

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.278>



黄土高原东部(山西阳曲)1.2 Ma 以来黄土记录的两次显著干旱化事件

毛永栋¹, 王治祥^{2*}, 庞志斌¹

1. 山西省地质调查院, 山西太原 030000
2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 重建第四纪时期亚洲内陆干旱过程和沙漠的扩张历史对于我们了解东亚冬季风演变具有重要意义。然而目前对于黄土高原的干旱过程的研究主要聚焦于吕梁山以西的黄土地区, 对于其东部还缺乏相应研究。为此, 我们对吕梁山东部约 1.2 Ma 以来的阳曲黄土剖面进行了磁化率和元素含量测试, 结果显示阳曲地区在 1.2 Ma 以来经历了两次明显的干旱事件。第一次干旱化事件发生在 0.94 Ma, 表现为 Si、Fe 百分含量和 Rb/Sr 比值显著减小而 Ca 含量明显增加, 这次事件可能主要与大气 CO₂ 浓度下降导致全球冰量增加, 特别是北半球冰盖扩张相关。第二次事件发生在 0.31 Ma 左右, Rb/Sr 比值显著下降, Ca 含量显著增高, 这次事件可能是由于忻定古湖裂解引起区域干旱增强所致。

关键词: 黄土高原; 阳曲; 元素变化; 干旱化; 古气候学。

中图分类号: P532

文章编号: 1000-2383(2021)01-272-09

收稿日期: 2019-11-14

Two Significant Stages in the Aridification of the Eastern Chinese Loess Plateau since 1.2 Ma

Mao Yongdong¹, Wang Zhixiang^{2*}, Pang Zhibin¹

1. Shanxi Geological Survey Institute, Taiyuan 030000, China
2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Reconstruction of the progressive drying and expansion of deserts in eastern Asia during the Quaternary period is important for understanding the evolution of East Asian winter monsoon. The eolian deposits preserved in the Chinese Loess Plateau (CLP) are an unparalleled record of major wet/dry oscillations superimposed on the general drying trend of the Gobi and other nearby deserts of inland Asia. The element concentrations of these loess deposits in the Yangqu section in the eastern Loess Plateau indicate two major stages in the general aridification since 1.2 Ma. The first major step in aridification occurred at 0.94 Ma as indicated by an abrupt decrease of Si, Fe and Rb/Sr proportions and a significant increase of Ca content. We consider that the dominant factor for this drying step in eastern Loess Plateau was the increase of global ice volume, especially of Northern Hemisphere ice sheets, which force the Intertropical Convergence Zone to shift southward and inhibit the northward movement of moisture monsoon airflows. The second stage toward present aridification occurred at about 0.31 Ma. This step may be a localized regional event, perhaps attributed to the breach of Xin-Ding paleolake.

Key words: Loess Plateau; Yangqu; oxygen isotopic composition; aridification; paleoclimatology.

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(No. 12120113059300); 国家自然科学基金(No. 41322013).

作者简介: 毛永栋(1983-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事地质矿产和区域地质调查等研究。ORCID: 0000-0003-4850-1413. E-mail: mmmmyydd@163.com

***通讯作者:** 王治祥, ORCID: 0000-0001-8640-2761. E-mail: wangzhi8905@126.com

引用格式: 毛永栋, 王治祥, 庞志斌, 2021. 黄土高原东部(山西阳曲)1.2 Ma 以来黄土记录的两次显著干旱化事件. 地球科学, 46(1):272-280.

黄土高原新近纪以来堆积了较为连续的风尘沉积物,沉积序列从老到新依次为中新世风成红土、上新世三趾马红粘土及第四纪黄土,这些沉积物为研究新近纪气候变化提供了一个重要陆相记录(An *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2002). 现今总体认为,粒度相对粗的黄土层是在冰期时期沉积的,而互层的细颗粒古土壤层形成于温暖的间冰期时期(Chen *et al.*, 2001; 孙有斌和安芷生, 2002). 黄土—古土壤序列不仅记录了东亚夏季风和冬季风的强度变化及沙漠的进退幅度的演变(An *et al.*, 2001; Ding *et al.*, 2005),同时也响应了北半球冰量的变化(Ding *et al.*, 2002; Hao *et al.*, 2012).

众多保存在黄土中的古气候替代指标常用于解译亚洲内陆沙漠的扩展和气候变迁. 磁化率和粒度分别用于指示夏季风和冬季风强度变化(Sun *et al.*, 2010; Hao *et al.*, 2012). 古土壤层中磁化率相对较高,指示了较强的氧化和后期成壤作用;黄土层磁化率值相对较低,反映了增强的冬季风强度(曾方明等, 2007; Sun *et al.*, 2010). 黄土中的地球化学元素常用于指示化学风化的水平(Yang *et al.*, 2006). 黄土中保存的孢粉常用于重建黄土高原新近纪以来植被类型演替以及气候干湿变化(Wu *et al.*, 2007, 2013).

