

文章编号: 1006-6616 (2001) 02-0167-09

甘肃西峰晚第三纪红粘土的化学组成 及化学风化特征

陈 旻, 陈 骏, 刘连文

(南京大学地球科学系表生地球化学研究所
内生金属成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘 要:通过对甘肃西峰红粘土样品的地球化学研究,发现其碳酸盐含量较高,而Si、Al、Fe等元素含量相对较低。为消除碳酸盐的影响,样品经酸溶处理后其化学组成十分均一,反映物质来源的一致性。稀土元素以及微量元素分布形式揭示出红粘土与第四纪黄土-古土壤风成成因的相似性。研究表明,红粘土的化学风化尚处于脱Ca、Na为主的早期阶段;CIA值和酸不溶物中的Na/K比及Rb/Sr比参数一致地指示了红粘土化学风化程度高于第四纪的黄土和古土壤,反映出晚第三纪以来黄土高原的气候由相对温暖湿润向第四纪逐渐变干变冷演化的总趋势。

关键词:红粘土;化学组成;化学风化

中图分类号: P595 文献标识码: A

0 引言

我国北方黄土高原黄土-古土壤序列之下,普遍发育了一套晚第三纪的红色粉砂质粘土沉积,称为“红粘土”,由于含有三趾马化石而备受世人瞩目^[1,2]。长期以来人们对于红粘土的研究主要集中在地层与成因方面。关于红粘土的成因,主要有“残积说”^[3]、“水成说”^[4]和“风成说”^[5,6]。近年来,一些研究者通过对西峰、灵台、佳县、西安等几个典型红粘土剖面详细的磁化率、粒度、磁性地层及土壤发生学等方面的研究,指出红粘土与其上覆的第四纪黄土一样,是风成堆积的产物^[7-13],从而将黄土高原风成堆积的底界年龄向前推至7.2MaBP^[9,10]。红粘土风成成因的确立对于探讨晚新生代以来古气候的演化、东亚古季风的开始与演变,以及青藏高原的隆升、亚洲内陆干旱化和北半球冰量的变化等问题^[14-17]无疑具有十分重要的意义。

但是,上述研究主要侧重于红粘土的宏观特征(磁性地层、岩石学等)与物理指标(磁化率,粒度等),对微观意义上的化学组成缺乏探讨。而化学元素的分布、赋存、演化等特

收稿日期: 2001-03-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043400); 国家杰出青年基金(编号: 49725307)

作者简介: 陈旻(1973—),女,博士生,环境地球化学专业。

征对于揭示表生系统物质的来源及其演化规律具有鲜明的指示意义。为此,本文选取甘肃西峰地区,对该区红粘土的元素特征进行了初步研究,并与第四纪风成黄土和古土壤进行对比,以期探讨红粘土的物质来源和化学风化程度提供证据。

1 采样与分析

样品采自甘肃西峰巴家咀剖面(107°27'E, 35°53'N, 西峰市以西 16km), 其上覆盖第四纪黄土-古土壤序列, 下伏晚第三纪河流相细砂岩, 与红粘土之间有 1.5m 的过渡层。剖面总厚 66m, 未见层理, 呈红黄-浅红色, 团粒结构, 土体表面铁锰胶膜发育, 中、下部则发育有 4~5 层厚约 0.5m~1m 的钙结核层。

对全剖面依不同深度采集 9 个红粘土样品进行常量元素和稀土元素分析。为排除碳酸盐影响, 取其中 5 个样品用 1mol/L 的醋酸溶液酸溶^[18], 提取酸不溶物(AI)做常量元素及微量元素分析。稀土元素分析在南京大学内生成矿作用国家重点实验室进行, 仪器为 1100+2000 型电感耦合等离子直读光谱仪(ICP-AES); 常量元素和微量元素测试在南京大学现代分析中心 X 射线荧光光谱仪(VF-320)上完成。所有测试结果经标样控制和对照实验, 得出相对标准偏差为: 对稀土元素小于 10%, 对微量元素和 P、Mn 小于 5%, 对其余常量元素小于 2%。

