

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0022

SHEN Manli, ZHANG Jun, HUI Zhengchuang. Quaternary climate evolution recorded by loess chromatic proxy in Xijin, Lanzhou[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(3):809-817. [沈曼丽, 张军, 惠争闯. 兰州西津黄土色度指标记录的第四纪气候演化[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3):809-817.]

## 兰州西津黄土色度指标记录的第四纪气候演化

沈曼丽<sup>1</sup>, 张 军<sup>1</sup>, 惠争闯<sup>2</sup>

(1. 兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475004)

**摘 要:** 为了更深入研究黄土高原西部地区第四纪气候演化历史, 选取已建立可靠年代的兰州黄河南岸西津黄土钻孔剖面为研究载体, 应用CM-700D型分光测色计对等间距取样的417个样品进行实验分析, 获得了过去2.2 Ma的兰州地区色度指标记录序列。结合剖面已有其他古气候代用指标, 与周边已有记录及全球深海氧同位素记录对比, 发现2.2 Ma以来兰州地区气候演化整体呈现阶段性逐渐冷干化趋势, 可能反映了全球第四纪气候长期变冷的影响。此外, 在1.24 Ma和0.43 Ma左右经历了两次重要气候事件, 1.24 Ma事件之后东亚冬季风和夏季风同时发生了增强, 与“昆黄运动”起始时间一致, 表明该事件可能受到了青藏高原隆升驱动; 而0.43 Ma事件则是对全球中布容气候转型事件(MBE)的响应。因而, 黄土高原西部地区第四纪气候演化可能受青藏高原隆升和全球变冷的双重调控, 二者对不同气候事件的影响不同。

**关键词:** 兰州; 西津黄土; 色度; 第四纪; 气候演化

**中图分类号:** P534.63; P941.74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)03-0809-09

### 0 引言

黄土作为陆地上保存较好的第四纪沉积记录载体, 蕴含着丰富的古气候信息, 与深海沉积记录、冰芯记录并称为古气候研究的三大支柱<sup>[1-4]</sup>。中国厚层黄土沉积在第四纪古气候研究领域有着先天的优势, 从20世纪80年代至今, 科学家们已在黄土堆积空间分布特征<sup>[2]</sup>、沉积地层年代<sup>[5]</sup>、黄土代用指标的气候记录及形成机制<sup>[6-9]</sup>、黄土成因<sup>[10-11]</sup>及其物源<sup>[12]</sup>等多方面取得一系列的重要成果。然而, 从整个黄土高原地区来看, 目前黄土高原东部地区在研究深度和广度上, 明显要高于黄土高原西部地区(六盘山以西)。在黄土高原东部地区, 前人已借助物理学、地球化学、生物学等多学科交叉研究手段<sup>[13-17]</sup>, 较完善地构建出了第四纪气候变化的框架; 而黄土高原西部地区, 虽已开展了一些磁化率、粒度、碳酸钙、地球化学等指标的环境变化研究<sup>[18-20]</sup>, 但重建的气候代用指标记录间尚存互相不匹配的问题, 如兰州西津第四纪黄土的粒度与磁化率之间<sup>[18]</sup>, 据此重

建出的古气候变化信息也就会存在一定的不确定性, 因而仍需加强黄土记录中其他代用指标的研究, 以期建立起可靠且系统的气候变化记录。

色度即对土壤颜色的度量, 其变化主要受控于气候因素对土壤性质的影响, 反映了土壤形成时的气候环境信息, 因而可作为古气候变化研究的良好替代指标<sup>[21-23]</sup>。色度包含亮度、红度和黄度三个分量, 三者具有不同的指示意义, 亮度主要受土壤中有机质和碳酸钙相对含量的影响, 其大小与有机质含量呈负相关关系, 与碳酸钙含量正相关, 与区域内的有效降水量关系密切<sup>[24-25]</sup>; 然而, 也有研究认为在碳酸钙含量低的情况下, 亮度与碳酸钙可能会负相关<sup>[26]</sup>, 在极端干旱区, 亮度甚至与有机质和碳酸钙的含量均不相关, 而是受控于红度和黄度分量<sup>[27]</sup>。红度和黄度主要受控于土壤中赤铁矿和针铁矿的含量变化, 反映了沉积物形成时期的水热组合情况, 赤铁矿主要形成于年平均温高、年平均降水量低, 干湿季分明的气候条件下, 而针铁矿则主

收稿日期: 2021-05-12; 修订日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771209; 41877445)资助

作者简介: 沈曼丽, 硕士研究生, 主要从事气候变化研究. E-mail: shenml19@lzu.edu.cn

通信作者: 张军, 副教授, 主要从事环境变化与地貌演化研究. E-mail: zj@lzu.edu.cn

要形成于年平均温度低、年降雨量高的环境<sup>[21,25,28-31]</sup>。这三者既可单独应用也可与其他指标结合使用,用以恢复冰期-间冰期旋回高分辨率气候变化<sup>[32]</sup>或夏季风演化<sup>[26,33]</sup>。如同环境磁学、粒度、碳酸钙等其他气候代用指标一样,色度指标作为一种常用的气候代用指标,在多种沉积物的古气候研究中已得到广泛应用<sup>[24,30,34-36]</sup>,表现出较好的可靠性和有效性。

为此,本文选用兰州西津黄土作为研究载体,首先通过分光测色计获取整个剖面的色度数据信息,再结合该剖面已有其他气候代用指标可靠性以及指标间的对比分析,系统地重建2.2 Ma以来黄土高原西部地区气候演化过程。

## 1 研究区概况

兰州地处青藏高寒区、西北内陆干旱区和东部季风区的过渡地带,市区位于狭长的黄河河谷中,

黄河自西南向东北贯穿全境,地势西南高东北低,境内大部分海拔1 450~2 500 m<sup>[37]</sup>(图1)。该地区第四系地层主要以黄土-古土壤序列沉积为主,其次发育有分布较广的黄河阶地河流砾石层和局地堆积的山麓相上五泉砾石沉积。兰州属典型的温带大陆性气候,夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥;据统计,兰州地区多年平均气温为9.7℃,年温差和日温差均较大,多年平均降水量为319 mm,降雨主要集中在夏季<sup>[38]</sup>,季节变化明显。在第四纪时期,该区的山地丘陵和河谷地带草原植被占优势,一些较高的山地则是森林和森林草原植被,建群种以云杉、冷杉等为主<sup>[39-40]</sup>。

