

青藏高原东缘风成黄土的多源性 ——以九寨沟黄土为例

文星跃¹, 唐亚², 黄成敏^{2*}, 贡波索郎³

(1. 绵阳师范学院生态安全与保护四川省重点实验室, 四川 绵阳 621000; 2. 四川大学环境科学与工程系, 四川 成都 610065;
3. 四川九寨沟自然保护区管理局, 四川 阿坝 623402)

摘 要: 黄土是研究环境变化的重要材料, 揭示其物源及成因有利于解译其蕴含的环境信息。分析位于青藏高原东缘的九寨沟自然保护区黄土地层的矿物组成、粒度、稀土和微量元素、石英砂表面形态, 进而探讨九寨沟黄土的物源及成因意义。结果表明: 研究区黄土属风成沉积物, 黄土物质既有来自邻近地区的冰缘沉积物, 也包含北方远源的风尘物, 具有多源性特征; 青藏高原东缘黄土与南缘黄土的物源明显不同, 揭示出青藏高原内部的冷高压对其边缘地带黄土沉积并无直接作用, 而局地的山谷风对黄土沉积可能贡献更大。因此, 利用青藏高原边缘地带的黄土研究环境变化需重视地形因素, 同时应加强多剖面的对比。此外, 稀土元素分配模式对黄土物源的指示意义具有不确定性。

关键词: 黄土沉积; 物源; 成因; 九寨沟自然保护区; 青藏高原东缘

中图分类号: P534.63; P642.13⁺1, P931.

文献标志码: A

青藏高原东缘的山原峡谷地带广泛分布早更新世晚期以来形成的黄土地层, 提取其隐含的环境信息对于认识区域气候环境差异性, 深入研究大气环流系统演化及其与青藏高原隆升之间的关系具有十分重要的意义^[1]。粒度组成及石英砂表面特征的研究发现, 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有别于北方黄土高原黄土, 属冰缘风成沉积^[2-7]。利用这些地区黄土地层揭示的古气候演变表现为自 1.15 Ma BP 以来区域气候整体上向冷干方向变化的历史^[1, 3, 6, 8-10]。位于青藏高原东缘的四川省九寨沟

国家级自然保护区荷叶山及沟口附近出露的黄土地层, 彭东等^[11]认为是冰碛物经冰水洪积而成, 而非风成产物, 这明显与邻区黄土的风成成因认识有别^[3-7]。在紧邻的岷江上游地区, 特别是茂县盆地、叠溪至小关子一带及杂谷脑河两岸阶地也常见黄土堆积, 其形成起始年代大约在 62 ka BP 左右^[12], 李承三等^[13]曾认为这些黄土是冰碛物经风力或流水搬运沉积所致。而在成都平原广泛分布的“成都粘土”, 早年被马溶之^[14]认为相当于北方马兰黄土, 最近有学者根据粒度和石英砂表面特征等分析, 证明了其风成成因^[15]及物质来源的近源性特点^[16]。然

收稿日期(Received date): 2014-01-14; 修回日期(Accepted): 2014-04-16。

基金项目(Foundation item): 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0379)、高等学校学科创新引智计划项目(B08037)、四川省教育厅科研项目(13ZA0115)和绵阳师范学院科研启动项目(QD2013A08)资助。[Supported by the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-08-0379), the Program of Introducing Talents of Discipline to Universities (B08037) and the Scientific Research Fund of Sichuan Provincial Education Department (13ZA0115) and the Natural Science Foundation for Doctoral Career of Mianyang Normal University (QD2013A08).]

作者简介(Biography): 文星跃(1970-), 男(汉族), 重庆市巴南区人, 博士, 副教授, 主要从事土壤发生与环境变化方面的研究。[Wen Xingyue (1970-), male (Han Chinese), born in Banan, Chongqing. Doctor and associate professor; Research fields mainly cover soil genesis and environment change.] E-mail: wenxy126@126.com

* 通信作者(Corresponding author): 黄成敏, 博士, 教授, 主要从事土壤学和环境地球化学研究。[Huang Chengmin, Doctor, Professor of Sichuan University; Research fields mainly cover soil science and environmental geochemistry.] E-mail: cmhuangscu@gmail.com

而,在青藏高原东缘区域,关于黄土物源的研究还缺乏元素地球化学示踪的判断及其与北方黄土高原及邻区黄土的比较,同时,该区黄土是否具有北方黄土的成份目前仍无论断。受亚洲季风、高原气压及复杂的山谷气流的共同影响,青藏高原东缘黄土成因和物源或许比黄土高原更为复杂。

九寨沟自然保护区作为“世界自然遗产地”和“世界生物圈保护区”,探究其中的黄土成因及物源,不仅有助于增强对保护区自然环境的认识及生态环境的保护,而且也是进一步重构保护区第四纪

环境演变历史的基础,对丰富并促进青藏高原东缘区域相关问题的研究有着重要意义。

1 样品采集和分析方法

1.1 剖面特征和样品采集

本文采样剖面位于九寨沟自然保护区荷叶山尖盘寨附近一个黄土台地(33°14'N、103°54'E,海拔2 600 m)(图 1)。剖面深度 570 cm,剖面特征描述如表 1 所示。自下而上以间隔 5 cm 进行垂直采样,