先前对于黄土高原干旱化研究主要集中在吕梁山以西的黄土地区,并取得了一些进展. 基于黄土高原黄土—沙漠过度地带中过去3.5 Ma以来持

续的沙含量记录, Ding *et al.* (2005)认为毛乌素沙漠在2.6、1.2、0.7和0.2 Ma向南扩展,夏季风雨带向南退缩. 通过对黄土高原中部灵台剖面红粘土—黄土序列的矿物研究,显示0.5 Ma以来,物源区干旱化增强,引起黄土中伊利石含量减少而绿泥石和斜长石含量增加(Gylesjö and Arnold, 2006). 对黄土高原中部朝那地区孢粉记录研究,显示在2.60~0.95 Ma期间朝那地区植被类型由广阔的草原转变成森林或森林—草原混合的植被类型;0.95~0.50 Ma以开放的森林草原混合类型为主导;0.50 Ma之后转变成草原植被类型(Wu *et al.*, 2007). Sun *et al.* (2012)对黄土高原南部蓝田地区黄土剖面2.6 Ma以来有机质和全岩碳酸盐高分辨率碳同位素进行分析,显示黄土高原C₄植物在~1.60 Ma和~0.43 Ma发生显著扩张,这两次扩张与区域干旱化及季节性降雨增强相关. 黄土高原中部岩石磁学参数(Deng *et al.*, 2006)和地球化学组成(Chen *et al.*, 2001)同样显示了黄土高原第四纪以来干旱化增强的趋势.

然而,目前这些研究主要集中在吕梁山西部地区,而对于吕梁山东部黄土沉积还缺乏相关研究. 为了进一步解译黄土高原在更新世期间的干旱化模式,我们对吕梁山东部阳曲地区保存相对完整的黄土进行了磁化率和地球化学元素的测试,我们的结果显示黄土高原东部在1.2 Ma以来经历了两次明显的干旱化事件.

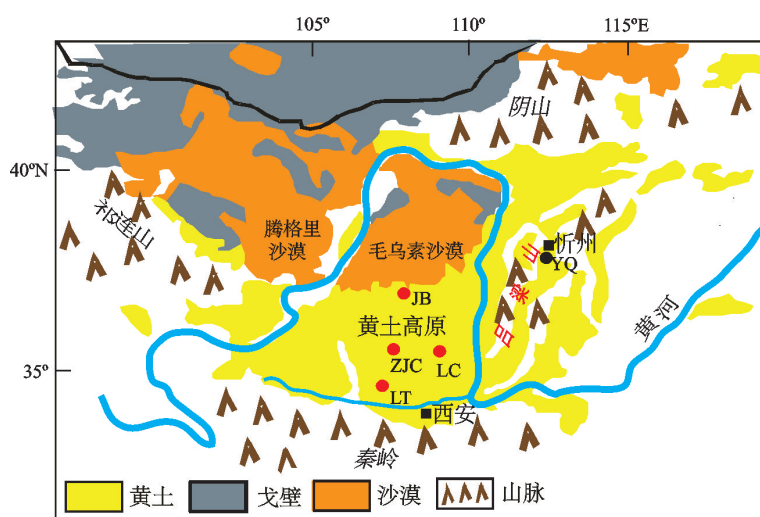


图1 黄土高原东部阳曲的地理位置(黑色圆圈)

Fig.1 Location of the Yangqu site (black dot) in the Chinese Loess Plateau

黄土分布的范围参考Sun *et al.* (2010);红色圆圈代表了黄土高原其他发表了磁化率数据的地区,用于和阳曲地区进行空间上对比;LC. 洛川;LT. 灵台;JB. 靖边;YQ. 阳曲;ZJC. 赵家川

1 研究区域和方法

本研究的黄土—古土壤序列坐落在黄土高原东部阳曲县北社村(38.06°N, 112.67°E)(图 1). 该区年均温为 8~9 °C, 年降雨为 441.2 mm, 剖面位于一个冲沟内壁, 厚度约 62 m, 露头新鲜. 野外可见明显的 S1 至 S14 古土壤层, 总体显示棕褐色或深红色, 碳酸盐结核层在野外或多或少出露. 黄土研究中常用的标志层 S5、L9 和 L15 在阳曲地区较容易识别, L9 和 L15 相对其他黄土层较厚, 约 7~8 m, 粒度较粗; S5 相对于其他土壤层显示出更红的、成壤更强的结构. S15 以下的单元由于出露不好, 故无法识别.

我们共采集了 259 个样品进行磁化率测试, 7.1~22.3 m 和 25.5~53.1 m 以 20 cm 间隔采样, 其他以 40 cm 间隔采样. 磁化率测试(κ , 体积磁化率)在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室 MFK1-FA/CS4 仪器上测试. 地球化学元素以 4 cm 间距采样, 用美国伊诺斯便携式分析仪(Innov-X Systems XRF)在地球化学模式下, 使用 50 kV 和 10 kV 光束在新鲜的露头上进行测试. 本文报道了 S13 沉积以来的硅(Si)、铁(Fe)、钙(Ca)和铷/锶比(Rb/Sr)的百分比含量. 基于 L9、L15 和 S5 标志层, 通过与黄土高原各地区磁化率序列进行空间对比, 其年代框架已大体确定, 在通过 Ding *et al.* (2002) 调谐的各古土壤层的年代结果, 能够获得更加准确的年代框架(详见 2.1 部分).

2 年代确定和元素变化

2.1 年代确定

S5 相对于其他古土壤层更红、土壤结构更发育, 因此阳曲剖面 20~25 m 相对较高的磁化率值为 S5 层, 对应于其他黄土地区的高磁化率 S5(图 2), L9 和 L15 相对较厚, 分别对应于 34~40 m 和 54~59 m(图 2). 以 S5、L9 和 L15 为卡尺, 由此我们建立了与黄土高原其他地区在深度域上磁化率进行空间对比图, 结合野外勘察, 确定了古土壤层从 S1 到 S14 的深度值(图 2). 基于 Ding *et al.* (2002) 对古土壤层顶底界线的天文调谐年代结果, 我们能够获得阳曲剖面各个古土壤层位的顶底界线年代, 再通过各古土壤和黄土层之间的线性内插获得整个剖面的持续时间. 我们结果显示剖面持续时间为 L15 以来(图 2), 由于 L14 与 L15 层位之间未进行元素含量测试, 我们仅选取约为 1 200 ka 沉积记录进行分析(图 3).

