

南京周家山下蜀黄土石英颗粒特征及其物源意义

徐洪阳 郑祥民 周立旻 任少芳 王小玉 玄晓娜

(华东师范大学地理科学学院 地理信息科学教育部重点实验室 上海 200241)

摘要 下蜀黄土的成因和物源一直是学术界研究的热点。对南京周家山下蜀黄土的石英粒度和石英表面微结构进行分析,结果显示:粉砂粒级石英颗粒(5~50 μm)占绝对优势;<20 μm 组分平均含量为42.76%,<30 μm 组分平均含量为62.98%;粒度分布曲线和累积曲线总体具有颗粒偏细,呈正偏态,分选较差,峰形尖锐,双峰曲线不对称的特征;粒级—标准偏差曲线呈“双峰”分布,两个明显的标准偏差峰值分别出现在7.962 1 μm 和39.905 2 μm 。石英颗粒表面形态主要以次棱角状为主;表面机械结构具有丰富的蝶形坑、曲脊、贝壳状断口,部分表面出现平行节理面、V形坑;不同粒级组分表面形态和机械结构特征存在差异。分析表明,南京周家山下蜀黄土属典型风成成因堆积物,是多源区物质高度混合搬运堆积的结果。

关键词 石英粒度 表面微结构 物源 下蜀黄土 周家山

第一作者简介 徐洪阳 男 1992年出生 硕士研究生 第四纪环境演变 E-mail: 15921933257@163.com

通讯作者 郑祥民 男 教授 E-mail: xmzheng@re.ecnu.edu.cn

中图分类号 P578.4⁺94 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

下蜀黄土是长江中下游地区广泛分布的中晚更新世浅黄色或黄棕色土状堆积物,是我国第四纪黄土地层的重要组成部分^[1]。近年来,众多学者对下蜀黄土的成因^[2-5]和物源^[6-11]等问题进行研究。在成因问题上,郑乐平等人根据前人研究成果系统评述了下蜀黄土的风成说、水成说和多成因说,认为从搬运营力的先后和主次来说,风成应为第一位^[2];李徐生等^[3]也从沉积学、地球化学^[4]等角度论证了镇江地区下蜀黄土的风成成因,为大多数学者所认同。在物源问题上,下蜀黄土为多源区物质高度混合搬运堆积物的观点逐渐明朗^[4,10]。有的学者认为下蜀黄土的粉尘主要来自我国北方的沙漠,与黄土高原同源^[1,6-7]。还有学者认为主要来自冰期暴露的长江河谷^[8]、当地冲积平原松散沉积物^[9-10]或大陆架沉积^[11]。然而,从更多角度的研究有助于深入理解该套沉积物的成因和物源。

石英是风尘黄土中的主要组成矿物之一^[12]。因其抗风化强度大的特点,风尘堆积过程中的石英粒度不易被后期的成壤作用等改造而更好的反映原始粉尘的粒度状况,对源区特征、搬运动力等有很好的指

示作用。同样因其硬度大、在表生环境下化学稳定性强的特点,加之石英为轻矿物,容易被搬运,石英颗粒的表面形态和微结构特征常被用来理解沉积物的搬运介质和物质来源^[13-14]。

通过分析南京周家山下蜀黄土石英粒度分布、表面微结构特征,探讨其下蜀黄土的形成机制及其物质来源,可为重建北亚热带第四纪古环境提供理论依据,对理解和认识区域粉尘传输机制具有重要的理论意义。

1 剖面特征

采样剖面位于南京市栖霞区,宁镇山脉西北方的周家山(32°09'49.51" N, 118°53'43.17" E)(图1)。所见为新鲜的取土剖面,高6 m,野外据颜色将剖面分为5层,自上而下分别为L_a上黄土层,厚70 cm、厚S_a上古土壤层,厚130 cm、L_b中黄土层,厚160 cm、S_b下古土壤层,厚110 cm、L_c下黄土层,厚130 cm,以下为冲积砾石层(未见底),底层样品ESR测年结果约为350 ka,属晚中更新世以来形成的堆积物^[15]。采样间距为10 cm,共采集样品61个。

2 测试和分析方法

石英单矿物的分离和提纯采用焦硫酸钾熔融—

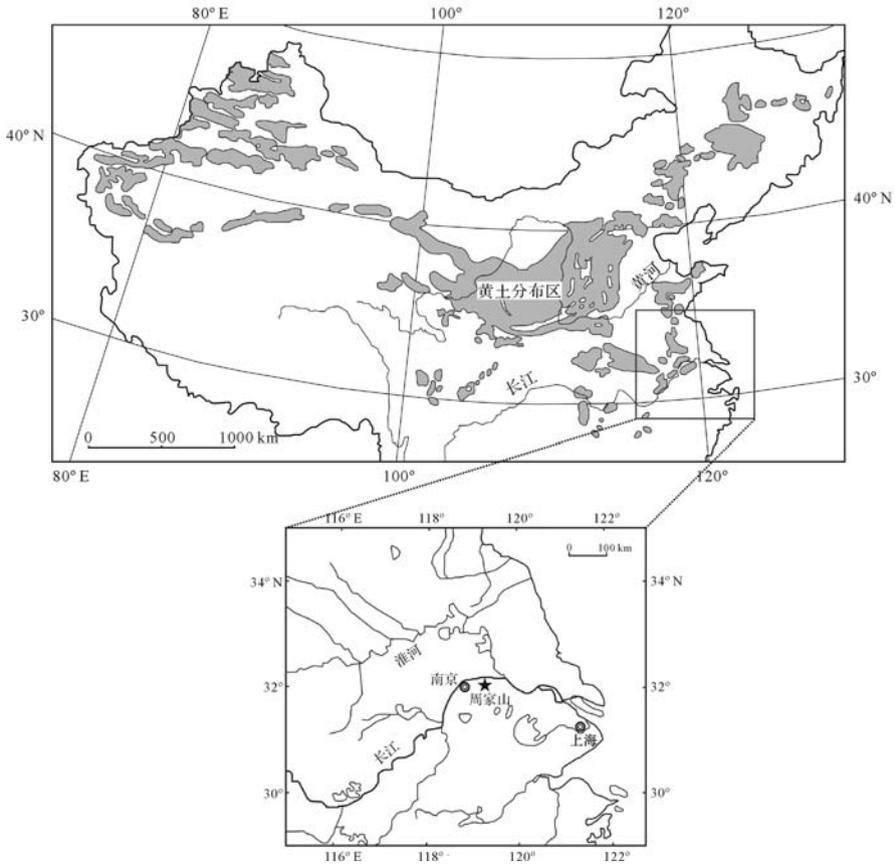


图 1 我国黄土分布及采样点位置(据 Hao, et al., 2010 改绘)

Fig.1 Loess distribution in China and the sampling sites(after Hao, et al., 2010)

