文章编号:1000-0550(2018)05-0927-10

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.065

# 青藏高原东部黄土沉积元素地球化学示踪

梁敏豪,杨胜利,成婷,李帅,刘楠楠,陈慧兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室,兰州 730000

摘 要 青藏高原东部广泛分布着典型黄土沉积,对气候变化有着敏感的响应。对青藏高原东部地区典型表土、黄土、古土壤以及砂样,进行系统的常量、微量元素组成分析,结果显示,高原东部黄土常量元素氧化物主要为  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 和  $CaO_3$ ,黄土中  $SiO_2$ 和  $CaO_3$  含量差别较大; Rb、Sr、Ba、Zr、V 含量占了微量元素含量的大部分,表土、黄土、古土壤微量元素含量差别不一。与高原东部的风沙沉积、黄土高原黄土、河西走廊黄土的对比结果表明,青藏高原东部黄土组分的常量元素之间的比值( $SiO_2/Al_2O_3$ 、 $TiO_2/Al_2O_3$ )、常量与微量元素之间的比值(Zr/Al, Zr/Ti)、常量元素三角图(Ca-Mg-K、Ca-Mg-Na)等与其他地区黄土有明显差异,而青藏高原东部黄土与高原表土沉积物及河流砂、风成砂样品比较接近。这些异同点指示青藏高原东部黄土与黄土高原黄土的物源不同; 其物源可能主要来自于青藏高原内部,高原内部的河流沉积物、冰碛物等粉尘物质可能为青藏高原东部黄土的主要物源。

关键词 青藏高原;黄土物源;元素地球化学

第一作者简介 梁敏豪,男,1994年出生,硕士,自然地理学,E-mail: liangmh15@lzu.edu.cn

通信作者 杨胜利,男,副教授,E-mail: shlyang@lzu.edu.cn

中图分类号 P59 文献标志码 A

### 0 引言

在第四纪环境变化研究中,黄土是重要的古环境记录的载体。青藏高原东部及其邻区广泛分布着不同时期的黄土—古土壤序列,它们是高原东部良好的古环境信息记录<sup>[1-2]</sup>,对研究该区域的环境变化、青藏高原隆升、高原季风演化机制等具有重要意义。与黄土高原黄土相比,该区的黄土沉积研究非常薄弱,已有的研究主要对该区黄土地层<sup>[3-4]</sup>、形成年代<sup>[3,5-6]</sup>和环境意义等进行了探讨<sup>[7-8]</sup>,而关于青藏高原东部黄土的物质来源还存在很多争论。最近,通过锆石的U-Pb 定年技术进行的青藏高原和黄土高原物源示踪研究,发现青藏高原的北部<sup>[9]</sup>、东北部<sup>[10]</sup>为黄土高原的黄土提供了重要物源。石英砂表面和粒度组成特征的研究发现,分布于青藏高原东部与东北部的四川甘孜、理县、马尔康、若尔盖等地黄土在物源上可能与北方黄土高原黄土有所差别<sup>[11-13]</sup>。

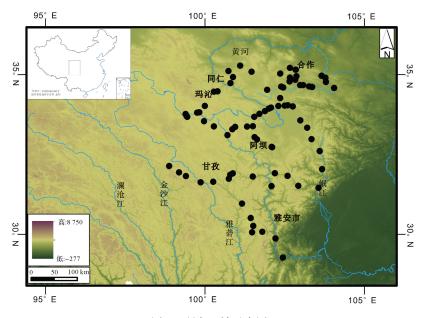
物源研究是探讨黄土沉积记录的古环境意义重要基础和前提。对青藏高原东部黄土的物源研究,不仅可以揭示黄土物源区古环境信息,深入理解高原黄土

古环境意义,而且对于探讨青藏高原古粉尘传输和扩散、古大气环流演化等具有重要意义。风尘堆积的地球化学特征与古气候变化以及物源有着密切联系<sup>[14-19]</sup>。迄今为止,青藏高原东部黄土的常量、微量元素的地球化学系统分析尚缺乏详细报道。本文通过对青藏高原东部地区大范围采集的表土、马兰黄土、古土壤样品以及沙样,进行详细的元素地球化学分析,并与黄土高原、河西走廊等地的代表性黄土剖面进行对比解析,探讨青藏高原东部黄土沉积的物质来源和环境意义,为高原东部黄土的物源研究提供关键证据。

## 1 材料和方法

#### 1.1 研究区概况和样品采集

青藏高原东部地区包括川西高原、青海东部地区、甘南高原等地,大致位于97°~103°E,25°~37°N,平均海拔约为2500~4000m(图1)。该区域地势西高东低,西部为青藏高原腹地,东邻四川盆地。黄土在该地区广泛分布,主要集中于断陷盆地、山麓面和河流阶地上;黄土厚度从1米到几十米不等。研究区属高原季风气候区,夏季暖湿,冬季干冷,年降水



研究区域示意图

Fig.1 Schematic map of the study area

量约为 600~750 mm<sup>[20]</sup>。

黄土样品采集主要按马兰黄土、古土壤进行采 样,表土样包括黄土样品和部分高原内部表土,同时 采集了典型细粒河流沉积物样品和风成砂样品,沙样 主要用于与黄土样品对比,探究两者是否存在关联。 其中表土样品 146 个、黄土样品 57 个、古土壤样品 7 个、沙样13个。所有样品采集时,均尽量避开受人类 活动影响的地点。

