

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019071602

铜陵红土石英颗粒特征及其环境意义

赵亚军^{1,2}, 杨立辉^{1,2}, 张硕^{1,2}, 董有进^{1,2}

1. 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241000

2. 资源环境与地理信息工程安徽省工程技术研究中心, 芜湖 241000

摘要: 目前我国南方网纹红土的成因、物源存在争议, 通过分析铜陵红土剖面石英粒度和石英颗粒表面形态特征, 并结合已发表年代数据探讨了红土沉积物的搬运动力和物质来源。结果表明, 铜陵剖面石英粒度表现出明显的风力搬运特征, 粒径整体偏细, 剖面自下而上粒径变粗, 粗粉砂($10\sim50\text{ }\mu\text{m}$)组分为众数粒组, 粒度频率分布曲线总体呈现出双峰且主峰明显的特征, 并在粗粒端含有隐峰, 颗粒总体分选较差, 呈正偏态, 峰态尖锐; 石英颗粒大多呈次棱角状或次圆状, 颗粒表面既出现水下磨光面、V型坑、三角型坑等水成特征, 也出现碟型坑、新月型坑、麻坑等风成特征, 还具有两种特征叠加的现象。剖面上自下而上颗粒磨圆度逐渐变好, 风成特征更加明显。综合分析推测铜陵网纹红土是风力搬运近源与远源物质共同沉积, 并随着东亚季风的变化, 不同物源区物质的贡献程度也发生转变。

关键词: 石英粒度; 表面特征; 网纹红土; 搬运动力; 物源

中图分类号:P532 文献标识码:A

Characteristics of quartz grains in the red clay of Tongling City and their environmental implications

ZHAO Yajun^{1,2}, YANG Lihui^{1,2}, ZHANG Shuo^{1,2}, DONG Youjin^{1,2}

1. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China

2. Engineering Technology Research Center of Resource Environment and GIS, Wuhu 241000, China

Abstract: Hot debate has been occurred for long concerning the origin and provenance of the vermicular red clay in South China. In this paper, transportation mechanism and provenance of the vermicular red clay were studied by means of grain size and surface textures of the quartz grains from the red clay in Tongling city in the south of Anhui province. The quartz grains from the Tongling section show some obvious characteristics of wind transportation. The grains are fine in general and gradually coarsen up from bottom to top. The vermicular red clay is dominated by silt($10\sim50\text{ }\mu\text{m}$), ranging from 40.62% to 60.37%. The frequency curves of the quartz grains are essentially bimodal with a low hidden peak in the coarse fraction. And the frequency curves of different layers in the profile shows good consistency. Microscopic images of quartz grains show that they are, in fact, the mixture of rounded and poorly rounded grains. Some particles have obvious hydrodynamic effects remained on the surface, such as underwater polished surfaces, V-shaped pits, etc., some have obvious traces of wind action, such as dish-shaped pits, crescent-shaped pits, etc., while the others show some surface texture jointly formed by hydrodynamic and wind actions, suggesting a mixture of distant and nearby sources. The near-source sediments may come from the floodplain of surrounding rivers, where the hydrological characteristics are retained due to the short-distance of wind transport. The surface of the quartz particles at the bottom of the profile has obvious features of hydrogenic origin, and the aeolian features increase upwards. Finally, it is confirmed that the red vermicular clay in Tongling city is a kind of mixed deposits composed of the particles from near and distant wind sources, and the contribution of the materials of different sources depends upon the change of East Asian monsoon.

Key words: quartz grain size; surface characteristics; vermicular red clay; transportation mechanism; provenance

第四纪红土广泛分布在我国南方地区, 它是记录南方气候变迁与环境演变信息的重要载体^[1-2]。其中发育大量条带状白色网纹的红土为网纹红土,

是南方地区第四纪红土中存在的较为普遍的地体质。红土沉积物记录着搬运与沉积过程的环境信息, 对其进行研究有利于揭示南方地区第四纪古气

资助项目:安徽师范大学博士科研启动金“皖南第四纪网纹红土的物质来源及传输机制研究”(2018XJJ44)

作者简介:赵亚军(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为第四纪环境变迁, E-mail: zyjANU@163.com

