

成都粘土地球化学特征及其 对物源和风化强度的指示

应立朝^{1,2} 梁 斌^{1,2} 王全伟² 朱 兵²
郝雪峰² 刘 亮¹ 文 龙¹ 燕钟林¹ 付小方²

(1.西南科技大学环境与资源学院,四川 绵阳 621010;2.四川省地质调查院,四川 成都 610081)

摘要:成都平原晚更新世成都粘土地球化学分析表明,不同剖面样品的化学组成具有较好的一致性,以 SiO₂(平均 75.24%)、Al₂O₃(平均 14.12%)、Fe₂O₃(平均 5.81%)为主,地球化学特征与 UCC 基本相似。与北方黄土相比,成都粘土具有较高的 TiO₂/Al₂O₃、Zr/Al、Zr/Ti 和 Y/Al 以及较低的 Eu/Eu*、La_N/Sm_N 和 La_N/Yb_N 比值,这些特征与成都平原第四系深层土壤样品组成一致,表明成都粘土来源于当地,与北方黄土物源不同。成都粘土 CIA 平均值为 78.59,高于北方黄土平均值(69.34),经历了中期的 K 迁移阶段,在风化过程中 Ca、Na、Mg 和 K 是主要的活动性元素。与北方黄土相比,成都粘土 Na、Mg、K 和 Ca 亏损较大,表明经历了更强的化学风化。

关键词:成都粘土;地球化学特征;物源;风化强度;成都平原

中图分类号:P534.63⁺1;P512.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)05-1666-09

1 引言

黄土沉积在中国广泛分布^[1],是重要的地球环境变化的记录。前人的研究主要集中在黄土高原风尘沉积的时代、物源和气候演变上^[1-6]。然而,这些序列主要位于中国北方干旱—半干旱的温带地区。为了得到更广范围的古环境信息,越来越多的研究开始集中在黄土高原外的黄土^[7-11]。在远离黄土高原的风尘沉积之中,长江上游成都平原的成都粘土是重要的风尘堆积物^[9-11],因其具有特殊的成因及古环境意义,历来受到人们的关注^[9-12]。根据光释光测年(OSL)结果,成都粘土堆积时间范围为(74.67±9.59) ka B.P. ~ 18.60±0.33)ka B.P.,为晚更新世中期至晚期,相当于末次冰期^[12]。

风尘沉积中主量、微量和稀土元素组成与母岩和古气候是密切相关的,它们通常用于指示风尘沉

积的物源及重建黄土古气候^[13-14]。主量元素组成、化学蚀变指数(CIA)等指标对揭示黄土的风化阶段、化学风化强度、母岩风化作用的控制因素和古气候环境意义等方面起到重要的指示作用。本文对成都平原成都粘土地球化学组成进行研究,并与北方黄土进行比较,旨在:(1)分析成都粘土的元素地球化学特征;(2)探讨成都粘土的物源;(3)比较成都粘土和北方黄土的化学风化特征异同。

2 采样和分析方法

本研究对成都平原 5 个第四系剖面上的成都粘土地球化学特征进行了分析(图 1^[3],表 1)。其中金堂福兴剖面(PM35)位于龙泉山东侧,成都粘土直接覆盖在白垩纪紫红色砂岩之上,厚约 2.30 m。另外 4 个剖面位于龙泉山西侧,从北向南分别为金堂姚渡剖面(PM37)成都粘土直接覆盖在白垩纪紫红

收稿日期:2012-11-07;改回日期:2013-02-19

基金项目:中国地质调查局 1:25 万成都幅区域地质调查项目(1212010880704)、四川省国土资源厅重点项目(批准号:KJ-2010-5)共同资助。

作者简介:应立朝,男,1985 年生,硕士生,主要从事地球化学方面研究;E-mail:yinglichao888@163.com。

通讯作者:付小方,女,1958 年生,教授级高级工程师,主要从事区域地质调查研究;E-mail:xiaofang@vip.163.com。

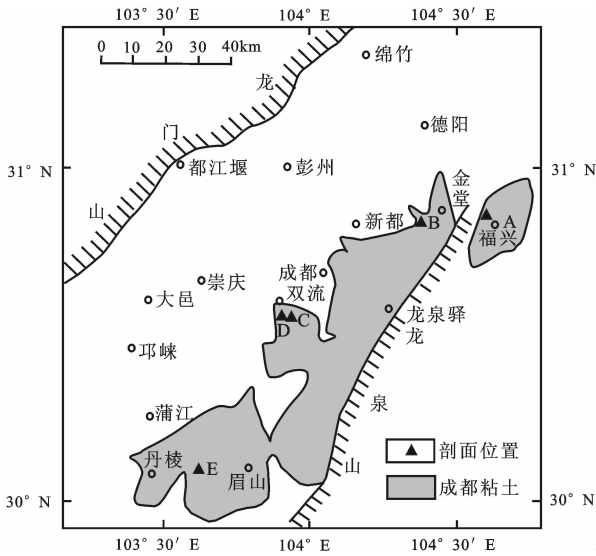


图 1 成都粘土的分布及剖面位置图
A-金堂福兴剖面;B-金堂姚渡剖面;C-双流机场剖面;
D-双流应天寺剖面;E-眉山东馆剖面

Fig.1 Distribution of Chengdu clay and location of sampling sections in Chengdu plain

A-Fuxing section in Jintang; B-Yaodu section in Jintang;
C-Airfield section in Shuangliu; D-Yingtiansi section in Shuangliu; E-Dongguan section in Meishan

色砂岩之上,厚约 3.28 m;双流飞机场剖面(PM30)成都粘土覆盖在Ⅳ级阶地砾石层之上,成都粘土厚约 5.08 m;双流应天寺剖面(PM31)成都粘土覆盖在

表 1 各剖面坐标及样品数

Table 1 The coordinates and sample numbers of each section

剖面名称	剖面编号	地理坐标	样品数/件
金堂福兴剖面	PM35	30° 49' 53" N, 104° 37' 35" S	2
金堂姚渡剖面	PM37	30° 49' 6" N, 104° 20' 56" S	2
双流飞机场剖面	PM30	30° 31' 7" N, 103° 56' 21" S	5
双流应天寺剖面	PM31	30° 31' 34" N, 103° 55' 1" S	2
眉山东馆剖面	PM03	30° 3' 4" N, 103° 40' 39" S	2

