

文章编号:1000-0550(2018)05-0937-09

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.138

甘肃天水全新世黄土—古土壤序列化学风化特征及其古气候意义

刘俊余, 查小春, 黄春长, 庞奖励, 周亚利, 李洋

陕西师范大学地理科学与旅游学院 地理学国家级实验教学示范中心, 西安 710062

摘要 对甘肃天水地区师家崖典型黄土—古土壤剖面化学元素的测定和分析结果表明:该剖面中氧化物 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 K_2O 和 Al_2O_3 含量变化趋势基本一致,均在古土壤层($S_{0上}$ 和 $S_{0下}$)中较高,黄土层(L_0 、 L_1 和 L_2)中较低;而氧化物 CaO 和 Na_2O 变化呈相反趋势;根据钙镁比(Ca/Mg)、钾钠比(K/Na)、淋溶系数、退碱系数、残积系数和化学蚀变系数(CIA)等化学参数的统计分析结果,揭示了古土壤层形成时期风化成壤作用强烈,黄土层堆积时期风化成壤作用微弱的规律;以Ti为参比,Si、Fe、K和Al相对富集,而Na和Ca发生不同程度的淋溶,总体处于脱Ca、Na的低等化学风化阶段;SJY剖面全新世以来的沉积环境分为化学风化较弱期、波动增强期和减弱期,记录了该区域气候经历了早全新世温凉、中全新世温暖湿润但不稳定,晚全新世凉干的演变过程,对天水地区的古气候变化具有重要意义。

关键词 黄土—古土壤;地球化学;师家崖;常量元素

第一作者简介 刘俊余,女,1994年出生,硕士研究生,土地资源开发与环境演变,E-mail: 1028180992@qq.com

通信作者 查小春,男,教授,E-mail: zhaxch@snnu.edu.cn

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

化学风化是地球表生环境相互作用的重要形式,对于揭示风成黄土成壤环境演变、古气候和古环境重建以及源区自然环境特征具有重要的作用^[1-3]。不同的化学元素因不同的化学活动性而发生分异,其富集和迁移规律不仅是风成黄土风化成壤的记录,而且又蕴含着其发生过程中古环境古气候的信息^[3]。目前,专家学者已对黄土高原^[4-7]、长江中游^[8]和淮河流域^[9]等地区黄土的地球风化特征做了深入研究,获得了大量的研究成果。而位于黄土高原西部缘区的天水市,是中国季风与西风交界的敏感地带,也是研究化学风化和气候演变的理想区域。诸多研究者对天水地区的气候演变研究少且主要集中在植物孢粉^[10]、磁化率^[4,10-12]、粒度和碳酸钙^[10-12]等理化性质的研究,但对于天水地区全新世黄土—古土壤序列的元素地球化学研究较少。本文通过对天水地区典型的黄土—古土壤剖面地球化学特征的研究,试图揭示天水地区全新世以来的化学风化特征及蕴含的古气候意义。

1 研究区域概况

天水市位于六盘山地、陇中黄土高原和秦岭山地交接处,处于中国季风与西风交界的敏感地带,对我国季风气候和全球气候变化的响应十分敏感。年平均降水量492 mm,年平均气温11.5℃,该区干旱少雨,属于季风气候西北部边缘区。区内植被稀疏,主要以耐旱的旱生植被为主,土壤以黑垆土为主。野外调查发现,横穿天水的藉河基岩台地上以及相对平缓的平地上和低洼区堆积着大量深厚的风成黄土,沉积连续无间断,发育良好。师赵村遗址位于藉河左岸的台地上,属仰韶文化遗址,野外调查时发现台地多处分布着大量的陶片,该遗址历史文化遗存丰富,发展脉络清晰,分布广泛(图1)。

2 剖面选择与研究方法

通过对甘肃天水的多次实地考察,选取的SJY剖面距著名的师赵史前文化遗址1 km。剖面所在地是典型的黄土台地,地层序列完整,层次清晰,马兰黄土以上部分完整出露。该处地势起伏小,平坦宽广,使

收稿日期:2017-10-31;收修改稿日期:2018-05-24

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金(GK201601006);国家自然科学基金项目(71471071)[Foundation:The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. GK201601006; National Natural Science Foundation of China, No. 71471071]

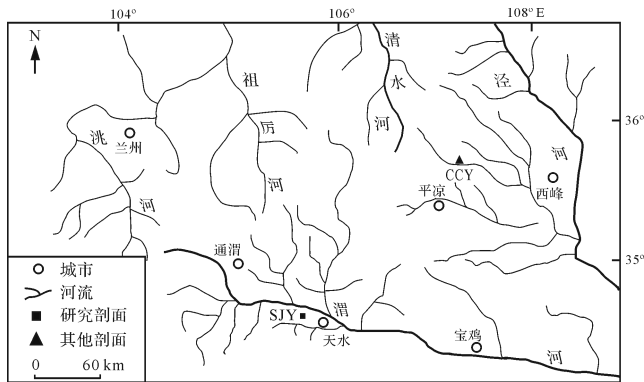


图1 研究区域示意图和采样点位置图

Fig.1 Schematic diagram and sampling site in the study area

得风成沉积物更好的保存下来,较少的受到水土流失的影响,虽然剖面顶端是大片的果园,人类耕作活动显著,但对整个剖面影响较小,保持了剖面的完整性。结合野外考察和室内的实验分析,将SJY剖面划分为7个层位:1)表土层(TS):16~0 cm 浅灰色,块状结构,多孔,多植物根系,多蚯蚓孔洞,较结实,以疏松不均匀为特征,属典型耕作土壤。2)全新世黄土层(L_0):50~16 cm 浊黄色,较疏松,团块结构,质地均匀,黏砂质地。3)古土壤层上部($S_{0上}$):80~50 cm 黑灰色,棱块状结构,十分疏松,富含有机质,出现典型文化层,红陶出现。4)弱土壤层(L_x):110~80 cm 浅灰黄色细粉砂,结构较疏松多孔,含少量白色钙核。5)古土壤层下部($S_{0下}$):120~110 cm 黑灰色,黏土质粉沙质地,团块结构,含有大量蚯蚓孔和粪便。6)过渡土壤层(L_1):140~120 cm 浊黄橙色,粉沙质地,向下逐渐变浅,有垂直虫孔裂缝。7)马兰黄土层(L_1):140 cm 以下,浊黄橙色,粉沙质地块状结构,典型的马兰黄土,未见底。