2.2 元素变化

阳曲剖面黄土的磁化率数据序列能够和深海底栖氧同位素记录很好的对比(Lisiecki and Raymo, 2005)(图 3), 这和黄土高原其他地区的记录相一致(Ding *et al.*, 2005; Hao *et al.*, 2012). S5 显示出最高的磁化率值, 说明 S5 遭受了强烈的氧化和后期成壤作用. Rb/Sr 率在 1.20~0.94 Ma 显示较高的值, 在 0.94 Ma 显著减小, 其后保持相对稳定, 到 0.65 Ma 和 0.31 Ma 左右再次显著减少(图 3). 钙含量在 0.94 Ma 之前显示出较低的值, 在 0.94 Ma 明显的增加, 在 0.94~0.31 Ma 期间黄土层显示出高的含量而古土壤层含量相对较低, 直到 0.31 Ma 又一次明显的增加(图 3). Fe 和 Si 含量在 0.94 Ma 左右明显的减小, 接着在 0.94~0.45 Ma 轻微的增加, 然后在 0.45~0.31 Ma 逐渐减小, 在 0.31 Ma 又一次明显的减小(图 3). 除了 S5 强发育的古土壤层外, 0.94 Ma 之前的 Fe 含量比 0.94~0.31 Ma 期间相对高.

根据阳曲剖面 XRF 元素含量的变化, 我们可以将研究层段划分 3 个阶段: I(1 200~940 ka), II(940~310 ka) 和 III(310~0 ka). 阶段 I(1 200~940 ka) 对应于相对高的北纬 65° 夏季太阳辐射和相对高的偏心率值时期(图 3); 阶段 II(940~310 ka) 相对于较低的夏季太阳辐射和偏心率值时期(图 3); 阶段 III(310~0 ka) 相对于高的夏季太阳辐射量和偏心率值时期(图 3).

3 讨论

3.1 黄土高原东部 1.2 Ma 以来两次明显的干旱化事件

黄土中的磁化率主要受后期成壤过程中形成于原位的超细铁磁性矿物影响, 因此黄土中的磁化率指标常用于指示夏季风降雨多寡(An *et al.*, 2001; Hao *et al.*, 2012). Rb 在风化过程中相对稳定, 而 Sr 相对容易迁移(An *et al.*, 2001), 因此 Rb/Sr 比值的减小指示着风化和成壤强度的减弱. 黄土中 Ca 含量主要依靠于含钙的碳酸盐岩的变化, 含钙碳酸盐含量的变化与降雨诱导的 Ca 淋融和温度诱导的蒸发之间产生平衡的有效降雨相关(Sun *et al.*, 2010). 因此, 黄土中 Ca 含量变化也可以指示夏季风强度的相对变化, 因为古土壤层中强的降雨诱导的淋融会导致相对低的 Ca 含量值. 黄土中的 Fe 和 Si 含量主要取决于 Fe₂O₃ 和 SiO₂ 含量的变化(Maher *et al.*, 2009). 黄土中 Fe₂O₃ 比率(游离铁/总铁含量)在古土壤层中高于黄土层, 并且从北往南增加,

