

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017092601

靖边黄土剖面记录的末次冰期以来的气候变化

王攀¹, 张培新^{1,2}, 杨振京¹, 石迎春¹, 宋超¹, 郭娇¹

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061

2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083

摘要:靖边黄土剖面位于黄土-沙漠的过渡区,能更加敏感地记录第四纪东亚季风气候变化。对位于靖边县南15km的三道沟黄土剖面(0~7.2m)进行年代学、磁化率、粒度、元素地球化学分析,粒度数据显示靖边黄土剖面沉积物以粉砂为主,占比高达80%以上;年龄曲线显示靖边黄土剖面存在千年尺度的沉积间断;元素地球化学数据表明,古土壤向黄土层中的元素迁移顺序为Ca>Na>Mg>Si>Al>K>Fe,剖面黄土处于初级风化阶段;多指标综合分析表明,靖边黄土剖面末次冰期以来的气候变化经历了MIS3气候相对温暖湿润且震荡激烈、末次冰盛期气候极度冷干、冰消期气候好转和全新世气候温暖湿润4个阶段。

关键词:磁化率;粒度;元素;气候变化;靖边黄土

中图分类号:P532,P595 **文献标识码:**A

Climate change since the last glacial stage recorded in Jingbian loess section

WANG Pan¹, ZHANG Peixin^{1,2}, YANG Zhenjing¹, SHI Yingchun¹, SONG Chao¹, GUO Jiao¹

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China

2. China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: The Jingbian loess section is located in the transition zone between the loess plateau and desert, which is more sensitive than others to the Quaternary East Asian monsoon climate changes. The analyses of chronology, susceptibility, grain size and geochemical elements of the loess section in the south of Jingbian county were carried out. The Jingbian loess is a kind of eolian deposits composed of more than 80% of silty sand. Dating age suggests that there is a millennial scale sedimentary discontinuity in the section. The chemical data shows that the loess is in a primary weathering stage and the element abundance is in an order of Ca>Na>Mg>Si>Al>K>Fe. The comprehensive multi-index analyses suggest that the loess section has suffered four stages of climatic changes since the Last Glacial Period. The MIS3 was relatively warm, humid and oscillated. The Last Glacial Maximum was extremely cold and dry. The Last Deglaciation was under an improving climate condition and the Holocene warm and humid.

Key words: susceptibility; grain size; element; climate change; Jingbian loess

黄土高原在第四纪时期沉积的黄土-古土壤序列蕴藏着丰富的古气候信息。黄土分布广、沉积连续、沉积厚度大等特点,使其成为研究第四纪以来气候和环境变化的良好载体^[1,2]。连续沉积的黄土-古土壤序列对应北半球第四纪以来冰期-间冰期的气候旋回,很好地记录了自新生代以来的气候变化和生态环境演化历史,对研究亚洲内陆干旱化、东亚季风的长期演化规律、末次冰期-间冰期旋回的气候不

稳定性特征等具有重要的意义^[3-7]。

磁化率、粒度、元素地球化学等指标已经成为研究黄土记录的古气候变化的重要替代性指标^[8]。磁化率、粒度分别对应东亚夏季风和冬季风的强度变化^[9-12]。元素地球化学特征不仅受气候变化的影响,还受本身的物理、化学性质、地貌、构造活动等多个因素的影响^[13,14]。研究表明,黄土发育阶段气候冷干,风化作用较弱,而古土壤发育阶段气候暖湿,

资助项目:中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目“靖边地区次生黄土研究与极端气候识别”(SK201310);中国地质调查局地质调查大项目“中国气候变化黄土沉积记录研究”(12120113005900);中国地质科学院基本科研业务费项目“西北干旱半干旱地区表土孢粉研究及数据库建设”(YYWF201627)

作者简介:王攀(1987—),男,硕士,研究实习员,主要从事环境地球化学研究,E-mail:bjwp@live.com

收稿日期:2017-09-26;**改回日期:**2019-03-05 文凤英编辑

风化作用较强,这与深海氧同位素反映的气候变化特征相一致^[15,16]。在实际研究中,使用元素的比值作为古环境变化的指示因子,比元素含量具有更高的准确性^[17-20]。

靖边地处毛乌素沙地与黄土高原之间,是连接沙漠和黄土的过渡地区,对第四纪东亚季风气候变化更加敏感。该地区发育的砂质古土壤-砂质黄土-风成砂沉积序列在记录古气候和古环境变迁方面具有优势。因此,本文以陕北靖边县三道沟黄土剖面为研究对象,通过对剖面年代学、磁化率、粒度、元素地球化学等相关指标进行分析测试,恢复靖边地区末次冰期以来的气候变化,探讨本区域的气候环境变迁信息,深化沙漠-黄土过渡带元素地球化学演化对东亚夏季风变化响应机制

的认识。

1 剖面概况

靖边黄土剖面(37°27′41.16″N、108°46′45.58″E)位于陕西省靖边县南约 15km 的镇靖乡三道沟村,为天然出露的剖面,未受到人类活动的干扰,可肉眼区分出古土壤层、黄土层和风成砂层,剖面总深度 11.1m(图 1)。该区域属洛河流域的上游地区,为典型的黄土塬区地貌类型,地处鄂尔多斯地台南缘与黄土高原北部过渡地带,白于山横亘于南,毛乌素沙地绵延于北,靖边平原呈东西走向居中。根据对剖面野外观察和分析,将三道沟剖面地层从上到下划分为 6 个地层单元(表 1)。上部 0~7.20m 和