在野外详细观察剖面的宏观特征之后,从地表以每2 cm 厚度向下系统采样,至190 cm 共采集土样95个。同时,采集OSL样品3个,用于确定SJY年代框架。样品在室内风干后,于2017年3月将土样放入磨土机内研磨至200目以内,称取5 g 土样放入YY60X型压力机中,覆盖适量硼酸(H_3BO_3)压制圆片,用Panalytical公司生产的X-Ray荧光光谱仪进行测量(测定误差小于5%)。光释光测年技术采用单片再生剂量法(SAR),用丹麦生产的RIS TL/OSL-DA-20仪器测量,释光信号通过9235 QB15光电倍增管检测,滤光片为U340,以上实验均在陕西师范大学地理科学与旅游学院实验室完成。

3 地层年代分析

本文以光释光(OSL)测年结果为依据,结合地层年龄框架对比以及考古文化层的断代来确定剖面的年代框架(图2)。首先,SJY剖面与宁夏彭阳县长城源全新世典型剖面(CCY)^[13]的选取地点皆在黄土高原腹地西缘,六盘山以西,所处的地理环境相同。二者的剖面结构基本一致,尽管厚度有所差异,但各地层的颜色、质地、结构特征相似,说明两个剖面具有良好的可比性。另外,结合OSL测年结果, L_1 底部年龄为($10\ 524 \pm 491$) a,该年龄与CCY剖面^[13]和黄土高原典型剖面^[4-9]的 L_1 底部年龄(11 500 a B.P.)相一致,故将SJY剖面 L_1 与 L_1 分界年龄定为11 500 a B.P.。根据SJY剖面的颜色、结构和构造等野外宏观特征以及理化指标和成壤强度分析,可判定 $S_{0下}$ 与 L_1 的界限在120 cm处,SJY剖面与CCY剖面可良好对比,故将SJY剖面 $S_{0下}$ 的下界年龄确定为8 500 a B.P.。在 L_x 顶部80~85 cm的OSL年龄为($6\ 111 \pm 290$) a,并在 $S_{0上}$ 层的75~80 cm处发现师赵村四期文化层^[14]红色陶片(6 000~5 500 a B.P.),据此将 $S_{0上}$ 下部 L_x 的年龄确定为6 000~7 000 a B.P.之间。SJY剖面 $S_{0上}$ 顶部50~55 cm处的OSL年龄为 $3\ 250 \pm 220$ a,该年龄与CCY剖面的 $S_{0上}$ 顶部年龄3 100 a B.P.接近,因此,可将SJY剖面全新世黄土与古土壤年龄界定为

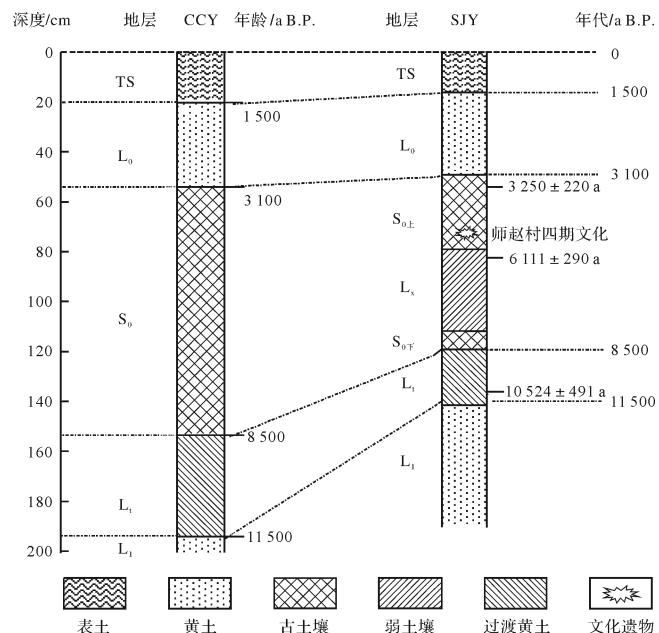


图2 天水SJY剖面与CCY剖面地层年代对比图

Fig.2 Pedostratigraphic correlations between the SJY profile and the CCY profile

3 100 a B.P.。

4 结果与分析

4.1 常量元素分布特征

首先将 SJY 剖面的常量元素含量与洛川黄土^[6]、关中黄土^[15]和地球上部陆壳(UCC)常量元素平均组成进行对比(图3),表明天水师家崖地区黄土在化学组分和构成方面与黄土高原洛川黄土和关中黄土相似,反映不同地区的沉积物在成因上具有相似性。另外,天水师家崖、关中和洛川地区的常量元素的 UCC 标准化曲线十分相似,除元素 Ca 外,其他元素变化几乎重合,均表现为 SiO₂、Fe₂O₃、K₂O 和 Al₂O₃ 接近于 1.00,没有明显亏损或者富集。而 Na₂O 明显位于 UCC 的下方,表现出明显的亏损状态,而 CaO 在这些区域表现明显的富集状态。这些共性暗示了不同地区(天水、关中和洛川)黄土可能具有相似的风成沉积基础。