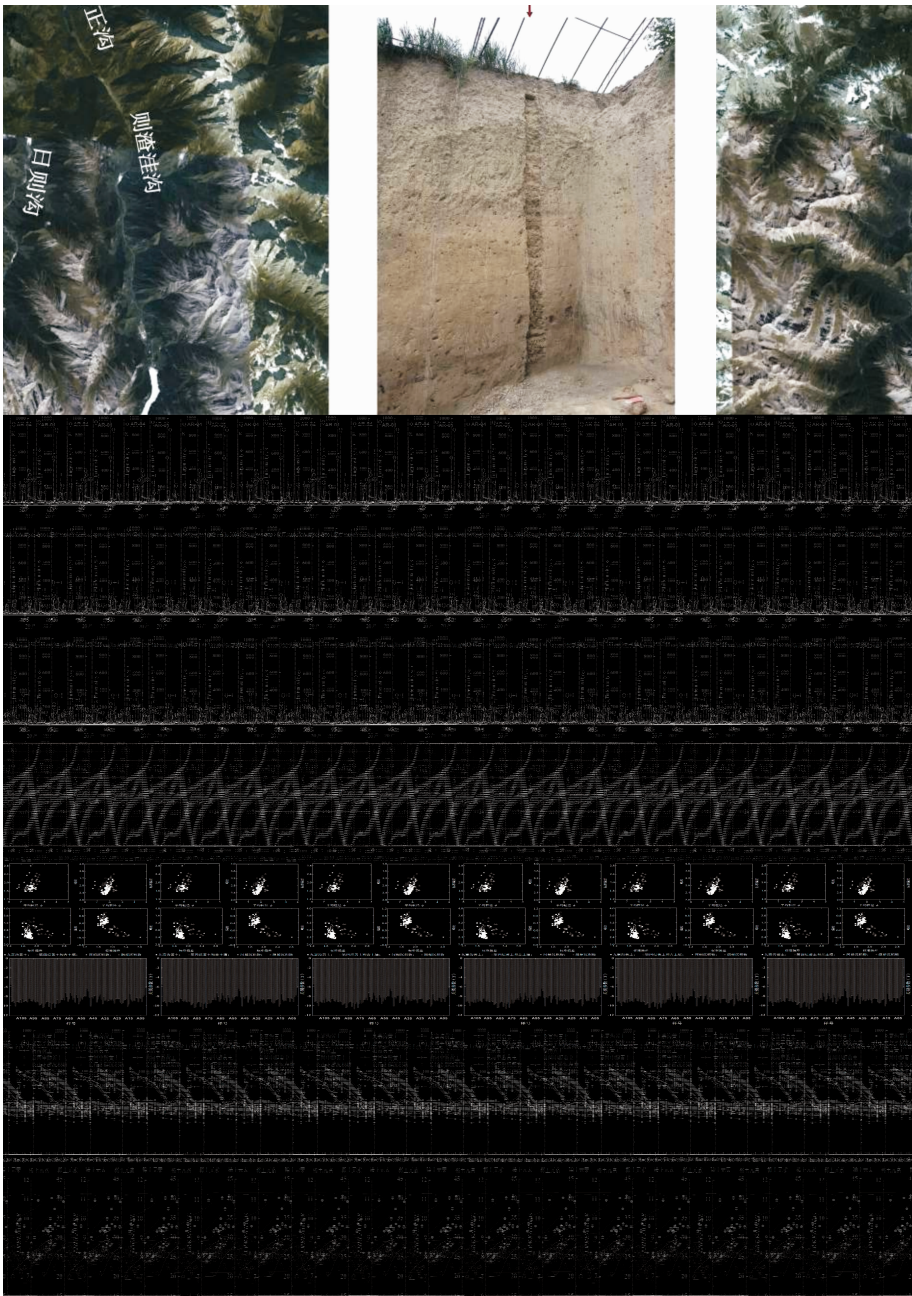


图 1 九寨沟黄土剖面的位置

Fig. 1 Location of loess profile in Jiuzhaigou Nature Reserve

共获得 114 个黄土样品(自下而上分别编号为 A01 至 A114)。此外,在高于剖面约 200 m 处的坡地发现出露板岩(AR-01)和变质石英砂岩(AR-04),并分别采样。

1.2 实验分析方法

岩石和部分黄土样品的矿物鉴定采用 X 射线衍射分析(荷兰 Philips 公司, X-Pert 型),测试前样品均用玛瑙研钵充分研磨成粉状,并过 200 目筛。黄土样品的粒径分布用马尔文 Master Size 2000 型激光粒度仪测定,样品前处理分别用 10% H₂O₂ 和 10% HCl 加热去除有机质和碳酸盐,并用去离子水浸泡静置,抽去上层清液后加入 0.05 M 的六偏磷酸钠分散剂,测试前用超声波清洗机振荡 5 min。黄土和岩石微量和稀土元素含量在中国科学院地球化学研究所测试,仪器为电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICP-MS; Perkin Elmer 公司 ELAN DRC-e 型)。选取部分黄土样品挑选石英颗粒进行扫描电镜微形态观察(日立 S-4800 型),石英砂选取方法参照文献[17]。

2 结果与讨论

2.1 矿物组成

黄土样品 X 射线衍射图谱表明(图 2),剖面中

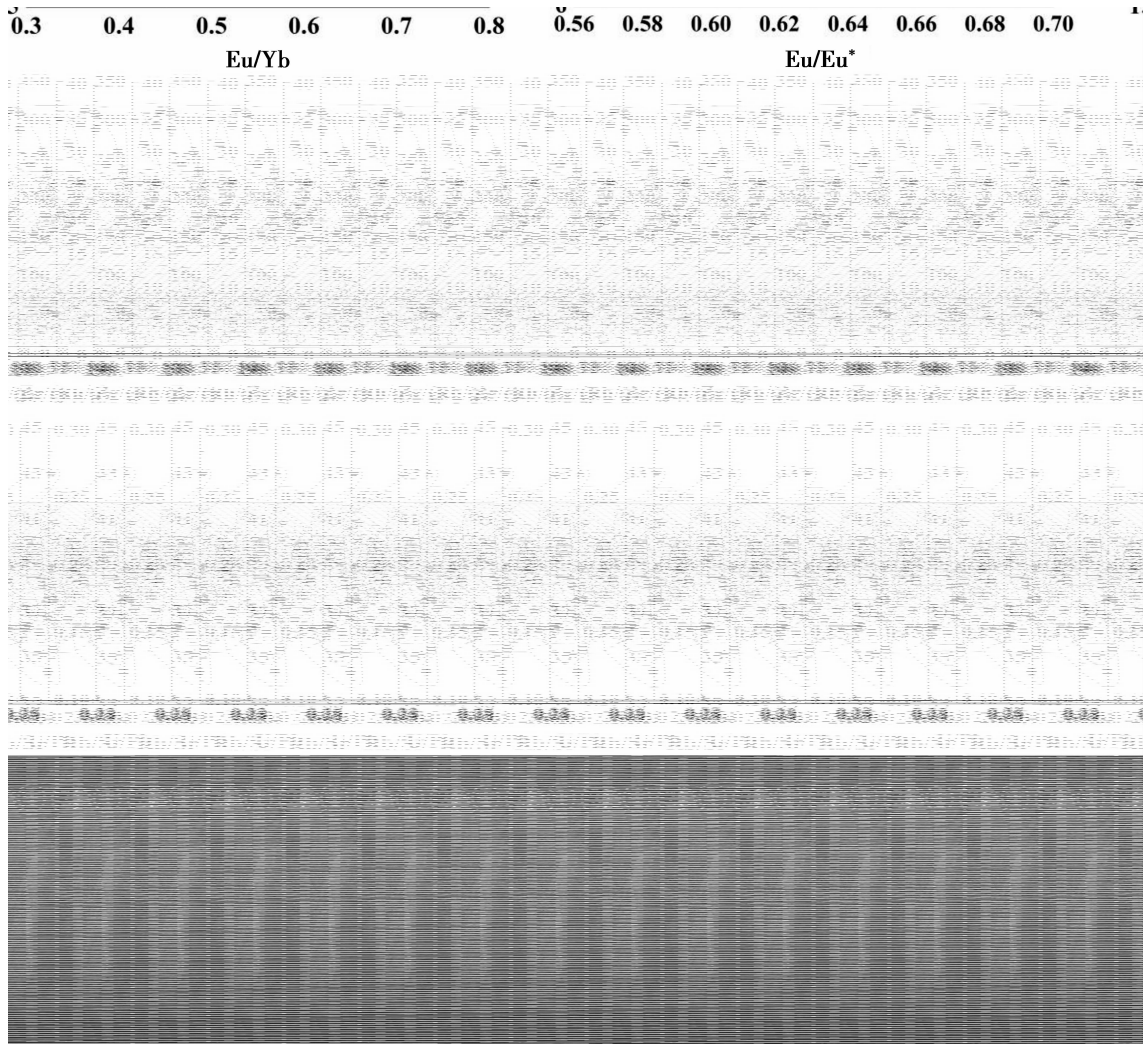
不同深度黄土的矿物组成是一致的,均以石英为主,其次主要是长石、方解石和伊利石,并含有少量高岭石。黄土高原和青藏高原南部分布的黄土中矿物组成也以石英、长石和方解石为主^[18],表现出不同地区黄土矿物组成的相似性。野外观察发现,剖面上部的露头岩石有两类:板岩(样品 AR-01)和变质石英砂岩(样品 AR-04),黄土剖面夹杂的少许岩屑也仅见这两类岩石。由图 2 可知,变质石英砂岩中石英占了绝大部分;板岩除含大量石英以外,主要为伊利石、高岭石和方解石等。两类岩石中均未见明显的长石矿物衍射峰,说明该矿物含量极少,这与黄土样品有较大的差异。此外,在样地所在的九寨沟自然保护区范围,主要分布有碳酸盐岩,而黄土中并未见此岩屑。剖面分布有大量的碳酸盐假菌丝体,未见钙质结核,且黄土色调和质地较均一,以 7.5YR 色调为主,其余为 10YR 色调,通体呈粉沙质。上述结果表明黄土不是来自研究区内的基岩及其坡积物,且来自研究区内冰水洪积物的可能性非常小。

2.2 粒度特征与沉积成因

沉积物粒度特征不仅是古气候信息的常用代用指标,同时因其与沉积环境密切相关,也被用于对沉积物形成原因及搬运动力条件的辨析^[19-21]。以下从粒度组成、粒度参数、粒度判别分析等方面探讨研究区黄土地层的沉积成因。

表 1 九寨沟黄土剖面地层及土壤学形态特征
Table 1 Stratigraphic subdivisions and pedological features of the loess profile in Jiuzhaigou