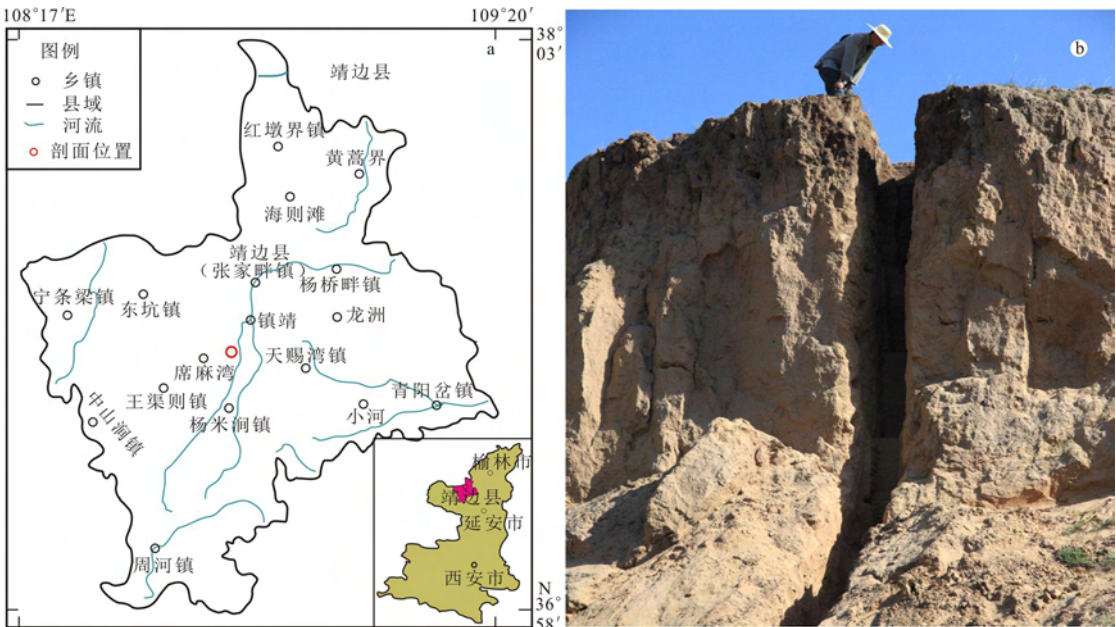


图 1 靖边黄土剖面位置(a)及剖面野外照片(b)

Fig.1 Location and photo of Jingbian loess section

表 1 靖边黄土剖面岩性描述

Table 1 Lithologic description of Jingbian loess section

深度/m	岩性描述
0~1.40	黑垆土,颜色发黑,菌丝体发育,根孔和虫孔发育,可见大量植物根系,0.5m 以下稍致密
1.4~1.80	黑垆土到黄土的过渡层,灰黄色粉砂
1.80~3.50	灰黄色粉细砂,偶见根系,含少量灰黑色铁锰质斑点,偶见钙斑,含石英、长石颗粒
3.50~6.20	灰黄色粉砂,质地疏松
6.20~10.60	灰黄色细砂,质地疏松,含水分,较湿润
10.60~11.10	上部 20cm 为亚砂土,含泥质,较湿润;下部 30cm 为灰黄色黄土

下部 10.60~11.10m 按照 2cm 间隔采样,7.20~10.60m 是均质的沙,未取样,共采集 385 组样品,本文主要对 0~7.20m 进行分析和讨论。

2 研究方法

2.1 年代学

基于靖边黄土剖面深度和岩性变化,本次在黑垆土层共采集 4 个 AMS¹⁴C 样品,在黄土层采集 3 个光释光(OSL)样品,AMS¹⁴C 样品分别在北京大学考古文博学院科技考古与文物保护实验室和 BE-TA 实验室完成,3 个光释光样品分别在中国地质科学院水文地质环境地质研究所和中国科学院地球环境研究所完成。测量时¹⁴C 半衰期为 5568a,年龄校正使用国际上通用的 CALIB7.0.4 版本(<http://calib.org/calib/>),转换为 BP(BP=1950AD)年代。

2.2 磁化率

本研究对 0~7.2m 的 360 组样品进行磁化率、粒度和地球化学元素测试。样品在自然状态下风干并轻轻磨碎,过 2mm 标准筛去除较大颗粒和植物碎屑。磁化率用英国 Bartington MS2 型磁化率仪,室温下分别测得低频(470Hz)磁化率(χ_{lf})和高频(4700Hz)磁化率(χ_{hf}),并计算频率磁化率($\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$)和频率磁化率的百分比($\chi_{fd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100\%$),每个样品测量不少于 3 次,然后取其平均值作为最后测量结果。

2.3 粒度

粒度用英国 Mastersizer2000 型激光粒度仪进行测试(测量范围 0.02~2000 μ m),取风干样品 1g 左右,加入双氧水去除有机质,待充分反应后,加入

蒸馏水,静置 12h,抽取上层液体,加入六偏磷酸钠分散剂,在震荡仪中震荡过后,在激光粒度仪上进行粒度测试,重复测量的相对误差<1%。

2.4 地球化学元素

地球化学元素在测量前将样品室内自然风干,并研磨成粉末后过 200 目筛,称取样品 4g 左右,采用半自动压样机,将其压制成为聚乙烯粉末镶边衬底直径 4cm 的饼状测量圆片。样品的元素含量采用荷兰帕纳科(PANalytical)公司生产的 PW4400 型 X 射线荧光光谱仪进行测量,该仪器对同一样品测量标准差控制在 2% 以内,测量过程中加入标准样品进行测试质量的控制。常量元素以氧化物形式给出,单位为%,其他元素以单独的元素形式给出,单位为 μ g/g。以上测试均在中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成。