通讯作者:杨立辉(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事全球环境变迁及区域响应等研究工作, E-mail: yanglihui@mail.ahnu.edu.cn

收稿日期:2019-07-16; 改回日期:2019-12-26。文凤英编辑

候变化及环境演变^[2-3]。许多学者对南方网纹红土的沉积动力与物源进行研究,其中长江中下游红土剖面一直是重点研究区域。一些学者对长江中下游地区宣城、九江等地红土剖面进行研究,认为其具有风成特征^[3-7],并认为物质来源与下蜀黄土相似^[8-9],有的学者则认为同时含有河流相物质^[10]。魏骥对湖南和湖北等地的第四纪红土剖面研究认为,红土粒度呈现上粗下细的“二元结构”,剖面上部具有风成特征,而下部则具有河流冲积相特征^[11]。Hu认为分布在29°~31°N地区的第四纪红土具有风成特征,记录了冰川和间冰期的古气候信息,而位于25°~28°N之间的红土具有明显冲积特征^[12]。近年来有学者通过对长江中下游下蜀黄土地球化学特征研究认为,其物质与北方黄土不一致,物质主要来源为长江以北的冲积扇^[13],黄颖等则认为庐山北麓的网纹红土为混合源,剖面中下部的网纹红土物质与长江沉积物相似,而剖面上部黄棕色土物质更近似北方黄土^[14]。此区域第四纪红土沉积物表现出多样性和复杂性的特征。

石英矿物具有稳定的化学性质以及较高的硬度,其表面可以较长时间地保存其经历的机械作用、化学作用所残留的痕迹^[15]。在自然界的沉积物中,石英颗粒的这种特性使得其粒度组成特征以及颗粒表面较好地记录了沉积物所经历的风化、搬运、沉积过程的信息,常被用来提取沉积物的沉积信息^[16-18],应用扫描电镜技术可以更加直观地观察

石英颗粒表面形态^[19-21]。本文选取位于29°~31°N之间的长江中下游安徽铜陵地区红土剖面(图1)为研究对象,通过分析剖面石英颗粒的粒度和表面形态特征,探讨长江中下游地区第四纪红土的沉积动力、物质来源以及其环境指示意义。

1 剖面特征

铜陵剖面($30^{\circ}57'37''\text{N}$ 、 $117^{\circ}50'13''\text{E}$)位于安徽省铜陵市郊,剖面厚约8.4 m(图1),去除顶部现代土壤层(20 cm),以5 cm为间距采集土样,共采样品165个。根据剖面沉积物的特征,剖面可划分为4个土层:① 8.4~7.4 m,棕黄色网纹红土层(层I),棕红—棕黄色,网纹相对稀疏,多为斑状和细条状,并在7.7 m处含有密集的铁锰结核;② 7.4~4.9 m,典型网纹红土层(层II),赤红色,含较多白色网纹;7.4~6.3 m网纹密集,较细小且多为横向分布;6.3~4.9 m网纹密度变小,网纹变粗并成倾斜或垂直分布;③ 4.9~2.5 m,紫红色网纹红土层(层III),网纹密集,形状细小且排列紊乱;④ 2.5~0.2 m,网纹化下蜀黄土层(层IV),深黄棕色,含有稀疏灰白色网纹,含有胶膜。

王彩霞^[22]通过ESR测年和古地磁测年,测得铜陵剖面底部7.8 m处(层I)年代为0.9 Ma左右,6.7 m(B/M界、层II)处的年代为0.78 Ma左右,认为剖面形成应略早于0.9 Ma,约为中更新世早期。

