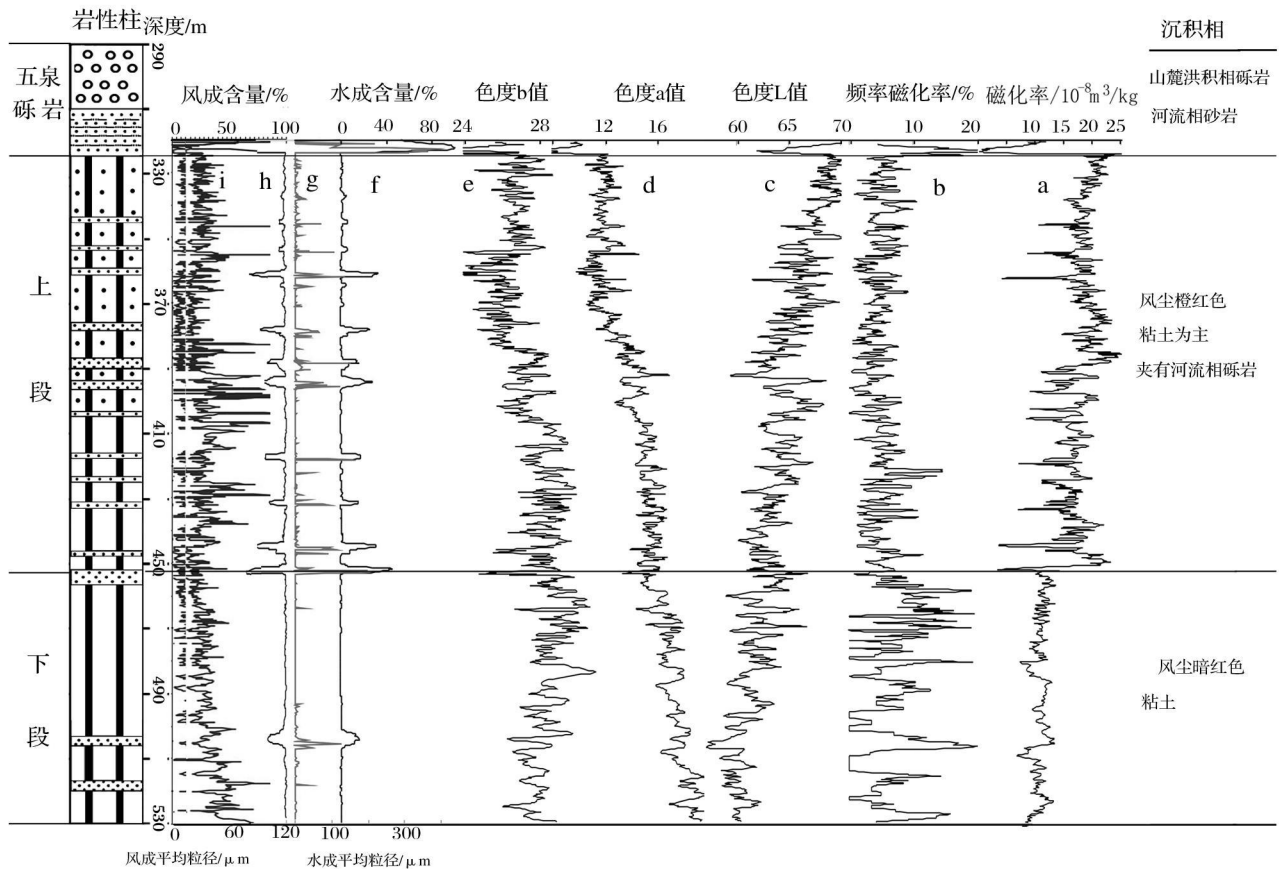


图 5 环境代用指标的深度序列曲线

Fig 5 Depth sequence curves of environmental proxies

3.2 色度

皋兰山剖面野外观测剖面整体以红色为基调, 尤其下半段出露大段暗红、棕红色地层, 整体颜色较深。根据色度的原理, 对剖面地层颜色所代表的沉积环境意义加以分析。CIE1976 (L a b) 表色系统在色度测量中广泛应用, 其中 L 代表明度、a 为红度、b 为黄度。已有的研究表明^[17-18], 高温多雨的强氧化环境有利于土壤中赤铁矿的形成, 而红度值高低主要受赤铁矿的控制, 赤铁矿含量越高, 红度越高。因此, 红度和黄度值与温度和降水量成正比。明度值和降水与温度的关系不大, 但和有机碳的含量成正相关。图 5 中的色度记录 (曲线 c d e) 显示, 红度和黄度值随着地层深度由下至上线性递减, 表现出一定的同步变化关系。明度值与前两者表现出鲜明的反相关, 其初始数值较低, 体现出由低至高的变化。可以推断出, 剖面下段地层有机碳含量高, 沉积环境显得更为湿热, 而上段则相对干冷, 所指示的气温和降水量有随深度递减的趋势。

