

文章编号: 1008-2786-(2019)4-488-11
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000441

岷江上游晚更新世黄土粒度与元素组成特征 及其物源指示意义

文星跃¹, 吴 勇¹, 黄成敏², 罗明云¹, 谌 柯¹

(1. 西华师范大学 国土资源学院, 四川 南充 637009; 2. 四川大学 环境科学与工程系, 成都 610065)

摘 要: 岷江上游地区广泛分布黄土地层, 揭示其成因和物源对深入理解该区环境演变具有重要意义。以位于四川省茂县叠溪镇的晚更新世黄土剖面为研究对象, 分析了黄土粒度分布、粒径频率曲线和粒度参数以及元素地球化学特征, 并与北方黄土和邻近的成都粘土对比。结果表明叠溪黄土剖面粉砂 ($2 \sim 50 \mu\text{m}$) 平均含量达 81.59%, 且变异较小, 而粘粒 ($< 2 \mu\text{m}$) 和砂粒 ($> 50 \mu\text{m}$) 平均含量分别为 13.77% 和 4.95%, 相对北方黄土含较多 $1 \mu\text{m}$ 左右的细颗粒。粒径频率曲线和粒度参数特征表明叠溪黄土具有典型风成沉积特征, 沉积物主要由 $< 1000 \text{ m}$ 高度的近地表风力搬运沉积为主。叠溪黄土常量元素含量与北方黄土基本相同, 表现为明显的 Na 淋失而 K 相对稳定, 风化程度较低。 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Eu/Eu^* 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 和 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 等特征值以及 Zr、Th、Sc、La、Th、Ba、Sr、Rb、Pb 和 U 含量分布反映出叠溪黄土与北方黄土物源具有相似性, 均明显区别于成都粘土。末次冰期亚洲冬季风和邻近山原地带产生的重力风可能均对岷江上游黄土沉积发挥了重要作用。

关键词: 晚更新世黄土; 粒度; 元素组成; 物源意义; 岷江上游

中图分类号: P534.63; P642.13

文献标志码: A

黄土-古土壤序列蕴含丰富的过去环境变化信息, 是地学界研究的主要对象。我国黄土高原深厚的黄土地层对揭示第四纪亚洲季风气候的冷暖波动发挥了重要作用^[1-3]。利用黄土重建古环境前提之一是弄清其成因及物源, 以此才能更好地提取环境指标并准确解译古环境。岷江上游属青藏高原东缘的山原峡谷地貌区, 河流阶地上广泛出露黄土地层。前人^[4]通过野外考察认为这些黄土的物源及成因是由邻近的冰碛物经风力或流水搬运沉积所致, 目前已有的测年表明该区黄土发育时期为晚更新世^[5], 但仍缺乏对该区黄土的系统研究。岷江上游地区已发掘的史前文化遗址均分布在黄土地层上, 其所属的新石器文化与黄河流域的甘青文化及成都

平原古蜀文化联系紧密, 受到学者们的广泛关注^[6-8]。因此, 研究黄土成因及其蕴含的古环境信息, 对进一步理解该区古人类活动的环境背景具有重要意义。本文拟运用粒度和元素地球化学分析方法, 探究岷江上游叠溪黄土的成因及物源, 为进一步运用黄土地层重建古环境奠定基础。

1 材料与方法

1.1 样品采集和年代

叠溪黄土剖面位于四川省茂县叠溪镇小关村 (32°00'N; 103°41'E), 海拔 2394 m, 属岷江三级阶地。剖面无层理现象, 但垂直节理发育, 含两层颜色

收稿日期 (Received date): 2018-10-30; 改回日期 (Accepted date): 2018-12-11

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41671220, 41371225)。[National Natural Science Foundation of China (41671220, 41371225)]

作者简介 (Biography): 文星跃 (1970-), 男, 重庆市巴南区人, 博士, 教授, 主要研究方向: 土壤地理和区域环境演变。[WEN Xingyue (1970-), male, born in Banan, Chongqing, Ph. D., professor, research on soil geography and regional environmental evolution] E-mail: wenxy@cwnu.edu.cn

偏红的古土壤,未发现坡积或人为扰动的岩屑等其他侵入体,均呈粉砂质地、块状或团块状结构。整个剖面厚度距地表为 465 cm,未见底,其中近地表 200 cm 厚的黄土相对较为松散,可能被人类扰动较大,不排除后期因地震等原因崩塌堆积的可能。且在剖深 200 ~ 380 cm 地层均为黄土,故本文选取两层古土壤及相邻黄土,深度范围为 370 ~ 465 cm,间

隔 5 cm 连续取样,分析样品共计 19 个(图 1,表 1)。碳 14 和光释光年代分别在中国科学院地球环境研究所和南京大学测试,光释光测年数据仅测得最低年限(表 2),结合碳 14 年代和文献[5]对岷江上游三级阶地黄土底部年代 6.2 万年的测年认识,本文研究剖面应属晚更新世黄土,对应于北方马兰黄土。