氟硅酸浸泡法,详细步骤参考文献[16]。改进地方有:加盐酸去除碳酸盐过程,将电热板加热改成水浴加热,以保证受热均匀,使样品充分反应。

获得的样品随机抽查 4 个,在华东师范大学地理科学学院 X 射线衍射仪上检测石英纯度,结果均显示无其他矿物(图 2)。

孙有斌等^[16-17]通过对分离前后石英颗粒的表面形态和微结构观测发现高温(650℃)、强酸及强氧化反应等化学过程并不会对石英表面造成明显的溶蚀痕迹,认为此方法提取的石英可以用来进行单颗粒微形貌的研究。不少学者^[13,18-19]运用此方法分离石英进行了表面形态和微结构的分析,证实了此方法的合理性。

石英粒度在华东师范大学地理科学学院 Mastersizer 2000 激光粒度仪上测量,测量范围为 0.02 ~ 2 000 μm,测量误差小于 2%。

石英颗粒表面形态和微结构观测:选取剖面中 150 cm、260 cm、440 cm、520 cm 处的 4 个样品共 76 粒受后期成壤作用较弱的石英颗粒,在华东师范大学电

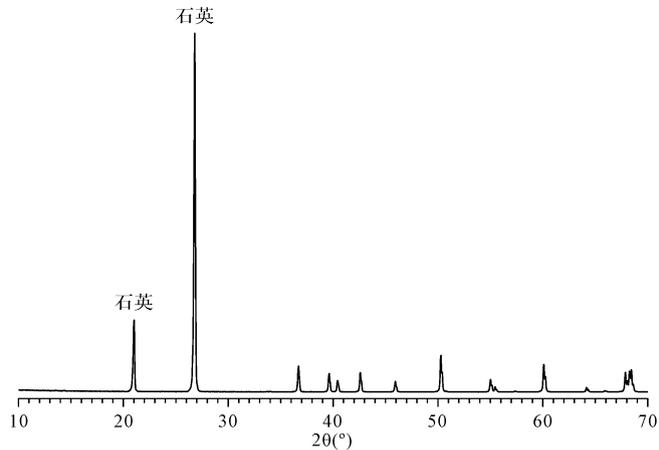


图 2 典型样品 X 射线衍射分析结果(440 cm)

Fig.2 X-ray diffraction analysis of typical sample(440 cm) 子显微镜中心 TM3030Plus 型扫描电子显微镜下观测。

3 结果

3.1 石英粒度特征

3.1.1 石英粒度组成

粗、细颗粒百分含量是黄土粒度研究中常用的指

标。去除后期成壤作用影响的石英颗粒粗、细组分含量的变化可以反映搬运动力大小与其搬运物质来源。本次研究采用 $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 作为黏粒、细粉砂、粗粉砂和砂粒的分界点^[20]。粒度分析表明(图3),南京周家山下蜀黄土剖面各粒级组成有如下特征:

砂粒组分($>50\ \mu\text{m}$):剖面中所测试样品均未发现粒径 $>250\ \mu\text{m}$ 的颗粒。 $>100\ \mu\text{m}$ 的颗粒组分含量变化于 $0.04\% \sim 0.31\%$ 之间,平均含量为 0.16% ,含量非常低; $>50\ \mu\text{m}$ 的颗粒组分含量变化于 $10.59\% \sim 15.63\%$ 之间,平均含量为 12.57% ,各样品间变化幅度较小,都保持在 10% 以上;其中 $50 \sim 100\ \mu\text{m}$ 的极细砂粒组分含量变化于 $10.53\% \sim 15.39\%$ 之间,平均含量为 12.41% 。

粉砂组分($5 \sim 50\ \mu\text{m}$):剖面各样品粗粉砂($10 \sim 50\ \mu\text{m}$)组分的含量最高,为众数粒组,变化于 $61.98\% \sim 69.13\%$ 之间,平均含量为 65.4% ,变化幅度较小;细粉砂($5 \sim 10\ \mu\text{m}$)组分含量变化于 $6.22\% \sim 10.29\%$ 之间,平均含量为 8.69% 。

黏粒组分($<5\ \mu\text{m}$):剖面中黏粒组分含量变化于 $9.84\% \sim 16.19\%$ 之间,平均含量为 13.34% ,为次众数粒级。总体变化趋势与细粉砂组分相同,与粗粉砂组分相反。

其他重要组分($<20\ \mu\text{m}$ 、 $<30\ \mu\text{m}$):剖面中 $<20\ \mu\text{m}$ 粒级组分含量变化于 $34.91\% \sim 47.74\%$,平均含量为 42.76% ; $<30\ \mu\text{m}$ 粒级组分含量变化于 $56.24\% \sim$

67.05% ,平均含量为 62.98% 。

3.1.2 石英粒度分布

在粒度分析中,粒度频率曲线因能更加直观准确地反映各粒度组分信息常被用来追索各沉积组分对应的物质来源和成因方式^[21]。南京周家山下蜀黄土剖面石英粒度频率曲线总体呈双峰态特征(图4A),即一个较高的主峰和一个低矮的次峰。剖面各样品石英粒度分布范围变化于 $0.3 \sim 110\ \mu\text{m}$ 之间,呈正偏态分布。第一众数粒径都分布在 $30\ \mu\text{m}$ 附近,并且自众数粒径向粗粒端减小的速率比向细粒端快。

粒度累积曲线常被用来反映沉积物的搬运方式及其不同搬运方式下分选性好坏^[22]。南京周家山下蜀黄土石英粒度累积曲线呈近 45° 斜角窄态的“S”型分布(图4B)。累积粒度范围短, $<63\ \mu\text{m}$ 组分占绝对优势,主要以悬浮和跳跃搬运为主。悬浮段内曲线呈标准的二段式,两段截点在 $10 \sim 15\ \mu\text{m}$ 之间。截点之前,曲线较平缓,石英颗粒分选较差;截点之后,曲线较陡,石英颗粒分选较好。剖面各样品粒度频率分布曲线和频率累积曲线变化小,变化趋势基本一致。

采用矩值法对南京周家山下蜀黄土剖面石英粒度参数进行计算^[23]。运用 Gradistat 软件计算石英粒度参数(图5),并根据给定的判别标准(ϕ 值标准)分析。粒度参数能够反映物源和沉积物的形成环境^[24],主要包括平均粒径、分选系数、偏度和峰度。剖面石英粒度平均粒径变化范围在 $15.60 \sim 20.93\ \mu\text{m}$ 之间,总平均粒径为 $17.71\ \mu\text{m}$ 。分选系数变化在