当然, 降水量的高值并不意味着此时期的地层经

过流水作用沉积而成。红度值整体分布在 10~20 单位之间, 和黄土剖面进行对比明显偏高。较高的红度值说明皋兰山地层富含赤铁矿, 而赤铁矿的形成有赖于良好的排水条件。过量水分会抑制其生成, 产生潜育化作用可以把磁性矿物还原成低磁性的纤铁矿和沼铁矿^[19-20]使土壤变青或变蓝。即通过对沉积相和色度的观察表明地层较少受流水作用的痕迹。

3.3 磁化率和磁化率频率效应

磁化率受到磁性矿物的种类和岩石的沉积环境的影响, 在超过一定降水量的过度湿润环境下, 低磁性矿物的含量会增加, 因而数值可能会很低^[21-22]。只有在降水量低于上限值的适用范围内, 才能更好地指示夏季风的强度。频率磁化率则由沉积物中超顺磁颗粒的含量多少来决定, 在湿热的气候条件下, 成壤作用加强, 容易形成超顺磁细颗粒^[23-24], 频率磁化率值会相应的增高。反之, 干冷的气候条件小, 则频率磁化率会减小。

从图 5 的 a 和 b 曲线来看, 上段地层和下段地层在沉积环境上存在较大的差异。上段地层磁化率数

值较高,集中在 10~25 个单位之间,而频率磁化率数值则在 5%上下波动,表现为低值。通过调查黄土高原西峰、赵家川、段家坡等剖面^[25]的磁化率发现,同年代地层磁化率值分布在 25~50 之间,佳县红粘土的频率磁化率数值分布为 8%~12%^[26]。对比可见,剖面地层的上部分磁化率与频率磁化率总体分布区间和黄土高原相近且读数偏低,指示着相对干燥的气候和类似的风尘沉积环境。下段地层的磁化率较低,可能意味着较高的降水量突破了上限值所至。而频率磁化率数值较高,也反映了有利于成壤作用发生的湿热气候条件,这与色度指标的结论是一致的。

4 兰州地区新近纪沉积环境演变

在皋兰山剖面古环境指标的深度序列(图 5)的基础上,以磁性地层界线为控制点,进行线性插值得到剖面新近纪地层古环境指标的年代序列(图 6)。

皋兰山剖面底部发育河湖相砂岩(图 2),向上开

始堆积风尘粘土序列,用古地磁方法测定其界限至少为 7 Ma 这一结果说明至少从 7 Ma 开始兰州地区的古季风气候(主要指冬季风)已经建立并且形成风尘序列的快速堆积,西部地区的干旱化至此已经开始。

6.0~5.2 Ma 阶段,与下段地层相对应,L 值整体偏低,并自 6 Ma 开始逐渐增加。而 a 值整体较高,并表现出与 L 相反的变化趋势。色度记录表明此阶段兰州地区出现气候湿热期,植被覆盖良好,并且是一个开阔的平原地带。此外,临夏盆地的孢粉记录也指出,8.5~4 Ma 出现一个 30 Ma 来最干旱的时期,而在 6 Ma 前后近百万年森林又再度出现^[27,28]。磁化率在此阶段读数较低,且波动范围小,可能由于此时期较高的降水量所至。反观频率磁化率在这一阶段对气候的反映则更加灵敏,温暖湿润的气候条件使成壤作用增强,表现为频率磁化率取值偏高,其对应当时古气候的反映也是和色度指标一致的。

