

九江下蜀黄土的常量元素组成及其物源指示

曾方明^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008)

摘 要:长江中下游地区下蜀黄土的物质来源一直是个热点问题。对江西九江下蜀黄土和甘肃临洮晚更新世以来黄土的常量元素组成进行了研究, 并与末次间冰期以来黄土高原其他点位的黄土、长江中下游其他地点的下蜀黄土和长江沉积物的元素组成进行对比, 以期探讨九江下蜀黄土的物质来源。结果表明: 1) 九江下蜀黄土的地球化学组成以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 为主。与临洮黄土的元素组成相比, 九江下蜀黄土具有较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 含量和较低的 CaO 、 MgO 含量; 2) 在空间上, 下蜀黄土的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值未表现出黄土高原黄土(北方黄土)的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值随纬度规律性变化的特点, 揭示下蜀黄土的主要源区可能不是北方的内陆荒漠或黄土高原; 3) $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解显示下蜀黄土与北方黄土存在显著差异, 进一步表明下蜀黄土与北方黄土的主要源区可能不同。

关键词:长江中下游; 下蜀黄土; 元素地球化学; 物源示踪

中图分类号: P534.63; P532

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2018)04-0019-08

长江中下游地区(湖北、湖南、江西、安徽、江苏、浙江等地)广泛发育下蜀黄土^[1-3], 下蜀黄土在成因上为风成^[4-5], 是亚热带第四纪古环境研究的重要沉积物^[6-12]。

尽管南京下蜀黄土中钙结核的¹⁴C年代结果比较年轻(<31 ka BP), 却可能揭示下蜀黄土沉积的时代对应于北方马兰黄土的堆积时期^[13]。南京下蜀黄土的古生物化石、孢粉、古地磁极性和热释光测年结果表明其形成时代为中更新世晚期^[14]。九江长虹剖面下蜀黄土底界的热释光年代为~100 ka, 表明其形成于晚更新世^[15]。江苏镇江大港下蜀黄土的磁化率与深海沉积的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线(SPECMAP)对比结果显示其形成年代可达~0.8 Ma^[9]。安徽郎溪、宣州黄棕色土(即下蜀黄土)的光释光年代学结果表明它们形成于末次冰期^[6]。

下蜀黄土的物质来源一直备受关注。有学者认为南京下蜀黄土与西北黄土一样, 均来自西北内陆荒漠^[16-17]。镇江下蜀黄土和北方黄土高原

黄土(以下简称为北方黄土)的稀土元素配分模式十分相似, 且不同时期的下蜀黄土样品的稀土配分模式几乎一致, 这些特征揭示了下蜀黄土的来源可能与西北内陆、黄土高原的粉尘有关^[18]。安徽宣城、繁昌两地下蜀黄土(<20 μm 组分和全岩)的常量和微量元素组成与北方黄土具有显著差异, 从而表明它们的源区可能不是西北内陆荒漠^[7]。与北方黄土相比, 宣城、九江的下蜀黄土具有较高的 Ti、Zr、Hf 含量和较低的 Ba 含量, 以及较高的 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、U/Pb 比值和较低的 Zr/Hf、Ba/Rb、 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值, 表明下蜀黄土与北方黄土的源区不同^[19]。在 Sm-Nd、Sr 同位素组成上, 宣城、九江下蜀黄土与北方黄土存在显著差异, 却与长江中下游的河流沉积物一致, 表明下蜀黄土的源区可能是长江中下游地区^[20]。在碎屑锆石 U-Pb 年龄谱上, 南京下蜀黄土与长江沉积物一致, 而与黄土高原黄土、毛乌素沙漠沉积存在显著差异, 有力地证明了南京下蜀黄土是来自长江流域的近源沉积, 其物源区与北方黄土不同^[8]。

收稿日期: 2016-01-21; 修回日期: 2016-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402314); 中国科学院青海盐湖研究所青年引导基金(Y460261051)

作者简介: 曾方明(1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事第四纪地质与地球化学研究。Email: fmzeng@163.com。

