

# 汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对比

毛沛妮, 庞奖励, 黄春长, 查小春, 周亚利, 郭永强, 胡 慧, 刘 涛

(陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710119)

**摘要:** 本文对汉江上游黄土的常量元素含量及相关地球化学参数CIA、Na/K、淋溶系数、退碱系数、残积系数等进行了系统分析。结果显示: ① 汉江黄土的主要化学成分为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 三者含量总和达767.3 g/kg; 常量元素含量大小排序为 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{CaO}$ 。风化成壤过程中Na、Ca、Mg、Si发生不同程度的迁移淋溶, 而Fe、Al、K相对富集。② 其风化成壤强度呈现从马兰黄土 $L_1$ →过渡性黄土 $L_2$ →古土壤 $S_0$ 逐渐升高、全新世黄土 $L_0$ 又降低的规律, 记录了该区域气候经历了末次冰期(55.0-15.0 ka BP)冷干、早全新世(15.0-8.5 ka BP)增温增湿、中全新世(8.5-3.1 ka BP)达到最暖湿, 晚全新世(3.1-0.0 ka BP)降温变干的演变过程。③ 汉江黄土与洛川、巫山、下蜀黄土的元素组合特征高度一致, 不同地区常量元素(CaO除外)含量十分接近且UCC标准化值变幅均小于0.25, 这暗示了它们风化之初具有相似的风成沉积基础; 但不同区域黄土的化学风化强度差异明显, 大致呈现洛川黄土 < 汉江黄土 < 巫山黄土 < 下蜀黄土的趋势, 与中国现代季风气候的空间变化规律相吻合, 即不同地区黄土风化程度差异主要是东亚季风变化影响的结果。

**关键词:** 黄土; 常量元素; 风化程度; 汉江上游; 区域对比

DOI: 10.11821/dlxb201702008

黄土中不同化学元素在表生环境的风化过程中往往表现出不同的化学活动性而发生分异<sup>[1-3]</sup>。元素迁移和聚集规律既是黄土风化成壤过程的直接记录, 又蕴含其发生过程中古环境变化信息<sup>[4-6]</sup>。前人已对黄土高原<sup>[6-10]</sup>、川西高原<sup>[11-12]</sup>及长江中下游<sup>[13-20]</sup>等地区黄土的地球化学特征做了大量研究, 并取得显著成果。汉江上游位于秦岭南麓、暖温带半湿润与亚热带湿润季风气候的过渡地带, 对气候变化的响应十分敏感。近些年, 野外调研发现该区域的盆地地带分布大量面积不等的风成黄土, 引起学者的广泛关注。作为中国特殊过渡地带发育的陆相沉积物, 该区域黄土的元素地球化学特征如何? 与其他区域黄土的风化强度差异如何? 这些问题对理解中国不同区域黄土化学风化特征的空间变异规律具有至关重要的意义。而以往对汉江上游黄土的研究主要集中在空间分布、地层序列、年代序列、风化成壤演变、古气候意义等相关问题<sup>[21-27]</sup>, 关于其地球化学特征的研究还比较有限。本文对汉江上游黄土的元素组成、丰度及相关化学风化参数进行系统分析, 并与洛川、巫山、下蜀黄土对比, 旨在阐明汉江上游地区黄土的地球化学特征、风化成壤强度变化及其蕴含的古气候信息, 并尝试解译不同区域黄土风化程度的空间变异规律。

收稿日期: 2016-06-17; 修订日期: 2016-10-12

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41271108, 41371029, 41471071); 国家社会科学基金项目(14BZS070); 中央高校基本科研业务费专项基金(GK201704014) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41271108, No.41371029, No.41471071; National Social Science Foundation of China, No.14BZS070; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.GK201704014]

**作者简介:** 毛沛妮(1989-), 女, 山西运城人, 博士生, 研究方向为资源开发与环境演变。E-mail: maopeini1989@126.com

**通讯作者:** 庞奖励(1963-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110005769M), 主要从事环境演变与土地资源利用的研究。E-mail: jlpang@snnu.edu.cn

## 1 研究区域

汉江发源于汉中盆地西端的潘冢山,于武汉汇入长江。整个流域位于 $30^{\circ}08'N\sim 34^{\circ}11'N$ 、 $106^{\circ}12'E\sim 114^{\circ}14'E$ ,干流河道全长1577 km,流域面积 $15.9\times 10^4\text{ km}^2$ ,其中丹江口水库以上为上游地区,河道长925 km,流域面积 $9.52\times 10^4\text{ km}^2$ (图1)。区内属北亚热带季风气候区,年均气温 $12\sim 16^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量700~1100 mm,受东南季风和西南季风的暖湿气流影响,降雨主要集中在5-10月。流域内植被茂密,以常绿阔叶林为主,森林覆盖面积高达62%,土壤类型主要为淋溶土(发生分类归为黄褐土)。

汉江在上游地区自西向东穿行于秦岭、大巴山之间,形成峡谷与盆地相间的地貌特征,区内分布有许多面积较大的盆地,如汉中盆地、西乡盆地,安康盆地、旬阳盆地、郧县盆地、商丹盆地等。这些盆地地区不仅发育有较清晰可见的I~IV级河流阶地,I、II、III、IV阶地分别高出汉江平水位10~15 m、30~40 m、60~70 m和90~100 m<sup>[22]</sup>,而且由于阶地面比较平缓,一般均覆盖着面积不等、堆积较厚的风成黄土,黄土厚度一般为5~20 m。其中II、III、IV级阶地的阶地面受侵蚀破坏严重,黄土的地层不全,而I级阶地覆盖的黄土发育较好,面积覆盖范围大,且地层保存完整<sup>[28-29]</sup>。

## 2 研究材料与方法

在汉江上游I级阶地野外调查过程中,对多处黄土进行了深入研究<sup>[21-27]</sup>,发现不同地点黄土剖面在宏观特征和地层上具有良好的可比性。这些剖面是位于河流两岸阶地上天然出露的陡坎,或者当地金矿在采砂金过程中暴露的极好断面,均能够清晰地见到风成黄土直接覆盖在河流相砂砾石层上,黄土剖面连续完整,中间未发现地层的缺失(图2)。本文选取前房村(QFC)、弥陀寺(MTS)、黄坪村

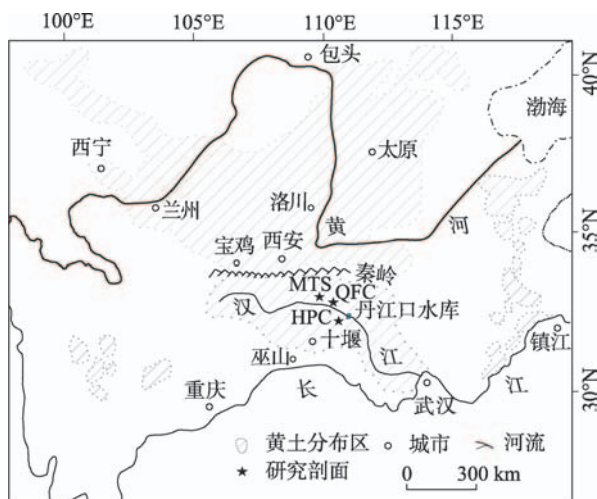
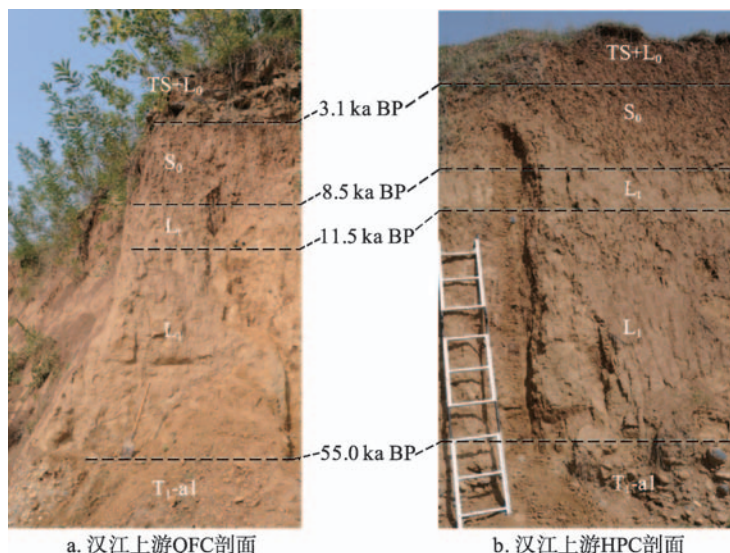


