

文章编号: 1000-0550(2017)03-0508-08

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.03.009

# 汉江上游庾家湾剖面化学风化特征及其意义

张文桐, 庞奖励, 黄春长, 周亚利, 查小春, 崔天宇, 王海燕, 杨丹

陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062

**摘要** 通过对庾家湾黄土剖面元素的分析, 揭示汉江上游地区黄土中常量元素的地球化学行为及对气候变化的响应。用 X-Ray 荧光光谱仪、MS-2 型磁化率仪分别测量了庾家湾剖面元素含量及磁化率值, 实验结果显示: 庾家湾剖面的风成黄土化学成分以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为主, 三者含量分别为 355.83 g/kg、79.62 g/kg、62.64 g/kg; 以 Ti 为参比, Na、Ca、Mg、Si、K 表现为迁移淋失, Fe、Al 元素相对富集, 元素的活动性及其迁移序列为  $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Si} > \text{K} > \text{Al} > \text{Fe}$ ; Fe 和 Al 元素含量曲线及 CIA 曲线在 228~260 cm ( $L_1 \sim S_1$ ) 和 294~370 cm ( $L_1 \sim S_2$ ) 深度处出现明显的峰值, 并与磁化率曲线呈现出高度一致性, 指示该层化学风化程度明显高于典型黄土, 接近于古土壤 ( $S_0$ ), OSL 年龄在 27.5~21.5 ka B.P. 之间。庾家湾剖面常量元素在剖面的变化, 表明在汉江上游地区晚更新世末期的气候并非是持续干燥寒冷, 而是存在一定的气候波动, 在 27.5~21.5 ka B.P. 期间风化成壤作用较为明显, 气候相对温暖湿润。

**关键词** 常量元素; 化学风化; OSL 年龄; 气候变化; 汉江上游

**第一作者简介** 张文桐, 男, 1991 年出生, 硕士研究生, 土地利用和气候变化, E-mail: 978696657@qq.com

**通讯作者** 庞奖励, 男, 教授, E-mail: jlpang@snnu.edu.cn

**中图分类号** P512.1 **文献标识码** A

## 0 引言

风成黄土的地球化学元素特征清楚的记录了自黄土风成沉积以来的化学风化过程及其反映的气候变化, 通过分析黄土中地球化学元素的淋溶迁移和富集状态, 可以有效地重建黄土—古土壤的化学风化程度及成壤演变过程<sup>[1-10]</sup>。前人在黄土高原地区对黄土—古土壤序列的地球化学元素进行深入研究, 已获得大量研究成果<sup>[7, 11-14]</sup>, 发现在晚更新世末期曾存在一定的气候波动。经调查研究发现在秦岭南侧同样存在大量风成黄土, 不同的研究者采用不同的研究手段对其进行研究<sup>[15-19]</sup>, 但是研究程度不高, 尚未发现晚更新世末期气候波动的证据。本文从地球化学元素方面进行分析, 试图揭示自晚更新世以来气候变化, 找到晚更新世末期气候波动的证据, 完善区域环境变化的资料。

## 1 区域概况

### 1.1 研究区域

汉江位于秦岭南侧, 为长江最大的支流, 属北亚热带北部湿润季风气候区, 年均降水 873 mm, 降雨集中在 5—10 月份。汉江流经陕西、湖北两省, 由西向

东依次经过汉中、安康、十堰、襄阳, 于武汉汇入长江。其河谷深切于基岩之中, 河道蜿蜒曲折, 峡谷与盆地交替出现。沿河两岸发育有四级阶地, 其中一级河流阶地最为平坦宽缓, 堆积了厚度不等的厚层黄土, 受流水侵蚀较弱, 保存完整, 呈现为面积不等的平坦黄土台地。

### 1.2 研究材料

本文选择庾家湾 (TJW) 剖面为研究对象, 位于湖北郧县观音镇垭子湾村, 汉江左岸一级河流阶地上 (图 1)。该地点由于当地人为活动, 形成了新鲜的垂直断面, 一级阶地河流相及其上覆盖层暴露出来, 清晰可见厚层黄土覆盖于砾石层上。对其进行详细观察并未发现明显的沉积间断。

根据野外考察并结合室内实验数据, 将 TJW 剖面从上向下依次划分为: 1) 0~30 cm, 表土 (MS), 浊棕色 (7.5YR6/3), 黏土粉砂质地, 团粒构造, 疏松多孔, 多植物根系。2) 30~66 cm, 近代黄土 ( $L_0$ ), 浊黄橙色 (10YR7/4), 粉砂质地, 团块—块状构造, 结构均匀, 比较疏松, 具有明显的成壤特征。3) 66~160 cm, 古土壤 ( $S_0$ ), 亮棕色—红棕色 (5YR5/6—5YR5/4), 黏土质地, 典型的棱块状构造, 致密紧实, 比较坚硬, 裂隙面有大量暗棕色黏土胶膜沉淀, 结构体内部仍为

收稿日期: 2016-03-31; 收修改稿日期: 2016-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271108, 41371029); 国家社会科学基金项目 (14BZS070); 中央高校基本科研费 (GK201601006) [Foundation: National Nature Science Foundation of China, No.41271108, 41371029; National Social Science Foundation of China, No.14BZS070; Fundamental Research Funds for Central Universities, No.GK201601006]