3 结果与分析

3.1 年代学分析

靖边黄土剖面表层 1.4m 内的 4 个 AMS¹⁴C 日历年龄随深度增加而增加(表 2),符合沉积地层学原理的下老上新,且日历年龄均未超过一万年,证明表层 1.4m 为全新世时期形成的黑垆土。年龄(T)与深度(X)呈线性分布(图 2),相关系数高达 0.99,说明黑垆土层是连续匀速沉积形成。根据年龄和深度的相关性($T = 4987.8X + 1722.2$),运用线性内插和外推的计算方法,可以获得不同深度和层位的年龄数据,最终获得整个剖面黑垆土层的年龄序列。通过计算可知靖边黄土剖面的黑垆土层从 8.7kaBP 开始形成,这比全新世开始的时间晚了近 3000 年。

表 2 靖边黄土剖面¹⁴C 测年数据

Table 2 Depth and ¹⁴C age of samples in Jingbian loess section

样品编号	实验室编号	深度/cm	测年材料	年龄*/aBP	校正年龄#/cal.aBP	测试单位
JB004	BA131585	6~8	全岩有机质	2090±25	2061±67	北京大学
JB030	BA131586	58~60	全岩有机质	4110±30	4669±145	北京大学
JB050	Beta-400776	98~100	全岩有机质	6120±30	7033±123	BETA 实验室
JB067	BA131587	132~134	全岩有机质	7380±45	8189±141	北京大学

* 运用样品相对于现代(1950 年)大气 ¹⁴C 活度的分数(FM)和半衰期 5568a 计算的传统¹⁴C 年龄;

树轮校正的¹⁴C 年龄。

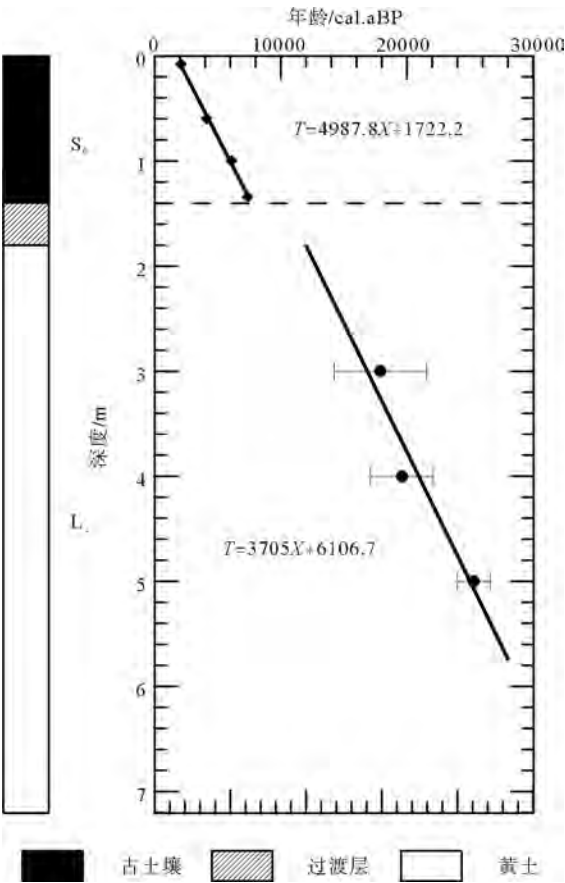


图 2 靖边黄土剖面年龄深度关系图
Fig.2 Depth vs age relationship of Jingbian loess section

靖边黄土剖面黄土层(1.4~7.2m)的 3 个 OSL 年龄(表 3)随深度呈线性正相关,相关系数为 0.91, 年龄均在三万年内,说明全新世黑垆土下沉积的黄土为末次冰期形成的马兰黄土(L1)。同样根据深度和年龄的相关性($T=3705X+6106.7$),运用线性内插和外推的计算方法,获得 L1 层的年龄序列,最终获得整个靖边黄土剖面的年代框架。根据推算,靖边黄土剖面在 7.2m 处对应年龄约为 32.78kaBP,该剖面记录了陕北靖边地区近 33kaBP 以来的沉积环境和气候变化过程。

3.2 剖面磁化率特征

靖边剖面低频磁化率的变化范围为(22.1~

114.7) $\times 10^{-8}$ m³/kg,平均值为 43.2 $\times 10^{-8}$ m³/kg; 高频磁化率变化范围为(22.1~104.8) $\times 10^{-8}$ m³/kg,平均值为 41.8 $\times 10^{-8}$ m³/kg;质量频率磁化率变化范围为(0.1~9.9) $\times 10^{-8}$ m³/kg,平均值 1.6 $\times 10^{-8}$ m³/kg;频率磁化率百分比平均值为 2.3%,最低 0.1%,最高 9.7%。通常在黄土剖面中采用的是低频磁化率进行分析,能够更好地反映出气候的变化。根据垂向变化显示(图 3),靖边剖面磁化率曲线的变化趋势稳定,没有剧烈的锯齿状波动出现。

3.3 剖面粒度特征

靖边黄土剖面样品粒度结果表明样品中值粒径为 18.0~102.2 μ m,平均值为 60.8 μ m;<4 μ m 颗粒含量为 2.3%~20.1%,平均值为 8.0%;4~63 μ m 颗粒含量为 77.2%~95.0%,平均值为 88.4%;>63 μ m 颗粒含量为 0~11.9%,平均值为 3.6%。粒度主要以 4~63 μ m 颗粒为主,含量大于 80%。按照三角粒度相组成图,可以判断靖边剖面的粒径范围主要集中在粉砂粒级范围内,占比达到 80%以上,黏粒和砂粒相对占比较少(图 4),这是因为其位于毛乌素沙地的南缘地带,粒度较粗反映出此地区物源的近源属性,毛乌素沙地东南缘在地质历史时期有过若干次沙进和沙退^[21-23]。