图1 汉江上游区域位置及研究剖面图

Fig. 1 Map showing the position of the upper Hanjiang River and the location of the loess-soil profiles



a. 汉江上游QFC剖面

b. 汉江上游HPC剖面

图2 汉江上游QFC、HPC剖面黄土的地层及年代序列

Fig. 2 The stratigraphy and chronology sequences of the QFC and HPC profiles in the upper Hanjiang River

(HPC) 剖面作为研究代表, 这些黄土剖面的理化性质和地层等已经进行了深入研究<sup>[22, 26-27]</sup>, 建立了可信的地层序列和年代框架<sup>[23]</sup>, 被认为是 55.0 ka BP 以来连续堆积的风成沉积物, 详细剖面特征如表 1 所示。

野外从剖面顶部向下按一定间隔 (2~5 cm) 进行高密度连续采样, 采至阶地砾石层顶部。化学元素分析在陕西师范大学环境变迁实验室完成。将自然风干土样机磨至 200 目以下, 称取 4.0 g 压制成圆形薄片, 采用荷兰 Panalytical 公司生产的 X-Ray 荧光光谱仪 PW2403 进行测定, 实验中加入标准样品 (GSS-1), 误差控制在 5% 内。颜色采用中国标准土壤色卡 (中国科学院南京土壤研究所, 1989) 进行描述。

表 1 汉江上游黄土剖面地层特征  
Tab. 1 Stratigraphic characteristics of the loess in the upper Hanjiang River

地层	年代 (ka BP)	黄土剖面特征描述		
		QFC 剖面	MTS 剖面	HPC 剖面
表土 (TS)	1.5-0.0	35~0 cm, 浊棕(5YR7/4, 干态), 黏土—粉砂质地, 团粒结构, 疏松多孔, 多植物根系。	60~0 cm, 浊棕(7.5YR5/4, 干态), 黏土—粉砂质地, 团粒结构, 疏松多孔, 多植物根系。	50~0 cm, 浊黄棕(10YR5/3, 干态), 黏土—粉砂质地, 团粒结构, 疏松多孔, 植物根系发育。
全新世黄土(L <sub>0</sub> )	3.1-1.5	110~35 cm, 浊黄橙(7.5YR5/4, 干态), 粉砂质地, 块状或团块状结构。顶部有汉代灰色绳纹薄陶片。	130~60 cm, 浊黄橙(10YR6/4, 干态), 粉砂质地, 块状结构。	100~50 cm, 浊黄橙(10YR6/4, 干态), 粉砂质地, 块状结构, 下部有周代灰色陶片和烧土块。
古土壤(S <sub>0</sub> )	8.5-3.1	260~110 cm, 浊红棕(5.5YR3/4, 干态), 黏土-粉砂质地, 棱块状结构, 致密坚硬, 大量亮红棕色黏土胶膜淀积, 结构体内仍呈红棕色, 且含有少量铁锰结核(< 0.2mm)。	270~130 cm, 暗棕(7.5YR3/4, 干态), 黏土—粉砂质地, 棱块状结构, 致密坚硬, 大量亮红棕色黏土胶膜淀积, 结构体内仍呈红棕色。	270~100 cm, 暗棕(7.5YR3/4, 干态), 黏土—粉砂质地, 棱块状结构, 致密坚硬, 大量亮红棕色黏土胶膜淀积, 结构体内仍呈红棕色。
过渡性黄土(L <sub>1</sub> )	11.5-8.5	320~260 cm, 浊黄橙(7.5YR5/4, 干态), 粉砂质地, 块状结构, 裂隙面有少量暗棕色黏土胶膜淀积。	350~270 cm, 浊黄橙(10YR7/4, 干态), 粉砂质地, 块状结构, 裂隙面有少量棕色黏土胶膜沉淀。	310~270 cm, 浊黄橙(10YR5/4, 干态), 粉砂质地, 块状结构, 裂隙面有少量棕色黏土胶膜沉淀。
马兰黄土(L <sub>1</sub> )	55.0-11.5	660~320 cm, 浊黄橙(7.5YR5/4, 干态), 粉砂质地, 均匀的块状结构。其中 660~480 cm 混夹有少量不规则薄层砂。	1140~350 cm, 浊黄橙(10YR7/3, 干态), 粉砂质地, 均匀的块状结构。其中 1140~590 cm 混夹少量不规则薄层砂。	790~310 cm, 浊黄橙(10YR7/3, 干态), 粉砂质地, 块状结构。
河流相沉积 (T <sub>1-al</sub> )		典型的河流相二元结构, 上部为十分疏松、干净的粗砂, 下部为磨圆度很高的砾石层。		

3 实验结果

(1) 汉江上游黄土的主要化学成分为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 其含量分别为 573.8 g/kg、134.1 g/kg 和 59.4 g/kg, 三者之和为 767.3 g/kg, 而 K<sub>2</sub>O、MgO、Na<sub>2</sub>O、CaO 含量分别仅为 26.1 g/kg、18.2 g/kg、13.5 g/kg 和 9.0 g/kg, 元素含量顺序呈现 SiO<sub>2</sub> > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > K<sub>2</sub>O > MgO > Na<sub>2</sub>O > CaO 的规律 (表 2)。上述常量元素含量在黄土层和古土壤 S<sub>0</sub> 中的变异系数 (CV) 较低, 除 CaO 和 Na<sub>2</sub>O 的 CV 值分别为 0.16 和 0.18 外, 其他元素含量的 CV 值均小于 0.10, 其中 SiO<sub>2</sub> (0.02)、K<sub>2</sub>O (0.03)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.04)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.07)、MgO (0.10), 说明古土壤 S<sub>0</sub> 与黄土的元素组成具有高度一致性, 暗示两者物质基础相同, 即古土壤是黄土风化成壤改造的产物。

(2) 黄土和古土壤中不同元素含量存在微弱差异。 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 有相似的分布规律,黄土层(包含 $L_1$ 、 $L_t$ 、 $L_0$ )中 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 的均值分别为577.4 g/kg、14.1 g/kg、9.0 g/kg、18.4 g/kg;而古土壤 $S_0$ 中这些元素的含量分别为568.6 g/kg、12.9 g/kg、8.6 g/kg、18.2 g/kg,其值明显低于黄土层,说明在古土壤形成时期化学风化作用强烈, $\text{Si}$ 、 $\text{Na}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$ 发生迁移淋失,表现出不同程度的亏损特征。剖面中 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 和 $\text{MgO}$ 含量在垂直方向上的变化大致呈现 $L_1$ 最高 $\rightarrow L_t$ 略有降低 $\rightarrow S_0$ 最低 $\rightarrow L_0$ 又升高的规律(表2),指示黄土堆积发育的不同时期风化成壤作用强度不同,这些元素迁移淋失程度也不同。此外,尽管表土TS的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 均值(567.9 g/kg、12.3 g/kg、9.4 g/kg和17.6 g/kg)较低,这与人类耕作活动影响息息相关。