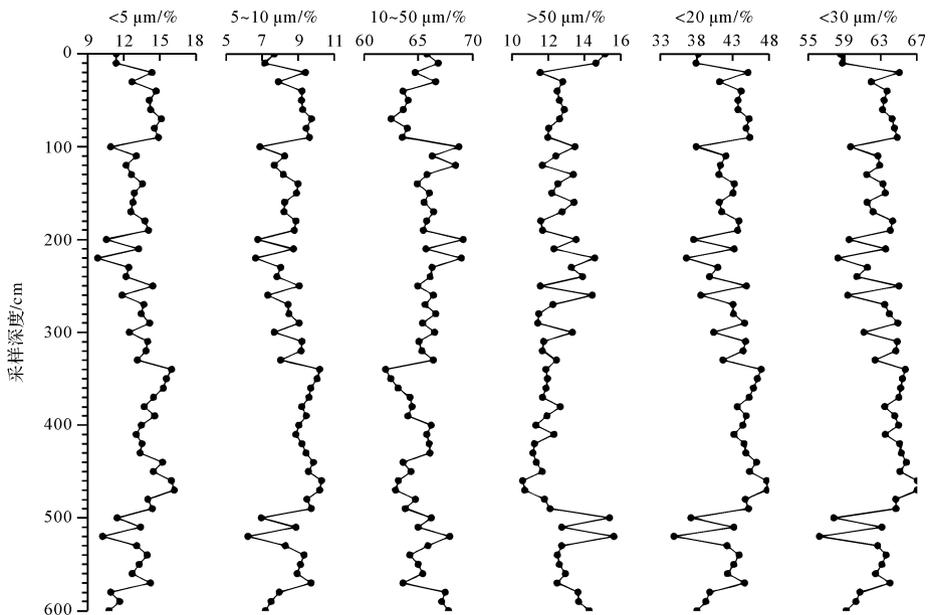


图3 南京周家山剖面下蜀黄土石英粒度各组分含量变化

Fig.3 Vertical variation of the quartz grain size contents of the Xiashu Loess section in Zhoujiashan Nanjing

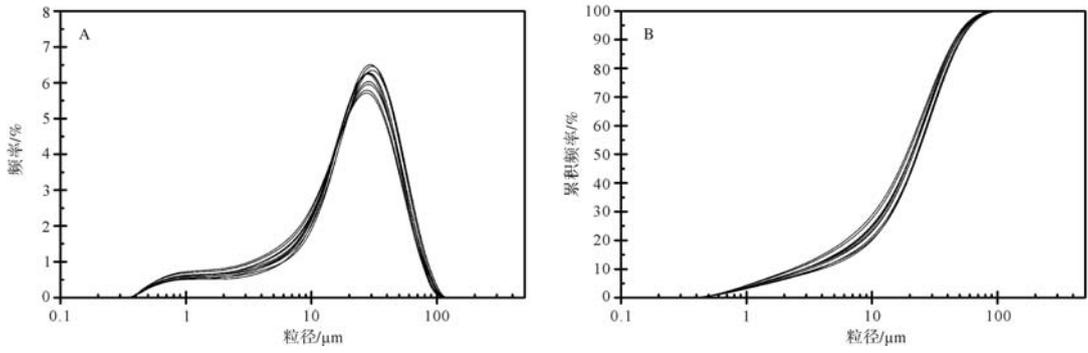


图4 南京周家山剖面下蜀黄土石英粒度频率分布曲线(A)和频率累积曲线(B)

Fig.4 The quartz grain size distribution and cumulative curves of the Xiashu Loess section in Zhoujiashan, Nanjing

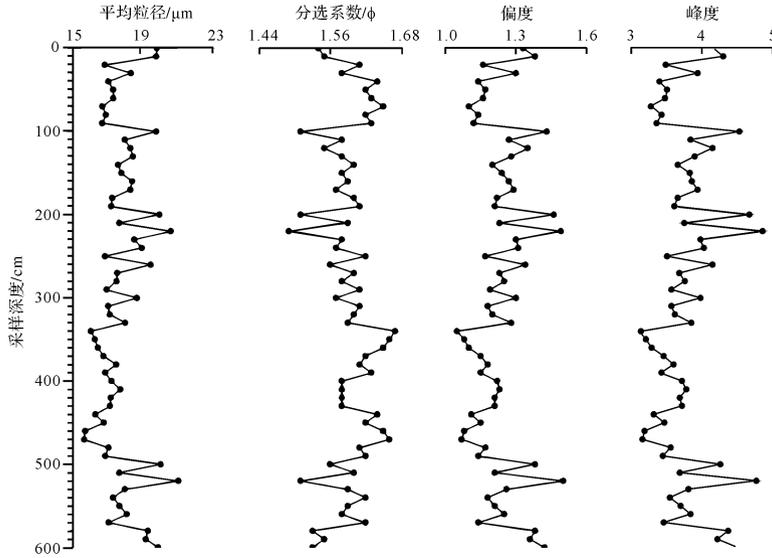


图5 南京周家山剖面下蜀黄土石英粒度参数变化

Fig.5 Vertical variation of the quartz grain size parameters of the Xiashu Loess section in Zhoujiashan, Nanjing

1.49~1.67 之间,平均分选系数为 1.59,分选较差。偏度变化于 1.05~1.50 之间,平均偏度值为 1.23,正偏明显,颗粒偏细;剖面峰度变化范围为 3.54~5.26,平均峰度值为 4.16,峰形为窄峰态。根据 ϕ 值标准综合判别,南京周家山下蜀黄土剖面石英粒度总体具有颗粒偏细,呈正偏态,分选较差,峰形尖锐,双峰曲线不对称的特征。据北方黄土石英粒度参数研究^[18,21],平均粒径变化在 19~26 μm 之间;分选系数变化于 1.08~1.26 之间;偏度变化在 0.61~0.82 之间;峰度变化于 2.86~3.47 之间。与北方黄土相比,下蜀黄土石英颗粒平均粒径更细,造成了颗粒更正偏;粗颗粒的减少造成了峰度值变大。

3.1.3 石英粒度的粒级—标准偏差曲线

粒级—标准偏差变化曲线反映不同样品的粒度含量在各粒径范围内的差异性。高的标准偏差值反映了不同样品的粒度含量在某一粒径范围内差异较

大,低的标准偏差值则反映了粒度含量在某一粒径范围内差异较小,据此确定样品序列中粒度变化存在明显差异的粒度组分的个数和范围,这些粒度组分与物源和沉积动力密切相关^[24-25]。

根据标准偏差计算公式^[26-27],计算南京周家山下蜀黄土剖面 61 个样品的粒级—标准偏差,结果见图 6。图 6 显示了用粒级—标准偏差的算法获得的每个组分的标准偏差随粒级的变化。南京周家山下蜀黄土剖面石英粒度的粒级—标准偏差曲线呈现“双峰”分布。2 个明显的标准偏差峰值分别出现在 7.962 1 μm 和 39.905 2 μm ,所对应的粒度组分范围分别为 0.399 1~15.886 6 μm , 15.886 6~112.468 3 μm 。