针对江西九江地区发育的下蜀黄土,学者们主要从年代学^[15]、成因^[21]、粒度^[22]、粘土矿物^[23]、地球化学特征与古风化强度及物质来源^[7,19-20,24-25]等方面对它们进行了研究。研究表明九江下蜀黄土的形成时代不早于晚更新世^[15]。选择相同年代的沉积物进行物源研究,可以消除不同时间尺度下诸如沉积作用、气候事件等因素对沉积物的地球化学组成造成的影响,从而更加准确地示踪沉积物的来源。甘肃临洮地区较完整地保存了晚更新世以来的黄土—古土壤序列,其物质成分均一,受局地地层的影响较小,与西北内陆荒漠源区有着密切的联系,是黄土高原西部黄土沉积的典型代表。因此,本文对九江 JJ3 和 JJ4 剖面的下蜀黄土以及黄土高原临洮剖面的黄土—古土壤序列($S_1-L_1-S_0$)样品的常量元素组成进行测定,并将它们与镇江大港、宣城向阳的下蜀黄土(形成于末次间冰期以来)和其他地点的北方黄土(仅限 S_1 以来的沉积)的元素组成特征进行对比。通过比较上述沉积物纬向上 SiO_2/Al_2O_3 比值的变化以及元素比值(TiO_2/Al_2O_3 、 K_2O/Al_2O_3 、 Fe_2O_3/Al_2O_3)的差异来初步探讨下蜀黄土的物质来源。

1 材料与方法

1.1 材料

江西九江位于长江中游地区,该区保存有较好的下蜀黄土^[15]。JJ3 剖面($29.7035^{\circ}N$, $116.0149^{\circ}E$)为一建筑工地挖掘机开挖出来的断面。剖面自上而下的岩性为:0~2.1 m,黄棕色下蜀黄土,以粉砂为主,无层理,质地疏松;2.1 m 以下为红土层,未见底^[26]。JJ4 剖面($29.6321^{\circ}N$, $116.0747^{\circ}E$)为当地村民修筑公路时露出的断面。剖面自上而下的岩性为:0~3.8 m,黄棕色下蜀黄土,以粉砂为主,质地疏松;3.8 m 以下为红土层,未见底^[26]。我们在 JJ3 剖面采集了 4 个下蜀黄土样品,在 JJ4 剖面采集了 6 个下蜀黄土样品。

为了对九江下蜀黄土进行元素地球化学对比研究和示踪物源,我们在黄土高原临洮县的黄土—古土壤序列中(LT 剖面, $35.3699^{\circ}N$,

$103.9240^{\circ}E$)选择了 7 个样品。LT15、LT20 为全新世时期的古土壤(S_0),对应深海氧同位素 MIS 1 阶段;LT36、LT90 为黄土(L_1),时代上大致对应 MIS 2 阶段;LT155 为黄土(L_1),为弱成壤作用的产物,时代上大致对应 MIS 3 阶段;LT205 为黄土(L_1),对应 MIS 4 阶段;LT295 为末次间冰期古土壤(S_1),对应 MIS 5 阶段。

1.2 方法

九江下蜀黄土和临洮黄土样品用塑料自封袋采集回来后,将样品袋开口,盖上纸张以防灰尘污染,让其在室内风干。由于九江下蜀黄土的粒度小,风干后的样品采用玛瑙研钵充分磨细之后装入样品袋,以备元素测定。为了减小对矿物颗粒的破坏,在玛瑙研钵中将风干后的临洮黄土样品中的团块轻轻碾碎,通过 200 目(孔径为 $75\ \mu m$)不锈钢网筛,收集通过网筛的样品。除 LT36 样品外,其余 6 个样品采用马尔文 Mastersizer 2000 粒度仪测定的粒度,结果显示: $<75\ \mu m$ 组分的含量为 92.2%~98.8%,据此可以认为过筛后的样品几乎等同于全岩样品。

称取 ~4g 处理好的样品放入聚氯乙烯(PVC)环内,采用压样机在 25 t 压力下(保压时间为 60 s)压制成片(直径 32 mm)。压好的片采用帕纳科 Axios X 射线荧光光谱仪(型号 PW4400)进行元素测定。测试过程中采用标准样品(GSS-1 至 GSS-28, GSD-1 至 GSD-23)与重复样进行质量监控,确保测试结果的准确度和精度。元素含量在中国科学院青海盐湖研究所盐湖化学分析测试中心进行测定,各常量元素分析误差小于 5%。本文九江 JJ3 和 JJ4 剖面下蜀黄土的元素数据来自文献^[26]。

此外,为了开展更好的对比,搜集了文献中发表的有关北方黄土、下蜀黄土的常量元素地球化学数据。所搜集的数据均为全岩样品、未经任何化学前处理(如酸处理去除碳酸盐)的元素数据。