$\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{K}_2\text{O}$ 含量分布及变化趋势相同。黄土层(包括 $L_1$ 、 $L_t$ 、 $L_0$ )中它们的均值较低, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{K}_2\text{O}$ 分别为132.0 g/kg、57.6 g/kg、25.8 g/kg,而高峰值(137.8 g/kg、62.4 g/kg、26.5 g/kg)出现在古土壤 $S_0$ 中,说明风化成壤过程中易溶元素 $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Na}$ 的大量淋失,导致 $\text{Al}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{K}$ 表现出相对富集的特征。且 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{K}_2\text{O}$ 含量在不同层位中呈现从 $L_1 \rightarrow L_t \rightarrow S_0$ 逐渐增强、 $L_0$ 又减弱的变化规律(表2),与 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 的变化特征呈现相反关系的吻合。上述特征反映了汉江上游黄土风化成壤过程中,常量元素发生了明显分异,表现为 $\text{Si}$ 、 $\text{Na}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$ 发生了不同程度的淋溶, $\text{Al}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{K}$ 发生了富集;而风化成壤强度不同,导致了上述元素的分异程度存在明显差异。

表2 汉江上游黄土常量元素含量(g/kg)

Tab. 2 The major element contents (g/kg) of the loess in the upper Hanjiang River

地层	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$
TS	472.2~648.2 <sup>①</sup>	111.2~151.0	54.0~66.7	24.2~28.1	7.4~12.2	9.2~18.3	16.0~19.6
	567.9 <sup>②</sup>	136.4	61.9	26.4	9.4	12.3	17.6
$L_0$	464.7~701.5	105.8~150.0	44.8~62.6	23.7~28.2	7.4~10.4	9.4~21.9	14.2~19.5
	592.2	127.0	54.7	25.1	8.7	14.1	16.4
汉江上游黄土	472.4~652.7	109.5~153.8	56.1~65.7	23.5~29.7	7.4~10.7	9.8~20.7	16.3~20.8
	568.6	137.8	62.4	26.5	8.6	12.9	18.2
$L_t$	480.8~653.7	112.5~152.	53.5~62.3	23.6~29.6	7.5~9.6	9.7~18.4	18.1~20.2
	570.0	136.0	60.3	26.1	8.7	13.1	19.0
$L_1$	479.2~642.8	102.9~151.4	52.7~65.2	22.3~29.5	7.7~11.4	9.7~25.5	16.8~22.3
	570.1	133.1	57.8	26.3	9.5	15.0	19.8
整体均值	464.7~701.5	102.9~153.8	44.8~66.7	22.3~28.2	7.4~12.2	9.2~25.5	14.2~22.3
	573.8	134.1	59.4	26.1	9.0	13.5	18.2
CV	0.02	0.04	0.07	0.03	0.16	0.18	0.10
洛川黄土 <sup>[2]</sup>	575.7	119.0	48.0	20.8	77.3	14.9	20.6
巫山黄土 <sup>[17]</sup>	662.0	133.5	52.9	23.2	36.6	12.3	16.0
下蜀黄土 <sup>[13]</sup>	680.7	133.2	53.0	23.5	10.0	9.2	16.1
UCC <sup>[31]</sup>	660.0	152.0	50.0	34.0	39.0	42.0	22.0

注:汉江上游黄土常量元素含量为前房村、弥陀寺、黄坪村3个剖面的范围与均值;其中①代表范围,②代表平均值。

## 4 讨论

### 4.1 汉江上游黄土的风化成壤强度

化学风化过程中,风成黄土的不同元素表现出不同化学活动行为而发生分异。 $\text{Si}$ 是



主要的造岩矿物元素, 化学性质相对稳定, 碱性条件下才易溶解迁移; Fe、Al 属于稳定性元素, 随着大量盐基离子和硅酸等易溶组分迁移淋失而发生相对富集; Na、K、Ca、Mg 属于化学性质较活跃的碱金属和碱土元素, 暖湿环境下易被溶解迁移, 但 K 易被黏土矿物吸附固定, 迁移作用微弱<sup>[13, 17, 19]</sup>。因此, 不同元素含量及元素氧化物分子比值的变化特征既可以指示黄土风化成壤过程, 又能反映其蕴含的古气候环境演变状况。

**4.1.1 地球化学参数** 目前对风成黄土化学风化程度的判别尚没有统一的标准, 常用地球化学参数有: 化学蚀变指数 CIA ( $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ )、钠钾比值 ( $\text{Na}/\text{K}$ )、淋溶系数 ( $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ )、退碱系数 ( $(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ )、残积系数 ( $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O})$ ) 等, 它们从不同角度反映了风化的强度。化学风化过程中, 长石矿物会遭受不同程度的蚀变, 碱金属元素 Na、Ca、K 随水介质迁移流失, 同时形成主要成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的黏土矿物<sup>[30]</sup>, 因此, CIA 实质上反映了风化过程中长石转变成黏土矿物的程度<sup>[13, 31-32]</sup>, 且 CIA 值越高, 说明化学风化强度越高, 暗示气候越温暖湿润。CIA 值具体计算方法参考文献[13]获得。

汉江上游黄土的 CIA 值介于 56.98~71.32 之间, 在 QFC、MTS 和 HPC 剖面的变化趋势相似, 均大致呈现马兰黄土  $L_1$  最低→过渡性黄土  $L_t$  略有升高→古土壤  $S_0$  最高→全新世黄土  $L_0$  又降低的规律 (图 3)。以 QFC 剖面为例, 黄土层  $L_1$ 、 $L_t$  和  $L_0$  的 CIA 均值分别为 65.99、68.39 和 68.51, 而古土壤  $S_0$  的均值 (70.40) 明显高于黄土层, 说明古土壤形成时期风化成壤作用强烈, 长石蚀变成黏土矿物的程度高, 指示该期间气候暖湿, 有利于化学风化的进行; 而黄土层形成时期气候干冷, 不利于长石的蚀变, 风化成壤程度弱。剖面中不同层位 CIA 值的变化本质上反映了黄土堆积发育过程中经历的风化成壤强度差异, 即不同时期风化成壤强度从  $L_1 \rightarrow L_t \rightarrow S_0$  逐渐增强、 $L_0$  又开始减弱。这种变化特征与磁化率反映的成壤强度变化规律<sup>[22]</sup>大体一致, 这证明 CIA 在汉江区域对黄土风化成壤强度和古气候状况具有良好的指示作用。但 CIA 与磁化率变化曲线的形态上稍微有些偏差 (图 3), 这是因为磁化率的变化不仅与风化成壤强度相关, 还与游离铁的赋存形态相关。而表土层 CIA 值较高, 这与人类耕作活动直接相关。

Na/K 是判定黄土中长石矿物被化学风化程度的常用指标<sup>[12-13]</sup>。由于斜长石比钾长石优先被风化, Na 的流失速率远远大于 K, 因而, Na/K 比值随化学风化作用增强而降低。各剖面中 Na/K 比值介于 0.34~0.54 之间, 高值出现在黄土层, 其中黄土  $L_1$ 、 $L_t$ 、 $L_0$  的数值分别为 0.50、0.47 和 0.42, 而古土壤  $S_0$  的数值 (0.41) 较低, 说明古土壤形成时期斜长石被强烈分解, Na 迅速流失, 指示较强的化学风化作用; 而黄土层形成时期斜长石被分解程度低, Na 流失程度弱, 指示较弱的化学风化作用。且不同层位 Na/K 比值大小排序为  $L_1 > L_t > L_0 > S_0$ , 其变化趋势与 CIA 曲线呈相反关系的吻合 (图 4), 指示不同时期风化成壤强度呈现  $L_1$  最弱→ $L_t$  略有增强→ $S_0$  最强→ $L_0$  又降低的变化特征。