2 结果与讨论

2.1 红粘土的元素地球化学特征

表 1 西峰红粘土中常量元素的含量(%)

Table 1 Contents (wt%) of major elements in the red clay samples from Xifeng

样号	WC30	WC50	WC65	WC92	WC105	WC120	WC132	WC147	WC162	
深度或层位	8.0m	16.0m	22.0m	32.8m	38.0m	44.0m	48.8m	54.8m	60.8m	平均值
SiO ₂	53.61	53.46	50.13	54.42	49.8	48.79	50.47	48.11	49.05	50.87
Al ₂ O ₃	12.42	12.49	11.79	12.75	11.56	11.36	11.73	11.35	11.15	11.84
CaO	9.26	9.27	11.48	8.29	11.81	12.17	11.39	12.89	12.2	10.97
MgO	2.52	2.73	3.16	2.86	2.95	3.13	2.79	2.75	3.14	2.89
K ₂ O	2.35	2.42	2.24	2.49	2.16	2.15	2.2	2.12	2.07	2.24
Na ₂ O	1.12	1.24	1.08	1.14	0.94	0.82	1.01	0.9	0.99	1.03
Fe ₂ O ₃	3.41	3.98	3.71	4.05	3.67	3.71	3.72	3.64	3.29	3.69
FeO	0.86	0.8	0.82	0.84	0.77	0.72	0.77	0.71	0.96	0.81
MnO	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08
P ₂ O ₅	0.12	0.24	0.12	0.14	0.12	0.12	0.11	0.1	0.12	0.13
TiO ₂	0.65	0.64	0.6	0.64	0.59	0.57	0.58	0.55	0.57	0.60
LOI (烧失量)	13.15	12.55	14.94	12.47	15.4	16.26	14.79	16.28	15.94	14.64
总量	99.55	99.91	100.15	100.18	99.85	99.88	99.64	99.48	99.55	

表 2 西峰红粘土酸不溶物中常量元素 (%) 与微量元素 ($\times 10^{-6}$) 的含量及与黄土和古土壤酸不溶物^[18]的对比

Table 2 Concentrations of major and trace elements in the acid-insoluble phases of the Xifeng red clay, compared with loess and paleosols^[18]