3.4 剖面地球化学元素特征

为了进一步分析靖边剖面中常量地球化学元素的分布特征,本文将古土壤和黄土中的常量元素均值与上部陆壳(UCC)相应的化学元素均值进行对比分析。如图 5a 所示,靖边剖面常量元素含量与 UCC 存在一定的差异,但古土壤和黄土中常量元素含量均值差值相对于 UCC 含量均值总体较小。古土壤和黄土中常量元素采用 UCC 归一化后的差值分析(图 5b)发现,CaO、MgO、Na₂O 归一化差值偏负,古土壤中呈现相对低值状态。

本文选取较为稳定的 Al 元素作为参考值,选取黄土层代表风化成壤母质,来计算剖面元素迁移变化率(图 6a)。在靖边剖面风化过程中,古土壤中

表 3 靖边黄土剖面光释光测年数据
Table 2 Results of optically stimulated luminescence dating of Jingbian loess section

样品编号	埋深/cm	测年材料	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K/%	含水率/%	年剂量/(Gy·ka ⁻¹)	等效剂量/Gy	年龄/a	测试单位
OSL-13-03	300	细颗粒石英	1.78	8.46	1.63	15±5	2.51±0.09	44.85±9.07	17890±3670	中科院地环所
OSL-13-04	400	细颗粒石英	1.95	9.21	1.62	15±5	2.56±0.09	50.14±6.14	19590±2490	中科院地环所
OSL-13-05	500	细颗粒石英	2.96	17.52	1.62	7	4.40±0.18	111.28±3.37	25300±1300	地科院水环所

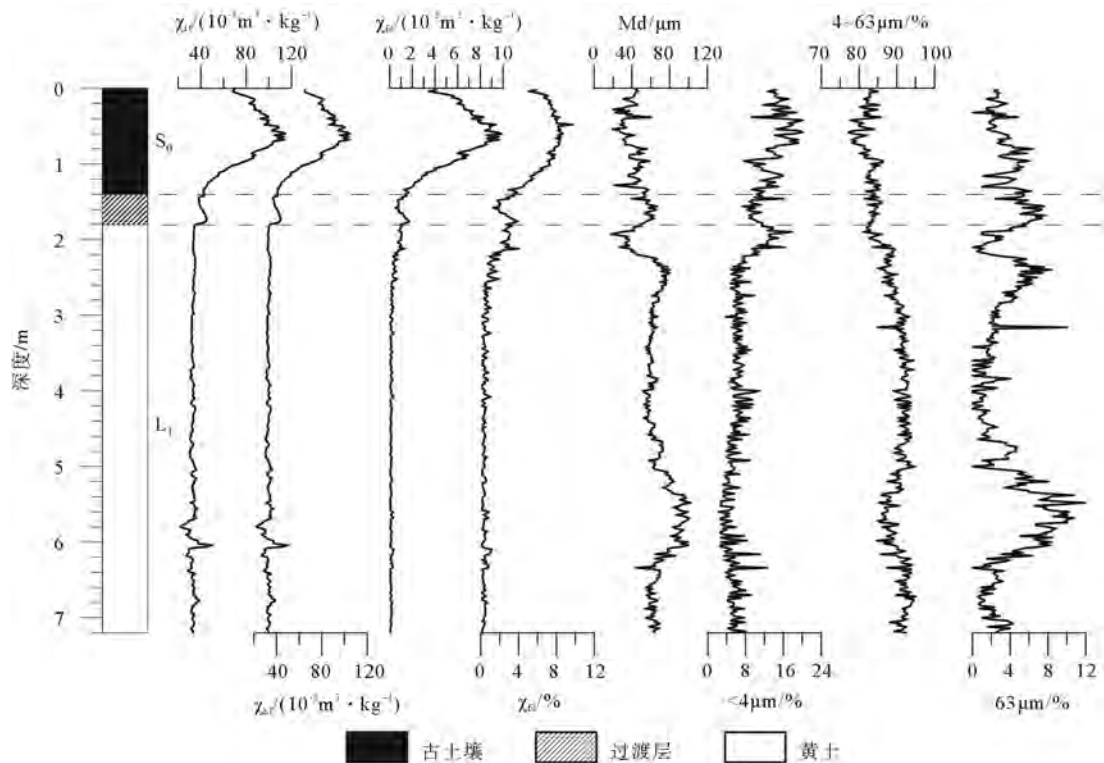


图3 靖边黄土剖面磁化率、粒度曲线图

Fig.3 Magnetic susceptibility and grain size curves of Jingbian loess section

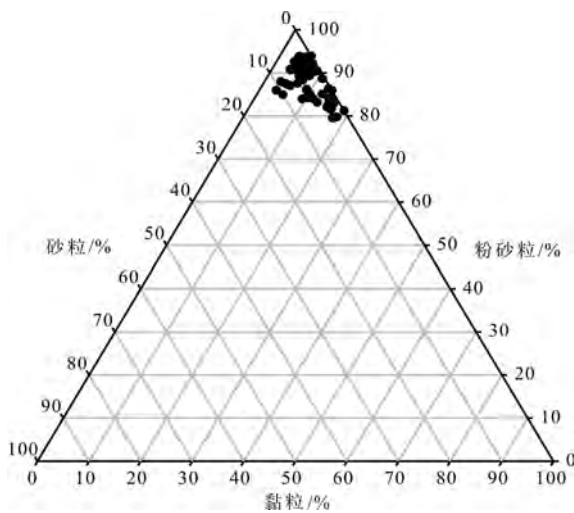


图4 靖边黄土剖面粒度三角相图

Fig.4 Grain size distribution of the Jingbian loess section in clay-silt-sand triangular diagram