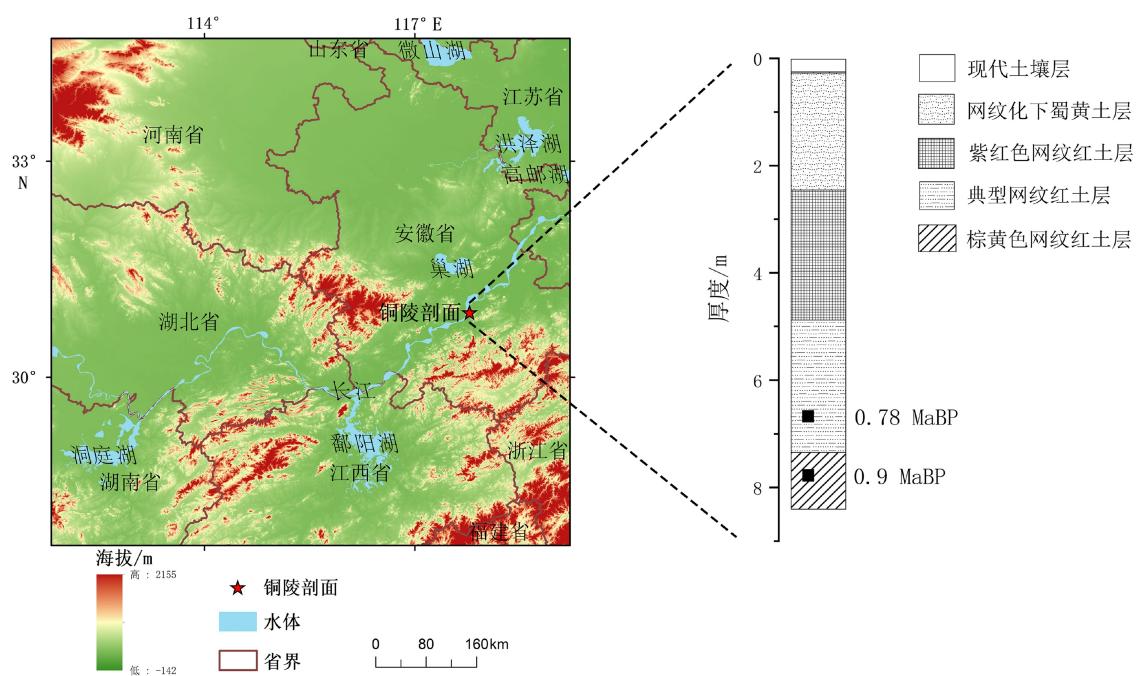


图1 安徽铜陵红土剖面位置图

Fig.1 Red clay section at Tongling City, Anhui Province

2 实验方法

间隔选取剖面中 56 个样品(其中在剖面 8.4~4.9 m 深度段, 间隔 10 cm, 共选取 36 个样品, 在 4.9~0.2 m 深度段, 间隔 20 cm, 共选取 20 个样品)进行石英矿物的提取, 使用焦硫酸钾熔融法^[23], 具体实验步骤如下: 先取 2 g 风干样品放入烧杯中, 加入 10 mL 浓度为 30% 的 H₂O₂ 并放置 12 h, 后加 50 mL 6 mol/L 的 HCl 在 100°C 下煮 2 h, 离子水离心清洗 3 次后烘干; 再取烘干后样品 1 g 放于坩埚中, 加 10 g 焦硫酸钾 (K₂S₂O₇), 混合均匀后用马弗炉在 650°C 高温下熔融 45 min, 待样品冷却加 100 mL 去离子水浸泡直至完全溶解, 用离子水离心清洗 3 次; 之后放入 20 mL 纯度为 30% 的氟硅酸 (H₂SiF₆) 浸泡 3 d, 每日搅拌 3 次后再用去离子水离心清洗 3 次, 即可得到石英单矿物。

石英粒度测试: 删除剖面上部受人工干扰的样品 4 个, 剩余样品在浙江师范大学地理过程实验室激光粒度仪上测试, 型号为 Mastersizer 2000, 测试范围为 0.02~2 000 μm。

石英颗粒表面特征观察: 在 56 个样品中共选取 447 粒受风化作用较弱的石英颗粒, 在安徽师范大学化学与材料科学学院分析测试中心 S-4800、S-8100 扫描电子显微镜下观察。