Ⅳ级阶地网纹红土之上,成都粘土厚约 3.20 m;眉山东馆剖面(PM03)成都粘土覆盖在Ⅱ级阶地网纹红土之上,成都粘土厚约 4.49 m。本次研究共采集样品 13 个,用于成都粘土主量、微量和稀土元素的地球化学分析,各剖面上样品数见表 1。

3 结果和讨论

3.1 主量元素特征

成都粘土主量元素组成以 SiO₂(平均 75.24%)、Al₂O₃(平均 14.12%)、Fe₂O₃(平均 5.81%)为主(表 2),不同剖面样品中主量元素丰度是基本一致的,反映了它们较好的混合性质。与北方黄土样品相比,成都粘土表现出较低的 CaO、Na₂O、MgO 和 K₂O 含量以及较高的 SiO₂ 和 TiO₂ 含量。成都粘土的烧失量(LOI)也比北方黄土样品低(表 2)。与北方黄土相

表 2 成都粘土主量元素成分及北方黄土、成都平原第四系深层土壤平均含量(%)

Table 2 Mean concentrations (%) of major elements of Chengdu clay and loess in northern China

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Total	LOI	CIA	数据来源
PM30-3	75.89	13.83	5.60	0.16	0.75	0.32	0.39	2.01	1.03	0.03	100.00	4.33	80.20	本文
PM30-4	72.37	15.50	5.74	0.17	1.30	0.68	1.08	2.27	0.89	0.03	100.00	4.91	73.84	本文
PM30-5	80.23	10.96	3.33	0.12	0.67	0.53	1.56	1.73	0.88	0.02	100.00	2.74	66.90	本文
PM30-6	75.60	13.87	4.71	0.17	0.90	0.54	1.24	2.08	0.92	0.03	100.00	4.01	72.41	本文
PM30-7	75.02	14.11	5.83	0.15	0.81	0.39	0.73	1.96	1.01	0.03	100.00	4.51	77.74	本文
PM03-4	78.18	12.07	6.18	0.03	0.57	0.25	0.23	1.34	1.14	0.02	100.00	4.16	84.11	本文
PM03-5	78.38	12.41	5.61	0.05	0.60	0.21	0.24	1.35	1.14	0.03	100.00	4.26	84.72	本文
PM31-7	74.83	14.68	5.90	0.04	0.84	0.36	0.44	1.86	1.04	0.03	100.00	4.75	81.23	本文
PM31-6	76.59	12.75	6.74	0.02	0.65	0.30	0.50	1.36	1.09	0.02	100.00	4.32	81.72	本文
PM37-2	69.48	17.92	7.80	0.02	0.97	0.57	0.35	1.87	0.99	0.05	100.00	5.86	83.08	本文
PM37-3	75.74	14.01	5.77	0.03	0.78	0.47	0.46	1.65	1.06	0.05	100.00	4.67	80.44	本文
PM35-1	74.16	15.04	5.66	0.03	0.96	0.69	0.79	1.73	0.93	0.03	100.00	4.80	77.17	本文
PM35-2	71.70	16.37	6.60	0.06	1.01	0.82	0.67	1.82	0.94	0.03	100.00	5.34	78.16	本文
平均值	75.24	14.12	5.81	0.08	0.83	0.47	0.67	1.77	1.00	0.03	100.00	4.51	78.59	本文
西峰黄土	63.07	18.38	7.86	0.14	3.53	1.27	1.26	3.48	0.84	0.17	100.00	5.37	69.25	[7]
西峰红土	63.17	18.54	7.79	0.12	3.82	1.14	0.94	3.47	0.85	0.16	100.00	5.51	71.51	[7]
东湾黄土	63.35	18.13	7.77	0.13	3.20	1.44	1.42	3.56	0.84	0.17	100.00	5.49	67.27	[7]
UCC	66.00	15.20	5.00	0.08	2.20	4.20	3.90	3.40	0.65	0.15	100.00	-	46.12	[15]
成都平原第四系深层土壤	71.14	15.28	6.28	0.08	1.64	1.32	0.72	2.31	0.95	0.04	100.00	-	-	[16]

注:测试单位为武汉综合岩矿测试中心,采用 X 射线荧光光谱法(XRF),分析误差小于 2%,数据是在除去挥发组分的基础上重新计算的结果,UCC 指上地壳。

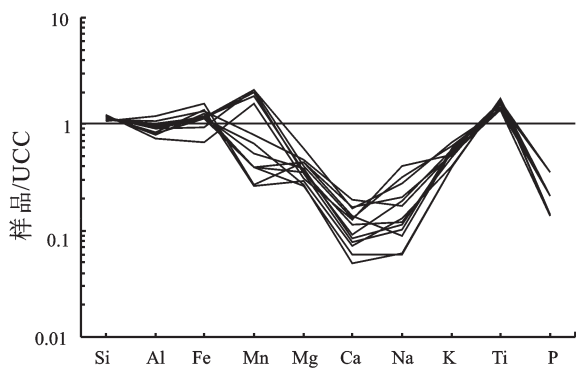


图2 成都粘土主要元素 UCC 标准化丰度曲线分布图 (UCC 数据引自文献[15])

Fig.2 UCC-normalized abundances of major elements of Chengdu clay (The UCC values are from [15])

比,成都粘土 Na、Mg、K 和 Ca 亏损较大,表明经历了更强的化学风化。

与 UCC 平均值相比(图 2),成都粘土样品表现出明显较低的 MgO、CaO、Na₂O 和 K₂O 以及较高的 SiO₂、Fe₂O₃ 和 TiO₂ 含量。

TiO₂/ Al₂O₃ 比值对各种沉积物的物源判别是非常有用的^[17]。沉积物中的 K₂O/Al₂O₃ 比值通常作为化学作用强度的指示,但由于 Ca 和 Na 的迁移, K₂O/ Al₂O₃ 比值也被用作化学风化早期沉积物原始物质组成的指示^[18]。钾长石比斜长石耐风化,在硅酸钾风化过程中,部分 K 紧密结合在伊利石粘土的晶格中,因此在风化剖面中 K 比 Na 更稳定。