淋溶系数、退碱系数常被用来反映黄土风化成壤过程中 Ca、Na 等易溶性元素的淋溶迁移程度<sup>[35]</sup>, 残积系数则反映稳定性元素 Fe、Al 相对富集或残积的程度<sup>[18]</sup>, 因而, 淋溶系数、退碱系数与其风化成壤强度成反比, 残积系数则成正比。QFC 剖面古土壤  $S_0$  中的淋溶系数、退碱系数 (分别为 0.42 和 0.21) 较低, 黄土  $L_1$ 、 $L_t$ 、 $L_0$  层较高, 且  $L_1$  (0.52 和 0.27)  $> L_t$  (0.46 和 0.24)  $> L_0$  (0.45 和 0.22); 而残积系数在古土壤  $S_0$  的均值 (2.37) 明显高于黄土层 ( $L_1$ 、 $L_t$ 、 $L_0$  分别为 1.90、2.10 和 2.34)。这些特征说明了古土壤发育时期风化成壤作用强烈, 易溶元素 Ca、Na 被大量迁移淋失, Fe、Al 富集或残积程度高; 而黄土层形成时期元素的淋溶与残积能力均非常微弱。且可以看出, 不同层位淋溶系数、退碱系数的大小序列均表现为  $L_1 > L_t > L_0 > S_0$ , 残积系数则呈现完全相反的吻合, 反映了

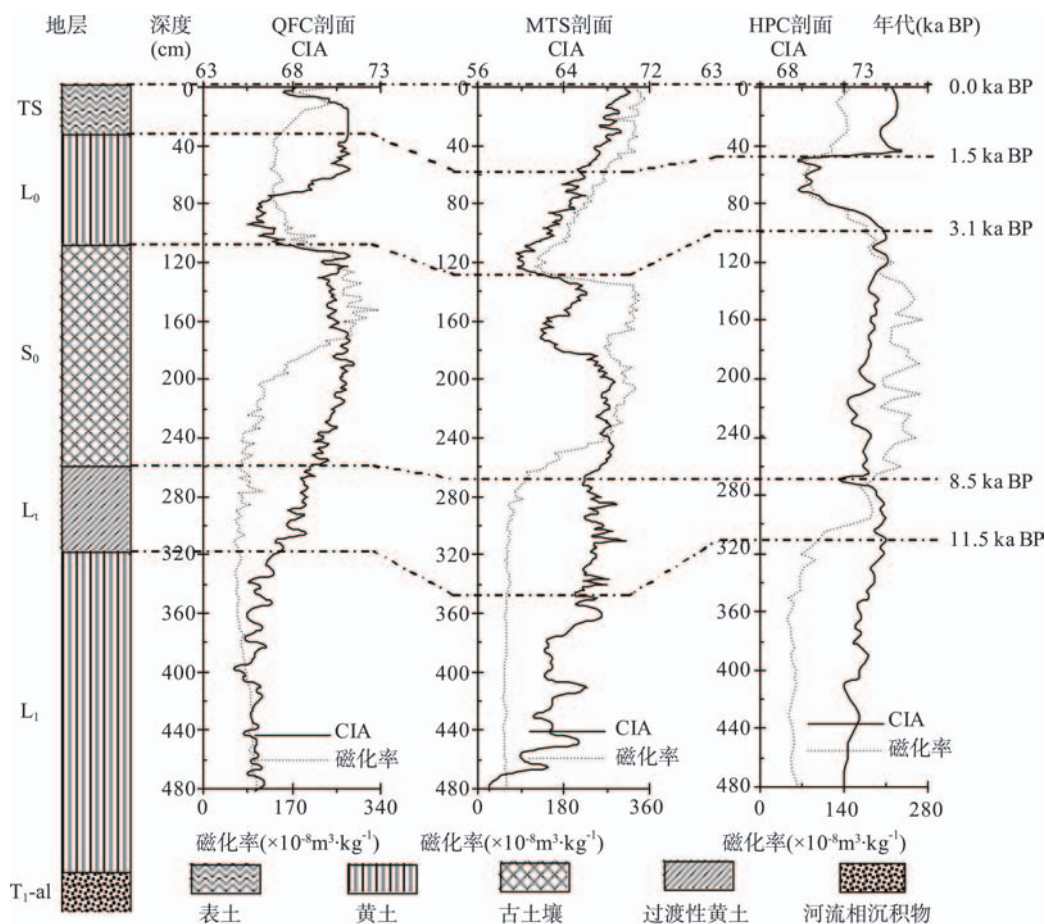


图3 汉江上游黄土CIA值与磁化率的曲线图

Fig. 3 Variations of CIA and magnetic susceptibility of the loess profiles in the upper Hanjiang River

不同时期风化成壤强度从 $L_1 \rightarrow L_0 \rightarrow S_0$ 逐渐加强、 $L_0$ 又开始减弱(图4)。显而易见,CIA值不仅较好的指示了汉江上游黄土风化成壤强度变化规律,这种规律也得到Na/K、淋溶系数、退碱系数、残积系数等地球化学参数的佐证。

**4.1.2 A-CN-K三角图** A-CN-K图(即 $Al_2O_3-CaO^*+Na_2O-K_2O$ )常被用来反映沉积物的化学风化趋势以及化学风化过程中主要矿物成分的变化<sup>[36]</sup>。在图5a中,汉江上游黄土的化学风化趋势线大致平行于CN-A连线,这说明化学风化过程中斜长石遭受较强的风化分解,易溶元素Ca、Na大量流失,形成含Al的次生黏土矿物。此外,黄土和古土壤投影点集中且靠近蒙脱石—伊利石连线一侧,说明其风化产生的黏土矿物主要以蒙脱石和伊利石为主,即整体处于脱钙、钠的中等风化阶段,而尚未达到以高岭石、三水铝石为主的强烈风化阶段。

但不同层位的化学风化强度仍存在一定差异,古土壤 $S_0$ 更靠近A顶点(图5a),指示斜长石被风化转变成黏土矿物的程度最高,而马兰黄土 $L_1$ 更靠近CN底点,说明其遭受的化学风化程度最低。从不同地层单元在图5a中的投影位置可以看出,整个剖面的风化强弱序列为古土壤 $S_0 >$ 全新世黄土 $L_0 >$ 过渡性黄土 $L_1 >$ 马兰黄土 $L_1$ ,与CIA、Na/K、淋溶系数、退碱系数、残积系数反映的风化成壤强度变化规律完全吻合。