3.2 石英颗粒表面形态特征

采用特征颗粒百分比法对 76 粒石英颗粒进行统计,统计结果见表 1。采用以 5~30 μm 、30~50 μm 分

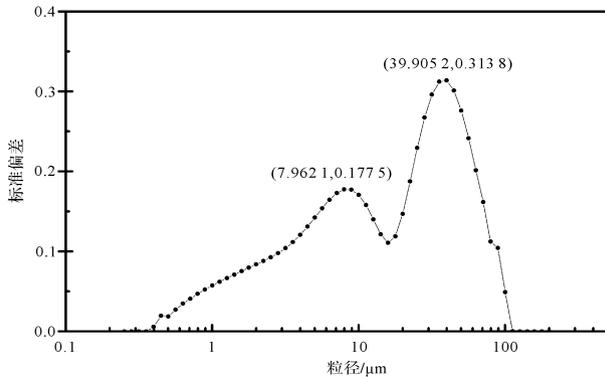


图6 南京周家山剖面下蜀黄土石英粒度粒级—标准偏差曲线

Fig.6 Grade-standard deviation curves of the quartz grain size of the Xiashu Loess section in Zhoujiashan, Nanjing

粒级进行统计是基于中远距离(1 500 km 以上)风尘沉积传输的颗粒主要以<30 μm 组分占绝对优势^[28]的尝试,试图从比较两者异同的角度,探讨下蜀黄土的物源问题。

3.2.1 石英颗粒形态

石英颗粒形态是区别外营力种类和搬运距离长短的重要标志^[29]。南京周家山下蜀黄土石英颗粒(图7A)以不规则多面体占绝对优势,极少数为近椭

球体。根据颗粒磨圆度标准^[30]进行统计表明,南京周家山下蜀黄土石英颗粒以次棱角为主,占58%;尖棱角和次圆状次之,分别占25%和17%;没有出现圆状颗粒。

在5~30 μm 粒级中,石英颗粒形态主要以次棱角状和次圆状为主(图7:1~8),分别占64%和26%,尖棱角仅占10%,颗粒边缘出现较多的凸边,棱角不尖锐;在30~50 μm 粒级中,石英颗粒形态主要以次棱角状和棱角状为主(图7:9~16),两者所占比例相当,分别为51%和41%,次圆状仅占8%,颗粒棱角分明,多为直角或锐角棱角,出现凹边和直边。

3.2.2 石英颗粒表面机械结构特征

石英颗粒表面微结构特征主要分为机械结构特征和化学结构特征。石英颗粒表面机械结构特征的形成主要受后期搬运动力(风、流水、冰川等)的影响,不同搬运动力作用在颗粒表面的机械结构特征不同。以风为搬运动力的石英颗粒表面机械结构特征主要有蝶形坑、平行节理面、麻面结构、曲脊等;以流水为搬运动力的石英颗粒表面机械结构特征主要有V形坑、水下磨光面、贝壳状断口等;而大贝壳状断口、压坑、平行擦痕等则是以冰川为主要搬运动力的石英颗粒表面机械结构特征^[31]。

表1 南京周家山下蜀黄土石英颗粒形态、表面机械结构特征统计

Table 1 Statistics on the features of surface mechanical texture and shape of quartz grains of the Xiashu Loess Section in Zhoujiashan, Nanjing

深度/cm 层位	150		260		440		520		频率/%		
	S_a		L_b		S_b		L_c		5~30	30~50	5~50
粒级/ μm	5~30	30~50	5~30	30~50	5~30	30~50	5~30	30~50	5~30	30~50	5~50
数量/粒	11	10	8	10	8	9	12	8	100	100	100
尖棱角	2	5	0	4	1	2	1	4	10	41	25
次棱角	6	4	6	5	6	7	7	3	64	51	58
次圆	3	1	2	1	1	0	4	1	26	8	17
圆	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
蝶形坑	11	9	8	8	7	6	9	8	90	84	87
新月形坑	1	3	1	2	0	1	1	1	8	19	13
V形坑	4	4	2	3	0	1	0	3	15	30	22
麻面结构	0	2	0	2	0	3	4	1	10	22	16
三角形坑	1	1	2	0	0	0	1	0	10	3	7
平行节理面	3	2	1	0	1	2	3	2	21	16	18
水下磨光面	1	1	0	1	0	1	1	1	5	11	8
贝壳状断口	2	6	2	5	0	4	5	1	23	43	33
翻卷节理薄片	1	0	1	0	0	0	1	0	8	0	4
曲脊	5	1	2	4	2	1	2	2	28	22	25
直弯撞击沟槽	6	5	4	1	3	5	3	5	41	43	42
断裂裂隙	0	0	1	1	0	1	1	0	5	5	5
不规则外形坑	0	1	0	1	0	0	0	0	0	5	3
擦痕	0	0	1	2	0	1	0	1	3	11	7