成都粘土和北方黄土在 K₂O/Al₂O₃-TiO₂/Al₂O₃ 图中有明显的区分(图 3)。成都粘土具有高 TiO₂/Al₂O₃ 值和低 K₂O/Al₂O₃ 值的特点,其低 K₂O/Al₂O₃ 值在一定程度上是沉积后风化作用所致。两地区 TiO₂/Al₂O₃ 值的不同为它们物源不同提供了证据。

Nesbitt 等^[19] 提出了大陆化学风化趋势预测的 A-CN-K (Al₂O₃-CaO*+Na₂O-K₂O)三角模型图。此模型可以反映化学风化趋势以及化学风化过程中主成分和矿物学变化。将成都粘土与北方黄土数据投到 A-CN-K 图上(图 4),对比二者可以看出:相对于 UCC 的平均组成含量,成都粘土和北方黄土的 Ca 和 Na 明显亏损,化学风化的趋势指向近似平行于 A-CN 边,显示了富含 Ca、Na 的斜长石已经大量风化分解。成都粘土比北方黄土更靠近 A-K 连线(图 4),表明其样品中的斜长石几乎完全分解,

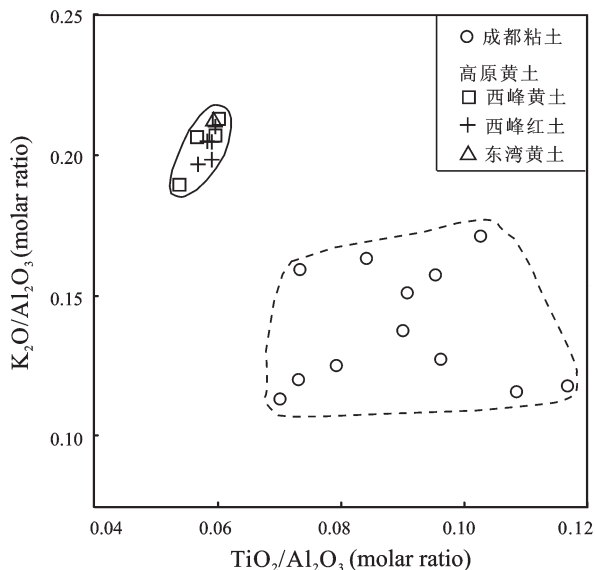


图3 成都粘土和北方黄土 K₂O/Al₂O₃-TiO₂/ Al₂O₃ 图
Fig.3 Plot of K₂O/Al₂O₃ versus TiO₂/Al₂O₃ of Chengdu clay and loess in northern China

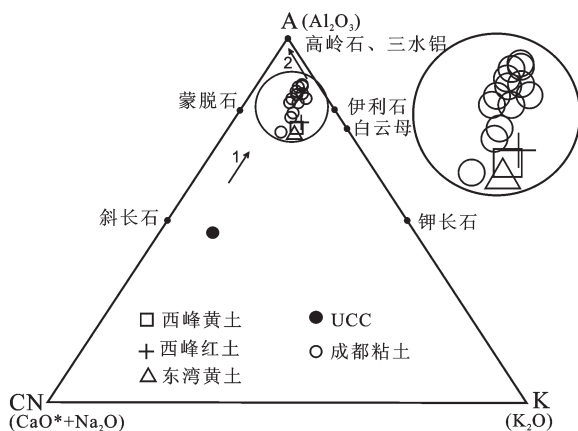


图4 成都粘土 A-CN-K 化学风化趋势图 (箭头代表大陆风化趋势)

Fig.4 A-CN-K ternary diagram of Chengdu clay (arrows indicating weathering trend, the legends as for Fig. 3)

风化过程发展到 K 的迁移阶段,以钾长石和伊利石的风化为特征。

化学蚀变指数(CIA)通常作为岩石或土壤风化程度的指标,用下面的公式计算(分子比):CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO*+Na₂O+K₂O)]×100^[20],这里的 CaO*是硅酸盐矿物中 CaO 的量。成都粘土 CIA 值介于 66.90~84.72 (平均值为 78.59),比北方黄土 CIA 平均值(69.34)高(表 2),具有中等的化学风化程度^[21]。

表 3 成都粘土和北方黄土微量元素含量 (10⁻⁶)

Table 3 Trace element concentrations (10⁻⁶) of Chengdu clay and loess in northern China

样品编号	Zr	Hf	Ba	Cu	V	Zn	Sc	Cr	Co	Ni	Rb	Pb	Th	U	Y
PM30-3	355	10.4	401.6	37.1	97.7	66.5	11.9	81.2	25.3	35.4	110.0	34.5	15.8	3.9	28.2
PM30-4	268	7.9	494.5	42.0	92.9	66.8	13.2	81.4	16.6	39.8	128.6	25.6	15.3	3.5	33.2
PM30-5	385	11.5	329.3	37.1	68.9	42.2	9.7	56.6	17.2	21.7	93.6	21.9	14.0	3.1	35.2
PM30-6	335	9.5	522.0	48.4	83.0	52.7	11.6	75.0	17.8	31.3	117.2	25.5	15.0	3.6	35.1
PM30-7	361	10.2	460.2	33.4	100.2	67.8	13.1	82.1	26.9	35.0	116.1	37.0	17.0	3.8	29.6
PM03-4	406	11.7	278.9	76.0	100.3	57.6	11.8	80.9	9.8	24.2	81.6	18.8	15.7	3.8	33.1
PM03-5	422	12.3	312.1	95.3	99.5	62.7	10.8	84.5	17.5	29.3	72.1	24.2	13.8	4.0	32.5
PM31-6	411	12.0	242.0	23.8	102.9	49.4	12.1	89.6	7.8	24.6	67.6	20.8	15.2	4.1	33.1
PM31-7	351	10.1	387.8	28.7	100.0	77.2	10.1	86.8	28.0	43.5	87.8	30.5	12.4	3.3	33.3
PM37-2	291	8.7	358.8	31.3	124.8	78.1	7.7	104	11.6	35.2	68.7	31.4	15.3	5.3	21.9
PM37-3	341	9.9	347.7	26.7	103.5	65.5	7.0	69.0	25.5	30.9	80.3	43.7	17.1	4.3	29.0
PM35-1	310	9.2	409.6	21.9	99.6	61.6	7.4	67.4	8.8	25.2	88.1	25.0	17.1	3.3	24.1
PM35-2	262	7.6	478.7	24.0	109.2	72.4	7.5	76.7	19.2	32.9	90.5	29.6	16.7	4.3	25.8
平均值	346.0	10.1	386.4	40.4	98.6	63.1	10.3	79.6	17.9	31.5	92.5	28.3	15.4	3.9	30.3
西峰黄土	151.0	4.7	578.0	-	117.0	-	16.8	-	20.7	-	125.0	35.7	13.9	3.0	22.6
西峰红土	152.0	4.6	543.0	-	124.0	-	17.8	-	19.3	-	137.0	32.0	14.0	2.9	23.1
东湾黄土	160.0	4.9	631.0	-	121.0	-	18.8	-	21.2	-	156.0	34.5	16.1	2.7	27.4
UCC	190	5.80	550	25.0	107	71.0	13.60	35.0	17.0	44.0	112.0	17.0	10.7	2.80	22