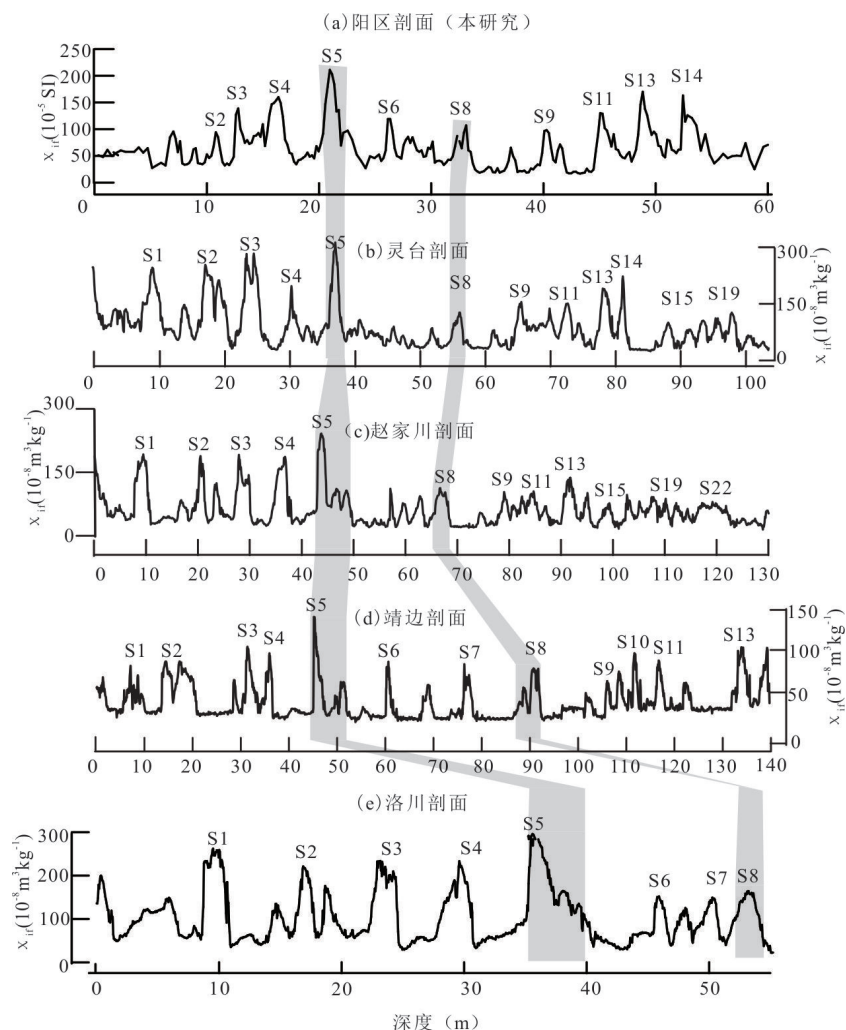


图2 阳曲和黄土高原其他地区剖面的磁化率对比

Fig.2 Spatial linkages of magnetic susceptibility (MS) between the Yangqu site and other parts in the Loess Plateau

灵台剖面来自于 Ding *et al.* (1999); 赵家川剖面来自于 Sun *et al.* (2006); 靖边剖面来自于 Ding *et al.* (2005); 洛川剖面来自于 Hao *et al.* (2012)

因此 Fe_2O_3 比率(游离铁/总铁含量)变化可以作为夏季风强度的指标(Ding *et al.*, 2001). 总体而言,在气候相对温暖湿润时期,Fe 含量相对增加,而气候干冷时期,其含量相对减少. Si 是相对难迁移、极稳定的元素,在强的化学风化过程中,其比例会明显增加.

基于上述古气候指标的分析,我们的研究结果显示阳曲地区在 1.2 Ma 以来遭受两次明显的干旱事件. 第一次显著干旱发生在 0.94 Ma, 表现在 Si、Fe 含量和 Rb/Sr 比值显著减小, Ca 含量明显增加(图 3). 这一次干旱事件在其他地区也被记录. 黄土高原中部朝那剖面的孢粉记录显示,在 0.95 Ma 左右,主导的森林草原混合植被类型转变成开放的森林草原植被类型(Wu *et al.*, 2007); 黄土高原碳同

位素显示 C_4 植被在 1.3~0.9 Ma 显著的扩张(An *et al.*, 2005), 这与增强的干旱化和季节性降雨相关; 黄土高原中部质量堆积速率(MAR)在 0.94 Ma 左右显著增加(Sun and An, 2005); 灵台剖面反映化学风化强度的 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ 在 1.0~0.8 Ma 之后明显减小, 指示了化学风化强度变弱(Chen *et al.*, 2001); 腾格里沙漠在 0.9 Ma 之后持续出现的风尘砂指示了沙漠初始形成(Li *et al.*, 2014a); 塔克拉玛干和古尔班通古特沙漠在 0.9~0.8 Ma 发生了明显的扩展(Fang *et al.*, 2002). 阳曲地区另一次显著的干旱事件发生在 0.31 Ma 左右, 伴随着 Si、Fe 含量和 Rb/Sr 比值减小, Ca 含量明显增加(图 3). 这次气候变化事件在黄土高原其他地区很少报道, 我们认为这次干旱化事件可能更多的反映了区域环境转变.

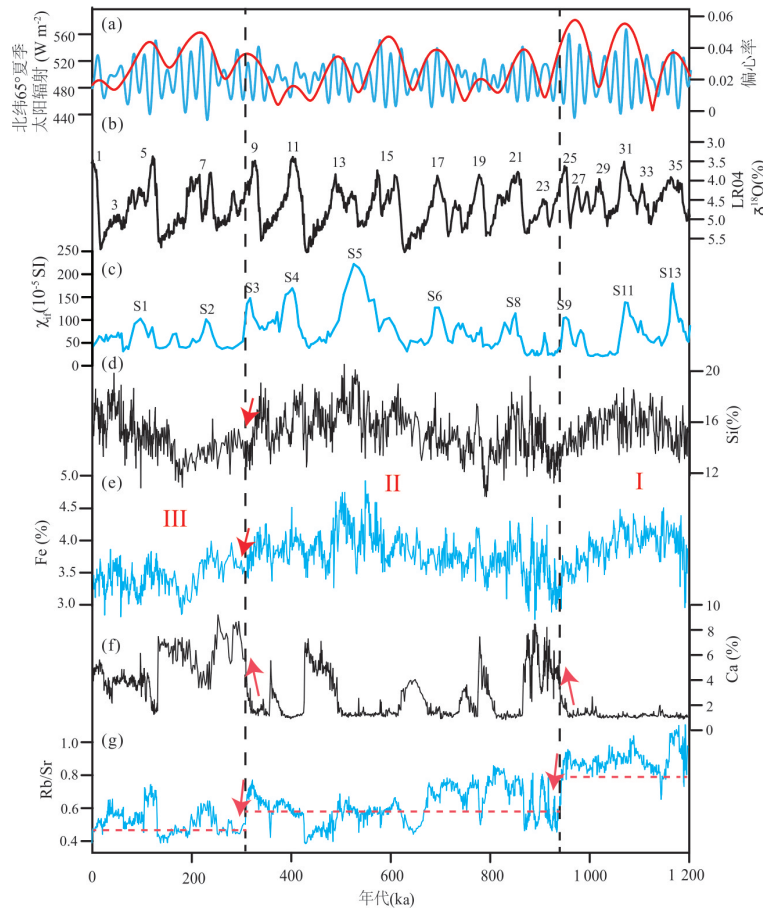


图3 过去1.2 Ma以来阳曲古气候指标和深海氧同位素及天文理论曲线对比

Fig.3 Comparison of the paleoclimatic proxies in Yangqu section with other palaeoclimatic data of the past 1.2 Ma

a. 北纬65°夏季太阳辐射(绿色)和偏心率曲线(红色)(Laskar *et al.*, 2004); b. 底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ LR04序列(Lisiecki and Raymo, 2005); c~g. 分别是阳曲剖面的磁化率, Si, Fe, Ca百分含量和 Rb/Sr 比率