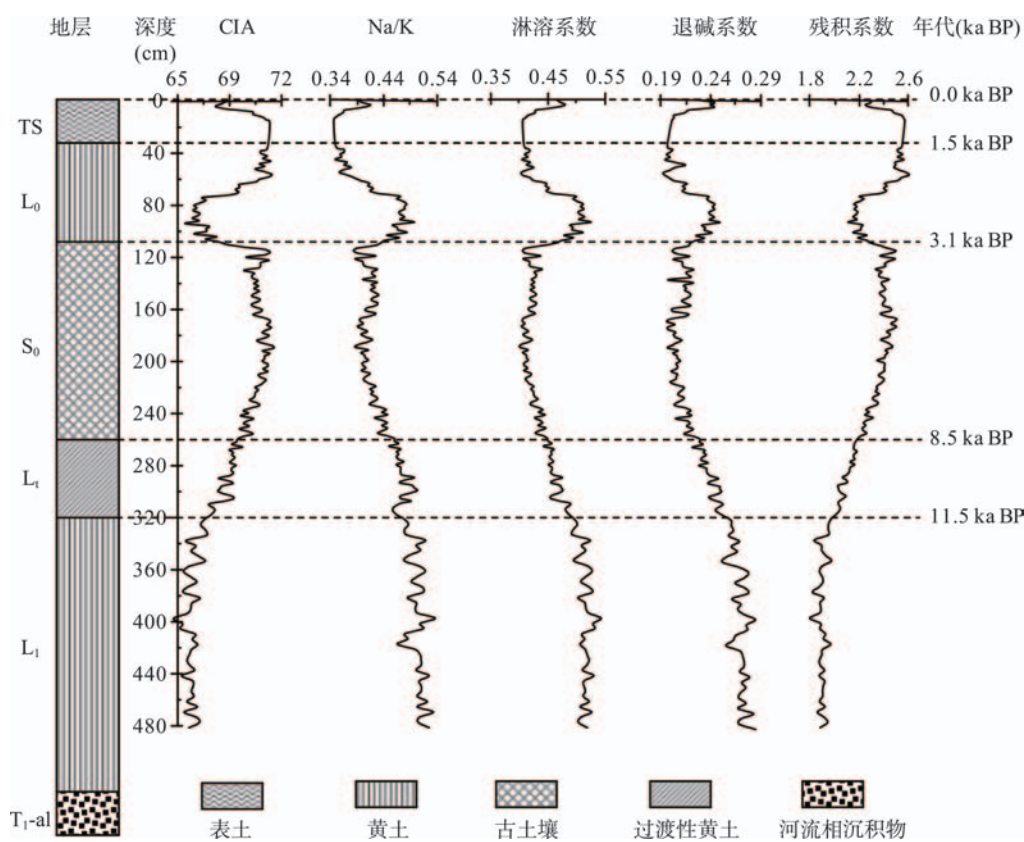


图4 汉江上游QFC剖面地球化学参数曲线图

Fig. 4 Variations of weathering parameters of the QFC profile in the upper Hanjiang River

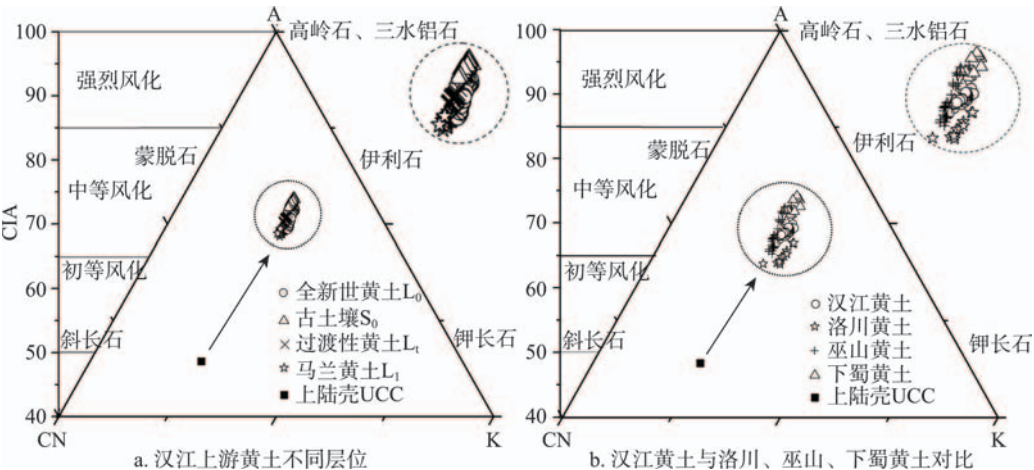


图5 汉江上游黄土化学风化趋势图及其与洛川、巫山、下蜀黄土的对比(箭头表示风化趋势)

Fig. 5 A-CN-K ternary diagram of the loess in the upper Hanjaing River and its comparison with the Luochuan, Wushan and Xiashu loess (arrows indicating weathering trend)

显然可见, 剖面宏观特征、常量元素地球化学参数及A-CN-K图反映的汉江上游黄土风化成壤强度及变化规律是一致的, 即马兰黄土 $L_1$ 最弱→过渡性黄土 $L_1$ 略有增强→古土壤 $S_0$ 最强→全新世黄土 $L_0$ 又开始减弱。



#### 4.2 汉江上游黄土风化成壤强度与气候变化

汉江上游黄土的风化成壤程度反应了古气候的特征,而时间上的变化则记录了汉江 I 级阶地形成以来气候的变化历史。末次冰期 (55.0-11.5 ka BP): 汉江 I 级阶地在 55.0 ka BP 前后形成并开始接受风尘堆积, 风尘堆积作用一直持续到 11.5 ka BP, 形成了马兰黄土  $L_1$ 。黄土  $L_1$  中, CIA (65.99)、残积系数 (1.90) 在剖面中呈现最低值, 而 Na/K (0.50)、淋溶系数 (0.52)、退碱系数 (0.27) 呈现最高值, 说明其风化成壤作用极其微弱, 指示了该时期冬季风强盛, 气候特征为寒冷干旱, 沙尘暴活动强烈, 风尘大量堆积, 与全球范围的末次盛冰期阶段相对应。全新世早期 (11.5-8.5 ka BP): 即过渡性黄土  $L_4$  堆积时期, 与马兰黄土  $L_1$  相比, CIA (68.39)、残积系数 (2.10) 有所升高, 而 Na/K (0.47)、淋溶系数 (0.46)、退碱系数 (0.24) 均降低, 表明其风化成壤作用有所加强, 指示随着全球末次冰期的结束, 冬季风减弱, 夏季风增强, 该区气候也开始转向温暖湿润, 风尘堆积作用减弱, 发生微弱的成壤改造作用。

全新世中期 (8.5-3.1 ka BP): 即古土壤  $S_0$  发育时期, CIA (70.40)、残积系数 (2.37) 达到剖面最高值, 而 Na/K (0.41)、淋溶系数 (0.42)、退碱系数 (0.21) 显著低于黄土层, 说明其风化成壤作用非常强烈, 指示该时期夏季风强盛, 气候达到最温暖湿润时期阶段 (即全新世大暖期), 风尘堆积作用微弱, 强烈的成壤改造作用占主导。全新世晚期 (3.1-0.0 ka BP): 即全新世黄土  $L_0$  堆积时期, 与古土壤  $S_0$  相比, CIA (68.51)、残积系数 (2.34) 降低, Na/K (0.42)、淋溶系数 (0.45)、退碱系数 (0.22) 升高, 说明其风化成壤作用减弱, 反映了全新世大暖期结束后, 东亚季风格局发生转变, 气候转为凉干, 沙尘暴再明显堆积。

#### 4.3 汉江黄土与其他区域(洛川、巫山、下蜀)黄土的对比

**4.3.1 常量元素组成** 将汉江黄土与洛川、巫山、下蜀黄土进行对比, 明显看出不同区域黄土常量元素组成具有高度的相似性, 主要表现为: ① 它们的主要化学成分均以  $\text{Si}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为主, 三者所占比例之和均大于 75% (即 750.0 g/kg)。但不同区域黄土中这 3 种元素总含量存在微弱差异 (表 2), 其中洛川黄土<sup>[2]</sup>和汉江黄土在 742.7~767.3 g/kg 之间、巫山黄土<sup>[17]</sup>和下蜀黄土<sup>[13]</sup>在 848.4~866.9 g/kg 之间, 这可能与区域气候环境差异相关。② 不同地区常量元素的 UCC 标准化曲线十分相似, 除 CaO 外, 其他元素变化几乎呈现出一组平行线, 均表现为  $\text{Si}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$  接近于 1.00, 没有明显亏损或富集, 而  $\text{Na}_2\text{O}$  明显位于 UCC 下方, 表现出亏损特征 (图 6); ③ 不同区域黄土的