## 2 样品采集与实验分析

### 2.1 样品采集

研究剖面位于兰州市黄河南岸西津村(36°01'1.1" N、103°44'50.8" E)(图1),获得总长

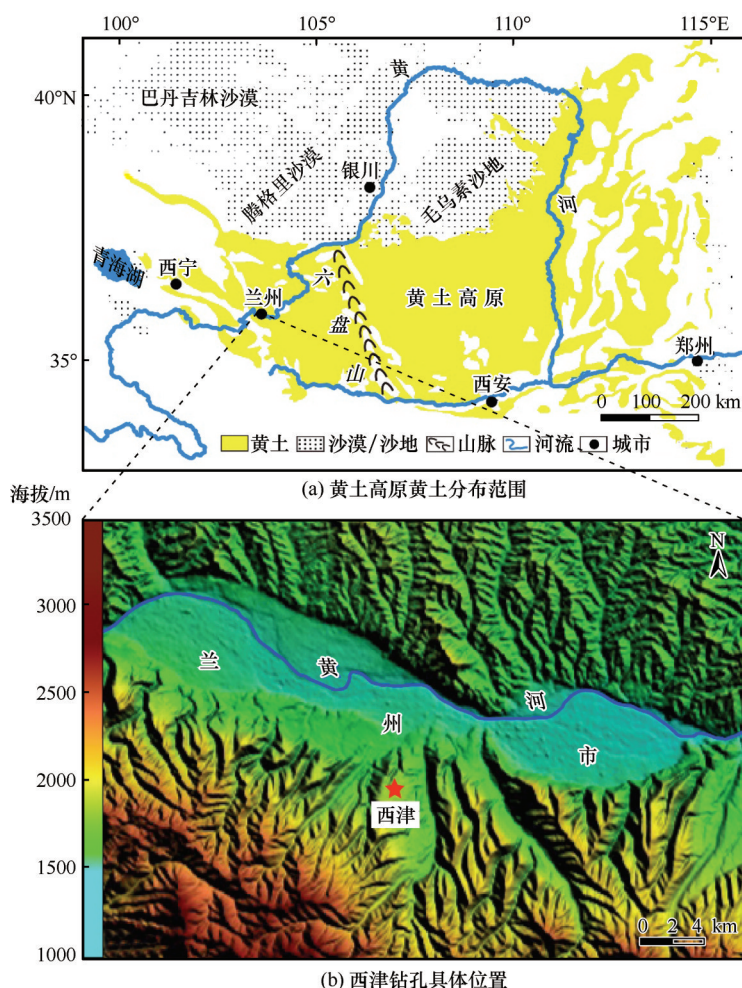


图1 兰州西津剖面位置图

Fig. 1 Location map of Xijin section, Lanzhou: distribution range of loess on the Chinese Loess Plateau (a), and location of Xijin core in Lanzhou (b)

416.2 m 的连续第四纪黄土地层岩芯样品,并通过磁性地层年代学手段,建立了 2.2 Ma 以来西津黄土钻孔的可靠年代序列<sup>[18]</sup>。为获得轨道尺度上连续的色度指标记录数据,本研究以 1 m 等间距对整个剖面进行了取样,总共获得 417 个色度指标样品。

## 2.2 实验分析

色度实验应用柯尼卡美能达公司生产的 CM-700D 型分光测色计进行了测量,整个测试过程在背景光源稳定的条件下完成。详细实验步骤如下:①将全部样品自然烘干后,研磨至 200 目以下。②在稳定光源条件下,使用零校正盒 CM-A182 对分光测色计进行仪器颜色系统的零位校准。③首先称取约 0.5 g 样品放在载玻片上压实、压平;然后将载玻片放在测色计自带的白色校正板上,移动载玻片,选择三个表面平整区域连续测试三次,分别得到三组  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  的数据结果;最后求得平均值。上述实验在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  体系是 1976 年由国际照明委员会 (Commission Internationale De L'Eclairage, CIE) 提出的一种均匀颜色描述体系,一般用来定量描述样品颜色的空间变化。 $L^*$  值代表亮度,变化介于 0~100 之间

(0 表示黑色,100 表示白色); $a^*$  值代表红度,变化于 -60~60 之间(-60 代表绿色,60 代表红色); $b^*$  值代表黄度,变化于 -60~60 之间(-60 代表蓝色,60 代表黄色)<sup>[33]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 西津黄土色度记录的气候演化总体趋势

通常  $L^*$  受控于土壤中的有机质和碳酸钙含量,与区域有效降水量密切相关<sup>[24-25]</sup>, $a^*$  和  $b^*$  则与土壤中的赤铁矿和针铁矿含量紧密相关,反映了沉积物形成时期的水热组合状况<sup>[25]</sup>。如图 2(a) 所示,西津黄土  $L^*$  值的变化范围为 71.86~81.39,平均值为 78.86,变化幅度 11.69%,其中黄土层  $L^*$  平均值为 79.63,古土壤层  $L^*$  平均值为 78.11;从整个序列来看, $L^*$  值具有高频变化特征,整体变化趋势不显著,但间冰期时段呈现自下而上变小趋势,变幅表现为阶段性增大。 $L^*$  指标揭示的气候变化整体趋势不显著,这可能与兰州的独特位置和半干旱区的湿度条件有关。由于兰州地区距离黄土物源区较近,相对于黄土高原东部地区来说,黄土中来自物源区的原生碳酸钙所占比重相对更大,而对  $L^*$  值影响较大的