#### 1.2 地球化学分析

地球化学元素测试在兰州大学西部环境教育部 重点实验室完成。进行元素测试前,我们利用干筛法 提取了样品中粒度小于 63 μm 的组分,具体步骤如 下:取30g左右自然风干的黄土样品,进行研磨,之 后将样品过筛,提取出粒度小于 63 µm 组分的样品。 元素测试前,称取4g(±0.01g)研磨好的黄土样品和 少量硼酸,充分混合后进行压片制饼,仪器显示重量 为 3.3×10<sup>4</sup> kg, 压力为 150 MPa; 之后使用 X 荧光光 谱仪 MagiX(PW2403)进行测量,元素测量范围为 Be-U,浓度范围为×10<sup>-6</sup>,测量精度从 0.1% ~0.3%。

本研究提取样品中粒度小于 63 μm 的组分,进 行常量和微量元素分析。主要基于以下原因:粒度分 析显示,该区黄土主要组分为粉砂;该组分属于经由 风力搬运的、主要以悬移的形式进行较长距离传输的 主要物质。如果青藏高原东部黄土物源与黄土高原或 者河西走廊黄土具有同源性,那么粒度小于 63 μm 的 粉砂组分才可能越过高山进行传输。本文主要选用了 末次冰期以来的黄土样品,虽然青藏高原东部黄土样 品的年代学与黄土高原、河西走廊等地黄土地层对比 需要进一步工作,但是在地球化学对比分析物源的研 究仍是可行的。

## 结果与讨论

#### 青藏高原东部黄土元素地球化学特征 2.1

#### 常量元素地球化学特征

青藏高原东部黄土常量元素含量特征(表1)显 示,SiO,含量约为 53.04%~73.81%,Al,O,含量约为 12.20%~19.16%, Fe, O, 含量约为 3.98%~7.48%, CaO 含量约为 0.27%~15.99%, 这四种常量元素氧化 物占据高原黄土常量元素氧化物大部分。从氧化物 中可以看出,青藏高原东部黄土中 SiO,和 CaO 含量 差别较大,青藏高原东部的降水条件优于黄土高原, 所以造成这种差异可能与源区物质成分组成或当地 的环境有关。高原东部黄土与上地壳(UCC)相比<sup>[23]</sup> (图 2), Na,O、K,O 和 P,O,相对亏损, MnO 和 TiO,相 对富集,而SiO,、Fe,O,和Al,O,与UCC则较为接近。 MgO 和 CaO 在不同样品中有较大差异,其中古土壤和 沙样呈现相反情况,即土壤样品的 MgO 和 CaO 相对于 上地壳(UCC)要富集,而沙样中两者显示亏损。相比 其他地区黄土,青藏高原东部黄土 CaO 和 MgO 偏低, Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以及 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>偏高,而 SiO<sub>2</sub>则较为接近。

#### 表 1 青藏高原东部黄土与河西走廊黄土[17]、黄土高原黄土[15,21-22]常量元素含量(wt%)

Table 1 Mean concentration (weight %) for major elements of the loess deposits from the eastern Tibetan Plateau,
Hexi Corridor and the Chinese Loess Plateau

氧化物 -	青藏高原东部				黄土高原				河西走廊
	L1(n=57)	Top(n = 146)	S(n=7)	Sand( $n = 13$ )	LC(n=14)	XF(n=10)	XN(n=10)	JZT(n=5)	HX(n=14)
SiO <sub>2</sub>	63.97	66.82	62.47	69.32	60.29	65.45	64.27	62.67	
$Al_2O_3$	14.55	15.16	14.91	14.78	12.86	13.31	12.76	13.12	10.64
CaO	8.09	4.60	8.74	2.80	6.24	8.53	10.19	9.88	7.11
$\mathrm{Fe_2O_3}$	5.37	5.73	5.62	5.52	4.97	5.04	4.76	5.32	_
$K_2O$	2.88	3.04	3.03	2.93	2.46	2.58	2.57	2.80	2.26
MgO	2.30	1.88	2.48	1.54	2.08	2.42	2.73	2.79	3.14
$Na_2O$	2.06	1.92	1.97	2.26	1.36	1.69	1.80	2.26	1.60
MnO	0.09	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	1.00
$P_2O_5$	0.08	0.11	0.08	0.11	0.16	0.17	0.16	0.18	1.00
${ m TiO}_2$	0.81	0.87	0.82	0.86	0.76	0.72	0.67	0.74	0.99

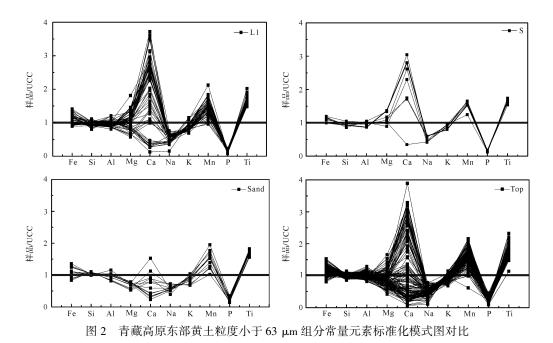


Fig.2 UCC-normalized for major elements in the loess deposits from the eastern Tibetan Plateau