岩性 样号 深度或层位	红粘土					黄土		古土壤	
	WC30 8.0m	WC65 22.0m	WC92 32.8m	WC120 44.0m	WC162 60.8m	范围	平均值	范围	平均值
淋溶率 (%)	20.57	22.01	16.50	23.16	26.81	9.39 ~ 21.12	13.43	0.75 ~ 10.70	4.97
SiO ₂	65.62	63.07	63.12	62.05	64.89	63.83 ~ 69.47	66.40	63.20 ~ 67.97	65.18
Al ₂ O ₃	14.62	15.17	15.16	15.48	14.81	13.14 ~ 15.04	14.20	13.96 ~ 15.51	14.79
CaO	0.89	0.83	0.87	0.99	0.94	0.87 ~ 1.22	1.02	0.57 ~ 0.95	0.83
MgO	2.54	2.99	2.94	3.20	2.80	1.99 ~ 2.60	2.29	1.86 ~ 2.60	2.21
K ₂ O	3.17	2.81	3.09	3.02	2.92	2.62 ~ 3.23	3.01	2.56 ~ 3.35	3.15
Na ₂ O	1.27	1.22	1.19	0.86	1.24	1.32 ~ 2.03	1.66	1.03 ~ 1.79	1.41
Fe ₂ O ₃ *	5.08	5.27	5.36	5.62	5.06	4.18 ~ 5.50	4.81	4.66 ~ 5.54	5.12
MnO	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.05 ~ 0.09	0.07	0.06 ~ 0.09	0.08
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.15	0.16	0.15	0.12 ~ 0.18	0.15	0.09 ~ 0.14	0.11
TiO ₂	0.80	0.75	0.76	0.73	0.74	0.67 ~ 0.79	0.73	0.72 ~ 0.78	0.75
LOI (烧失量)	5.84	7.50	6.80	7.48	6.40	4.43 ~ 6.74	5.36	4.43 ~ 7.56	6.00
总量	100.05	99.84	99.52	99.67	100.02				
CIA	68.24	70.99	69.91	71.73	69.33	62.93 ~ 68.56	65.46	65.99 ~ 69.71	67.99
U	4.1	3.4	3.8	2.3	4.9	0.4 ~ 5.7	2.9	0.4 ~ 5.2	3.1
Rb	123	125	126	125	124	102 ~ 127	116	112 ~ 137	123
Th	12.5	14.4	14.4	16	10	8.7 ~ 18.3	13.2	10.0 ~ 17.4	13.7
Sr	113	119	117	112	116	115 ~ 142	127	98 ~ 125	115
Y	25.6	24.9	24.7	25.8	24.3	14.4 ~ 26.7	23.9	22.9 ~ 31.4	26.7
Zr	254	233	236	228	230	230 ~ 275	247	228 ~ 273	243
Nb	16.2	16.2	15.9	15	14.4	12.9 ~ 18	16	12 ~ 19	16
Cu	32	31	33	34	37	18 ~ 31	26	23 ~ 36	30
Ba	449	437	442	339	500	388 ~ 655	445	409 ~ 715	465
Pb	24	24	26	57	41	15 ~ 173	37	14.4 ~ 37.0	25
Zn	86	89	92	94	89	66 ~ 90	79	72 ~ 94	83
Ni	42	44	43	46	44	31 ~ 44	38	35 ~ 44	41
Co	14.9	17.5	18.7	18.8	14.5	12.1 ~ 17.5	14.9	11.4 ~ 18.0	15.4
V	96	108	110	106	107	78 ~ 106	96	89 ~ 111	100
Cr	72	52	43	42	47	15 ~ 84	51	19 ~ 82	58
Ca	20.5	20.1	22.3	17.4	18.1	15.9 ~ 20.2	18.0	14.6 ~ 21.7	18.3

* 全铁以 Fe₂O₃ 计

表 1 列出了红粘土的常量元素分析结果。从表中可以看出，常量元素在不同的红粘土样

品中的含量比较相近,其中 SiO_2 含量在 48.11% ~ 54.42% 之间, Al_2O_3 含量为 11.15% ~ 12.75%, CaO 含量为 8.29% ~ 12.89%, MgO 含量为 2.52% ~ 3.16%。 Si 、 Al 、 K 、 Na 和 Fe 等元素的含量波动往往与 Ca 的含量变化相反。在 CaO 含量比较高的 WC147 和 WC162 等样品中, Si 、 Al 等元素的含量较低。烧失量 (LOI) 与 CaO 呈同步变化的趋势,在 WC147 样品中,烧失量高达 16.28%。与第四纪黄土和古土壤样品相比较,红粘土相对含有较高的 CaO 、 MgO 和烧失量,而其它元素的含量相对较低。

红粘土中较高的 CaO 含量和较大的烧失量,表明红粘土可能含较多的碳酸盐物质。一般碳酸盐矿物在沉积后易发生风化淋失及再沉积作用,含量变化比较大,从而影响其它元素的含量变化。为消除碳酸盐的影响,从中选择了 5 个样品,采用醋酸酸溶方法去除碳酸盐,再来分析不含碳酸盐的组分即酸不溶物中元素的含量 (表 2)。表 2 清楚地显示,去除碳酸盐后,酸不溶物样品中的 CaO 含量都低于 1%,远远低于其在红粘土全岩样品中的含量,表明红粘土中的 Ca 主要以碳酸盐矿物的形式存在。红粘土的淋溶率 (主要反映碳酸盐的含量) (平均为 22%) 明显高于第四纪古土壤 (平均为 5%),也略高于黄土样品 (平均为 13%)。这与其全岩中 CaO 含量较高相一致,表明红粘土比第四纪黄土和古土壤含有更多的碳酸盐物质。

去除碳酸盐后,常量和微量元素在不同深度的红粘土中的含量比较接近,这表明其来源物质比较一致。与第四纪的黄土和古土壤相比较,红粘土的酸不溶物中的 Al 、 Fe 和 K 等元素的含量相对较高,而 Si 、 Ca 和 Na 等元素的含量相对较低。

