

doi:10.3799/dqkx.2013.090

“巫山黄土”常量元素地球化学特征

李长安^{1,2}, 张玉芬³, 熊德强³, 周 耀³, 郭 洁³

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要: 为了研究“巫山黄土”的地球化学特征, 利用 X 射线荧光光谱仪对“巫山黄土”样品的常量元素进行测试分析, 结果表明: (1) 常量元素 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 Fe_2O_3 和 TiO_2 含量随着剖面中细颗粒粘土含量的变化呈现明显的旋回变化特点, 该特点对“巫山黄土”沉积时的气候演化规律具有一定的指示意义; (2) 在化学风化过程中, 元素 Si、Al、Fe、K、Mn、Ti 之间具有很好的相似性, 表现为明显的正相关, 而它们与元素 Ca、P 却具明显的差异性, 表现为明显的负相关; (3) 沉积物的粒径对部分常量元素地化特征具有一定的控制效应, Al、Fe、Ti 等元素主要富集于 $0.8\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 黏土粒级沉积物中, 而在 $40\sim 100\ \mu\text{m}$ 的粗粉砂和极细砂粒级中的含量极少; (4) “巫山黄土”常量元素 UCC 标准化后分布曲线近于平坦线型且靠近 UCC 分布曲线, 指示其可能为风积成因。

关键词: 长江上游; “巫山黄土”; 沉积物; 常量元素; 粒度效应; 地球化学。

中图分类号: P532

文章编号: 1000-2383(2013)05-0916-07

收稿日期: 2012-09-13

Major Element Compositions of the “Wushan Loess”

LI Chang-an^{1,2}, ZHANG Yu-fen³, XIONG De-qiang³, ZHOU Yao³, GUO Jie³

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In this paper, we present the major element compositions of the “Wushan loess”, measured by X-ray fluorescence spectrometer. The content of major elements SiO_2 , Al_2O_3 , TFe_2O_3 , Fe_2O_3 and TiO_2 varies with the content of clay in the profile. Besides the content of these elements displays several obvious circles and could be indicators of climate when the “Wushan loess” deposited. The elements of Si, Al, Fe, K, Mn and Ti show similarity and positive correlation during the weathering process while they are different from Ca and P, with negative correlation. The results reveal that grain size compositions of the sediments could dominate the content of some major elements. Major elements such as Al, Fe and Ti are concentrated in the clay fraction between 0.8 and $2.0\ \mu\text{m}$ instead of the coarse silt and very fine sand fractions ($40\sim 100\ \mu\text{m}$). The UCC-normalized patterns of the “Wushan loess” are almost flat indicating the aeolian origin.

Key words: upper reaches of the Yangtze River; “Wushan loess”; sediments; major elements; grain size effect; geochemistry.

不同气候条件下存在着一定的与之相适应的沉积物, 这些沉积物与它所处环境之间的平衡关系是通过沉积矿物及元素组成的迁移或富集及元素重新组合产生新矿物来实现的, 因而它们不但具有原岩的组成特征, 而且记录着它们形成时的气候环境, 这就是利用元素地球化学的研究来探讨气候变化历史

的理论基础(张虎才等, 1997; 刁桂仪和文启忠, 1999; 李徐生等, 1999; Chen *et al.*, 2008). 第四纪沉积物中主要的造岩元素硅(Si)、铝(Al)、铁(Fe)、钙(Ca)、镁(Mg)、钾(K)、钠(Na)等主要以其氧化物的形式存在. 依据这些氧化物的表生地球化学性质, 研究其百分含量在剖面中的变化规律, 可以对古气候

基金项目: 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(No. SKILLQG0908); 国家自然科学基金(Nos. 40971008, 40771213).

作者简介: 李长安(1956—), 男, 教授, 博士, 主要从事第四纪地质与环境地质方面的教学与研究. E-mail: chanli@cug.edu.cn

环境进行指示(张虎才等,1997;李徐生等,1999;顾兆炎等,2000;陈旻等,2001;丁敏等,2011;杨瑞霞等,2011;李传想等,2012;于英鹏等,2012)。