层位	深度/cm	颜色		形态特征
		干态	湿态	
表土层(T _s)	0~50	灰黄棕 10YR 6/2	浊黄棕 10YR 5/3	粉砂质地,团粒状,结持疏松;近地表 30 cm 是现代耕作土壤,根系较多。有较多岩屑
黄土层(L ₀₁)	50~110	浊黄橙 10YR 7/2	浊黄棕 10YR 5/3	粉砂质地,块状结构,稍硬,根系细少。有较多岩屑
黄土层(L ₀₂)	110~260	淡棕灰 7.5YR 7/2	浊棕 7.5YR 5/3	粉砂质地,团块状,极硬,有少量直径 2~3 cm 的粗岩屑
黄土层(L ₀₃)	260~290	浊棕-浊橙 7.5YR 6.5/3	棕 7.5YR 4/4	粉砂质地,均质块状,硬,根系极少,见炭屑,通体有白色钙质假菌丝体
弱发育古土壤(S ₀₁)	290~340	浊橙 7.5YR 7/3	浊棕 7.5YR 5/4	粉砂质地,均质块状,稍硬,根系少,见炭屑,通体有白色钙质假菌丝体
黄土层(L ₀₄)	340~470	浊棕 7.5YR 6/3	棕 7.5YR 4/3	粉砂质地,均质块状,硬,根系极少,见炭屑;通体有白色钙质假菌丝体
古土壤层(S ₀₂)	470~550	浊棕 7.5YR 5/3	暗棕 7.5YR 3/4	粉砂质地,团块结构,稍硬,较多根孔发育,见炭屑;在中部白色钙质假菌丝体较少,见团粒结构
黄土层(L ₀₅)	550~570	浊橙 7.5YR 7/4	棕 7.5YR 4/4	粉砂质地,均质块状,硬,通体有白色钙质假菌丝体,根孔极少,未见底



Q:石英(Quartz);F:长石(Feldspar);C:方解石(Calcite);I:伊利石(Illite);K:高岭石(Kaolinite)

图2 部分黄土和岩石X射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of selected loess and rock samples

2.2.1 粒度组成

研究区黄土粒度组成以粉砂(2~63 μm)为主,其含量介于79.50%~89.66%,其中以细粉砂(2~16 μm)为主,其含量在29.79%~56.07%;粘粒(<2 μm)和砂粒(>63 μm)含量变化范围分别为5.71%~11.34%和2.62%~13.29%。而砂粒主要集中在极细砂(63~125 μm)部分,含量变化在2.62%~13.21%。所有样品含大于125 μm的颗粒极少,中值粒径在10.21~27.11 μm变化。

粒径累积频率曲线常用来反映沉积物沉积特征,滚动总体的粒径一般<1 φ,跳跃总体为0~3 φ,而悬移总体>2~3 φ^[7]。除表土样品(A114)外,所有黄土样品粒度累积频率曲线有两个截点(图3-(a)),上截点在10 φ附近,对应累积含量为95%左右;下截点在4 φ附近,对应累积含量为10%左右,

<3 φ的总体几乎为零,说明沉积物主要由悬移体构成,而其中粉砂(4~9 φ)悬移组分是沉积物构成主体。一般认为,被气流搬运的悬浮物以粉砂为主^[4-5, 22]。上述粒度组成特征不仅与邻区甘孜和若尔盖黄土相似,也与北方黄土高原风成黄土相似^[3, 7, 23-24],说明九寨沟黄土具有风成沉积的颗粒组成特征。

沉积物受搬运方式和搬动力改变的影响,其粒径分布会形成不同的组合方式,表现出多峰态连续分布的特点,如果搬运介质和动力相对稳定,粒径分布通常呈现单峰曲线^[25-27]。因此,可以根据样品粒径分布曲线表现出的众数(峰)的高低变化反映各种搬运介质或动力在沉积过程中的贡献。Patterson等^[25]对土壤风蚀产生的大气粉尘粒度组成研究发现,粒径分布主要由以下3部分粒径的对数分布

形态构成:20~100 μm (A),属中等程度风力搬运有关的组分,可能与尘暴搬运的粉尘有关。黑龙江哈尔滨市2002年3月沙尘暴天气产生的沉积物粒径绝大部分集中在此段^[26];2~20 μm (B),为大气正常情况下存在的组分;0.04~1 μm (C),为大气本底气溶胶部分。九寨沟黄土样品粒径分布频率呈3峰形态,其中最高峰集中在20~80 μm ,与A对应;第二主峰分布在2~20 μm ,对应于B,而与C对应的第三峰相对较少(图3(b))。北方黄土高原第四纪黄土粒径频率曲线呈双峰形态,尽管与九寨沟黄土一样缺少粗尾,但>63 μm 的砂粒极少,主峰集中在16~63 μm (6~4 ϕ),略小于九寨沟黄土;相当于C的次峰与九寨沟黄土的第三峰相似^[24]。这些表明,对黄土沉积贡献最大的是类似于沙尘天气条件下的较强风力,但九寨沟黄土较之黄土高原第四纪黄土,受到的搬运动力更大。而且,九寨沟黄土相对多出的B峰表明就近大气有较多的该组粒级的粉尘,很可能跟地形因素引起的山谷风或高原气压有关,说明物源组成较黄土高原黄土更为复杂。

2.2.2 粒度参数

沉积物的粒度参数特征常用于识别沉积环境。为便于与文献对比,黄土粒度参数采用常用的矩法公式计算^[28]。样品平均粒径、标准偏差、偏度和峰度的变化范围分别为6.65~5.74 ϕ (9.96~18.71 μm)、1.58~1.99、0.05~0.87和2.29~3.16。邻区甘孜黄土地层相应的值分别在6.80~5.40 ϕ (8.97~23.68 μm)、1.50~1.80、0.15~1.00和2.10~3.50之间变化^[23],二者非常相近,表明它们在沉积成因上的相似性。同时,较之黄土高原第四纪黄土和古土壤的粒度参数值^[24],也非常相似。样

品及黄土高原黄土和古土壤的标准偏差明显低于河湖相沉积样品,说明沉积过程中的搬运动力相对稳定(图4)。但九寨沟及甘孜黄土平均粒径大于北方黄土相应值(7.20~6.50 ϕ , 6.80~11.05 μm),其原因很可能是物源区的差异所致,反映出青藏高原东缘黄土搬运距离较黄土高原黄土短。

由于沉积环境的复杂性,单一的粒度参数往往难以区分不同类型的沉积物,需要对几种粒度参数进行综合分析才能得出较为可靠的结论。虽然不同类型沉积物参数值在某些点上相近,但在点群的分布上却存在差异,因此,粒度参数散点图是辨别不同沉积类型的有效方法^[20, 24]。从粒度参数散点图(图4)可以看出,研究区样品与黄土高原第四纪黄土和古土壤有相近的投影区域,而明显区别于河湖相沉积样品,反映了研究区黄土与黄土高原黄土-古土壤序列有相同的风成成因,沉积物应是经风力搬运而来。

2.2.3 粒度判别分析

判别分析是用来区分沉积物沉积环境的一种统计分析方法,我们利用Sahu判别公式^[30]计算黄土剖面样品的判别值

$$Y = -3.5688M_z + 3.7016\sigma^2 - 2.0677S_k + 3.1135K_c \quad (1)$$

式中 M_z 为平均粒径, σ 为标准偏差, S_k 为偏度, K_c 为峰度。样品的判别参数 Y 值介于-10.69和-5.47,符合Sahu^[30]对风尘堆积判别值小于-2.74的认识。同时,整体上研究区黄土样品判别值比较稳定(图5),且与乔彦松等^[24]运用同一公式计算的黄土高原第四纪黄土粒度判别参数值非常相近。这些也进一步表明研究区黄土与黄土高原黄土一样属风成沉积。