的常量元素的迁移顺序为 $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Si} > \text{Al} > \text{K} > \text{Fe}$ 。

$\text{A-CN-K}(\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})$ 用来反映在风化过程中主要矿物成分变化以及沉积物风化程度。在图 6b 中,靖边剖面的风化趋势大致平行 CN-A 线,表明在风化过程中斜长石受到较强风化, Ca、

Na 大量流失,形成含 Al 的次生黏土矿物。黄土、过渡层、古土壤的位置靠近斜长石-钾长石连线一侧,且高于斜长石-钾长石连线,说明靖边黄土剖面的风化产物以黏土矿物为主,且处于初等风化阶段。

4 讨论

4.1 靖边黄土剖面千年尺度的沉积间断

根据古土壤层和黄土层沉积速率的差异,对靖边黄土剖面 0~1.4 和 1.4~7.2 m 分别进行年龄与深度拟合(图 2)。根据两段直线获得的在古土壤与黄土界限 1.4 m 上段底与下段顶存在约 2600a 的年龄差值,换言之,在 95% 置信度上,年龄在分段界限 1.4 m 处不连续,存在千年尺度的间断。前人对黄土高原晚更新世以来的黄土剖面进行高密度光释光定年结果发现,在距离粉尘源区较近的沙漠边界带存在亚轨道时间尺度的沉积间断^[24-27]。靖边黄土剖面记录的沉积间断期为 11300~8700a,这段时期北半球接受太阳辐射变化较快,黄土高原北部受东亚夏季风影响较弱,气候偏干燥。前人的研究认为,气候转型时期是黄土高原侵蚀加速的时期^[26],推测靖

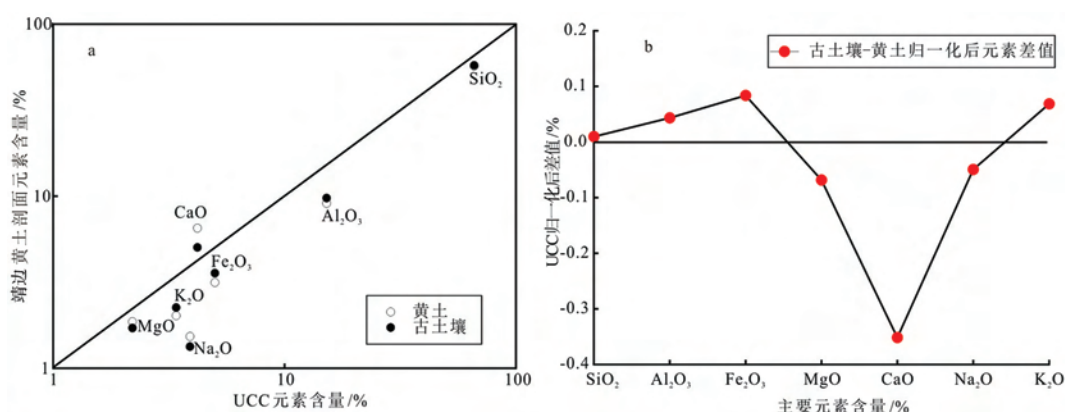
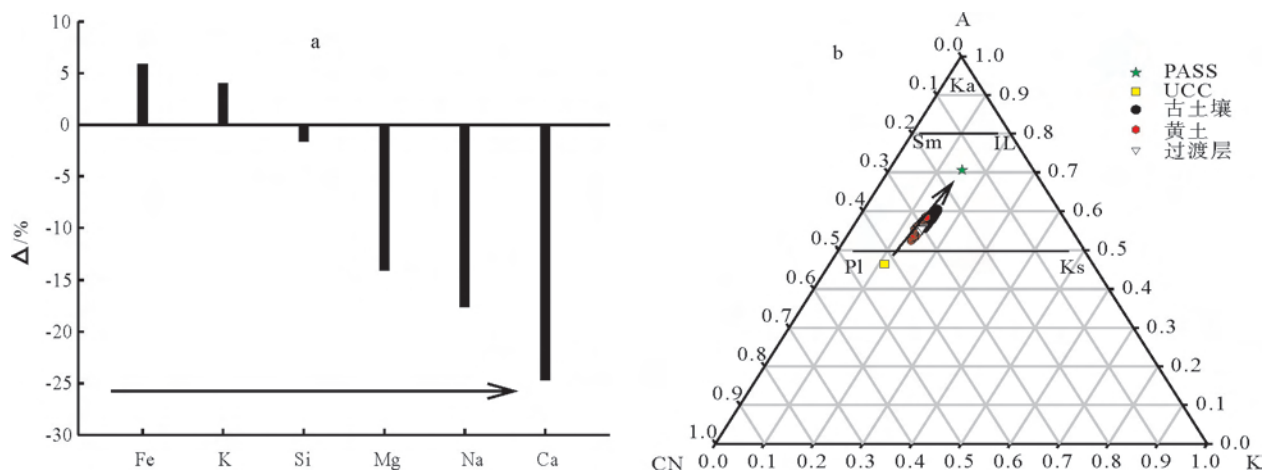