常量元素指标的垂直差异反映了风成沉积物堆积后的环境变化^[13]。SJY 剖面常量元素氧化物 SiO₂、Al₂O₃ 和 CaO 三者相对含量较多,三者总和达 70%,常量元素平均含量(g/kg)顺序呈现 SiO₂(522.0 g/kg) > Al₂O₃(100.0 g/kg) > CaO(82.6 g/kg) > Fe₂O₃(42.0 g/kg) > K₂O(23.0 g/kg) > Na₂O(14.7 g/kg) 的规律。6 种常量元素的变异系数(CV)值均小于 6,说明黄土—古土壤序列的元素组成具有高度的一致性,主要的化学成分基本一致,即古土壤是黄土成壤改造的产物,来自相同的物源区^[16-17]。

从图4中可以看出,CaO、Na₂O 氧化物含量变化趋势相似,二者在黄土层含量较高,最低值则出现在 S_{0上},明显低于黄土层,说明在古土壤形成时期气候

温暖湿润,降水丰富,化学风化强烈,CaO 和 Na₂O 发生迁移淋失,表现出不同程度的亏损。就二者的变化曲线来看,CaO 曲线的变化趋势比 Na₂O 明显,波动程度较大,在 S_{0上} 出现凹谷(图4),在 L_x 出现凸峰,说明全新世大暖期气候波动明显,而 CaO 的变异系数也比 Na₂O 略大,说明 Na₂O 对风化成壤变化的敏感性较弱。

SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 K₂O 四者含量的变化趋势基本一致。除 TS 外,最高值均出现在 S_{0上},分别为 531.1 g/kg、102.2 g/kg、53.5 g/kg、24.3 g/kg,其四者的含量在古土壤层高于黄土层,表现为相对富集,说明风化成壤过程中,易溶性元素 Ca 和 Na 大量迁移淋溶,导致 Al、Si、Fe 和 K 表现出相对富集的特征。L₁ 中 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 K₂O 含量略高于 L₁,但是变化不明显;在 L_x 中四者元素波动幅度较大,均呈现出双峰状曲线,其中在 90~80 cm、110~100 cm 处存在低值区, SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 K₂O 平均含量分别为 518.7 g/kg、99 g/kg、41.6 g/kg 和 23 g/kg。L₀ 的含量较低,分别为 519.8 g/kg、99.9 g/kg、42.0 g/kg、23.1 g/kg。TS 波动较大,可能受现代人类活动影响。

从图4分析可知,各常量元素含量的波动变化与黄土—古土壤序列交替发育相对应,说明黄土堆积时期气候寒冷干燥,降水稀少,不利于生物活动,化学风化作用微弱,易溶性元素 Ca 和 Na 淋溶较弱,属于缓慢脱盐基阶段;而古土壤发育时期,气候温暖湿润,水热状况良好,适合植物生长,生物活动频繁,易溶性元素 Ca 和 Na 淋溶强烈, SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 K₂O 富铁铝化较强,化学风化作用显著, L_x 形成时期,存在着气候波动,气候冷暖变化频繁。

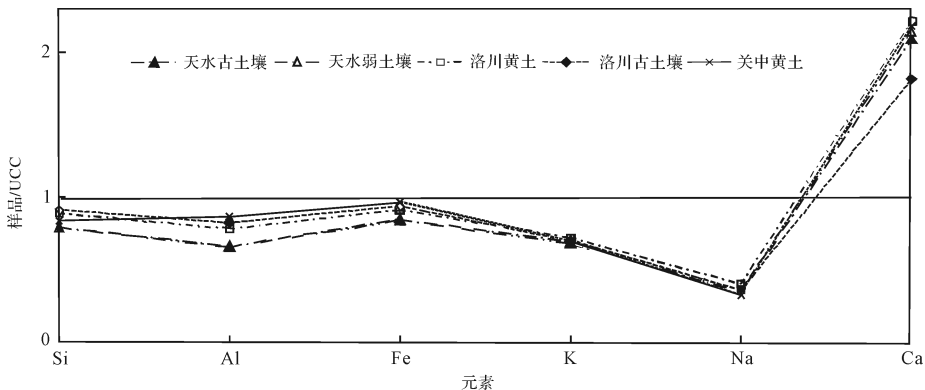


图3 天水师家崖及洛川、关中黄土常量元素的 UCC 标准化曲线图

Fig.3 UCC-normalized pattern of major elements of the loess in Shijiaya of Tianshui city and its comparison with that of the Luochuan and Guanzhong loess