棕

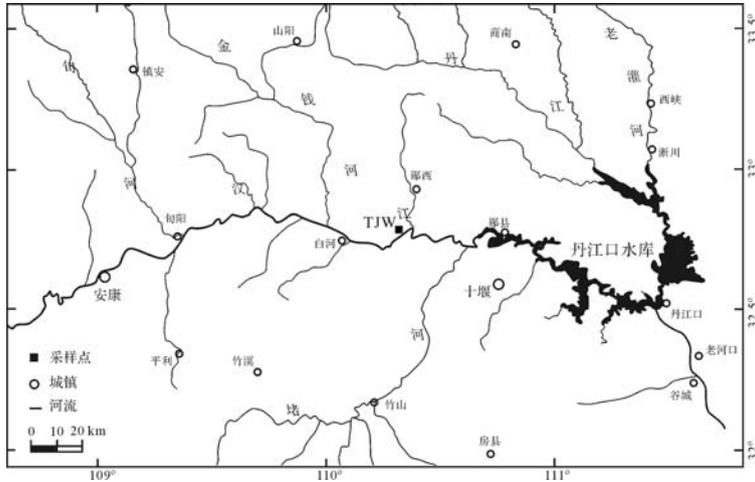


图1 汉江上游谷地采样点分布图

Fig.1 The distribution map of sample points in the upper reaches of Hanjiang valley

色。4) 160~178 cm, 过渡层( $L_1$ ), 浊黄橙色(10YR6/4), 过渡性黄土, 粉砂质地, 块状构造。5) 178~560 cm, 马兰黄土( $L_1$ ), 浊黄橙色(10YR7/4), 粉砂质地, 均匀块状构造, 十分疏松, 典型黄土。在 228~260 cm 和 294~370 cm 呈暗红棕色(5YR3/6), 黏土粉砂质地, 弱棱块状结构, 较紧实和较坚硬, 显示明显成壤特征。6) 560~818 cm, 黄土与砂互层( $T_{1-al2}$ ), 黄土层与较薄砂层交互出现, 其中黄土层呈浊黄橙色(10YR7/4), 为粉砂—细砂质地, 疏松且干净, 而砂层呈细砂质地, 十分疏松且干净的粒状结构。7) 818~838 cm, 砾石层( $T_{1-all}$ ), 典型二元结构, 纯净砂层(厚度>100 cm), 直接覆盖在河流相砾石层。

## 2 研究方法

自剖面顶部向下, 以 2 cm 为间距进行连续采样, 其中 570 cm 以下 4 cm 连续采样(采至砾石层顶界), 共获得 353 个样品。样品在室内自然风干后进行相关实验分析。元素测量方法: 将自然风干的土样放入磨土机内研磨至 200 目以内, 称取 4.0 g 土样放入 YY60 型压力机中, 覆盖适量硼酸压成可用圆片, 用荷兰 Panalytical 公司生产的 X-Ray 荧光光谱仪(PW2403)进行测量, 实验误差<5%。磁化率测量方法: 用 MS-2 型磁化率仪(英国 Bartington 公司生产)进行测量, 每个样品重复测 3 次, 取平均值。OSL 年龄在陕西师范大学光释光测年实验室完成, 样品等效剂量值的测量是在装有 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 型 $\beta$ 辐射源的释光仪(RISØ-TL/OSL-20 型)上进行, 采用粗颗粒(90~

125  $\mu\text{m}$ ) 石英单片再生剂量法(SAR)获得, 且光释光测年数据的可靠性通过等效剂量值的频率分布、样品自然释光信号的离散度和样品第一次再生剂量的释光信号的离散度进行分析, 说明数据是可靠的。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 磁化率特征

磁化率的高低反映了气候的干湿状况, 对风化强度有良好的指示作用, 并得到广泛应用<sup>[20-25]</sup>。TJW 剖面中不同地层单元之间磁化率差异明显, 并具有磁化率值与地层同步变化的特点(图 2)。实验数据显示, TJW 剖面中磁化率分布在  $29.4 \times 10^{-8} \sim 207.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  之间, 平均值为  $113 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。古土壤( $S_0$ ) 表现为明显的高值区, 平均值为  $166.15 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。近代黄土( $L_0$ ) 磁化率值为  $156.88 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 在曲线上表现为谷值(图 2), 低于表土层(MS)和古土壤( $S_0$ )。马兰黄土( $L_1$ ) 的磁化率变化范围为  $57.4 \times 10^{-8} \sim 115.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 平均值为  $75.78 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 为明显的低值区。但值得注意的是, 在 228~260 cm 和 294~370 cm 的深度处, 其磁化率值呈现出明显的峰值, 分别为  $136.83 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  和  $162.22 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 接近于古土壤( $S_0$ ) 的磁化率值, 这说明在马兰黄土层中 228~260 cm 和 294~370 cm 的深度处铁磁性矿物含量高, 出现较强烈的化学风化作用, 具有一定的成壤特征。

### 3.2 常量元素分布特征

(1) 实验数据显示: 在整个剖面中常量元素以

SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为主,常量元素的平均含量(g/kg)排序为:Si(355.83) > Al(79.62) > Fe(62.64) > Na(26.07) > K(18.22) > Mg(16.51) > Ca(7.01)。