注:测试单位为武汉综合岩矿测试中心,采用光度法、原子吸收、原子荧光、发射光谱,分析误差小于 10%。西峰黄土、西峰红土、东湾黄土和 UCC 数据来源同表 2。

3.2 微量元素特征

成都粘土样品微量元素数据在表 3 中列出,和主量元素情况一样,各个剖面成都粘土样品的微量元素含量是基本一致的。与北方黄土相比,成都粘土样品中 Y、Zr 和 Hf 含量偏高,Sc、Rb、Ba、Pb、V 和 Co 等含量偏低,Th 及 U 含量与北方黄土相近。

对于大部分微量元素,成都粘土不同样品的 UCC 标准化丰度有相似的模式(图 5),含量也与 UCC 相似(表 3)。

在沉积过程中微量元素 La、Th、Zr 和 Sc 等具有较低的活动性,被认为是最适合作物源判别的元素^[2],在风化和转移时这些元素很少变化,因此能反映母质的特征^[23]。如图 6 所示,在三元图 La-Th-Sc^[15,23]和 Zr/10-Th-Sc^[23]中可以看到两地区黄土组分的不同,成都粘土数据点偏离于北方黄土样品,远离于三角图的 Sc 端。

3.3 稀土元素特征

与北方黄土相比,成都粘土所有稀土元素含量均偏高(表 4),各个剖面样品稀土元素球粒陨石标准化分配模式(图 7)是基本一致的,均表现为轻稀土富集,重稀土亏损。La_N/Yb_N 为 6.36~8.54(平均值为 7.61),δEu 为 0.58~0.67(平均值为 0.62),具中等 δEu 负异常。

稀土元素被广泛用于各种沉积物的物源判别^[15,24]。在风化和沉积的过程中 Eu 比其他稀土元素

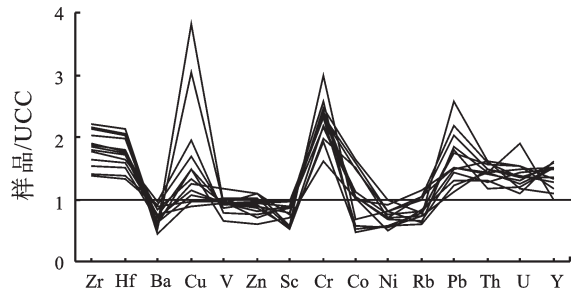


图 5 成都粘土微量元素 UCC 标准化丰度曲线分布图 (UCC 数据引自文献[15])

Fig.5 UCC-normalized abundances of trace elements of Chengdu clay (The UCC values are from [15])

稳定^[24],只有当斜长石强烈富集时才能导致 Eu/Eu* 比值发生大的变化^[25],因此它对物源是敏感的。成都粘土 Eu/Eu* 比值是 0.58~0.67(平均值 0.62),北方黄土样品 Eu/Eu* 比值是 0.65~0.66,地球上其他黄土地层的 Eu/Eu* 比值也是不同的:斯匹次卑尔根岛黄土是 0.70,欧洲黄土是 0.53~0.67,阿根廷黄土是 0.74~0.83^[26]。在稀土元素分配模式参数图中(图 8),成都粘土与北方黄土相比,具有较低的 Eu/Eu*、La_N/Yb_N 和 La_N/Sm_N 值以及分布范围较广的 Gd_N/Yb_N 值。

尽管稀土元素通常是相对稳定的,有证据表明重稀土元素比轻稀土元素更易转移,强风化作用导

表 4 成都粘土和北方黄土稀土元素含量 (10^{-6})Table 4 Rare earth element concentrations (10^{-6}) of Chengdu clay and loess in northern China