#### 2.1.2 微量元素地球化学特征

表 2 为青藏高原东部黄土的微量元素含量,从表中可知,Rb、Sr、Ba、Zr、V含量占了微量元素含量的大部分。从青藏高原东部黄土的微量元素上看,四种样品 Ba、Co、Cu、Hf、Nb、Nd、Ni、Rb、Y、V元素含量差异不超过 10%,其他微量元素差异较大。相比其他地区黄土,从图 3 可以看出青藏高原东部黄土中大部分微量元素含量都较高。因为 Zr 元素赋存于锆石中,在风化成壤等作用下不易发生迁移,继承了母岩的特征,在不同物质来源的风成物中差异表现明显<sup>[14,24-25]</sup>,所以 Zr 元素含量变化最为明显。高原东部黄土 Sr 元素和 Pb 元素含量则低于其他地区,而

Ba元素则与其他地区相对持平。

#### 2.2 青藏高原东部黄土风化强度

#### 2.2.1 化学蚀变指数与 Na/K(摩尔比)

CIA 又称为化学蚀变指数,常作为反映化学风化强度的指标,其计算公式为<sup>[26]</sup>:CIA = [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO\*+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)]×100。式中 CaO\* 指的是存在于硅酸盐矿物中的 CaO。实验中样品测试结果包括了碳酸钙,所以这里采样 Nesbitt<sup>[26]</sup>的方法来求取 CIA 中 CaO\*, CIA 与长石矿物以及黏土矿物比值负相关,能作为硅酸盐矿物风化程度的良好指标<sup>[27]</sup>。Na/K 比值也是常作为判断风化程度的指标,其主要是用于衡量斜长石蚀变程度的指标。因为Na元素

表 2 青藏高原东部黄土与河西走廊黄土[17]、黄土高原黄土[15,21-22]微量元素含量(×10<sup>-6</sup>)

Table 2 Mean concentration ( $\times 10^{-6}$ ) for trace elements of the loess deposits from the eastern Tibetan Plateau, Hexi Corridor and the Chinese Loess Plateau

氧化物 -	青藏高原东部				黄土高原				河西走廊
	L1(n=57)	Top(n = 146)	S(n=7)	Sand( n = 13)	LC(n=14)	XF(n=10)	XN(n=10)	JZT( n = 5)	$\overline{\mathrm{HX}(n=14)}$
Ba	576.0	584.58	583.48	564.40	455.20	479.8	451.9	565.4	498.8
Ce	81.89	97.38	90.29	109.98	59.48	66.35	54.6	_	74.51
Co	16.35	16.37	16.44	14.61	_	_	_	11.7	12.81
$\operatorname{Cr}$	90.16	104.90	88.61	90.19	_	_	_	75	86.47
Cu	30.46	30.78	32.74	27.17	_	_	_	28.6	38.45
Hf	10.24	11.48	9.66	15.82	5.15	5.23	3.5	_	_
La	38.96	43.64	50.55	47.58	32.84	31.68	25.31	_	37.03
Nb	22.86	23.81	23.15	23.56	11.15	11.73	11.35	14.3	_
Nd	40.20	42.51	42.90	49.16	29.09	28.67	22.63	_	32.06
Ni	36.25	36.83	39.36	31.67	_	_	_	33.18	45.86
Pb	8.91	12.04	10.51	12.33	20.86	17.62	16.99	19.36	19.89
Rb	122.14	132.44	128.75	119.47	88	87.2	80.9	98.4	80.72
$\operatorname{Sr}$	250.82	201.34	263.48	186.33	161.71	197.5	268.5	261	220.08
Y	29.11	29.55	28.63	29.68	30.96	26.41	20.58	26.02	20.77
Zr	418.19	442.27	385.27	606.84	192.79	205.5	136.1	231.4	98.34
V	98.36	101.52	103.84	91.54	_	_	_	66.2	85.30

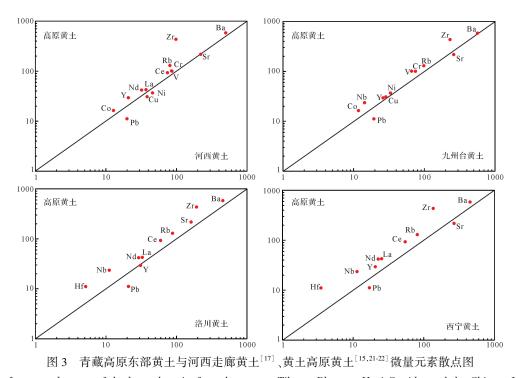


Fig. 3 Plots for trace elements of the loess deposits from the eastern Tibetan Plateau, Hexi Corridor and the Chinese Loess Plateau

一般赋存于斜长石中,K 元素则一般赋存于钾长石和 伊利石中。由于造岩矿物中斜长石相比钾长石更易 于风化,因而沉积物中 Na/K 比值(摩尔比)常与其风 化程度成反比[28]。

青藏高原东部黄土、表土、古土壤和沙样的 CIA 均值分别为 59.72、61.75、60.48 和 59.12、洛川剖面、 九州台剖面、西峰剖面、西宁剖面和河西剖面黄土的 CIA 均值分别为 64.19、55.64、61.45、59.39 和 66.03。 一般来说,CIA 处于 50~65,说明当时处于寒冷干燥 的气候,指示低等化学风化强度;CIA 处于 65~85,说 明当时处于温暖湿润的气候,指示中等化学风化强 度;CIA 处于 85~100,说明当时处于炎热潮湿的气 候,指示强烈风化强度。根据 Taylor 的研究结果,未风化的上部陆壳(UCC)的 CIA 大致为 47.9,黄土的CIA 为 57.97~63.31<sup>[29]</sup>。CIA 值一般与风化强度成正比,而 Na/K 值一般与风化强度成反比。从 CIA 均值比较可以明显看出,青藏高原东部的样品比其他地区黄土 CIA 值较低。从图 4 可以明显看出,青藏高原东部的样品主要处于低等风化强度阶段,只有表土样品较多处于中等风化强度阶段,黄土样品较多分布于CIA 值低的位置,说明当地的环境可能会对风化强度造成一定的影响。此外,CIA 值与 Na/K 比值呈明显的负相关,这与前人的研究结果一致<sup>[14,27]</sup>。