“巫山黄土”剖面位于巫山县客运港附近的长江左岸(张玉芬等,2010)。该剖面为一建筑工地人工开挖的露头剖面,剖面高约15 m,是巫山县境内新近发现的一个黄土剖面。岩性主要以褐黄色和黄色的砂、粉砂和砂质粘土组成,含有少量的钙质结核。剖面无层理,垂直节理发育,大孔隙明显。整个剖面土壤化程度较高,但未见明显的古土壤层分布。光释光(OSL)年龄测试表明该剖面底部年代大约是晚更新世早期,其年龄为100 ka B.P.左右。拟通过对该剖面样品的常量元素特征分析,初步探讨该区的古气候演化特征和意义。

1 实验样品的采集和测试

采样时剥去剖面上表层土,向剖面内挖0.15 m深的竖槽,从剖面顶部开始,在槽内壁自上而下以10 cm间隔连续取样,共采集地球化学样品146件。并对每组样品都分开密封保存,按取样点位置进行分类,为之后样品测量及数据处理作准备。室内根据岩性变化特征不等间距实测了73件常量元素。

地球化学样品测试在国土资源部合肥矿产资源监督检测中心完成,使用仪器为X射线荧光光谱仪。首先将样品在常温下自然风干,然后将每件约5 g重的样品置于玛瑙研钵中研磨,再用200目分析筛筛选后供测试,共测试了12种主量元素(氧化物形式,如:SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、Fe₂O₃、FeO、K₂O、Na₂O、CaO、MgO、MnO、TiO₂、P₂O₅)和烧失量(LOI)。根据多个空白样、重复样及国家标准样(GSS)的分析来监控测试精度与准确度,得出分析的相对偏差,除FeO误差>10%外,其他氧化物误差均小于2.5%。表1是“巫山黄土”样品氧化物测试统计结果。粒度分析使用仪器为Mastersizer 2000激光粒度仪,测试范围为0.02~2000.00 μm,重复测试误差

小于0.5%。

2 实验结果分析

2.1 常量元素含量特征

由常量元素测试结果(表1)分析可见:“巫山黄土”常量元素含量特征为:SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃含量较高,平均值分别为66.20%、13.35%和4.60%,质量分数分布范围分别为59.62%~70.49%、11.83%~15.28%和4.85%~6.15%;CaO、K₂O、MgO、Na₂O含量次之,平均含量分别为3.66%、2.32%、1.60%、1.23%,质量分数分布范围分别为0.93%~12.20%、2.17%~2.40%、1.37%~1.83%、0.84%~1.38%。TiO₂、FeO、P₂O₅、MnO元素含量最少,平均含量分别仅为0.84%、0.69%、0.13%、0.09%,其质量分数分布范围分别介于0.78%~0.89%、0.35%~1.30%、0.08%~0.20%、0.07%~0.13%之间。统计表明:“巫山黄土”73件样品的SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃三者的平均含量之和达到了84.15%,变化于75.27%~91.58%范围,明显高于北方的洛川黄土(平均值75.41%)(陈骏等,1997)和川西的甘孜黄土(平均值76.79%)(王玲等,2010)。同时“巫山黄土”常量元素含量随深度变化曲线(图1)显示各主量元素在沉积垂向上均有不同程度的波动并伴有以下明显的特点:(1)SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂含量由老到新逐渐减少,而FeO、CaO、Na₂O、P₂O₅含量则呈现由老到新逐渐增多的趋势,MnO、K₂O、MgO含量由老到新呈现不明显的逐渐增加的趋势;(2)在整个剖面中各个氧化物组分都有一定程度的变化和波动,但在剖面6.0~10.0 m深度段曲线的波幅最大,且氧化物SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂百分含量在此段含量具有明显增高的特点。

2.2 常量元素含量标准化曲线特征

在研究常量元素特征时,通常以上陆壳平均值作为标准,将常量元素与上陆壳平均值相比,即所谓

表1 “巫山黄土”样品常量元素含量(%)平均值

Table 1 The major elements average content(%) of the “Wushan loess”

样品数(73)	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	MnO
平均值	13.35	5.29	0.69	4.60	1.23	1.60	3.66	66.20	0.13	2.32	0.84	0.09
最大值	15.28	6.15	1.30	5.80	1.38	1.83	12.20	70.49	0.20	2.40	0.89	0.13
最小值	11.83	4.85	0.35	3.82	0.84	1.37	0.93	59.62	0.08	2.17	0.78	0.07