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	La _N /Yb _N	Eu/Eu*	LREE/HREE
PM30-3	38.81	112.60	8.55	31.99	6.10	1.10	4.50	0.84	4.85	1.00	2.99	0.47	3.24	0.48	7.76	0.62	10.84
PM30-4	45.14	87.01	10.14	38.13	7.55	1.49	5.95	1.04	5.95	1.18	3.38	0.51	3.47	0.50	8.42	0.66	8.63
PM30-5	47.21	90.96	10.96	41.53	7.95	1.53	6.66	1.12	6.25	1.24	3.65	0.56	3.83	0.54	7.98	0.63	8.40
PM30-6	48.69	105.80	10.79	42.46	7.90	1.57	6.20	1.12	6.19	1.22	3.58	0.54	3.69	0.52	8.54	0.67	9.42
PM30-7	40.18	98.75	8.97	33.39	6.29	1.20	5.43	0.89	5.09	1.03	3.03	0.48	3.27	0.47	7.95	0.62	9.59
PM03-4	36.37	69.70	7.91	29.72	5.53	1.04	4.33	0.86	5.54	1.13	3.39	0.54	3.70	0.53	6.37	0.63	7.51
PM03-5	38.07	106.70	8.14	33.96	5.43	1.01	4.48	0.88	5.35	1.15	3.64	0.55	3.65	0.53	6.74	0.61	9.55
PM31-6	36.34	76.90	8.16	30.89	5.58	1.07	5.11	0.91	5.58	1.15	3.39	0.54	3.70	0.53	6.36	0.61	7.60
PM31-7	41.40	94.90	9.49	35.35	6.75	1.26	5.58	0.96	5.87	1.16	3.48	0.52	3.71	0.50	7.22	0.62	8.69
PM37-2	30.22	95.16	6.71	24.44	4.68	0.87	4.15	0.65	3.87	0.82	2.31	0.38	2.58	0.38	7.58	0.60	10.71
PM37-3	39.55	101.00	9.05	33.31	6.48	1.18	5.88	0.89	5.21	1.08	2.98	0.50	3.20	0.47	7.99	0.58	9.43
PM35-1	34.09	80.99	8.15	29.57	5.83	1.07	5.05	0.76	4.33	0.89	2.49	0.42	2.61	0.39	8.46	0.59	9.43
PM35-2	33.17	79.65	8.04	29.80	5.91	1.17	5.41	0.82	4.77	0.96	2.74	0.44	2.87	0.43	7.49	0.62	8.55
平均值	39.17	92.32	8.85	33.43	6.31	1.20	5.29	0.90	5.30	1.08	3.16	0.50	3.35	0.48	7.61	0.62	9.10
西峰黄土	33.40	66.80	7.38	28.00	5.27	1.02	4.37	0.75	4.42	0.89	2.52	0.39	2.51	0.38	8.61	0.66	8.74
西峰红土	34.50	67.60	7.64	28.90	5.44	1.05	4.51	0.75	4.32	0.87	2.51	0.39	2.48	0.37	9.00	0.65	8.96
东湾黄土	40.00	78.00	8.88	33.40	6.13	1.22	5.26	0.89	5.30	1.05	2.95	0.46	2.94	0.43	8.80	0.66	8.69
UCC	30.00	64.00	7.10	26.00	4.50	0.88	3.80	0.64	3.50	0.80	2.30	0.33	2.20	0.32	9.22	0.65	9.54

注:测试单位为武汉综合岩矿测试中心,采用 ICP-AES 分析方法,分析误差 <5%。西峰黄土、西峰红土、东湾黄土和 UCC 数据来源同表 2。

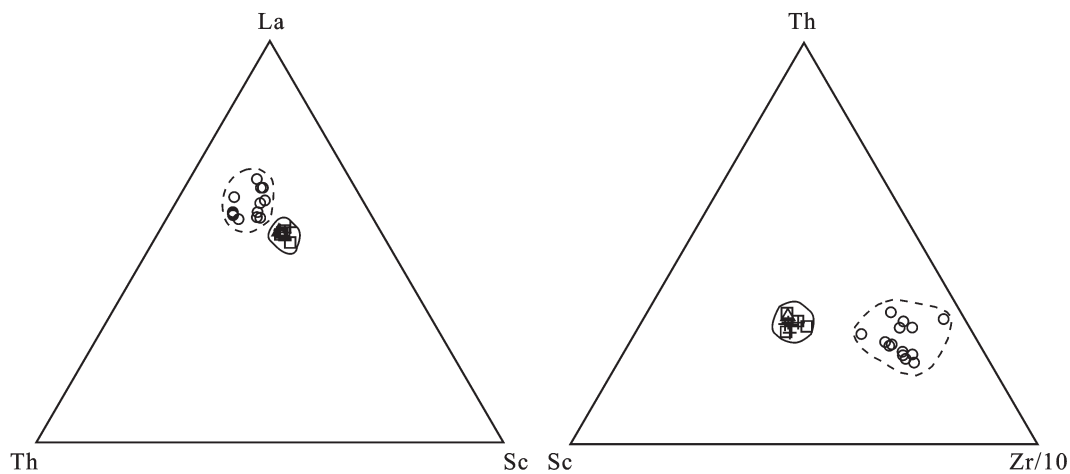


图 6 成都粘土和北方黄土 La-Th-Sc 和 Zr/10-Th-Sc 三角图(图例同图 3)

Fig.6 Ternary plots of La-Th-Sc and Zr/10-Th-Sc of Chengdu clay and loess in northern China (symbols as for Fig. 3)

致 La_N/Sm_N 值的减少, La_N/Yb_N 和 Gd_N/Yb_N 值的增加^[27]。如果成都粘土来源于北方沙漠,其稀土元素组成将被沉积后的风化作用强烈改造, La_N/Sm_N 值应降低,而 La_N/Yb_N 和 Gd_N/Yb_N 值将增加。然而事实与所期望的风化作用对稀土元素分馏的结果并不相符。成都粘土稀土元素的这些特征表明其物源区不

同于北方黄土。

3.4 主量和微量元素的比值

Fralick 和 Kroberg^[28]提出用主量元素 (Al 和 Ti) 和微量元素 (Zr) 间的元素比判别碎屑沉积岩的物源。成都粘土和北方黄土微量和主量元素比值图(图 9)显示明显地不同,再次表明两者物源区不同。Y 有

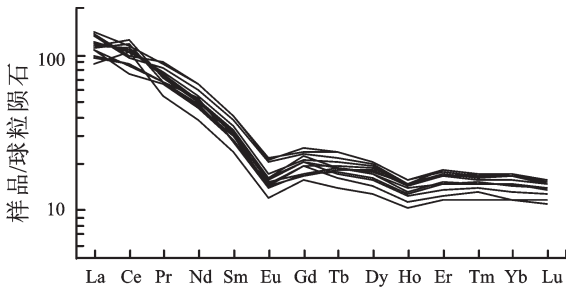


图 7 成都粘土稀土元素球粒陨石标准化配分模式图
Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of Chengdu clay