2.2 红粘土来源的地球化学证据

大量的研究证据表明,第四纪黄土起源于亚洲内陆沙漠,粉尘经风力搬运而后沉积到黄土高原^[19,20]。作为下伏于黄土的晚第三纪红粘土,与黄土是否有相同的成因模式?红粘土与黄土是否有相同或相近的原岩?近来研究者从磁化率、粒度等物理性质方面,初步确定了红粘土与黄土的风成成因的一致性^[8~13]。本文则从元素地球化学方面来进一步阐述红粘土与黄土的成因关系。

表 3 西峰红粘土稀土元素特征参数值及与黄土和古土壤^[22]的对比

Table 3 Parameters of rare earth elements of red clay from Xifeng, compared with loess and paleosols^[22]

	红粘土		黄土		古土壤	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
$\Sigma\text{REE}/\times 10^{-6}$	150 ~ 166	160	150 ~ 210	176	190 ~ 230	214
LR/HR	7.80 ~ 8.20	8.03	6.05 ~ 9.21	7.63	6.39 ~ 8.74	7.51
Eu/Sm	0.203 ~ 0.210	0.205	0.178 ~ 0.241	0.205	0.186 ~ 0.217	0.201
Sm/Nd	0.180 ~ 0.191	0.183	0.134 ~ 0.21	0.168	0.153 ~ 0.188	0.162
δEu	0.64 ~ 0.67	0.65	0.60 ~ 0.84	0.68	0.65 ~ 0.87	0.68
δCe	0.91 ~ 1.02	0.95	0.77 ~ 0.99	0.88	0.80 ~ 1.01	0.93

稀土元素常作为沉积物的物源示踪剂,通过比较不同沉积物中稀土元素的含量与配分模式,可以对它们的来源提供比较可信的证据^[21]。表 3 中,红粘土的稀土元素总量 (ΣREE)、轻重稀土的比值 (LREE/HREE), δEu 、 δCe 、 Eu/Sm 、 Sm/Nd 等特征参数值,与黄土和古土壤^[22]十分接近,说明它们可能有相似的物质来源。红粘土的稀土配分模式呈现轻稀土富集、重稀土亏损的负斜率形式 (图 1),与第四纪黄土和古土壤的稀土配分模式非常相似,进一

步揭示出红粘土与第四纪黄土 - 古土壤在成因上的相似性。

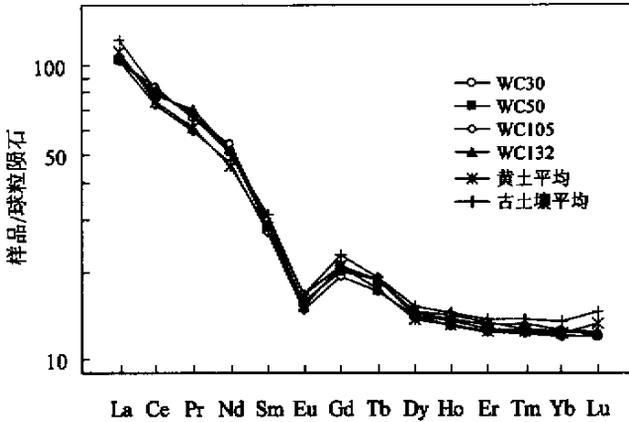


图 1 西峰红粘土和第四纪黄土 - 古土壤稀土元素配分模式

Fig.1 Chondrite-normalized REE distribution pattern for red clay from Xifeng and Quaternary loess and paleosols

