

成都粘土中石英的粒度分布及其表面微结构特征

胡兆国^{1 2 3}, 冯金良^{1 2}, 鞠建廷^{4 5}

(1 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 2 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100085;
3 中国科学院研究生院, 北京 100049 4 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
5 中国科学杂志社, 北京 100717)

摘要: 对成都粘土以及相邻的川西黄土(青藏高原东部黄土)和北部黄土(秦岭山地及黄土高原黄土)的石英粒度分布和石英表面微结构进行了研究。结果显示大部分成都粘土的石英颗粒粒度频率曲线与川西黄土、北部黄土相似, 为单峰分布, 但有些成都粘土样品表现为双峰分布。成都粘土的石英粒度组成、粒度参数与川西黄土和北部黄土存在差异, 成都粘土以粉砂粒级为主, 有较好的分选。成都粘土的石英颗粒表面微结构与北部黄土存在差异, 成都粘土石英颗粒表面的三角形撞击坑和碟形坑较深, 轮廓线明显呈规则排列, 表现出水下环境形成的特征。依据石英粒度分布和石英表面微结构特征, 对成都粘土成因和物源进行了初步讨论。

关键词: 成都粘土; 四川盆地; 青藏高原; 黄土高原; 秦岭; 风尘堆积; 物源

中图分类号: P575 文献标识码: A

“成都粘土”原称“成都土”(Chengtu Clay)由土壤学家梭颇(James Thorp)和戴意(Daniel S. Dye)^[1]在1936年命名。用以指示分布在四川盆地西部、西北部丘陵以及高阶地上的棕黄色、灰棕色的富含钙质结核的塑性粘土, 并指出其可能为风尘堆积。随后的几十年里越来越多的学者开始对成都粘土的成因及物源进行研究。马溶之^[2](1944)认为成都粘土与马兰黄土相当。但也有些学者^[3 4]对成都粘土的成因提出了不同的观点, 认为它与下伏的雅安砾石层同属冰水成因。一些地质调查工作者^[5]认为成都粘土是水成和风成混合成因。也有一些地质工作者^[6-9]认为成都粘土是冲积成因。费美高等^[10](1995)认为成都粘土是晚更新世龙门山山前形成的沉积物。钱洪和唐荣昌^[11](1997)认为成都平原的沉积是岷江、沱江等主要水系进入成都平原后的河流相沉积, 并且不排除冰水沉积的可能性。张品萃等^[12](1999)认为成都粘土是冰水沉积物。一些地质调查工作者^[13 14]和一些学者^[15-23]则

指出成都粘土是风尘堆积的产物。

对于冲积和冰水堆积论者, 成都粘土物质来源于川西北的河流侵蚀、冰川磨蚀和冰缘寒冻风化形成的碎屑物质。成都粘土的物质来源争议最大的是风成论者。其物质来源主要集中在三个地区: 一是西北沙漠以及北部毛乌素等沙漠, 即蒙新沙漠地区^[1 2 16 17]。二是青藏高原区。方小敏等^[19 20 24-28]提出青藏高原中西部是一个重要的粉尘源区, 青藏高原冬季风和西风带可将粉尘搬运至高原的东侧及邻区^[19]; 并认为秦岭以南为冷黄土区, 物质主要来源于青藏高原^[19 24 25]。但张小曳等^[29 30]认为青藏高原不具备粉尘源区条件。三是近距离搬运堆积^[21]。汪波等^[21]认为成都粘土是晚更新世龙门山的冰缘区冰川堆积物等经风蚀并搬运到成都平原堆积所致。乔彦松等^[22]认为成都粘土的风尘物质主要来源于当地。

粒度分析已经广泛应用到沉积物的成因分析研究中^[22 31-39 40-44]。由于石英稳定的物理、化学性

收稿日期(Received date): 2010-01-03; 改回日期(Accepted): 2010-04-23.

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(编号 40771028)。[National Nature Science Foundation of China 40771028]

作者简介(Biography): 胡兆国(1983-)男(汉族), 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向地貌与第四纪地质。[Hu ZhaoGuo(1983-), Male, Linyi Shandong Province, Master Candidate, Research in Geomorphology and Quaternary Geology] Mobile 13601248305 E-mail zhongguoren-hu@163.com

质, 在搬运、沉积和后期成壤作用过程中受到的改造较小, 其粒度组成代表着原始粉尘的粒度组成^[45-46]; 而在石英颗粒表面保留着搬运过程中形成的微结构, 这些表面结构比较稳定, 不易消失^[47]。因此越来越多的学者利用石英粒度分析和石英表面微结构研究沉积物的成因以及物质来源^[48-49-54]。因此本文尝试利用石英的粒度分析结合石英表面微结构, 对成都粘土的成因和物质来源进行初步研究。

成都粘土有广义和狭义之分, 广义的成都粘土是指雅安砾石层之上的土层, 包括成都粘土和网纹红土; 狭义的成都粘土是指含有钙质结核的第一层粘土层。本文研究的成都粘土是指狭义的成都粘土。

成都粘土成因和物质来源的研究对解决以下问题有重要意义: 成都粘土的物质堆积受到区域气候系统的控制, 为以后对沉积环境和气候的研究奠定基础。成都粘土分布区紧邻青藏高原, 为研究青藏高原对东亚环境的影响提供信息。此外, 对广大南方地区其他第四纪沉积物来源的研究亦有重要意义。成都粘土是裂隙性和胀缩性粘土, 是一类对工程建筑物具有特殊危害作用的土体^[10-55-56]。成因与物源的研究, 对于了解这一类土体中裂隙的成因、滑坡的形成、地基的变形等工程地质问题具有较强的理论和实践意义^[57-60]。因此对成都粘土的成因和物质来源的研究具有重要的科学和实践意义。

1 样品和方法

我们采取类比和归纳方法, 选取两条横断面: 一是东西向横断面, 从川西黄土到成都粘土分布区; 二是南北向横断面, 从黄土高原黄土到成都粘土分布区。依据石英粒度特征和石英表面微结构特征, 初步探讨成都粘土与川西黄土以及北部黄土的成因和物源关系。

本文研究的成都粘土剖面主要位于成都市东部、东南部以及北部, 共选取 18 个剖面的成都粘土样品; 在青藏高原东部共选取 11 个黄土剖面的 L1 层黄土样品 (统称川西黄土); 在秦岭山地和黄土高原采集 L1 黄土样品 5 个 (统称北部黄土); 在金堂剖面采集 4 个样品。详细采样点见表 1 和图 1。用现在较为成熟的 $K_2S_2O_7$ 熔融 $-H_2SiF_6$ 浸泡的化学方法提取纯石英^[62], 并在中国地质科学院矿产资源研究所 D Max-2400 型衍射仪上检验石英纯度, X

衍射结果显示无其他矿物。在中国科学院地理资源研究所 Malvern 2000 上进行石英粒度测量, 测量范围在 0.02~2 000 μm 间。在中国科学院地质与地球物理研究所扫描电镜实验室 LEO1450VP 型扫描电镜上观察石英表面微结构形态。

2 结果

2.1 石英重量百分含量

成都粘土中石英含量平均为 37.5%, 最高含量达 43.9%, 最低含量为 28.8%。北部黄土的石英含量平均为 38.2%, 最高含量为 55.6%, 最低含量为 27.8%。川西黄土石英含量平均为 36.5%, 最高含量为 50.1%, 最低含量为 24.7%。如图 2 所示, 在南北向区域上石英含量没有规律变化, 北部黄土石英含量变化较大, 成都粘土的变化较小。东西向区域上川西黄土石英含量有由西向东逐渐减少的趋势, 但是在金川以东石英含量增加。石英含量最高的是北部黄土, 其次是成都粘土, 川西黄土的石英含量最少。

2.2 石英粒度分布特征

2.2.1 石英粒度组成

北部黄土石英粒度组成主要由粉粒级 (5~50 μm) 为主, 砂粒级 ($>50 \mu\text{m}$) 占有一定比例, $>100 \mu\text{m}$ 颗粒很少。以秦岭为界, 秦岭以北由北向南有变细的趋势, 粉粒级石英颗粒含量增多, 砂粒级石英颗粒含量减少。在位于秦岭山顶的 FZ1-3 砂粒级石英颗粒含量有所增加。秦岭以南, 砂粒级石英颗粒含量没有减少的趋势, 在广元剖面 GJH1-3 样品 $>50 \mu\text{m}$ 砂粒级石英颗粒含量高达 15.5%, 高于宝鸡剖面 LH1-3 样品。

川西黄土粉粒级石英颗粒含量明显比北部黄土要少, 砂粒级石英颗粒含量要多。川西黄土 $>50 \mu\text{m}$ 的石英颗粒含量远远多于北部的黄土, 高达 47.5%。以金川为界, 金川以西黄土的砂粒级石英颗粒含量很高, 由西向东砂粒级石英颗粒含量逐渐减小, 粉粒级石英颗粒含量增加, 但总体上砂粒级石英颗粒含量远远高于粉粒级石英颗粒含量。金川以东直至成都附近, 砂粒级石英颗粒含量明显要低于金川以西的黄土, 略微高于北部黄土, 并且金川以东的黄土砂粒级石英颗粒含量没有明显的变化。由图 3(B、C) 可见川西黄土中砂粒级石英颗粒含量最多, 粉粒级石英颗粒含量较少。