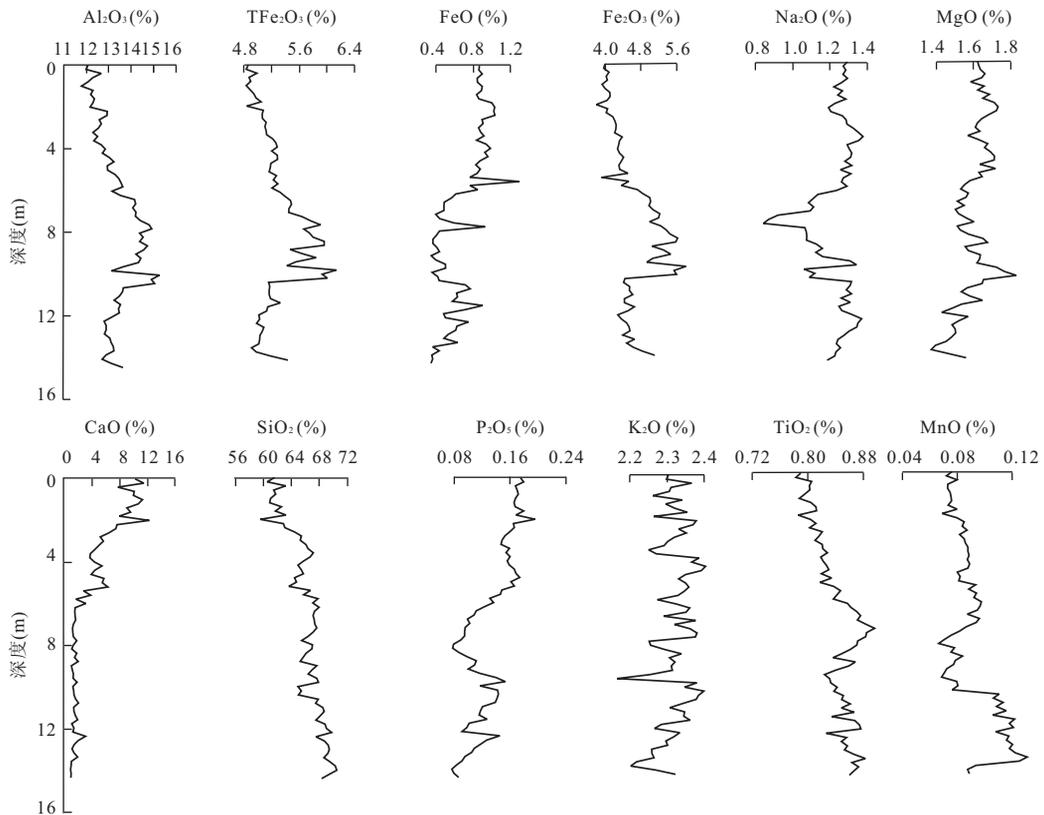


图1 “巫山黄土”氧化物含量随深度变化

Fig.1 Major chemical compositions variation with depth of the “Wushan loess”

的常量元素 UCC (upper continent crust) 标准化 (Taylor and McLennan, 1985; 李徐生等, 2007; 乔彦松等, 2010). 图 2 为“巫山黄土”常量元素 UCC 标准化后结果, 由图可知“巫山黄土”除钠 (Na) 和磷 (P) 以外, 其他常量元素的分布曲线近于平坦线型且靠近 UCC 分布曲线, 表明“巫山黄土”与 UCC 的化学组成比较接近, 其物质来源广泛, 并经过充分混合, 使之趋近于上部陆壳平均成分. Na 和 P 元素的数据点则显著偏离上部陆壳的平均组成, 与 UCC 相比表现出较明显的亏损特征, 这可能是大陆化学风化的效应.

2.3 常量元素含量相关性分析

对 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 SiO_2 、 P_2O_5 、 MnO 、 TiO_2 作一元线性回归分析 (表 2), 发现 Al_2O_3 、 SiO_2 与 TFe_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 成强烈正相关, 因为 Si、Al、Fe 和 Ti 几乎同时在剖面中富集; Al_2O_3 、 SiO_2 与 CaO 、 P_2O_5 成强烈负相关, 这可能是由于 Al、Si 是化学活动性比较稳定的元素, 易在湿热条件下富集, 而 P、Ca 元素是活动性中等或较强的元素, 只要是在半干旱一半湿润的气候环境下, CaO 与 P_2O_5 就可以较多地被