3 结果

3.1 石英粒度特征

粒度是沉积物受到搬运动力、沉积环境等影响所反映出的特征, 可指示古气候和环境的变化, 对沉积物粒度的分析可推测出其搬运动力和沉积环境^[24-25]。

3.1.1 石英粒度组成

在黄土研究中, <5 μm 颗粒可以随粉尘携带搬运, 被视为“挟持粒组”, 5~10 μm 颗粒为远源组分, 而 10~50 μm 颗粒则被认为是风尘沉积的“基本粒组^[26]”。为了便于与之前的研究做对比, 本文采用刘东生^[26]所使用的粒径分组方法, 将 <5 μm 颗粒作为黏粒, 5~10 μm 颗粒为细粉砂, 10~50 μm 颗粒为粗粉砂, >50 μm 颗粒为砂(表 1)。对粒度组成(图 2)进行不同层面分析, 各粒级变化特征如下:

(1) 从剖面 4 个土层看, 层 I 中, 粗粉砂含量最高, 均值为 47.02%, 并随深度变浅含量逐步增加, 而黏粒和细粉砂含量则逐步减少, 粒径变化显示有变粗趋势, 表明此层中细粒物质逐渐减少。层 II、层 III 中各组分含量变化幅度均较小, 粗粉砂与砂粒均有增加趋势, 黏粒与细粉砂则有减少趋势, 约在 3.9 m 处, 黏粒和细粉砂含量增加。层 IV 中粗粉砂和砂粒含量变动较大, 黏粒和细粉砂有缓慢减少趋势,

表 1 铜陵剖面石英粒度组成、粒度参数
Table 1 Quartz grain size composition and grain size parameters in Tongling section

层位描述	样品属性	粒度组成/%				粒度参数			
		<5 μm	5~10 μm	10~50 μm	>50 μm	平均粒径Mz	偏度Sk	峰态Kg	分选系数Sd
层I 棕黄色网纹红土层	最大值	35.27	23.80	50.82	5.41	18.20	0.81	1.32	1.75
	最小值	26.40	18.17	40.62	0.31	9.87	0.61	1.25	1.51
	平均值	29.66	20.40	47.02	2.92	14.26	0.71	1.29	1.63
层II 典型网纹红土层	最大值	27.49	18.11	56.00	7.32	20.82	0.87	1.33	1.77
	最小值	22.56	14.32	49.82	3.16	14.78	0.56	1.27	1.65
	平均值	24.93	16.48	53.21	5.36	17.97	0.77	1.30	1.70
层III 紫红色网纹红土层	最大值	28.86	17.35	57.19	9.37	23.49	0.83	1.33	1.83
	最小值	22.26	14.58	50.66	3.13	14.34	0.66	1.26	1.66
	平均值	24.29	15.58	53.89	6.24	19.37	0.76	1.30	1.74
层IV 网纹化下蜀黄土层	最大值	25.39	15.37	60.37	13.22	24.48	0.95	1.32	1.84
	最小值	19.43	12.38	52.93	4.48	16.66	0.72	1.29	1.64
	平均值	22.75	13.99	55.71	7.55	20.22	0.84	1.30	1.73