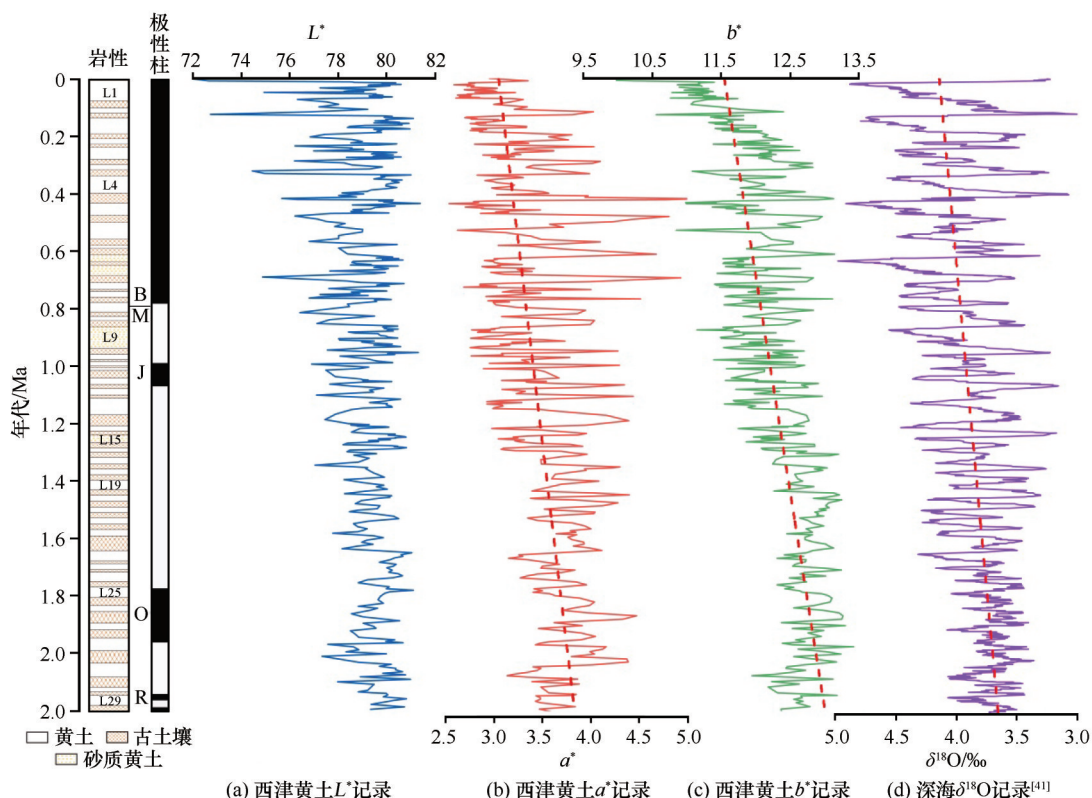


图2 西津黄土-古土壤序列色度记录随深度变化(红色虚线表示长期变化趋势)

Fig. 2 The chromatic records of Xijin loess-paleosol sequence with the depth:  $L^*$  for Xijin (a),  $a^*$  for Xijin (b),  $b^*$  for Xijin (c), and stacked deep-sea benthic foraminiferal  $\delta^{18}\text{O}$ <sup>[41]</sup> (d) (The red dotted line indicates the long-term change trend)

次生碳酸钙(气候作用下形成的)则相对较少;在第四纪时期全球持续降温的影响下[图2(d)],全球蒸发水汽减少,对于降水主要依靠季风水汽来源的兰州地区,在冰期时湿度条件进一步变差,气候变的更趋干旱,生成的次生碳酸钙更少,占比更低的次生碳酸钙组分对 $L^*$ 值影响微弱,同时冰期时植被发育较差,黄土层中含量极低的有机质对 $L^*$ 值影响甚微,从而导致 $L^*$ 指标无法敏感记录当时的气候变化。在间冰期时,气候条件相对暖湿,次生碳酸钙含量增加,同时植物生物量的增加也会引起土壤有机质含量升高,二者共同影响 $L^*$ 值大小。另外, $L^*$ 序列记录的整体间冰期阶段呈现一种逐渐变小趋势[图2(a)],这可能主要是由于土壤有机质含量的阶段性增加所致,研究已表明,兰州地区第四纪以来间冰期夏季风有阶段性增强的趋势<sup>[18]</sup>,较强夏季风会产生更多降水,使该区植被得到更好发育,从而提高了土壤中的有机质含量;同时,西津黄土 $\chi_{fd}\%$ 记录[图3(d)]也证实了湿度条件确实存在这种阶段性改善的趋势。

$a^*$ 值变化范围介于2.54~5.10之间,平均值为3.36,整体变幅超过50%,其中黄土层 $a^*$ 平均值为3.36,古土壤层 $a^*$ 平均值为3.90; $a^*$ 变化表现为自下而上变幅先变大后变小的特征,在S4中达到了最大值,呈现为自下而上分阶段趋于变小[图2(b)]。从 $b^*$ 记录的变化序列来看, $b^*$ 值变化介于9.22~14.26之间,平均值为12.41,整体变幅为35.4%,其中黄土层 $b^*$ 平均值为12.30,古土壤层 $b^*$ 平均值为12.51,相对于 $a^*$ 值变化而言,而 $b^*$ 的变幅则更小,但变化趋势却更为显著;然而, $b^*$ 值自下而上与 $a^*$ 具有相似的变化趋势[图2(c)],在整个剖面中不论是整体趋势还是阶段性变化特征,二者都具有较好的一致性,即随深度由底向顶均表现为显著阶段性变小的整体趋势,暗示二者的影响因子可能相似,且已有研究证实<sup>[27]</sup>, $a^*$ 和 $b^*$ 具有强相关性,共同受控于相似的环境因素。

已有研究认为, $a^*$ 和 $b^*$ 指标变化与土壤中的赤铁矿和针铁矿含量变化相关,反映了沉积物形成时期的水热组合条件<sup>[30]</sup>,西津黄土2.2 Ma以来的 $a^*$ 和 $b^*$ 整体长期减小的趋势,可能指示兰州黄土中受气候变化控制的赤铁矿和针铁矿含量日趋减小,揭示出这一地区水热条件阶段化趋于逐渐恶化的演化过程。基于兰州地区植被演替的研究成果<sup>[39]</sup>,第四纪以来兰州地区的植被类型经历了森林草原—草

原—疏林草原—草原—森林草原—草原和荒漠草原的演替过程,呈现出一种在波动中阶段性趋于总体变干的趋势,西津黄土 $a^*$ 和 $b^*$ 指标记录的减小趋势同植被变化一样,可能共同受到整个区域第四纪以来日趋冷干化的气候演变过程的调控。此外,通过色度指标与反映全球温度变化的深海氧同位素记录曲线[图2(d)]对比发现,二者具有较好的相似性趋势,说明兰州地区2.2 Ma以来的气候冷干化过程,正是全球第四纪变冷过程在这一地区构造尺度上的一致性响应的记录,来自陆地的孢粉<sup>[42-43]</sup>、磁化率和粒度<sup>[18]</sup>等记录证据同样揭示了这种相同的变化趋势。