和重稀土元素相似的地球化学特性^[15], Y/Al 比值被用于指示 Y 从沉积系统中部分的迁移。成都粘土有较高的 Y/Al 比值,表明重稀土元素的富集。

3.5 成都粘土的物源区

黄土的物质来源对于古地理、古气候的重建具有重要意义,已有的研究认为中国北方、青藏高原内部以及秦岭以南的黄土来源于蒙新沙漠区、青藏高原区^[9,29-32]。地处四川盆地西部、青藏高原东缘的成都平原上的成都粘土来源于何处,是一个十分重要的问题,成都粘土的地球化学特征为其物源区的判别提供了途径。

成都粘土主量、微量和稀土元素与 UCC 总体的相似性表明成都粘土和北方黄土一样在沉积于现在的位置之前已经历了众多的循环过程^[33]。然而,研究显示成都粘土和北方黄土地球化学组成明显不同。

和北方黄土相比,成都粘土有较高的 SiO₂、TiO₂ 含量(表 2)和 TiO₂/Al₂O₃ 比值(图 3)以及较低的 Fe₂O₃、Al₂O₃ 和 MnO 含量(表 2)。早期研究表明 Ti 受风化影响很少,通常存在于稳定的重矿物中,如锐钛矿、板钛矿和金红石^[17]。Al 在风化中也是较稳定的元素^[34],顾兆炎等^[35]发现北方黄土不同粒级组分的 TiO₂/Al₂O₃ 几乎是一致的,这个指标和沉积物风化不相关,可以指示粉土沉积的物源。成都粘土较高的 TiO₂ 和 TiO₂/Al₂O₃ 比值表明成都粘土与北方黄土的物源不同。

稀土元素特征研究显示,成都粘土 Eu/Eu* 比值总体较北方黄土低(表 4,图 8),铕亏损主要是内生条件下 Eu²⁺ 与矿物中 Ca²⁺ 发生置换的结果,Eu/Eu* 比值往往由物源区原岩类型决定^[36]。在主量元素和微量元素比值图(图 9)上,成都粘土亦明显区别于北方黄土。此外,La-Th-Sc 和 Th-Sc-(Zr/10)图中,成都粘土和北方黄土样品分为不同的区域(图 6),La、Th、Sc 和 Zr 在风化、侵蚀、转移和沉积过程中是相对不溶的,不会明显的分馏^[15],以上特征都表明它们物源区的不同。

成都粘土和成都平原第四系深层土壤样品^[16]中元素含量分布及相关地球化学比值大体相似,都具有较高的 SiO₂、TiO₂ 含量和 TiO₂/Al₂O₃、SiO₂/Al₂O₃ 比值以及较低的 Fe₂O₃、Al₂O₃、MnO、MgO、Na₂O、K₂O、P₂O₅ 含量(表 2)。在一定程度上表明了成都粘土主要来源于成都平原当地。乔彦松等^[9]对成都粘

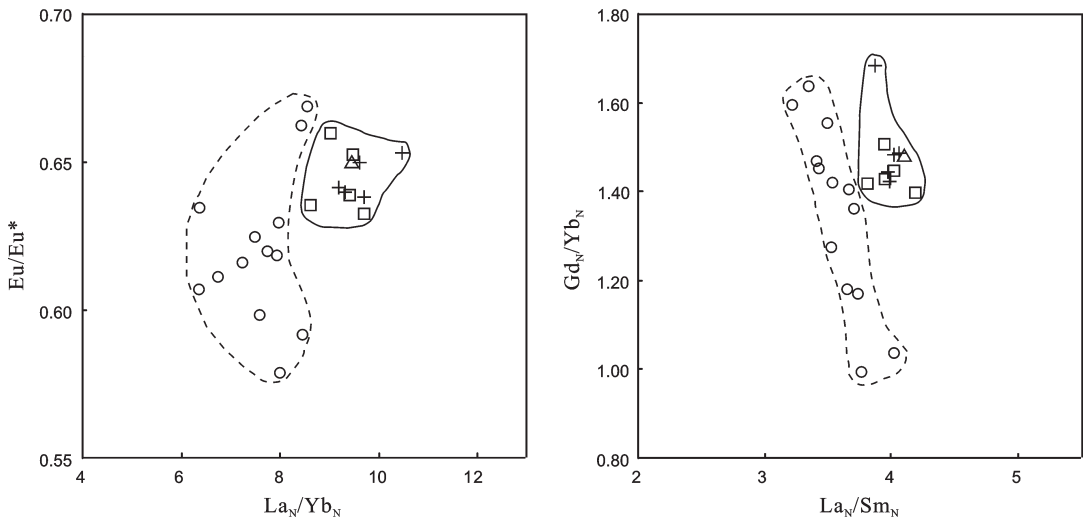


图 8 成都粘土和北方黄土稀土元素配分参数图(图例同图 3)
Fig.8 Plots of parameters of rare earth element (REE) patterns of Chengdu clay and loess in northern China (symbols as for Fig. 3)

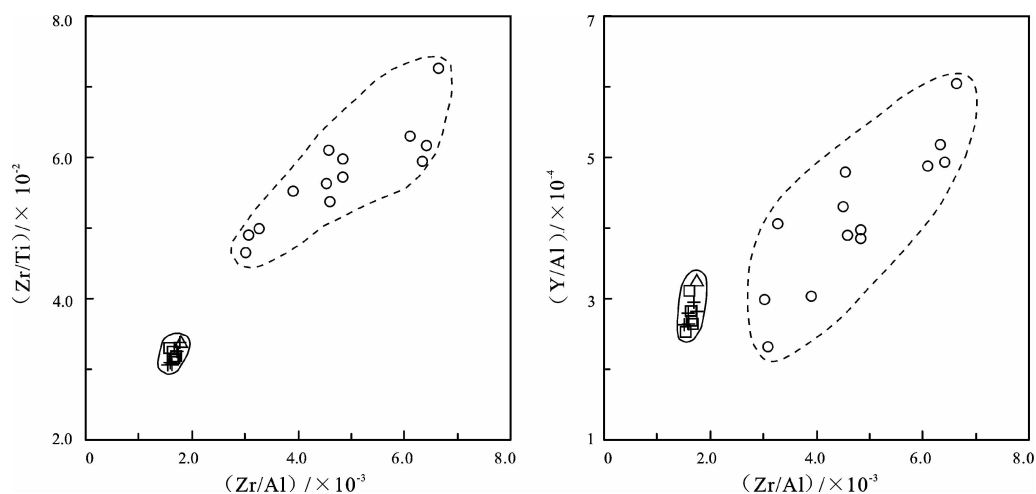


图9 成都粘土和北方黄土微量和主量元素间的比值图(图例同图3)