Rb/Sr 比值在 0.65 Ma 也有一次明显的降低(图 3), 这与黄土高原平均质量堆积速率增加、大气 CO_2 下降和全球海平面下降相吻合(图 5). 然而, 我们认为这次气候变干事件可能仅是对冰期-间冰期旋回的响应, 而不是在构造尺度上显著变干事件, 这是因为: (1) Ca 含量在 0.65 Ma 稍微明显的增加, 但是在 0.6 Ma 之后又转变成 1% 左右, 因此在 0.65 Ma Ca 含量变化并没有前后显著不一致; (2) Fe 的含量和磁化率在 0.65 Ma 之后明显增加, 说明 0.65 Ma 并不是明显的变干事件.

图 4 中的剖面颜色也显示出两种截然不同的变化. 第一次变化发生在 L9 的底部, L9 之前的岩性颜色以红层为主, 响应强烈的化学风化和后期成壤作用, 这指示着在 0.94 Ma 之前黄土高原东部相对高的降雨和温度. 在 0.94 Ma 之后, 红层和黄层互层主导, 指示气候明显一次变干的过程. 在约 0.31 Ma 之后, 岩性颜色以黄层主导, 这意味着

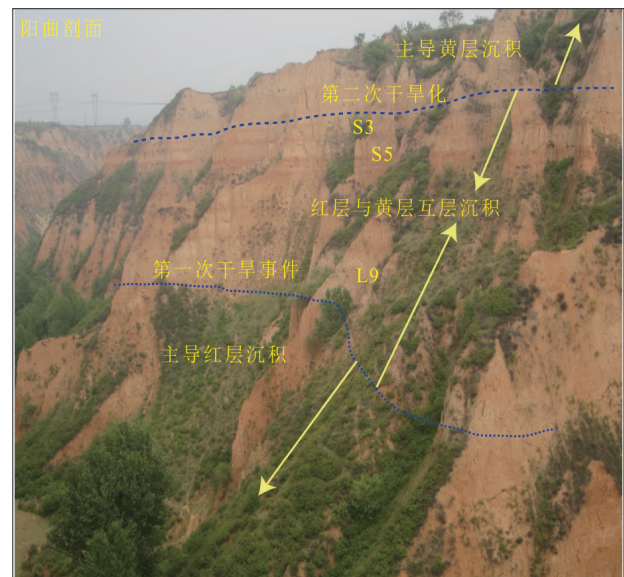


图4 阳曲剖面的野外露头照片

Fig.4 Field picture from the Yangqu Section
图中显示剖面颜色明显的两次转变

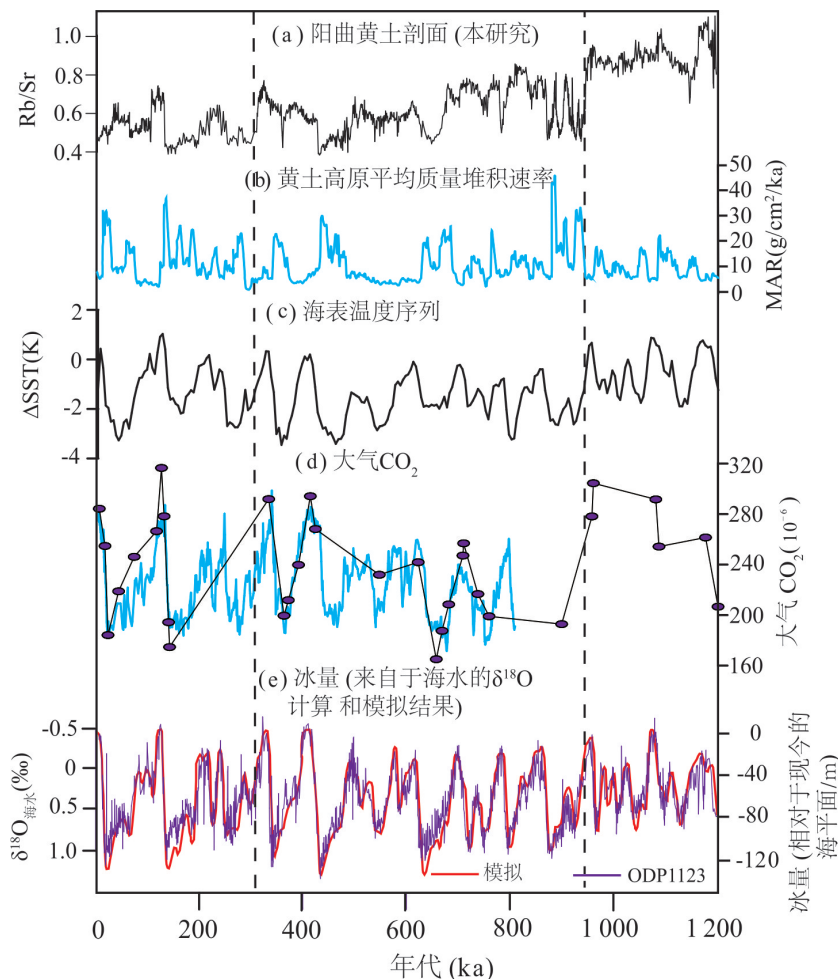


图 5 过去 1.2 Ma 以来阳曲剖面的 Rb/Sr 比值和其他古气候记录对比

Fig.5 Comparison of the Rb/Sr ratio in Yangqu section with other palaeoclimatic data of the past 1.2 Ma