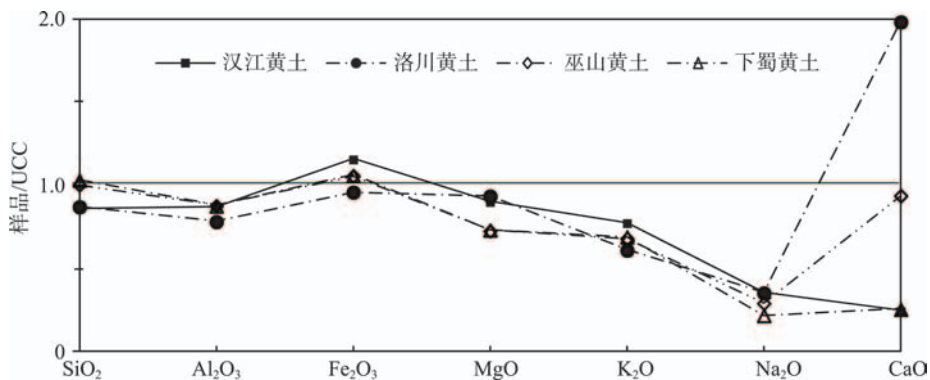


图 6 汉江上游及洛川、巫山、下蜀黄土常量元素的 UCC 标准化曲线图

Fig. 6 UCC-normalized pattern of major elements of the loess in the upper Hanjiang River and its comparison with that of the Luochuan, Wushan and Xiashu loess



UCC 标准化值 (CaO 除外) 非常接近,  $\text{SiO}_2$  变化幅度介于 0.86~1.03,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  介于 0.78~0.88,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  介于 0.96~1.16,  $\text{K}_2\text{O}$  介于 0.61~0.77,  $\text{MgO}$  介于 0.73~0.94,  $\text{Na}_2\text{O}$  介于 0.22~0.36, 各常量元素 UCC 标准化值变幅均小于 0.25 (图 6)。这些共性暗示了不同地区 (汉江、洛川、巫山、下蜀) 黄土可能具有相似的风成沉积基础。此外, 图 5b 中这些地区黄土的数据点集中于一个狭小的范围内, 且分布在 UCC→洛川黄土的连线上, 这无疑也证明了这些黄土物质成因的相似性。

$\text{Na}_2\text{O}$  的亏损是黄土沉积物中斜长石矿物受到风化蚀变的结果, 但它们的亏损程度在不同地区有所不同, 对区域风化程度差异具有一定的指示作用。 $\text{CaO}$  在洛川黄土中发生明显富集, 而在汉江、巫山、下蜀黄土中出现不同程度的亏损, 这是由于不同区域气候 (尤其是降水) 差异影响下 Ca 元素迁移淋溶程度不同而导致的; 但巫山黄土  $\text{CaO}$  的亏损程度异常偏低, 可能由于该区位于大量石灰岩 ( $\text{CaCO}_3$ ) 分布区, 石灰岩溶解于水溶液并随之迁移淀积而致, 具体原因还有待探讨<sup>[16]</sup>。

**4.3.2 化学风化程度** 尽管不同区域黄土常量元素组成特征高度一致、风化之初具有相似的风成沉积基础, 但它们经历的化学风化程度并不完全相同。汉江上游黄土的 CIA 均值为 65.99, 显著高于洛川黄土 (62.44), 接近且略低于巫山黄土 (67.04), 明显低于下蜀黄土 (70.49); 且图 7 显示, 不同区域黄土的 CIA 值从左到右 (即从洛川黄土→汉江黄土→巫山黄土→下蜀黄土) 依次增大, 反映了各地区黄土经历的化学风化强弱顺序为下蜀黄土 > 巫山黄土 > 汉江黄土 > 洛川黄土。

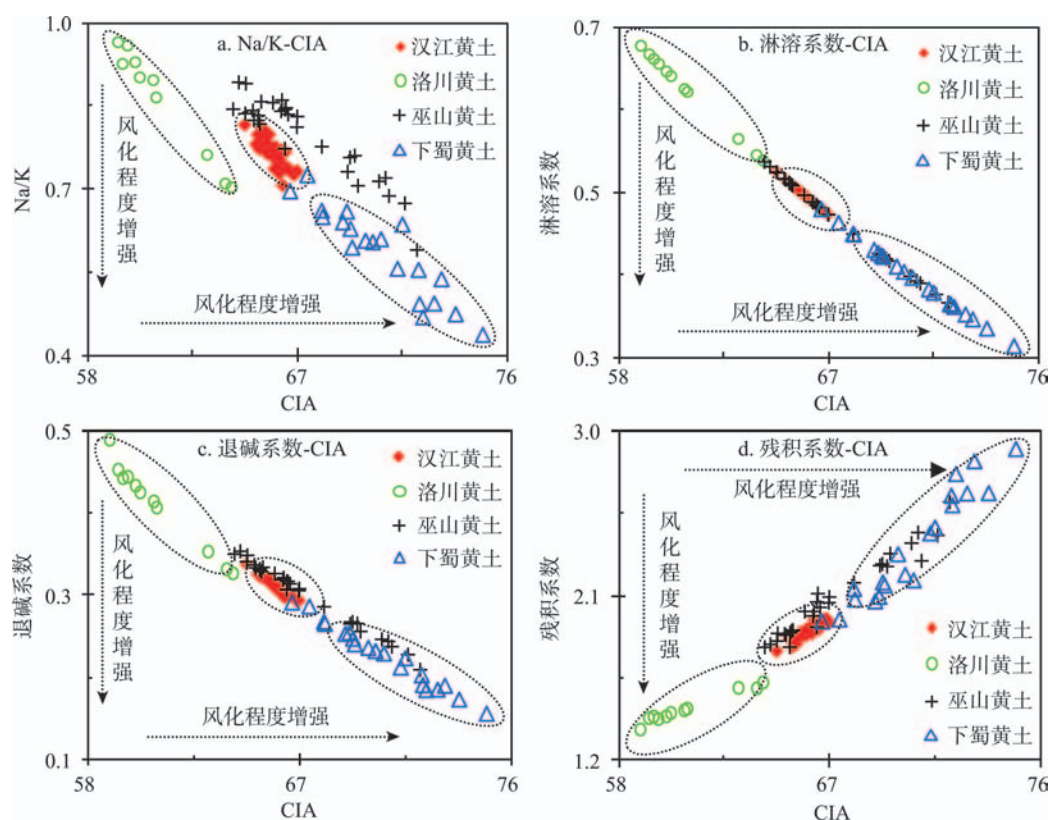


图 7 不同区域黄土在 Na/K-CIA、淋溶系数-CIA、退碱系数-CIA 和残积系数-CIA 图中的位置

Fig. 7 The location of the loess in different regions in the scatter diagram of weathering parameters

在 A-CN-K 图解中, 不同地区黄土的位置有所不同, 说明它们的斜长石矿物经历的风化蚀变程度不同 (图 5b)。洛川黄土的数据点位于最下方, 指示其斜长石被风化蚀变的程度最低, 处于初等向中等风化过渡阶段; 下蜀黄土靠近最上方, 长石风化蚀变程度最强, 处于中等风化阶段; 汉江、巫山黄土比较接近, 介于洛川、下蜀黄土之间, 也达到中等风化阶段; 但各地区黄土的数据点呈现从洛川黄土→汉江黄土→巫山黄土→下蜀黄土逐渐向右上方移动的趋势, 揭示了不同区域黄土的化学风化强度沿该方向逐渐增强, 与 CIA 值反映的规律相吻合。