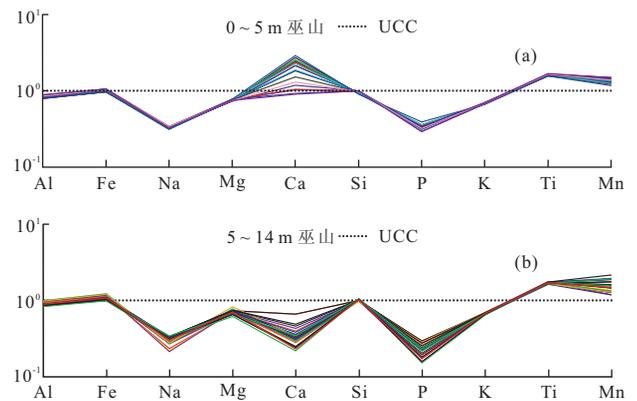


图2 “巫山黄土”部分样品常量元素 UCC 标准化曲线

Fig.2 UCC-normalized pattern of major elements of the “Wushan loess”

溶解和迁移, 主要在较干旱的气候环境下富集; FeO 与 Fe_2O_3 成强烈负相关, 表明了它们在剖面中随着氧化还原条件的变化是相互转化的 (李徐生等, 1999).

2.4 常量元素含量与沉积物粒径相关性分析

图 3 为“巫山黄土”常量元素与其粒径相关性曲线, 由图可见: (1) 氧化物 TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、

表 2 “巫山黄土”氧化物含量相关系数

Table 2 Correlation coefficient matrix of some major chemical compositions of the “Wushan loess”

氧化物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
SiO ₂	1.00											
Al ₂ O ₃	0.65	1.00										
TFe ₂ O ₃	0.55	0.95	1.00									
Fe ₂ O ₃	0.62	0.93	0.95	1.00								
FeO	-0.58	-0.65	-0.60	-0.82	1.00							
K ₂ O	0.63	0.76	0.68	0.59	-0.27	1.00						
Na ₂ O	0.21	-0.45	-0.44	-0.43	0.29	-0.11	1.00					
CaO	-0.95	-0.85	-0.77	-0.81	0.66	-0.74	0.03	1.00				
MgO	-0.22	0.26	0.38	0.18	0.23	0.38	-0.07	0.04	1.00			
MnO	0.71	0.18	-0.01	0.08	-0.22	0.43	0.43	-0.56	-0.37	1.00		
TiO ₂	0.93	0.80	0.68	0.75	-0.67	0.68	-0.13	-0.96	-0.22	0.59	1.00	
P ₂ O ₅	-0.73	-0.68	-0.56	-0.7	0.76	-0.39	0.36	0.77	0.47	-0.44	-0.86	1.00

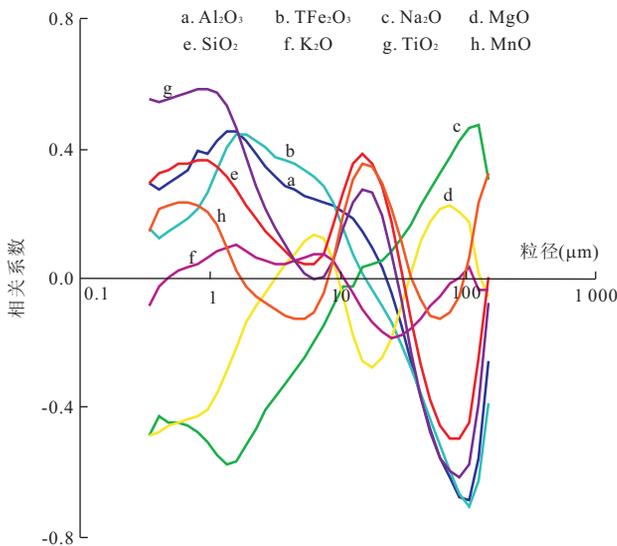


图 3 “巫山黄土”常量元素氧化物与沉积物粒径相关性曲线
Fig.3 Major element compositions vary with correlation coefficient of the “Wushan loess”