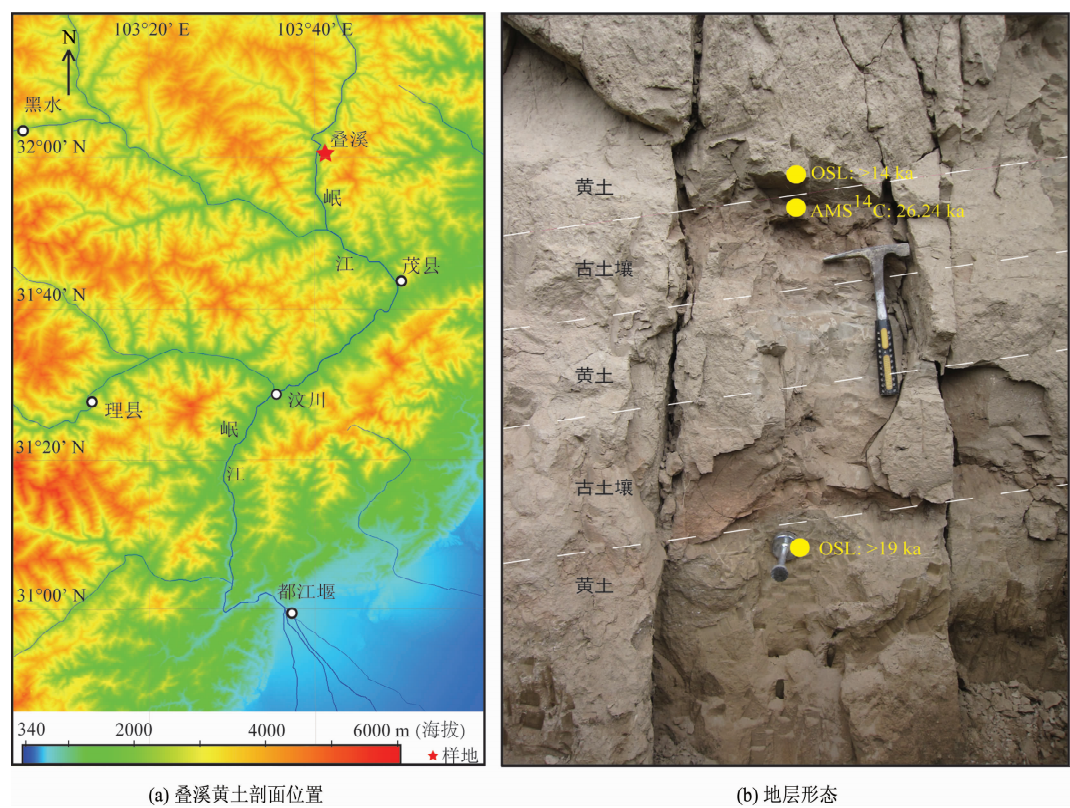


图 1 样地位置和黄土剖面形态

Fig. 1 Location and photo of the loess profile in Diexi

表 1 叠溪黄土剖面地层及形态描述

Tab. 1 Stratigraphic subdivisions and morphological features of the loess profile in Diexi

地层	深度/cm	样品个数	剖面基本特征
黄土(L ₁ LL ₁)	370 ~ 380	2	浅棕 10YR 7/3(干),黄棕 10YR 5/4(湿);粉砂均质,块状结构,较硬
古土壤(L ₁ SS ₁)	380 ~ 400	4	浅棕(褐色)7.5YR 6/3(干),棕色 7.5YR 5/4(湿);粉砂均质,块状结构,较硬;顶部见碳屑
黄土(L ₁ LL ₂)	400 ~ 420	4	上部浅灰 10YR 7/2(干),浅棕 10YR 6/3(湿);下部粉红 7.5YR 7/3(干),浅棕(褐色) 7.5YR 6/3(湿);粉砂均质,块状结构,较硬
古土壤(L ₁ SS ₂)	420 ~ 445	5	上部粉红 7.5YR 7/3(干),棕色 7.5YR 4/4(湿),下部为浅红棕 5YR 6/4(干),红棕 5YR 4/4(湿);粉砂均质,块状结构,较硬;顶部见碳屑
黄土(L ₁ LL ₃)	445 ~ 465	4	上部浅棕(褐色)7.5YR 6/4(干),棕 7.5YR 4/4(湿);下部为粉红 5YR7/3(干),棕 7.5YR 4/3(湿);粉砂质地,块状结构,较硬

1.2 实验方法

粒度供测样品为过 10 目筛土样,采用美国贝克曼库尔特公司生产的 LS13320 型激光粒度仪,测试前分别用 30% 的 H₂O₂ 和 10% 的 HCl 进行消煮后去除有机质和碳酸盐,然后经去离子水浸泡,静置 24 h 后吸去上层清液,确保样品呈中性再加入 0.05 mL/L 的六偏磷酸钠分散剂,最后用超声波清洗机振荡 5 分钟后测定。元素测试样品为过 200 目筛土样(<0.074 mm),其中常量元素在兰州大学采用荷兰 Panalytical B. V 公司 PW2403 型 X-射线荧光光谱仪测定;微量及稀土元素在中科院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室测试,仪器为四级杆型电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICP-MS)。

2 结果与分析

2.1 粒度特征

叠溪黄土剖面的颗粒组成整体上以粉砂

(2~50 μm)为主,含量介于 78.47%~83.81%,平均 81.59%,变异系数为 1.68%;其次为粘粒(<2 μm)组分,含量介于 9.57%~17.09%,平均 13.77%,变异系数为 17.44%;砂粒(>50 μm)含量最低,范围 1.56%~8.05%,平均 4.95%,变异系数达 33.51%。古土壤 L₁SS₂ 层颗粒大小相对较细,粘粒/砂粒比值最高,可能受成壤作用影响(表 3)。

粒径频率分布表现出双峰态特征(图 2a),主峰集中在 20~30 μm,而次峰处于 1 μm 左右,所有剖面 >100 μm 的颗粒极少,几乎不含 >200 μm 的颗粒。相较于北方第四纪风成黄土^[9],叠溪黄土粒径频率分布曲线的次峰频率略微偏大,说明 1 μm 左右的粘粒组分相对较多。粒径累积频率分布曲线在 5φ(约 32 μm)和 10~11φ(约 1~0.5 μm)处出现截点(图 2b),表现为三段式特征,两截点分别对应累积频率 25% 和 90%~95% 左右,说明高空悬移输送而来或经化学风化形成的细粘粒组分含量相对较少,黄土组分主要由 <1000 m 的近地表风力搬运沉

表 2 叠溪剖面测年数据

Tab.2 Dating results of the samples from the Diexi profile

AMS ¹⁴ C 测年										
实验室编号	样品号	材料	深度/ cm	δ ¹³ C/ ‰		pMC/ ‰		¹⁴ C Age/aBP		校正年代 /aBP
				δ ¹³ C	Error/ 1σ	pMC	Error/ 1σ	¹⁴ C age	Error/ 1σ	
XA17802	MXDX37	古土壤	380~385	-21.66	0.18	6.45	0.05	22024	68	26242
光释光测年										
实验室编号	样品号	深度/ cm	U/ppm	Th / ppm	K/ ‰	Q-De/ Gy	Aliquots Num.	W. C	Q-Dose rate	Q-Age/ ka
NJU1985	MXDX-L05	450	3.50 ± 0.12	14.6 ± 0.39	2.26 ± 0.06	>74	13	9.25	4.02 ± 0.21	>19
NJU1987	MXDX-L07	378	3.88 ± 0.13	12.2 ± 0.34	2.01 ± 0.06	>54	4	4.08	3.91 ± 0.22	>14