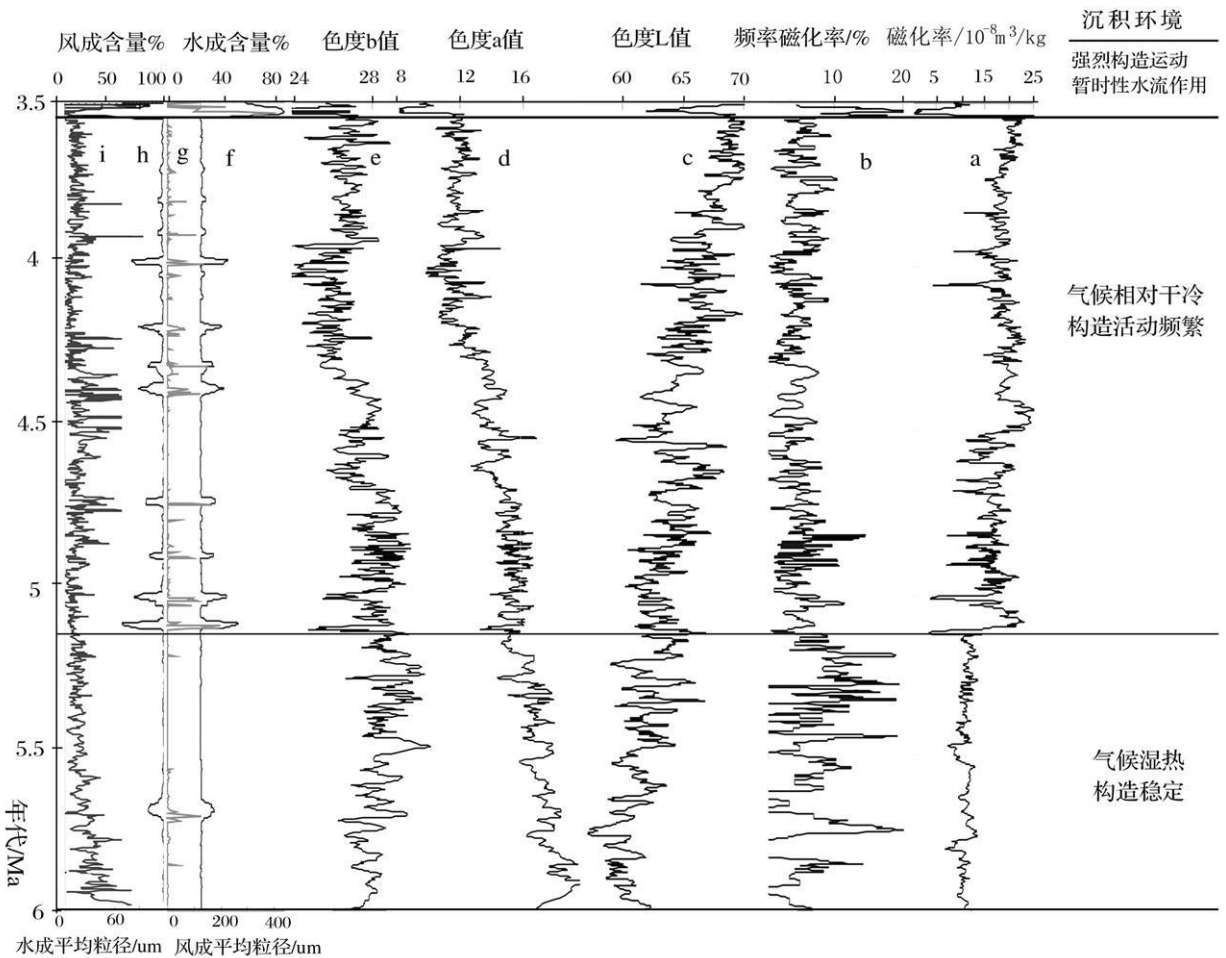


图 6 环境代用指标的年代序列曲线

Fig 6 Chronological sequence curves of environmental proxies

通过以上分析可以看出,兰州地区在 6~5.2 Ma 时期大的气候背景炎热而湿润,并伴随着气温和降水量递减的过程。地质构造稳定且地势开阔,尚未形成盆地。

5.2~3.5 Ma 时期,对应剖面上段地层,红度和黄度值继续下降,明度升高,频率磁化率减小,表明气温和降水量持续递减,成壤作用减弱,气候转变为相对干冷。可能是因为降水量跌破上限值,磁化率值大幅回升,并在约 3.6 Ma 4.5 Ma 5.1 Ma 指示出 3 个夏季风相对适宜的时期。通过以上分析可以看出,兰州地区的古气候在 5.2 Ma 时期有一定程度的转变。该时期在岩性上表现为 452 m 深度处出现一层 3 m 厚的砂岩,正好是剖面上下段的标志性砂层。而近乎同期,临夏盆地在 5.4 Ma 发育一层 11~13 m 厚,粒径为 1~5 cm 的底砾岩^[29],虽然二者在粒径和厚度上存在差异,但是从二者与青藏高原的距离考虑,这种差异性是可以由河流介质的搬运能力和对砂砾的磨蚀程度来加以解释的,因此可以判断兰州地区 5.2 Ma 左右发育的厚砂岩是对青藏高原一次构造变动的记录^[30]。5.2~4 Ma 年龄的地层夹有约 12 层粗砂岩,各砂层的厚度较薄(约 0.5~1.5 m),这种持续反复的河流相薄层砂岩的出现说明青藏高原处于构造活跃期^[31],只是这些构造运动十分微弱,可以看作是 3.5 Ma 开始的青藏运动的前奏。

自 3.5 Ma 开始,青藏运动揭开序幕,皋兰山剖面的五泉砾岩记录了这一事件。据古地磁测定,五泉砾岩的底界年代为 3.5 Ma 略晚于临夏盆地积石组(3.58 Ma),可以推断为同期构造运动产生,是兰州地区对青藏高原 A 幕运动的具体响应,为其提供了地质证据。

5 结论

(1) 皋兰山剖面地层粘土主体成因为风成沉积序列,在 5.2~3.5 Ma 间隔出现的砂层为河流相沉积,并且伴随出现较少的次生粘土。

(2) 兰州地区至少 7 Ma 开始沉积地层由河湖相向风尘沉积转变,气候干旱化开始,与黄土高原风尘序列堆积底界 7~8 Ma^[32] 基本一致。6~5.2 Ma 构造稳定,是比较开阔的平原环境,并且气候条件比较湿热;5.2~3.5 Ma 间构造波动比较频繁,形成了间隔性的河流相砂岩沉积,而在气候上表现为相对干冷。

(3) 5.2~3.5 Ma 河流相薄层砂岩的出现说明青藏高原处于构造活跃期,但这些构造变动都是十分

微弱的,自 3.5 Ma 开始,兰州地区发生相对构造凹陷,五泉砾岩层底界年龄为 3.5 Ma 左右,其发育过程是对青藏运动 A 幕的具体响应。

参考文献 (References)

- Li Jijun, Wen Shixuan, Zhang Qing, et al. A discussion on the period, amplitude and type of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Science in China Series D*, 1979, 22(12): 1314—1328.
- 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: 380—390.
- 陈发虎, 张宇田, 张维信, 等. 兰州九州台黄土沉积年代的综合研究 [J]. *沉积学报*, 1989, 7(3): 105—111 [Chen Fahu, Zhang Yutian, Zhang Weixin, et al. The comprehensive study on depositional age of Jiuzhoutai loess, Lanzhou [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, 7(3): 105—111].