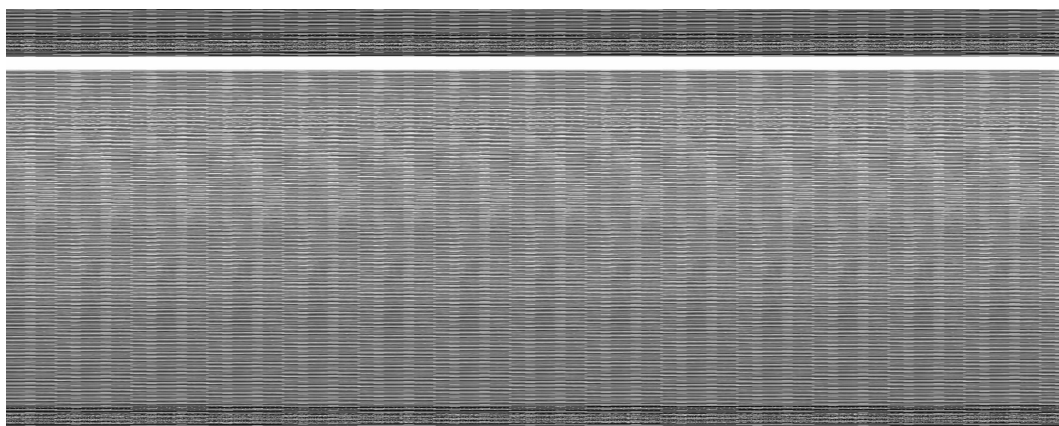
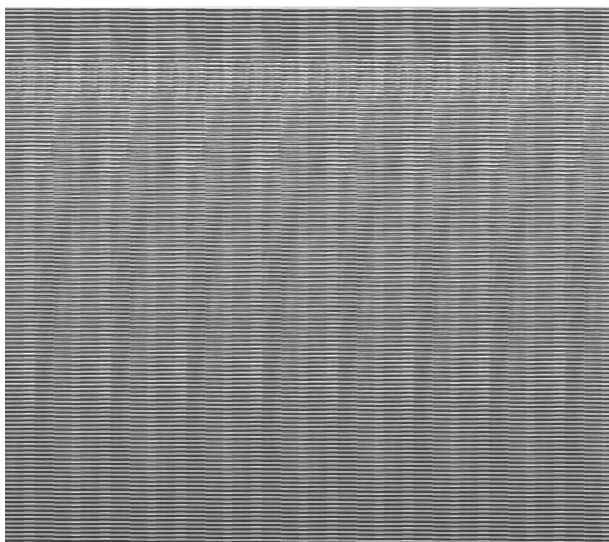


图3 九寨沟黄土粒径累积频率曲线(a)和粒径分布曲线(b)

Fig. 3 Cumulative grain size frequency (a) and grain size distribution (b) curves of the loess in Jiuzhaigou



(黄土高原第四纪黄土和古土壤及河流相沉积物粒度参数数据文献^[24],湖相沉积物粒度参数根据文献^[29]中九寨沟犀牛海部分沉积物粒度计算)

图 4 九寨沟与北方黄土、河湖相沉积物粒度参数比较

Fig. 4 Comparison on grain size parameter between loess from Jiuzhaigou and northern China, fluvial and lacustrine sediments in Jiuzhaigou

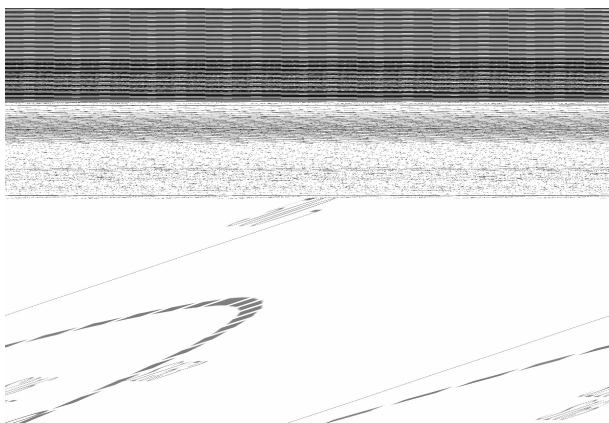


图 5 九寨沟黄土粒度参数判别图

Fig. 5 Discrimination diagram of grain size parameter from the loess in Jiuzhaigou

2.3 REE 分布模式及比值特征

稀土元素(REE)一般以 +3 价态存在,因化学性质相似它们在自然界中常常共生在一起。风化产物在外力搬运、沉积以及变质或成岩作用的过程中,其 REE 组成及分配模式变化较小。因此,沉积物中 REE 组成特征主要受控于物源区源岩,REE 常被作为沉积物的物源示踪剂^[31-33]。九寨沟黄土剖面样品 REE 含量(不含 Y)变化范围为 82.87 ~ 219.42 $\mu\text{g/g}$,平均值为 153.45 $\mu\text{g/g}$ 。稀土元素总量(Σ

REE)值与黄土高原黄土接近,如渭南剖面黄土平均值为 177.55 $\mu\text{g/g}$,黄河中游地区黄土平均为 159.21 $\mu\text{g/g}$ ^[34],洛川马兰黄土平均为 168 $\mu\text{g/g}$ ^[35]。研究区黄土样品 REE 分配模式表现为富轻稀土,曲线呈右倾状。La-Eu 曲线较陡, Eu-Lu 曲线较为平缓,具有明显的 Eu 负异常。尽管样品在 ΣREE 值上存在差异,但相互间的 REE 分配模式非常相似(图 6(a))。

九寨沟黄土样品的上述 REE 分配模式与中国北方黄土具有类似的特点^[34],表现出与上陆地壳 REE 分配模式^[33]的一致性。文启忠等^[36]最初发现中国北方黄土平均 REE 分布模式与北美页岩相似,且接近上陆地壳 REE 平均值,认为黄土物质离开母岩后可能曾经受到流水的搬运进入沉积体系,而后才被风力搬运至黄土区堆积。随后的研究^[35]证实不仅黄土高原不同地区、不同时代的黄土 REE 含量及分布模式相似,而且世界各地风成黄土中 REE 组成也一致,据此提出可以用黄土平均 REE 含量代表上陆地壳 REE 平均值。近年一些学者的研究表明中国南方下蜀黄土^[37],以及西北地区的柴达木盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地等地^[38]的风成沉积物 REE 分布模式也与黄土高原黄土一致。这种不同时空的黄土 REE 分布模式一致性,通常被解释为上陆壳各类岩石的风化产物在风力搬运过程中经过充分的混合所致^[34, 37-38]。据此,一些研究者依据 REE 分布模式的一致性判断不同地区黄土物源的一致性^[34]或辨为“风成说”证据^[37, 39]。

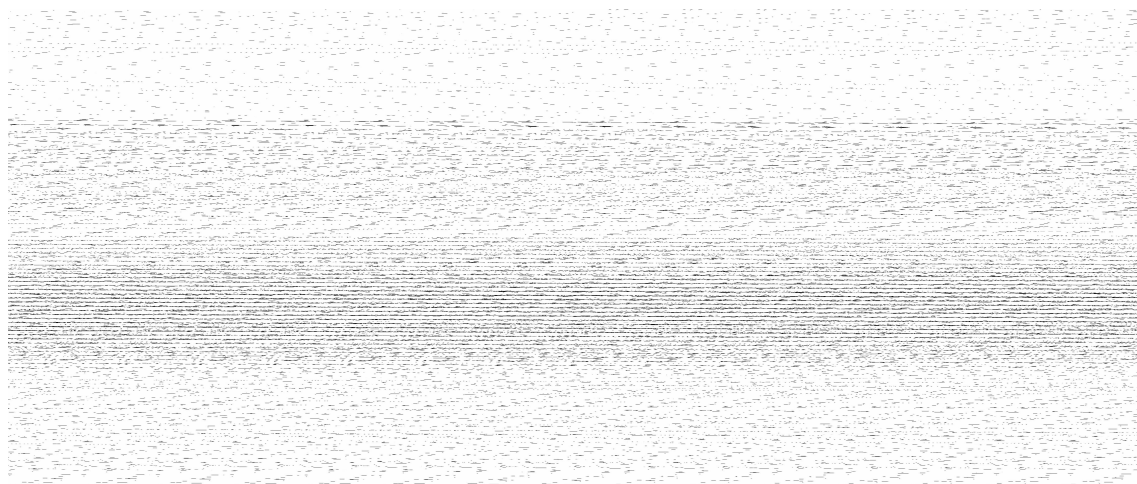
然而,上陆地壳物质的充分混合途径并不局限于风力搬运,仅依据 REE 分布模式的一致性辨析黄土的成因和物源还有待商榷。我们将九寨沟黄土与剖面附近基岩(AR-01 和 AR-04)、黄土高原黄土、成都平原河流相沉积物、长江下游和黄河下游河流沉积物中的 REE 平均值分布模式进行了比较(图 6(b)),同样发现它们在分布模式上非常相近。只能说明它们在以下两点具有相似性:一是物质源于上陆地壳,二是颗粒物在沉积(或成岩)之前经历了较长距离的搬运(不限于风力),以至充分混合达到了由多种岩石矿物组成的上陆地壳 REE 的平均组成状况。因此,对于源自上陆地壳的沉积物或沉积岩而言,REE 含量及分配模式对于其成因及物源的示踪意义是不确定的。