表 3 叠溪黄土剖面粒度特征值

Tab.3 Grain size features of the loess profile in Diexi

地层	深度/cm	粘粒	粉砂	砂粒	粘粒	平均粒径	标准偏差	偏度	峰度
		/%			/砂粒	φ			
黄土(L ₁ LL ₁)	370~380	9.83	83.81	6.62	1.35	6.51	1.72	0.62	2.88
古土壤(L ₁ SS ₁)	380~400	11.34	82.16	6.81	1.78	6.63	1.76	0.57	2.74
黄土(L ₁ LL ₂)	400~420	13.44	81.87	5.43	2.96	6.88	1.77	0.40	2.60
古土壤(L ₁ SS ₂)	420~445	15.58	81.33	3.26	5.46	7.10	1.75	0.33	2.42
黄土(L ₁ LL ₃)	445~465	16.22	79.98	3.86	4.53	7.10	1.79	0.33	2.43
平均值		13.77	81.59	4.95	3.53	6.89	1.76	0.43	2.57
变异系数/%		17.44	1.68	33.51	62.38	3.47	2.17	29.15	7.38

积而成^[10],同时粗尾段的缺失表明颗粒物不含近距离搬运的跃移或推移物质。整体看叠溪黄土粒径频率分布与中国不同地区典型风成黄土具有很好的一致性^[10, 11]。

粒度参数散点分布可用于判别沉积成因。由图

3 可知,叠溪黄土剖面粒度参数明显有别于河湖相沉积物,同时相较邻区同样具有风成成因^[12, 13]的成都粘土也更接近北方风成黄土^[14]。此外,整个剖面标准偏差变异较小具有一致性,且与北方黄土相似(表3,图3),表明黄土物源稳定,风化成壤作用对

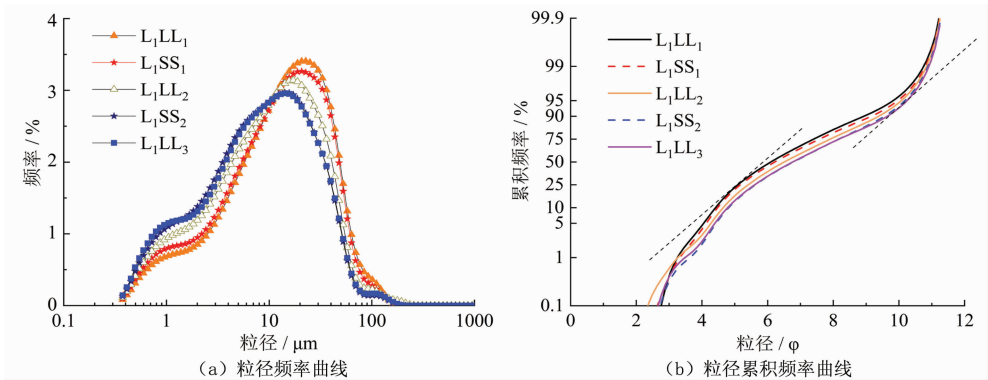


图 2 叠溪黄土粒径分布曲线
Fig.2 Grain size distribution curves of the loess in Diexi

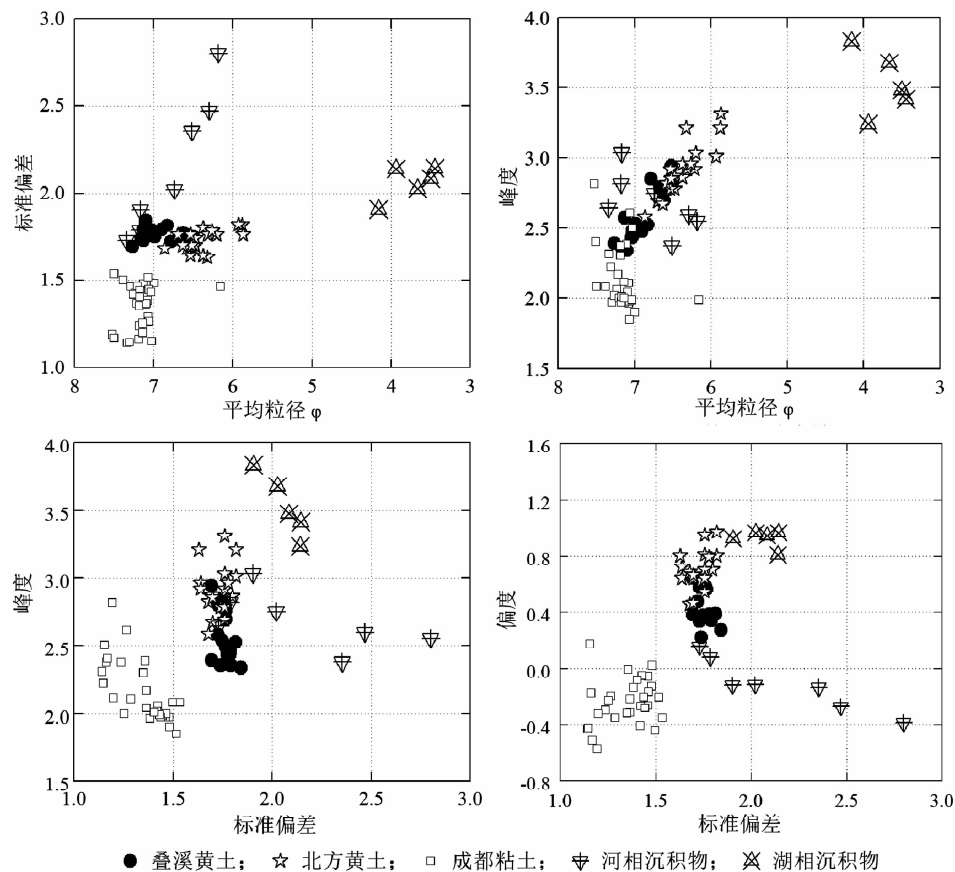


图 3 岷江上游与其他地区黄土粒度参数散点比较图
(北方黄土和河湖相沉积物粒度参数引自文献[14],成都粘土数据引自文献[12])
Fig.3 Comparison on grain size parameters between loess from Diexi and other place

颗粒的沉积分选性影响较弱。

2.2 元素化学特征

2.2.1 常量元素

叠溪黄土常量元素组成以 SiO_2 为主, 平均值 52.75%, 其他元素平均含量依次为 Al_2O_3 (14.26%) > CaO (8.23%) > Fe_2O_3 (5.82%) > K_2O (3.45%) > MgO (2.48%) > Na_2O (1.36%) > TiO_2 (0.79%)。相较上陆壳(UCC), 明显亏损 Na_2O 而富集 CaO , 说明处于矿物风化的早期阶段, 还未达到脱 K 的中等风化程度。叠溪黄土全量元素分布更接近于北方黄土, 而成都粘土 Na_2O 和 K_2O 含量更低, 表明其化学风化程度更高。相对北方黄土本文样品明显富集 CaO , 很可能跟样品未完全去除 CaCO_3 有关(图 4)。有研究表明^[15], 成都粘土化学风化强度已属中等, 在晚更新世期间成都平原相对北方黄土沉积区温暖湿润。