a. 阳曲地区 Rb/Sr 比值; b. 黄土高原中部风尘沉积质量堆积速率(MAR)(Sun and An, 2005); c. 海表温度序列(SST)(Martinez-Boti *et al.*, 2015); d. 冰芯记录的大气 pCO_2 (绿色)(Lüthi *et al.*, 2008; Petit *et al.*, 1999; Siegenthaler *et al.*, 2005) 和海表水记录的大气 pCO_2 (紫色线)(Hönisch *et al.*, 2009); e. 来自于 ODP1123Mg/Ca 记录的冰量(Elderfield *et al.*, 2012)和模拟的结果(Bintanja *et al.*, 2005)

东部降雨进一步减少, 干旱增强.

3.2 两次干旱化事件的驱动机制探讨

青藏高原在更新世时期的隆升广泛被用于解释亚洲内陆干旱化的驱动机制(Li *et al.*, 2014b), 这是因为: 首先, 青藏高原的隆升能够阻挡印度季风向北贯入到亚洲内陆; 其次, 模拟结果显示青藏高原北部的隆升能够引起高原北部年均降雨的实质性减小和区域大气环流的转变, 引起粉尘风暴的发生和粉尘通量的增加(Liu *et al.*, 2015). 然而, 我们认为青藏高原隆升并不是导致阳曲地区 1.2 Ma 以来两次干旱化的主导因素: 首先, 高原北部、东部和南部在更新世之前就可能达到现今的海拔高度(Li *et al.*, 2015); 其次, 青藏高原的隆升会加强东亚夏季风的强度, 然而黄土高原北部靖边(Ding *et al.*, 2005)和东部阳曲黄土记录显示亚

洲夏季风在 0.94 Ma 显著的减弱.

阳曲地区 0.94 Ma 显著干旱化与全球冰量明显增加、海表温度减小及黄土高原的质量堆积速率快速增加相对应(图 5). 因此, 我们认为这次干旱化事件主要受全球冰量增加, 特别是北半球冰量增加的影响: 首先, 极地冰盖增加导致高纬与低纬之间温度梯度增大, 这抑制了夏季风向北的移动(Ding *et al.*, 2005); 其次, 北半球冰量增加能够加强西伯利亚高压, 进一步增强冬季风强度(Ding *et al.*, 2002), 因此增加阳曲地区粉尘堆积粒度; 再次, 晚更新世北半球冰盖扩张会驱动热带辐合带向赤道地区移动, 引起中高纬度干冷气候盛行. 同时, 这次干旱化事件对应于中更新世气候转型期(深海氧同位素显示周期从之前的主导 41 ka 斜率转变成 100 ka 偏心率周期; Lisiecki and Raymo, 2005). 目前, 对于引起

中更新世气候转型的驱动机制还不清楚,但大气 CO₂浓度下降引起北半球冰盖扩张可能扮演了重要作用(Clark *et al.*, 2006). 因此,黄土高原东部 0.94 Ma 左右的干旱化事件与大气 CO₂浓度下降导致北半球冰盖扩张可能存在着因果关系.

阳曲地区 0.31 Ma 时期记录的干旱化事件可能更多反映了区域的环境转变,这是因为在黄土高原其他地区的古气候指标中对此次事件并没有明显的记录. 这次事件可能是由于忻定古湖裂解引起区域干旱程度增强所致,但具体原因目前不知. Hu *et al.* (2016) 运用磁性地层学、沉积地层和光释光年代学方法,对汾渭地堑河流阶地进行年代学研究,结果显示汾渭地堑在 0.41 Ma 以来发生了快速扩展,响应了青藏高原加速向东挤出. Ren *et al.* (2014) 对忻州地区滹沱河河流阶地热释光和光释光测年,结合上覆的黄土—古土壤序列年代,指示忻定古湖的裂解发生在 0.60 Ma 至 0.13 Ma 之间,响应了区域山体差异隆升. 0.60 Ma 以来忻州—五台地区大的山前冲积扇发育(任俊杰和张世民, 2006)和至少在山前发育三级冲积阶地(Zhang *et al.*, 2007)说明忻州地区在晚第四纪时期发生了强的构造隆升,导致河流溯源侵蚀增强,从而促使忻定古湖裂解. 但由于目前对忻定古湖裂解研究较少,其具体的裂解年代有待进一步研究.

4 结论

通过对黄土高原东部阳曲剖面 1.2 Ma 以来磁化率和化学元素含量的分析,显示出阳曲地区经历了两次显著的干旱化事件. 第一次干旱化事件发生在 0.94 Ma, 表现为 Si、Fe 百分含量和 Rb/Sr 比值显著减小而 Ca 含量明显增加,这次事件主要是与全球冰量增加,特别是北半球冰盖扩张相关,而青藏高原的隆升并不是这次气候事件的主导因素. 第二次事件发生在 0.31 Ma 左右,这次事件可能是由于忻定古湖裂解所致. 这项研究为我们研究黄土高原第四纪以来的干旱化过程提供了重要的参考,并且进一步完善了黄土高原不同地区干旱化的演化历史.