(2) 各地层单元之间同种常量元素含量差异显著,并与磁化率值呈现同步变化的特点(图2)。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量在古土壤(S<sub>0</sub>)中最高,平均值分别为82.52 g/kg和67.24 g/kg;马兰黄土(L<sub>1</sub>)则为低值区,分别为78.82 g/kg和61.02 g/kg;过渡层黄土(L<sub>1</sub>)中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量略高于马兰黄土(L<sub>1</sub>),为80.47 g/kg和62.32 g/kg;近代黄土(L<sub>0</sub>)中的含量为79.79 g/kg和62.33 g/kg。CaO和Na<sub>2</sub>O的含量变化则与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的呈相反趋势(图2)。古土壤(S<sub>0</sub>)中CaO和Na<sub>2</sub>O的含量为整个剖面的最低值,平均值分别为5.52 g/kg和23.21 g/kg;在马兰黄土(L<sub>1</sub>)为高值区,平均值分别为6.08 g/kg和27.86 g/kg;过渡层黄土(L<sub>1</sub>)中CaO和Na<sub>2</sub>O的含量的略低于马兰黄土(L<sub>1</sub>),为5.78 g/kg和26.69 g/kg;近代黄土(L<sub>0</sub>)为6.01 g/kg和26.37 g/kg。K<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>和MgO的含量变化趋势大致相同(图2),在古土壤(S<sub>0</sub>)中的含量略低,分别为18.05 g/kg、356.17 g/kg和15.83 g/kg;马兰黄土(L<sub>1</sub>)中的含量略有升高,分别为18.49 g/kg、358.72 g/kg和16.64 g/kg。

(3) 马兰黄土(L<sub>1</sub>)中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量虽然处于低值区,但是在228~260 cm和294~370 cm的深度处Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量要远高于马兰黄土(L<sub>1</sub>),228~260 cm处的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量分别为81.39 g/kg和63.24 g/kg,294~370 cm处Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量为81.20 g/kg和65.16 g/kg。马兰黄土(L<sub>1</sub>)中CaO和Na<sub>2</sub>O的含量为高值区,但是在228~260 cm和294~370 cm的深度处CaO和Na<sub>2</sub>O的含量要低于马兰黄土(L<sub>1</sub>),228~260 cm处的CaO和Na<sub>2</sub>O的含量分别为6.00 g/kg和26.31 g/kg,294~370 cm处CaO和Na<sub>2</sub>O的含量分别为5.74 g/kg和25.20 g/kg。

## 4 讨论

### 4.1 TJW剖面常量元素迁移序列

为了精确表述沉积物在风化过程中元素淋溶迁移与富集程度,通常选用较稳定元素Al或Ti作为参考系,计算土壤剖面中其他元素在地层中的迁移能力<sup>[5-6,13-14,26]</sup>。以马兰黄土(L<sub>1</sub>)代表近似的原始母质,选用变异系数较小的Ti来作为参照系。计算古土壤及弱古土壤层中其他元素的迁移率: $\Delta = [(M_x/M_T)/(N_x/N_T) - 1] \times 100\%$ 。式中:M<sub>x</sub>、M<sub>T</sub>分别代表元素X和Ti的含量,N<sub>x</sub>、N<sub>T</sub>分别代表母质层中元素X和参比元素Ti的含量。若 $\Delta < 0$ ,则反映元素X在该层中相对于参比元素发生迁移,若 $\Delta > 0$ ,则反映元素X在该层中相对于参比元素富集。结果显示(图3),相对于稳定元素Ti,古土壤(S<sub>0</sub>)和弱古土壤(L<sub>1</sub>~S<sub>1</sub>和L<sub>1</sub>~S<sub>2</sub>)中的K、Si、Mg、Ca、Na元素发生不同程度的淋溶迁移,而Fe和Al元素相对富集,由此可得这些元素在黄土化学风化过程中的活动迁移能力强弱为:Na>Ca>Mg>Si>K>Al>Fe。