同样, Na/K、淋溶系数、退碱系数、残积系数等也是衡量化学风化程度的重要参数。图 7a、7b、7c 显示, 不同区域黄土的 Na/K、淋溶系数、退碱系数的变化趋势大体一致, 洛川黄土位于最左上方, 指示其风化程度最弱; 下蜀黄土位于最右下方, 指示其风化程度最强烈; 而汉江黄土与巫山黄土介于二者之间, 即从左上方至右下方依次呈现洛川黄土、汉江黄土、巫山黄土、下蜀黄土, 反映了各地区黄土经历的化学风化强弱顺序为下蜀黄土 > 巫山黄土 > 汉江黄土 > 洛川黄土。而残积系数的变化 (图 7d) 显示, 沿左下方至右上方 (即从洛川黄土→汉江黄土→巫山黄土→下蜀黄土) 化学风化程度逐渐升高。可以看出, 不同地区黄土在 Na/K-CIA、淋溶系数-CIA、退碱系数-CIA、残积系数-CIA 图中分布在不同的区域, 即清楚地显示了它们的区域风化程度差异。且 Na/K、淋溶系数、退碱系数、残积系数反映的黄土区域风化程度变化与 CIA 值、A-CN-K 图解揭示的规律一致, 共同指示了不同地区黄土经历的化学风化强弱顺序为下蜀黄土 > 巫山黄土 > 汉江黄土 > 洛川黄土。

相同沉积物在表生环境下化学风化方向 and 风化强度差异主要是受沉积环境条件 (如气温和降水等) 所制约<sup>[13, 17, 37]</sup>。汉江黄土的化学风化强度高于洛川黄土, 从现代气候条件看, 二者分别位于秦岭南北两侧的北亚热带和暖温带季风气候区, 汉江区域的年均气温与降水量 (15.2 °C 和 820 mm) 均比洛川地区 (9.2 °C 和 622 mm) 优越, 这种差异在秦岭隆升之时就开始出现, 说明气候条件差异是地质历史时期风化成壤强度差异的主要原因。空间上从下蜀黄土→巫山黄土→汉江黄土→洛川黄土, 即大致沿中国东南至西北方向, 这些黄土经历的风化程度呈现降低趋势, 这种变化特征与中国现代季风气候的空间差异相吻合, 这无疑说明不同区域黄土风化强度的差异主要是受夏季风的影响程度不同造成的, 是对东亚季风气候变化的具体体现。

## 5 结论

(1) 汉江上游黄土的主要化学成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 平均含量分别为 573.8 g/kg、134.1 g/kg 和 59.4 g/kg, 三者之和为 767.3 g/kg; 常量元素含量大小排序为  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{CaO}$ 。风化成壤过程中 Na、Ca、Mg、Si 发生不同程度的迁移淋溶, 而 Fe、Al、K 则相对富集。

(2) 不同地层层位风化成壤强弱顺序为马兰黄土  $L_1$  最弱→过渡性黄土  $L_1$  略有增强→古土壤  $S_0$  最强→全新世黄土  $L_0$  又降低的规律, 这种变化实质上反映了气候在时间序列上的演变规律, 即晚更新世末次冰期 (55.0-15.0 ka BP) 气候冷干, 沙尘暴活动强烈→全新世早期 (15.0-8.5 ka BP) 气候开始增温增湿→全新世中期 (8.5-3.1 ka BP) 气候达到最温暖湿润阶段→全新世晚期 (3.1-0.0 ka BP) 气候恶化, 又开始转向凉干。

(3) 汉江黄土与洛川、巫山、下蜀黄土的常量元素分布高度一致, 均以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为主, 三者之和均大于 750.0 g/kg,  $\text{Si}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$  的含量接近

于UCC, 而 $\text{Na}_2\text{O}$ 表现出明显的亏损特征, 且不同区域各种常量元素( $\text{CaO}$ 除外)的UCC标准化变幅均小于0.25, 暗示了它们具有相似的风成沉积基础; 但不同地区黄土的化学风化强度存在明显差异, 表现为洛川黄土 < 汉江黄土 < 巫山黄土 < 下蜀黄土, 这种特征与中国现代季风气候的空间变化规律相吻合, 即不同地区黄土风化程度差异是对东亚季风变化的具体体现。

## 参考文献(References)

- [1] Liu Dongsheng, Lu Yanchou, Zheng Honghan. Loess and Environment. Beijing: Science Press, 1985. [刘东生, 卢演侑, 郑洪汉. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [2] Wen Qizhong. Geochemistry in Chinese Loess. Beijing: Science Press, 1989. [文启忠. 中国黄土地球化学. 北京: 科学出版社, 1989.]
- [3] Diao Guiyi, Wen Qizhong. The migration series of major elements during loess pedogenesis. *Geology-Geochemistry*, 1999, 27(1): 21-26. [刁桂仪, 文启忠. 黄土风化成土过程中主要元素迁移系列. *地质地球化学*, 1999, 27(1): 21-26.]
- [4] Rutter N W, Ding Zhongli. Chinese Loess and Global Change. *Quaternary Sciences*, 1992(1): 2-11. [Rutter N W, 丁仲礼. 中国黄土和全球变化. *第四纪研究*, 1992(1): 2-11.]
- [5] Huang C C, Pang J L, Su H X, et al. The Ustic Isohumisol (Chernozem) distributed over the Chinese Loess Plateau: Modern soil or palaeosol? *Geoderma*, 2009, 150(3-4): 344-358.
- [6] 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 Asian inland. *Science in China: Series D*, 2001, 31(2): 136-145. [陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近2.5 Ma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. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(2): 136-145.]
- [7] Gallet S, Jahn B M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications. *Chemical Geology*, 1996, 133(1-4): 67-88.
- [8] Wen Qizhong, Diao Guiyi, Jia Rongfen, et al. Geochemical records of paleoclimate change in loess sections. *Quaternary Sciences*, 1995, 15(3): 223-231. [文启忠, 刁桂仪, 贾蓉芬, 等. 黄土剖面中古气候变化的地球化学记录. *第四纪研究*, 1995, 15(3): 223-231.]
- [9] Huang Chunchang. Loess-palaeosol and climate changes on southern Loess Plateau in Late Pleistocene. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(1): 1-10. [黄春长. 黄土高原南部晚更新世黄土古土壤与气候变迁. *地理学报*, 1989, 44(1): 1-10.]
- [10] Liang L J, Sun Y B, 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69(12): 177-184.
- [11] Qiao Y S, Zhao Z Z, Wang Y, et al. Variations of geochemical compositions and the paleoclimatic significance of loess-soil sequence from Ganzhi county of western province, China. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(24): 4697-4703.
- [12] 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. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(3): 255-260. [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. *科学通报*, 2010, 55(3): 255-260.]
- [13] Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Shouye, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu province. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 62(11): 1174-1184. [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. *地理学报*, 2007, 62(11): 1174-1184.]
- [14] Chen Y Y, Li X S, Han Z Y, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(3): 341-352.
- [15] Yang Shouye, Li Congxian, Li Xusheng, et al. Geochemical records of chemical weathering of Xiashu loess in lower reaches of Yangtze River. *Geochemica*, 2001, 30(4): 402-406. [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. *地球化学*, 2001, 30(4): 402-406.]
- [16] Li Chang'an, Zhang Yufen, Xiong Deqiang, et al. Major element compositions of the "Wushan Loess". *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(5): 916-922. [李长安, 张玉芬, 熊德强, 等. “巫山黄土”常量元素地球化学特征. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2013, 38(5): 916-922.]
- [17] Zhang Yufen, Li Chang'an, Xiong Deqiang. Oxide geochemical characteristics and paleoclimate records of "Wushan loess". *Geology in China*, 2013, 40(1): 352-360. [张玉芬, 李长安, 熊德强. “巫山黄土”氧化物地球化学特征与古气候