SiO₂、K₂O、MnO 与粒径在 0.8~2.0 μm 区间段表现为正相关,其中 TiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃ 与该粒径段的相关系数达 0.5 以上,呈显著正相关, SiO₂、K₂O 与该粒径段的相关系数为 0.5 以下,呈低度相关,而 Na₂O、MgO 与该粒径段却表现为强烈的负相关。(2)氧化物 SiO₂、TiO₂、TFe₂O₃、Al₂O₃ 与粒径在 40~100 μm 区间段则表现为显著负相关,而 Na₂O、MgO 与该粒径段却表现为正相关关系。因为大于 100 μm 的粒径级的颗粒含量极少,所以该粒径级不予考虑。

根据以上分析可知, TiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、SiO₂、K₂O、MnO 主要富集于 0.8~2.0 μm 的粒径级的沉积物中,而 Na₂O、MgO 却主要富集于 40~

100 μm 的粒径级的沉积物中。

3 讨论

3.1 “巫山黄土”常量元素含量变化特征对气候的指示

黄土是干冷气候条件下的产物,此时地表植被不发育,风化成壤作用微弱,原生 CaCO₃ 很少或几乎没有被淋失;古土壤是黄土在温湿气候条件下经过风化作用后形成的,此时地表植被发育,风化成壤作用强, CaCO₃ 淋失严重,稳定成分相对富集(雷祥义和岳乐平,1997)。一般来说,气候越温湿成土作用就越强烈,成土母质中岩基遭到淋失,铁、铝等高价氧化物相对聚集(李铮华和王玉海,1998)。因此,剖面中氧化物含量的变化可以间接表征古气候的变化。由表 2 和图 1 所示的“巫山黄土”常量元素氧化物含量分布特点,即常量元素的氧化物 SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂ 百分含量在 6 m 以下表现为高值,在 6 m 以上表现为低值,并且在 7~10 m 段为本剖面的最高值段。因此,可将巫山剖面气候变化以大约 6 m 为界分为上下两个时段,在剖面下段(6 m 以下)气候相对比较温湿,上段气候相对比较干冷,在剖面 7~10 m 沉积时期气候为本剖面最温暖的时期,这与野外观测该时段沉积物的成壤化程度相对比较高的结果是一致的。同时与笔者对沉积物粒度在该段粒径最细的研究结果也是一致的(李长安等,2010)。

3.2 “巫山黄土”常量元素含量标准化曲线特征对成因的指示

图 2 给出了“巫山黄土”常量元素 UCC 标准化后的结果,由图可见“巫山黄土”除 Na 和 P 以外的

常量元素的分布曲线近于平坦线型且靠近 UCC 分布曲线,表明“巫山黄土”与 UCC 的化学组成是比较接近的,其沉积物来源广泛,并经过充分混合,使之趋近上部陆壳平均成分.这也是风积成因沉积物物质组成的一个重要标志和特点.因此,“巫山黄土”常量元素 UCC 标准化后曲线的上述特点指示了“巫山黄土”系风积成因.分析图 2 还可以发现元素 Ca 标准化后的曲线在剖面上段(图 2a)和下段(图 2b)具有不同的变化规律,上段相对于 UCC 表现为富集,而下段相对于 UCC 却表现为亏损,这主要与 Ca 在不同的气候条件环境中具有不同的迁移和富集规律有关.也间接的反映出在剖面上段沉积时较下段沉积时的气候要干冷.

3.3 “巫山黄土”常量元素化学风化过程中的相似性和差异性特点

表 2 给出的“巫山黄土”的常量元素相关系数矩阵表明, SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 K_2O 之间呈显著正相关,而它们与 CaO 呈显著负相关.“巫山黄土”的形成经历了粉尘的形成、搬运、堆积和成壤等一系列复杂过程,在上述过程中原始粉尘不同程度地遭受了后期的风化和改造作用.Si 和 Al 是硅酸盐矿物的主要组成元素,在风化过程中属于相对稳定的元素.钛(Ti)在地表分布较分散,但化学性质较稳定且不易通过再分配进行集中(王云和魏复盛,1995).铁(Fe)是变价元素,在地表的氧化条件下 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ,生成难溶的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 Fe_2O_3 ,常残留在风化产物中(欧阳自远,2001),而 Fe 只有在强酸性条件下才发生淋溶迁移(刘英俊等,1984).因此,在风成沉积地层中 Si、Al、Fe、Ti 含量的增加代表着气候的暖湿波动;相反,气候向干燥方向变化时,地层多呈碱性,易溶元素不易淋失,Si、Al、Fe、Ti 的含量相对降低(王云和魏复盛,1995).钾(K)在风化和成土过程中,K 元素在土壤中残留比较多,K 在地层中含量增高反映气候湿润,降水多;反之,表明降水相对减少,气候相对干燥(管清玉,2006).钙(Ca)是较易迁移元素,在温暖湿润的环境中,Ca 大量迁移.黄土中的 Ca 主要是以 CaCO_3 的形式存在(文启忠,1989),使黄土层具有富含碳酸盐的典型特征.表 2 显示了 Ca 与其他组分呈显著负相关关系.因此,“巫山黄土”常量元素间所表现出的相似性和差异性特点是它们本身的地球化学风化过程的相似性和差异性,以及气候环境演变共同作用的结果.