图 5 靖边黄土剖面元素含量与 UCC 比值及归一化后差值分析

Fig.5 Comparison of element contents with UCC and normalized difference analysis in Jingbian loess section



Pl:斜长石;Ks:钾长石;Sm:蒙脱石;IL:伊利石;Ka:高岭石

图 6 靖边黄土剖面元素迁移规律图(a)及风化趋势图(b)

箭头所指方向为迁移顺序及风化加强

Fig.6 Relation between element migration(a) and weathering trend of Jingbian loess section (b)

边黄土剖面存在千年尺度的沉积间断应该是气候快速变化引起的。

4.2 靖边剖面记录的末次冰期以来的气候变化

磁化率和粒度在我国黄土研究中占有很重要的地位,磁化率是反映东亚夏季风的代用指标,粒度可以指示东亚冬季风的变化,大于 $63\mu\text{m}$ 颗粒百分含量反映东亚冬季风盛行、尘暴等极端气候事件的出现,并可以指示沙漠活化扩展和固定缩小的过程^[28]。沉积过程中,沉积物的元素含量的变化与地质环境存在相对应的关系^[29,30]。湿润度是 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{MgO} + \text{CaO})$,可以衡量沉积环境的相对湿润程度及变化。退碱系数(Bc)是 $(\text{Na}_2\text{O} +$

$\text{CaO})/\text{Al}_2\text{O}_3$,其中 Al_2O_3 由于其化学性质的活泼性,在风化过程中容易淋溶和聚集,其值变大时,表明沉积气候环境处于干旱化阶段;反之,处于湿润环境。Rb/Sr 比值的大小反映了气候环境水热条件和化学风化的程度^[31-34]。Mg/Sr 比值升高,指示温度升高,反之指示温度降低^[35]。Mg/Al 值偏高,气候干冷;其值偏低,气候湿润。根据靖边剖面深度与磁化率、粒度、常量地球化学元素综合参数曲线图(图 7)显示,不同元素之间的比值在垂向上的变化与磁化率、中值粒径所反映的变化趋势基本一致,靖边剖面记录的末次冰期以来的气候变化可分为深海氧同位素 3 阶段(MIS3)、末次冰盛期(LGM, The Last Glacial Maximum)、冰消期和全新世 4 个阶段。

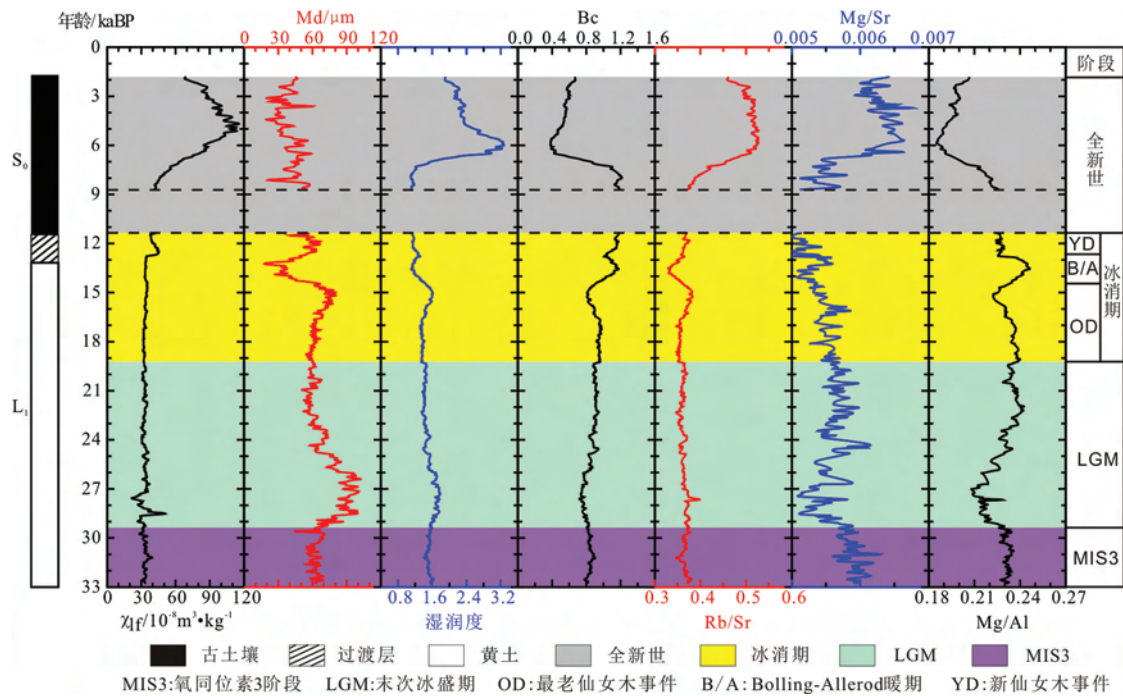


图7 靖边黄土剖面综合参数曲线图

Fig.7 Integrated parameter curves of Jingbian loess section

MIS3(32.8~29.1kaBP):此阶段磁化率较低,中值粒径较小,Rb/Sr值较小,Mg/Sr值较大且波动较明显,Mg/Al值偏低,表明此阶段是气候相对温暖湿润,震荡激烈的一段时期。

LGM(29.1~19.1kaBP):此阶段磁化率值较小,总体变化趋势不大,最低为 $22 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,粒度较粗,4~63 μm 组分含量接近90%,中值粒径和大于63 μm 颗粒百分含量达到最高值,代表此阶段风力强劲,冷干气候盛行,处于冷干气候环境下。Mg/Sr值比前一阶段降低,Mg/Al值逐渐升到最大值,表明此阶段冬季风盛行,降雨量很小,为极度冷干的末次冰盛期。