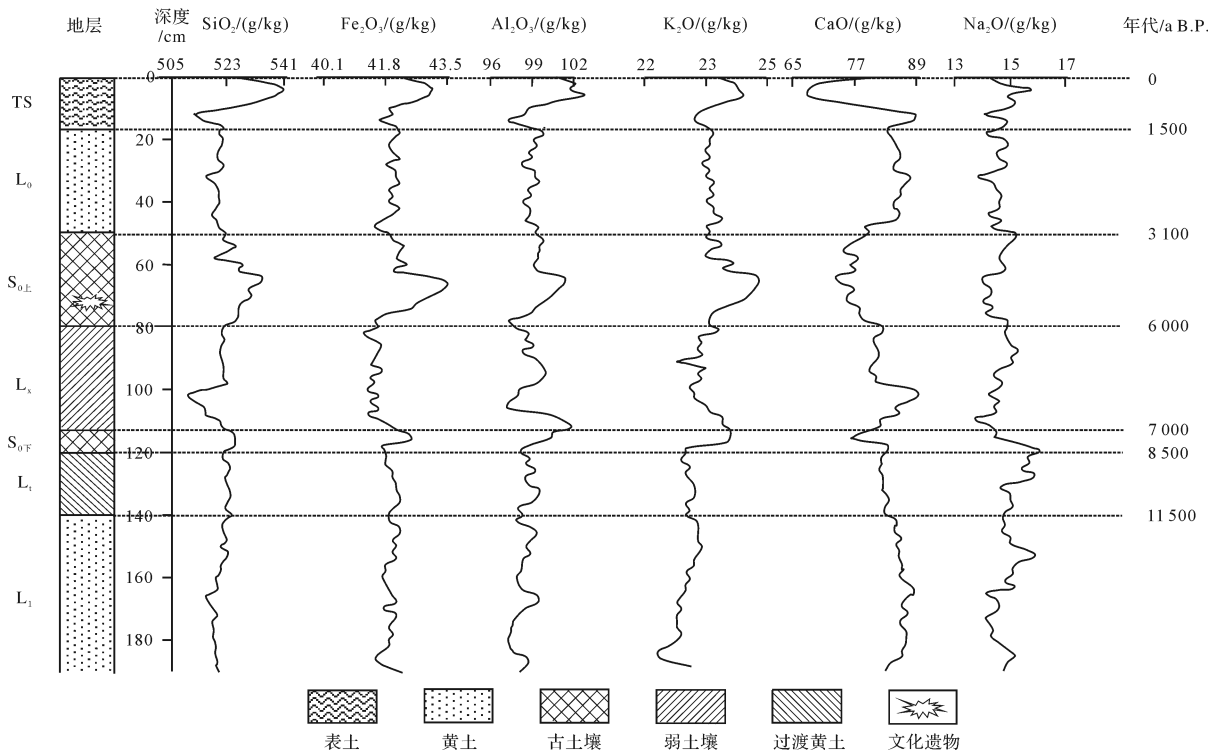


图4 SJY剖面常量元素分布曲线图

Fig.4 Diagrams showing of major chemical compositions at SJY profile

4.2 地球化学风化参数

沉积物中常量元素的化学参数可以反映气候的干湿冷暖状况,指示元素的迁移程度,较单个常量元素,地球化学参数能更好的反映沉积物的风化程度和气候演变规律^[18-22]。

钙镁比(Ca/Mg)揭示了碱土矿物Ca和Mg的分异程度,是在风化过程中迁移能力和速度的表现^[23]。在SJY剖面中(图5),110~50cm处峰谷交错,波动明显,除TS外,最低值出现在S_{0上},最小值为3.12;最高值出现在L_x,最大值为3.92;而L_x波动明显,凸凹交错。古土壤形成时期气候温暖湿润,水热条件优越,风化淋溶作用强,Ca和Mg都发生淋失迁移,二者分异不明显,弱土壤形成时期气候不稳定,冷暖波动;而黄土堆积期气候寒冷干燥,风化作用微弱,活动性较强的Ca淋失较多。

钾钠比值(K/Na)是揭示黄土—古土壤序列中斜长石风化程度的常用指标^[24]。K在元素周期表中的位置决定了它属于易溶性元素,易随矿物的风化成壤作用而发生淋溶迁移。但由于钾离子半径较大,容易被土壤吸附,所以钾在土壤中的富集程度大于Na。S_{0上}中出现一个明显峰值(图5),这是由于斜长石的风化速度远远大于钾长石且在温暖湿润环境下,Na

的淋溶速度远远超过K,此外,L_x处110~100cm处出现凹谷,且随剖面自下而上呈波动性减小后增大的趋势,这是由于S_{0上}中Na遭受较强淋溶作用向下迁移堆积形成的。K/Na说明古土壤形成时斜长石被强烈分解,Na强烈淋溶,指示较强的化学风化作用;而在黄土层出现低值指示较低的风化作用。

淋溶系数(CaO + K₂O + Na₂O)/Al₂O₃和退碱系数(Na₂O+CaO)/Al₂O₃常常用来反映黄土化学风化过程中Ca和Na等易溶性元素的淋溶迁移状况,残积系数常常反映的是稳定性元素Si、Al相对富集或沉积的程度,三者均反映的是元素活性组分与惰性组分的关系,与气候密切相关^[4]。一般来说,随着气候湿润程度的加深和风化成壤作用的增强,CaO、K₂O和Na₂O淋溶作用强烈,而Al₂O₃和Fe₂O₃等元素相对沉积,因而残积系数与风化成壤强度呈正比关系,而淋溶系数和退碱系数则呈反比。SJY剖面中的淋溶系数介于1.03~1.28之间,其中最低值(1.03)出现在TS,这与人类活动密切相关。次低值(1.10)出现在S_{0上},而最高值出现在L_x。退碱系数在垂直方向上表现出相似的变化趋势,黄土层较高,低值出现在古土壤层;而残积系数变化规律与淋溶系数、退碱系数相反,在S_{0上}80~60cm处出现波峰,在L_x中100~110cm