表 1 采样点详细分布
Table 1 Detail sites of samples

样品号	层位	采样深度 (m)	地理位置		行政隶属	海拔 (m)
			N	E		
DT1-2	成都粘土	0.43	31°6.337'	105°6.708'	四川三台县东塔镇	496
JY1-1	成都粘土	0.7	30°23.050'	104°33.845'	四川简阳县东溪镇	411
CDST-2	成都粘土	0.9	30°40.682'	104°8.545'	四川成都理工大学	545
HY1-1	成都粘土	0.3	31°34.125'	105°10.480'	四川梓潼县东石乡黄桷村	458
LS1-1	成都粘土	1.0	30°59.96'	104°23.931'	四川广汉市连山镇西	478
CYC1-1	成都粘土	0.6	31°21.090'	104°23.257'	四川罗江县略坪长玉村	554
FM1-2	成都粘土	0.3	31°29.403'	104°38.807'	四川绵阳市永兴普明砖厂	544
BSC1-1	成都粘土	0.7	30°50.532'	105°24.695'	四川射洪县大于镇碧山村	358
SZS1-3	成都粘土	1.0	30°36.404'	104°7.198'	四川成都市狮子山	505
LP2-3	成都粘土	0.35	31°19.832'	104°23.555'	四川罗江县略坪砖厂	551
JT3-1	成都粘土	0.6	30°51.904'	104°23.142'	四川金堂县金堂镇西	454
YT1-1	成都粘土	0.4	31°12.274'	105°24.353'	四川盐亭县氮肥厂	383
TSH1-1	成都粘土	0.65	30°42.509'	104°13.706'	四川新都县石板滩镇通顺村	487
SSH1-1	成都粘土	0.35	30°51.802'	105°22.202'	四川射洪县城西	344
HXXH-7	成都粘土	2.1	31°14.695'	104°24.865'	四川德阳市黄许镇新合砖场	516
SH1-6	成都粘土	0.55	31°38.513'	105°5.295'	四川梓潼县三泉乡三河村	502
SLC1-3	成都粘土	1.7	30°42.919'	104°11.545'	四川新都县木兰镇十里砖场	524
HX1-50	成都粘土	0.8	31°15.433'	104°24.596'	四川德阳市黄许镇新丰砖场	524
LX1-3	黄土 L ₁ 层	1.1	31°27.165'	103°9.989'	四川理县县城北喇嘛寺	2 055
GZ1-2	黄土 L ₁ 层	2.5	31°37'09.08"	99°58'38.60"	四川甘孜县满地村	3 431
AB1-1	黄土 L ₁ 层	0.6	32°54'24.27"	101°46'20.64"	四川阿坝县城东	3 373
SP1-2	黄土 L ₁ 层	0.45	32°47'28.11"	103°39'13.11"	四川松潘县川主寺	3 197
SLH1-1	黄土 L ₁ 层	0.6	31°24'23.49"	100°40'43.06"	四川炉霍县寿利寺	3 259
JC1-1	黄土 L ₁ 层	0.8	31°29'46.26"	102°04'53.45"	四川金川县马厂村	2 484
WQ1-2	黄土 L ₁ 层	0.75	31°38'40.58"	100°15'26.82"	四川炉霍县前进村	3 708
MX2-4	黄土 L ₁ 层	1.56	32°00'17.75"	103°41'00.86"	四川茂县小吴子村	2 380
WC1-2	黄土 L ₁ 层	1.2	31°27'44.72"	103°34'54.79"	四川汶川县威利镇万村	1 882
GT1-5	黄土 L ₁ 层	1.9	31°42'25.06"	98°32'53.67"	四川德格县岗托电站	3 110
FZ1-3	黄土 L ₁ 层	0.5	33°58.325'	106°38.479'	陕西凤县凤洲镇西	1 053
LG1-2	黄土 L ₁ 层	1.0	34°04'19.53"	107°18'40.64"	陕西太白县李家沟	1 587
LH1-3	黄土 L ₁ 层	5.75	34°25'23.62"	107°07'32.93"	陕西宝鸡市陵塬乡陵辉四组	908
WJP1-1	黄土 L ₁ 层	0.7	33°05'13.29"	106°56'46.23"	陕西汉中市南郑县吴家坪村	534
GJH1-3	黄土 L ₁ 层	1.2	32°25'20.88"	105°46'04.73"	四川广元市贯家河	480
JTW1-3	成都粘土	0.7				
JTW1-5	渐变层	1.45	30°51.9863'	104°23.5923'	四川成都市金堂镇西	451
JTW1-7	渐变层	2.3				
JTW1-8	风化层	2.65				
LT-25 ⁶¹¹	黄土 L ₁ 层		34°06'	109°19'	陕西西安市蓝田镇	

成都粘土砂粒级石英颗粒含量比川西黄土略微少; 川西黄土砂粒级石英含量变化较大, 在金川以东与成都粘土砂粒级石英颗粒含量相近。成都粘土砂

粒级石英含量与北部黄土相比相差不大。成都粘土的石英粒度主要集中在 5 ~ 50 μm 间, 占到 70% ~ 80% 左右。

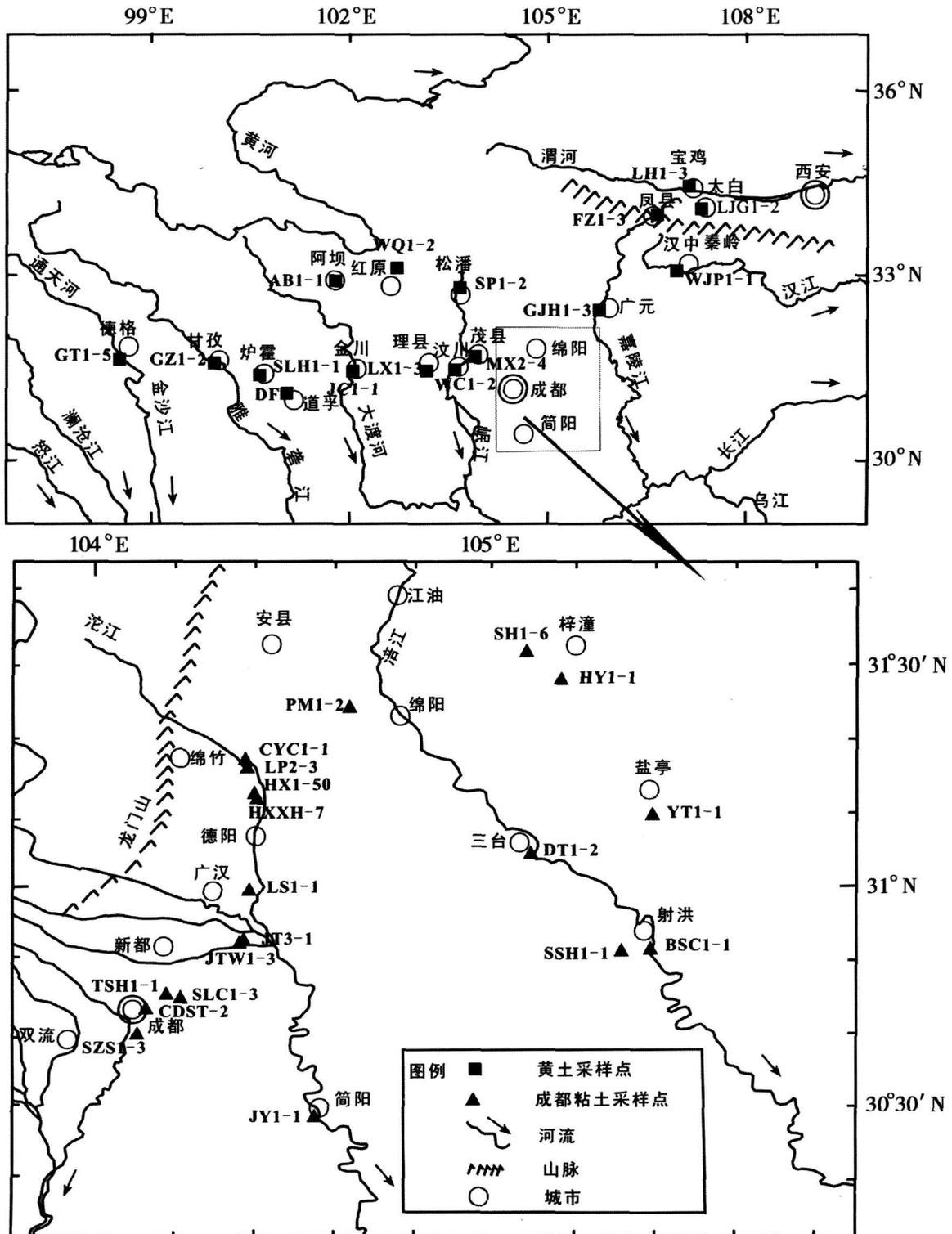


图 1 采样点位置

Fig 1 Location of sampling sites

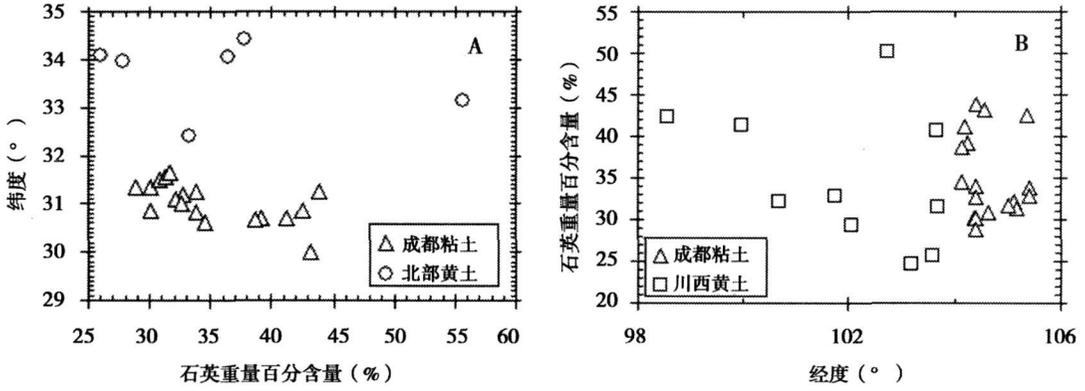


图2 石英含量随纬度和经度变化

(A: 石英含量随纬度变化; B: 石英含量随经度变化)

Fig. 2 Variations in quartz content with latitude and longitude (A: Quartz content vs. latitude; B: Quartz content vs. longitude)