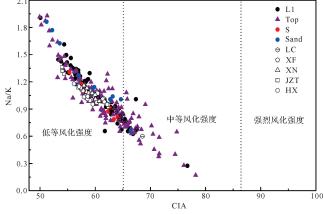


图 4 青藏高原东部黄土与河西走廊黄土<sup>[17]</sup>、黄土高原 黄土<sup>[15,21-22]</sup>化学蚀变指数(CIA)与 Na/K 比值关系散点图 Fig.4 Scatter plots for CIA vs. Na/K Molar Ratio of the loess deposits from the eastern Tibetan Plateau, Hexi Corridor region and the Chinese Loess Plateau

### 2.2.2 A-CN-K 三角模型图

A-CN-K 三角模型图也可以反映剖面地层的化 学风化趋势, 其中 A 代表 Al, O3, CN 代表 CaO\*+ Na,O,K代表 K,O。在模型图中样品所处的位置可 以代表其所受风化强度的强弱,同时可以反映样品大 致经历了哪种风化过程[30]。根据青藏高原东部样品 的分析结果在 A-CN-K 三角图上的投点情况,所有样 品均分布在 Pl-Ks 基线之上,大致与 A-CN 线平行,靠 近斜长石一侧,这表明剖面经历了斜长石的脱 Na 的 风化过程,而钾长石几乎没有变化(说明没达到能使 钾长石风化的强度)。只有几个样品分布在 Sm-IL 基 线之上,而且表土样品明显比其他样品受到了更为强 烈的化学风化作用(图5)。研究表明,沉积物的风化 强度主要与母岩成分、地形条件和气候条件等密切相 关,A-CN-K与CIA、Na/K指标一样,受到以上因素共 同影响,是沉积物原始成分和沉积后风化作用的综合 反映。通过 DEM 图(图 1)以及采样记录,地形条件 是有所差别的,北部为较为平坦的高原地区,而南部 为山地为主。综上所述,青藏高原东部黄土长石风化 主要表现为斜长石风化,影响斜长石风化的因素可能 包括母岩、地形和气候条件。

#### 2.3 青藏高原东部黄土物源示踪

常量元素 Ti、Si、Al 等在迁移过程中和沉积后不 易受化学风化等外界因素影响,迁移速率较低,可以 用于物源示踪。其中 Ti 主要存于金红石中,在不同 岩石中含量变化较大;Si主要存在于石英中,而石英

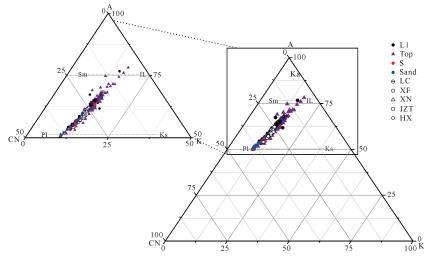


图 5 青藏高原东部黄土与河西走廊黄土 $^{[17]}$ 、黄土高原黄土 $^{[15,21-22]}$ A-CN-K 化学风化趋势图  $A=Al_2O_3$ ,  $C=CaO^*$ ,  $N=Na_2O$ ,  $K=K_2O$ , Pl=斜长石, Sm=蒙脱石, Ka=高岭石, IL=伊利石, Ks=钾长石

Fig.5 A-CN-K Ternary Diagram of the loess deposits from the eastern Tibetan Plateau and Hexi Corridor region and the Chinese Loess Plateau

不易受到风化作用等影响,不易发生迁移;Al 主要赋 存于长石、云母、辉石等铝硅酸盐矿物中,并在水中难 以被溶解,在不同岩石中含量较为稳定[31]。前人研 究表明, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与风尘粒度密切相关[30],而 TiO<sub>3</sub>/Al<sub>3</sub>O<sub>3</sub>在不同的风尘粒级有很好的一致性,受风 化作用影响很小,可作为风尘物源的重要指标[31-32]。 本文使用了常量元素 Ti、Si、Al 之间的比值共同示踪 物源(图 6a,b)。图中显示青藏高原东部样品 TiO,/ Al,O,比值较为分散,但黄土与表土、河床砂、风成砂 之间无明显分区特征,约在 0.045~0.075 之间,而其 他地区黄土 TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值分布较为集中,约在 0.050~0.060 之间。青藏高原东部样品 SiO,/Al,O,比 值主要分布于60~85之间,河床砂、风成砂、表土样 与黄土样无明显差异,而其他地区黄土 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比 值分布于85~105之间。常量元素散点图清晰指示 了青藏高原东部黄土与其他地区黄土物源的显著不 同,而代表青藏高原内部样品的河流沉积物与风成沙 以及表土和黄土相比无显著差别,指示了高原东部黄 土和高原内部物质可能具有同源性。

微量元素 Nb、Zr、Hf、La、Y等主要继承了母岩的特点,这些元素之间的比值在不同类型岩石中都有较大的区别,可用于物源示踪<sup>[33-34]</sup>。 Zr 和 Hf 富存于锆石中,不同类型岩石或沉积物中 Zr/ Hf 比值不