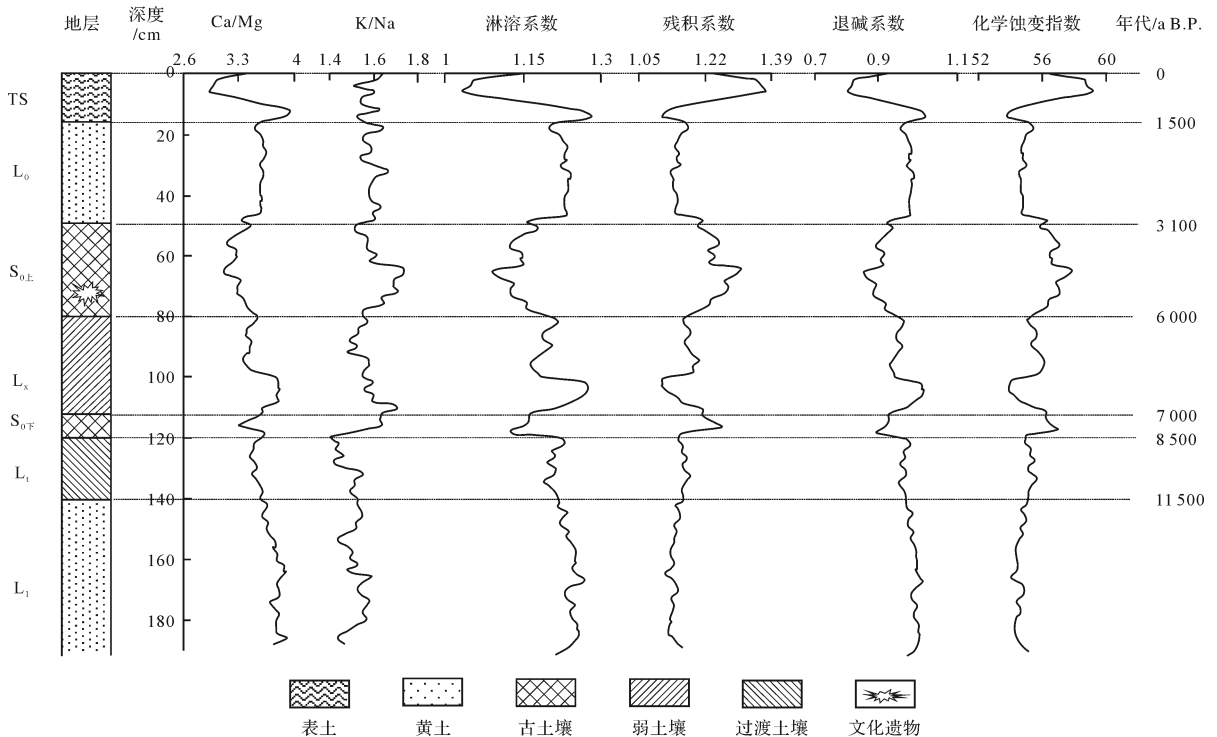


图5 天水 SJY 剖面地球化学风化参数曲线图

Fig.5 Diagrams showing the curves of geochemical weathering parameters of SJY profile in Tianshui city

处出现凹谷, SJY 剖面中的黄土层的残积系数较高于 $S_{0上}$ 和 $S_{0下}$, 这些特征均说明了古土壤形成时期夏季风盛行, 气候温暖湿润, 化学风化成壤作用强烈, 斜长石、钾长石等矿物强烈风化, 易溶元素 Ca, Na 等大量淋溶散失、迁移堆积, Fe、Al 等稳定性元素富集程度高, 而黄土堆积时期, 易溶元素的迁移淋溶能力微弱。

化学蚀变指数 (CIA) 可以指示长石风化成黏土矿物的程度, 是研究大陆黄土化学风化程度的定性指标^[16]。计算公式为: $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + K_2O + Na_2O)] \times 100$ 。公式之中, 氧化物均为分子摩尔数, CaO^* 为硅酸盐相, CaO^* 的计算采用 McLennan (1993) 的方法。前人研究认为^[4, 16], CIA 值处于 50~65 之间反映寒冷、干燥的气候条件下低等的化学风化程度; 处于 65~85 之间反映温暖湿润的气候条件下中等的化学风化水平; 处于 85~100 之间反映炎热条件下的高等的化学风化程度。从图 5 来看, SJY 剖面 CIA 值介于 53.94~58.66 之间, 表明天水师家崖地区受到的风化程度较低。剖面中不同层位 CIA 值变化的实质上反映了黄土在堆积过程中的风化成壤强度的差异, 虽同属于低等的化学风化水平, 但风化程度各层位也有所差异, 大致呈现 L_1 最低、 L_1 略有上升、 L_x 波动下降, $S_{0上}$ 达到高值, L_0 又降低的规律, 而 TS

达到最高值应该与人类活动有直接关系。另外, 古土壤含量值明显高于黄土层, 说明古土壤形成过程中, 风化成壤作用强烈, 长石矿物遭受强烈的蚀变, Na 和 Ca 等碱土矿物迁移淋失强, 长石转化为黏土矿物多, 指示温暖湿润的气候, 利于风化成壤。而 L_x 波动下降, 出现凹谷, 指示当时气候干冷, 有可能出现气候波动, 风化程度低。SJY 剖面整体的 CIA 平均值为 57.67, 明显高于 UCC 的平均值 (47.80), 低于洛川黄土 (63.73)^[7]、关中黄土 (65.44)^[15] 和陆源页岩 (70.36)^[15], 由此可以得出典型沉积物的风化强度序列, 由强到弱依次为: 陆源页岩 > 关中黄土 > 洛川黄土 > 天水师家崖黄土 > UCC。关中黄土的风化程度基本上处于温暖湿润的气候条件下中等的化学风化水平。与关中黄土相比, SJY 剖面的黄土—古土壤序列整体上经历了较弱的化学风化过程, 处于低等风化的阶段, 总体较关中黄土的风化程度弱, 反映了天水地区的气候形成于寒冷干燥的背景。

4.3 常量元素迁移序列

元素绝对含量的增加和减少并不能真实的反映风化成壤过程中元素的迁移和富集情况, 这是因为各元素在风化成壤过程中, Ca、Na 等活动性元素的淋溶会造成 Fe、Al 等稳定性元素浓度的增加, 为了消除此

影响,常常采用某一稳定性元素(Ti、Al)作为参照,计算样品中其他元素的变化率来获知元素的迁移状况^[18-22]。本文选择Ti作参比元素,选取剖面中风化作用最弱的马兰黄土为参比标准,计算 $S_{0上}$ 和 L_x 中其他元素的迁移率,计算公式为: $\Delta = [(X_s/I_s)/(X_p/I_p) - 1] \times 100$ 。其中 X_s 、 I_s 分别代表样品中元素X和Ti的含量; X_p 、 I_p 分别代表 L_1 层的元素X和参比元素Ti的含量。当 $\Delta < 0$ 时,反映元素X在该层中相对于Ti迁出;反之,代表元素X相对富集^[20]。