- 张虎才, 张林源. 兰州九州台黄土剖面元素地球化学研究 [J]. *地球化学*, 1991, 1: 79—86 [Zhang Hucui, Zhang Linyuan. Element geochemistry of the Jiuzhoutai loess section, Lanzhou [J]. *Geochimica*, 1991, 1: 79—86].
- Yue Leping, Heller F, Qiu Zhanxin, et al. Magnetostratigraphy and paleoenvironmental record of Tertiary deposits of Lanzhou Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(9): 770—774.
- 岳乐平, 邱占祥, 颜光普, 等. 兰州盆地永登剖面记录的第三纪沉积环境 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(4): 683—687 [Yue Leping, Qiu Zhanxin, Yan Guangpu, et al. Sedimentary environment of Tertiary recorded in the Yongdeng section of Lanzhou area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4): 683—687].
- Li Jijun, Zhang Bao, Zhu Junjie, et al. Magneto and pedo-stratigraphy of paleosoil loess sequences in the Lanzhou Basin: evidence for evolution of Huanghe [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44: 119—483.
- 谷祖刚, 张生源. 兰州地区早更新世五泉砾岩哺乳动物化石证据 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 1987, 23(1): 114—121 [Gu Zugang, Zhang Shengyuan. Evidence of mammalian fossils in Wuquan conglomerate of Early Pleistocene at Lanzhou and its neighborhood [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 1987, 23(1): 114—121].
- Sun Donghui, Liuyu, Tan Ming. Digital image analysis of paleoenvironmental records and applications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(23): 1957—1963.
- Viscaro R A, Rosel B, Minasy P, Roudier, et al. Colour space models for soil science [J]. *Geoderma*, 2006, 133: 320—337.
- 孙东怀, 鹿化煜, David Rea 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义 [J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 327—335 [Sun Donghui, Lu Huayu, David Rea, et al. Binodal grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 327—335].
- Sun Donghui, An Zhisheng, Sun Ruixia, et al. Mathematical ap-