同[24-25]。常量元素和微量元素之间的比值具有物源 指示意义,在黄土沉积的物源示踪中得到了广泛应 用<sup>[35-36]</sup>。本文微量元素散点图(图 6c,d)可以大致区 分青藏高原东部黄土和其他地区黄土。青藏高原东 部黄土 Zr/Al 比值约为 15~50, 黄土与表土、河床砂、 风成砂没有明显分区特征,而其他地区黄土 Zr/Al 比 值约为 5~20, 高原东部黄土 Zr/Al 比值明显高于其 他地区黄土;高原东部黄土 Zr/Ti 比值约为 5~15,黄 土与表土、河床砂、风成砂无明显分区,其他地区黄土 Zr/Ti 比值约为 1~4, 高原东部黄土 Zr/Ti 比值明显 高于其他地区黄土,而 Y/Al 比值比较接近。微量元 素和常量元素比值散点图表明了青藏高原东部黄土 与其他地区黄土在 Zr、Ti 元素上区别较大,而在 Al、Y 元素上区别较小,指示了青藏高原东部黄土与其他地 区黄土物源的不同,而高原东部黄土样和河床砂、风 成砂、表土的总体特征近似,说明两者可能具有同 源性。

剖面物源的差异可以在微量元素和常量元素的 三角图中显示,如 Olivarez et al. [37] 利用 La-Th-Sc 探 究了太平洋中深海沉积物的物源。同样的,常量元素 也可以作为物源的良好指示物,如 Zimbelman et al. [38] 成功利用常量元素氧化物区分了风成物质, Ren et al. [39] 也利用常量元素三角图对民勤地区沙源

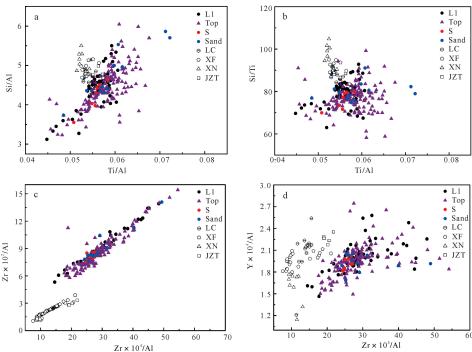
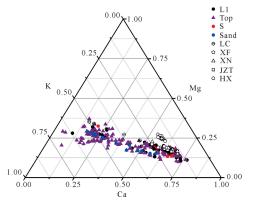


图 6 青藏高原东部黄土与河西走廊黄土<sup>[17]</sup>、黄土高原黄土<sup>[15,21-22]</sup>常量元素、常量和微量元素间散点图 Fig.6 Scatter plots for major element ratios and trace vs. major element ratios of the loess deposits from the eastern

和传输路径进行了探究。Al 主要存在于云母、长石、辉石等铝硅酸盐矿物中,在不同类别岩石中含量比较固定,并且沉积后受到化学风化影响较小,不易发生迁移<sup>[28]</sup>。K 主要赋存于钾长石中,在不同矿物的含量有比较明显的变化<sup>[40]</sup>,而 Na 主要赋存于斜长石中,容易受风化作用的影响。利用常量元素之间关系绘制出的三角图能表现出一定的空间分布关系,从而能运用于物源示踪<sup>[39]</sup>。常量元素三角图(图7)显示出青藏高原东部黄土与黄土高原的洛川、西宁、兰州黄土,以及河西走廊地区的黄土元素特征明显不同:青藏高原东部表土、黄土、古土壤和河流沉积物、风成砂等样品分布在同一区域,在三角图中清晰的表现出了青藏高原黄土 K、Na 元素含量高于,Ca 元素含量低于其他地区黄土的特点。

常量元素与微量元素物源示踪分析,揭示了青藏高原东部黄土与黄土高原、河西走廊地区黄土物源不同,而青藏高原东部黄土与沙样、表土物源可能相同,指示了高原东部黄土不可能主要来自西北干旱区,而可能来自高原内部的特点。这与早期研究基本一致,如方小敏等<sup>[41]</sup>通过稀土元素分析得出高原上的黄土可能主要为冰缘、冰碛物风化物所进行补给的黄土;川西地区4个黄土剖面地球化学元素和矿物成分的一致性对应粉尘经历了一定的混合,其物源主要来自较远的青藏高原西部地区<sup>[7]</sup>。

黄土的主要成分为粉砂物质(2~63 μm),黄土堆积有两个重要前提,其一是存在粉尘源区。Pye<sup>[42]</sup>研究认为粉尘物质可以在冰川、河流、沙漠和高山等形成过程中,通过冰川磨蚀作用、风的磨蚀作用、流水作用等将岩石细化磨碎形成。研究区毗邻青藏高原内部,靠近澜沧江和金沙江,高原内部的冰川作用和流水作用都可能为研究区提供粉尘物质。在冰期,河



流水量减少、冰川作用加强导致沉积物更多出露在表面,提供了大量物源粉尘。青藏高原内部存在许多冰川,在冰川搬运、磨蚀等作用下形成的冰碛物同样可能为粉尘物质来源。从青藏高原东部样品地球化学特征可以看出,高原黄土样品与河床沙、风成沙样品、表土样品分布在同一区域,与其他地区黄土有差异,而两者并无明显分区差异,这说明两者可能具有同源性,该数据结果也论证了本文上述的推测。此外,对现代沙尘暴气候学和天气动力学研究表明青藏高原可能自身为重要粉尘源区[43-44]。青藏高原东部地区的细粒粉尘物源可能来自羌塘地区和长江、黄河源区,因为它们是青藏高原上尘暴高发的两个重要源区[45]。