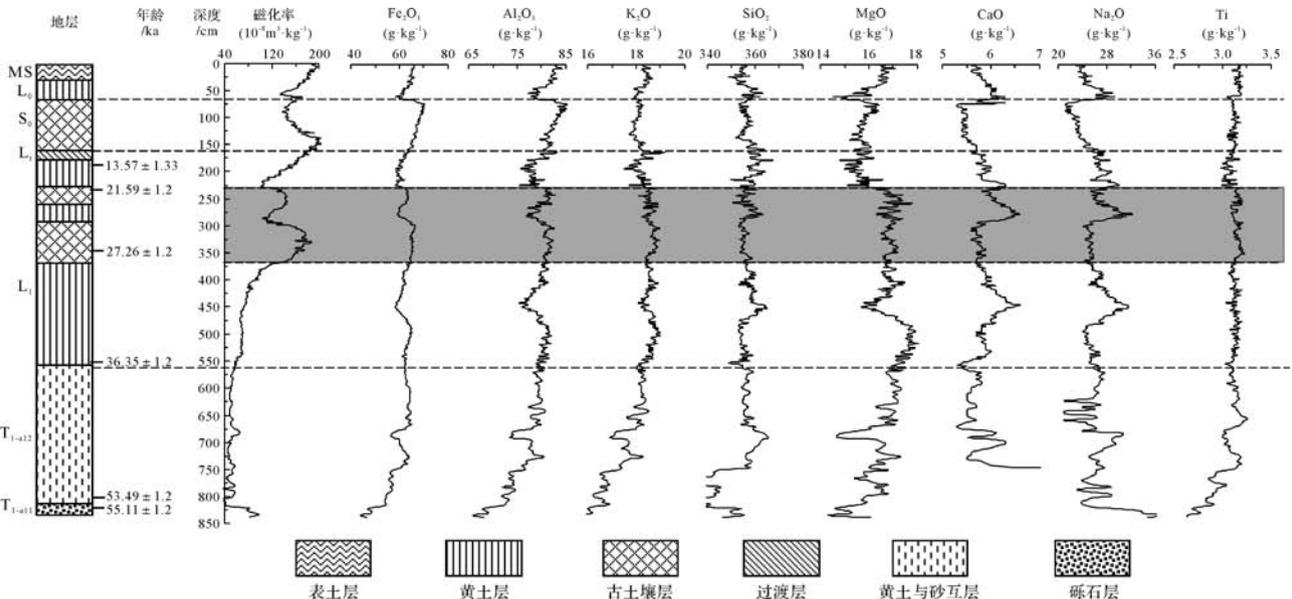


图2 鹿家湾(TJW)剖面常量元素含量变化曲线图

Fig.2 Constant element curves of the section at TJW profile

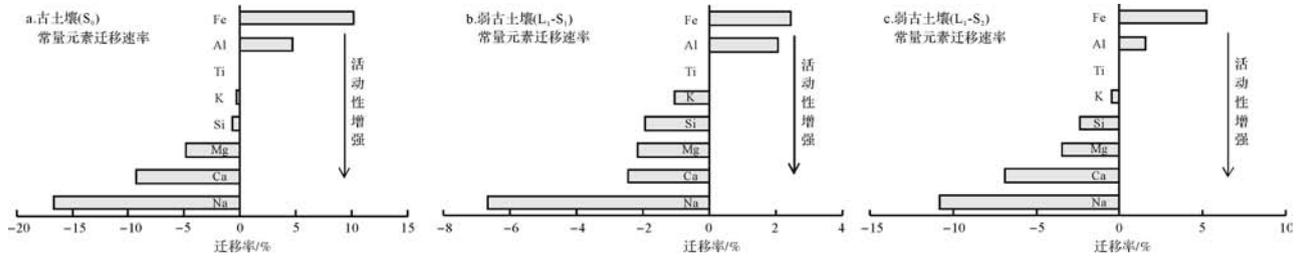


图3 TJW剖面常量元素相对于Ti元素的迁移率

Fig.3 Migration ratio of major elements related to the stable element Ti in the TJW profile

剖面形成过程中的气候变化可以用元素的淋溶迁移和富集程度来说明,在温暖湿润时期,土壤中活动性元素(K、Si、Mg、Ca、Na)迁移现象明显,活动性弱的元素出现富集现象,而在寒冷干旱的环境下淋溶作用则比较微弱。TJW剖面古土壤层中,Na和Ca元素的强烈淋溶,Fe和Al元素富集作用明显(图3a),反映该时期气候温暖湿润,有利于易溶元素的迁移。同样在弱古土壤层(L<sub>1</sub>~S<sub>1</sub>和L<sub>1</sub>~S<sub>2</sub>)中活动性元素的迁移作用较为明显(图3b,c),说明在弱古土壤层(L<sub>1</sub>~S<sub>1</sub>和L<sub>1</sub>~S<sub>2</sub>)的形成过程中化学风化程度要高于马兰黄土(L<sub>1</sub>),成壤作用明显。

### 4.2 TJW剖面风化成壤程度分析

化学蚀变指数(CIA)是反映化学风化程度的常用指标<sup>[27-29]</sup>,CIA值越大,说明经历的风化作用越强<sup>[5-6]</sup>,其公式为: $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + K_2O + Na_2O)] \times 100\%$ 。式中:各项均为氧化物分子摩尔数,CaO\*指存在于硅酸盐矿物中的摩尔含量。TJW剖面中CIA波动明显(图4),在古土壤(S<sub>0</sub>)呈现为高值区,为55.25,马兰黄土(L<sub>1</sub>)中则表现为低值,为50.96;但是在228~260cm和294~370cm的深度处的CIA值分别为52.64和53.29(表1),高于马兰黄土(L<sub>1</sub>)。说明古土壤在形成过程中经历了强烈的化