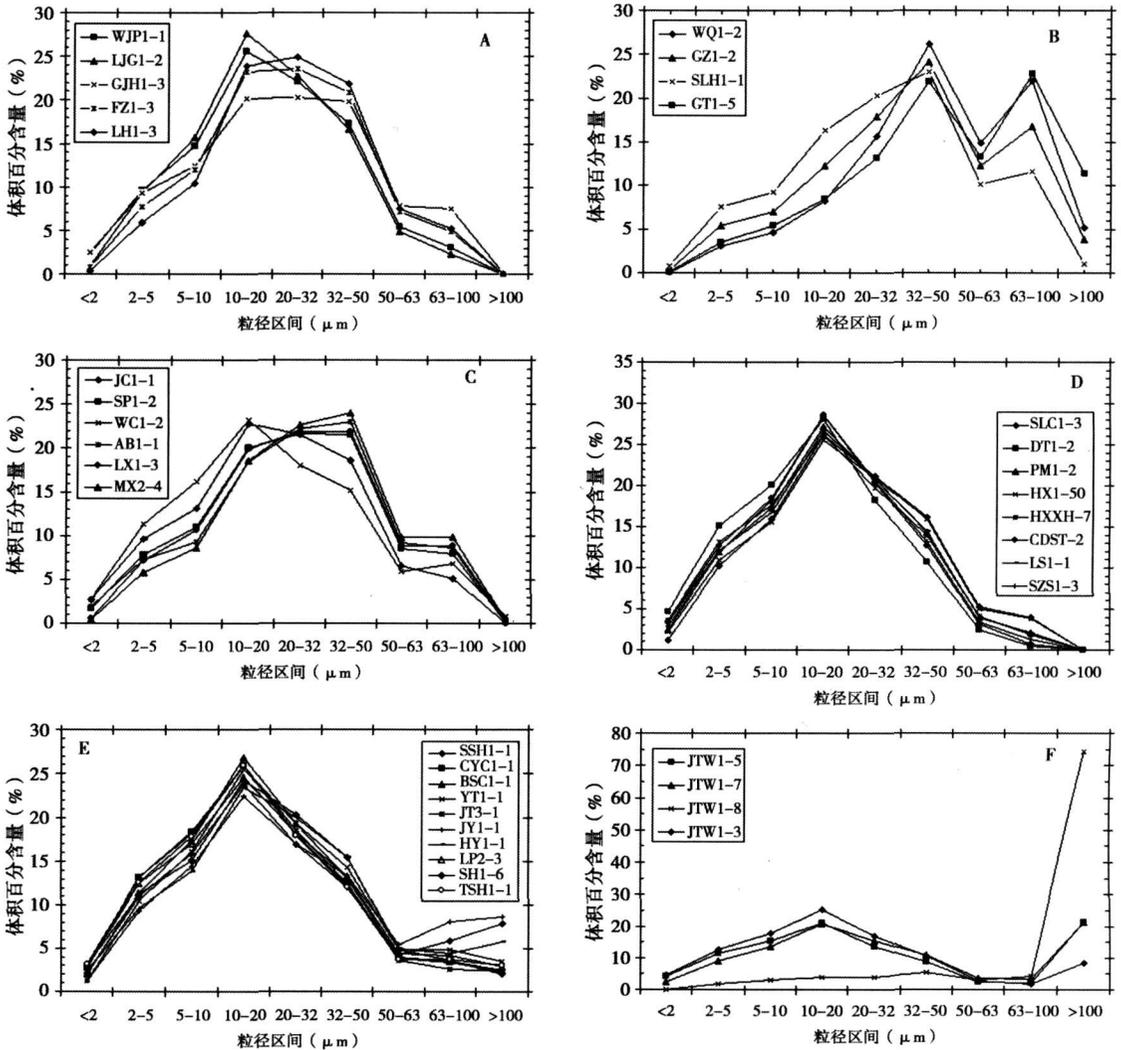


图3 不同粒级石英体积百分含量

(A: 北部黄土; B和C: 川西黄土; D和E: 成都粘土; F: 金堂剖面)

Fig. 3 Voluminal percentage of various quartz grain-size fractions

(A: The northern loess; B and C: The loess in western Sichuan Plateau; D and E: The Chengdu Clay; F: Jintang profile)

金堂剖面从上向下粉粒级石英颗粒含量逐渐减少, 砂粒级组分逐渐增多, 从上层的成都粘土经过渐变层, 到底层的红色砂岩风化壳, 砂粒级石英颗粒含量从上到下逐渐增加, 最底层砂岩风化壳砂粒级石英颗粒含量高达 81.6%。说明部分成都粘土中砂粒级组分可能来源于周围砂岩风化产物。详细的粒度组成见图 3(F)。

2.2.2 石英粒度分布

由石英粒度曲线 (图 4) 可以看出, 北部黄土呈单峰分布, 石英颗粒粒径主要集中在 1 ~ 100 μm 间, 众数组分在 20 ~ 32 μm 间, 粉粒级石英颗粒是黄土主要粒度组分; 没有粗尾, 有轻微的细尾, 这些都是风成黄土的典型石英粒度特征。川西黄土石英粒度曲线与北部黄土相似, 众数组分出现在 25 ~ 50 μm 间; 具有明显的粗尾, 呈单峰分布, > 100 μm 颗粒具有一定含量, 粒径明显比北部黄土要粗, 具有风

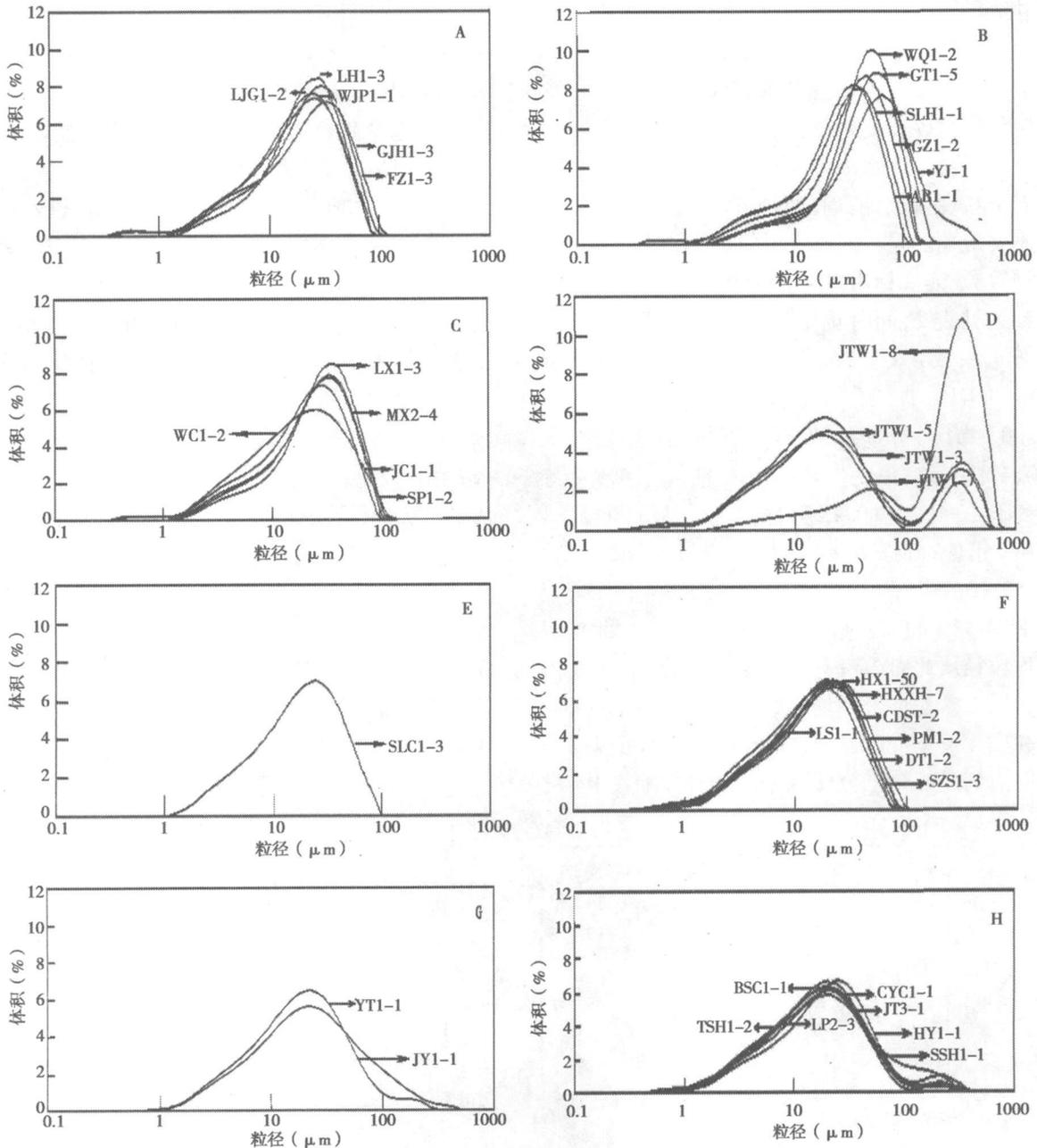


图 4 石英粒度分布曲线

(A 北部黄土; B 和 C: 川西黄土; D 金堂剖面; E F G 和 H: 成都粘土)

Fig 4 Quartz grain-size distribution

(A The northern loess B and C: The loess in western Sichuan Plateau D Jintang profile E F G and H: The Chengdu Clay)

成因特征。砂粒级石英颗粒是川西黄土的主要粒度组分。由图 4 可以看出成都粘土石英粒度曲线可以分为 4 类: 无粗尾和细尾 (E); 有细尾无粗尾 (F); 无细尾有粗尾 (G); 有粗尾和细尾 (H)。成都粘土的石英粒度曲线与北部黄土相似, 众数组分出现在 $20 \mu\text{m}$ 左右。但是成都粘土的石英粒度曲线具有轻微的细尾和较为明显的粗尾, 而北部黄土无粗尾, 这与北部的黄土有一定的差别。在金堂剖面的石英粒度曲线从上到下粒度变粗, 除了底部的砂岩风化壳的石英粒度曲线之外, 之上的石英粒度曲线具有双峰分布, 第一众数出现在 $16 \mu\text{m}$ 左右, 第二众数出现在 $280 \mu\text{m}$ 左右, 最上层的成都粘土含有一定的砂粒级石英颗粒。