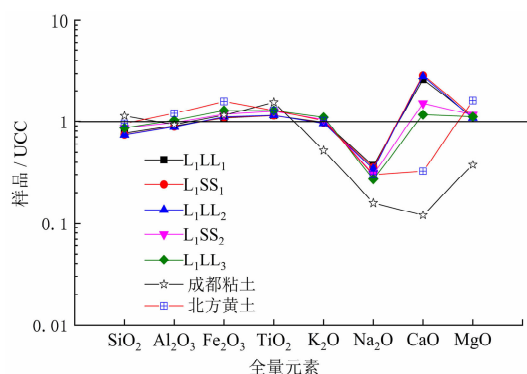


图 4 叠溪黄土与北方黄土、成都粘土常量元素 UCC 标准化丰度曲线分布比较图

(北方黄土数据引自文献[18], 成都粘土数据引自文献[15])

Fig. 4 Comparison on UCC-normalized pattern of major elements in the sediments between the Diexi loess, northern China loess and Chengdu clay

Al 和 Ti 溶解度在常量元素中表现较低, 且 Ti 含量随岩石类型而变化^[16], $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 摩尔比值常被用于辨识沉积物源^[17, 18]。顾兆炎等^[19]发现北方黄土不同粒度组分的 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值是一致的, 认为这个指标与风化作用不相关。沉积物早期化学风化阶段, 钾长石较斜长石稳定, 且 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 在不同的长石、云母及粘土矿物中有显著差异, 因此 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 也可用于指示沉积物源^[20]。图 5 表明叠溪黄土与北方黄土范围相近, 而明显有别于成都粘土。

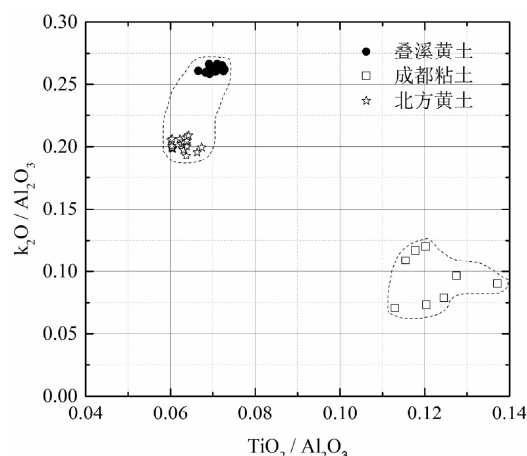


图 5 叠溪黄土与北方黄土、成都粘土

$\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ — $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 散点比较图

(北方黄土引自文献[18], 成都粘土数据引自文献[15])

Fig. 5 Comparison on scatter diagram of $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ in the sediments between the Diexi loess, northern China loess and Chengdu clay

2.2.2 稀土和微量元素

沉积物稀土元素(REE)特征主要受物源区背景值影响, REE 特征可以示踪沉积物物源^[21-23]。样品稀土元素含量如表 4 所示。叠溪黄土样品 REE 含量(不含 Y)变化范围为 165.76 ~ 202.33 $\mu\text{g/g}$, 平均值 184.51 $\mu\text{g/g}$, 略高于北方黄土, 如渭南黄土剖面平均值为 177.55 $\mu\text{g/g}$ ^[24], 洛川马兰黄土平均为 168 $\mu\text{g/g}$ ^[25]; 样品 REE 均值低于成都粘土^[15](均值 201.31 $\mu\text{g/g}$)。叠溪黄土剖面各地层 REE 分配模式均非常相似, 且与其他地区风成沉积物一致(图 6), 表明沉积物同样在沉积前经过充分混合, 从而与上陆地壳平均 REE 分配模式相似^[23]。

部分 REE 比值特征可用于指示沉积物物源差异^[26, 27]。元素 Eu^{3+} 在表生环境下较其他 REE^{3+} 稳定^[28], 而 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 Eu 异常(Eu/Eu^*), 因此沉积物 Eu/Eu^* 值可反映物源的差异。叠溪黄土 Eu/Eu^* 值分布范围较北方黄土广但较成都粘土窄, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 和 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值与北方黄土有较多的重合(图 7)。而且, 风化作用可导致沉积物中的轻重稀土元素发生分馏从而表现出 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值增加而 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值减少^[29], 叠溪黄土的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值明显较成都粘土偏高, 然而岷江上游气候特征较成都平原

表 4 叠溪黄土稀土元素含量(单位:μg/g)

Tab.4 Concentrations of rare earth elements from the Diexi loess (Unit:μg/g)