从图6可知,相对于稳定元素Ti, $S_{0上}$ 和 L_x 中的Fe、Al、K、Si的 Δ 值 > 0 ,表现出轻微的富集程度,活动性较弱;Ca、Na元素发生不同程度的淋溶迁移。在 $S_{0上}$ 常量元素在化学风化过程中活动性顺序与迁移能力大小为 $K > Si > Fe > Al > Ca > Na$, L_x 的迁移能力大小为 $Si > Fe > Al > K > Na > Ca$ 。除Ca和Na外,常量元素均以富集为主,但富集程度较低且变化幅度小,表明全新世以来天水黄土—古土壤序列的沉积环境较为干旱。

5 风化成壤强度与气候演变

前人研究表明,黄土—古土壤序列中元素组分的含量变化和分布特征记录着黄土沉积和成壤过程中的气候信息^[23-25]。根据天水SJY剖面地球化学元素和地球化学参数变化特征,将SJY剖面全新世以来的沉积环境分为三个阶段:

全新世早期(11 500~8 500 a B.P.),140~120 cm的 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 K_2O 等稳定性元素相比 L_1 含量略有增加,但是变化并不明显。淋溶性元素Ca变化趋势微弱,而Na元素呈现显著增加趋势。化

学蚀变指数、残积系数和钾钠比值有所升高,而淋溶系数、退碱系数和钠镁比值均降低,这些变化均表明 L_1 形成时期化学风化程度略有增强,风化成壤作用仍然很低,黄土的堆积速度大于成壤速度,指示在末次冰期结束之后,天水地区虽由寒冷干燥向温暖湿润转变,但水热组合状况限制了风化成壤作用。由成壤特征反映全新世早期该区气候仍然湿冷,难以发生显著的风化成壤改造作用,处于化学风化的较弱期。该时期的环境特征与甘肃北道^[11]、天水谢家湾^[12]和甘肃通渭^[16]气候具有一致性,气候开始向温暖转变。

全新世中期(8 500~3 100 a B.P.),对应于 $S_{0上}$ 、 $S_{0下}$ 和 L_x ,110~50 cm的 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 K_2O 等氧化物出现最高值,而淋溶性元素Ca和Na呈相反趋势。化学蚀变系数、残积系数和钾钠比为全剖面最高值,呈现先增大后减小最后增大的趋势,而淋溶系数、退碱系数和钠镁比呈低值,呈现先减小后增大最后减少的趋势。这些数值综合反映全新世中期气候波动明显,谷峰交替出现,但是该时期总体上是温暖湿润的,风化成壤作用占优势。然而,从各元素和元素参数波动变化来看,在110~80 cm, Si、Fe等稳定性元素明显降低, Ca和Na等元素出现凸峰,除淋溶系数、退碱系数外, CIA、钾钠比等化学参数呈现明显下降趋势,这可能存在气候波动。付淑清对甘肃北道全新世剖面^[10]进行研究认为全新世中期处于总体温湿的大背景下,存在着频繁的气候波动(6 900~7 300 a B.P.)^[12],另外他又提出在全新世大暖期经历过一次历时千年之久的气候波动事件^[16]。另外,舒培仙等^[26]根据腹足类动物化石和湖沼相地层中石英砂粒表面电镜扫描得出6 590~6 000 a B.P.存在

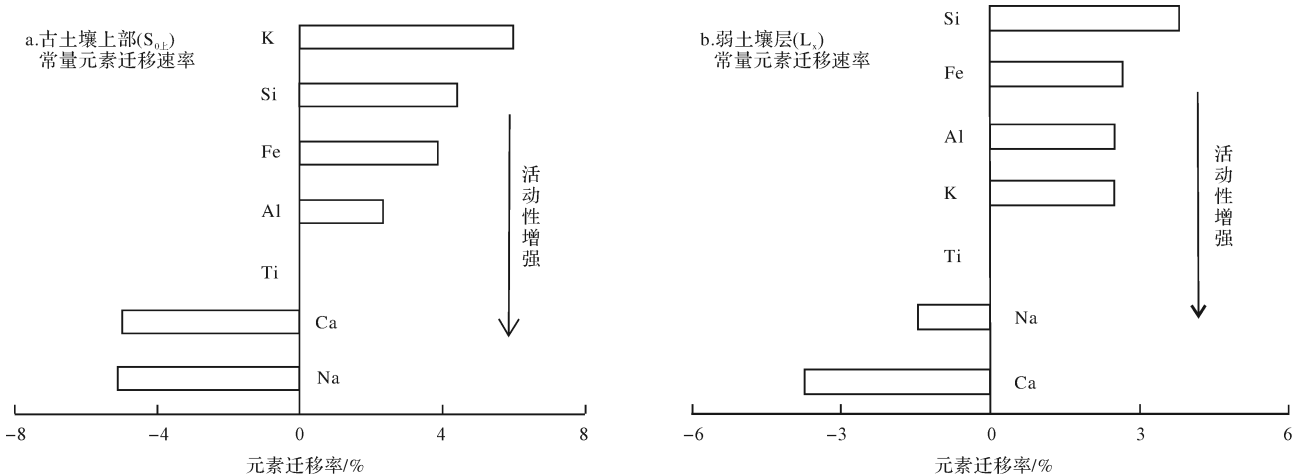


图6 SJY剖面常量元素相对于Ti的迁移率

Fig.6 Migration ratio of major elements of the SJY profile Loess calculated relative to the stable element Ti

气候变冷事件。吴永红^[27]揭露了在千年尺度的气候旋回上,长江三角洲存在有多次突变寒冷气候事件,其主要发生时间为7 600~5 800 a B.P.。很多研究^[3,28]都已经证实了全新世中期气候并非连续稳定温暖湿润的,而是存在气候波动,气候寒冷干燥。天水地区全新世中期的气候变化与中国其他地区气候环境演变具有较好的吻合性,在气候波动事件上不仅具有区域性而且也具有全球性。