2 结果与讨论

2.1 九江下蜀黄土与临洮黄土的常量元素组成

九江下蜀黄土与临洮黄土的常量元素组成见

表 1。九江 JJ3 和 JJ4 剖面下蜀黄土的常量元素组分以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 为主,这 3 种氧化物的含量大于 86%^[26]。 SiO_2 含量为 64.48% ~ 66.34%, Al_2O_3 含量为 14.79% ~ 15.82%, Fe_2O_3 含量为 5.69% ~ 6.20%,另 TiO_2 含量为 0.88% ~ 0.92%, CaO 含量为 0.37% ~ 0.56%, MgO 含量为 1.34% ~ 1.51% (表 1)。

临洮黄土样品的常量元素组分也以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 为主,这 3 种氧化物的含量大于 72%。 SiO_2 含量为 55.63% ~ 61.54%, Al_2O_3 含量为 11.88% ~ 13.98%, Fe_2O_3 含量为 4.27% ~ 5.28%,而 TiO_2 含量为 0.58% ~ 0.70%, CaO 含量为 4.03% ~ 9.69%, MgO 含量为 2.27% ~ 2.59% (表 1)。

表 1 九江 JJ3 和 JJ4 剖面及临洮剖面的元素组成
Table 1 Elemental compositions of JJ3 and JJ4 sections in Jiujiang, and LT section at Lintao County on the Chinese Loess Plateau

样号	深度 /m	岩性	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	MnO	TiO_2	P_2O_5
JJ3-1*	0.5	下蜀黄土	64.86	15.72	5.94	2.40	0.78	0.40	1.43	0.11	0.90	0.11
JJ3-2*	1.0	下蜀黄土	65.33	15.45	5.77	2.32	0.76	0.42	1.41	0.12	0.92	0.09
JJ3-3*	1.5	下蜀黄土	64.84	15.50	5.94	2.27	0.65	0.40	1.34	0.11	0.90	0.09
JJ3-4*	2.0	下蜀黄土	64.48	15.82	6.20	2.35	0.68	0.40	1.40	0.13	0.92	0.09
JJ4-1*	0.5	下蜀黄土	66.34	14.82	5.75	2.27	0.99	0.37	1.35	0.11	0.90	0.12
JJ4-2*	1.0	下蜀黄土	65.94	14.88	5.83	2.28	1.01	0.50	1.44	0.11	0.90	0.13
JJ4-3*	1.5	下蜀黄土	65.44	15.22	5.84	2.32	0.97	0.55	1.51	0.11	0.88	0.15
JJ4-4*	2.0	下蜀黄土	66.15	14.81	5.69	2.26	0.97	0.56	1.43	0.10	0.88	0.15
JJ4-5*	2.5	下蜀黄土	65.46	14.79	6.07	2.23	0.83	0.52	1.42	0.13	0.90	0.14
JJ4-6*	3.5	下蜀黄土	65.42	15.27	5.84	2.32	0.85	0.54	1.46	0.12	0.90	0.11
LT15	0.3	古土壤	55.63	12.13	4.33	2.31	1.39	9.69	2.43	0.08	0.60	0.13
LT20	0.4	古土壤	56.96	11.88	4.33	2.33	1.54	9.52	2.29	0.08	0.60	0.14
LT36	0.72	黄土	56.59	12.04	4.29	2.35	1.53	9.07	2.43	0.08	0.58	0.14
LT90	1.8	黄土	58.24	12.01	4.33	2.39	1.87	8.46	2.29	0.08	0.60	0.15
LT155	3.1	黄土	61.54	13.98	5.28	2.72	2.08	4.03	2.59	0.11	0.70	0.17
LT205	4.1	黄土	57.70	12.06	4.27	2.40	1.98	8.83	2.27	0.08	0.60	0.15
LT295	5.9	古土壤	59.30	13.32	5.00	2.67	1.93	6.21	2.35	0.09	0.67	0.16
UCC#			66.0	15.2	5.0	3.4	3.9	4.2	2.2	0.08	0.68	0.15

* 氧化物数据引自文献^[26]

#UCC 数据 TiO_2 依据文献^[27]; P_2O_5 依据文献^[28]; 其它依据文献^[29]

与上地壳(UCC)平均成分相比,九江下蜀黄土的 Si、Al 与 UCC 相当一致,Fe、Ti 相对富集(Fe_2O_3 标准化值的变化范围为 1.1 ~ 1.2, TiO_2 标准化值的变化范围为 1.3 ~ 1.4),K 相对亏损

(K_2O 标准化值为 0.7)(图 1a)。临洮黄土的 Si、Al、Fe、K、Ti 与 UCC 基本一致,但总体呈略微亏损的状态(图 1b),可能与临洮黄土中较高的 CaO 含量(4.03% ~ 9.69%)(表 1)的稀释作用有关。