2.2.3 石英粒度参数

石英粒度参数计算有两种方法: 图表法和矩值法。本文应用的是目前最常用的矩值法进行粒度参数的计算^[64], 运用 GRADISTAT 软件计算出的石英粒度参数见表 2 同时也给出了判别标准 (Φ 值标准): 分选系数 $\sigma < 1.27$ 分选极好; $1.27 \sim 1.41$, 分选较好; $1.41 \sim 1.62$ 分选好; $1.62 \sim 2.00$ 中等分选; $2.00 \sim 4.00$ 分选差; $4.00 \sim 16.00$ 分选较差; > 16.00 分选极差; 偏度 $S < -1.3$ 极细偏, $-1.3 \sim -0.43$ 细偏, $-0.43 \sim 0.43$ 对称, $0.43 \sim 1.3$ 粗偏, > 1.3 为极粗偏; 峰态 $K < 1.7$ 较宽峰, $1.7 \sim 2.55$ 宽峰, $2.55 \sim 3.7$ 中等, $3.7 \sim 7.4$ 窄峰, > 7.4 极窄峰。

平均粒径可以反映沉积物的平均粒度。北部黄土平均粒径从北向南没有明显变细的趋势, 在太白盆地和汉中盆地黄土平均粒径明显要细, 而在凤洲黄土和广元黄土平均粒径要粗。从图 5 上可以看出从北向南到成都粘土分布区平均粒径没有变化, 没

有变粗和变细的趋势。川西黄土以金川为界限, 金川以西平均粒径从西向东由粗变细, 而在金川以东这种变细的趋势不明显, 与成都粘土的平均粒径相似。而从西北阿坝县 (AB1-1)、红原县 (WQ1-2)、松潘县 (SP1-2)、茂县 (MX2-4)、汶川县 (WC1-2) 显示出无规律的变化。川西黄土平均粒径整体上要比北部黄土的大, 且是越靠近西藏平均粒径也越大。成都粘土的平均粒径最小的为 $13.9 \mu\text{m}$, 最大为 $25.1 \mu\text{m}$ 平均为 $18.5 \mu\text{m}$, 有的样品平均粒径要比北部黄土以及川西黄土粗。金堂剖面平均粒径自上向下逐渐变大, 底层的砂岩风化壳石英平均粒径达 $199 \mu\text{m}$ 。

分选系数表示沉积物分选程度。根据 Φ 值判别标准可以看出, 北部秦岭山地和黄土高原黄土的分选系数 (Φ 值) 在 $1.08 \sim 1.37$ 间, 分选较好, 南北向没有太大变化。青藏高原东部黄土分选系数 (Φ 值) 在 $1.08 \sim 1.40$ 间, 与秦岭山地和黄土高原黄土相似, 分选较好, 东西向无规律变化。成都粘土分选系数 (Φ 值) 在 $1.24 \sim 1.57$ 间, 分选好, 但是比青藏高原东部和秦岭山地和黄土高原黄土分选略微差一些。偏度可以用来判别沉积物分布的对称性, 北部秦岭山地和黄土高原黄土偏度 (Φ 值) 主要集中在 $0.61 \sim 0.85$ 间, 为粗偏, 粒度主要集中在粗端部分, 偏度变化不大。青藏高原东部黄土偏度 (Φ 值) 也都集中在 $0.54 \sim 1.21$ 间, 为粗偏, 粒度也都集中在粗端部分, 偏度变化较大, 与北部秦岭山地和黄土高原黄土相比, 具有更多的粉砂粒组分。成都粘土的偏度 (Φ 值) 变化更大, 主要集中在 $-0.07 \sim 0.43$ 和 $0.43 \sim 0.66$ 两部分之间, 表现为对称和粗偏两种类型, 比青藏高原东部黄土以及北部秦岭山地和黄土

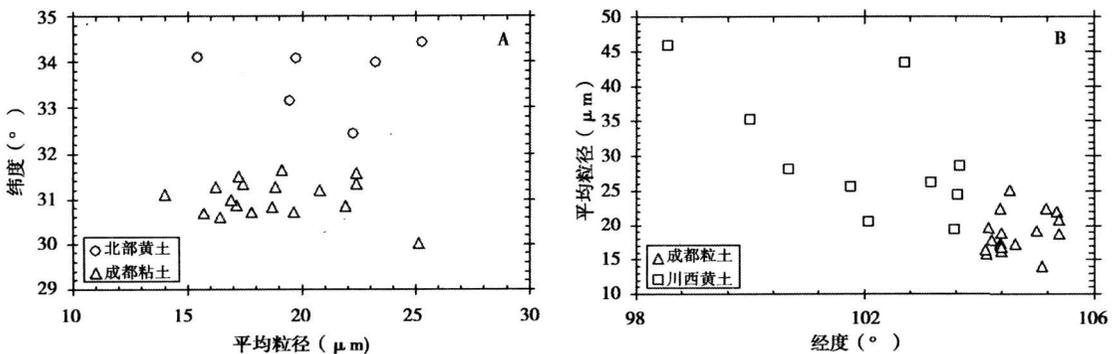


图 5 石英平均粒径随纬度和经度变化

(A 平均粒径随纬度变化; B 平均粒径随经度变化)

Fig 5 Variations in quartz mean gain size with latitude and longitude

(A, quartz mean grain size vs. latitude, B, quartz mean grain size vs. longitude)

表 2 样品的粒度参数
Table 2 Grain-size parameters of samples

样品号	层位	平均粒径 M (μm)	分选系数 σ_ϕ	偏度 S_ϕ	峰态 K_ϕ
DT1-2	成都粘土	13.97	1.30	0.56	2.71
JY1-1	成都粘土	25.14	1.55	-0.05	2.86
CDST-2	成都粘土	15.72	1.26	0.66	2.92
HY1-1	成都粘土	22.40	1.52	0.01	3.43
LS1-1	成都粘土	16.89	1.30	0.66	2.93
CYC1-1	成都粘土	17.42	1.40	0.11	3.03
PM1-2	成都粘土	17.23	1.25	0.59	2.83
BSC1-1	成都粘土	18.69	1.35	0.13	3.15
SZS1-3	成都粘土	16.41	1.24	0.65	2.98
LP2-3	成都粘土	18.45	1.45	0.16	3.00
JT3-1	成都粘土	17.11	1.43	0.10	3.33
YT1-1	成都粘土	20.76	1.36	0.09	2.99
TSH1-1	成都粘土	17.80	1.46	0.05	3.28
SSH1-1	成都粘土	21.94	1.57	-0.07	2.88
HXXH-7	成都粘土	16.23	1.32	0.61	2.80
SH1-6	成都粘土	19.12	1.42	0.31	3.30
SLC1-3	成都粘土	19.66	1.22	0.52	2.72
HX1-50	成都粘土	18.82	1.28	0.61	2.90
LX1-3	黄土 L ₁ 层	26.13	1.20	0.74	3.08
GZ1-2	黄土 L ₁ 层	35.17	1.22	0.97	3.61
AB1-1	黄土 L ₁ 层	25.54	1.30	1.07	4.04
SPI-2	黄土 L ₁ 层	24.30	1.29	0.90	3.57
SLH1-1	黄土 L ₁ 层	28.10	1.27	0.85	3.20
JC1-1	黄土 L ₁ 层	20.56	1.34	0.86	3.46
WQ1-2	黄土 L ₁ 层	43.28	1.08	1.21	4.60
MX2-4	黄土 L ₁ 层	28.56	1.15	0.87	3.47
WC1-2	黄土 L ₁ 层	19.36	1.40	0.54	2.92
GT1-5	黄土 L ₁ 层	45.79	1.21	1.04	4.00
FZ1-3	黄土 L ₁ 层	23.24	1.17	0.75	3.11
LG1-2	黄土 L ₁ 层	19.72	1.14	0.61	2.86
LH1-3	黄土 L ₁ 层	25.32	1.08	0.77	3.39
WJP1-1	黄土 L ₁ 层	19.46	1.26	0.82	3.47
GJH1-3	黄土 L ₁ 层	22.23	1.37	0.85	3.39
JTW1-3	成都粘土	18.84			
JTW1-5	渐变层	28.98			
JTW1-7	渐变层	33.06			
JTW1-8	砂岩风化层	199.00			
LT-25 ⁶¹⁾	黄土 L ₁ 层	15.4			

备注: 分选系数、偏度和峰态为按 Φ 值标准计算得结果。

高原黄土偏度值小, 表现为粒度组分偏细。峰态是用来衡量粒度分布的中部与两尾端的展形之比, 北部黄土峰态值都集中在 2.55~3.7 间, 为中等峰态。川西黄土峰态值变化较大, 主要集中在 2.55~3.7 间, 但是也有集中在 3.7~7.4 间的, 显示出窄峰。成都粘土的峰态值在 2.55~3.7 间, 比川西黄土和北部黄土的峰态值要小, 为中等峰态。

基于沉积成因的复杂性, 用单一的粒度参数判别沉积环境难免失于偏颇, 常常需要对各个参数进行综合分析, 才能得出比较可靠的结论^[64], 参数综合分析形成的结构散点图见图 6。在图中显示, 尽管会出现个别样品相互穿插, 成都粘土和北部黄土以及川西黄土投影区存在差异。

2.2.4 A-M 图和 C-M 图

图 7 中 A 为 A-M 图, B 为 C-M 图, A 为 $<4 \mu\text{m}$ 组分的重量百分数, M 为中值粒径, 即 50% 的粒度, C 为从粗到细累积百分之一含量的粒度^[64]。成都粘土中 $<4 \mu\text{m}$ 组分含量明显高于黄土样品, 川西黄土 $<4 \mu\text{m}$ 组分含量最少, 北部黄土介于两者之间。从 C-M 图中可以看出, 成都粘土、北部黄土和川西黄土投影区呈带状分布, 川西黄土中值粒径偏粗, 位于 C-M 图的右上方, 成都粘土中值粒径偏细, 位于 C-M 图的左下方, 北部黄土介于成都粘土和川西黄土之间。

2.3 石英表面微结构

选取典型的黄土样品凤州黄土 (FZ1-3) 以及成都粘土中典型的样品成都理工大学 (CDST-2)、绵阳市 (PM1-2) 进行观测 (图 8)。结果如下:

黄土样品主要为次棱角一次圆状 (FZ1-3C), 出现擦痕, 碟形撞击坑 (FZ1-3A), 可以看见贝壳状断口 (FZ1-3A), 颗粒表面具有化学溶蚀坑, 表面坑洼不平, 近乎蜂窝状 (FZ1-3B)。石英颗粒表面出现裂痕, 近乎脱落 (FZ1-3C)。黄土石英颗粒表面的擦痕以及贝壳状断口数量较多, 表面化学溶蚀强烈, 是典型的风成黄土石英表面组合。