一些微量元素如 Th、Sc、Co、Zr、Hf、Ti 和 Nb 等，在母岩风化、搬运、沉积和后期成壤变化中，几乎等量地转移到沉积物中而不发生迁移或流失，因而可用来示踪沉积物的物源。图 2 给出了红粘土（去除碳酸盐后的酸不溶物）中微量元素参比于上部陆壳^[23]（UCC）的蛛网图。和第四纪黄土和古土壤的对比表明，红粘土中微量元素的分布特征与黄土和古土壤十分相似，且变化范围十分狭窄，反映了红粘土与黄土 - 古土壤成因上的一致性。稳定元素对比值如 Zr/Ti、Ti/Al 和 Nb/Zr 等，也是判断不同沉积物其来源是否一致的极好指标。由图 3 可以看出，红粘土样品中 Zr/Ti、Ti/Al 和 Nb/Zr 比值的变化范围很窄，与第四纪的黄土和古土壤的比值非常接近，进一步证明红粘土与黄土 - 古土壤具有相同的物质来源。

2.3 红粘土化学风化程度及其古气候指标

化学风化是表生环境中主要的地质作用之一。为了排除碳酸盐影响，在研究沉积物所受的化学风化程度时，常用 CIA 值和酸不溶物中的 Na/K 比和 Rb/Sr 比等指标进行判别。其中 CIA 值表示为：

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + K_2O + Na_2O)] \times 100$$

式中均为氧化物摩尔比，其中 CaO* 表示在硅酸盐矿物中的含量，不包括碳酸盐和磷酸盐中的 CaO 含量^[24]。从表 2 中可以看出，红粘土的 CIA 值在 68 ~ 72 之间，略高于第四纪冰川粘土（60 ~ 65），而远低于残积粘土（85 ~ 100），与平均页岩的值相近（70 ~ 75）^[24]，表明红粘土总体风化程度相对较弱，只与页岩相当。然而，与第四纪黄土和古土壤^[18]相比，红粘土的 CIA 值则略高，反映了红粘土比黄土和古土壤遭受过相对较强的化学风化。

Na/K 比是衡量样品中斜长石风化程度的指标，同样可用于表征沉积物的化学风化程度。由于斜长石的风化速率远大于钾长石，因此，风化剖面中 Na/K 比与其风化程度呈反比^[25]。从图 4 中可以看出，红粘土 Na/K 比的变化与 CIA 参数的变化特征相反，且低于黄土和古土壤的 Na/K 比值，同样指示了红粘土遭受过较强的化学风化。Rb/Sr 比是另一个较常用的指示

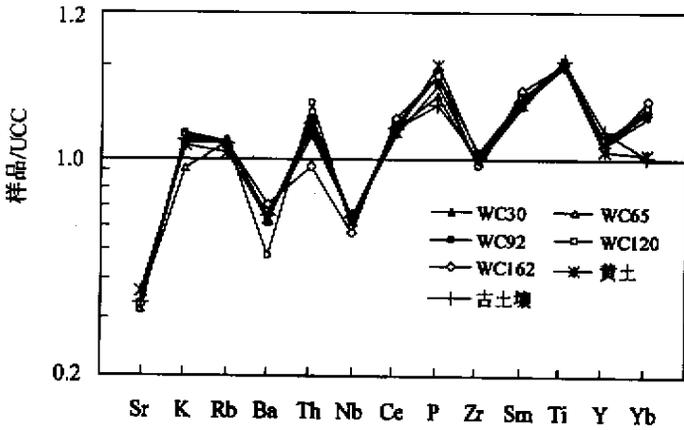


图2 西峰红粘土和洛川黄土-古土壤^[18]中微量元素的分布特征
 Fig.2 UCC-normalized pattern of trace elements for the red clay from Xifeng and loess paleosols samples from Luochuan^[18]

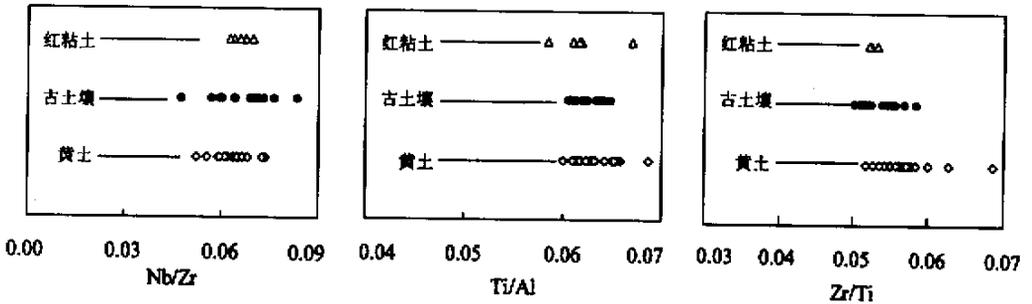


图3 西峰红粘土和洛川黄土-古土壤^[18]Zr/Ti、Ti/Al和Nb/Zr比值范围
 Fig.3 Ranges of Zr/Ti、Ti/Al和Nb/Zr ratios for the red clay from Xifeng and loess paleosols samples from Luochuan^[18]