### 3.2 西津黄土揭示的气候变化

不同地区的气候环境受到全球性和区域性因素的共同作用,存在对不同调控因素反映灵敏度之间的差异,但总体来看,不同指标对重大的气候事件反映一般具有较好的区域一致性和同步性。通过对西津黄土色度指标研究,并结合已有的磁化率和粒度资料<sup>[18]</sup>,本文研究表明,兰州地区2.2 Ma以来至少敏感地响应了1.24 Ma和0.43 Ma两次重要气候变化事件。

#### 3.2.1 1.24 Ma的气候变化事件

从 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 三个指标随时间变化[图3(a)~(c)]来看,西津黄土气候变化记录在1.24 Ma左右由相对低频低幅进入了高频高幅变化阶段,其中以 $a^*$ 曲线表现最为明显,在1.24~0.43 Ma阶段波动幅度达到48.46%。色度指标记录从1.24 Ma开始出现较大幅度波动,指示兰州地区气候演变的冰期—间冰期旋回强度显著增大,冰期气候变的更冷干,间冰期则更暖湿。这与 $\chi_{fd}\%$ 在1.24 Ma之后出现显著的高幅波动一致,表明夏季风此时已强烈影响兰州地区。同时,粒度指标冰期—间冰期尺度变幅在1.2 Ma也有所增大,但粒度的这种高幅波动却从2.2 Ma以来一直存在<sup>[18]</sup>。通常 $\chi_{fd}\%$ 和色度指标主要反映夏季风变化<sup>[2,24,44]</sup>,从整个西津黄土记录序列演变分析(图3),色度相对于粒度,与 $\chi_{fd}\%$ 记录的阶段耦合性更优。而黄土粒度指标则主要用于反映冬季风的变化<sup>[2]</sup>,粒度信号自2.2 Ma以来变幅一直较显著<sup>[18]</sup>,指示此前强盛的冬季风已影响兰州地区,这与黄土高原东部地区研究结果一致<sup>[2,46]</sup>。更值得注意的是,上述这三个指标在1.24 Ma均出现变幅的明显增大,揭示出黄土高原西部地区冬、夏季风在此时发生同步增强。同样,来自黄土高原东

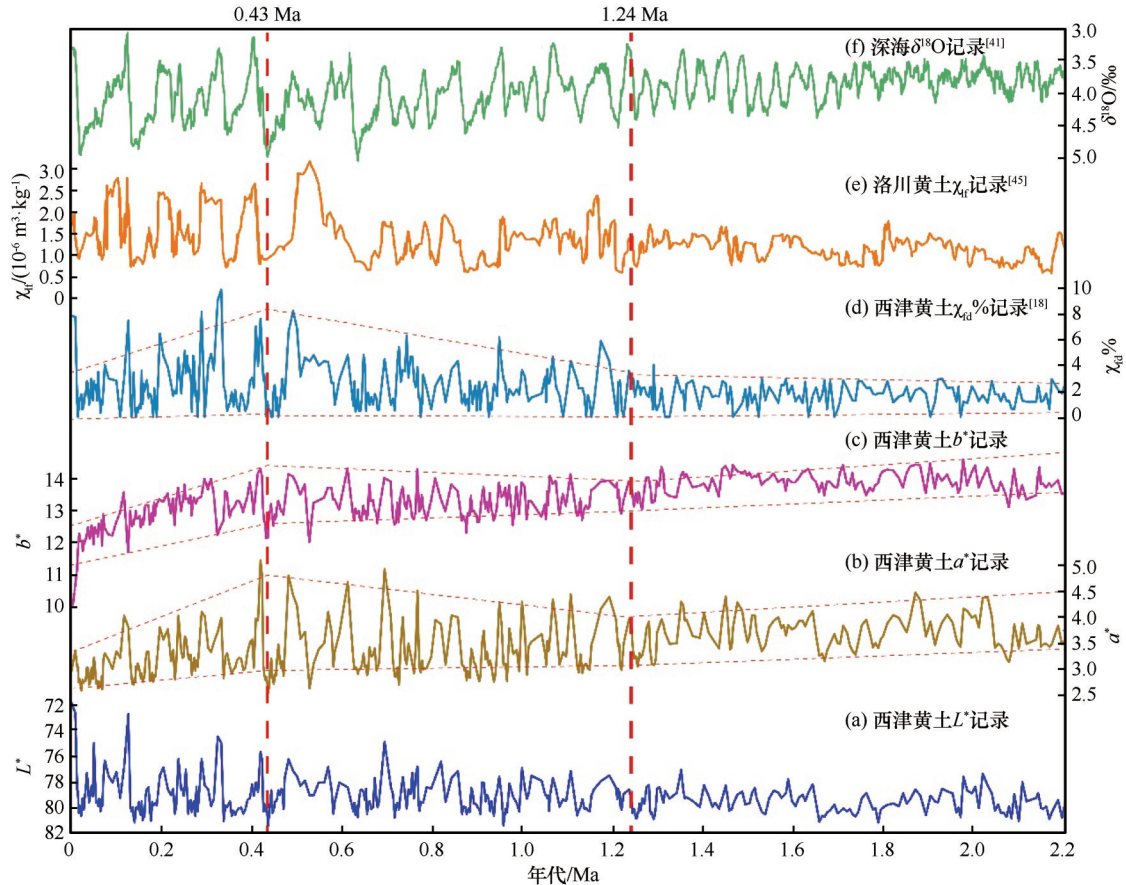


图3 西津黄土-古土壤序列色度及 $\chi_{fd}\%$ 与洛川黄土低频磁化率和深海氧同位素记录的比较

Fig. 3 Comparison of chroma and percentage frequency-dependent magnetic susceptibility record of Xijin loess-paleosol sequence with low-frequency magnetic susceptibility of Luochuan loess and stacked deep-sea  $\delta^{18}\text{O}$  records:

$L^*$  for Xijin (a),  $a^*$  for Xijin (b),  $b^*$  for Xijin (c),  $\chi_{fd}\%$  for Xijin<sup>[18]</sup> (d),  $\chi_{lf}$  for Luochuan<sup>[45]</sup> (e), and stacked deep-sea benthic foraminiferal  $\delta^{18}\text{O}$ <sup>[41]</sup> (f)