成都粘土颗粒磨圆为次棱角状一次圆状 (CDST-2A, CDST-2C), 表面出现擦痕、撞击痕, 并且有很深的撞击坑、碟形坑, V 形坑以及三角形撞击坑 (CDST-2A, CDST-2C); 还有次生二氧化硅沉淀在颗粒表面, 掩盖了原先形成的撞击坑, 留下撞击痕迹, 在颗粒表面明显能看到掩盖留下的撞击痕 (CDST-2B), 在有的颗粒光滑表面出现沟槽, 也有的颗粒表面是化学溶蚀形成的溶蚀坑, 颗粒表面有溶蚀沟槽 (PM1-2B)。在石英颗粒表面有次生二氧

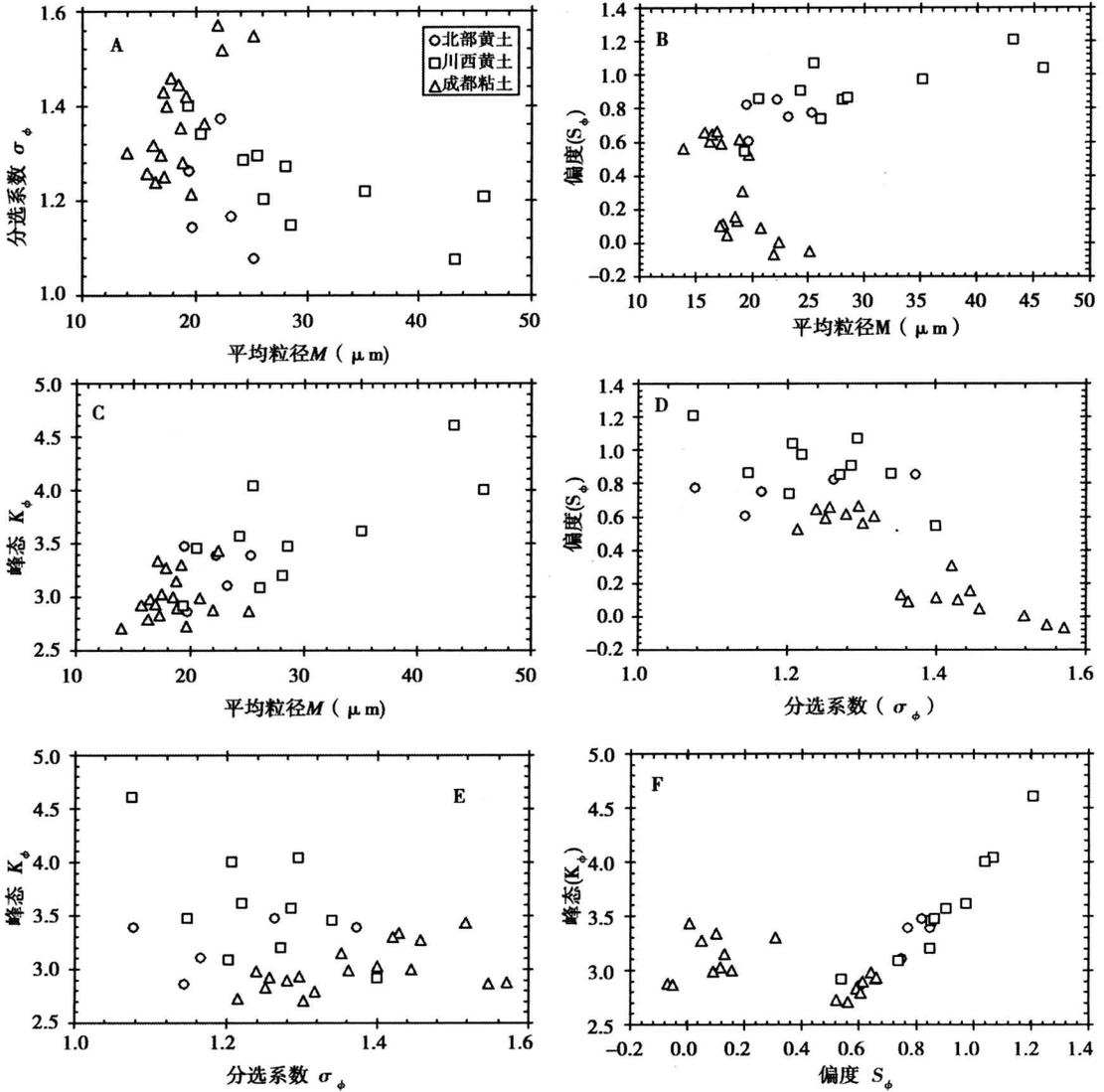


图6 结构散点图

Fig. 6 Plots of grain-size parameters

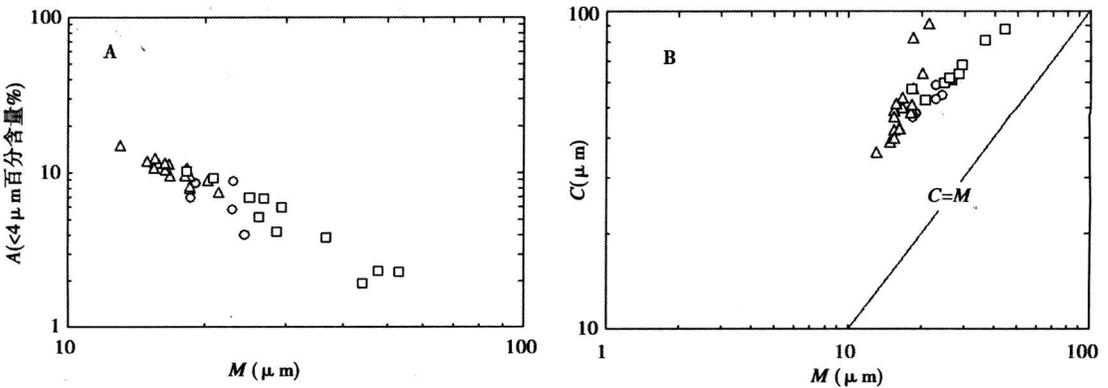


图7 A-M图和C-M图

(○北部黄土; □川西黄土; △成都粘土)

Fig. 7 A-M and C-M plots

(○The northern loess; □The loess in western Sichuan Plateau; △The Chengdu Clay)

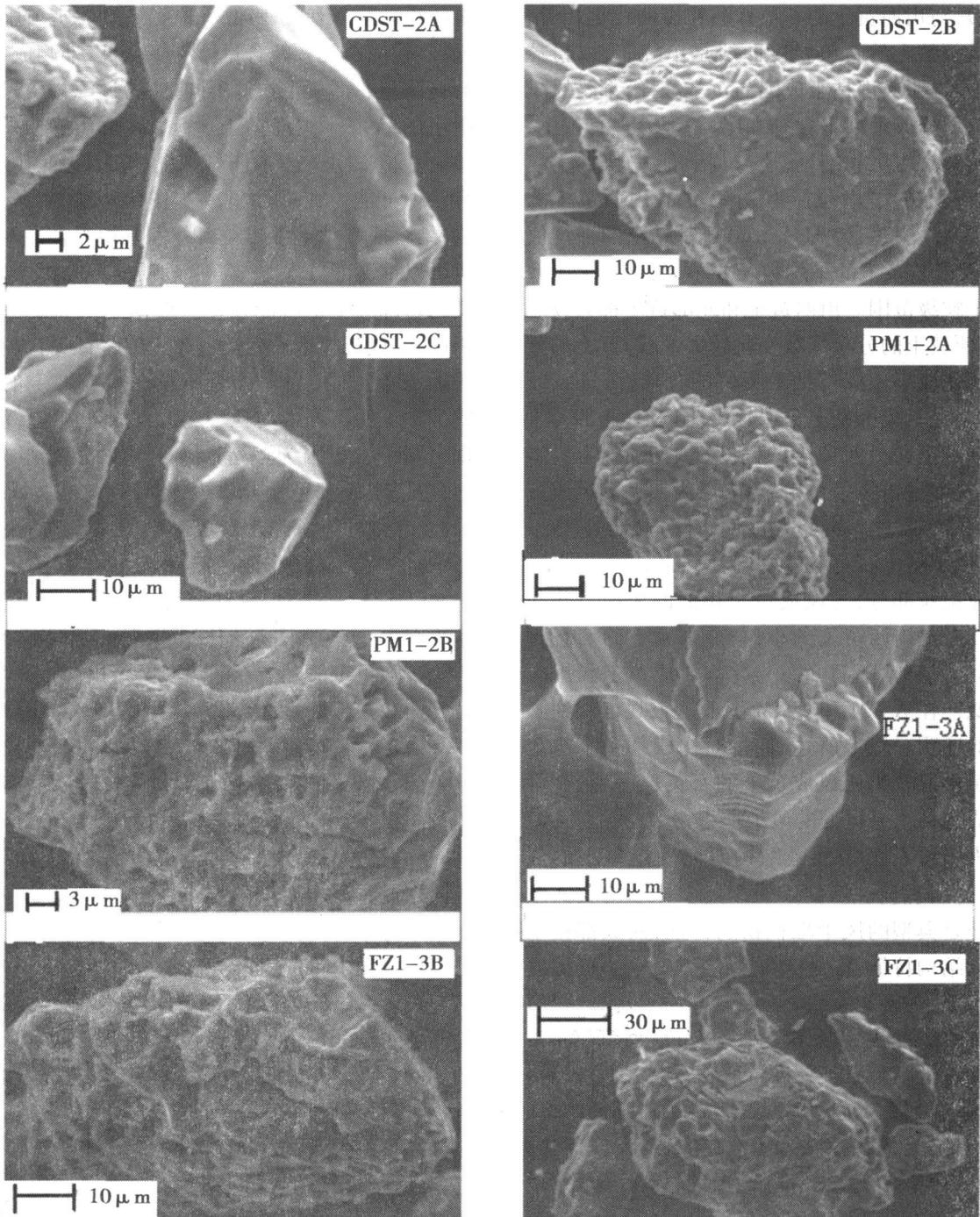


图 8 石英表面微结构
Fig 8 The surface micro-structure of quartz grains

化硅沉淀, 使石英表面凸凹不平 (PM1-2A)。

3 讨论

3.1 成都粘土成因

沉积物的粒度分析已经广泛应用到黄土成因的

研究, 包括全岩粒度分析^[31 38 40 43]和石英样品粒度分析^[35 53]。沉积物的石英颗粒粒度曲线, 能够代表粉尘原始特征。风成黄土沉积物的石英粒度分布曲线为典型的单峰, 以粉粒级为主 (5 ~ 50 μm), 由于风力分选以及风动力变化, 曲线会出现细尾^[35]。成都粘土的石英样品粒度曲线特征与典型的北部黄土