化学风化程度的指标^[26-28]。由于 Rb 主要赋存在较稳定的含 K 矿物中 (如钾长石和伊利石), 而 Sr 主要赋存在易风化的含 Ca 的矿物中 (如斜长石), 因此, 随着含 Ca 矿物的风化和 Sr 的迁出, 必然造成风化剖面中 Rb/Sr 比的升高^[27,28]。图 4 中 Rb/Sr 比变化形式与 CIA 值的变化特征十分吻合, 同样反映了红粘土的化学风化程度强于第四纪黄土和古土壤。此外, 尽管西峰红粘土和洛川黄土-古土壤的形成时代与地理位置都不相同, 但二者 Na/K 和 Rb/Sr 参数关于 CIA 值的投影点均落在一条趋势线附近, 呈极显著的相关关系 (相关系数分别为 -0.91 和 0.79), 也进一步验证了红粘土和黄土-古土壤具有相同的物质来源。

将红粘土酸不溶物分析结果投在 A-CN-K 三角图中 (图 5), 可以看出红粘土的物质组成与陆源页岩的平均化学组成^[24]十分接近, 而与上部陆壳^[23]明显不同。尽管红粘土化学风化程度高于第四纪的黄土和古土壤, 由其在 A-CN-K 三角图中的投影点位置可以看出红粘土经历的化学风化仍处于脱 Ca、Na 为主的早期阶段, 还未达到去 K 的中级阶段。

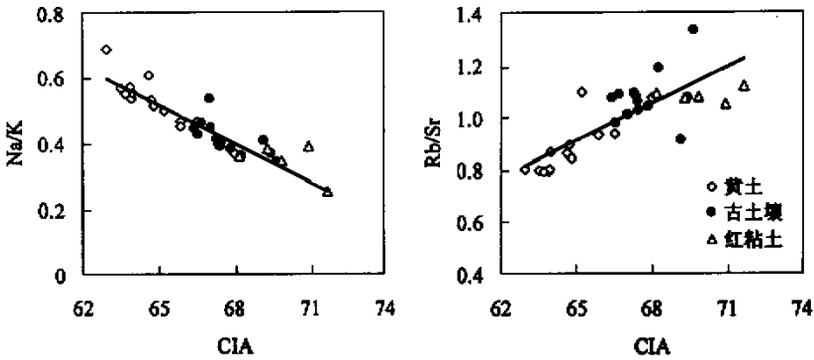


图 4 西峰红粘土与洛川黄土 - 古土壤^[18] 化学风化参数 Na/K, Rb/Sr 与 CIA 关系图

Fig.4 Diagrams of Na/K and Rb/Sr vs. CIA values for the red clay from Xifeng and loess paleosol samples from Luochuan^[18]

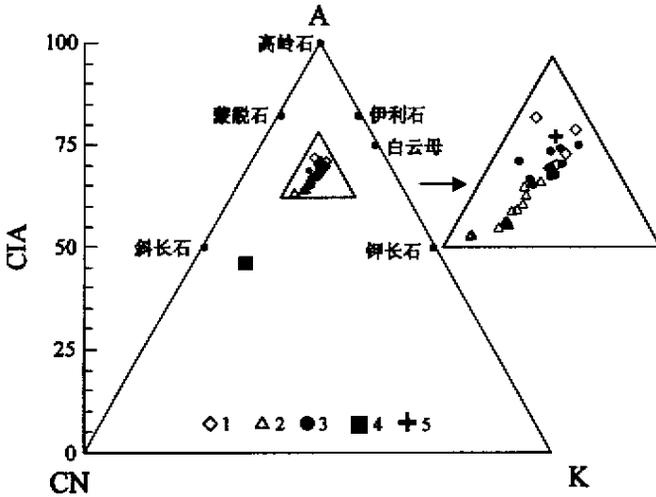


图 5 西峰红粘土和洛川黄土 - 古土壤^[18]化学风化趋势图

Fig.5 Weathering trend of the red clay from Xifeng and loess paleosol samples from Luochuan^[18]