- 记录. 中国地质, 2013, 40(1): 352-360.]
- [18] Zhang Yufen, Shao Lei, Xiong Deqiang, et al. Elemental compositions of the "Wushan Loess": Implications for origin and sediment source. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 78-84. [张玉芬, 邵磊, 熊德强. "巫山黄土"元素地球化学特征及成因和物源意义. 沉积学报, 2014, 32(1): 78-84.]
- [19] Li Xusheng, Yang Dayuan, Lu Huayu, et al. Oxide-geochemistry features and paleoclimatic record of the aeolian-dust depositional sequence in southern Anhui. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(4): 75-82. [李徐生, 杨达源, 鹿化煜, 等. 皖南风尘堆积序列氧化物地球化学特征与古气候记录. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(4): 75-82.]
- [20] Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y S, et al. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China. *Quaternary Science Reviews*, 2010(29): 3317-3326.
- [21] Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zhou Yali, et al. Holocene aeolian loess and its pedogenic modification in the Upper Hanjiang River Valley, China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1562-1573. [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. 地理学报, 2011, 66(11): 1562-1573.]
- [22] 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. *Geological Review*, 2014, 60(5): 1076-1084. [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. 地质论评, 2014, 60(5): 1076-1084.]
- [23] Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zhou Yali, et al. Eolian loess-paleosol sequence and OSL age of the first terraces within the Yunxi Basin along the upper Hanjiang River, China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 63-72. [庞奖励, 黄春长, 周亚利, 等. 郧县盆地风成黄土—古土壤与汉江 I 级阶地形成年龄研究. 地理学报, 2015, 70(1): 63-72.]
- [24] Yang Jianchao, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Grain-size distribution and its significance in Liaowadian profile in the upper Hanjiang River Valley, China. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(3): 682-687. [杨建超, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游河谷辽瓦店剖面粒度组成特征及意义. 中国沙漠, 2013, 33(3): 682-687.]
- [25] Mao Peini, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Pedogenesis characteristics and its environmental information interpretation of Guixianhekou profile in the upper Hanjiang River Valley, China. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(6): 1678-1683. [毛沛妮, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游谷地归仙河口剖面风化成壤特征及其记录的气候变化事件. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1678-1683.]
- [26] Zhao Yanlei, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Study on loess-weathering paleosol sequence and paleoclimate evolution in QFC profile in Yunxian, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(5): 840-845. [赵艳雷, 庞奖励, 黄春长, 等. 郧县前坊村剖面黄土—古土壤序列风化成壤及古气候研究. 沉积学报, 2014, 32(5): 840-845.]
- [27] Bian Hongyan, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. A comparative study of chemical weathering intensity and element transport features of loess- palaeosol in the upper reaches of Hanjiang and Weihe river valleys, China. *Geographical Research*, 2014, 33(4): 654-664. [卞鸿雁, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游谷地与渭河谷地黄土化学风化程度比较. 地理研究, 2014, 33(4): 654-664.]
- [28] Shen Yuchang. Landscape and its development history of Hanjiang River Valley. *Acta Geographica Sinica*, 1956, 22(4): 295-321. [沈玉昌. 汉水河谷的地貌及其发育历史. 地理学报, 1956, 22(4): 295-321.]
- [29] Zhu Zhenda. Valley landscape of Hanjiang river upstream between Danjiangkou to Baihe. *Acta Geographica Sinica*, 1955, 21(3): 259-270. [朱震达. 汉江上游丹江口至白河间的河谷地貌. 地理学报, 1955, 21(3): 259-270.]
- [30] Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. Chemical Index of Alteration (CIA) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 539-544. [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. 地学前缘, 2003, 10(4): 539-544.]
- [31] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London: Blackwell, 1985: 277.
- [32] Qiao Y S, Zhao Z Z, Wang Y, et al. Geochemical characteristics of the eolian deposits in southern China, and their implications for provenance and weathering intensity. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 308(3): 511-523.
- [33] Chen Jun, Li Junfeng, Qiu Gang, et al. Geochemical studied on chemical weathering degree of Luochuan Loess, Shaanxi Province. *Science in China: Series D*, 1997, 27(5): 531-536. [陈骏, 季峻峰, 仇纲, 等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究. 中国科学(D辑), 1997, 27(5): 531-536.]
- [34] Wang Lijuan, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Weathering intensity of the TSG Holocene loess-paleosol sequence and its significance. *Progress in Geography*, 2011, 30(3): 379-384. [王丽娟, 庞奖励, 黄春长, 等. 甜水沟全新世黄土—古土壤序列风化程度及意义. 地理科学进展, 2011, 33(3): 379-384.]
- [35] Chen Yumei, Shu Qiang, Zhang Maoheng, et al. Environmental evolution information recorded in the Xiashu loess (250-

- 100 ka) in Nanjing, China. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(6): 55-59. [陈玉美, 舒强, 张茂恒等. 南京下蜀黄土记录的250~100 ka期间的环境演化信息. 地质科学情报, 2014, 33(6): 55-59.]
- [36] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major chemistry of lutites. *Nature*, 1982, 299: 715-717.
- [37] Xu Liangfeng, Wei Ji, Jiang Wei. The weathering characteristics of the reticulate red clay in southern Anhui province and its paleo-environmental significance. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(1): 7-12. [许良峰, 魏骥, 姜伟. 皖南网纹红土的剖面风化特征及其古气候意义地学前缘. 土壤通报, 2010, 41(1): 7-12.]

## Chemical weathering characteristics and regional comparative study of the loess deposits in the upper Hanjiang River

MAO Peini, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, ZHA Xiaochun,  
ZHOU Yali, GUO Yongqiang, HU Hui, LIU Tao

(College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Field investigations were carried out along the upper reaches of the Hanjiang River, a major tributary of the Yangtze River in China. Three loess profiles on the first river terrace were selected for a detailed study. The characteristics of major elements and chemical weathering were analyzed systematically. Results are shown as follows. (1) The major elements are dominated by  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , the total average content of which is 767.3 g/kg, in the loess profiles of the region. The contents of the major elements are ranked in the following order:  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{CaO}$ . The elements Na, Ca, Mg and Si are leached to different degrees and Fe, Al and K relatively enriched in the chemical weathering processes. (2) The weathering and pedogenic intensity was the weakest in the Malan loess  $L_1$ , increased slightly in the transition loess  $L_t$ , became the strongest in the paleosol  $S_0$ , and decreased again in recent loess  $L_0$ . The results reveal that the climate was cold-dry in the Last Glacial (55.0-15.0 ka BP), turned into warm-wet gradually in the Early Holocene (15.0-8.5 ka BP), became the warmest and wettest in the Mid-Holocene Climate Optimum (8.5-3.1 ka BP), and turned into cool and dry in the Late Holocene (3.1-0.0 ka BP). (3) Based on the comparison with Luochuan, Wushan and Xiashu loess, we can find that the major elemental compositions and the UCC-normalized patterns of the loess are similar with those of Luochuan, Wushan and Xiashu loess to a higher degree, suggesting a similar sedimentary background of aeolian loess. But the chemical weathering intensity of these loess deposits changes significantly in different parts of China, with the sequence of Luochuan loess < loess in the Hanjiang River < Wushan loess < Xiashu loess. The changing trend is well consistent with the modern climate change in China, which is the response to the East Asian monsoon.

**Keywords:** loess; major element; chemical weathering degree; upper Hanjiang River; regional comparison