曲线相似,与川西黄土的石英样品粒度曲线也相近。大多数成都粘土的石英粒度曲线是单峰态,以粉粒组分为主,说明成都粘土成因与黄土一样,都是风尘堆积物。部分成都粘土含有细尾,一部分含有粗尾,有的样品具有粗尾和细尾,这与黄土有一定的差异。北部风成黄土的平均粒径为 $21.7 \mu\text{m}$,川西黄土的平均粒径要高一些,为 $31.8 \mu\text{m}$,成都粘土的平均值为 $18.5 \mu\text{m}$,较黄土的平均粒径要小,明显处于典型风成黄土粒级范围。川西黄土和北部黄土都为较好分选,川西黄土的分选系数变化较大,北部黄土的分选系数变化较小。成都粘土为好的分选,分选系数变化较大,显示成都粘土分选较川西黄土、北部黄土差。北部黄土和川西黄土的偏度都是正偏,为典型的粗偏,粒度主要集中在粗粒部分,为典型的风成黄土特征,成都粘土大部分为正偏,部分接近正态分布,说明成都粘土石英粒度要比黄土的细,粒度也主要集中在粗粒部分,与风成黄土相似的成因。北部黄土的峰态比川西黄土的小,与成都粘土的峰态相似,总体上成都粘土的峰态与北部风成黄土和川西黄土相似。在 A-M 和 C-M 图上这个观点得到了进一步的证明。综上所述,通过对比成都粘土与北部风成黄土以及川西风成黄土的石英粒度特征,可以得出成都粘土是典型的风尘堆积物。

前人通过石英表面微结构研究确定黄土的成因^[47-53]。我们观察到 FZ1-3 黄土样品的表面微结构特征是典型的风尘堆积物的特征,而成都粘土样品的微结构特征,都是棱角一次棱角状,表面擦痕以及撞击痕,并且能看到三角形撞击坑、较深的碟形坑,表面的化学溶蚀以及次生二氧化硅沉淀存在,并且存在裂痕。结合石英粒度特征和石英表面微结构特征,显示成都粘土应该是近距离风力搬运的结果。

3.2 成都粘土的物源

有些学者认为成都粘土来源于蒙新沙漠^[3,16,17],成都粘土石英粒度曲线与北部黄土相似,但是也存在一定的差异。北部黄土与典型的黄土高原黄土相似,物源与黄土高原相似,是风力搬运的结果。成都粘土的石英粒度频率曲线与北部黄土相似,含有细尾、粗尾组分。风洞实验证明, $> 20 \mu\text{m}$ 的颗粒很难在空中被长距离搬运,在极端猛烈的风暴条件下,也只能运移几百公里的距离^[65],所以成都粘土的物质局地来源不可忽视。成都粘土的石英粒度组成上 $> 20 \mu\text{m}$ 的颗粒占有相当大的比例, $> 20 \mu\text{m}$ 的石英颗粒含量在 35%~50%间,与北部黄

土的粉砂粒级组分相似。根据粉尘搬运随距离越远,砂粒级石英颗粒含量就越少,可以推测成都粘土的物源与北部黄土物源不同,应为近源物质,近距离搬运的结果。成都粘土 $< 5 \mu\text{m}$ 石英颗粒含量在 15%~20%间。孙东怀(2006)认为超细组分成因有三种可能。在排除了成壤作用产生的粘粒的影响,结合成都粘土中粗粒组分占有相当含量的特征,也可以推测部分来源于近源物质。但来源于北部沙漠的远源降尘也可能存在。根据 2009-04-24 四川广元、成都等地发生的扬尘天气,可以看出自北部的远源降尘对成都粘土中石英颗粒有一定的影响。成都粘土的石英平均粒径与北部黄土相似,没有表现出同一物源因为搬运距离造成的粗粒组分的差异,也说明成都粘土物源与北部黄土的物源不同。因此,北部的远源降尘对成都粘土中粘粒有一定的影响,但是成都粘土的主要物源与北部黄土不同。有些学者^[19,20]认为,高原冬季风和高空西风急流将粉尘搬运到高原东侧及其邻区,使得青藏高原就成为成都粘土可能和潜在的物源区。川西黄土的石英粒度曲线众数明显要粗,并且粉粒级石英颗粒含量低,砂粒级石英颗粒含量明显的要高,远远高于成都粘土的含量,在石英粒度曲线上也有很大差别。川西黄土中 $> 20 \mu\text{m}$ 石英颗粒的含量在 50%~80%之间,并且分布没有规律,以金川为界,金川以东从西向东没有由粗变细的趋势,这可能指示川西黄土不是来源于青藏高原,而是近距离搬运的结果。在结构散点图上可以看出成都粘土与川西黄土和北部黄土投影区不同,除个别样品穿插之外,成都粘土、川西黄土和北部黄土投影在不同区域,反映其物源的不同。在实验处理过程中发现,川西黄土的暗色矿物、不稳定矿物远远高于成都粘土,这与当地的河流样品很相似,与成都粘土相差较大。

在金堂剖面的石英粒度曲线可以看出,上部成都粘土的石英粒度曲线具有明显的双峰,在粗尾出现第二众数,从上到下第二众数的峰逐渐增高,第一众数的峰逐渐降低,剖面最底部是红色砂岩风化壳,其粗粒级石英颗粒含量明显要高,因此可以看出红色砂岩风化产物可能是部分成都粘土的物源之一,对部分成都粘土的形成有重要的作用,为部分成都粘土提供了粗粒组分。

沉积物中石英含量随着搬运距离而变化,搬运愈远,粘土矿物含量愈高,石英含量愈低。南北向北部黄土到成都粘土分布区,石英含量没有明显变化,

而与此同时, 东西向川西黄土到成都粘土分布区, 石英含量也没有明显变化。进一步验证成都粘土与北部黄土和川西黄土有不同物源。

成都粘土石英颗粒表面微结构为次棱角状一次圆状, 表面出现擦痕、撞击痕, 并且有很深的撞击坑、碟形坑, 三角形撞击坑。并且有次生二氧化硅沉淀在颗粒表面, 掩盖了原先形成的撞击坑, 明显在颗粒表面能看到掩盖留下的撞击痕, 在有的颗粒光滑表面出现沟槽, 也有的颗粒表面是化学溶蚀形成的溶蚀坑, 颗粒表面有溶蚀沟槽。在石英颗粒表面有次生二氧化硅沉淀, 使石英表面凹凸不平。综上所述, 成都粘土石英表面微结构特征显示出不稳定水动力作用的痕迹。结合成都粘土的石英粒度特征和成因, 我们初步认为成都粘土的主要物质来源于龙门山山前冲洪积物, 是近距离搬运沉积的结果。

4 总结

本文对成都粘土的石英粒度进行了详细的分析, 结合石英表面微结构, 以及与川西黄土和北部黄土进行对比, 并在金堂剖面进行剖面石英粒度分析。我们可以得出以下几点认识: (1) 成都粘土与北部黄土以及川西黄土的粒度特征相似, 大部分成都粘土石英颗粒呈单峰分布, 粉砂级组分为主, 好的分选, 正偏或者对称, 中等峰态。成都粘土 $> 20 \mu\text{m}$ 石英颗粒含量在 35% ~ 50% 间, 与北部黄土相似, 没有表现出同一物源因为搬运距离造成的粗粒组分的差异。而川西黄土 $> 20 \mu\text{m}$ 石英颗粒含量在 50% ~ 80% 间, 但是空间分布无规律, 且靠近成都粘土分布区的黄土样品与成都粘土粗粒级石英颗粒含量相似, 没有变化。(2) 成都粘土的石英表面微结构主要为次棱角状一次圆状, 表面出现擦痕、撞击痕、很深的撞击坑、碟形坑和三角形撞击坑。并且有次生二氧化硅沉淀在颗粒表面, 掩盖了原先形成的撞击坑。在有的颗粒光滑表面出现沟槽, 也有的颗粒表面是化学溶蚀形成的溶蚀坑, 颗粒表面有溶蚀沟槽。(3) 石英粒度特征和石英表面微结构特征表明, 成都粘土是风尘堆积物, 主要物源应该为近源物质, 成都粘土可能主要来源于龙门山山前冲洪积物; 金堂剖面石英粒度特征显示丘陵区的基岩风化物质是部分成都粘土的物源之一; 该区域现代降尘的存在表明远源降尘对成都粘土亦有较小的贡献。

感谢: 谢又予老师对文章进行了审阅, 提出了修

改意见, 特此致谢。野外工作得到了赵翔博士及其华博士的大力支持和帮助, 在此谨表谢忱。

参考文献 (References)