地层	野外编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
黄土 (L ₁ LL ₁)	MXDX35	40.10	78.80	8.98	32.90	6.18	1.24	5.62	0.89	4.75	1.00	2.99	0.42	2.85	0.41	187.12
	MXDX36	40.50	80.10	8.78	33.20	6.09	1.23	5.70	0.86	4.67	0.94	2.84	0.41	2.67	0.40	188.40
古土壤 (L ₁ SS ₁)	MXDX37	36.60	72.30	7.89	29.10	5.62	1.15	5.38	0.82	4.51	0.92	2.65	0.39	2.48	0.39	170.18
	MXDX38	37.90	73.50	8.55	31.60	6.01	1.15	5.28	0.85	4.73	0.96	2.73	0.40	2.66	0.40	176.72
	MXDX39	40.70	79.90	9.35	34.70	6.43	1.36	5.74	0.94	5.03	1.05	2.95	0.44	2.77	0.41	191.78
	MXDX40	40.50	76.90	9.06	33.40	6.22	1.31	5.61	0.92	5.18	1.04	3.04	0.42	2.76	0.42	186.78
黄土 (L ₁ LL ₂)	MXDX41	36.00	68.50	7.85	28.90	5.50	1.11	5.16	0.82	4.63	0.97	2.82	0.41	2.70	0.40	165.76
	MXDX42	38.60	75.40	8.68	33.00	5.99	1.23	5.48	0.90	5.03	1.01	2.94	0.44	2.78	0.40	181.87
	MXDX43	37.60	72.10	8.31	31.70	5.81	1.22	5.52	0.87	4.79	1.00	2.86	0.41	2.67	0.41	175.26
	MXDX44	36.00	69.90	8.09	29.70	5.57	1.20	5.26	0.81	4.44	0.91	2.70	0.38	2.48	0.39	167.84
古土壤 (L ₁ SS ₂)	MXDX45	40.00	77.30	8.73	33.10	6.16	1.30	5.74	0.92	5.42	1.09	3.15	0.48	2.97	0.46	186.82
	MXDX46	39.30	75.70	9.10	33.20	6.41	1.32	5.81	0.89	5.14	1.02	3.07	0.43	2.82	0.41	184.62
	MXDX47	41.40	78.50	9.37	34.90	6.57	1.35	5.88	0.89	5.05	0.99	3.06	0.42	2.74	0.41	191.53
	MXDX48	40.60	77.30	8.91	34.50	6.41	1.27	5.89	0.91	4.90	1.01	3.01	0.43	2.72	0.41	188.27
	MXDX49	38.90	72.80	8.92	32.90	6.24	1.28	5.86	0.89	5.03	1.05	3.12	0.43	2.88	0.45	180.76
黄土 (L ₁ LL ₃)	MXDX50	43.20	81.10	9.77	37.60	7.45	1.44	6.52	1.02	5.67	1.15	3.35	0.46	3.14	0.46	202.33
	MXDX51	43.30	81.10	9.73	36.20	7.22	1.46	6.27	0.98	5.59	1.09	3.15	0.48	2.93	0.42	199.92
	MXDX52	42.30	78.80	9.53	35.30	7.02	1.32	6.33	0.93	5.25	1.03	3.00	0.44	2.85	0.41	194.51
	MXDX53	40.00	75.80	9.11	33.40	6.47	1.32	5.66	0.88	5.00	1.01	2.92	0.42	2.76	0.41	185.15

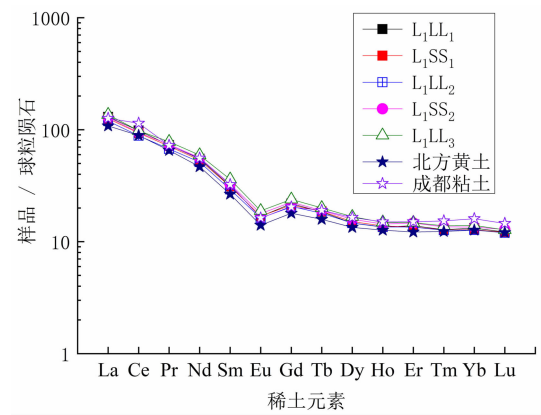


图 6 叠溪黄土剖面稀土元素分配模式
(北方黄土引自文献[18],成都粘土引自文献[15])

Fig.6 Chondrite - normalized REE patterns of the Diexi loess, northern China loess and Chengdu clay

冷干,且全量元素特征表现出成都粘土的风化强度相对较强。上述表明叠溪黄土部分物源与北方黄土吻合,但与成都粘土物源不一致。

元素 Sc、La、Zr、Th、Ba、Sr、Rb、U、Pb 等也常被用于示踪沉积物源^[13,26,27,31],样品微量元素含量如表 5 所示。在 Zr - Th - Sc 和 Sc - La - Th 三角图中

(图 8),叠溪黄土也与北方黄土重合度较大,明显区别于成都粘土。图 9 表明叠溪黄土与北方黄土在 Ba/Sr - Rb/Sr 与 U/Pb - Th/U 散点图中分布趋势基本一致,说明物源具有相似性。

3 讨论

岷江上游叠溪黄土颗粒组分以粉砂为主,平均含量达 81.52%,其在剖面分布差异较小,变异系数仅为 1.68%(表 3),而 >100 μm 的粗颗粒含量极少,粒度组成、粒径频率分布和粒度参数符合典型风成黄土沉积特征(图 2 和图 3),因此叠溪黄土应为风成沉积物。粒度标准偏差与分选性有关,剖面中古土壤粒度标准偏差与黄土相近,表明成壤作用并未影响颗粒的沉积分选,古土壤发育较弱。相对北方黄土,叠溪黄土具有较多 1 μm 左右的细颗粒组分,其成因很可能是相同物源情况下,传输距离越远颗粒沉积越细所致。有研究表明^[10],亚洲冬季风主要为 <1000 m 高度的近地表风,其对北方黄土沉积贡献较大,而高空的西风环流仅对 <5 μm 左右的细

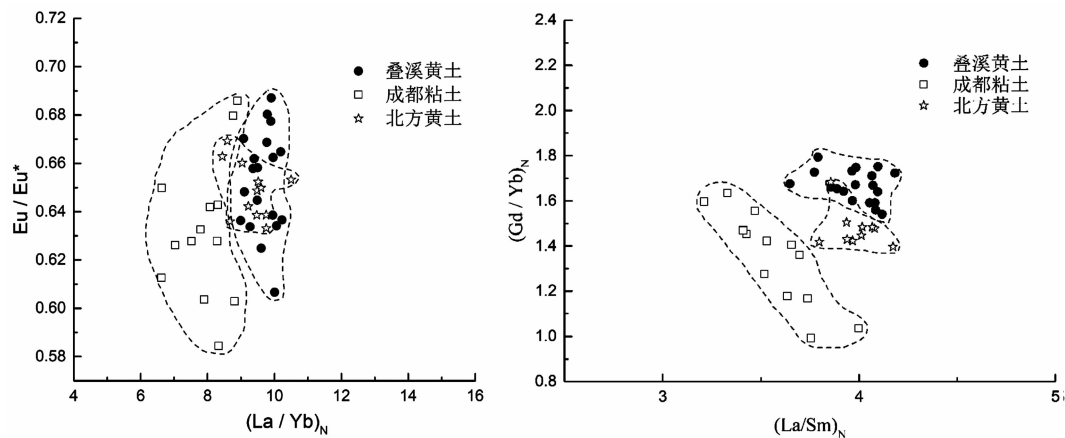


图 7 叠溪黄土与北方黄土、成都粘土稀土元素比值散点比较图
(北方黄土数据引自文献[18, 30], 成都粘土数据引自文献[15])

Fig. 7 Eu/Eu^* vs. $(La/Yb)_N$ and $(Gd/Yb)_N$ vs. $(La/Sm)_N$ diagrams comparing the Diexi loess, northern China loess and Chengdu clay