部地区洛川剖面的低频磁化率变化曲线<sup>[45]</sup> [图3 (e)],也在约1.24 Ma同时出现了从低振幅到高振幅的阶段演变特征,清楚地记录了这次重要转型事件。但是,这次气候转型事件在全球深海氧同位素变化记录中却并不显著,因此,该事件可能指示的是相对区域性的气候演变特征。

黄土高原西部地区作为独特的区域性地理单元,其气候变化主要受到东亚季风的调控<sup>[18,44,47-48]</sup>,而研究表明东亚季风的演变又受到青藏高原阶段性隆升的影响<sup>[49-52]</sup>,因而,黄土高原东部和西部地区季风在1.24 Ma左右同时增强,可能受到毗邻的青藏高原强烈隆升的影响,而且这次隆升事件得到了大量证据支持。研究<sup>[53-54]</sup>证实,在1.2 Ma左右,昆仑山抬升,黄河切穿积石峡,青藏高原进一步隆起,昆黄运动开始,使青藏高原海拔高度达到3 000 m以上。昆仑山垭口地区地貌、构造、沉积相、地层及古生物组合等多种资料的研究发现,同样在1.1~

1.2 Ma青藏高原开始发生强烈的构造隆升,这次构造活动结束后当地海拔上升了约1 500 m<sup>[55-56]</sup>。而来自青藏高原东北缘东昆仑地区研究<sup>[57-58]</sup>证实,正是始于1.2 Ma的昆黄运动使得该区地形差异升降加剧,且形成了粗粒径的冲洪积相砾石层沉积,并最终导致了两山相隔水系和盆岭相间的地貌格局形成。另外,柴达木盆地第四纪环境演变、构造变形与青藏高原隆升关系的研究同样揭示出,在1.38~1.1 Ma之间盆地经历了一次强烈的构造隆升<sup>[59]</sup>。此外,因河流阶地被认为是构造抬升的直接证据,根据化隆盆地<sup>[60]</sup>、兰州盆地<sup>[61]</sup>、渭河上游三阳川盆地<sup>[62]</sup>、湟水河谷<sup>[63]</sup>等高原东北部地区河流阶地研究也发现,普遍在1.2 Ma发育了一级典型的河流阶地,共同记录了青藏高原这次强烈隆升事件。而当青藏高原隆升到一定高度后,会导致海陆热力性质差异增大,引起东亚地区的气压场和季风系统加强,使东亚冬、夏季风同时增强;同时,高原隆升所

产生的地形效应也会加强内陆的干旱化,使西北干旱-半干旱区的干旱化加剧。

### 3.2.2 中布容气候事件

通过兰州西津黄土色度与  $\chi_{fd}\%$  曲线对比(图3),发现黄土高原西部地区除了 1.24 Ma 记录的气候事件外,在 0.43 Ma 左右  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  均同时开始出现 2.2 Ma 以来最显著的减小趋势,这一趋势在  $a^*$  和  $b^*$  指标中表现尤为显著,且在  $\chi_{fd}\%$  记录[图3(d)]中也有突出反映。在 0.43 Ma 之后,通过西津黄土的  $a^*$ 、 $b^*$  及  $\chi_{fd}\%$  与深海氧同位素记录的对比分析发现,在第四纪全球持续降温的背景下,西津黄土这三个记录指标共同揭示了一个显著的冷干化演化过程。因此,在 0.43 Ma 的这次事件是黄土高原西部兰州地区经历的一次重要的气候转型事件。

同样,在六盘山以西黄土高原西部地区的靖远黄土剖面,也同样记录这次发生在 0.43 Ma 左右的重要气候事件,此后同样揭示了黄土高原西部地区进一步干旱化的趋势<sup>[64]</sup>。另外,来自六盘山以东洛川剖面和灵台剖面的研究表明<sup>[45,65]</sup>,黄土高原东部地区第四纪气候演变序列中也记录了 0.43 Ma 的这次气候事件,但其后的冷干化趋势却没有黄土高原西部地区显著。最近,通过黄土高原地区多个剖面的最新研究进一步表明,在 0.43 Ma 左右发生的这次事件,在整个黄土高原地区甚至全球均具有同步性<sup>[66]</sup>。从全球范围来看,底栖有孔虫氧同位素<sup>[67-68]</sup>、海表温度和粉尘<sup>[69]</sup>等研究记录中,都发现了这次 0.43 Ma 的中布容事件(The Mid-Brunhes Event, MBE),因而,黄土高原西部兰州地区西津黄土剖面、黄土高原东部洛川和灵台黄土剖面的记录,正是中国黄土高原的不同区域,对这次全球范围内广泛发生的中布容事件的同步响应。

通过上述 1.24 Ma 和 0.43 Ma 的两次气候事件分析表明,黄土高原西部地区第四纪气候演变,不仅受到了青藏高原第四纪构造隆升过程的影响,而也会受到全球尺度气候变化的调控。

## 4 结论

本文通过对已建立可靠年代序列的兰州西津黄土钻孔剖面,进行取样实验分析,获得了兰州地区自 2.2 Ma 以来的黄土-古土壤沉积序列的色度指标记录,结合该剖面的  $\chi_{fd}\%$  记录和其他相关气候记录,初步得出以下几点结论:

(1)自 2.2 Ma 以来,兰州地区气候演化整体呈

现出一种阶段性逐渐冷干化的趋势,与第四纪全球持续降温有关。

(2)相较粒度,色度与  $\chi_{fd}\%$  在整个剖面的阶段性耦合性更好。黄土高原西部地区第四纪时期在 1.24 Ma 和 0.43 Ma 发生过两次重要气候事件。

(3)1.24 Ma 事件后东亚冬季风和夏季风同时增强,可能由青藏高原隆升驱动;而 0.43 Ma 事件则是对全球中布容气候转型事件(MBE)的响应,还揭示出其后发生了一个显著且持续冷干化的气候演化阶段。因而,黄土高原西部地区第四纪气候演变可能受青藏高原隆升和全球变冷的双重调控,二者对不同气候事件的影响不同。

谨以此文,纪念李吉均院士!