黄土堆积的另一个重要前提是有足够的风动力<sup>[20]</sup>。青藏高原在冬季或冰期时,高处的冰川形成一个冷高压,使周围的大气由冰川向四周运动,形成反气旋型环流<sup>[3,46]</sup>,而这种环流很可能是高原东部黄土形成的重要风动力。

青藏高原东部黄土的潜在物源主要有两个:西北荒漠远源粉尘<sup>[21,47]</sup>和青藏高原内部沉积物<sup>[7,41]</sup>。本文地球化学元素比值示踪证据与前人的研究均显示,青藏高原东部黄土和黄土高原、河西走廊黄土物源的不同,高原黄土物源不可能来自于西北荒漠远源粉尘;同时,青藏高原东北部山地海拔较高(均高于2500 m),对低空环流带来的西北、北部粉尘进行了有效的阻隔。这些证据都排除了西北荒漠区等地远源粉尘为青藏高原东部黄土主要物源的可能。虽然部分采样点可能会靠近沙漠地区,尘暴等可能会携带部分西北粉尘,但本研究分析结果并未显示出与黄土高原黄土有类似的化学特征,说明西北荒漠区的粉尘物质并非青藏高原黄土的主要物源。青藏高原东部

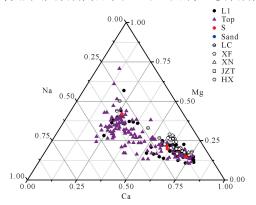


图 7 青藏高原东部黄土与河西走廊黄土[17]、黄土高原黄土[15,22-22] Ca-Mg-K、Ca-Mg-Na 三角图

Fig. 7 Ternary plots for Ca-Mg-K, Ca-Mg-Na of the loess deposits from the eastern Tibetan Plateau, the Hexi Corridor and the Chinese Loess Plateau

部样品地球化学特征显示,青藏高原东部黄土与内部河床砂、风成砂以及表土在元素比值上没有明显差异;同时,高原内部的冰川、流水作用带来的物质为青藏高原东部提供了大量物源。结合前人对高原黄土物源和风动力的研究,推测高原东部黄土主要来自于为青藏高原内部的沉积物。

### 3 结论

通过对青藏高原东部黄土常量和微量元素地球化学特征的分析,本研究主要得出以下初步结论:

- (1) 青藏高原东部黄土 SiO<sub>2</sub>含量约为 53.04%~73.81%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量约为 12.20%~19.16%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量约为 3.98%~7.48%,CaO 含量约为 0.27%~15.99%,这四种常量元素氧化物占据高原黄土常量元素氧化物大部分。青藏高原东部黄土的微量元素含量,四种样品 Ba、Co、Cu、Hf、Nb、Nd、Ni、Rb、Y、V 元素含量差异不超过 10%,其他微量元素差异较大。青藏高原东部黄土样品主要处于低等风化强度,部分处于中等风化强度,长石风化主要表现为斜长石风化。
- (2) 与其他地区黄土相比,青藏高原东部黄土 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Zr/Al 和 Zr/Ti 比值有明显差异,显示出青藏高原黄土与其他地区黄土差异。Ca-Mg-K、Ca-Mg-Na 三角图等同样显示出青藏高原黄土与其他地区黄土的物源具有明显的差异,表明青藏高原东部黄土与黄土高原黄土存在明显差异,西北内陆荒漠区不是其主要源区。
- (3) 在常量元素和微量元素的散点图、三角图中,青藏高原东部黄土与河流沉积物、风成沙与青藏高原内部表土未表现出有明显的特征差异,前人研究结论也显示青藏高原内部可能为东部提供了物质来源,本文认为青藏高原内部的冰川活动、干旱化过程产生的大量粉尘物质为青藏高原东部黄土的主要物源。

由于黄土物源研究的复杂性,在今后还需开展多方面工作如同位素示踪等。

#### 参考文献(References)

[1] 颜茂都,方小敏,陈诗越,等. 青藏高原更新世黄土磁化率和磁性地层与高原重大气候变化事件[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2001,31(增刊1):182-186. [Yan Maodu, Fang Xiaomin, Chen Shiyue, et al. Pleistocene magnetic susceptibility and paleomagnetism of the Tibetan loess and its implications on large climatic change events [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2001, 31(Suppl.1): 182-186.]