与临洮黄土的元素组成相比,九江下蜀黄土具有较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 含量和较低的 CaO 、 MgO 含量。在风化过程中, Ca 、 Mg 元素赋存在易风化的斜长石矿物中,最易从风化剖面中迁出,从而导致 Al 、 Fe 、 Ti 等稳定性元素在风化剖面中相对富集^[30]。九江下蜀黄土中的 Ca 、 Mg 含量低,表明沉积物在沉积前和沉积后可能遭遇

了强烈的化学风化作用。然而,临洮黄土的 Ca 、 Mg 含量高,并未从剖面中大量迁出,可能与临洮黄土沉积区较干旱的气候条件、较弱的化学风化作用有关。因此,九江下蜀黄土与临洮黄土在常量元素组成上的差别受沉积区不同强度的化学风化作用影响,也可能与源区物质的成分有关。

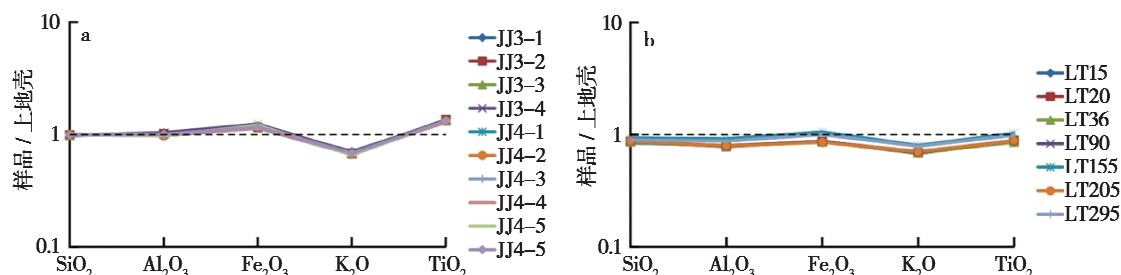


图 1 九江下蜀黄土(a)和临洮黄土(b)主要元素的 UCC 标准化值分布图(九江下蜀土数据引自文献^[26])

Fig. 1 The UCC-normalized values of elements in Xiashu loess in Jiujiang (a) and loess-paleosol sequence since the last interglacial at Lintao on the Chinese Loess Plateau (b)

2.2 下蜀黄土与北方黄土的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值在纬向上的变化

过去研究表明,黄土高原黄土沉积的粒度在空间上从西北往东南方向依次为砂黄土、黄土、粘黄土^[16,31],揭示黄土搬运的风动力主要为西北风,其源区位于黄土高原的西北方向。更加详细的粒度结果表明冰期—间冰期尺度上黄土—古土壤的中值粒径存在规律性的变化。冰期时粒度明显变粗,间冰期时粒度明显变细,反映了气候驱动下的沙漠进退对黄土高原黄土颗粒粒径的显著影响^[32]。黄土高原长武 L_1 和 L_4 样品的粒径 $< 50 \mu\text{m}$ 时,它们的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值与粒径呈显著正相关关系;末次间冰期以来渭南和洛川黄土—古土壤序列的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值与中值粒径的变化趋势一致^[33]。因此,黄土高原黄土—古土壤序列在空间上的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值的变化特征和粒度特征一致,可以用来指示搬运粉尘沉积的风动力方向,从而对于物源示踪具有重要作用。

黄土高原沿西北—东南方向分布的点位上,末次冰期黄土(L_1)和末次间冰期古土壤(S_1)的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值随纬度降低而减小^[7]。本次研究,我们分析了末次间冰期以来临洮黄土—古土壤样品的常量元素组成,搜集了黄土高原末次间

冰期以来黄土—古土壤全岩样品的常量元素组成,对这些样品的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值与纬度(36.67°N 至 34.07°N)的关系进行了分析。结果表明:这些样品的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值随着纬度的降低逐渐减小(图 2),与沿西北—东南方向有规律分布的点位上的研究结果一致^[7]。大量的研究表明,黄土高原黄土的主要源区为位于黄土高原西北方向的内陆干旱区^[16,34-35]。