**致谢:**感谢兰州大学资源环境学院张延广和李想在实验方面的帮助。

### 参考文献(References):

- [1] Li Jijun, Kang Jiancheng. Quaternary glaciations, physiographic stages and loess record in China [J]. Quaternary Sciences, 1989(3): 269-278. [李吉均, 康建成. 中国第四纪冰期、地文期和黄土记录[J]. 第四纪研究, 1989(3): 269-278.]
- [2] Liu Dongsheng. The loess and environment [M]. Beijing: Science Press, 1985. [刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [3] Chai Yucheng, Tian Xingyou, Ma Fuchen. The role of past global changes (PAGES) research in China in the international academic community [J]. Science Foundation in China, 1998(2): 134-136. [柴育成, 田兴有, 马福臣. 居世界前列的我国“过去全球变化”研究[J]. 中国科学基金, 1998(2): 134-136.]
- [4] Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxin, et al. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(2): 193-209. [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.]
- [5] An Zhisheng, Kukla G, Liu Dongsheng. Loess stratigraphy in Luochuan of China [J]. Quaternary Sciences, 1989(2): 155-168. [安芷生, Kukla G, 刘东生. 洛川黄土地层学[J]. 第四纪研究, 1989(2): 155-168.]
- [6] Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau [J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 1998, 28(3): 278-283. [鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 1998, 28(3): 278-283.]
- [7] Sun Y B, An Z S, Clemens S C, et al. Seven million years of wind and precipitation variability on the Chinese Loess Plateau [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 297 (3/4): 525-535.
- [8] Sun Y B, Ma L, Blomendal J, et al. Miocene climate change on the Chinese Loess Plateau: possible links to the growth of the northern Tibetan Plateau and global cooling [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, 16(7): 2097-2108.
- [9] Song Y G, Fang X M, King J W, et al. Magnetic parameter variations in the Chaona loess/paleosol sequences in the central

- Chinese Loess Plateau, and their significance for the middle Pleistocene climate transition[J]. *Quaternary Research*, 2014, 81(3): 433-444.
- [10] Zhao Jingbo. The essence and formation model of the loess[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 198-204. [赵景波. 黄土的本质与形成模式[J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 198-204.]
- [11] Sun Jianzhong. On the genesis of the loess in China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1980(2): 194-200. [孙建中. 黄土成因问题的探讨[J]. *地质科学*, 1980(2): 194-200.]
- [12] Ji Junfeng, Chen Jun, Wang Hongtao, et al. Crystallinity of illite from the Luochuan loess-paleosol sequence, Shaanxi Province: Indicators Origin and paleoclimate of loess[J]. *Geological Review*, 1997, 43(2): 181-185. [季峻峰, 陈骏, 王洪涛, 等. 陕西洛川黄土-古土壤剖面中伊利石结晶度: 黄土物质来源和古气候环境的指示[J]. *地质论评*, 1997, 43(2): 181-185.]
- [13] Ji Junfeng, Chen Jun, Balsam W, et al. Quantitative analysis of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequences and its implication for dry and humid variability[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 221-229. [季峻峰, 陈骏, Balsam W, 等. 黄土剖面中赤铁矿和针铁矿的定量分析与气候干湿变化研究[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(2): 221-229.]
- [14] Ning Youfeng. Reviews on the quantitatively reconstructing paleoclimate and paleovegetation based on carbon isotope of soil organic matter on Chinese Loess Plateau[J]. *Geological Review*, 2010, 56(6): 851-857. [宁有丰. 黄土有机碳同位素与古气候植被定量化研究进展[J]. *地质论评*, 2010, 56(6): 851-857.]
- [15] Liu Hu, Liu Weiguo. Relationship of plant leaf wax *n*-alkanes molecular distribution characteristics and vegetation types[J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(3): 38-49. [刘虎, 刘卫国. 植物叶蜡正构烷烃分子分布特征与植被类型的关系[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(3): 38-49.]
- [16] Tian Shaohua, Xiao Guoqiao, Yang Huan. Application of Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraether lipids in paleoenvironment reconstruction of loess deposits: a review of recent progresses[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(5): 465-477. [田少华, 肖国桥, 杨欢. GDGTs在黄土古环境重建中的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(5): 465-477.]
- [17] Wang Haibin, Chen Fahu, Zhang Jiawu. Environmental significance of grain size of loess-paleosol sequence in western part of Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(1): 21-26. [汪海斌, 陈发虎, 张家武. 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 21-26.]
- [18] 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.
- [19] Liu Xiuming, Mao Xuegang, Ding Zhongli, et al. Study on the relation between loess paleoclimate trend and uplift of Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 988-999. [刘秀铭, 毛学刚, 丁仲礼, 等. 黄土古气候变化趋势与青藏高原隆升关系初探[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(5): 988-999.]
- [20] Wang Yang, Liu Xingxing, Li Zaijun, et al. Major elemental compositions of Tertiary sediments in Lanzhou Basin and their paleoenvironment implication[J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, 7(4): 393-404. [王扬, 刘星星, 李再军, 等. 兰州盆地第三纪沉积物常量元素变化及其古环境意义[J]. *地球环境学报*, 2016, 7(4): 393-404.]
- [21] Yang Shengli, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. Studies on the qualitative and semi-quantitative relationship research between the topsoil color and climate[J]. *Science in China: Series D*, 2001, 31(Suppl 1): 175-181. [杨胜利, 方小敏, 李吉均, 等. 表土颜色和气候定性至半定量关系研究[J]. *中国科学: D辑*, 2001, 31(增刊1): 175-181.]
- [22] Liu Liyun, Lu Ruijie, Liu Xiaokang. Climate change in the Mu Us Desert since Holocene based on soil chromaticity[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(6): 83-89. [刘荔昀, 鲁瑞洁, 刘小楝. 风成沉积物色度记录的毛乌素沙漠全新世以来气候变化[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 83-89.]
- [23] 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. [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.]
- [24] Sun Y B, Liu H, Liang L J, et al. Changing color of Chinese loess: geochemical constraint and paleoclimatic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(6): 1131-1138.
- [25] Wang Qiansuo, Song Yougui, Li Jijun, et al. Characteristics of color in Chaona section and its paleo climatic significance during the last glacial-interglacial cycle[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(11): 1489-1494. [王千锁, 宋友桂, 李吉均, 等. 末次冰期-间冰期旋回朝那黄土颜色特征及古气候意义[J]. *地理科学*, 2015, 35(11): 1489-1494.]
- [26] Ding Z Y, Lu R J, Wang L D, et al. Early-mid Holocene climatic changes inferred from colors of eolian deposits in the Mu Us Desert[J]. *Geoderma*, 2021, 401: 115172.
- [27] Chen Jie, Yang Taibao, Zeng Biao, et al. Chroma characteristics and its paleoclimatic significance in Pamir loess section, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(2): 122-131. [陈杰, 杨太保, 曾彪, 等. 中国帕米尔地区黄土上部色度变化特征及古气候意义[J]. *沉积学报*, 2018, 36(2): 122-131.]
- [28] Cheng Yu, Qiao Yansong, Liu Zongxiu, et al. Magnetostratigraphy and chroma records of a red clay formation near Lingtai County of Gansu Province[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(2): 391-398. [程瑜, 乔彦松, 刘宗秀, 等. 甘肃灵台县邵寨红黏土的磁性地层及其色度记录[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(2): 391-398.]
- [29] Gao X, Hao Q, Luo W, et al. The different climatic response of pedogenic hematite and ferrimagnetic minerals: evidence from particle-sized modern soils over the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 179: 69-86.
- [30] He Liu, Sun Youbin, An Zhisheng. Changing color of Chinese loess: controlling factors and paleoclimatic significances[J]. *Geochimica*, 2010, 39(5): 447-455. [何柳, 孙有斌, 安芷生. 中国黄土颜色变化的控制因素和古气候意义[J]. *地球化学*, 2010, 39(5): 447-455.]
- [31] Shi Peihong, Yang Taibao, Tian Qingchun, et al. Chroma characteristics in the loess-paleosol at Jingyuan section and its signification to paleoclimate[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, 48(2): 15-23. [石培宏, 杨太保, 田庆春, 等. 靖远黄土-古土壤色度变化特征分析及古气候意义[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(2): 15-23.]
- [32] Wang Q S. Color characteristics of Chinese loess and its paleoclimatic significance during the last glacial-interglacial cycle[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 116: 132-138.
- [33] Hu Mengjun, Li Nana, Zhang Yayun, et al. Variation characteristics of chromaticity parameters and environmental evolution