全新世晚期(3 100 a B.P.以来)对应于 L_0 ,在50~16 cm的 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 K_2O 等稳定性元素相比 S_{0L} 有所下降,而淋溶性元素Ca,Na呈增加趋势。CIA、残积系数和钾钠比数值波动减小,这些数值综合揭示了气候由暖湿向凉干转变的过程,降水显著减少,温度降低,水热组合状况限制了化学风化的进行,化学成壤作用减弱。这与前人的结论基本一致:胡梦珺等^[17]提出玛曲高原自3 500~1 600 a B.P.期间气候由凉润向凉干过渡,降水稀少,风化成壤作用微弱;毛沛妮等^[4]认为全新世晚期东亚季风格局发生转变,冬季风强盛,气候转为凉干,发生了微弱的成壤改造作用。

6 结论

(1) 天水SJY剖面与关中和洛川地区的常量元素的UCC标准化曲线相似,表明天水、关中和洛川黄土具有相似的风成沉积基础。剖面中 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 K_2O 和 Al_2O_3 含量变化趋势基本一致,均在古土壤层中较高,黄土层中较低;而CaO和 Na_2O 含量变化呈相反趋势。

(2) 钙镁比、淋溶系数、退碱系数变化趋势基本一致,在古土壤中较高,黄土层较低;钾钠比、残积系数和化学蚀变系数等化学参数呈现相反的趋势,表明古土壤层形成时期的风化成壤作用强烈,黄土层堆积时期风化成壤作用微弱。

(3) 常量元素在化学风化过程中活动性顺序与迁移能力大小为 $K > Si > Fe > Al > Ca > Na$ 。不同地层的风化成壤规律为 L_1 较低 $\rightarrow L_1$ 升高 $\rightarrow L_x$ 较弱 $\rightarrow S_{0L}$ 增强 $\rightarrow L_0$ 减弱的规律,记录了该区域气候经历了早全新世温凉、中全新世温暖湿润与气候波动并存和晚全新世凉干的气候演变过程。

参考文献(References)

[1] 刘东生,卢演涛,郑洪汉. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985.[Liu Tungsheng, Lu Yanchou, Zheng Honghan. Loess and

environment[M]. Beijing: Science Press, 1985.]

- [2] 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京:科学出版社,1989.[Wen Qizhong. Geochemistry in Chinese loess[M]. Beijing: Science Press, 1989.]
- [3] 王绍武. 全新世气候变化[M]. 北京:气象出版社,2011:43-136.[Wang Shaowu. Holocene climate change[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011: 43-136.]
- [4] 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.]
- [5] 宋佃星,马莉. 西安少陵塬晚更新世黄土常量元素地球化学特征与气候变化研究[J]. 江西农业学报,2015,27(4):33-36.[Song Dianxing, Ma Li. Researches on geochemical characteristics of major elements in Late Pleistocene loess in Shaoling tableland of Xi'an and climatic changes[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, 27(4): 33-36.]
- [6] 牛晓露,庞奖励,黄春长,等. 陕西周原地区全新世黄土—古土壤序列风化程度研究[J]. 干旱区研究,2011,28(2):306-312.[Niu Xiaolu, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Study on weathering degree of Holocene loess-paleosol sequence in the Zhouyuan region, Shaanxi province[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(2): 306-312.]
- [7] 陈骏,季峻峰,仇刚,等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究[J]. 中国科学(D辑):地球科学,1997,27(6):531-536.[Chen Jun, Ji Junfeng, Qiu Gang, et al. Geochemical studies on the intensity of chemical weathering in Luochuan loess-paleosol sequence, China[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 1997, 27(6): 531-536.]
- [8] 龙进,贾玉连,张智,等. 末次冰期以来鄱阳湖北缘下蜀黄土常量元素地球化学特征及其物源指示[J]. 沉积学报,2015,33(5):932-940.[Long Jin, Jia Yulian, Zhang Zhi, et al. Geochemical characteristics of loess from northeast of Poyang Lake since Last Glacial and its provenance implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(5): 932-940.]
- [9] 李新艳,黄春长,庞奖励,等. 淮河上游全新世黄土—古土壤序列元素地球化学特性研究[J]. 土壤学报,2007,44(2):189-196.[Li Xinyan, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. Geochemical characteristics of elements in Holocene loess-paleosol profile in the upper-reaches of the Huaihe River basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 189-196.]
- [10] 黄春长. 甘肃秦安大地湾遗址植被气候变迁[J]. 地理科学,1991,11(4):328-335.[Huang Chunchang. The change of vegetation and climate at Dadiwan Neolithic site in Qinan county, Gansu province[J]. Scientia Geographica Sinica, 1991, 11(4): 328-335.]
- [11] 付淑清,陈淑娥,李勇,等. 渭河中上游地区全新世气候不稳定性初步研究[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(7):85-89.[Fu Shuqing, Chen Shue, Li yong, et al. Primary study on the environ-