尽管 REE 分配模式在辨别黄土物源上存在不确定性,但由于沉积物往往保留了源区轻重稀土及

元素 Ce 和 Eu 的分异情况,所以 *REE* 比值特征却能反映黄土在物源上的差异^[38, 41-42]。轻稀土(*LREE*, La-Eu)与重稀土(*HREE*, Gd-Lu)之比反映 *REE* 的分馏状况,较高的 *LREE/HREE* 值说明 *LREE* 的相对富集而 *HREE* 亏损。在 *REE* 中,元素 Ce 和 Eu 会发生变异, Ce^{3+} 在表生条件下可能被氧化成 Ce^{4+} ,而 Eu^{3+} 在复杂的环境,如岩浆变质或高级变质作用条件下会被还原成 Eu^{2+} ^[43]。 Ce^{4+} 和 Eu^{2+} 因性质与其他 REE^{3+} 有差异而产生分离,从而在样品 *REE* 分布中分别表现出 Ce 异常(Ce/Ce^*)和 Eu 异常(Eu/Eu^*)。一般异常值 <0.95 称为负异常,而 >1.05 称为正异常。Sun 等^[18] 运用 *LREE/HREE* - Eu/Eu^* 和 $Ce/Yb - Eu/Yb$ 散点图有效地辨别了

中国西北内陆盆地和青藏高原南部的黄土与黄土高原黄土在物源上的差异,以下我们引用其中的数据(代表黄土高原和雅鲁藏布江河谷不同地点黄土各 10 个)与所测 77 个样品进行比对(图 7)。

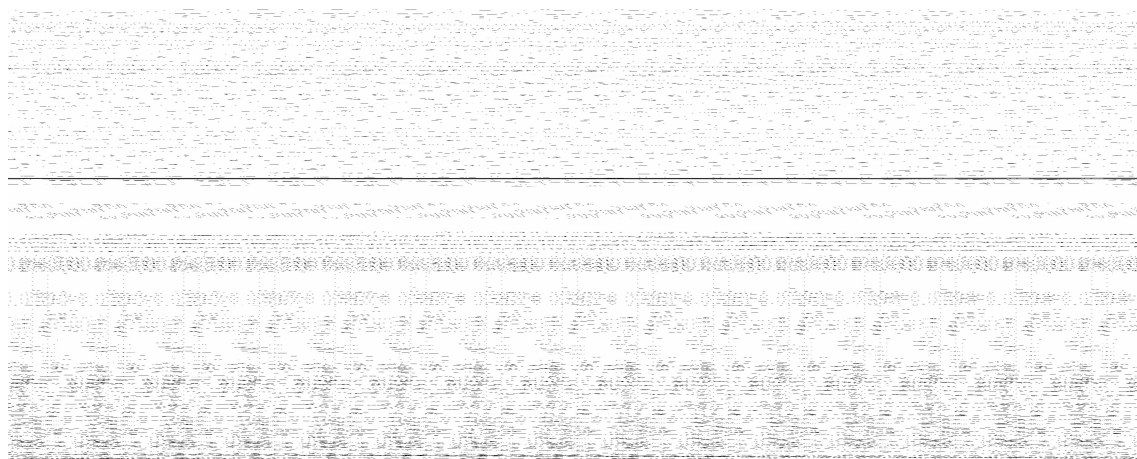
九寨沟黄土 Ce/Yb 和 *LREE/HREE* 值与黄土高原黄土比较接近,表明部分黄土沉积在物质组成上的相似。图 7 中九寨沟与黄土高原黄土分布区域存在重叠部分,也揭示出部分黄土与黄土高原物源相近。因九寨沟地区邻近黄土高原南部,其黄土沉积中含有黄土高原及其同源的沙漠地带的粉尘,也是合理的。九寨沟黄土与雅鲁藏布江河谷黄土物质组成差异显著,说明青藏高原东部与南部的风成沉积有着不同的物质来源。此外,从样品的集中度来看,



(渭南和黄河中游黄土 *REE* 据文献^[34],长江和黄河下游沉积物 *REE* 据文献^[31],成都平原沉积物 *REE* 据文献^[40])

图 6 九寨沟黄土 *REE* 和不同类型沉积物(岩)平均 *REE* 分布模式

Fig. 6 *REE* patterns from the loess in Jiuzhaigou and mean *REE* patterns from different sediments and rocks in Jiuzhaigou



○ 九寨沟黄土;★ 黄土高原黄土^[18];● 雅鲁藏布江河谷黄土^[18]

图 7 九寨沟与黄土高原、雅鲁藏布江河谷黄土 *REE* 比值特征散点图

Fig. 7 Scatter diagram of *REE* ratios in loess samples from Jiuzhaigou Nature Reserve, Loess Plateau and Brahmaputra Valley

黄土高原黄土相对集中,反映了物质组成相对均一,这是因为该区域黄土沉积之前曾经历了更长距离的搬运,以至混合更为充分^[18];九寨沟黄土同雅鲁藏布江河谷黄土一样,物质组成差异较大,表明黄土物质沉积前搬运距离相对较短,混合度较北方黄土差。

2.4 微量元素比值特征

微量元素地球化学研究表明,元素 Zr 和 Hf 主要附着于锆石,在岩浆作用的影响下,不同岩源区的 Zr/Hf 会有所差异^[33]。元素 Sr 和 Ca 有相似的地球化学行为,在很多矿物中 Sr 能代替 Ca 的位置,黄土中的 Sr 含量变化往往跟碳酸盐有关^[44]。Rb 和 Cs 主要存在于云母和钾长石里,Pb 也主要存在于钾长石里,U 和 Th 主要在重矿物中赋存或被粘土矿物吸附^[18, 45]。因此,利用微量元素及其比值特征对黄土沉积的物质来源也能起到良好的示踪作用^[18, 38, 41-42]。图 8 表明,样品与黄土高原及雅鲁藏布江河谷的黄土微量元素组合关系明显不同,表明它们物质组成存在差异;但大部分样品与北方黄土重叠,说明研究区黄土与之有相同的物源特征,但同时表现出较大的变化幅度,可能跟物质来源的多样

性有关,相对雅鲁藏布江河谷黄土,其物源更为复杂。雅鲁藏布江河谷黄土的物源主要是就近的山谷冰雪融化后形成的冰水沉积或冲积物^[18]。结合前述粒度组成和 REE 比值特征分析,我们认为研究区黄土沉积物很可能具有类似于雅鲁藏布江河谷黄土的近源特性,但同时也包含了部分北方黄土高原黄土或其同源的风尘物质。其原因很可能跟青藏高原隆起对季风环流的影响有关。青藏高原东缘区域受东亚季风的影响较大,高原隆起对冬季风的阻挡作用并不明显,如九寨沟自然保护区目前冬季盛行西北风,部分风成沉积物源自北方是完全可能的。而青藏高原南缘区域受到高原阻挡的影响,较弱的亚洲冬季风不利于北方风尘物质的送达,故其风成黄土具有典型的近源性特征。

值得注意的是,青藏高原东缘和南缘的黄土在物源上虽然均具有近源性,但上述 REE 及微量元素比值特征表明二者的物源并不一致,说明黄土物质并非源自青藏高原内部,或者说高原反气旋引起的高原季风对黄土沉积的直接作用并不明显。推测在山原峡谷地带,局地山谷风很可能对风尘物的搬运