- [2] Yang S L, Fang X M, Yan M D, et al. Grain size profiles in the Chengdu Clay, eastern margin of the Tibetan Plateau: Implications for significant drying of Asia since ~500 ka B.P.[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 38(1/2): 57-64.
- [3] 王书兵,蒋复初,田国强,等. 四川金川黄土地层[J]. 地球学报, 2005,26(4):355-358. [Wang Shubing, Jiang Fuchu, Tian Guoqiang, et al. The Jinchuan loess stratigraphy in Western Sichuan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(4):355-358.]
- [4] 乔彦松,刘冬雁,李朝柱,等. 川西甘孜地区黄土的磁性地层学研究[J]. 地质力学学报,2007,13(4);289-296. [Qiao Yansong, Liu Dongyan, Li Chaozhu, et al. Magnetostratigraphy of a loess-soil sequence in the Garze area, Western sichuan[J]. Journal of Geomechanics, 2007, 13(4);289-296.]
- [5] 陈富斌,高生淮,陈继良,等. 甘孜黄土剖面磁性地层初步研究 [J]. 科学通报,1990,35(20):1600. [Chen Fubin, Gao Shenghuai, Chen Jiliang, et al. A study on the magnetostratigraphy of the loess section of Garz[J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(20): 1600.]
- [6] 乔彦松,赵志中,王燕,等. 川西甘孜黄土磁性地层学研究及其古气候意义[J]. 第四纪研究,2006,26(2):250-256. [Qiao Yansong, Zhao Zhizhong, Wang Yan, et al. Magnetostratigraphy and its paleoclimatic significance of a loess-soil sequence from Ganzi Area, West Sichuan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(2): 250-256.]
- [7] 王建民,潘保田. 青藏高原东部黄土沉积的基本特征及其环境 [J]. 中国沙漠,1997,17(4):395-402. [Wang Jianmin, Pan Baotian. Loess deposit in eastern part of Qinghai-Xizang Plateau: its characteristics and environment [J]. Journal of Desert Research, 1997, 17(4):395-402.]
- [8] 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[J]. 科学通报,2010,55(3): 255-260. [Qiao Yansong, Zhao Zhizhong, Wang Yan, et al. Variations of geochemical compositions and the paleo-climatic significance of a loess-soil sequence from Garzê County of western Sichuan province, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(24): 4697-4703.]
- [9] Pullen A, Kapp P, McCallister AT, et al. Qaidam Basin and northern Tibetan Plateau as dust sources for the Chinese Loess Plateau and paleoclimatic implications[J]. Geology, 2011, 39(11): 1031-1034.
- [10] Nie J S, Stevens T, Rittner M, et al. Loess Plateau storage of Northeastern Tibetan Plateau-derived Yellow River sediment [J]. Nature Communication, 2015, 6(1): 8511.
- [11] 方小敏,陈富斌,施雅风,等. 甘孜黄土与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 the evolution of the cryosphere on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(20):1865-1867.]
- [12] 王运生,李永昭,向芳. 川西高原甘孜黄土的成因[J]. 地质力学学报,2003,9(1):91-96. [Wang Yunsheng, Li Yongzhao, Xiang Fang. The Ganzi loess origin in the west Sichuan Plateau

- [J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9(1): 91-96.
- [13] 盛海洋. 青藏高原东北缘若尔盖盆地黄土的成因[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2010,35(1):62-74. [Sheng Haiyang. Zoigê Basin loess origin in the northeast Tibet Plateau[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(1):62-74.]
- [14] 李楠, 郝青振, 张绪教, 等. 东秦岭黄土物源的常量元素和微量元素地球化学证据[J]. 第四纪研究, 2016, 36(2): 332-346. [Li Nan, Hao Qingzhen, Zhang Xujiao, et al. Geochemical evidence for the provenance of loess deposits in the eastern Qinling Mountains, central China [J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(2): 332-346.]
- [15] Gallet S, Jahn B M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications [J]. Chemical Geology, 1996, 133(1/2/3/4): 67-68.
- [16] 陈骏. 新世纪亚洲风尘系统地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2012,31(5):433-446. [Chen Jun. Progress of Aeolian sediments and dust geochemistry in Asia in the new century [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(5):433-446.]
- [17] Schettler G, Romer R L, Qiang M R, et al. Size-dependent geochemical signatures of Holocene loess deposits from the Hexi Corridor (China) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(2): 103-136.
- [18] 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[J]. 沉积学报,2014,32(1):78-84. [Zhang Yufen, Shao Lei, Xiong Deqiang. Elemental compositions of the "Wushan Loess": implications for origin and sediment source[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1):78-84.]
- [19] 文星跃,唐亚,黄成敏,等. 青藏高原东缘风成黄土的多源性: 以九寨沟黄土为例[J]. 山地学报,2014,32(5):603-614. [Wen Xingyue, Tang Ya, Huang Chengmin, et al. Multi-material source of loess deposits from the Jiuzhaigou national nature reserve on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Mountain Research, 2014, 32(5):603-614.]
- [20] 欧先交,曾兰华,周尚哲,等. 四川西部黄土沉积与环境演变研究综述[J]. 地球环境学报,2008,3(1):692-704. [Ou Xian-jiao, Zeng Lanhua, Zhou Shangzhe, et al. A review on research of loess and environmental change in West Sichuan Plateau of the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Earth Environment, 2008, 3(1):692-704.]
- [21] Jahn B M, Gallet S, Han J M. 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(1/2/3/4): 71-94.
- [22] 陈发虎,马海洲,张宇田,等. 兰州黄土地球化学特征及其意义[J]. 兰州大学学报(自然科学版),1990,26(4):154-162. [Chen Fahu, Ma Haizhou, Zhang Yutian, et al. The geochemical characteristics and its significance of Lanzhou Loess[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1990, 26(4): 154-166.]