其中 A = Al₂O₃; CN = CaO + Na₂O; K = K₂O. 1. 西峰红粘土;
2. 洛川黄土^[18]; 3. 洛川古土壤^[18]; 4. 上部陆壳平均值^[23]; 5. 陆源页岩^[23]

沉积物的化学风化程度受多种因素控制，在地形、母岩等条件相似的情况下，气候（特别是降雨量）是控制化学风化程度的主要因素。在温暖潮湿的气候条件下，化学风化程度较强，而在干冷的气候条件下，化学风化往往较弱。红粘土的化学风化程度高于第四纪的黄土和古土壤，表明在黄土高原，晚第三纪时的气候条件要比黄土堆积时期相对潮湿，同时也反映出晚第三纪以来气候由相对温暖湿润向第四纪逐渐变干变冷的总体趋势^[14, 18]。

3 结 论

通过对甘肃西峰红粘土的地球化学和化学风化研究,可以得出以下初步认识:

(1) 红粘土的化学组成以富含碳酸盐为特征,通过酸溶消除碳酸盐对其它元素含量的影响,发现其化学成分十分均一,反映物质来源的一致性。

(2) 红粘土稀土元素的配分模式与黄土-古土壤十分相似,意味着它们在成因上的相似性;微量元素的分布特征以及元素对比值的变化范围进一步说明红粘土与黄土-古土壤具有相同的物质来源。

(3) 红粘土的化学风化处于脱 Ca 、 Na 为主的早期阶段, CIA 值和酸不溶物中的 Na/K 比及 Rb/Sr 比参数一致地指示了红粘土化学风化程度高于第四纪的黄土和古土壤,表明在黄土高原晚第三纪时的气候条件要比黄土堆积时期相对潮湿,同时也反映出晚第三纪以来气候由相对温暖湿润向第四纪逐渐变干变冷的总趋势。

参 考 文 献

- [1] Teilhard de Chardin P, Young C C. Fossil mammals from the Late Cenozoic of the northern China [J]. *Paleontologia Sinica*, Ser. C, 1931, 9 (1): 1 ~ 66.
- [2] 邱占祥, 黄为龙, 郭志慧. 中国的三趾马化石. 中国古生物志, 新两种第 25 号 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [3] 曹家欣, 严润娥, 王欢. 山东庙岛群岛的红色风化壳与棕红土及其古气候意义 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 1994, 24 (2): 216 ~ 224.
- [4] 张云翔, 薛祥煦. 甘肃武都龙家沟三趾马动物群的埋藏特征及该区红层的成因 [J]. *科学通报*, 1995, 40 (5): 447 ~ 449.
- [5] 赵景波. 西安、山西保德第三纪晚期红土的研究 [J]. *沉积学报*, 1987, 7 (3): 113 ~ 120.
- [6] Evans M E, Wang Y, Rutter N W, et al. Preliminary magnetostratigraphy of the red clay underlying the loess sequence at Baoji, China [J]. *Geophysical Research Letters*. 1991, 18: 1409 ~ 1412.
- [7] 朱日祥, 潘永信, 丁仲礼. 红粘土的磁性性质研究 [J]. *第四纪研究*, 1996, (3): 232 ~ 238.
- [8] 孙东怀, 刘东生, 陈明扬, 等. 中国黄土高原红粘土序列的磁性地层与气候变化 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 1997, 27 (3): 265 ~ 270.
- [9] 孙东怀, 陈明扬, Shaw J, 等. 晚新生代黄土高原风尘堆积序列的磁性地层年代与古气候记录 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 1998, 28 (1): 79 ~ 84.
- [10] Sun D, Shaw J, An Z, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2Ma Late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25 (1): 85 ~ 88.
- [11] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原红粘土与黄土古土壤粒度特征对比——红粘土风成成因的新证据 [J]. *沉积学报*, 1999, 17 (2): 226 ~ 232.
- [12] 丁仲礼, 孙继敏, 朱日祥, 等. 黄土高原红粘土成因及上新世北方干旱化问题 [J]. *第四纪研究*, 1997, (2): 147 ~ 156.
- [13] 丁仲礼, 孙继敏, 杨石岭, 等. 灵台黄土-红粘土序列的磁性地层及粒度记录 [J]. *第四纪研究*, 1998, (1): 86 ~ 92.
- [14] 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性 [J]. *第四纪研究*, 1998, (3): 194 ~ 211.
- [15] 安芷生, 王苏民, 吴锡浩, 等. 中国黄土高原的风积证据: 晚新生代北半球大冰期开始及青藏高原的隆升驱动 [J]. *中国科学*, 1998, 28 (6): 481 ~ 490.
- [16] 郭正堂, 彭淑贞, 郝青振, 等. 晚第三纪中国西北干旱化的发展及其与北极冰盖形成演化和青藏高原隆升的关系