Fig.9 Plots of immobile elements ratios between trace and major elements of Chengdu clay and loess in northern China (symbols as for Fig. 3)

土的粒度研究表明成都粘土 $> 32 \mu\text{m}$ 的颗粒组分含量占有相当大的比例,很难在空中被长距离搬运,主要来源于当地,这一结论与成都粘土地球化学对其物源的判断是一致的。末次冰期时当地河谷和河床中的沉积物大面积裸露^[9],为成都粘土的堆积提供了丰富的物质来源。

3.6 成都粘土的风化强度

风尘沉积元素的活动性主要受化学风化强度控制,成都粘土主量元素含量(表2)和它们的UCC标准化丰度(图2)表明Ca、Na、Mg和K在风化过程中是典型的活性元素,Ca主要存在于碳酸盐和斜长石中,沉积物中的Na也主要在斜长石中富集。本研究在化学分析之前过滤了硅酸盐,成都粘土较低含量的Ca和Na暗示斜长石大部分被分解。K主要存在于钾长石中,部分存在于伊利石和云母中。成都粘土的CIA平均值为78.59,高于北方黄土的平均值69.34,具有中等的化学风化强度。 Al_2O_3 - $(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ - K_2O (A-CN-K)三角图(图4)显示了成都粘土比北方黄土风化更强烈,风化过程发展到K的迁移阶段,而北方黄土仅经历了Na和Ca的迁移阶段,表明晚更新世成都平原相对于温带干旱和半干旱地区更加温暖湿润。

4 结论

成都平原不同剖面成都粘土样品的化学组成具有较好的一致性,以 SiO_2 (平均75.24%)、 Al_2O_3 (平均

14.12%)、 Fe_2O_3 (平均5.81%)为主,地球化学特征与UCC基本相似。

成都平原晚更新世成都粘土地球化学特征与北方黄土有较大差异,而与成都平原第四系深层土壤样品地球化学特征一致,结合冰期时物源方面因素支持,推断成都粘土来源于成都平原当地。

通过对化学蚀变指数(CIA)、A-CN-K图解等分析,成都粘土的风化过程发展到K的迁移阶段,以钾长石和伊利石的风化为特征,具有中等的化学风化强度,表明成都平原晚更新世相对于温带干旱和半干旱地区更加温暖湿润。

参考文献(References):

- [1] 刘东生, 等著. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985:1-481.
Liu Tungsheng, et al. Loess and the Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985:1-481(in Chinese with English abstract).
- [2] Kukla G, An, Z S. Loess stratigraphy in Central China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1989, 72: 203-225.
- [3] Guo Z T, Peng S Z, Hao Q Z, et al. Origin of the Miocene - Pliocene red-earth formation at Xifeng in northern China and implications for paleoenvironments [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 170:11-26.
- [4] 师焕芝, 李福春, 孙旭辉, 等. 洛川黄土/古土壤中有有机碳的分布特征及其与粘土矿物的相关性[J]. 中国地质, 2001, 38(5):1355-1362.
Shi Huanzhi, Li Fuchun, Sun Xuhui, et al. Distribution of organic carbon in the Luochuan loess/paleosol and its relationship with clay

- minerals[J]. *Geology in China*, 2001, 38(5):1355-1362(in Chinese with English abstract).
- [5] 谢远云, 李长安, 周嘉, 等. 陇西民和黄土 CaCO_3 和有机碳总量的含量变化及其气候指标的局限性 [J]. *中国地质*, 2003, 33(1): 99-104.
Xie Yuanyun, Li Changan, Zhou Jia, et al. Variations of the CaCO_3 and total organic carbon contents in the Minhe loess and their limitations as climatic proxies [J]. *Geology in China*, 2003, 33(1): 99-104(in Chinese with English abstract).
- [6] 殷志强, 秦小光, 李玉梅, 等. 源区距离对黄土粒度多组分分布特征的影响[J]. *中国地质*, 2008, 35(5):1037-1043.
Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Li Yumei, et al. Influence of the dust source distance on the multimodal grain-size distribution characteristics of loess[J]. *Geology in China*, 2008, 35(5):1037-1043 (in Chinese with English abstract).
- [7] Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y S, et al. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29:3317-3326.
- [8] Qiao Y S, Hao Q Z, Peng S S, et al. Geochemical characteristics of the eolian deposits in southern China, and their implications for provenance and weathering intensity [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 308:513-523.
- [9] 乔彦松, 赵志中, 李增悦, 等. 成都平原红土堆积的风成因证据 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(2):286-294.
Qiao Yansong, Zhao Zhizhong, Li Zengyue, et al. Aeolian origin of the red earth formation in the Chengdu Plain [J]. *Quaternary Science*, 2007, 27(2):286-294(in Chinese with English abstract).
- [10] 赵志中, 乔彦松, 王燕, 等. 成都平原红土堆积的磁性地层学及古环境记录[J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(3):370-377.
Zhao Zhizhong, Qiao Yansong, Wang Yan, et al. Magnetostratigraphic and paleoclimatic studies on the Red Earth Formation from the Chengdu Plain in Sichuan Province[J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(3):370-377(in Chinese).
- [11] 应立朝, 梁斌, 王全伟, 等. 川西平原区成都粘土的粒度特征及其成因意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, 32(1):72-77.
Ying Lichao, Liang Bin., Wang Quanwei, et al. The grain-size characteristics and genetic significance of Chengdu clay in the western Sichuan Plain [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32(1): 72-77(in Chinese with English abstract).
- [12] 梁斌, 王全伟, 朱兵, 等. 川西地区成都粘土的光释光年代学[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(4):823-828.
Liang Bin, Wang Quanwei, Zhu Bing, et al. Optically stimulated luminescence dating of Chengdu clay in west Sichuan Basin [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33 (4):823-828 (in Chinese with English abstract).
- [13] 应立朝, 梁斌, 王全伟, 等. 川西平原中更新世网纹红土主量元素地球化学特征[J]. *高校地质学报*, 2012, 18(4):759-764.
Ying Lichao, Liang Bin., Wang Quanwei, et al. Major elements characters of the Middle Pleistocene vermicular red clay from the Western Sichuan Plain [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(4):759-764 (in Chinese with English abstract).
- [14] Yang S L, Ding F, Ding Z L. Pleistocene chemical weathering history of Asian arid and semi-arid regions recorded in loess deposits of China and Tajikistan [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(6):1695-1709.
- [15] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. London: Blackwell, 1985:57-72.
- [16] 刘应平. 成都平原第四纪地球化学及其生态响应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012:47-58.
Liu Yingping. *The Quaternary Geochemical and Ecological Response Research of Chengdu Plain* [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012:47-58 (in Chinese with English abstract).
- [17] Sheldon N D, Tabor N J. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 95 (1/2):1-52.
- [18] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United-States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59:2919-2940.
- [19] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of Plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 1523-1534.
- [20] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299: 19-40.
- [21] Fedo C, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. *Geology*, 1995, 23: 921-924.
- [22] Holland H. *The Chemistry of the Atmosphere and Oceans* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [23] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92: 181-193.
- [24] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*, 1989: 169-200.
- [25] Condie K, Dengate J, Cullers R. Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 279-294.
- [26] Gallet S, Jahn B M, Lanoe B V V, et al. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 156: 157-172.
- [27] Galan E, Fernandez-Caliani J C, Miras A, et al. Residence and fractionation of rare earth elements during kaolinization of alkaline