- of aeolian sand-paleosol sequence in Qinghai Lake during the past 32 ka [J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40 (5): 1105-1117. [胡梦珺, 李娜娜, 张亚云, 等. 近 32 ka 以来青海湖古风成砂-古土壤序列色度参数变化特征及环境演变[J]. 第四纪研究, 2020, 40(5): 1105-1117.]
- [34] Li Yang, Fang Jing, Pan Long, et al. Application of sediment chromaticity in paleo-environment reconstruction [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(6): 24-29. [李杨, 方晶, 潘隆, 等. 沉积物色度在古环境重建中的应用[J]. 气象科技进展, 2018, 8(6): 24-29.]
- [35] Ding Min, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Chroma characteristics and its climatic significance in Holocene loess-paleosol sequence: a case study of the Holocene Liangcun profile in the western Guanzhong Basin [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2003, 38 (5): 92-97. [丁敏, 庞奖励, 黄春长, 等. 全新世黄土-古土壤序列色度特征及气候意义: 以关中平原西部梁村剖面为例[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2003, 38(5): 92-97.]
- [36] Chen J, Ji J F, Balsam W, et al. Characterization of the Chinese loess-paleosol stratigraphy by whiteness measurement [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 183(3/4): 287-297.
- [37] Lanzhou Compilation Committee of the Chorography, Lanzhou Compilation Committee of Natural Geography Chorography. *Lanzhou chorography 2: natural geography chorography* [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1998. [兰州市地方志编纂委员会, 兰州市自然地理志编纂委员会. 兰州市志第 2 卷: 自然地理志[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1998.]
- [38] China Weather Network. Introduction to Lanzhou City [EB/OL]. [2021-06-10]. <http://www.weather.com.cn/cityintro/101160101.shtml>. [中国天气网. 兰州城市介绍[EB/OL]. [2021-06-10]. <http://www.weather.com.cn/cityintro/101160101.shtml>]
- [39] Ju Tianzhen, Zhu Yan, Chen Xuelin, et al. The historical succession of vegetations in Lanzhou [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1997, 17(6): 62-66. [巨天珍, 朱艳, 陈学林, 等. 兰州地区植被的历史演替[J]. 西北植物学报, 1997, 17(6): 62-66.]
- [40] Wei Ying, Dai Lilan. Vegetation and environment in Lanzhou [J]. *Forestry of China*, 2010(1): 55. [魏瑛, 代立兰. 兰州的植被与环境[J]. 中国林业, 2010(1): 55.]
- [41] Zachos J. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686-693.
- [42] Han Jian'en, Yu Jia, Zhu Dagang, et al. The sedimentary and environmental evolution on Yellow River source area during late Cenozoic era [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30 (12): 1941-1949. [韩建恩, 余佳, 朱大岗, 等. 黄河源区晚新生代沉积与环境演化研究[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1941-1949.]
- [43] Wu Fuli, Fang Xiaomin, Ma Yuzhen, et al. A 1.5 Ma pollen record of paleoecologic environment evolution in the central Chinese Loess Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (3): 295-302. [吴福莉, 方小敏, 马玉贞, 等. 黄土高原中部 1.5 Ma 以来古生态环境演化的孢粉记录[J]. 科学通报, 2004, 49(3): 295-302.]
- [44] Chen F H, Bloemendal J, Feng Z D, et al. East Asian monsoon variations during oxygen isotope stage 5: evidence from the northwestern margin of the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(8/9): 1127-1135.
- [45] Bloemendal J, Liu X. Rock magnetism and geochemistry of two plio-pleistocene Chinese loess-paleosol sequences: implications for quantitative palaeoprecipitation reconstruction [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 226(1/2): 149-166.
- [46] Liu Dongsheng. *Loess and arid environment* [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2009. [刘东生. 黄土与干旱环境[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2009.]
- [47] Fang X M, Ono Y, Fukusawa H, et al. Asian summer monsoon instability during the past 60000 years: magnetic susceptibility and pedogenic evidence from the western Chinese Loess Plateau [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1999, 168 (3/4): 219-232.
- [48] Sun Y B, Chen J, Clemens S C, et al. East Asian monsoon variability over the last seven glacial cycles recorded by a loess sequence from the northwestern Chinese Loess Plateau [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(12): 1-16.
- [49] An Z S, John E K, Warren L P, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since late Miocene times [J]. *Nature*, 2001, 411(6833): 62-66.
- [50] An Zhisheng, Zhang Peizhen, Wang Erqi, et al. 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. [安芷生, 张培震, 王二七, 等. 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.]
- [51] Kutzbach J E, Prell W L, Ruddiman W F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101: 177-190.
- [52] Li J J, Fang L X. Uplift of the Tibetan Plateau and environmental changes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (23): 2117-2124.
- [53] Li Jijun, Wen Shixuan, Zhang Qingsong, et al. Discussion on time, range and forms of the rise of the Tibetan Plateau [J]. *Science in China*, 1979(6): 608-616. [李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨[J]. 中国科学, 1979(6): 608-616.]
- [54] Li Jijun. *The uplift of the Tibetan Plateau and Asian environment evolution* [M]. Beijing: Science Press, 2006. [李吉均. 青藏高原隆升与亚洲环境演变[M]. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [55] Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian, et al. On Kunlun-Yellow River tectonic movement [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 1998, 41(6): 592-600. [崔之久, 伍永秋, 刘耕年, 等. 关于“昆仑-黄河运动”[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 1998, 28(1): 53-59.]
- [56] Song C H, Gao D L, Fang X M, et al. Late Cenozoic high-resolution magnetostratigraphy in the Kunlun Pass Basin and its implications for the uplift of the northern Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(17): 1912-1922.
- [57] Xiang Shuyuan, Wang Guocan, Deng Zhonglin. Deposit response to important tectonic events of Cenozoic plateau uplift, east segment of eastern Kunkun Mountains [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(6): 615-620. [向树元, 王国灿, 邓中林. 东昆仑东段新生代高原隆升重大事件的沉积响应[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(6): 615-620.]
- [58] Wang An, Wang Guocan, Xiang Shuyuan. Characteristics of river terraces in north slope of eastern Kunlun Mountains and their relationship with plateau uplift [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28 (6): 675-678. [王岸, 王国灿, 向树元. 东昆仑山东段北坡河流阶地发育及其与构造隆升的关系[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(6): 675-678.]