与黄土高原末次间冰期以来的黄土—古土壤不同,南方下蜀黄土的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值与纬度之间不存在规律性关系(图 2)。镇江末次间冰期以来下蜀黄土(32.22°N)的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值^[36]为 $8.41 \sim 8.61$,比渭南黄土(34.07°N)的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值($7.42 \sim 7.93$)^[37]要大。如果南方下蜀黄土与北方黄土具有相同的源区,理论上是纬度越低,下蜀黄土的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值要比北方黄土的小。事实上,这一现象并没有出现,从而表明下蜀黄土与北方黄土的源区可能不同。宣城末次间冰期以来下蜀黄土(30.88°N)的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值变化最大,为 $7.02 \sim 11.41$ ^[38]。

九江位于东亚冬季风的下风向地带,与黄土高原南部渭南、蓝田的距离大约为 800 km 。如果九江下蜀黄土和渭南、蓝田黄土的源区相同,其 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值应该显著低于渭南、蓝田黄土的

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值。实际上,九江下蜀黄土的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值为 6.92 ~ 7.60,与渭南和蓝田末次间冰期以来黄土—古土壤的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值(7.04 ~ 7.93)接近^[37,39]。上述结果表明九江下蜀黄土可能与渭南、蓝田黄土的源区很可能不同。

安徽宣城、繁昌两地下蜀黄土与北方黄土的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值差异明显,表明宣城、繁昌下蜀黄土很可能不是来自北方内陆干旱区^[7]。我们的研究结果支持下蜀黄土不是来自北方内陆干旱区的推论。

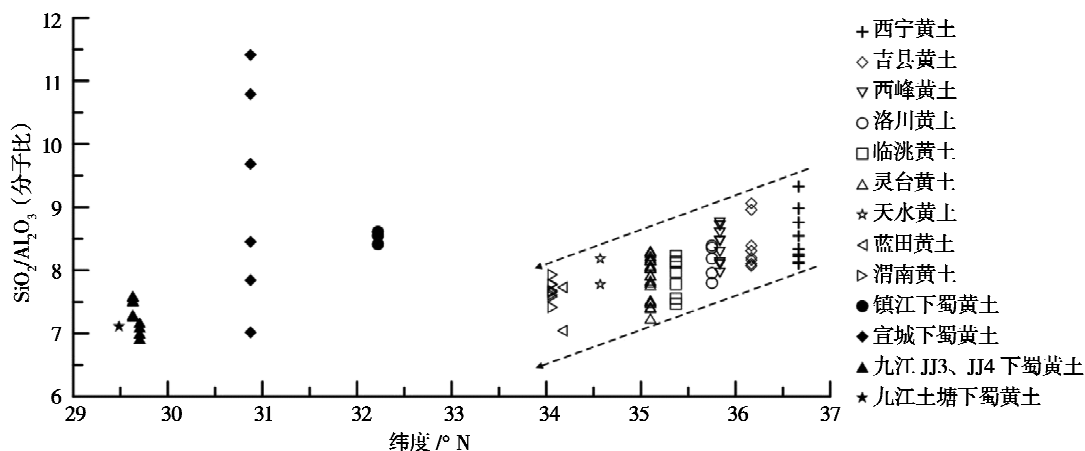


图2 末次间冰期以来北方黄土和南方下蜀黄土 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值随纬度的变化

(数据来源:西宁、吉县和西峰黄土^[40];洛川黄土^[41-42];临洮黄土据本文;灵台黄土^[43-44];天水、蓝田黄土^[39];渭南黄土^[37];镇江下蜀黄土^[36];宣城下蜀黄土^[38];九江 JJ3、JJ4 下蜀黄土^[26];九江土塘下蜀黄土^[24])

Fig. 2 Variations in $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios plotted against latitude for last interglacial bulk samples of the Xiashu loess from southern China and loess-paleosol sequences on the Chinese Loess Plateau

2.3 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解

微量元素^[19]、Sm-Nd 同位素^[19]、Sr-Nd 同位素比值^[20]、碎屑锆石 U-Pb 年龄谱^[8]等证据表明下蜀黄土为近源沉积,主要源区为长江中下游地区。这一认识对于理解末次冰期亚洲冬季风的搬运能力和长江中下游地区的古环境变化具有重要意义。

元素地球化学手段常被用于沉积物的物源示踪。Ti 和 Al 在水中的溶解度最小^[45]。 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值可以用来反映风成沉积和河流沉积对于地中海钻孔 (ODP 967) 沉积的物质贡献^[46]。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值的大小主要由源区物质的组成决定,受粒级分异的影响小,是反映源区物质组成的代用指标^[43]。Fe、Al 是表生地球化学过程中的稳定元素,在风化过程中不易从沉积物中迁出^[43], $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值指示了风成沉积的原始