表 5 叠溪黄土微量元素含量

Tab. 5 Concentrations of trace elements from the Diexi loess

地层	野外编号	Zr	Ba	Sc	Rb	Pb	Th	U	Sr	Ba/Sr	Rb/Sr	Th/U	U/Pb
		/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)											
黄土 (L ₁ LL ₁)	MXDX35	218.00	621.00	12.60	122.00	23.50	13.80	3.48	305.00	2.04	0.40	3.97	0.15
	MXDX36	211.00	597.00	12.40	117.00	22.60	13.20	3.63	348.00	1.72	0.34	3.64	0.16
古土壤 (L ₁ SS ₁)	MXDX37	202.00	595.00	11.10	118.00	22.20	12.10	3.61	398.00	1.49	0.30	3.35	0.16
	MXDX38	210.00	567.00	12.40	113.00	21.50	13.00	3.63	349.00	1.62	0.32	3.58	0.17
	MXDX39	220.00	594.00	12.90	114.00	23.40	14.20	3.68	313.00	1.90	0.36	3.86	0.16
	MXDX40	212.00	580.00	12.50	118.00	23.40	14.50	3.83	338.00	1.72	0.35	3.79	0.16
黄土 (L ₁ LL ₂)	MXDX41	204.00	569.00	11.70	116.00	22.60	13.20	3.71	338.00	1.68	0.34	3.56	0.16
	MXDX42	223.00	574.00	12.40	119.00	24.10	13.70	3.72	288.00	1.99	0.41	3.68	0.15
	MXDX43	192.00	581.00	12.20	121.00	23.20	13.80	3.58	334.00	1.74	0.36	3.85	0.15
	MXDX44	191.00	573.00	11.80	120.00	23.20	13.00	3.47	330.00	1.74	0.36	3.75	0.15
古土壤 (L ₁ SS ₂)	MXDX45	203.00	594.00	13.20	123.00	25.90	14.40	3.70	282.00	2.11	0.44	3.89	0.14
	MXDX46	204.00	586.00	13.30	125.00	25.80	13.90	3.55	251.00	2.33	0.50	3.92	0.14
	MXDX47	203.00	603.00	13.00	120.00	26.00	14.60	3.69	258.00	2.34	0.47	3.96	0.14
	MXDX48	201.00	578.00	13.00	117.00	25.70	14.50	3.41	272.00	2.13	0.43	4.25	0.13
	MXDX49	196.00	575.00	12.80	116.00	25.10	13.70	3.43	293.00	1.96	0.40	3.99	0.14
黄土 (L ₁ LL ₃)	MXDX50	212.00	593.00	14.50	133.00	27.60	15.50	3.35	216.00	2.75	0.62	4.63	0.12
	MXDX51	198.00	591.00	13.90	132.00	27.10	14.70	3.41	222.00	2.66	0.59	4.31	0.13
	MXDX52	209.00	570.00	13.50	129.00	25.70	14.00	3.20	233.00	2.45	0.55	4.38	0.12
	MXDX53	202.00	558.00	12.30	120.00	25.10	13.80	3.46	259.00	2.15	0.46	3.99	0.14

颗粒搬运发挥作用。叠溪黄土粒径频率主峰集中在 20 ~ 30 μm 左右,表明黄土颗粒主要由近地表风力搬运而来。

叠溪黄土常量元素组成特征与北方黄土相近,相对 UCC 出现 Na 亏损,而 K 未淋失,表明矿物风

化程度较弱(图 4),均明显区别于风化程度较强的成都粘土^[15]。TiO₂/Al₂O₃ - K₂O/Al₂O₃ 散点比较图表明叠溪黄土显著区别于成都粘土而与北方黄土接近(图 5)。稀土元素分配模式显示(图 6)叠溪黄土、北方黄土及成都粘土均与上陆壳分配模式一致,

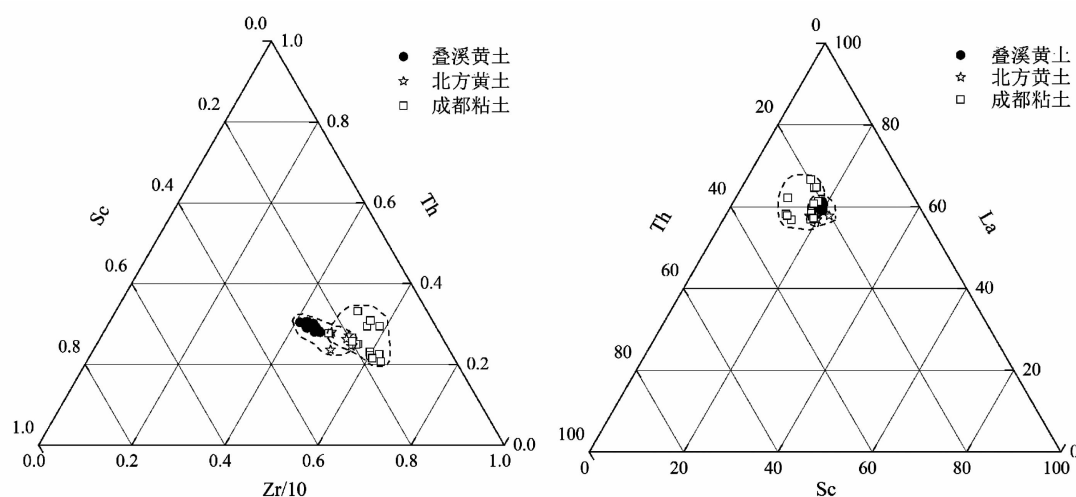


图8 叠溪黄土与北方黄土、成都粘土 Zr-Th-Sc 和 Sc-La-Th 三角图

(成都粘土引自文献[15], 北方黄土引自文献[30])

Fig. 8 Ternary diagrams for Zr-Th-Sc and Sc-La-Th comparing the Diexi loess, northern China loess and Chengdu clay