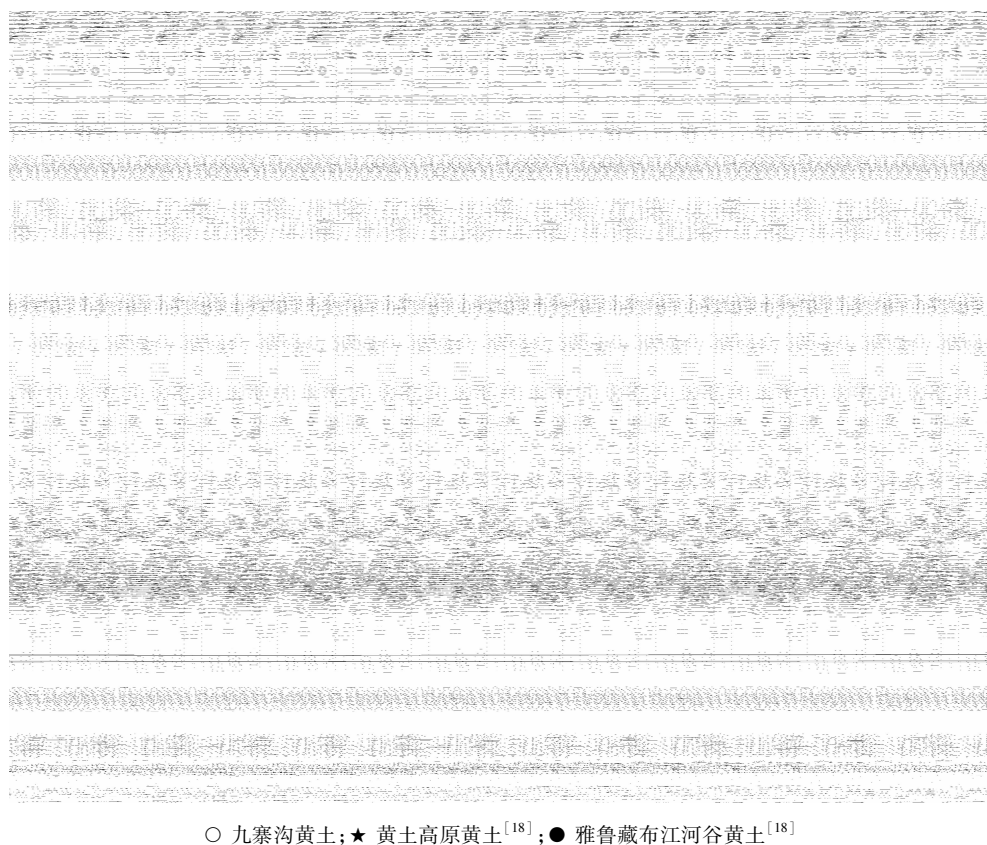


图 8 九寨沟与黄土高原、雅鲁藏布江河谷黄土微量元素比值散点图

Fig. 8 Scatter diagram of trace element ratios in loess samples from the Jiuzhaigou Nature Reserve, Loess Plateau and Brahmaputra Valley

和沉积影响较大,就地或邻近地区的裸地风化物、河谷冲(沉)积物等为黄土提供了充足的物源,这与北方黄土高原以亚洲季风影响为主的风尘沉积有所差异。因此,利用青藏高原周缘山原地带黄土研究古环境需结合地形考察,同时应加强区域内多剖面对比研究,这样得出的研究认识更为可靠。

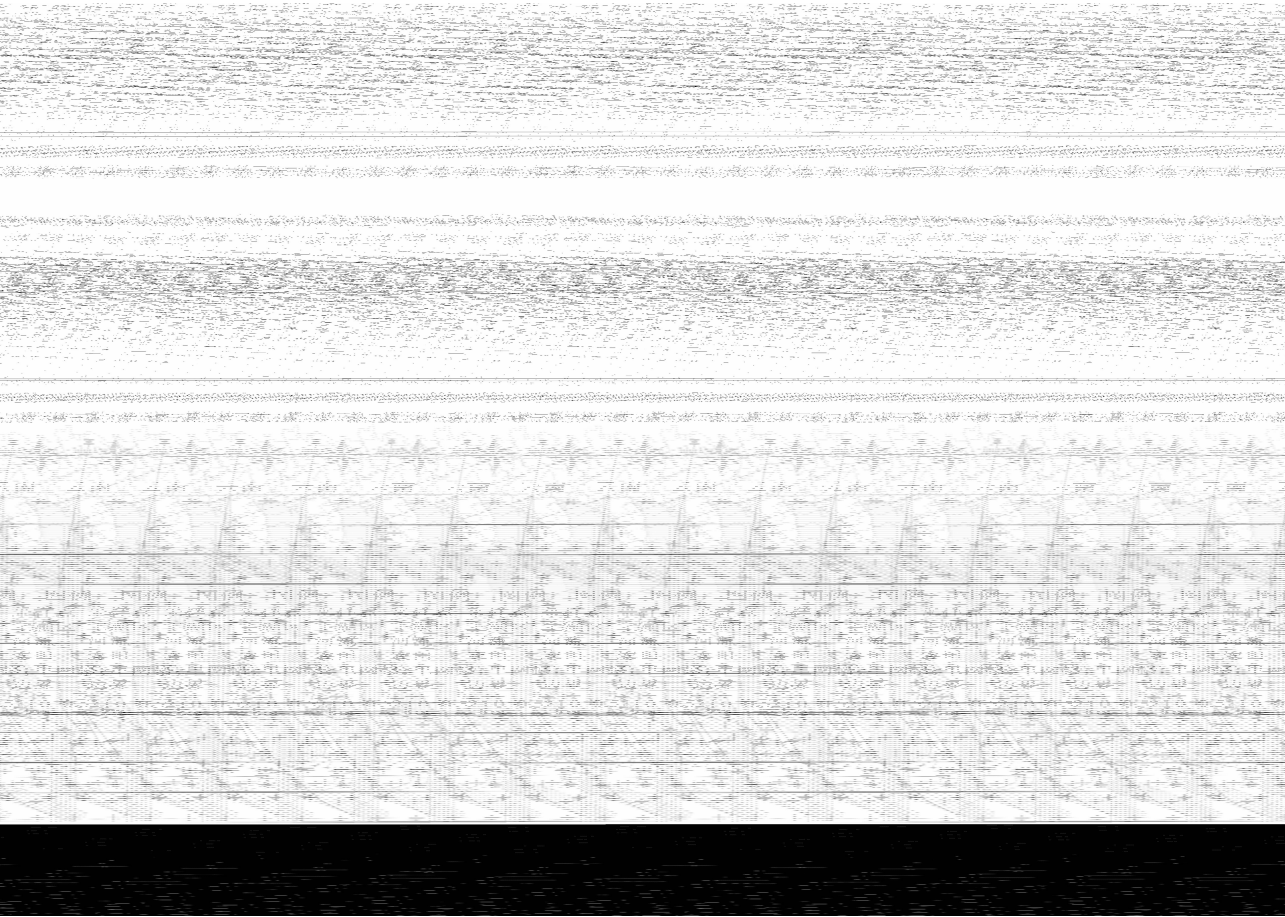
2.5 石英砂表面特征

石英砂具有较强的抗风化能力,较好地保留了在搬运和沉积过程中外力作用形成的表面形态特征。在不同的地貌外营力作用下,石英砂表面通常会表现出颗粒形状、断口、磨蚀或挤撞擦痕等方面的差异,据此可以用来识别沉积物经历的搬运过程和沉积环境^[46-49]。

样品石英砂颗粒形状多呈尖棱角和次棱角状(图 9(1)和(2)),也含较多的次圆形颗粒(图 9(3)),见少量纺锤体形(图 9(4)),说明石英颗粒多数磨圆度较差。前人研究表明,黄土高原黄土石英