- [1] Thorp J., Dye D. S. The Chengtu Clay deposits of possible Tertiary origin in western and northwestern Szechuan Basin [J]. *Bulletin of the Geological Society of China* 1936 15(2): 225 ~ 246
- [2] Ma Rongzhi. The formation of Chinese loess [J]. *Geological Review* 1944 (2): 207 ~ 223 [马溶之. 中国黄土之生成 [J]. 地质论评, 1944 (2): 207 ~ 223]
- [3] Li Chunyu. The formation of Yaan and Jiangbei period gravel layer [J]. *Geological Review* 1947 12(1-2): 117 ~ 126 [李春昱. 雅安期与江北期砾石层之生成 [J]. 地质论评, 1947 12(1-2): 117 ~ 126]
- [4] Chengdu Hydrogeology and Engineering Geology Team of Sichuan Province Geological Bureau. The report of dynamic observation and environmental hydro-geological survey in Chengdu urban [R]. 1978 8 ~ 24 [四川地质局水文工程地质大队. 成都市区地下水动态观测及环境水文地质调查报告 [R]. 1978 8 ~ 24]
- [5] Chengdu Hydrogeology and Engineering Geology Team of Sichuan Province Geological Bureau. The hydro-geological survey report of water supply in the east platform areas of Chengdu [R]. 1984 30 ~ 39 [四川地矿局成都水文地质工程地质队. 成都市东部台地地区供水水文地质勘察报告 [R]. 1984 30 ~ 39]
- [6] Aviation Regional Geological Survey Team of Sichuan Province Geological Bureau. The 1/200000 regional geological survey report of Langzhong H-48-9 Santai H-48-10 Jianyang H-48-15 [R]. 1980 1 ~ 113 [四川省地矿局航空区域地质调查队. 阆中幅 H-48-9 三台幅 H-48-10 简阳幅 H-48-15 1/20 万区域地质调查报告 [R]. 1980 1 ~ 113]
- [7] Chengdu Hydrogeology and Engineering Geology Team of Sichuan Province Geological Bureau. The 1/200000 regional geology and hydro-geological survey report of Chengdu plain in Sichuan province [R]. 1960 17 ~ 22 [四川省地矿局水文工程地质大队. 四川成都平原区域地质-水文地质勘察报告: H-48-VIII (灌县东半幅) ; H-48-IX (金堂西半幅) ; H-48-XIV (浦江东半幅) ; H-48-XV (简阳西半幅) 1/20 万 [R]. 1960 17 ~ 22]
- [8] Chengdu Hydrogeology and Engineering Geology Team of Sichuan Province Geological Bureau. The comprehensive report of hydrogeology and engineering geology survey in Chengdu city [R]. 1990 15 ~ 33 [四川地矿局成都水文地质工程地质队. 成都市综合水文地质工程地质勘察报告 [R]. 1990 15 ~ 33]
- [9] Geochemical Exploration Team of Sichuan Province Geological Bureau. The 1/50000 regional geological survey report of urban [R]. 1991 2 ~ 90 [四川省地矿局化探队. 德阳幅 H-48-29-D 黄许幅 H-48-29-B 罗江幅 H-48-30-A 1/5 万城市区域地质调查报告 [R]. 1991: 2 ~ 90]
- [10] Fei Meigao, Xu Guolia, Zhang Pincui. Phenomena of tectonic fractures and faults in Chengdu clay [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation* 1995 6(3): 24 ~ 32 [费美高, 许国琳, 张品萃. 成都粘土中的构造断裂现象及其研究意义 [J]. 地质灾害与环境保护, 1995 6(3): 24 ~ 32]
- [11] Qian Hong, Tang Rongchang. On the formation and evolution of

- the Chengdu plain [J]. *Earthquake Research in Sichuan* 1997 11 (3): 1~7 [钱洪, 唐荣昌. 成都平原的形成与演化 [J]. 四川地震, 1997 11(3): 1~7]
- [12] Zhang Pincui. Effect of free Fe_2O_3 on the engineering properties of Chengdu clay [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology* 1999 19 (1): 81~84 [张品萃. 游离 Fe_2O_3 对成都粘土部分工程地质特征的影响 [J]. 矿物岩石, 1999 19(1): 81~84]
- [13] Chengdu Hydrogeology and Engineering Geology Team of Sichuan Province Geological Bureau. The report of hydrogeology and engineering geology comprehensive survey evaluation in Chengdu plain [R]. 1985: 8~45 [四川省地质矿产局水文地质工程地质队. 成都平原水文地质工程地质综合勘察评价报告 [R]. 1985: 8~45]
- [14] Chengdu Hydrogeology and Engineering Geology Team of Sichuan Province Geological Bureau. The summary report of the regional hydro-geological survey of Chengdu plain in Sichuan province [R]. 1980: 23~43 [四川省地质局水文工程地质大队. 四川成都平原区域水文地质普查总结报告 [R]. 1980: 23~43]
- [15] Regional geology of Sichuan province [M]. Beijing Geological Press of China 1991 [四川省区域地质志 [M]. 北京: 中国地质出版社, 1991]
- [16] Liu Xingshi. Quaternary of Sichuan basin [M]. Chengdu Science and Technology Press of Sichuan Province 1983: 88~95 [刘兴诗. 四川盆地的第四系 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1983: 88~95]
- [17] Wang Wenhui. A brief history of Mianyang landforms [J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology* 1998 8(3): 72~76 [王文鹤. 绵阳市地貌发育简史 [J]. 西南工学院学报, 1998 13(3): 72~76]
- [18] Chen Zhirong, He Yingyu. A preliminary discussion on datedetermination of Guanghan Clay and Chengdu Clay with ^{14}C [J]. *Journal of Mountain Science* 1990 8(3): 167~173 [陈治荣, 何银武. 据 ^{14}C 年龄数据浅议广汉粘土与成都粘土的时代归属 [J]. 山地研究 (现山地学报), 1990 8(3): 167~173]
- [19] Fang Xiaomin. The preliminary study on the causes and sources of Malan loess in the eastern edge of Tibet Plateau and its adjacent areas [J]. *Science in China (series B)*, 1994 24(5): 539~546 [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]
- [20] Fang Xiaomin, Li Jijun, Bvander R. The formation age of western Qinling loess and the discussion of source areas [J]. *Chinese Science Bulletin* 1999 44(7): 779~782 [方小敏, 李吉均, R bvander. 西秦岭黄土的形成时代及与物源区关系探讨 [J]. 科学通报, 1999 44(7): 779~782]
- [21] Wang Bo, Nie Qianrong, Wang Yunsheng et al. Discussion on the origin of Chengdu Clay [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation* 2002 13(1): 54~64 [汪波, 聂前勇, 王运生, 等. 也论成都粘土成因 [J]. 地质灾害与环境保护, 2002 13(1): 54~64]
- [22] 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): 286~291 [乔彦松, 赵志忠, 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): 286~291]
- [23] Yang Shengli, Fang Xiaomin, Yan Maodu et al. Grain size profiles in the Chengdu Clay eastern margin of the Tibetan Plateau: Implications for significant drying of Asian since ~ 500 ka B.P. [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* 2010 38(1-2): 57~64
- [24] Fang Xiaomin, Chen Fubin, Shi Yaofeng et al. Ganzi loess and cryosphere evolution of Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin* 1996 41(20): 1865~1867 [方小敏, 陈富斌, 施雅风, 等. 甘孜黄土和青藏高原冰冻圈演化 [J]. 科学通报, 1996 41(20): 1865~1867]
- [25] Chen Guoying, Sun Shurong, Fang Xiaomin et al. Heavy mineral and provenance of the Malan loess on the Tibet Plateau and its adjacent area [J]. *Journal of Sedimentary* 1999 15(4): 134~142 [陈国英, 孙树荣, 方小敏, 等. 青藏高原及其邻区马兰黄土重矿物与黄土物质来源 [J]. 沉积学报, 1999 15(4): 134~142]
- [26] Fang Xiaomin, Han Yongxiang, Ma Jinhui et al. Dust characteristics of Tibet Plateau and loess accumulation: With sand and dust weather process for example in Lhasa 2003-03-04 [J]. *Chinese Science Bulletin* 2004 49(11): 1084~1090 [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]
- [27] Han Yongxiang, Xi Xiaoxia, Song Lianchun et al. Spatio-temporal Sand-dust Distribution in Tibet Plateau and Its Climatic Significance [J]. *Journal of Desert Research* 2004 24(5): 588~592 [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]
- [28] Lv Lianqing, Fang Xiaomin, Lu Huayu et al. The northeastern margin of Tibet Plateau loess grain size records of the last glacial millennium-scale climate change [J]. *Chinese Science Bulletin* 2004 49(1): 1091~1098 [吕连清, 方小敏, 鹿化煜, 等. 青藏高原东北缘黄土粒度纪录的末次冰期千年尺度气候变化 [J]. 科学通报, 2004 49(1): 1091~1098]
- [29] Zhang Xiaoye, Shen Zhibao, Zhang Guangyu et al. The distal westerly winds of dust of Tibet Plateau and loess accumulation [J]. *Science in China (series D)*, 1996 26(2): 147~154 [张小曳, 沈志宝, 张光宇, 等. 青藏高原远源西风粉尘与黄土堆积 [J]. 中国科学 (D), 1996 26(2): 147~154]
- [30] Zhang Xiaoye. Source distributions, emission, transport, deposition of Asian dust and loess accumulation [J]. *Quaternary Sciences*, 2001 21(1): 29~41 [张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积 [J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 29~40]
- [31] Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen et al. Miocene loess-palaeosol sequence and its particle size characteristics and the indication of the origin [J]. *Science in China (series D)*, 2006 36(7): 646~653 [乔彦松, 郭正堂, 郝青振, 等. 中新世黄土-古土壤序列的粒度特征及其对成因的指示意义 [J]. 中国科学 D 辑, 2006 36(7): 646~653]
- [32] Sun Donghui, Lu Huayu, David Rea et al. Binodal grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2000 18(3): 327~334 [孙东怀, 鹿化煜, David Rea 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义 [J]. 沉积学报, 2000 18(3): 327~334]
- [33] Li Xusheng, Yang Dayuan, Lu Huayu. Grain-size features and