3.4 粒度对各常量元素分布的控制效应

如图 3 所示,Fe、Al、Ti 与 $0.8\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 之间的

黏土粒级成分呈显著正相关,Si 呈低度相关,K 元素与 $0.8\sim 9.0\ \mu\text{m}$ 之间粒级呈低度正相关.暖湿环境条件下,易溶元素大量溶解迁移,Al、Fe、Ti 等迁移能力很弱的元素,往往残留在原地形成的新矿物——黏土矿物中(管清玉,2006).康建成和穆德芬(1998)研究表明,K 元素分布于硅酸盐矿物中,被风化解析出来后,易受到黏粒的置换、吸附;赵锦慧等(2004)认为 K 不仅是黄土中主要黏土矿物伊利石的组成元素之一,也更易于被黏粒吸附;K 相对富集,其变化趋势受到黏粒含量的影响,与成壤强度正相关.“巫山黄土”K 元素含量与 $0.8\sim 9.0\ \mu\text{m}$ 粘土和极细粉砂呈低度正相关的特点,也说明了“巫山黄土”所经历的风化并不强烈,Ca 主要赋存于易风化的斜长石和暗色矿物辉石中,因此在化学风化的初始阶段就会遭受强烈的淋滤(梁美艳等,2006),表现出与其他元素具有相反的变化规律,主要富集于较粗的粒级组分中.图 3 显示,Al、Fe、Ti 与 $40\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间的粗粉砂和极细砂粒级成分呈显著负相关,这可能与来自于粗粉砂及极细砂组分对全样的稀释效应有关(王玲等,2010).

4 结论

通过对采自长江上游巫山县城附近的“巫山黄土”的常量元素测试和分析,得到如下结论.

(1)常量元素含量在剖面中具有明显的变化规律, SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 Fe_2O_3 和 TiO_2 随着剖面中细颗粒粘土含量的高低变化呈现明显的旋回变化特点,该特点对“巫山黄土”沉积时的气候演化规律具有一定的指示意义.气候总体变化规律是: $6.0\sim 14.5\ \text{m}$ 沉积时段气候比较温湿, $0\sim 6\ \text{m}$ 沉积时段气候比较干冷,在 $7\sim 10\ \text{m}$ 沉积时段气候为本区最温湿阶段.

(2)在化学风化过程中,元素 Si、Al、Fe、K、Mn、Ti 之间具有很好的相似性,表现为明显的正相关,而它们与元素 Ca、P 却具明显的差异性,表现为明显的负相关.上述特点是它们本身的地球化学风化过程中的相似性和差异性,以及气候环境演变共同作用的结果.

(3)沉积物的粒径对部分常量元素含量特征具有一定的控制效应,Al、Fe、Ti 等元素的分布与 $0.8\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 黏土粒级含量具有显著正相关,可能与黏土的吸附作用有关.与 $40\sim 100\ \mu\text{m}$ 的粗粉砂和极细砂粒级含量具有显著负相关,可能与粗粉砂和极