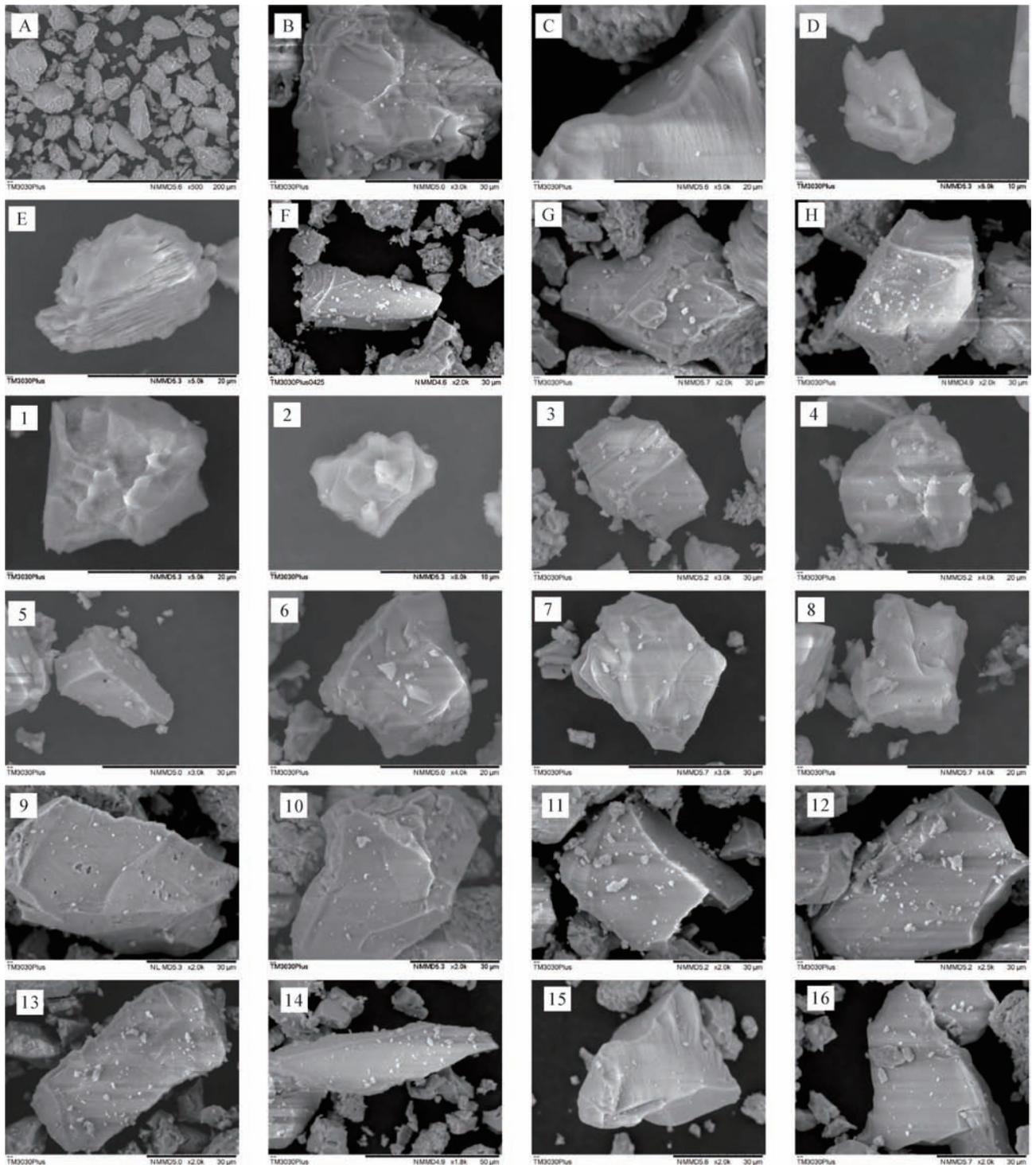


图 7 石英表面微结构及其对比

编号说明:A 为石英颗粒形态, L_c; B 为蝶形坑, S_b; C 为曲脊+蝶形坑, L_c; D 为翻卷节理薄片, S_a; E 为平行节理面, S_a; F 为贝壳状断口, S_b; G 为 V 形坑, S_b; H 为水下磨光面, S_b。1、2、9、10 为 S_a; 3、4、11、12 为 L_b; 5、6、13、14 为 S_b; 7、8、15、16 为 L_c。1~8 为 5~30 μm 颗粒; 9~16 为 30~50 μm 颗粒。

Fig.7 Surface micro-structure of quartz grains and its comparison

Newsome^[32] 研究认为, 特征出现频率大于 75% 为大量出现, 25%~75% 的为正常出现, 2%~25% 的为少量出现, 小于 2% 为极少量出现, 甚至不出现。

南京周家山下蜀黄土石英颗粒表面机械结构特征统计结果如下:

从全粒级看, 蝶形坑(图 7B) 出现概率为 87%,

为大量出现。直弯撞击沟槽、贝壳状断口(图7F)、曲脊(图7C)为正常出现,出现概率分别为42%、33%、25%。直弯撞击沟槽以直形沟槽为主;贝壳状断口以小贝壳状断口($<20\ \mu\text{m}$)为主;曲脊与蝶形坑往往同时出现,特征明显。其他机械特征出现频率在2%~25%之间,为少量出现;但V形坑(图7G)、平行节理面(图7E)、麻面结构、新月形坑的出现频率相对较高,分别为22%、18%、16%和13%,其他特征出现频率在10%以下。

从分粒级看,5~30 μm 粒级段蝶形坑为大量出现;曲脊和直弯撞击沟槽为正常出现;除不规则外形坑外其他机械特征均为少量出现,但贝壳状断口、平行节理面出现频率在20%以上。30~50 μm 粒级段蝶形坑同样为大量出现,但出现频率比5~30 μm 粒级段低;直弯撞击沟槽、贝壳状断口和V形坑为正常出现;除翻卷节理薄片(图7D)外其他机械特征均为少量出现,曲脊和麻面结构出现频率在20%以上,水下磨光面出现频率也达到11%。两粒级段对比发现,V形坑、贝壳状断口出现频率差别最大,相差在15%以上;且都是30~50 μm 粒级段比5~30 μm 粒级段出现频率更高。

4 讨论

4.1 南京周家山下蜀黄土的成因分析

风尘堆积物的形成一般需要满足三个条件:一是要有相对稳定的地形作为沉积基底;二是要有适当的大气环流作为动力;三是要有充足的物质来源^[33]。南京周家山下蜀黄土地处宁镇山脉西北方的岗地上,地势相对较高,又有南部宁镇山脉的阻挡,为其堆积提供了相对稳定的地形。早更新世晚期(约0.85 Ma),随着亚洲内陆干旱化程度加强,中国北部粉尘通量增大^[34-35],东亚季风随之加强^[36]。沿黄土高原至南京地区方向上,石英平均粒径变细的趋势特征,反映了与冬季风方向上粉尘的搬运距离变化相吻合,初步说明了低空冬季风为下蜀黄土堆积物的搬运提供了主要动力^[37]。此时,中国北方沙漠化程度加重,江淮平原细粒物质大量出露地表^[10],中国东部大陆架出露^[11],则为长江中下游地区持续的粉尘堆积提供了充足的物质来源。三个条件的满足为南京周家山下蜀黄土风尘堆积提供可能。

风尘黄土沉积物的石英粒度一般呈主峰明显、出现细尾的双峰态,粉砂粒级组分占绝对优势^[14,38]。南京周家山下蜀黄土石英粒度10~50 μm 组分平均

含量为65.4%,在各粒级中占绝对优势。该粗粉砂组分作为风尘的“基本粒组”^[12],表明了下蜀黄土的风力搬运特性。粒度频率分布曲线的双峰态、细尾和累积曲线呈现两段式,以悬浮搬运为主的特征与第四纪典型黄土—古土壤非常相似^[13]。剖面各样品的粒度分布曲线形态非常吻合,如此均一的剖面变化暗示了其风成成因特性。

据研究,中等风暴条件下 $<20\ \mu\text{m}$ 的粉尘以在空气中长期悬浮的形式被风力搬运,是远源风尘物的主要组成部分^[39]。刘东生等对源自1500 km以外中国北部荒漠的现代大气降尘的研究揭示,风尘中以 $<30\ \mu\text{m}$ 的组分占优势^[28]。孙有斌等对不同沉积物的全样与石英样粒度对比,发现大气降尘全样与提取的石英样粒度组成差别最小^[21]。而南京周家山下蜀黄土剖面石英粒度 $<20\ \mu\text{m}$ 粒级组分平均含量为42.76%, $<30\ \mu\text{m}$ 粒级组分平均含量为62.98%,也表明了其风成沉积特性。