- proach to sedimentary component partitioning of polymodal sediments and its applications [J]. *Progress in Natural Science* 2001, 11 (5): 374-382
- 13 Sun Donghuai, B. Bemendal, J. Rea, D. K. et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments and numerical partitioning of the sedimentary components [J]. *Sedimentary Geology* 2002, 152 (3-4): 263-277
- 14 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用 [M]. 北京:地质出版社, 1976: 55-65 [Shanbei Team of Chengdu Geological College. Grain-Size Analysis and Its Applications of Sedimentary Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1976: 55-65]
- 15 Sun Donghuai, Su Ruixia, B. Bemendal, J. et al. Grain-size and accumulation rate records from Late Cenozoic aeolian sequences in northern China: Implications for variations in the East Asian winter monsoon and westerly atmospheric circulation [J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 2008, 264 (1): 39-53
- 16 孙东怀. 黄土粒度分布中的超细粒组分及其成因 [J]. 第四纪研究, 2006, 26 (6): 928-936 [Sun Donghuai. Super-fine grain size components in Chinese loess and their palaeoclimatic implication [J]. *Quaternary Sciences* 2006, 26 (6): 928-936]
- 17 宋春晖, 白晋锋, 赵彦德, 等. 临夏盆地 13~4.4Ma湖相沉积物颜色记录的气候变化探讨 [J]. 沉积学报, 2005, 23 (3): 507-513 [Song Chunhui, Bai Jinfeng, Zhao Yande, et al. The color of lacustrine sediments recorded climatic changes from 13 to 4.4 Ma in Linxia basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2005, 23 (3): 507-513]
- 18 徐丽, 苗运法, 方小敏, 等. 青藏高原东北部西宁盆地中始新世—渐新世沉积物颜色与气候变化 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45 (1): 12-19 [Xu Li, Miao Yunfa, Fang Xiaomin, et al. Middle Eocene-Oligocene climatic changes recorded by sedimentary colors in the Xining basin in northeastern Tibetan Plateau, NW China [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Science* 2009, 45 (1): 12-19]
- 19 Yang Shengli, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. Transformation functions of soil color and climate [J]. *Science in China Series D* 2001, 44 (Supp): 218-226
- 20 陈一萌, 陈兴盛, 宫辉力, 等. 土壤颜色——一个可靠的气候变化代用指标 [J]. 干旱区地理, 2006, 29 (3): 309-313 [Chen Yimeng, Chen Xingsheng, Gong Huili, et al. Soil color: a new sensitive indicator for climatic change [J]. *Arid Land Geography* 2006, 29 (3): 309-313]
- 21 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: B 辑, 1994, 24 (12): 1290-1297 [Lv Houyuan, Han Jiamao, Wu Naiqin, et al. The analysis of modern soil magnetic susceptibility and its paleoclimatic significance [J]. *Science in China Series B* 1994, 24 (12): 1290-1297]
- 22 刘秀铭, 夏敦胜, 刘东生, 等. 中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨 [J]. 第四纪研究, 2007, 27 (2): 210-219 [Liu Xiuming, Xia Dunsheng, Liu Tungsheng, et al. Discussion on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaskan and Chinese loess [J]. *Quaternary Sciences* 2007, 27 (2): 210-219]
- 23 刘秀铭, 刘东生, Heller F. 等. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换 [J]. 第四纪研究, 1990, 1: 142-149 [Liu Xiuming, Liu Tungsheng, Heller F. et al. Frequency-dependent susceptibility of loess and Quaternary paleoclimate [J]. *Quaternary Sciences* 1990, 1: 142-149]
- 24 卢升高. 土壤频率磁化率与矿物粒度的关系及其环境意义 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8 (1): 9-14 [Lu Shenggao. Relationship between frequency magnetic susceptibility and ferromagnetic mineral grain size in soils and its environmental implications [J]. *Journal of Basic Science and Engineering* 2000, 8 (1): 9-14]
- 25 孙东怀. 晚新生代黄土高原风尘序列的磁性地层与古气候记录 [D]. 中国科学院地球环境研究所, 1998: 65-174 [Sun Donghuai. Magnetostratigraphy and Paleoclimate Records of Late Cenozoic Eolian Sequence in the Loess Plateau of China [D]. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 1998: 65-174]
- 26 强小科, 安芷生, 常宏. 佳县红粘土堆积序列频率磁化率的古气候意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23 (3): 91-96 [Qiang Xiaoke, An Zhisheng, Chang Hong. Paleoclimatic implication of frequency-dependent magnetic susceptibility of red clay sequences in the Jiaxian profile of Northern China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology* 2003, 23 (3): 91-96]
- 27 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19 (1): 1-11 [Li Jijun. Studies on the geomorphology of the Qinghai Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology* 1999, 19 (1): 1-11]
- 28 Li Jijun, Fang Xiaomin. Uplift of the Tibetan Plateau and environmental changes [J]. *Chinese Science Bulletin* 1999, 44 (23): 2217-2224
- 29 李建力, 李吉均, 方小敏, 等. 临夏盆地三千万年来沉积物粒度特征及其构造意义 [J]. 地理研究, 1998, 17 (1): 39-47 [Wang Jianli, Li Jijun, Fang Xiaomin, et al. Tectonic significance deduced from grain size characteristics in Linxia basin in 30 million years [J]. *Geographical Research* 1998, 17 (1): 39-47]
- 30 方小敏, 徐先海, 宋春晖. 临夏盆地新生代沉积物高分辨率岩石磁学记录与亚洲内陆干旱化过程及原因 [J]. 第四纪研究, 2007, 27 (6): 989-999 [Fang Xiaomin, Xu Xianhai, Song Chunhui. High resolution rock magnetic records of Cenozoic sediments in the Linxia basin and their implications on drying of Asian inland [J]. *Quaternary Sciences* 2007, 27 (6): 989-999]
- 31 宋春晖, 方小敏, 高军平, 等. 青藏高原东北部贵德盆地新生代沉积演化与构造隆升 [J]. 沉积学报, 2001, 19 (4): 493-499 [Song Chunhui, Fang Xiaomin, Gao Junping, et al. Tectonic uplift and sedimentary evolution for the Guide basin in the Northeast margin of Tibetan Plateau in Cenozoic Era [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2001, 19 (4): 493-499]
- 32 Sun Donghuai, 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 [J]. *Geophysical Research Letters* 1998, 25: 85-88