细砂对黏土吸附作用的稀释效应有关。

(4)“巫山黄土”常量元素 UCC 标准化后分布曲线所具有的近于平坦线型且靠近 UCC 分布曲线的特点,指示其可能为风积成因。

References

- Chen, J., Ji, J. F., Qiu, G., et al., 1997. Geochemical Research of Chemical Weathering Degree in the Luochuan Loess. *Science in China (Series D)*, 27(6): 531—536 (in Chinese).
- Chen, Y., Chen, J., Liu, L. W., 2001. Chemical Composition and Characterization of Chemical Weathering of Late Tertiary Red Clay in Xifeng, Gansu Province. *Journal of Geomechanics*, 7(2): 167—175 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. Y., Li, X. S., Han, Z. Y., et al., 2008. Chemical Weathering Intensity and Element Migration Features of the Xiashu Loess Profile in Zhenjiang. *Journal Geographical Sciences*, 3(18): 341—352. doi: 10.1007/s11442-008-0341-9
- Diao, G. Y., Wen, Q. Z., 1999. The Migration Series of Major Elements during Loess Pedogenesis. *Geology-Geochemistry*, 27(1): 21—26 (in Chinese with English abstract).
- Ding, M., Pang, J. L., Huang, C. C., et al., 2011. Geochemical Characteristics of Major Elements in Holocene Loess-Paleosol Sequence in the Eastern Guanzhong Basin, Shaanxi, China. *Journal of Desert Research*, 31(4): 862—867 (in Chinese with English abstract).
- Gu, Z. Y., Han, J. M., Liu, T. S., 2000. Progress in Geochemical Research on the Loess and Other Quaternary Deposits in China. *Quaternary Research*, 20(1): 41—55 (in Chinese with English abstract).
- Guan, Q. Y., 2006. Study of the Highly Unstable Climate in Last Glacial Cycle. Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Kang, J. C., Mu, D. F., 1998. Geochemical Characteristics of the North Plateau Loess Section, Gansu Linxia. *Journal of Lanzhou University (Nature Science)*, 34(2): 119—125 (in Chinese with English abstract).
- Lei, X. Y., Yue, L. P., 1997. The Characteristics of the Late Pleistocene Loess-Paleosol Sequence and Their Records of Paleoenvironmental Changes in Guanzhong, Shaanxi. *Geological Review*, 43(5): 550—560 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. A., Zhang, Y. F., Yuan, S. Y., et al., 2010. Grain Size Characteristics and Origin of the Wushan Loess at Wushan Area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 879—884 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. X., Song, Y. G., Wang, L. M., 2012. Geochemical Characteristics and Paleo-Environmental Significance of the Loess in the Ili Region, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 30(1): 103—108 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. S., Han, Z. Y., Yang, S. Y., 2007. Chemical Weathering Intensity and Element Migration Features of the Xiashu Loess Profile in Zhenjiang. *Acta Geographica Sinica*, 62(11): 1174—1176 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. S., Yang, D. Y., Lu, H. Y., 1999. Oxide-Geochemistry Features and Paleoclimatic Records of the Aeolian-Dust Depositional Sequence in Southern Anhui Province. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(4): 75—82 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. H., Wang, Y. H., 1998. The Geochemical Record of Loess Deposit and Paleoclimatic Evolution. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 18(2): 41—47 (in Chinese with English abstract).
- Liang, M. Y., Guo, Z. T., Gu, Z. Y., 2006. Geochemical Characteristics of the Miocene Eolian Deposits and Comparison with the Pliocene and Quaternary Eolian Deposits. *Quaternary Research*, 26(4): 657—664 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. J., Cao, L. M., Li, Z. L., et al., 1984. Element Geochemistry. Science Press, Beijing (in Chinese).
- OuYang, Z. Y., 2001. Chemical Processes and Material Evolution of the Earth. Shangdong Education Press, Jinan, 6 (in Chinese).
- Qiao, Y. S., Zhao, Z. Z., Wang, Y., et al., 2010. Variations of Geochemical Compositions and the Paleoclimatic Significance of Loess-soil Sequence from Ganzi County of Western Sichuan Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 55(3): 255—260 (in Chinese).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: It's Composition and Evolution. Blackwell Science Pub., Palo Alto, 277—312.
- Wang, L., Liu, D. Y., Liu, M., et al., 2010. Geochemical Characteristics of Major Elements of Ganzi Loess in the Western Sichuan Province. *Periodical of Ocean University of China*, 40(Suppl.): 221—225 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Wei, F. S., 1995. Soil Environment Element Chemistry. China Environmental Science Press, Beijing, 10 (in Chinese).
- Wen, Q. Z., 1989. Geochemistry of China Loess. Science Press, Beijing, 63 (in Chinese).
- Yang, R. X., Li, Z. F., Zhang, L., et al., 2011. Elements Distri-