前人研究发现,棱角状石英颗粒在沉积物中占主导地位,是风成沉积的典型特征^[40-41];而蝶形坑大量出现则是风作用于石英颗粒表面的主要结果^[42]。南京周家山下蜀黄土石英颗粒形态主要以次棱角状、棱角状为主,次圆状次之,与第四纪典型黄土和晚第三纪风尘堆积中的石英颗粒形态相类似^[43-44]。表面具有丰富的蝶形坑、部分表面具有曲脊、平行节理面和麻面结构,是石英颗粒在风力搬运过程中表面被撞击、侵蚀的结果,也反映了其风力搬运特性。同时发现,所研究的石英颗粒表面部分出现“V”形坑、水下磨光面和贝壳状断口等水流作用特征。伊继雪、范庆斌等人通过对下蜀黄土和南方红土的石英颗粒形态研究也发现类似特征^[19,45]。而Nie *et al.*^[46]研究发现黄土高原堆积物主要来自青藏高原东北部,是先经黄河携带搬运至银川—河套谷地堆积,后经风力搬运形成。Liu *et al.*^[8]最近研究发现,泰山新村和幕府山剖面的下蜀黄土 $>40\ \mu\text{m}$ 颗粒的碎屑锆石U-Pb年龄谱与黄土高原和北方沙漠存在差异,而与长江河漫滩沉积物比较吻合。这些证据表明了南京周家山下蜀黄土堆积物形成过程的复杂性,部分颗粒可能在风力搬运之前经历过河流的搬运作用。

综上所述,南京周家山剖面下蜀黄土厚度达6 m,时间覆盖约35万年,其他任何沉积动力都难以形成如此均质的、在石英粒度分布、颗粒表面形态和结构上与典型风尘沉积非常相似的沉积序列。南京周家山下蜀黄土属于典型的风成成因堆积物。

4.2 南京周家山下蜀黄土的物源探讨

中国风尘黄土主要是受近地面东亚冬季风作用搬运形成的^[47]。冬季蒙古和西伯利亚高压与太平洋赤道附近的热带低压造成了巨大气压差,形成大致偏北的冬季风。在特定风向的作用下,风尘沉积物的分选性好坏主要与其搬运距离、源区物质种类和后期风化成壤作用有关。一般来说,单一物源的风尘堆积物随搬运距离的增加,分选性变好。南京周家山下蜀黄土石英粒度基本剔除了后期成壤作用的影响,其分选系数平均为1.59,而北方黄土为1.23^[18]。在冬季风方向上,随搬运距离的增加,分选性更差,这表明在搬运过程中可能存在其他物质的汇入^[24]。根据 ϕ 值标准综合判别,南京周家山下蜀黄土剖面石英粒度总体具有颗粒偏细,呈正偏态,分选较差,峰形尖锐,双峰曲线不对称的特征,这种特征初步指示了该剖面下蜀黄土是多种物质经过高度分选与混合后形成的风成沉积物^[30]。

近年来,各国学者利用函数拟合法^[48]、端元模型法^[49-50]、粒度—标准偏差法^[26,51]等方法探讨了沉积物粒度不同来源的多组分分离方法,对追溯物源、探讨季风等方面取得不错效果。我们采用粒度—标准偏差法对南京周家山下蜀黄土剖面的石英粒度进行分析发现,该曲线呈“双峰”分布,表明其主要受两个因素控制。这种结果的出现是不同物源或沉积动力过程共同作用的结果^[26]。之前的分析已经表明南京周家山下蜀黄土风成成因特性,基本排除多种沉积动力过程的影响,则“双峰”的出现很有可能指示了两种或多种物源的存在。

通过对不同粒度段石英颗粒表面的观测发现,南京周家山下蜀黄土剖面30~50 μm 粒度中石英颗粒棱角分明,多为直角或锐角棱角,出现凹边和直边,这可能是近距离搬运,颗粒未受强烈摩擦和碰撞所致。5~30 μm 粒度中石英颗粒磨圆度较好,出现较多的凸边,棱角不尖锐,这可能由于受到远距离搬运,摩擦碰撞导致。30~50 μm 粒度段石英颗粒表面光洁,风力作用下痕迹相对较少,而V形坑、贝壳状断口等水流作用特征较为明显;0~30 μm 粒度段石英颗粒表面坑、洼广布,风力作用更加明显,并没有出现较多的水流作用特征。这些特征表明0~30 μm 和30~50 μm 的物质来源是存在差异的。

同时,前人研究过程中也发现下蜀黄土物质来源的复杂性。钱鹏等^[52]通过研究上海地区沙尘暴天气大气颗粒物的地球化学元素发现,沙尘暴样品的物质

来源既有西北内陆地区的贡献,也有局部地源物质的贡献。曹希强等^[53]通过研究东海岛屿浪岗山黄土剖面的粒度、磁化率和地球化学元素等指标发现,该地岛屿黄土不仅有来自西北内陆的远源风尘物质,还有接受东海陆架的“近源”物质。李徐生等^[4]通过对镇江下蜀黄土稀有元素的研究发现,下蜀黄土可能是一个广泛而开放的空间范围,在搬运过程中可能经历了高度混合。乔彦松^[36]、郝青振等^[10]通过对南方风尘序列的磁性地层学和地化元素的研究认为南方风尘堆积物物质来源具有多样性。结合上述的分析,我们认为南京周家山下蜀黄土应该是多源物质混合堆积的结果。

5 结论

本文对南京周家山下蜀黄土的石英粒度特征、表面微结构特征进行了详细的分析,并结合前人的研究结果进行对比。可以得出以下几点认识:

(1) 石英粒度粉砂粒级(5~50 μm)占绝对优势;黏粒组分与粗粉砂组分变化趋势相反;<20 μm 组分平均含量为42.76%,<30 μm 组分平均含量为62.98%;粒度分布曲线和累积曲线与第四纪典型黄土相类似,总体具有颗粒偏细,呈正偏态,分选较差,峰形尖锐,双峰曲线不对称的特征;粒度—标准偏差曲线呈“双峰”分布,2个明显的标准偏差峰值分别出现在7.962 143 μm 和39.905 2 μm 。

(2) 石英颗粒表面形态主要以次棱角状为主,棱角状和次圆状次之;表面具有丰富的风力作用留下的蝶形坑、曲脊、平行节理面和麻面结构,部分表面出现流水作用留下的贝壳状断口、水下磨光面、V形坑等机械结构;不同粒度段表面形态和机械结构特征存在差异,30~50 μm 粒度组分比5~30 μm 粒度组分的流水作用特征明显。

(3) 石英粒度特征和石英表面微结构特征表明,南京周家山下蜀黄土属典型风成成因堆积物,是多源区物质高度混合搬运堆积的结果。

致谢 感谢编辑部老师和审稿专家提出的宝贵意见;感谢吕红华老师、钱鹏老师在论文修改过程中提出的真切意见;感谢同门师兄师姐、师妹在实验过程中给予我的帮助。

参考文献 (References)

- 1 郑祥民. 长江三角洲及海域风尘沉积与环境[M]. 上海:华东师范大学出版社,1999:1-170. [Zheng Xiangmin. Aeolian Sediments and