化学成分,从而可以用于沉积物的物源示踪研究^[47]。

北方黄土和下蜀黄土中 $<20 \mu\text{m}$ 和全岩组分的 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解显示二者能够很好地被区分开来,从而表明它们的源区可能不同^[7]。北方黄土和南方下蜀黄土及长江沉积物的 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图 3a)显示,下蜀黄土与北方黄土不同。下蜀黄土与长江沉积物的 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值基本一致。下蜀黄土的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值比长江沉积物的低(图 3),可能与下蜀黄土在沉积后期受亚热带温湿气候条件影响发生较强的化学风化导致 K 元素亏损有关。

北方黄土和南方下蜀黄土及长江沉积物的 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图 3b)显示,下蜀黄土与北方黄土不同。各类沉积物的 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值为下蜀黄土与北方黄土源区不同的结论提供了进一步的证据^[7]。

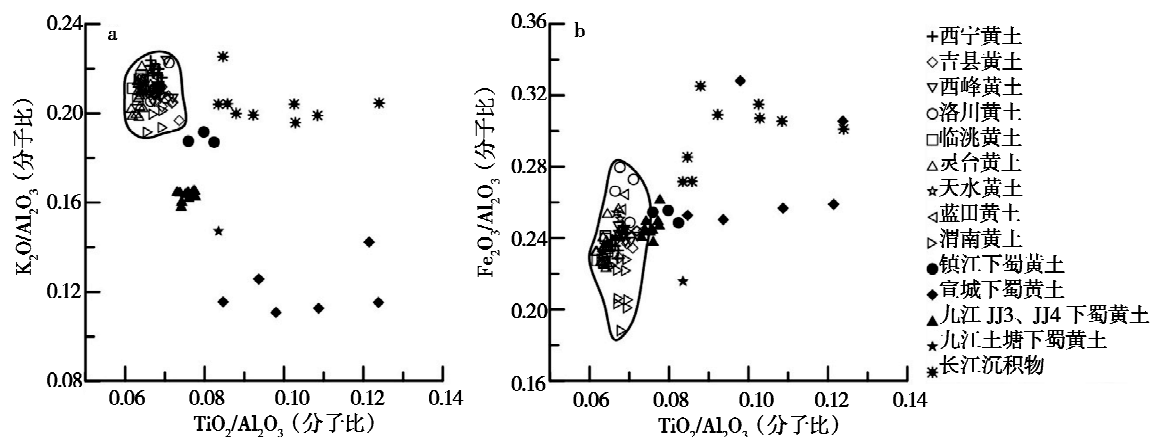


图 3 各类沉积的 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(a)和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(b)

(数据来源:长江沉积物^[24-25,48-51],其它沉积物的数据来源同图 3)

Fig. 3 Plots of $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (a) and $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) for different kinds of sediments

3 结 论

1) 九江下蜀黄土具有较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 含量和较低的 CaO 、 MgO 含量,可能与源岩的物质成分以及沉积区域较温湿的气候导致较强的化学风化作用有关。

2) 末次间冰期以来,在空间上,下蜀黄土的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值没有表现出北方黄土的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值随纬度降低而减小的规律性特点,指示了下蜀黄土与北方黄土的来源可能不同。

3) $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解显示下蜀黄土与北方黄土存在显著差异,支持下蜀黄土与北方黄土源区不同的认识^[7-8,19-20]。

致谢:上海大学胡雪峰教授、中国科学院青海盐湖研究所刘向军副研究员共同参与了野外工作,王德荣高级实验师帮助测定了样品的元素含量,审稿专家对本文提出了建设性修改意见,特致谢忱!

参考文献:

- [1] 赵其国,杨浩. 中国南方红土与第四纪环境变迁的初步研究[J]. 第四纪研究,1995,(2):107-116.
- [2] 杨达源. 中国东部的第四纪风尘堆积与季风变迁[J]. 第四纪研究,1991,11(4):354-360.
- [3] 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.