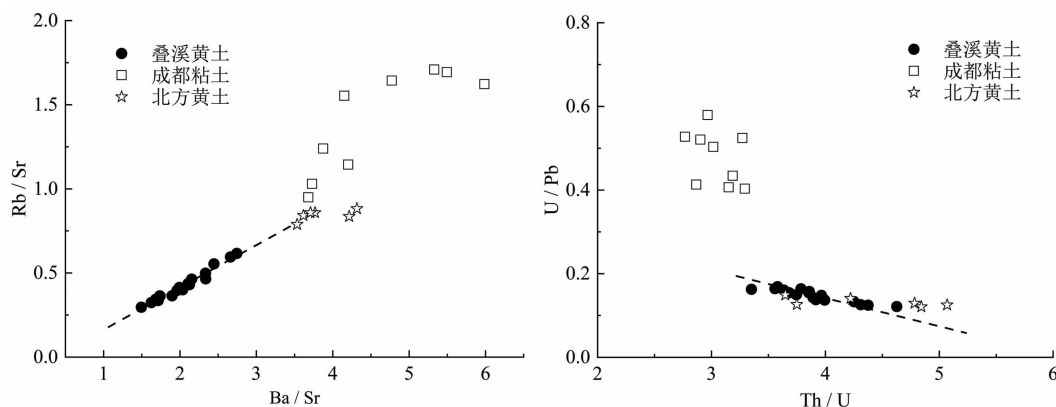


图9 Ba/Sr-Rb/Sr 与 U/Pb-Th/U 散点分布比较图

(成都粘土引自文献[13], 北方黄土引自文献[30])

Fig. 9 Ba/Sr vs. Rb/Sr and U/Pb vs. Th/U diagrams comparing the Diexi loess, northern China loess and Chengdu clay

表明沉积物在沉积前均经历了充分混合,但不能区别物源的差异^[32]。而一些稀土元素和微量元素比值很好地保留了源区信息,具有示踪意义^[18,26,27,30,31]。叠溪黄土剖面中的 Eu/Eu^* 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 和 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值分布范围与北方黄土有差异但又部分重合,且明显区别于邻近的成都粘土(图7),表明叠溪黄土除了含有与北方黄土同源的颗粒组分外,还有其他有别于成都粘土的物质来源。微量元素 Zr-Th-Sc、Sc-La-Th 三角图(图8)和 Ba/Sr-Rb/Sr、U/Pb-Th/U 散点图(图9)也同样表明叠溪黄土更多地与北方黄土相近,而与成都粘土区别较大。整体上看,叠溪黄土物源与北方黄土具有较多的相似性,但完全区别于成都

粘土。

最近的研究表明^[13,33],发育于晚更新世的成都粘土主要受古重力风(Katabatic wind)影响,其物质来源主要为附近的河流相沉积物及下伏白垩系砂岩风化产物等,属近源性风成沉积。重力风是指因地心引力作用下沿山坡下降的风^[34-35],青藏高原东缘山原峡谷地带因地形起伏大,密度较大的冷空气下沉沿坡面流动而极易产生重力风^[13]。重力风对地表的侵蚀搬运也是一些地区黄土堆积的成因^[36-38]。亚洲冬季风携带的近地表风尘颗粒可能受秦岭山脉的影响而无法送达成都平原,而青藏高原冬季风和西风急流因海拔较高原因,不利于长距离输送 $>20\ \mu\text{m}$ 粒径的颗粒^[13]。同样,本文样品 $>20\ \mu\text{m}$

的颗粒组分相对较多,高空远程输送不太可能,沉积物应该为近地表风力搬运为主。如果因青藏高原冬季风带来风尘物,研究区与邻近的成都平原风成物质应该在元素组成上相近,然而前述表明并非如此。因此,叠溪黄土极可能是因重力风和亚洲冬季风共同搬运沉积而来。尽管受龙门山脉和秦岭山脉的影响,阻碍了来自北方的冬季风对成都平原的影响,然而岷江上游河谷及邻近山脉均以南北走向为主,样地海拔近 2400 m,且北连松潘高原,来自北方的冬季风极易到达此处。因此,叠溪黄土含有部分与黄土高原同源的风尘物是可能的,同时,受晚更新世以来气候冷暖波动及地形强烈起伏产生的局地重力风影响,附近地表沉积物和风化产物也可能是黄土堆积的物质来源,邻近的九寨沟黄土也具有类似的多源性特征^[32]。进一步的证据需对邻近区域不同沉积相开展系统取样,采用石英颗粒微形态、放射性元素示踪等方法开展工作。

4 结论

(1)岷江上游晚更新世黄土颗粒组成以粉砂为主,不含坡积特征和近距离推移或跃移搬运的颗粒组分,粒径频率分布和粒度参数具有典型风成黄土特征,应属风成沉积物;搬运动力主要为 <1000 m 高度的近地表风。

(2)岷江上游晚更新世黄土全量元素含量较上陆壳 Na_2O 亏损而 K_2O 未出现淋溶,与北方黄土基本一致,黄土和古土壤均表现较弱的风化程度; $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 散点图表明岷江上游黄土物源与北方黄土相似而与邻近的成都粘土区别较大。

(3)稀土和微量元素 $\text{Eu}/\text{Eu}^* - (\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} - (\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 、 $\text{Ba}/\text{Sr} - \text{Rb}/\text{Sr}$ 和 $\text{U}/\text{Pb} - \text{Th}/\text{U}$ 散点分布以及 $\text{Zr} - \text{Th} - \text{Sc}$ 和 $\text{Sc} - \text{La} - \text{Th}$ 三角图显示岷江上游黄土物质来源与北方黄土具有较大相似性但不完全重合,表明物源既有相似性又存在差异;然而岷江上游黄土这些特征明显区别于成都粘土。

(4)受晚更新世亚洲冬季风盛行的影响,岷江上游黄土具有与北方黄土同源的物质来源,同时含有部分因重力风而形成的近源性风成沉积物;岷江上游黄土风成沉积可能受到末次冰期强盛的亚洲冬

季风和因地形起伏较大而形成重力风的双重影响。

参考文献 (References)