- [23] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust; its composition and evolution [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1985; 1-312.
- [24] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1989, 21(1): 169-200.
- [25] Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems; evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1996, 123(3); 323-333.
- [26] 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.
- [27] 张智,贾玉连,彭学敏,等. 赣北鄱阳湖地区黄土元素地球化学特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(8):1125-1131. [Zhang Zhi, Jia Yulian, Peng Xuemin, et al. The study of chemical weathering intensity in North Poyang Lake Region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(8): 1125-1131.]
- [28] 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(11): 1659-1666.
- [29] Taylor S R, McLennan S M, McCulloch M T. Geochemistry of loess, continental crustal composition and crustal model ages [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47(11): 1897-1905.
- [30] Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M, et al. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies [J]. The Journal of Geology, 1996, 104(5): 525-542.
- [31] Sheldon N D, Tabor N J. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 95(1/2): 1-52.
- [32] Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y D, 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
- [33] Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust [J]. Chemical Geology, 2000, 165(3/4): 197-213.
- [34] Kahmann J A, Seaman III J, Driese III S G. Evaluating trace elements as paleoclimate indicators; multivariate statistical analysis of late mississippian pennington formation paleosols, Kentucky, U.S. A[J]. The Journal of Geology, 2008, 116(3); 254-268.
- [ 35 ] Muhs D R, Bettis III E A, Aleinikoff J N. Origin and paleoclimatic significance of late Quaternary loess in NEBRASKA: evidence from stratigraphy, chronology, sedimentology, and geochemistry [ J]. Geological Society of America Bulletin, 2008, 120(11/12): 1378-1407.
- [36] Grousset F E, Biscaye P E. Tracing dust sources and transport patterns using Sr, Nd and Pb isotopes[J]. Chemical Geology, 2005, 222(3/4): 149-167.

- [37] Olivarez A M, Owen R M, Rea D K. Geochemistry of eolian dust in Pacific pelagic sediments; implications for paleoclimatic interpretations [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55(8); 2047-2058.
- [38] Zimbelman J R, Willianms S H. Geochemical indicators of separate sources for eolian sands in the eastern Mojave desert, California, and western Arizona [J]. Geological Society of America Bulletin, 2002, 114(4); 490-496.
- [39] Ren X Z, Yang X P, Wang Z T, et al. Geochemical evidence of the sources of Aeolian sands and their transport pathways in the Minqin Oasis, northwestern China [J]. Quaternary International, 2014, 334-335; 165-178.
- [40] 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(14): 2919-2940.
- [41] 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 origin and provenance of Malan loess along the eastern margin of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its adjacent area [J]. Science in China Series B, Chemistry, Life Sciences & Earth Sciences, 1995, 24(5): 539-546.]
- [42] Pye K. Aeolian dust and dust deposits [M]. London; Academic Press, 1987; 198-265.
- [43] 韩永翔,奚晓霞,宋连春,等. 青藏高原沙尘及其可能的气候意

义[J]. 中国沙漠,2004,24(5):588-592. [Han Yongxiang, Xi Xiaoxia, Song Lianchun, et al. Spatio-temporal sand-dust distribution in Qinghai-Tibet Plateau and its climatic significance [J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(5):588-592.]

第36卷

- [44] 方小敏,韩永翔,马金辉,等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积:以 2003-03-04 拉萨沙尘天气过程为例[J]. 科学通报, 2004,49(11):1084-1090. [Fang Xiaomin, Han Yongxiang, Ma Jinhui, et al. Dust storms and loess accumulation on the Tibetan Plateau: A case study of dust event on 4 March 2003 in Lhasa[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(11): 1084-1090.]
- [45] Han Y X, Fang X M, Kang S C, et al. Shifts of dust source regions over central Asia and the Tibetan Plateau: connections with the Arctic oscillation and the westerly jet[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(10): 2358-2368.
- [46] 王安宇,王谦谦. 青藏高原大地形对冬季东亚大气环流的影响 [J]. 高原气象, 1985, 4(2): 109-120. [Wang Anyu, Wang Qianqian. The effects of the Qinghai-Xizang Plateau on the mean general circulation in East Asia in winter[J]. Plateau Meteorology, 1985, 4(2): 109-120.]
- [47] 汪海斌,陈发虎,张家武.黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义[J]. 中国沙漠,2002,22(1):21-26. [Wang Haibin, Chen Fahu, Zhang Jiawu. Environmental significance of grain size of loess-paleosol sequence in western part of Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 21-26.]

## Geochemical Evidence for the Provenance of Loess Deposits in the Eastern Tibetan Plateau

LIANG MinHao, YANG ShengLi, CHENG Ting, LI Shuai, LIU NanNan, CHEN Hui Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education) College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Typical loess deposits are widely distributed in the eastern Tibetan Plateau (ETP), which are sensitive to environmental change of the Plateau region. The geochemical analyses of the surface soil, loess, paleosol samples in the ETP, show that major elements of the loess are mainly SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaO, and the contents of the SiO<sub>2</sub> and CaO in loess vary largely. The contents of the Rb, Sr, Ba, Zr, V account mainly for the trace elemental composition of all samples, which have different characters among the surface soil, loess, paleosol. In comparison of major and trace elements of the loess with the ETP, the Chinese Loess Plateau(CLP) and the Hexi Corridor, the ratios between the major elemental oxides(SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), the element ratios(Zr/Al, Zr/Ti), and the major elemental ternary(Ca-Mg-K, Ca-Mg-Na) show that the ETP loess are distinctly different from other regions. While ETP loess and top soil, fluvial sand, aeolian sand samples have no obvious difference. These results may indicates that the loess in the ETP has different source region against with the loess in the CLP and the Hexi corridor. We infer that the interior dry land, river drainage basin and active glacials in the Tibetan Plateau may provide the most silt materials for the loess deposit in the ETP.

**Key words:** Tibetan Plateau; provenance of loess; element geochemistry