- [4] 邵家骥. 长江下游第四纪下蜀黄土的成因探讨[J]. 中国区域地质,1988,(4):312-319.
- [5] 李徐生,鹿化煜. 镇江下蜀黄土粒度特征及其成因初探[J]. 海洋地质与第四纪地质,2001,21(1):25-32.
- [6] Hu X F, Du Y, Liu X J, et al. Polyedogenic case of loess overlying red clay as a response to the Last Glacial - Interglacial cycle in mid-subtropical Southeast China [J]. Aeolian Research, 2015, 16: 125-142.
- [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 (23-24): 3317-3326.
- [8] Liu F, Li G J, Chen J. U-Pb ages of zircon grains reveal a proximal dust source of the Xiashu loess, Lower Yangtze River region, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59 (20): 2391-2395.
- [9] 李徐生,杨达源. S_2 以来下蜀黄土沉积序列磁化率记录与深海氧同位素记录的对比[J]. 南京大学学报:自然科学版,2001,37(6):766-772.
- [10] Zhang W G, Yu L Z, Lu M, et al. East Asian summer monsoon intensity inferred from iron oxide mineralogy in the Xiashu Loess in southern China [J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(3):345-353.
- [11] Zhang Q, Zhu C, Jiang T, et al. Mid-Pleistocene environmental reconstruction based on Xiashu loess deposits in the Yangtze Delta, China [J]. Quaternary International, 2005, 135 (1): 131-137.
- [12] Guan H C, Zhu C, Zhu T X, 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.

- [13] 吴标云. 南京下蜀黄土沉积特征研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(2): 113–121.
- [14] 黄姜依, 方家骅, 邵家骥, 等. 南京下蜀黄土沉积时代的研究[J]. 地质论评, 1988, 34(3): 240–247.
- [15] 蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 等. 九江地区网纹红土的时代[J]. 地质力学学报, 1997, 3(4): 27–32.
- [16] 刘东生等. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [17] 王爱萍, 杨守业, 李从先. 南京地区下蜀土元素地球化学特征及物源判别[J]. 同济大学学报, 2001, 29(6): 657–661.
- [18] 李徐生, 韩志勇, 杨达源, 等. 镇江下蜀黄土的稀土元素地球化学特征研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 1–7.
- [19] 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 (3–4): 513–523.
- [20] Hong H L, Wang C W, Zeng K F, *et al.* Geochemical constraints on provenance of the mid-Pleistocene red earth sediments in subtropical China[J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 290: 97–108.
- [21] Hu X F, Zhu Y, Shen M N. Grain-size evidence for multiple origins of the reticulate red clay in southern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(9): 910–918.
- [22] 张明强, 朱丽东, 姜永见, 等. 九江 JL 红土剖面记录的中更新世气候转型事件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(6): 115–123.
- [23] Hong H L, Gu Y S, Yin K, *et al.* Clay record of climate change since the mid - Pleistocene in Jiujiang, south China[J]. *Boreas*, 2013, 42(1): 173–183.
- [24] 凌超豪, 龙进, 贾玉连, 等. 赣北鄱阳湖地区土塘剖面第四纪红土地球化学特征及古气候意义[J]. 古地理学报, 2015, 17(5): 699–708.
- [25] 龙进, 贾玉连, 张智, 等. 末次冰期以来鄱阳湖东北缘下蜀黄土常量元素地球化学特征及其物源指示[J]. 沉积学报, 2015, 33(5): 932–940.
- [26] 曾方明. 九江下蜀黄土—红土的化学风化特征[J]. 盐湖研究, 2018, 26(1): 32–38.
- [27] McLennan S M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2001, 2: 154–155.
- [28] Gao S, Luo T C, Zhang B R, *et al.* Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62 (11): 1959–1975.
- [29] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [30] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299 (5885): 715–717.
- [31] Liu T S, Ding Z L. Chinese loess and the paleomonsoon[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1998, 26(1): 111–145.
- [32] Yang S L, Ding Z L. Advance - retreat history of the East-Asian summer monsoon rainfall belt over northern China during the last two glacial - interglacial cycles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 274(3): 499–510.
- [33] Peng S Z, Guo Z T. Geochemical indicator of original eolian grain size and implications on winter monsoon evolution[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44: 261–266.
- [34] Chen J, Li G J, Yang J D, *et al.* Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: Implications for the provenances of Asian dust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(15): 3904–3914.
- [35] 曾方明, 向树元, 刘向军, 等. 黄土高原风尘堆积物源研究进展[J]. 地球科学, 2014, 39(2): 125–140.
- [36] 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.
- [37] 刁桂仪, 文启忠. 黄土风化成土过程中主要元素迁移序列[J]. 地质地球化学, 1999, 27(1): 21–26.
- [38] 李徐生, 杨达源, 鹿化煜. 皖南风尘堆积序列氧化物地球化学特征与古气候记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(4): 75–82.
- [39] 汪海斌, 于英鹏, 刘现彬, 等. 黄土高原 S₁ 古土壤的地球化学特征及其对物源的指示[J]. 第四纪研究, 2011, 31(2): 338–346.
- [40] Jahn B, Gallet S, Han J. Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China: eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka[J]. *Chemical Geology*, 2001, 178: 71–94.
- [41] Chen J, Ji J F, Qiu G, *et al.* Geochemical studies on the intensity of chemical weathering in Luochuan loess-paleosol sequence, China[J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 41(3): 235–241.
- [42] Gallet S, Jahn B, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications[J]. *Chemical Geology*, 1996, 133: 67–88.
- [43] 顾兆炎. 中国北方风成堆积的风化作用与环境变迁—U—Th、¹⁰Be 及元素地球化学的研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1999.
- [44] 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.
- [45] Sugitani K, Horiuchi Y, Adachi M, *et al.* Anomalously low Al₂O₃/TiO₂ values for Archean cherts from the Pilbara Block, Western Australia—possible evidence for extensive chemical weathering on the early earth[J]. *Precambrian Research*, 1996, 80(1–2): 49–76.
- [46] Larrasoana J, Roberts A, Rohling E, *et al.* Three million years of monsoon variability over the northern Sahara[J]. *Climate Dynamics*, 2003, 21(7–8): 689–698.
- [47] 程燕, 张小曳, 鹿化煜, 等. 最近 140 ka 以来黄土元素地球化学演化及其古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质,