- Environment in Yangtze River Delta and the Adjacent Coastal Ocean [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1999: 1-170.]
- 2 郑乐平,胡雪峰,方小敏. 长江中下游地区下蜀黄土成因研究的回顾[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 20(1): 54-57. [Zheng Leping, Hu Xuefeng, Fang Xiaomin. A review of the study on the origin of Xiashu Loess in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2002, 20(1): 54-57.]
 - 3 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): 25-32. [Li Xusheng, Yang Dayuan, Lu Huayu. Grain-size features and genesis of the Xiashu Loess in Zhenjiang[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1): 25-32.]
 - 4 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. [Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang dayuan, et al. REE geochemistry of Xiashu Loess in Zhenjiang, Jiangsu province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 1-7.]
 - 5 邵家骥. 长江下游第四纪下蜀黄土的成因探讨[J]. 中国区域地质, 1998(4): 312-319. [Shao Jiayi. The origin of the Xiashu Loess in the lower reaches of the Yangzi River[J]. Regional Geology of China, 1998(4): 312-319.]
 - 6 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): 178-188. [Lei Xiangyi. Grain-size analysis and genesis of Loess in the Qinling Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(2): 178-188.]
 - 7 邵家骥,李长生,陈舒舒,等. 江苏南部常熟虞山下蜀土成因探讨[J]. 江苏地质, 2007, 31(4): 305-309. [Shao Jiayi, Li Changsheng, Chen Shushu, et al. Genetic discussions on Xiashu soil of Yushan in Changshu, south Jiangsu[J]. Jiangsu Geology, 2007, 31(4): 305-309.]
 - 8 Liu Fei, Li Gaojun, Chen Jun. U-Pb ages of zircon grains reveal a proximal dust source of the Xiashu loess, Lower Yangtze River region, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(20): 2391-2395.
 - 9 Hao Qingzhen, Guo Zhengtao, 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.
 - 10 Qiao Yansong, Hao Qingzhen, Peng Shasha, et al. Geochemical characteristics of the eolian deposits in southern China, and their implications for provenance and weathering intensity[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 308(3/4): 513-523.
 - 11 赵松龄,于洪军. 晚更新世末期黄、渤海陆架沙漠化环境的形成[J]. 第四纪研究, 1996(1): 42-47. [Zhao Songling, Yu Hongjun. Shelf desertization environment in the Bohai and Yellow Seas during the Last Glacial Maximum[J]. Quaternary Sciences, 1996(1): 42-47.]
 - 12 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1-497. [Liu Dongsheng. Loess and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-497.]
 - 13 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. [Liu Jinfeng, Guo Zhengtang, Qiao Yansong, et al. Eolian origin of the Miocene loess-soil sequence at Qin'an, China: Evidence of quartz morphology and quartz grain-size[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(24): 2806-2809.]
 - 14 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): 2094-2097. [Sun Youbin, Lu Huayu, An Zhisheng. Grain size distribution of quartz isolated from Chinese loess1 paleosol[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(19): 2094-2097.]
 - 15 刘峰,王昊,秦志帆,等. 南京周家山下蜀黄土色度特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 143-151. [Liu Feng, Wang Hao, Qin Yifan, et al. Chroma characteristics of the Zhoujiashan Xiashu Loess profile in Nanjing and its significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(5): 143-151.]
 - 16 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. [Sun Youbin. Separation of quartz minerals from loess samples[J]. Rock and Mineral Analysis, 2001, 20(1): 23-26.]
 - 17 Xiao Jule, Porter S C, An Zhisheng, et al. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 yr[J]. Quaternary Research, 1995, 43(1): 22-29.
 - 18 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. [Hu Zhaoquo, Feng Jinliang, Ju Jianting. Grain-size distribution and micro-structure of quartz in the Chengdu clay[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(4): 392-406.]
 - 19 范庆斌. 中国南方风成沉积石英颗粒表面形态特征及环境意义[D]. 金华: 浙江师范大学, 2014. [Fan Qinbin. Surface features of quartz grains of Aeolian deposit in south China and its environmental significance[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2014.]
 - 20 王永焱,林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990. [Wang Yongyan, Lin Zaiguan. The Structure Features and Physical and Mechanical Properties of Loess in China[M]. Beijing: Science Press, 1990.]
 - 21 孙有斌,周杰,鹿化煜,等. 风化成壤对原始粉尘粒度组成的改造证据[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 16-20. [Sun Youbin, Zhou Jie, Lu Huayu, et al. Modification to the grain size distribution of original eolian dust by weathering and pedogenic processes[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 16-20.]
 - 22 安福元,马海州,樊启顺,等. 粒度在沉积物物源判别中的运用[J]. 盐湖研究, 2012, 20(1): 49-56. [An Fuyuan, Ma Haizhou, Fan Qishun, et al. The application of grain size analysis in sediments provenance discriminant[J]. Journal of Salt Lake Research, 2012, 20(1): 49-56.]
 - 23 毛龙江,庞奖励,刘晓燕. 南京下蜀黄土图解法与矩值法粒度参数对比研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 95-99. [Mao Longjiang, Pang Jiangli, Liu Xiaoyan. Comparative study on grain-size parameters of Xiashu Loess derived from graphic and moment methods in Nanjing[J]. Journal of Shaanxi Normal University: Nature Science Edition, 2007, 35(3): 95-99.]