- genesis of the Xiashu loess in Zhenjiang [J]. *Journal of Marine Geology and Quaternary Geology* 2001, 21 (1): 25 ~ 31 [李徐生, 杨达源, 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 ~ 31]
- [34] Li Xusheng Yang Dayuan Lu Huayu et al The grain-size features of quaternary eolian dust deposition sequence in south Anhui and significance [J]. *Journal of Marine Geology and Quaternary Geology* 1997 17(4): 73 ~ 80 [李徐生, 杨达源, 鹿化煜. 皖南第四纪风尘堆积序列粒度特征及其意义 [J]. *海洋地质与第四纪研究*, 1997 17(4): 73 ~ 80]
- [35] Sun Yubin Lu Huayu An Zhisheng Grain size of loess paleosol and Red Clay deposits on the Chinese Loess Plateau Significance for understanding pedogenic alteration and paleomonsoon evolution [J]. *Paleoclimatology* 2006 24(1): 129 ~ 138
- [36] Lei Xiangyi Grain-size analysis and genesis of loess in the Qinling Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica* 1998 72(2): 178 ~ 187 [雷祥义. 秦岭黄土的粒度分析及其成因初步探讨 [J]. *地质学报*, 1998 72(2): 178 ~ 187]
- [37] Xie Yuanxuan Zhang Xuqiang He Kui et al Grain-size distribution and material source analysis of loess on the north-eastern margin of Qinghai-Tibet plateau [J]. *Geology in China* 2002 29 (3): 317 ~ 321 [谢远玄, 张序强, 何葵, 等. 青藏高原东北缘黄土粒度组成及物质来源分析 [J]. *中国地质*, 2002 29(3): 317 ~ 321]
- [38] 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 ~ 231 [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 ~ 231]
- [39] Zhao Zhizhong Qiao Yansong Wang Yan et al The magnetic stratigraphy and the paleoenvironmental record of red clay in Chenglu plain [J]. *Science in China (series D)*, 2007 37(3): 370 ~ 377 [赵志中, 乔彦松, 王燕, 等. 成都平原红土堆积的磁性地层学及古环境记录 [J]. *中国科学 (D 辑)* 2007 37(3): 370 ~ 377]
- [40] Janos Kovacs Grain-size analysis of the Neogene red clay formation in the Pannonian Basin [J]. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 2008 97: 171 ~ 178
- [41] Ding Zhongli Rutten N. W., Sun Jinbia et al Re-arrangement of atmospheric circulation at about 2.6 Ma over northern China: evidence from grain size records of loess-paleosol and red clay sequences [J]. *Quaternary Science Reviews* 2000 (19): 547 ~ 558
- [42] Chen Fahu Feng Zhaodong Zhang Jiawu Loess particle size data indicative of stable winter monsoons during the last interglacial in the western part of the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena* 2000 (39): 233 ~ 244
- [43] Sun Donghuai Jan Blomendal David K. R., et al Bimodal grain-size distribution of Chinese loess and its palaeoclimatic implications [J]. *Catena* 2004 (55): 325 ~ 340
- [44] Nugteren G., Vandenbergh J., Huissteden J. K., et al A quaternary climate record based on grain size analysis from the Luochuan loess section on the Central Loess Plateau [J]. *China Global and Planetary Change* 2004 (41): 167 ~ 183
- [45] Sun Yubin Separation of quartz minerals from loess samples [J]. *Rock and mineral analysis* 2001 20(1): 23 ~ 26 [孙有斌, 黄土样中石英单矿物的分离 [J]. *岩矿测试*, 2001 20(1): 23 ~ 26]
- [46] Sun Yubin Lu Huayu An Zhisheng Grain-size distribution of quartz in loess-paleosol [J]. *Chinese Science Bulletin* 2000 45 (19): 2094 ~ 2096 [孙有斌, 鹿化煜, 安芷生. 黄土—古土壤中石英颗粒的粒度分布 [J]. *科学通报*, 2000 45 (19): 2094 ~ 2096]
- [47] Wang Yongyan Teng Zhihong Yue Leping Surface texture of quartz grains under the scanning electron microscope and the genesis of loess in China [J]. *Acta Geographica Sinica* 1982 37(1): 35 ~ 39 [王永焱, 滕志宏, 岳乐平. 黄土中石英颗粒表面结构与中国黄土的成因 [J]. *地理学报*, 1982 37(1): 35 ~ 39]
- [48] Liu Jinfeng Guo Zhengtang Qiao Yansong et al Quartz grain morphology grain-size distribution of Qinan Miocene loess-paleosol sequence [J]. *Chinese Science Bulletin* 2005 50 (24): 2806 ~ 2809 [刘进峰, 郭正堂, 乔彦松, 等. 秦安中新世黄土—古土壤序列石英颗粒形态特征、粒度分布及其对成因的指示意义 [J]. *科学通报*, 2005 50(24): 2806 ~ 2809]
- [49] Wang Ying Dinauer B Atlas of Quartz Sand Surface Structure Pattern [M]. Beijing: The Geological Publishing House 1985 1 ~ 64 [王颖, B. 迪纳瑞尔. 石英砂表面结构模式图集 [M]. 北京: 地质出版社, 1985 1 ~ 64]
- [50] Xie Youyu Map of Quartz Sand Surface Structural Characteristics in China [M]. Beijing: Ocean Press 1984 1 ~ 48 [谢又予. 中国石英砂表面结构特征图谱 (M). 北京: 海洋出版社, 1984 1 ~ 148]
- [51] Lu Yanchou Wen Qizhong Huang Bojun et al A preliminary discussion on the source of loessic materials in china—a study of the surface textures of silt quartz grains by transmission electron microscope [J]. *Geochimica* 1976 (1): 47 ~ 52 [卢演涛, 文启忠, 黄伯钧, 等. 中国黄土物质来源的初步探讨——石英粉沙颗粒表面结构的电子显微研究 [J]. *地球化学*, 1976 (1): 47 ~ 52]
- [52] Qiao Shuqing Yang Zuosheng Advances in study on Quartz as a tracer for material source [J]. *Advances in Marine Science* 2006 24(2): 266 ~ 272 [乔淑卿, 杨作升. 石英示踪物源研究进展 [J]. *海洋科学进展*, 2006 24(2): 266 ~ 272]
- [53] Sun Yubin An Zhisheng Sedimentary interpretation of surface textures of quartz grains 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]
- [54] Xie Youyu Cui Zhijiu Some surficial characteristics of till quartz sand in china under electronic scanning microscope [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 1981 (2): 52 ~ 54 [谢又予, 崔之久. 电子扫描镜下我国若干冰碛石英砂的表面特征 [J]. *冰川冻土*, 1981 (2): 52 ~ 54]
- [55] Hydrological Engineering Geology Teaching and Research of Chengdu College of Geology The engineering geological characteristics of Chengdu clay [J]. *Journal of Chengdu College of Geology* 1960 (1): 5 ~ 11 [成都地质学院水文工程地质教研室. 成都粘土的工程地质特征 [J]. *成都地质学院院报*, 1960 (1): 5 ~ 11]

- [56] Kong Defang Fractured Clay [M]. Beijing The Geological Publishing House 1994 1~11 [孔德坊. 裂隙性粘土 [M]. 北京: 地质出版社, 1994 1~11]
- [57] Gao Xiongying Analysis of landslide generated geological conditions [J]. Sichuan Architectural 2004 24(3): 46~47 [高雄鹰. 浅析滑坡生成的地质条件 [J]. 四川建筑 2004 24(3): 46~47]
- [58] Han Mei Summary of foundation soil building conditions in Chengdu urban [J]. Journal of Electric Power Survey 1996 (1): 25~33 [韩梅. 成都市区地基土的建筑条件综述 [J]. 电力勘测, 1996 (1): 25~33]
- [59] Zhang Huiying Tian Jinhua Characteristics of swelling and shrinkage of Chengdu clay [J]. Journal of Chengdu College of Geology 1990 17(2): 95~105 [张惠英, 田金花. 成都粘土的胀缩特性 [J]. 成都地质学院院报, 1990 17(2): 95~105]
- [60] Zhao Xiang On genesis of fissures in Chengdu clay [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation 1997 8(4): 40~46 [赵翔. 成都粘土的裂隙成因研究 [J]. 地质灾害与环境, 1997 8(4): 40~46]
- [61] Feng Jinliang Zhu Liping Ju Jianting et al Heavy dust fall in Beijing on April 16-17, 2006: Geochemical properties and indications of the dust provenance [J]. Geochimical Journal 2008 42: 221~236
- [62] Syers J K, Chapman S L, Jackson M. L, et al Quartz isolation from rocks, sediments and soils for determination of oxygen isotope composition [J]. Geochim Cosmochim Acta 1968 32: 1022~1025
- [63] Xu Shujian Pan Baotian Zhang Hui et al Grain size parameters of loess-paleosol deposits from graphic and moment methods: a comparative study [J]. Arid Land Geography 2005 28(2): 194~197 [徐树建, 潘保田, 张慧, 等. 末次冰期旋回风成沉积物图解法与矩值法粒度参数的对比 [J]. 干旱区地理, 2005 28(2): 194~197]
- [64] Shanbei Team of Chengdu College of Geology Grain Size Analysis of Sedimentary Rocks (material) and Its Application [M]. Beijing The Geological Publishing House 1976 1~105 [成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1976 1~105]
- [65] Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits [M]. Beijing China Ocean Press 1991 74~82 [肯尼斯. 派伊. 风蚀粉尘及粉尘沉积物 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991 74~82]

Grain-size Distribution and Micro-structure of Quartz in the Chengdu Clay

HU Zhao^{1, 2, 3}, FENG Jinliang^{1, 2}, JU Jianting^{4, 5}

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Geographical Sciences and Nature Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 5. Science in China, Beijing 100717, China)

Abstract: In the present study, we focus on the quartz grain-size distribution and the surface micro-structure of quartz grains in the Chengdu Clay, as well as in the adjacent loess from the western Sichuan Plateau, the loess from the Qinling Mountains and the loess from the Chinese Loess Plateau. The results indicate that the quartz grains show unimodal distribution patterns in the most of Chengdu Clay, as well as in the adjacent loess from the western Sichuan Plateau, the loess from the Qinling Mountains and the loess from the Chinese Loess Plateau, but the quartz grains show bimodal distribution patterns in some of Chengdu Clay. The composition of quartz grain sizes and grain-size parameters in the Chengdu Clay are different with the loess from the western Sichuan Plateau and the loess from the Qinling Mountains and the loess from the Chinese Loess Plateau. The Chengdu Clay mainly consists of silty quartz grains with well sorting. The quartz micro-structures of the Chengdu Clay and the loess from the Qinling Mountains and the loess from the Chinese Loess Plateau are different with each other. The surface of quartz grains in Chengdu Clay has deep dish and triangular pits. All of above suggest that the surface features of quartz grains in Chengdu Clay are formed in underwater. Base on the quartz grain-size distribution and quartz micro-structure, the origin of the Chengdu Clay was discussed.

Key words: Chengdu Clay, Sichuan Basin, Tibetan Plateau, Chinese Loess Plateau, Qinling Mountains, eolian deposits, origin