- peraluminous granites in NW Spain [J]. *Clay Minerals*, 2007, 42: 341–352.
- [28] Fralick P W, Kronberg B I. Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock sources [J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 113: 111–124.
- [29] 方小敏. 青藏高原东部边缘及邻区马兰黄土成因与来源的初步研究[J]. *中国科学(B 辑)*, 1994, 24(5): 539–546.
Fang Xiaomin. The preliminary study on the causes and sources of Malan loess in the eastern edge of Tibet Plateau and its adjacent areas [J]. *Science in China (series B)*, 1994, 24 (5): 539–546 (in Chinese).
- [30] 方小敏, 陈富斌, 施雅风, 等. 甘孜黄土和青藏高原冰冻圈演化[J]. *科学通报*, 1996, 41(20): 1865–1867.
Fang Xiaomin, Chen Fubin, Shi Yafeng et al. Ganzi loess and cryosphere evolution of Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(20): 1865–1867 (in Chinese).
- [31] Thorp J, Dye D S. The Chengdu clays deposits of possible Aeolian origin in Western and Northwestern Sichuan Basin [J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1936, 15(2):225–246.
- [32] 刘兴诗. 四川盆地的第四系 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1983:88–95.
Liu Xingshi. *Quaternary of Sichuan Basin* [M]. Chengdu: Scienceand Technology Press of Sichuan Province. 1983: 88–95 (in Chinese with English abstract).
- [33] 文启忠, 刁桂仪, 潘景瑜, 等. 黄土高原黄土的平均化学成分与地壳克拉克值的类比[J]. *土壤学报*, 1996, 33(3):225–231.
Wen Qizhong, Diao Guiyi, Pan Jingyu, et al. Comparison of average chemical composition of loess in Loess Plateau with clark values of crust [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33 (3):225–231 (in Chinese with English abstract).
- [34] Broecker W S, Peng T H. *Tracers in the Sea* [M]. New York: Eldigio Press, 1982.
- [35] 顾兆炎, 丁仲礼, 熊尚发, 等. 灵台红粘土和黄土—古土壤序列的地球化学演化[J]. *第四纪研究*, 1999, 4:357–365.
Gu Zhaoyan, Ding Zhongli, Xiong Shangfa, et al. A seven million geochemical record from Chinese red -clay and loess -paleosol sequence: Weathering and erosion in northwestern China [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 4: 357–365 (in Chinese with English abstract).
- [36] 朱丽东, 周尚哲, 叶玮, 等. 网纹红土稀土元素地球化学特征的初步研究[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(2):194–200.
Zhu Lidong, Zhou Shangzhe, Ye Wei, et al. Preliminary study on geochemical behavior of rare earth element of plinthitic red earth in South China [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(2):194–200 (in Chinese with English abstract).

Geochemical characteristics of Chengdu clay and their implications for provenance and weathering intensity

YING Li-chao^{1,2}, LIANG Bing^{1,2}, WANG Quan-wei², ZHU Bing², HAO Xue-feng²,
LIU Liang¹, WEN Long¹, YAN Zhong-lin¹, FU Xiao-fang²

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. Sichuan Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The chemical composition of late Pleistocene Chengdu clay in Chengdu plain shows that SiO₂ (75.24% on average), Fe₂O₃ (14.12% on average) and Al₂O₃ (5.81% on average) are dominant chemical compositions, Chengdu clay has an overall similarity in geochemical characteristics to the UCC. In comparison with the loess of northern China, Chengdu clay has higher TiO₂/Al₂O₃, Zr/Al, Zr/Ti and Y/Al ratios, and lower Eu/Eu*, La_N/Sm_N and La_N/Yb_N ratios. These features coincide with those of the Quaternary deep soil in Chengdu plain, which suggests local sources for the Chengdu clay in this region; nevertheless, Chengdu clay is quite different from the loess of northern China. The average chemical index of alteration (CIA) of Chengdu clay is 78.59, higher than that of the loess of northern China. Chengdu clay has experienced the intermediate K removal weathering stage, and Ca, Na, Mg and K seem to have been the main mobile elements in the weathering process. In comparison with the loess of northern China, Chengdu clay has greater depletion of Na, Mg, K and Ca, indicating a stronger weathering intensity.

Key words: Chengdu clay; geochemical characteristics; provenance; weathering intensity; Chengdu plain

About the first author: YING Li-chao, male, born in 1985, master candidate, engages mainly in the study of geochemistry; E-mail: yinglichao888@163.com.