致谢:编辑及两位匿名评审专家的评审意见显著提高了本文的质量,在此特别感谢. 对本文的数据感兴趣的读者可通过发送邮件向作者索取. 该工作由中国地质调查局地质调查工作项目(12120113059300)和国家自然科学基金(41322013)共同资助!

References

- An, Z. S., Huang, Y. S., Liu, W. G., et al., 2005. Multiple Expansions of C4 Plant Biomass in East Asia since 7 Ma Coupled with Strengthened Monsoon Circulation. *Geology*, 33(9): 705. <https://doi.org/10.1130/g21423.1>
- An, Z. S., Kutzbach, J. E., Prell, W. L., et al., 2001. Evolution of Asian Monsoons and Phased Uplift of the Himalaya - Tibetan Plateau since Late Miocene Times. *Nature*, 411(6833): 62–66. <https://doi.org/10.1038/35075035>
- Bintanja, R., van de Wal, R. S. W., Oerlemans, J., 2005. Modelled Atmospheric Temperatures and Global Sea Levels over the Past Million Years. *Nature*, 437(7055): 125–128. <https://doi.org/10.1038/nature03975>
- Chen, J., An, Z. S., Liu, L. W., et al., 2001. Variations in Chemical Compositions of the Eolian Dust in Chinese Loess Plateau over the Past 2.5 Ma and Chemical Weathering in the Asian Inland. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 44(5): 403–413. <https://doi.org/10.1007/bf02909779>
- Clark, P. U., Archer, D., Pollard, D., et al., 2006. The Middle Pleistocene Transition: Characteristics, Mechanisms, and Implications for Long-Term Changes in Atmospheric pCO₂. *Quaternary Science Reviews*, 25(23/24): 3150–3184. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.07.008>
- Deng, C. L., Shaw, J., Liu, Q. S., et al., 2006. 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 and Planetary Science Letters*, 241(1–2): 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.10.020>
- Ding, Z. L., Derbyshire, E., Yang, S. L., et al., 2002. Stacked 2.6 Ma Grain Size Record from the Chinese Loess Based on Five Sections and Correlation with the Deep-Sea Δ¹⁸O Record. *Paleoceanography*, 17(3): 5–1–5–21. <https://doi.org/10.1029/2001pa000725>
- Ding, Z. L., Derbyshire, E., Yang, S. L., et al., 2005. Stepwise Expansion of Desert Environment Across Northern China in the Past 3.5 Ma and Implications for Monsoon Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(1/2): 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.036>
- Ding, Z. L., Xiong, S. F., Sun, J. M., et al., 1999. 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. *Palaeogeography, Palaeoclimatology*,