- [59] Zhu Xiaomin, Kang An, Han Dexin, et al. Relation among Quaternary environmental evolution, tectonic deformation in the Qaidam Basin and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(3): 413-424. [朱筱敏, 康安, 韩德馨, 等. 柴达木盆地第四纪环境演变、构造变形与青藏高原隆升的关系[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 413-424.]
- [60] Pan Baotian, Li Jijun. Study on the geomorphic evolution and development of the Yellow River in the Hualong Basin [J]. Mountain Research, 1996, 14(3): 153-158. [潘保田, 李吉均. 化隆盆地地貌演化与黄河发育研究[J]. 山地研究, 1996, 14(3): 153-158.]
- [61] Pan B T, Su H, Hu Z B, et al. Evaluating the role of climate and tectonics during non-steady incision of the Yellow River: evidence from a 1.24 Ma terrace record near Lanzhou, China [J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(27/28): 3281-3290.
- [62] Gao H S, Li Z M, Liu X M, et al. Fluvial terraces and their implications for Weihe River valley evolution in the Sanyangchuan Basin [J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 60(3): 413-427.
- [63] Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou, et al. Geomorphologic 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. [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[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 39(4): 380-390.]
- [64] Meng X Q, Liu L W, Miao X D, et al. Significant influence of Northern Hemisphere high latitude climate on appeared precession rhythm of East Asian summer monsoon after Mid-Brunhes Transition interglacials recorded in the Chinese loess [J]. Cate-na, 2021, 197: 105002.
- [65] 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 [J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(1/2): 33-48.
- [66] Xu X W, Qiang X Q, Hu S, et al. Records of the Mid-Brunhes Event in Chinese loess-paleosol sequences [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2020, 543: 109596.
- [67] Huang H-H M, Yasuhara M, Iwatani H, et al. Deep-sea ostracod faunal dynamics in a marginal sea: biotic response to oxygen variability and mid-Pleistocene global changes [J]. Paleobiology, 2019, 45: 85-97.
- [68] Crundwell M, Scotta G, Naish T, et al. Glacial-interglacial ocean climate variability from planktonic foraminifera during the Mid-Pleistocene transition in the temperate Southwest Pacific, ODP Site 1123 [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 260(1/2): 202-229.
- [69] Barth A C, Clark P, Bill N S, et al. Climate evolution across the Mid-Brunhes Transition [J]. Climate of the Past, 2018, 14: 2071-2087.

## Quaternary climate evolution recorded by loess chromatic proxy in Xijin, Lanzhou

SHEN Manli<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, HUI Zhengchuang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

**Abstract:** The chronology of Xijin loess section on the southern bank of the Yellow River in Lanzhou Basin was already founded reliably, thus, which was selected as a carrier to deeply study the Quaternary climatic evolution in the western Chinese Loess Plateau. The 417 samples at the same intervals were measured with a Minolta CM-700D spectrophotometer, and the record sequence of chromatic proxy in the Xijin section was obtained since 2.2 Ma ago. The results show that the climate evolution has undergone an overall trend of gradually drying and cooling since 2.2 Ma, with the published records of other paleoclimate proxies, the surrounding area and global stacked deep-sea  $\delta^{18}\text{O}$ , and which may indicate the impact of the global climate cooling during the Quaternary. Moreover, two significant climatic events were also found at about 1.24 Ma and 0.43 Ma. The winter and summer monsoons were synchronously strengthened after the event at 1.24 Ma, which was consistent with the beginning time of Kun-Huang Movement. This event may be driven by the uplift of the Tibetan Plateau. However, the event at 0.43 Ma in Lanzhou area is sensitively responsible for the global Mid-Brunhes Event (MBE). It is also shown that Quaternary climate evolution in Lanzhou area may have been regulated by both the uplift of the Tibetan Plateau and global cooling, and both impacts to different climate events may be different.

**Key words:** Lanzhou; Xijin loess; chroma; Quaternary; climate evolution

(责任编辑: 王杰; 编辑: 武俊杰)