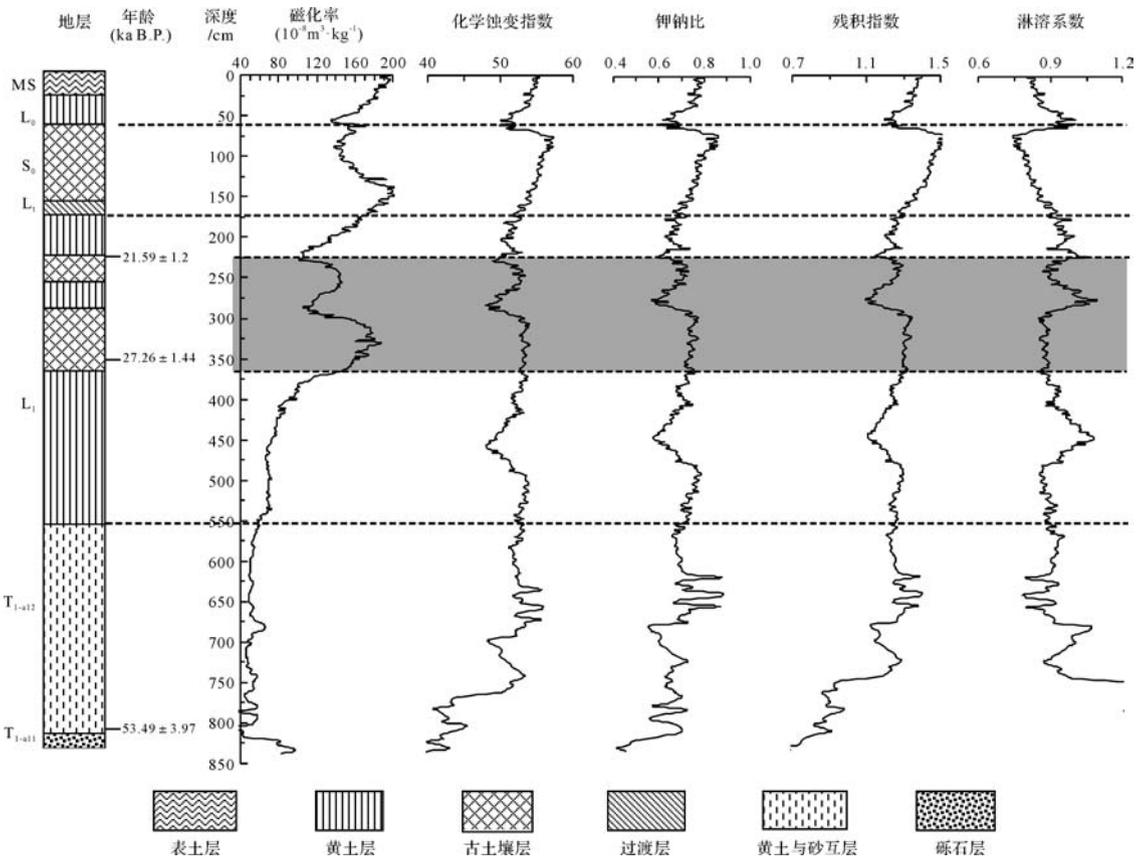


图4 TJW剖面地球化学风化参数曲线图

Fig.4 Diagrams showing the curves of geochemical weathering parameters TJW profile

学风化作用,而马兰黄土在形成时期的化学风化作用则较为微弱,但不是持续的,在228~260 cm和294~370 cm处化学风化作用则要较为强烈,明显高于马兰黄土( $L_1$ ),而又略低于古土壤( $S_0$ )。

钾钠比值( $K_2O/Na_2O$ )是衡量样品中斜长石风化程度的指标,也可用于反映沉积物的风化程度。由于Na比K易于淋失,因此其钾钠比值与沉积物的风化程度呈正相关<sup>[30]</sup>。TJW剖面中钾钠比值的变化与CIA参数变化特征相同(图4)。表现为:马兰黄土为低值区,古土壤( $S_0$ )呈现出明显的高值,值得注意的是在228~260 cm和294~370 cm深度处呈现出高值(表1、图4)。指示了在古土壤形成时期的风化强度要远高于马兰黄土形成时期,而马兰黄土在形成时期又经历了两段较为短暂的风化程度较强的时期。

残积指数( $(Al_2O_3+Fe_2O_3)/(CaO+MgO+Na_2O)$ )作为反映铁铝富集程度的重要参数,可衡量成土母质风化及成壤强度<sup>[31]</sup>。TJW剖面中残积系数的变化范围为0.72~1.43,此曲线与CIA变化曲线一致(图4),最高值出现在古土壤( $S_0$ ),为1.43;马兰黄土( $L_1$ )为低值区,平均值为1.20;但是在228~260 cm和294~370 cm深度处的残积系数远高于马兰黄土( $L_1$ ),分别为1.27和1.31(表1、图4)。此现象说明在古土壤( $S_0$ )中Ca、Na大量淋失迁移而Fe、Al相对富集,风化淋溶作用强烈;相反马兰黄土( $L_1$ )的风化淋溶作用微弱,而228~260 cm和294~370 cm深度处的风化淋溶作用强烈,进一步证实此深度处为两层弱古土壤层( $L_1 \sim S_1$ 和 $L_1 \sim S_2$ )。

表1 TJW剖面地球化学风化参数

Table 1 Geochemical weathering parameters in TJW profile

地层	化学蚀变指数	钾钠比值	残积指数	淋溶系数
古土壤( $S_0$ )	55.25	0.78	1.43	0.81
马兰黄土( $L_1$ )	50.96	0.67	1.20	0.96
弱古土壤( $L_1 \sim S_1$ )	52.64	0.70	1.27	0.90
弱古土壤( $L_1 \sim S_2$ )	53.29	0.74	1.31	0.88

淋溶系数反映了活动组分与惰性组分之间的联系,与气候的干湿变化密切相关<sup>[32]</sup>,其低值反映了暖湿气候特征,风化淋溶作用强烈;高值则反映干旱少雨的气候特征,土壤的风化程度降低<sup>[31-32]</sup>。TJW剖面的淋溶系数( $(CaO+K_2O+Na_2O)/Al_2O_3$ )曲线与CIA值、钾钠比值、残积系数的变化完全相反(图4),在古土壤( $S_0$ )为低值区,马兰黄土( $L_1$ )为高值区,并且在228~260 cm和294~370 cm深度处低于马兰黄

土( $L_1$ )(表1、图4),表明228~260 cm和294~370 cm深度处的风化成壤作用明显。

通过对化学蚀变指数、钾钠比值、残积指数和淋溶系数的分析,可以得出古土壤( $S_0$ )的化学风化程度明显高于马兰黄土层( $L_1$ ),并且马兰黄土层中弱古土壤层( $L_1 \sim S_1$ 和 $L_1 \sim S_2$ )的化学风化程度也要高于马兰黄土层( $L_1$ )。

#### 4.3 TJW剖面化学风化强度反映的气候变化

通过元素的迁移变化率( $\Delta$ )、化学蚀变指数(CIA)、及其他参数(磁化率、 $K_2O/Na_2O$ 等)明确指示了自晚更新世以来的化学风化程度和成壤演变过程。磁化率值、常量元素中Fe和Al含量、化学蚀变指数、以及钾钠比这些指标在马兰黄土( $L_1$ )都表现为明显的低值区,而Ca和Na元素的含量及硅铝系数在马兰黄土( $L_1$ )都表现为明显的高值区(图2、4),说明马兰黄土( $L_1$ )的淋溶迁移作用十分微弱。古土壤( $S_0$ )的磁化率值、常量元素中Fe和Al含量、化学蚀变指数、以及钾钠比高于马兰黄土( $L_1$ ),在剖面中表现为高值区,Ca和Na元素的含量及硅铝系数低于马兰黄土( $L_1$ )(图2、4),说明古土壤( $S_0$ )的化学风化程度要远高于马兰黄土( $L_1$ )。在马兰黄土层中228~260 cm和294~370 cm深度处的磁化率值、常量元素中Fe和Al含量、化学蚀变指数等要高于马兰黄土( $L_1$ ),Ca和Na元素的含量、硅铝系数等低于马兰黄土( $L_1$ )(图2、4),并且常量元素的迁移率也显示在此深度处Na和Ca元素的淋溶作用明显,Fe和Al元素富集作用明显(图4),说明在此深度处的化学风化作用明显且成壤作用较好,高于马兰黄土而又略低于古土壤,应为两层弱古土壤层。而OSL测年数据显示,弱古土壤发生时间在27.5~21.5 ka B.P.期间。此数据与黄土高原地区的可进行良好对比,年龄数据基本一致,是记录气候变化的直接证据<sup>[32-34]</sup>。