- 2003, 23(3): 103–108.
- [48] Yang S Y, Li C X, Zhao Q H, *et al.* Element geochemistry of Holocene sediment and paleoenvironmental change in the Changjiang Estuary[J]. Science in China (Series B), 2001, 44(1): 40–46.
- [49] 杨守业, Jung H S, 李从先, 等. 黄河, 长江与韩国 Keum, Yeongsan 江沉积物常量元素地球化学特征[J]. 地球化学, 2004, 33(1): 99–105.
- [50] 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 19–26.
- [51] 黄湘通, 郑洪波, 杨守业, 等. 长江三角洲 DY03 孔沉积物元素地球化学及其物源示踪意义[J]. 第四纪研究, 2009, 29(2): 299–307.

Element Compositions of Xiashu Loess in Jiujiang and Its Implication for Provenance Tracing

ZENG Fang-ming^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;
2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining, 810008, China)

Abstract: This study presents the major element compositions of Xiashu loess in Jiujiang, Jiangxi Province, and loess deposited since the late Pleistocene at Lintao, Gansu Province. The results are compared with element compositions of the other loess deposits deposited since the last interglacial on Chinese Loess Plateau, Xiashu loess at other sites and fluvial sediments in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The aim of this work is to discuss the source area of the Xiashu loess in Jiujiang. The conclusions are drawn as follows: (1) Elements of Xiashu loess in Jiujiang are dominated by SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 oxides. Compared to major elements in loess at Lintao section, Xiashu loess in Jiujiang has higher contents of SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , and lower contents of CaO , MgO . (2) On the space, there is a significant rule in loess on Chinese Loess Plateau since the last interglacial: the higher latitude, the higher $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ values in sediments. However, this rule does not appear in the Xiashu loess in southern China, implicating that the Xiashu loess is probably not from the inland deserts in northern China or Chinese Loess Plateau. (3) Plots of $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ show that obvious difference existed between Xiashu loess in southern China and loess in northern China. The result further indicates that the main source area of the Xiashu loess in southern China and loess deposits on the Chinese Loess Plateau is probably different.

Key words: Middle and lower reaches of the Yangtze River; Xiashu loess; Element geochemistry; Provenance tracing

封面图片: 浪错

浪错, 位于西藏自治区日喀则昂仁县东南部, 雅鲁藏布江北岸, 地理坐标 $29^{\circ}11'28'' \sim 29^{\circ}12'40''\text{N}$, $87^{\circ}22'16'' \sim 87^{\circ}25'15''\text{E}$; 219 新藏线自湖北岸经过, 交通便利。湖盆四面环山, 海拔在 4 500 ~ 4 800 m 之间, 湖岸陡峭, 是发育于雅鲁藏布江断裂带上的构造湖。湖面海拔约 4 300 m, 长轴呈东西向展布, 长约 6 900 m, 最大宽度 2 300 m, 湖水面积约 12 km^2 。湖区受高原大陆性气候控制, 降水稀少, 寒冷干旱, 植被覆盖度低, 仅在湖盆东西部次一级小凹陷内发育小面积的湿地草原。湖水主要靠降水所产生的季节性河流补给, 可以通过下游河道流入雅鲁藏布江, 为外流湖, 湖水较淡。

(中国科学院青海盐湖研究所 凌智永)