- bution of the Dengjia Loess Section, Central Henan and Its Environmental Implications. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31(2): 130—134 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y. P., Wang, H. B., Liu, X. B., et al., 2012. Geochemical Characteristics of Loess Deposition since Last Interglacial at Desert Margin and Its Provenance and Climatic Implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(2): 356—365 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. C., Li, J. J., Ma, Y. Z., et al., 1997. A Study on Elemental Geochemical Characters of the Wuwei Loess Section in the South Vicinity of Tengger Desert. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(4): 152—158 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Shao, L., et al., 2010. Magnetic Fabric Characteristics and Implications for Its Origin of “Wushan Loess”. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 885—890 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. H., Wang, D., Fan, B. S., et al., 2004. Geochemical Characteristics of the Loess Deposit at Yan'an and Its Implication to Changes of East Asia Summer Monsoon during the Past 130 ka. *Geochemica*, 33(5): 495—500 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈骏, 季峻峰, 仇纲, 等, 1997. 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)*, 27(6): 531—536.
- 陈旸, 陈骏, 刘连文, 2001. 甘肃西峰晚第三纪红粘土的化学组成及化学风化特征. *地质力学学报*, 7(2): 167—175.
- 刁桂仪, 文启忠, 1999. 黄土风化成土过程中主要元素迁移序列. *地质地球化学*, 27(1): 21—26.
- 丁敏, 庞奖励, 黄春长, 等, 2011. 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. *中国沙漠*, 31(4): 862—867.
- 顾兆炎, 韩家楦, 刘东生, 2000. 中国第四纪黄土地球化学研究进展. *第四纪研究*, 20(1): 41—55.
- 管清玉, 2006. 末次冰期旋回气候高度不稳定性研究. 兰州: 兰州大学.
- 康建成, 穆德芬, 1998. 甘肃临夏北塬黄土剖面地球化学特征. *兰州大学学报: 自然科学版*, 34(2): 119—125.
- 雷祥义, 岳乐平, 1997. 陕西关中晚更新世黄土—古土壤序列特征及其记录的古环境变迁. *地质论评*, 43(5): 550—560.
- 李长安, 张玉芬, 袁胜元, 等, 2010. “巫山黄土”粒度特征及其对成因的指示. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(5): 879—884.
- 李传想, 宋友桂, 王乐民, 2012. 新疆伊犁黄土元素地球化学特征及古环境意义. *新疆地质*, 30(1): 103—108.
- 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等, 2007. 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*, 62(11): 1174—1176.
- 李徐生, 杨达源, 鹿化煜, 1999. 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*, 19(4): 75—82.
- 李铮华, 王玉海, 1998. 黄土沉积的地球化学记录与古气候演化. *海洋地质与第四纪地质*, 18(2): 41—47.
- 梁美艳, 郭正堂, 顾兆炎, 2006. 中新世风尘堆积的地球化学特征及与上新世和第四纪风尘堆积的比较. *第四纪研究*, 26(4): 657—664.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等, 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社.
- 欧阳自远, 2001. 地球的化学过程与物质演化. 济南: 山东教育出版社, 6.
- 乔彦松, 赵志中, 王燕, 等, 2010. 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*, 55(3): 255—260.
- 王玲, 刘冬雁, 刘明, 等, 2010. 川西高原甘孜黄土 A 剖面常量元素地球化学特征初步研究. *中国海洋大学学报*, 40(增刊): 221—225.
- 王云, 魏复盛, 1995. 土壤环境元素化学. 北京: 中国环境科学出版社, 10.
- 文启忠, 1989. 中国黄土地球化学. 北京: 科学出版社, 63.
- 杨瑞霞, 李志飞, 张莉, 等, 2011. 河南嵩山东麓邓家剖面元素的地球化学特征及环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 31(2): 130—134.
- 于英鹏, 汪海斌, 刘现彬, 等, 2012. 末次间冰期以来沙漠边缘黄土沉积的地球化学特征初探. *沉积学报*, 30(2): 356—365.
- 张虎才, 李吉均, 马玉贞, 等, 1997. 腾格里沙漠南缘武威黄土沉积元素地球化学特征. *沉积学报*, 15(4): 152—158.
- 张玉芬, 李长安, 邵磊, 等, 2010. “巫山黄土”的磁组构特征及成因. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(5): 885—890.
- 赵锦慧, 王丹, 樊宝生, 等, 2004. 延安地区黄土堆积的地球化学特征与最近 13 万年东亚夏季风气候的波动. *地球化学*, 33(5): 495—500.