- Palaeoecology*, 152(1/2): 49–66. [https://doi.org/10.1016/s0031-0182\(99\)00034-6](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(99)00034-6)
- Ding, Z. L., Yang, S. L., Sun, J. M., et al., 2001. Iron Geochemistry of Loess and Red Clay Deposits in the Chinese Loess Plateau and Implications for Long-Term Asian Monsoon Evolution in the Last 7.0 Ma. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(1–2): 99–109. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(00\)00366-6](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(00)00366-6)
- Elderfield, H., Ferretti, P., Greaves, M., et al., 2012. Evolution of Ocean Temperature and Ice Volume through the Mid-Pleistocene Climate Transition. *Science*, 337(6095): 704–709. <https://doi.org/10.1126/science.1221294>
- Fang, X., Lü, L., Yang, S., et al., 2002. Loess in Kunlun Mountains and its Implications on Desert Development and Tibetan Plateau Uplift in West China. *Science in China Series D*, 45(4): 289. <https://doi.org/10.1360/02yd9031>
- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., et al., 2002. Onset of Asian Desertification by 22 Ma ago Inferred from Loess Deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159–163. <https://doi.org/10.1038/416159a>
- Gylesjö, S., Arnold, E., 2006. Clay Mineralogy of a Red Clay-Loess Sequence from Lingtai, the Chinese Loess Plateau. *Global and Planetary Change*, 51(3/4): 181–194. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.03.002>
- Hao, Q. Z., Wang, L., Oldfield, F., et al., 2012. Delayed Build-Up of Arctic Ice Sheets during 400 000-Year Minima in Insolation Variability. *Nature*, 490(7420): 393–396. <https://doi.org/10.1038/nature11493>
- Hönisch, B., Hemming, N. G., Archer, D., et al., 2009. Atmospheric Carbon Dioxide Concentration Across the Mid-Pleistocene Transition. *Science*, 324(5934): 1551–1554. <https://doi.org/10.1126/science.1171477>
- Hu, Z. B., Pan, B. T., Guo, L. Y., et al., 2016. Rapid Fluvial Incision and Headward Erosion by the Yellow River along the Jinshaan Gorge during the Past 1.2 Ma as a Result of Tectonic Extension. *Quaternary Science Reviews*, 133: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.12.003>
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., et al., 2004. A Long-Term Numerical Solution for the Insolation Quantities Of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428(1): 261–285. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>
- Li, J. J., Fang, X. M., Song, C. H., et al., 2014b. Late Miocene-Quaternary Rapid Stepwise Uplift of the NE Tibetan Plateau and Its Effects on Climatic and Environmental Changes. *Quaternary Research*, 81(3): 400–423. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.01.002>
- Li, Y. L., Wang, C. S., Dai, J. G., et al., 2015. Propagation of the Deformation and Growth of the Tibetan-Himalayan Orogen: A Review. *Earth-Science Reviews*, 143: 36–61. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.01.001>
- Li, Z. J., Sun, D. H., Chen, F. H., et al., 2014a. Chronology and Paleoenvironmental Records of a Drill Core in the Central Tengger Desert of China. *Quaternary Science Reviews*, 85: 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.12.003>
- Lisiecki, L. E., Raymo, M. E., 2005. A Pliocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic $\Delta 18\text{O}$ Records. *Paleoceanography*, 20(1): 10–15. <https://doi.org/10.1029/2004pa001071>
- Liu, X. D., Sun, H., Miao, Y. F., et al., 2015. Impacts of Uplift of Northern Tibetan Plateau and Formation of Asian Inland Deserts on Regional Climate and Environment. *Quaternary Science Reviews*, 116: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.010>
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., et al., 2008. High-Resolution Carbon Dioxide Concentration Record 650 000–800 000 years before Present. *Nature*, 453(7193): 379–382. <https://doi.org/10.1038/nature06949>
- Maher, B. A., Mutch, T. J., Cunningham, D., 2009. Magnetic and Geochemical Characteristics of Gobi Desert Surface Sediments: Implications for Provenance of the Chinese Loess Plateau. *Geology*, 37(3): 279–282. <https://doi.org/10.1130/g25293a.1>
- Martinez-Botí, M. A., Foster, G. L., Chalk, T. B., et al., 2015. Plio-Pleistocene Climate Sensitivity Evaluated Using High-Resolution CO_2 Records. *Nature*, 518(7537): 49–54. <https://doi.org/10.1038/nature14145>
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., et al., 1999. Climate and Atmospheric History of the Past 420 000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica. *Nature*, 399(6735): 429–436. <https://doi.org/10.1038/20859>
- Ren, J. J., Zhang, S. M., Meigs, A. J., et al., 2014. Tectonic Controls for Transverse Drainage and Timing of the Xinding Paleolake Breach in the Upper Reach of the Hutuo River, North China. *Geomorphology*, 206: 452–467. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.016>
- Ren, J. J., Zhang, S. M., 2006. A Tectonic Movement during Later Stage of Late Pleistocene Epoch in the Xinding Basin. *Seismology and Geology*, 28(3): 487–496 (in Chinese with English abstract).
- Siegenthaler, U., Stocker, T. F., Monnin, E., et al., 2005. Stable Carbon Cycle-Climate Relationship during the Late Pleistocene. *Science*, 310(5752): 1313–1317. <https://doi.org/10.1126/science.1120130>

- Sun, J. M., Lü, T. Y., Zhang, Z. Q., et al., 2012. Stepwise Expansions of C4 Biomass and Enhanced Seasonal Precipitation and Regional Aridity during the Quaternary on the Southern Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 34: 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.12.007>
- Sun, Y. B., An, Z. S., 2005. Late Pliocene - Pleistocene Changes in Mass Accumulation Rates of Eolian Deposits on the Central Chinese Loess Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 110(D23): 1–10. <https://doi.org/10.1029/2005jd006064>
- Sun, Y. B., An, Z. S., Clemens, S. C., et al., 2010. Seven Million Years of Wind and Precipitation Variability on the Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 297(3–4): 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.07.004>
- Sun, Y. B., Clemens, S. C., An, Z. S., et al., 2006. Astronomical Timescale and Palaeoclimatic Implication of Stacked 3.6 Ma Monsoon Records from the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 25(1/2): 33–48. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.07.005>
- Sun, Y. B., An, Z. S., 2002. Variation of the East Asian Winter Monsoon Recorded by Chinese Loess during the last Four Glacial-Interglacial Cycles. *Earth Science*, 27(1): 19–24 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. L., Fang, X. M., Ma, Y. Z., et al., 2007. Plio-Quaternary Stepwise Drying of Asia: Evidence from a 3 Ma Pollen Record from the Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(1/2): 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.02.029>
- Wu, Y., Zhu, Z. Y., Qiu, S. F., et al., 2013. A Rock Magnetic Record of Asian Cooling and Aridification Processes during 1.95~0.40 Ma in the Southeastern Chinese Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 58(30): 3636–3644. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5775-5>
- Yang, S. L., Ding, F., Ding, Z. L., 2006. Pleistocene Chemical Weathering History of Asian Arid and Semi-Arid Regions Recorded in Loess Deposits of China and Tajikistan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(7): 1695–1709. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.12.012>
- Zeng, F. M., Xiang, S. Y., Lu, Y. L., 2007. Environmental Evolution of Late Pleistocene Loess Deposits at Lintao County, Gansu Province. *Earth Science*, 32(5): 703–712 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. M., Ren, J. J., Nie, G. Z., 2007. Paragenesis of Quaternary Pediments and River Terraces on the North Piedmont of Wutai Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 52(4): 521–530. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-0081-8>

附中文参考文献

- 任俊杰, 张世民, 2006. 忻定盆地晚更新世晚期的一次构造运动. *地震地质*, 28(3): 487–496.
- 孙有斌, 安芷生, 2002. 最后 4 个冰期旋回中国黄土记录的东亚冬季风变化. *地球科学*, 27(1): 19–24.
- 曾方明, 向树元, 路玉林, 等, 2007. 甘肃临洮晚更新世黄土环境变迁. *地球科学*, 32(5): 703–712.