颗粒多为次棱角至次圆状^[49],这跟其源区的沙漠石英砂形状以球体、椭球体或纺锤体为主的特征基本吻合^[50],这是长距离风力搬运过程中的充分摩擦、撞击磨圆的结果。而搬运距离较短的石英颗粒,如冰川砂、泥石流砂和洪积砂多为尖棱角和次尖棱角状的不规则形态^[50]。因此,研究区黄土中的大部分石英颗粒搬运距离相对黄土高原较短,不是来自北方沙漠或戈壁环境。

样品石英砂出现较多断口(图 9(5)和(6)),这是在外营力搬运过程中受到强大的挤压或撞击作用而产生的,通常认为较大的贝壳状断口是冰川作用所为,而泥石流、洪流作用形成的断口相对较小^[17, 51]。同时,样品石英颗粒表面也见撞击坑和较规则 V 形坑(图 9(5)和(6)),反映黄土沉积物曾经受到较高水力或风力作用的影响^[7, 17]。此外,样品中还出现受流水和冰川搬运作用影响下产生的擦痕和刻痕(槽)和(图 9(7)、(8)和(9))。



(1)尖棱角状;(2)次棱角状;(3)次圆形;(4)纺锤体形;(5)贝壳状断口+V形坑;(6)断口+撞击坑;(7)刻槽;(8)擦痕+断口;(9)刻痕

图 9 九寨沟黄土石英砂表面特征

Fig. 9 Surface texture of quartz grain size of loess from Jiuzhaigou Natural Reserve

上述特征反映出样品颗粒在沉积之前大多受到冰川和流水搬运作用的影响。邻区若尔盖和西宁黄土石英颗粒表面特征也表现出曾受到冰缘作用的影响^[7, 17]。结合前述矿物组成和元素地球化学特征的分析,推断研究区黄土沉积物大部分来自附近山麓地带冰水沉积物和寒冻风化物,但也包含了部分北方远源风尘物质,其颗粒组成复杂,不能简单地称之为“冰缘风成”沉积。

3 结论

通过对位于青藏高原东缘的九寨沟黄土的矿物组成、粒度组成、粒度参数、稀土和微量元素、以及石英砂表面微形态等特征的分析,得到如下认识:1. 九寨沟黄土是经风力搬运沉积所致,其物质主要来自邻近区域的冰缘作用产物,但受亚洲冬季风影响,也含有一定量的北方远源风尘物。因此,青藏高原东缘黄土物质来源具有多源性特征,不能简单地把该区域的黄土称为“冰缘风成”沉积。2. 青藏高原东缘黄土与南缘黄土的物源完全不同,表明高原内部产生的反气旋并未向周围输送粉尘物质,而局地山谷风可能对青藏高原周缘地带黄土沉积影响较大,因此利用黄土地层研究古环境需结合地形考察加强区域内的多剖面比较。3. 缘于上陆地壳且经充分混合的物质 *REE* 分布模式具有一致性,因此 *REE* 分配模式用于指示黄土颗粒在物源上的一致性及“风尘”特性具有不确定性。

参考文献 (Reference)

- [1] Wen Xingyue, Huang Chengmin. Loess and environmental change on the eastern edges of the Qinghai Xizang Plateau[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 251–256 [文星跃, 黄成敏. 青藏高原东缘黄土与环境变化研究进展[J]. *地球与环境*, 2011, 39(2): 251–256]
- [2] Fang Xiaomin, Chen Fubin, Shi Yafeng, et al. Garze loess and the evolution of the cryosphere on the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(20): 1865–1867 [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]
- [3] Wang Jiangmin, Pan Baotian. Loess deposit in the eastern part of Qinghai–XiZang Plateau: Its characteristics and environment[J]. *Journal of Desert Research*, 1997, 17(4): 395–402 [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]
- [4] Wang Yunsheng, Li Yongzhao, Xiang Fang. The Ganzi loess origin in the west Sichuan Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 2003, 9(1): 91–96 [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]
- [5] Liu Weiliang, Li Guoxin, Gu Man. Study on the origin of the loess in Keryin area, West Sichuan Plateau[J]. *Geology and Resources*, 2007, 16(4): 300–302 [刘维亮, 李国新, 谷曼. 川西高原可尔因地区黄土成因研究[J]. *地质与资源*, 2007, 16(4): 300–302]
- [6] Jiang Fuchu, Wu Xihao, Xiao Huaguo, et al. The Ganzi loess Stratigraphy in the west Sichuan Plateau[J]. *ACTA Geologica Sinica*, 1997, 18(4): 413–420 [蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 等. 川西高原甘孜黄土地层学[J]. *地球学报*, 1997, 18(4): 413–420]
- [7] Sheng Haiyang. Zoige basin loess origin in the northern Tibetan Plateau[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(1): 62–74 [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]
- [8] Wang Shubing, Jiang Fuchu, Tian Guoqiang. Loess stratigraphy and environment records in Lixian county, Sichuan province[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(3): 115–119 [王书兵, 蒋复初, 田国强. 理县黄土地层与环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(3): 115–119]
- [9] Wang Shubing, Jiang Fuchu, Tian Guoqiang, et al. The Jinchuan loess stratigraphy in western Sichuan Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 26(4): 355–358 [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]
- [10] Chen Shiyue, Fang Xiaomin, Wang Sumin. Relation between the loess stratigraphy on the eastern Tibetan Plateau and Indian monsoon [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(3): 41–46 [陈诗越, 方小敏, 王苏民. 川西高原甘孜黄土与印度季风演化关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(3): 41–46]
- [11] Peng Dong, Cao Jun, Yang Junyi, et al. Study of loess in the Jiuzaigou area, Sichuan [J]. *Regional Geology of China*, 2001, 20(4): 359–365 [彭东, 曹俊, 杨俊义, 等. 四川九寨沟地区黄土的初步研究[J]. *中国区域地质*, 2001, 20(4): 359–365]
- [12] Yang Wenguan. Research of sedimentary record in terraces and climate vary in upper reaches of Minjiang River, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005. [杨文光. 岷江上游阶地沉积记录与气候环境变迁研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.]
- [13] Li Chengsan, Wu Yansheng, Li Yongzhao, et al. Quaternary glaciation relics in east slope of southern Longmen Shan and its hillside [G]//Quaternary Research Committee of China. Collected works of quaternary glaciation relics research in China. Beijing: Science Press, 1964: 14–86 [李承三, 吴燕生, 李永昭, 等. 四川龙门山南段东坡及其山前带第四纪冰川遗迹[G]//中国第四纪研究委员会. 中国第四纪冰川遗迹研究文集. 北京: 科学出版社, 1964: 14–86]
- [14] Ma Rongzhi. Formation of loess in China [J]. *Geological Review*, 1944, 9(2): 207–223 [马溶之. 中国黄土之生成[J]. *地质论评*, 1944, 9(2): 207–223]
- [15] Qiao Yansong, Zhao Zhizhong, Li Zengyue, et al. Aeolian origin of the red earth formation in the Chengdu Plain [J]. *Quaternary*