冰消期(19.1~11.3kaBP):此阶段磁化率值依然较低,总体变化趋势不明显,稳定在 $40 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 左右,反映出气候始终处于冷干状态。粒度组分依旧以4~63 μm 颗粒为主,其百分含量与上个阶段相比明显降低,表明气候较上个阶段有所好转。其他指标波动明显,代表着气候的激烈波动,尤其是粒度指标,中值粒径先是增大,后快速降到最低,最后又快速上升,分别对应着最老仙女木冷期(Oldest Dryas)、Bolling-Allerod暖期和新仙女木冷期(The Younger Dryas)。

全新世(8.7~1.7kaBP):磁化率值在剖面中最大,粒度总体较末次冰期记录的细,中值粒径值较

低,<4 μm 颗粒的百分含量变高,4~63 μm 和>63 μm 颗粒的百分含量变低。在8.7~6.4kaBP,磁化率值、湿润度、Rb/Sr值、Mg/Sr值快速增加到最大值,Bc、Mg/Al值快速减少到最小值,反映东亚夏季风增强到最强盛,降水增加,气候温暖湿润,表明靖边地区气候演化到达全新世适宜期。约6.4kaBP开始,磁化率值、湿润度快速减小,靖边地区全新世大暖期结束,气候逐渐恶化变冷干,这与南方石笋记录的东亚夏季风变化趋势相一致^[36,37]。

5 结论

(1) 靖边黄土剖面末次冰期以来的沉积存在千年尺度的沉积间断,沉积间断期为11300~8700a,千年尺度的沉积间断可能是气候快速变化引起的。

(2) 靖边黄土剖面的元素迁移顺序为 $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Si} > \text{Al} > \text{K} > \text{Fe}$,从A-CN-K图可以看出靖边剖面黄土风化物以黏土矿物为主,且处于初级风化阶段。

(3) 靖边黄土剖面记录了末次冰期以来气候经历了MIS3的相对温暖湿润期、末次冰盛期的极度冷干期、末次冰消期的气候好转期、全新世的温暖湿润期的变化过程。

参考文献 (References)

- [1] 刘东生,等.黄土与环境[M].北京:科学出版社,1985.[LIU Tungsheng, et al. Loess and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [2] 刘东生.黄土与干旱环境[M].合肥:安徽科学技术出版社, 2009.[LIU Tungsheng. Loess and Arid Environment [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2009.]
- [3] An Z S, Liu T S, Lu Y C, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in Central China[J]. Quaternary International, 1990, 7: 91-95.
- [4] 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[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1999, 152: 49-66.
- [5] 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 [J]. Nature, 2002, 416: 159-163.
- [6] Sun J M. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203: 845-859.
- [7] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon[J]. Science, 2004, 304: 575-578.
- [8] Guan H C, Zhu C, Zhu T X, et al. Grain size, magnetic susceptibility and geochemical characteristics of the loess in the Chaohu lake basin: Implications for the origin, palaeoclimatic change and provenance[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 117: 170-183.
- [9] 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. 科学通报, 1997, 42(1): 66-69. [LU Huayu, AN Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size composite of loess deposit in Luochuan[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(1): 66-69.]
- [10] 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), 1998, 28(3): 278-283. [LU Huayu, AN Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-paleosol deposit in Chinese Loess Plateau[J]. Science in China (Series D), 1998, 41(6): 626-631.]
- [11] 孙东怀, 鹿化煜, Rea D, 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 Donghuai, LU Huayu, Rea D, et al. Bimode grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 327-335.]
- [12] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 最近 2.6 Ma 中国北方季风环流与西风环流演变的风尘沉积记录[J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33(6): 497-504. [SUN Donghuai, AN Zhisheng, SU Ruixia, et al. Eolian sedimentary records for the evolution of monsoon and westerly circulations of northern China in the last 2.6 Ma[J]. Science in China (Series D), 2003, 33(6): 497-504.]
- [13] 纪友亮, 胡光明, 张善文, 等. 沉积层序界面研究中的矿物及地球化学方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(4): 455-460. [JI Youliang, HU Guangming, ZHANG Shanwen, et al. Mineralogical and geochemical methods in study of sedimentary sequence boundary[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(4): 455-460.]
- [14] Yang S L, Ding F, Ding Z L. Pleistocene chemical weathering history of Asian arid and semi-arid regions recorded in loess deposits of China and Tajikistan[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70: 1695-1709.
- [15] 程燕, 张小曳, 鹿化煜, 等. 最近 140ka 以来黄土元素地球化学演化及其古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 103-108. [CHEN Yan, ZHANG Xiaoye, LU Huayu, et al. Variations of elemental geochemistry in Chinese loess during the last 140 ka BP and their paleoclimatological implications [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(3): 103-108.]
- [16] 李铮华, 王玉海. 黄土沉积的地球化学记录与古气候演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(2): 41-47. [LI Zhenghua, WANG Yuhai. The geochemical record of loess deposit and paleoclimatic evolution[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 18(2): 41-47.]
- [17] 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 21-28. [YANG Shouye, LI Congxian. Characteristic element compositions of the Yangtze and the Yellow River sediments and their geological background [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(2): 21-28.]
- [18] 王成, 龚庆杰, 李刚, 等. 从南海沉积物中的主量元素比值变化看沉积物源区化学侵蚀变化[J]. 海洋地质动态, 2007, 23(1): 1-5. [WANG Chen, GONG Qingjie, LI Gang, et al. Chemical weathering changes in sediment source areas showed by changes in major element ratios of sediments of the South China Sea[J]. Marine Geology Letters, 2007, 23(1): 1-5.]
- [19] 毛沛妮, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对比[J]. 地理学报, 2017, 72(2): 279-291. [MAO Peini, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Chemical weathering characteristics and regional comparative study of the loess deposits in the upper Hanjiang River[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(2): 279-291.]
- [20] 顾兆炎, 韩家懋, 刘东生. 中国第四纪黄土地球化学研究进展[J]. 第四纪研究, 2000, 20(1): 41-55. [GU Zhaoyan, HAN Jiamao, LIU Tungsheng. Progress in geochemical research on the loess and other Quaternary deposits in China[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(1): 41-55.]
- [21] Sun J M, Ding Z L, Liu T S, et al. 580,000-year environmental reconstruction from aeolian deposits at the Mu Us Desert margin, China [J]. Quaternary Science Reviews, 1999, 18(12): 1351-1364.
- [22] 靳鹤龄, 董光荣, 苏志珠, 等. 全新世沙漠-黄土边界带空间格局的重建[J]. 科学通报, 2001, 46(7): 538-543. [JIN Heling, DONG Guangrong, SU Zhizhu, et al. Reconstruction of the Holocene spatial pattern in the desert-loess boundary belt [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(7): 538-543.]
- [23] 丁仲礼, 孙继敏, 刘东生. 上新世以来毛乌素沙地阶段性扩张