Depositional Facies and Paleoenvironmental Record of the Late Tertiary Stratum of Lanzhou Area Gansu

ZHANG Yan¹ SUN Dong-hua¹ HAN Fei¹ WANG Fei¹ ZHU Yan-hu²
ZHANG Yue-bao¹ YI Zhi-yu³ LI Zai-jun¹

(1 Key Laboratory of Western China's Environmental System (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 73000)

2 Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000 3 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Lanzhou Area is located on the northwestern margin of the Loess Plateau and the northeastern margin of the Tibetan Plateau, which Tertiary stratum are specially significant for the research of the Tibetan Plateau uplifts and the development of the eolian sediment. With a thickness of 210 m, the Gaolan section belongs to the late Tertiary according to the magnetostratigraphy. 901 samples were obtained from the field in a sampling pace of 0.25 m and subsequently the grain-size, magnetic susceptibility and chroma experiments were accomplished in laboratory. The measured particle size data were separated by a mathematical method to gain the components of different origins as well as the ratio of each component. The analytical results of environmental proxies show that Gaolanshan section is eolian deposition with 15 layers of sand accumulated by rivers. The reconstruction results of paleoenvironment imply that the sedimentary stratum of the section had changed from fluvial deposits to eolian deposits at 7 Ma. That means the initial drying of the internal Asia continent begun at least 7 Ma ago, the conclusion of which is consistent with the main Loess Plateau. Lanzhou area was a relatively open plain and structurally stable with a wet and warm climatic condition in 6~5.2 Ma; in 5.2~3.5 Ma, the tectonic activities were frequent, thus the septial river sand formed and the climate was dry/cold; the lithosphere of Lanzhou area began to become relatively depressed at 3.5 Ma and Wuquan conglomerate is a result of the phase A of Qinghai-Xizang movement.

Key words Lanzhou area; Late Tertiary; eolian deposits; paleoenvironment