- [J]. 第四纪研究, 1999, (6): 556 ~ 567.
- [17] Ding Z, Rutter N W, Sun J, et al. Re-arrangement of atmospheric circulation at about 2.6Ma over northern China: evidence from grain size records of loess ~ paleosol and red clay sequences [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19: 547 ~ 558.
- [18] 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近 2.5Ma 黄土高原风尘化学组成变化与亚洲内陆化学风化 [J]. 中国科学 (D 辑), 2001, 31 (2): 136 ~ 145.
- [19] 刘东生, 等. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [20] An Z, Kukla G, 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: 29 ~ 36.
- [21] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989. 88 ~ 93.
- [22] 文启忠, 等. 中国黄土地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [23] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Geoscience Texts, London: Blackwell, 1985.
- [24] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, 299: 715 ~ 717.
- [25] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44, 1659 ~ 1666.
- [26] Dasch E J. Strontium isotopes in weathering profiles, deep sea sediments and sedimentary rocks [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1969, 33: 1521 ~ 1552.
- [27] Chen J, An Z, Head J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during last 130 000 years and their implications for monsoon paleoclimatology [J]. Quaternary Research, 1999, 51: 215 ~ 219.
- [28] Chen Jun, Wang Yongjin, Chen Yang, et al. Geochemical characterization of Rb and Sr in the Chinese loess stratigraphy and its implications for paleomonsoon climate [J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 4 (2): 279 ~ 288.

CHEMICAL COMPOSITION AND CHARACTERIZATION OF CHEMICAL WEATHERING OF LATE TERTIARY RED CLAY IN XIFENG, GANSU PROVINCE

CHEN Yang, CHEN Jun, LIU Lian-wen

(*Institute of Surficial Geochemistry, Department of Earth Sciences,*

State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China.)

Abstract: Geochemical studies have been conducted on the red clay samples from Xifeng, Gansu Province, China. Results show that these samples are enriched in carbonate and depleted in other elements such as Si, Al, and Fe. To eliminate the effect of the carbonate fraction, five samples were leached by 1mol/L acetic acid. It can be found that the acid-insoluble fractions of the samples have similar compositions, indicating same sources. The distribution patterns of rare earth elements and trace elements indicate the similarity of eolian origin between the red clay and Quaternary loess and paleosols. Further investigations show that the red clay experience the incipient stage of chemical weathering characterized by removal of Na and Ca. Several geochemical parameters such as CIA values, Na/K and Rb/Sr ratios in the acid-insoluble fractions reveal that the red clay has undergone more intense chemical weathering than loess and paleosols, suggesting that the paleoclimate on the Loess Plateau has evolved from warm and moist conditions during Late Tertiary to dry and cold conditions during Quaternary.

Key words: red clay; chemical composition; chemical weathering