TJW剖面下部马兰黄土( $L_1$ )的可溶性元素的淋溶迁移作用十分微弱、风化程度低,说明在此时期气候以干冷为主,环境恶劣,冬季风强盛;但是马兰黄土层中弱古土壤层( $L_1 \sim S_1$ 和 $L_1 \sim S_2$ )的淋溶迁移作用要高于马兰黄土( $L_1$ )(图5),说明在末次冰期气候并非持续干冷,在此期间(27.5~21.5 ka B.P.)可溶性元素淋溶作用明显,风化成壤作用较强,气候相对温暖湿润,此次气候波动不仅在汉江上游地区度家湾剖面记录,翟新伟等<sup>[32]</sup>在甘肃会宁剖面发现在30.04~24.47 ka B.P.期间气候为温暖湿润阶段,陈一萌等<sup>[33]</sup>在黄土高原西部临夏塬堡剖面同样发现在31~

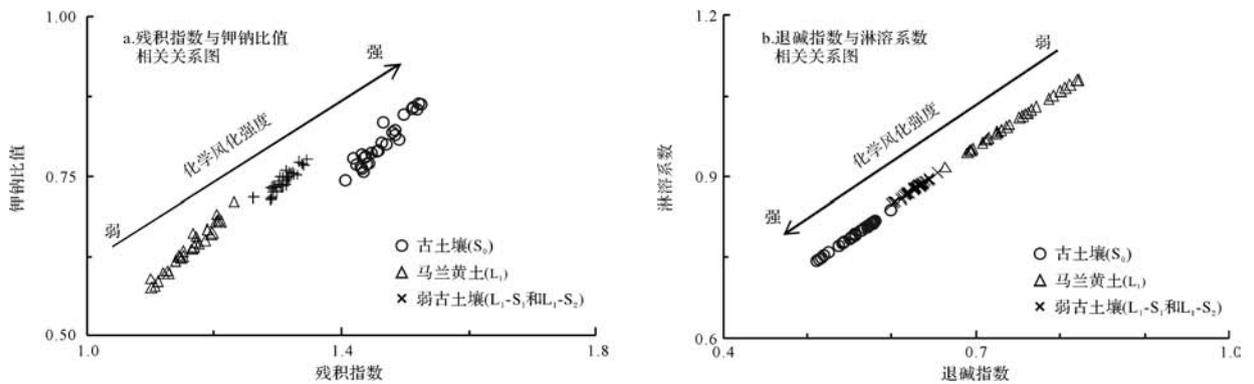


图5 TJW剖面残积指数与钾钠比值以及退碱指数与淋溶系数相关关系图

Fig.5 Correlation between  $(Al_2O_3+Fe_2O_3)/(CaO+MgO+Na_2O)$  and  $K_2O/Na_2O$ ,  $(Na_2O+CaO)/Al_2O_3$  and  $(CaO+K_2O+Na_2O)/Al_2O_3$  in the TJW profile

25 ka B.P.期间气候存在中等暖湿阶段,并与古里雅冰芯、北极 GRIP 冰芯进行对比。因此在 TJW 剖面发现的 27.5~21.5 ka B.P.期间气候转暖事件,是对此期间全球性的气候变暖事件的一次响应。

末次冰期结束后,气候向暖湿转变,在古土壤( $S_0$ )时期达到最为温暖湿润阶段,在此时期风化成壤作用强烈,可溶性元素淋溶作用强烈;在全新世晚期(3.1 ka B.P.以来),形成近代黄土( $L_0$ ),说明自全新世晚期以来,冬季风又开始逐渐加强,气候暖湿程度开始降低;表土层的元素含量变化与人类活动密切相关。

## 5 结论

(1) 汉江上游 TJW 剖面的有关地球化学参数,如化学蚀变指数、钾钠比、硅铝系数、淋溶系数、残积系数等,说明古土壤( $S_0$ )形成时期的化学风化最为强烈,马兰黄土形成时期的风化作用比较微弱,但是在马兰黄土 228~260 cm 和 294~370 cm 深度处的风化作用较强,成壤作用明显,属于弱古土壤层( $L_1 \sim S_1$  和  $L_1 \sim S_2$ )。

(2) 马兰黄土形成时期(55~11.5 ka B.P.)风化作用微弱,说明区内气候干燥寒冷,冬季风强盛;弱古土壤层( $L_1 \sim S_1$  和  $L_1 \sim S_2$ )形成时期化学风化作用较强,说明在晚更新世时期气候并非是持续干燥寒冷,在 27.5~21.5 ka B.P.期间出现短暂的气候转暖事件,气候温暖湿润,成壤条件较好,并且此次气候事件是对氧同位素 3 阶段全球性气候变暖事件的一次响应;过渡层黄土( $L_1$ )的存在则说明气候由干冷向暖湿转变;古土壤( $S_0$ )的风化程度最强说明在此时期气候最为温暖湿润;近代黄土( $L_0$ )的风化强度弱于古土