- 24 刘冬雁,李巍然,彭莎莎,等. 粒度分析在中国第四纪黄土古气候研究中的应用现状[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2010,40(2):79-84. [Liu Dongyan, Li Weiran, Peng Shasha, et al. Current application of grain size analysis in Chinese loess paleoclimatic study [J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(2): 79-84.]
- 25 向荣,杨作升,Satio Y,等. 济州岛西南泥质区近 2300a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2006,36(7):654-662. [Xiang Rong, Yang Zuosheng, Satio Y, et al. East Asia winter monsoon changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records during the last 2300 years in mud area southwest off Cheju island, ECS [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2006, 36(7): 654-662.]
- 26 孙有斌,高抒,李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. 科学通报,2003,48(1):83-86. [Sun Youbin, Gao Shu, Li Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(1): 83-86.]
- 27 陈桥,刘冬艳,陈颖军,等. 粒度—标准偏差法和主成分因子分析法在粒度敏感因子提取中的对比[J]. 地球与环境,2013,41(3):319-325. [Chen Qiao, Liu Dongyan, Chen Yingjun, et al. Comparative analysis of grade-standard deviation method and factors analysis method for environmental sensitive factor analysis[J]. Earth and Environment, 2013, 41(3): 319-325.]
- 28 Liu Q S. A satellite image study on the dust storm at Beijing on April 17-21, 1880[C]// Quaternary Environment of China. Beijing: China Ocean Press, 1982: 49-52.
- 29 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. [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.]
- 30 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,2003. [Jiang Zaixing. Sedimentology[M]. Petroleum Industry Press, 2003.]
- 31 黄波清. 中国石英砂表面结构特征图谱[M]. 北京:海洋出版社,1984. [Huang Jiqing. Map of Quartz Sand Surface Structural Characteristics in China[M]. Beijing: Ocean Press, 1985.]
- 32 Newsome D, Ladd P. The use of quartz grain microtextures in the study of the origin of sand terrains in Western Australia[J]. Catena, 1999, 35(1): 1-17.
- 33 徐树建. 晚第四纪我国风尘堆积的区域对比研究[M]. 济南:山东人民出版社,2012:1-248. [Xu Shujian. The Research of Dust Accumulation in China and its Regional Contrast During Late Quaternary [M]. Jinan: People's Publishing House in Shandong, 2012: 1-248.]
- 34 Liu Xiuming, Liu T, Xu Tongchun, et al. The Chinese loess in Xifeng, I. The primary study on magnetostratigraphy of a loess profile in Xifeng area, Gansu province[J]. Geophysical Journal, 1988, 92(2): 345-348.
- 35 Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China[J]. Nature, 1982, 300(5891): 431-433.
- 36 乔彦松,郭正堂,郝青振,等. 皖南风尘堆积—土壤序列的磁性地层学列的磁性地层学研究及其古环境意义[J]. 科学通报,2003,48(13):1465-1469. [Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, et al. Loess-soil sequences in Southern Anhui Province: magnetostratigraphy and paleoclimatic significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(13): 1465-1469.]
- 37 孙东怀,鹿化煜,Rea D,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):327-335. [Sun Donghuai, Lu Huayu, Rea D, et al. Bimode grain-size distribution of Chinese Loess and its paleoclimate implication [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 327-335.]
- 38 Sun Youbin, Lu Huayu, An Zhisheng. Grain size of loess, palaeosol and Red Clay deposits on the Chinese Loess Plateau: significance for understanding pedogenic alteration and palaeomonsoon evolution[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 241(1): 129-138.]
- 39 Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits [M]. London: Academic Press, 1987: 1-165.
- 40 Whalley W B, Marshall J R, Smith B J. Origin of desert loess from some experimental observations[J]. Nature, 1982, 300(5891): 433-435.
- 41 Pye K, Sperling C H B. Experimental investigation of silt formation by static breakage processes: the effect of temperature, moisture and salt on quartz dune sand and granitic regolith[J]. Sedimentology, 1983, 30(1): 49-62.
- 42 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(1):35-40. [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(1): 35-40.]
- 43 卢演涛,文启忠,黄伯钧,等. 中国黄土物质来源的初步探讨——石英粉砂颗粒表面结构的电子显微镜研究[J]. 地球化学,1976(1):47-53. [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]. Geochemica, 1976(1): 47-53.]
- 44 Guo Z T, Peng S Z, Hao Q Z, et al. Origin of the Miocene-Pliocene red-earth formation at Xifeng in Northern China and implications for paleoenvironments[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 170(1/2): 11-26.]
- 45 伊继雪. 第四纪加积型红土与下蜀黄土理化特征对比及环境意义[D]. 金华:浙江师范大学,2010. [Yi Jixue. Comparative study on Quaternary Red Earth and Xiashu Loess in physical and chemical characteristics and its environmental significance[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2010.]
- 46 Nie J, Stevens T, Rittner M, et al. Loess plateau storage of northeastern Tibetan plateau-derived yellow river sediment[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8511.
- 47 孙继敏. 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程[J]. 第四纪研究,2004,24(2):175-183. [Sun Jimin. Provenance, forming mechanism and transport of Loess in China[J]. Quaternary Science, 2004, 24(2): 175-183.]

- 48 Prins M A, Postma G, Weltje G J. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: the Makran continental slope[J]. *Marine Geology*, 2000, 169(3/4): 351-371.
- 49 Ding Z L, Yu Z W, Yang S L, et al. Coeval changes in grain size and sedimentation rate of eolian loess, the Chinese Loess Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(10): 2097-2100.
- 50 Pichevin L, Cremer M, Griaudeau J, et al. A 190 Ky record of lithogenic grain-size on the Namibian slope: forging a tight link between past wind-strength and coastal upwelling dynamics[J]. *Marine Geology*, 2005, 218(1/2/3/4): 81-96.
- 51 薛积彬, 钟巍. 干旱区湖泊沉积物粒度组分记录的区域沙尘活动历史: 以新疆巴里坤湖为例[J]. *沉积学报*, 2008, 26(4): 647-654, 669. [Xue Jibin, Zhong Wei. Variations in dust event reflected by grain-size component of lacustrine records in droughty area: A case study on Barkol Lake, Xinjiang, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 647-654, 669.]
- 52 钱鹏, 郑祥民, 周立旻. 沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义[J]. *环境科学*, 2013, 34(5): 2010-2017. [Qian Peng, Zheng Xiangmin, Zhou Limin. Geochemical characteristics and sources of atmospheric particulates in Shanghai during dust storm event[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(5): 2010-2017.]
- 53 曹希强, 郑祥民, 马燕, 等. 东海浪岗山列岛风尘沉积的新证据[J]. *地理与地理信息科学*, 2006, 22(2): 78-82. [Cao Xiqiang, Zheng Xiangmin, Ma Yan, et al. New evidences of aeolian deposits at Langgangshan islands in East China Sea[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(2): 78-82.]

Characteristics of Quartz Grains of the Xiashu Loess in Zhoujiashan Nanjing and Its Provenance Significance

XU HongYang ZHENG XiangMin ZHOU LiMin REN ShaoFang
WANG XiaoYu XUAN XiaoNa

(Key Laboratory of Geo-information Science of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The genesis and source of the Xiashu Loess has always been a hotspot of academic research. We have analyzed the grain size of quartz and its surface microstructure of the Xiashu Loess in Zhoujiashan Nanjing. The results show that silt fraction of quartz grains (5~50 μm) accounts for absolute advantage. The content of the coarse silt fraction of quartz grains (10~50 μm) occupies 65.4%. The content of <30 μm component occupies 62.98%, while the content of <20 μm component occupies 42.76%. There is an opposite changes of the content in section between clay fraction and coarse silt fraction. The Xiashu Loess in Zhoujiashan Nanjing is similar to typical Northern Loess in China with the particle size distribution and cumulative curves. Overall, it presents the characteristics of very fine skewness, poorly sorting, leptokurtic and asymmetrical bi-modal curve in quartz grain size parameters. Grade-standard deviation curves present the distribution of "twin peak". Two obvious peaks in standard deviation is nearly 7.962 1 μm and 39.905 2 μm . The scope of the grain size fraction, corresponding to the two peaks, present to 0.399 1~15.886 6 μm and 15.886 6~112.468 3 μm , respectively. The surface shapes of quartz grains are mainly sub-angular. Surface mechanical structures not only have the characteristics of eolian features such as rich dish-shaped pits, curve ridge, parallel joint surface, textured structure and so on, but also slightly show the underwater environment characteristic as conchoidal breakage fractures, underwater ground surface and V-shaped pits. Meanwhile, it is different to the surface microstructure between 5~30 μm component and 30~50 μm component. Finally, our analysis has found that the Xiashu Loess in Zhoujiashan Nanjing belongs to the typical eolian-formation debris. It is probably a high degree of mixture with multiple sources. Our study has an important theoretical significance to understand the area dust transport mechanism.

Key words: quartz grain size; surface microstructure; provenance; Xiashu Loess; Zhoujiashan