- Sciences, 2007, 27(2): 286–294 [乔彦松, 赵志中, 李增悦, 等. 成都平原红土堆积的风成成因证据[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 286–294]
- [16] Hu Zhaoguo, Feng Jinliang, Ju Jianting. Grain-size distribution and micro-structure of quartz in the Chengdu clay [J]. Mountain Research, 2010, 28(4): 392–406 [胡兆国, 冯金良, 鞠建廷. 成都粘土中石英的粒度分布及其表面微结构特征[J]. 山地学报, 2010, 28(4): 392–406]
- [17] Li Zhen, Zhang Jiawu, Ma Haizhou. Discussion on the texture features of quartz grains and their origin in the Xining loess [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 221–225 [李珍, 张家武, 马海洲. 西宁黄土石英颗粒表面结构与黄土物质来源探讨[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 221–225]
- [18] Sun J M, Li S H, Muhs D R, et al. Loess sedimentation in Tibet: provenance, processes, and link with Quaternary glaciations[J]. Quaternary Science Reviews, 2007, 26(17–18): 2265–2280
- [19] Lu Huayu, An Zhisheng. Comparison of grain-size distribution of red clay and loess-paleosol deposits in Chinese Loess Plateau[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 226–232 [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]
- [20] Lu H Y, Vandenberghe J, An Z S. Aeolian origin and palaeoclimatic implications of the ‘red clay’ (north China) as evidenced by grain-size distribution[J]. Journal of Quaternary Science, 2001, 16(1): 89–97
- [21] Rea D K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: The geologic history of wind[J]. Reviews of Geophysics, 1994, 32(2): 159–196
- [22] Liu T S. Loess and the environment[M]. Beijing: China Ocean Press, 1985.
- [23] Li Mingze. Garze loess strata and its implication to paleoclimatic change in the western Sichuan [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008. [李明则. 川西甘孜黄土地层与古气候变化[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.]
- [24] Qiao Y S, Guo Z T, Hao Q Z, et al. Grain-size features of a Miocene loess-soil sequence at Qinan: Implications on its origin[J]. Science in China: Series D, 49(7): 731–738
- [25] Patterson, E., Gillette, D. Commonalities in measured size distributions for aerosols having a soil-derived component[J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(15): 2074–2082
- [26] He Kui, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. Grain-size distributions of Harbin fallouts and its source areas [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(11): 200–205 [何葵, 谢远云, 康春国, 等. 哈尔滨沙尘沉降物的粒度组成及其源地分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(11): 200–205]
- [27] Liu Yanlin, Yue Leping, Parati. Characters of grain-size and susceptibility of the Neogene Laogaochuan red clay section, Shaanxi, and its paleoenvironment significance [J]. Geology in China, 2005, 32(3): 496–501 [刘艳霖, 岳乐平, 帕拉提. 陕西老高川红粘土剖面粒度磁化率特征及古环境意义[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 496–501]
- [28] Friedman G M, Sanders J E. Principles of Sedimentology[M]. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [29] Hu Xinxin. Study on the lake deposition and sediment source of the world heritage site Jiuzhaigou nature reserve [D]. Chengdu: Sichuan University, 2009. [胡欣欣. 世界遗产地九寨沟自然保护区湖泊沉积与泥沙来源研究[D]. 成都: 四川大学, 2009.]
- [30] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1964, 34(1): 73–83
- [31] Yang Shouye, Li Congxian. REE geochemistry and tracing application in the Yangtze River and the Yellow River sediments [J]. Geochimica, 1999, 28(4): 374–380 [杨守业, 李丛先. 长江与黄河沉积物 REE 地球化学及示踪作用[J]. 地球化学, 1999, 28(4): 374–380]
- [32] Cullers R L, Barrett T, Carlson R, et al. Rare-earth element and mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment: a case study in the Wet Mountains, Colorado, USA[J]. Chemical Geology, 1987, 63(3–4): 275–297
- [33] 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
- [34] Liu Tungsheng. Loess and arid environment [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2009: 325–328 [刘东生. 黄土与干旱环境[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2009: 325–328]
- [35] Wen Qizhong. Geochemistry of loess in China [M]. Beijing: Science Publishing House, 1989: 95–114 [文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 95–114]
- [36] Wen Qizhong, Yu Shuhua, Gu Weifei, et al. Preliminary study on the REE of loess [J]. Geochimica, 1981, (2): 151–157 [文启忠, 余素华, 顾雄飞, 等. 黄土中稀土元素的初步探讨[J]. 地球化学, 1981, (2): 151–157]
- [37] Li Xusheng, Han Zhiyong, Yan Dayuan, et al. REE geochemistry of Xiashu loess in Zhengjiang, Jiangsu province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 1–7 [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]
- [38] Sun J M. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203: 845–859
- [39] Mao Longjiang, Mo Duowen, Zhou Kunshu, et al. Short-term climate events in late glacial recorded by rare earth elements and sedimentary grain-size in Tableland profile in Liyang Plain, Hunan [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(2): 267–272 [毛龙江, 莫多闻, 周昆叔, 等. 澧阳平原晚冰期短尺度气候变化的风成沉积物稀土元素和粒度记录[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 267–272]
- [40] Wen X Y, Wang C S, Huang C M, et al. A novel method to assess the effect of diagenesis on fossil teeth: Rare earth element signatures[J]. Journal of Rare Earths, 2011, 29(7): 710–715
- [41] Sun J M. Source Regions and Formation of the Loess Sediments on the High Mountain Regions of Northwestern China[J]. Quaternary Research, 2002, 58(3): 341–351

- [42] Liu C Q, Masuda A, Okada A, et al. A geochemical study of loess and desert sand in northern China: Implications for continental crust weathering and composition[J]. *Chemical Geology*, 1993, 106:359–374
- [43] Metzger C A, Terry D O, Grandstaff D E. Effect of paleosol formation on rare earth element signatures in fossil bone[J]. *Geology*, 2004, 32(6):497–500
- [44] 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, 178:71–94
- [45] Beswick A E. An experimental study of alkali metal distributions in feldspars and micas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37(2):183–208
- [46] Jiang Xinsheng, Xu Jinsha, Pan Zhongxi. Microscopic features on quartz sand grain surface in the Cretaceous desert of Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3):416–421 [江新胜, 徐金沙, 潘忠习. 鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠石英沙颗粒表面特征[J]. *沉积学报*, 2003, 21(3):416–421]
- [47] Yin Xuebin, Sun Liqiang, Liu Xiaodong. Characteristics of quartz grain surface textures in the Antarctic ice-free area [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2003, 15(1):1–9 [尹雪斌, 孙立广, 刘晓东. 南极无冰区典型沉积环境石英砂表面结构特征及其在沉积环境识别中的应用[J]. *极地研究*, 2003, 15(1):1–9]
- [48] Doornkamp J C, Krinsley D. Electron microscopy applied to quartz grains from a tropical environment[J]. *Sedimentology*, 1971, 17(1–2):89–101
- [49] Sun Youbin, An Zhisheng. Sedimentary interpretation of surface textures of quartz grain from the eolian deposits [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(4):506–509 [孙有斌, 安芷生. 风尘堆积物中石英颗粒表面微结构特征及其沉积学指示[J]. *沉积学报*, 2000, 18(4):506–509]
- [50] Wang Ying, Deonarine B. Model atlas of surface textures of quartz sand [M]. Science Press, 1985. [王颖, 迪纳瑞尔 B. 石英表面结构模式图集[M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [51] Wang Xiangzhen, Wu Shiguo, Li Chuanrong, et al. Surface textures of quartz grain from a core of the Antarctic Prydz Bay [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 1997, 9(2):91–104 [王祥珍, 吴时国, 李传荣, 等. 南极普里兹湾柱样中石英颗粒的表面特征[J]. *极地研究*, 1997, 9(2):91–104]

Multi-material Source of Loess Deposits from the Jiuzhaigou National Nature Reserve on the Eastern Margin of the Tibetan Plateau

WEN Xingyue¹, TANG Ya², HUANG Chengmin², Gongbo Suolang³

(1. *Ecological Security and Protection Key Laboratory of Sichua Province, Mianyang Normal University, Mianyang 621000, China;*

2. *Department of Environmental Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;*

3. *Administration of Jiuzhaigou Nature Reserve, Jiuzhaigou 623402, China)*

Abstract: As an important archive to record environmental change, loess deposits need to be understood in terms of formation and material source to further reflect environment information. The formation of loess deposits and the provenance of loess material in the Jiuzhaigou National Nature Reserve on the eastern margin of the Tibetan Plateau were investigated based on the proxies of mineralogy, grain size distribution, rare earth and trace elements, and morphology of quartz grains in loess deposits. The results show that (1) the loess deposits in the study region are windblown dust accumulation derived from both neighboring glaciofluvial outwash deposits and remote windblown dusts; (2) the source of loess material in the study region differs from that of the southern margin of the Tibetan Plateau, indicating that the formation of loess deposits on the margin region of the plateau coupled with the mountain-valley breeze rather than the cold high pressure of the Plateau. Moreover, it should be cautious to judge the source of loess deposits using the pattern of rare earth elements.

Key words: Loess deposit; material source; formation cause; Jiuzhaigou National Nature Reserve; eastern margin of the Tibetan Plateau