壤指示了在全新世晚期气候由暖湿开始向冷干转变。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985:1-336. [Liu Dongsheng. Loess and environment[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-336.]
- [2] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zhou Qunying, et al. Holocene pedogenic change and the emergence and decline of rain-fed cereal agriculture on the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(23/34): 2525-2535.
- [3] Schatz A K, Scholten T, Kühn P. Paleoclimate and weathering of the Tokaj (Hungary) loess - paleosol sequence[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 426: 170-182.
- [4] Guan Houchun, Zhu Cheng, Zhu Tongxin, 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.
- [5] 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.]
- [6] 王学佳, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游弥陀寺黄土—古土壤序列的化学风化特征及其环境意义[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1191-1198. [Wang Xuejia, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Chemical weathering characteristics of Mituosi's Loess-Palaeosol sequence in the upper Hanjiang River Valley and its environmental significance[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(6): 1191-1198.]
- [7] Liang Lianji, Sun Youbin, Beets C J, et al. Impacts of grain size sorting and chemical weathering on the geochemistry of Jingyuan loess in the northwestern Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 69: 177-184.

- [8] 陈俊,王鹤年. 地球化学[M]. 北京:科学出版社,2004:1-299. [Chen Jun, Wang Henian. Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-299.]
- [9] 邓宏文,钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1993:1-154. [Deng Hongwen, Qian Kai. Sedimentary geochemistry and environmental analysis[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 1-154.]
- [10] Qin Xiaoguang, Mu Yan. Elimination and evaluation of grain size's effect in analysis of chemical weathering of loess-paleosol sequences [J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2011, 71(1): 53-58.
- [11] 孙斌,郭正堂,尹秋珍,等. 西宁第四纪黄土—古土壤序列中的可溶盐、来源及环境意义[J]. 第四纪研究,2006,26(4):649-656. [Sun Bin, Guo Zhengtang, Yin Qiuzhen, et al. Soluble salts in a quaternary loess-soil sequence near Xining and their environmental implications[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(4): 649-656.]
- [12] 乔彦松,赵志中,王燕,等. 川西甘孜黄土—古土壤序列的地球化学演化特征及其古气候意义[J]. 科学通报,2010,55(3):255-260. [Qiao Yansong, Zhao Zhizhong, Wang Yan, et al. Variations of geochemical compositions and the Paleoclimatic significance of a loess-soil sequence from Garzê county of western Sichuan province, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(3): 255-260.]
- [13] 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.]
- [14] 叶玮, Sadaya Y, Shinji K. 中国西风区黄土常量元素地球化学行为与古环境[J]. 干旱区地理,2003,26(1):23-29. [Ye Wei, Sadaya Y, Shinji K. Geochemical behavior of major element of loess in Westerly area of China and paleoclimatic implications[J]. *Arid Land Geography*, 2003, 26(1): 23-29.]
- [15] 庞奖励,黄春长,周亚利,等. 汉江上游谷地全新世风成黄土及其成壤改造特征[J]. 地理学报,2011,66(11):1562-1573. [Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zhou Yali, et al. Holocene Aeolian loess and its Pedogenic modification in the upper Hanjiang River Valley, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1562-1573.]
- [16] 马春梅,朱诚,郑朝贵,等. 晚冰期以来神农架大九湖泥炭高分辨率气候变化的地球化学记录研究[J]. 科学通报,2008,53(增刊1):26-37. [Ma Chunmei, Zhu Cheng, Zheng Chaogui, et al. High-resolution geochemistry records of climate changes since late-glacial from Dajihu peat in Shennongjia Mountains, Central China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(Suppl.1): 26-37.]
- [17] 黄培华,李文森. 湖北郧县曲远河口的地貌、第四纪地层和埋藏环境[J]. 汉江考古,1995(4):83-86. [Huang Peihua, Li Wensen. Landscape, Quaternary strata and buried environment at estuary of the Quyuan River in Yunxi county, Hubei province[J]. *Jiangnan Archaeology*, 1995(4): 83-86.]
- [18] 雷祥义. 秦岭黄土—古土壤发育时的植被与环境[J]. 海洋地质与第四纪地质,2000,20(1):73-79. [Lei Xiangyi. Vegetation and environment during period of Loess-Paleosol development in the Qinling Mountains[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(1): 73-79.]
- [19] 何报寅,张穗,蔡述明. 近2600年神农架大九湖泥炭的气候变化记录[J]. 海洋地质与第四纪地质,2003,23(2):109-115. [He Baoyin, Zhang Sui, Cai Shuming. Climatic changes recorded in peat from the Dajiu Lake basin in Shennongjia since the Last 2600 years[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(2): 109-115.]
- [20] 李新艳,黄春长,庞奖励,等. 淮河上游全新世风成黄土与成壤环境变化研究[J]. 干旱区地理,2007,30(3):392-399. [Li Xinyan, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. Holocene aeolian loess and pedogenic environmental change in the upper-reaches of the Huaihe River[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(3): 392-399.]
- [21] 庞奖励,黄春长,周亚利,等. 汉江上游I级河流阶地形成及对东亚季风变化的响应[J]. 地质论评,2014,60(5):1076-1084. [Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zhou Yali, et al. Formation of the First River Terraces of Hanjiang River and its response to the East Asian monsoon change[J]. *Geological Review*, 2014, 60(5): 1076-1084.]
- [22] An Zhisheng, Kukla G J, Porter S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 years[J]. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36.
- [23] 刘秀铭,刘东生, Shaw J. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义[J]. 第四纪研究,1993(3):281-287. [Liu Xiuming, Liu Dongsheng, Shaw J. Magnetic mineral characteristics of Chinese loess and its palaeoclimatic significance[J]. *Quaternary Sciences*, 1993(3): 281-287.]
- [24] 刘秀铭,刘东生, Heller F, 等. 中国黄土磁化率与第四纪古气候研究[J]. 地质科学,1992(S1):279-285. [Liu Xiuming, Liu Dongsheng, Heller F, et al. Study on magnetic susceptibility of loess and Quaternary climate in China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1992(S1): 279-285.]
- [25] 柏道远,李长安,陈渡平,等. 化学风化指数和磁化率对洞庭盆地第四纪古气候变化的响应[J]. 中国地质,2011,38(3):779-785. [Bai Daoyuan, Li Chang'an, Chen Duping, et al. Chemical weathering index and magnetic susceptibility of deposits and their responses to the Quaternary climate in Dongting Basin[J]. *Geology in China*, 2011, 38(3): 779-785.]
- [26] 葛本伟,黄春长,庞奖励,等. 豫中黄土地区全新世黄土剖面成壤作用与古气候研究[J]. 土壤通报,2010,41(1):1-6. [Ge Benwei, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. Holocene Pedogenesis and Paleoclimate in the Loess region in the middle part of Henan province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(1): 1-6.]
- [27] 李徐生,韩志勇,杨守业,等. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度