- 的黄土-红粘土沉积证据[J].科学通报,1999,44(3):324-326.
- [DING Zhongli, SUN Jimin, LIU Tungsheng, et al. Stepwise advance of the Mu Us desert since late Pliocene: Evidence from a red clay-loess record [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(13): 1211-1214.]
- [24] Stevens T, Lu H Y, Thomas D, et al. Optical dating of abrupt shifts in the Late Pleistocene East Asian monsoon [J]. Geology, 2008, 36(5): 315-418.
- [25] Stevens T, Armitage S J, Lu H Y, et al. Sedimentation and diagenesis of Chinese loess: Implications for the preservation of continuous, high-resolution climate records [J]. Geology, 2006, 34(18): 2253-2259.
- [26] Lv H Y, Stevens T, Yi S W, et al. An erosional hiatus in Chinese loess sequences revealed by closely spaced optical dating [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(18): 2253-2259.
- [27] Buyalaert J P, Vandenberghe D, Murray A S, et al. Luminescence dating of old (>70ka) Chinese loess: A comparison of single-aliquot OSL and IRSL techniques [J]. Quaternary Geochronology, 2007, 2(1): 9-14.
- [28] 丁仲礼,孙继敏,刘东生.联系沙漠-黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标[J].中国科学D辑,1999,29(1):81-87.[DING Zhongli, SUN Jimin, LIU Tungsheng. A sedimentological proxy indicator linking changes in loess and deserts in the Quaternary[J]. Science in China (Series D), 1999, 42(2): 146-152.]
- [29] 张永双,曲永新.陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J].工程地质学报,2005,13(1):18-28.[ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Cements of sand loess and their cementation in North Shaanxi and West Shanxi[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1): 18-28.]
- [30] 郭泽泽,李喜安,陈阳,等.基于SEM-EDS的湿陷性黄土黏土矿物定量分析[J].工程地质学报,2016,24(5):899-906.[GUO Zeze, LI Xi'an, CHEN Yang, et al. Analysis of clay minerals in collapsible loess with SEM-EDS[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5): 899-906.]
- [31] Gallet S, Jahn B M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications[J]. Chemical Geology, 1996, 133(1-4): 67-88.
- [32] 陈骏,汪永进,季峻峰,等.陕西洛川黄土剖面的Rb/Sr值及其气候地层学意义[J].第四纪研究,1999,19(4):350-356.[CHEN Jun, WANG Yongjin, JI Junfeng. Rb/Sr variations and its climatic stratigraphical significance of a loess-paleosol profile from Luochuan, Shaanxi Province[J]. Quaternary Sciences, 1999, 19(4): 350-356.]
- [33] 庞奖励,黄春长,刘安娜,等.黄土高原南部全新世黄土-古土壤序列若干元素分布特征及意义[J].第四纪研究,2007,27(3):357-364.[PANG Jiangli, HUANG Chunchang, LIU Anna, et al. Ba/Sr and Rb/Sr ratio of Holocene loess-paleosol sequences and its significance in South Loess Plateau, China [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(3): 357-364.]
- [34] 李拓宇,莫多闻,朱高儒,等.晋南全新世黄土剖面常量元素地球化学特征及其古环境意义[J].地理研究,2013,32(8):1411-1420.[LI Tuoyu, MO Duowen, ZHU Gaoru, et al. Geochemical characteristics of major elements and its paleoenvironmental significance of Holocene loess profile in southern Shanxi, China[J]. Geographical Research, 2013, 32(8): 1411-1420.]
- [35] 黄俊华,胡超涌,周群峰,等.长江中游和尚洞石笋的高分辨率同位素、微量元素记录及古气候研究[J].沉积学报,2002,20(3):442-446.[HUANG Junhua, HU Chaoyong, ZHOU Qun-feng, et al. Study on high-resolution carbon, oxygen isotope and trace element records and paleoclimate from Heshang Cave, the middle reach of the Yangtse River[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(3): 442-446.]
- [36] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate [J]. Science, 2005, 308(5723): 854-857.
- [37] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years[J]. Nature, 2008, 451(7182): 1090-1093.