- [1] AN Zhisheng, KUKLA G J, 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**(1):29 - 36.
- [2] KUKLA G. Loess stratigraphy in central China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1987, **6**(3/4):191 - 219.
- [3] LIU Tungsheng. Loess and the environment [M]. Beijing: China Ocean Press, 1985: 1 - 50.
- [4] 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. [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]
- [5] 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, 2005:53 - 60. [YANG Wenguan. Research of sedimentary record in terraces and climate vary in upper reaches of Minjiang River, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005:53 - 60]
- [6] 辛中华. 岷江上游新石器时代遗存及相关问题探讨 [J]. *四川文物*, 2005, (1): 9 - 14, 39. [XIN Zhonghua. Discussion on Neolithic site in the upper reaches of Minjiang river [J]. *Sichuan Cultural Relics*, 2005, (1):9 - 14, 39]
- [7] 沈长云. 论古蜀文明的起源与其特征 [J]. *中华文化论坛*, 2010, (3): 35 - 39. [SHENG Changyun. The origin of ancient Shu civilization and its characteristic [J]. *Forum on Chinese Culture*, 2010, (3):35 - 39]
- [8] 文星跃. 岷江上游与成都平原史前文化演变及环境驱动 [J]. *西华师范大学学报 (自然科学版)*, 2017, **38**(2):199 - 206. [WEN Xingyue. Prehistorical cultural evolution triggered by environmental change in the upper Minjiang river and Chengdu plain [J]. *Journal of China West Normal University (Natural Sciences)*, 2017, **38**(2):199 - 206]
- [9] 庞奖励,黄春长,周亚利,等. 汉江上游谷地全新世风成黄土及其成壤改造特征 [J]. *地理学报*, 2011, **66**(11):1562 - 1573. [PANG Jiangli, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. Holocene aeolian loess and its pedogenic modification in the upper Hanjiang river valley, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(11):1562 - 1573]
- [10] 孙东怀,鹿化煜,DAVIE R,等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义_孙东怀 [J]. *沉积学报*, 2000, **18**(3):327 - 335. [SUN Donghuai, LU Huayu, DAVID R, et al. Bimode grain size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, **18**(3):327 - 335]

- [11] 朱丽东,叶玮,周尚哲,等. 中亚热带第四纪红粘土的粒度特征[J]. 地理科学,2006,26(5):586-591. [ZHU Lidong, YE Wei, ZHOU Shangzhe, et al. Grain size features of red earth in Mid-subtropics [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(5): 586-591]
- [12] 应立朝,梁斌,王全伟,等. 成都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. Grain size analysis and origin of the Chengdu clay from the Chengdu plain, Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(1): 72-77]
- [13] FENG Jinliang, HU Zhaoguo, JU Jianting, et al. The dust provenance and transport mechanism for the Chengdu Clay in the Sichuan Basin, China [J]. Catena, 2014, 121:68-80.
- [14] QIAO Yansong, GUO Zhengtang, HAO Qingzhen, et al. Grain-size features of a Miocene loess-soil sequence at Qinan; implications on its origin [J]. Science in China: Series D, 2006, 49(7):731-738.
- [15] 应立朝,梁斌,王全伟,等. 成都粘土地球化学特征及其对物源和风化强度的指示[J]. 中国地质,2013,40(5):1666-1674. [YING Lichao, LIANG Bing, WANG Quanwei, et al. Geochemical characteristics of Chengdu clay and their implication for provenance and weathering intensity [J]. Geology in China, 2013, 40(5):1666-1674]
- [16] LI Yanhui. A compendium of geochemistry: from solar nebula to the human brain [M]. Princeton: Princeton University Press, 2000:475.
- [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] HAO Qingzhen, GUO Zhengtang, QIAO Yansong, 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.
- [19] 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]
- [20] 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.
- [21] 杨守业,李从先. 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. [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]
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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. [LIU Tungsheng. Loess and arid environment [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2009:325-328]
- [25] 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京:科学出版社,1989:95-114. [WEN Qizhong. Geochemistry of loess in China [M]. Beijing: Science Publishing House, 1989:95-114]
- [26] SUN Jimin. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203:845-859.
- [27] LIU Congqiang, 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(3/4):359-374.
- [28] 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.
- [29] 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(3):341-352.
- [30] LIANG Meiyan, GUO Zhengtang, KAHMANN A J, et al. Geochemical characteristics of the Miocene eolian deposits in China: Their provenance and climate implications [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2009, 10(4):1-16, DOI: 10.1029/2008GC002331.
- [31] SUN Jimin, LI Shenghua, 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.
- [32] 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]
- [33] FENG Jinliang, JU Jianting, CHEN Feng, et al. Identification of a late Quaternary alluvial-aeolian sedimentary sequence in the Sichuan Basin, China [J]. Quaternary Research, 2016, 85(2):279-289.
- [34] ATKINSON B W. Meso-scale atmospheric circulations [M]. London: Academic Press, UK, 1981:495.

- [35] MACKAY J R, BURN C R. A long-term field study (1951 – 2003) of ventifacts formed by katabatic winds at Paulatuk, western Arctic coast, Canada [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2005, **42**(9):1615 – 1635.
- [36] THORSON R M, BENDER G. Eolian deflation by ancient katabatic winds: a late quaternary example from the north Alaska Range [J]. Geological Society of America Bulletin, 1985, **96**(6):702 – 709.
- [37] MUHS D R, BUDAHN J R. Geochemical evidence for the origin of late Quaternary loess in central Alaska [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2006, **43**:323 – 337.
- [38] SCHAEZTL R J, ATTIG J W. The loess cover of northeastern Wisconsin [J]. Quaternary Research, 2013, **79**(2):199 – 214.

Grain Size & Elements Composition Characteristics and Their Implications for Provenance of the Late Pleistocene Loess in the Upper Reaches of the Minjiang River, China

WEN Xingyue¹, WU Yong¹, HUANG Chengmin², LUO Mingyun¹, CHEN Ke¹

(1. College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637009, China;

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

Abstract: Investigation on the origin and provenance of the loess deposits, dotted extensively in the upper reaches of the Minjiang river, is necessary for further understanding regional environmental evolution. The Diexi loess, located in Maoxian county in Sichuan Province and deposited in the late pleistocene, were investigated and compared with the windblown sediments in northern China and clay in Chengdu plain, in terms of grain size distribution, frequency curve, particle size parameters and element geochemical features. The results showed that the silt fraction (2 ~ 50 μm) was dominant in the Diexi loess with an average concentration of 81.59% and a low coefficient of variation, while the clay (< 2 μm) and sand (> 50 μm) average concentrations are 13.77% and 4.95%, respectively. More fine particles of ~ 1 μm presented in the samples compared to northern loess. From the grain size frequency curves and particle size parameters, the Diexi loess were windblown dusts and were transported by near-surface wind that less than 1000 m high. The major elements contents of the Diexi loess were similar to those of the loess of northern China, as both showed leaching Na and stable K. The provenance of the Diexi loess was similar to that of the loess in northern China while significantly different from that of the Chengdu clays, demonstrated by the characteristic values of $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Eu/Eu^* 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ and $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$, and the concentration distributions of Zr、Th、Sc、La、Th、Ba、Sr、Rb、Pb and U. Our study suggested that the remote windblown dusts influenced by Asian winter monsoon and neighboring particles transported by katabatic winds may be both material sources of the loess in the upper reaches of the Minjiang river.

Key words: late pleistocene loess; grain size; element composition; provenance meaning; the upper reaches of the Minjiang River