- 与元素迁移特征[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1174-1184. [Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Shouye, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu Loess profile in Zhenjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(11): 1174-1184.]
- [28] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 539-544. [Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. CIA (Chemical Index of Alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 539-544.]
- [29] 杨守业, 李从先, 李徐生, 等. 长江下游下蜀黄土化学风化的地球化学研究[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 402-406. [Yang Shouye, Li Congxian, Li Xusheng, et al. Geochemical records of chemical weathering of the Xiashu Loess in the lower reaches of the Changjiang River[J]. Geochimica, 2001, 30(4): 402-406.]
- [30] 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近 2.5Ma 以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2001, 31(2): 136-145. [Chen Jun, An Zhisheng, Liu Lianwen, et al. 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[J]. Science China(Seri.D): Earth Sciences, 2001, 31(2): 136-145.]
- [31] 郭媛媛, 莫多闻, 毛龙江, 等. 澧阳平原岩板岩剖面地球化学特征与风化强度研究[J]. 地理科学, 2013, 33(3): 335-341. [Guo Yuanyuan, Mo Duowen, Mao Longjiang, et al. Geochemical characteristics and weathering intensity of the Yanbandang profile in Liyang Plain, the middle reach of the Changjiang River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(3): 335-341.]
- [32] 翟新伟, 李富强, 吴松. 会宁剖面黄土粒度记录的 MIS3 阶段气候变化研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 773-780. [Zhai Xinwei, Li Fuqiang, Wu Song. Huining MIS3 stage climate change based on the loess grain size record[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(5): 773-780.]
- [33] 陈一萌, 饶志国, 张家武, 等. 中国黄土高原西部马兰黄土记录的 MIS3 气候特征与全球气候记录的对比研究[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3): 359-365. [Chen Yimeng, Rao Zhiguo, Zhang Jiawu, et al. Comparative study of MIS3 climatic features recorded in Malan Loess in the western part of the Loess Plateau and global records[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(3): 359-365.]
- [34] 郭娇, 王伟, 吴利杰. 陕西吴起金丁黄土剖面末次冰期的环境记录[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 108-112. [Guo Jiao, Wang Wei, Wu Lijie. Environmental records of the last glacial period on Jinding loess profile in Wuqi, Shanxi province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(4): 108-112.]

## Chemical Weathering Characteristics of Tuojiawan Profile in the Upper Hanjiang River Valley and Its Environmental Significance

ZHANG WenTong, PANG JiangLi, HUANG ChunChang, ZHOU YaLi, ZHA XiaoChun, CUI TianYu, WANG HaiYan, YANG Dan

College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062

**Abstract:** The chemical characteristics of major elements and magnetic susceptibility of Tuojiawan profile in the upper Hanjiang River are studied. The change of the indexes revealed that major elements geochemical behavior and the corresponding laws of climate change in the Upper Hanjiang River. With X-Ray fluorescence spectrometer, MS-2 magnetic susceptibility instrument measured element content and magnetic susceptibility values. Results show that: The major elements are  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Na, Ca, Mg, Si, K are leached out while Ti, Fe, Al relatively enriched in the palaeosol  $S_0$ . The element mobility and migration ability of the major elements are ranked in the followed order:  $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Si} > \text{K} > \text{Al} > \text{Fe}$ . Magnetic susceptibility values showed obvious peak value in 228~260 cm and 294~370 cm depth, the variation in content of Fe and Al elements and chemical alteration index curve and magnetic susceptibility curve showing a high consistency, at this depth are characterized by high value. It was shown that the chemical weathering intensity of this depth was obviously higher than that of Malan loess, close to the palaeosol ( $S_0$ ), belonging to the weak palaeosol ( $L_1 \sim S_1$  and  $L_1 \sim S_2$ ). The age range of  $L_1 \sim S_1$  and  $L_1 \sim S_2$  was 27.5~21.5 ka B.P.. The change of the indexes showed the climate and pedogenic environmental changed since Pleistocene. Including the cold and arid glacial and a short time the climate was warm and wet in the glacial period (27.5~21.5 ka B.P.), the gradually intensified southeast monsoon during the early Holocene periods, the strongest monsoon in the mid-Holocene, and the monsoon recession and the climate drying during the late Holocene.

**Key words:** major elements; chemical weathering; OSL age; climate change; Upper Hanjiang River