- mental instability during Holocene in the upper and middle reaches of Weihe River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(7): 85-89.]
- [12] 付淑清,陈淑娥,魏明建,等. 天水谢家湾全新世环境变迁及人地关系演化[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(2): 81-84, 94. [Fu Shuqing, Chen Shue, Wei Mingjian, et al. Environmental transition and the evolution of the human-earth relationship during Holocene Epoch in Tianshui area[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(2): 81-84, 94.]
- [13] 杨红瑾,黄春长,庞奖励,等. 宁夏长城塬全新世黄土—土壤剖面元素地球化学特征研究[J]. *地理科学*, 2010, 30(1): 134-140. [Yang Hongjin, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. Geochemical characteristics of Holocene loess-soil profile on Changchengyuan loess tableland of Ningxia[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(1): 134-140.]
- [14] 张力刚. 试论大地湾、西山坪、师赵村遗址下层文化的相互关系[J]. *福建文博*, 2015(4): 13-16. [Zhang Ligang. Discusses the interrelation of the lower level culture of Dadiwan, Xishanping and Shizhaoya[J]. *Fujian Wenbo*, 2015(4): 13-16.]
- [15] 丁敏,庞奖励,黄春长,等. 关中东部全新世黄土—古土壤序列常量元素地球化学特性研究[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(4): 862-867. [Ding Min, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Geochemical characteristics of major elements in Holocene loess-paleosol sequence in the eastern Guanzhong Basin, Shaanxi, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(4): 862-867.]
- [16] 付淑清,陈淑娥,魏明建,等. 甘肃通渭县黄土堆积区全新世环境变迁[J]. *地球科学与环境学报*, 2005, 27(4): 71-74, 78. [Fu Shuqing, Chen Shue, Wei Mingjian, et al. Environmental changes during Holocene Epoch in loess area in Tongwei county of Gansu province[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2005, 27(4): 71-74, 78.]
- [17] 胡梦珺,左海玲,潘宁惠,等. 中晚全新世以来玛曲高原的化学风化过程演变[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 623-635. [Hu Mengjun, Zuo Hailing, Pan Ninghui, et al. Evolution of chemical weathering process since the Middle-Late Holocene in the Maqu Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(3): 623-635.]
- [18] 毛沛妮,庞奖励,黄春长,等. 汉江上游归仙河口剖面地球化学特性及其意义[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(1): 98-104. [Mao Peini, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Geochemical characteristics of Guixianhekou Profile in the upper Hanjiang River valley and its significance[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(1): 98-104.]
- [19] 张文桐,庞奖励,周亚利,等. 湖北郧西县鹿家湾剖面粒度组成特征及其环境意义[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(12): 1910-1916. [Zhang Wentong, Pang Jiangli, Zhou Yali, et al. Grain size distribution and its signification in Tuojiawan Profile, Hubei province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(12): 1910-1916.]
- [20] 楚纯洁,赵景波. 西安少陵塬黄土—古土壤序列 S₃ 剖面元素迁移及古气候意义[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 311-321. [Chu Chunjie, Zhao Jingbo. Element migration in S₃ profile of the Shaolingyuan loess-paleosol sequence in Xi'an and its paleoclimatic implication[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 311-321.]
- [21] 张智,贾玉连,彭学敏,等. 赣北鄱阳湖地区黄土元素地球化学特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(8): 1125-1131. [Zhang Zhi, Jia Yulian, Peng Xuemin, et al. The study of chemical weathering intensity in north Poyang Lake region[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(8): 1125-1131.]
- [22] 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.]
- [23] 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.]
- [24] 高鹏坤,庞奖励,黄春长,等. 陕西省丹凤县茶房村黄土—古土壤剖面风化程度及对气候变化的响应[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5): 1248-1253. [Gao Pengkun, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Weathering intensity of the Chafangcun loess-paleosol profile in Shaanxi, China and its response to climate change[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(5): 1248-1253.]
- [25] 曹兴山. 甘肃第四纪古地理环境[J]. *甘肃地质学报*, 1996, 5(2): 40-56. [Cao Xingshan. The quaternary paleogeographic environment of Gansu province[J]. *Acta Geologica Gansu*, 1996, 5(2): 40-56.]
- [26] 舒培仙,李保生,牛东风,等. 毛乌素沙漠东南缘滴哨沟湾剖面 DGS1 层段粒度特征及其指示的全新世气候变化[J]. *地理科学*, 2016, 36(3): 448-457. [Shu Peixian, Li Baosheng, Niu Dongfeng, et al. Climate variations recorded by the grain-size from the DGS1 segment in the southeast of China's Mu Us desert during the Holocene[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3): 448-457.]
- [27] 吴永红. 长江三角洲与贵州草海地区全新世环境变化对比研究[D]. 上海:华东师范大学, 2012. [Wu Yonghong. Comparative study on Holocene environmental change of Yangtze River delta and Caohai in Guizhou[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.]
- [28] 吴利杰,石建省,毕志伟,等. 平凉大寨剖面早中全新世气候不稳定性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(9): 129-133. [Wu Lijie, Shi Jiansheng, Bi Zhiwei, et al. High resolution studies on climate change and instability during the early and Middle Holocene in Pingliang area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(9): 129-133.]

Chemical Weathering Characteristics and Its Climate Significance of Holocene Loess-paleosol Sequence in Tianshui of Gansu Province

LIU JunYu, ZHA XiaoChun, HUANG ChunChang, PANG JiangLi, ZHOU YaLi, LI Yang

School of Geography and Tourism, National Experimental Teaching Demonstration Center, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

Abstract: The analysis of major elements in samples from the Shijiaya (SJY) profile in Tianshui of Gansu Province, China showed the similar curves trend of SiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O , and Al_2O_3 , with relatively high concentration all in the paleosol layer while lower in the loess. However, the variation tendency of CaO and Na_2O were different from that of SiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O and Al_2O_3 . Some typically chemical parameters in the SJY Profile such as K/Na ratio, Ca/Mg ratio, residual coefficient, leaching coefficient, the chemical index of alteration (CIA) indicated that chemical weathering was strong during the paleosol deposition and weak during the loess loading. Chemical activity of various elements on the section showed obvious variability. Compared to the stable element Ti, other major elements such as Ca and Na were migrated and leached, while the elements Si, Fe, K and Al were enriched, probably indicating some incipient stage of chemical weathering. The chemical weathering process of the Shijiaya profile could be divided into three stages, the stage of regional chemical weathering was relatively weaker, then it was unsteadily stronger and finally became weaker and weaker. The climate was cool in early Holocene (11 500-8 500 a B.P.), generally warm and humid during mid Holocene (8 500-3 100 a B.P.), and then became no stable with climatic fluctuation at 7 000-6 000 a B.P.. In the late Holocene (3 100 a B.P.-today), the climate entered a period of relatively cool with less rain.

Key words: loess-paleosol sequence; geochemistry; Shijiaya; major element