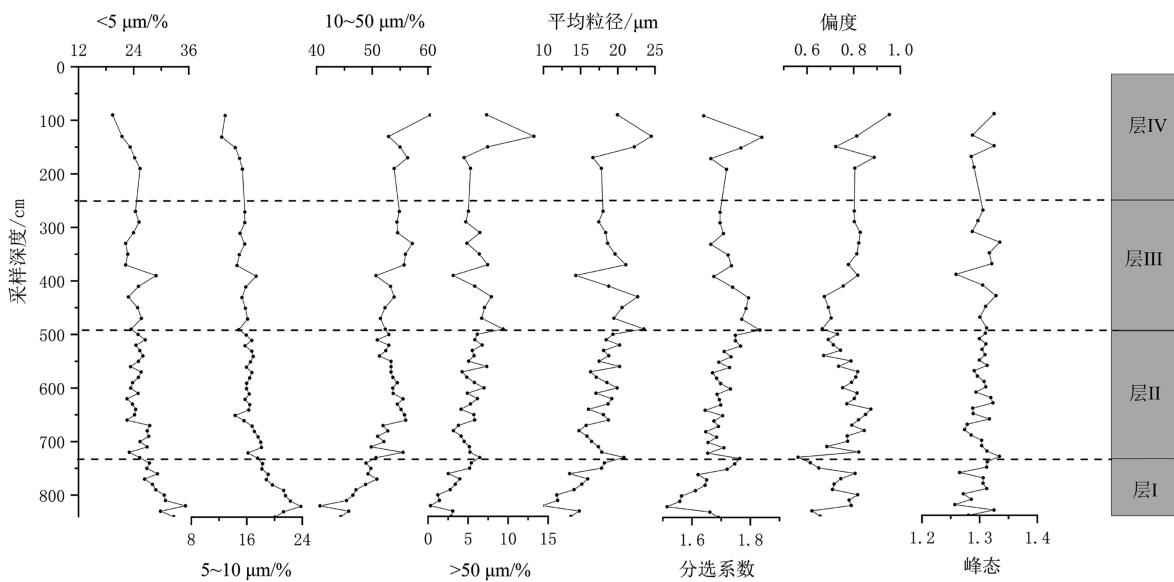


图 2 铜陵剖面石英粒度含量、参数深度变化图

Fig.2 Vertical variation of the quartz grain size content and parameters in Tongling section

其中 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 的“风尘基本粒级”和 $> 50 \mu\text{m}$ 砂粒含量在整个剖面中最高,而细粉砂和黏粒含量降到了最低。

(2)从整个剖面来看,剖面中石英整体粉砂含量最高,砂粒含量低,众数组分为 $10 \sim 25 \mu\text{m}$,而北方黄土石英粒度众数组分为 $20 \sim 32 \mu\text{m}$ ^[27],相比之下铜陵红土石英粒度偏细。铜陵剖面中粗粉砂的含量最高,为 $40.62\% \sim 60.37\%$,平均含量 52.30% ,为众数粒级,表明剖面中风尘沉积“基本粒级”比例较高;黏粒含量为 $19.43\% \sim 35.27\%$,平均含量为 25.58% ,为次众数粒级;细粉砂含量为 $12.39\% \sim 23.80\%$,平均含量为 16.86% ,并与黏粒组分波动情况一致,即自下而上波动下降。 $> 50 \mu\text{m}$ 的砂粒组分含量为 $0.31\% \sim 13.23\%$,平均含量 5.26% ,含量最低。 $< 20 \mu\text{m}$ 颗粒的平均含量为 68.32% ,是粒度组成的重要组分;而 $> 100 \mu\text{m}$ 的粒级组分的平均含量为 1.26% ,含量非常低。剖面中 4 个层面的粒度组成显示没有突变的现象,表现出一致性的特征。

3.1.2 石英粒度参数特征

粒度参数是常用来研究沉积物粒度特征的方法,运用统计学的有关知识,揭示沉积方面的地质意义^[28-29]。本文采用 Folk 和 Ward^[30]的方法,对粒度参数(平均粒径、分选系数、偏度和峰态)进行计算(图 2)。

层 I 平均粒径(Mz)最细,偏度(Sk)为 $0.61 \sim 0.82$,属于正偏,峰态(Kg)均值 1.29,属于尖锐峰态,分选系数(Sd)为 $1.51 \sim 1.75$,分选较差;层 II 中 Mz 值逐渐增加,Kg 值波动与层 I 相差不大,但分选

变差;层 III 中 Mz 值则出现波动下降趋势,粒径变细,Sk 仍为正偏,偏向细粒物质,分选持续变差;层 IV 中 Mz 值最高且波动最大($16.66 \sim 24.48 \mu\text{m}$),Kg 值波动增加,分选性仍较差。总体而言,剖面粒度整体颗粒偏细,呈正偏、峰态尖锐,分选性较差。其中剖面下部粒径较细,剖面上部则逐渐变粗,波动幅度也逐渐变大。

3.1.3 石英粒度曲线特征

粒度频率曲线也是一种用来反映沉积信息的方法,它将样品粒度的分布直观表现为曲线^[31]。剖面中石英粒度的频率分布曲线(图 3)总体上表现为双峰,主峰明显,在 $15 \mu\text{m}$ 左右,而次峰在 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 之间且峰值不明显,并在粗粒端有一隐峰。相比层 I,剖面上部层 II、层 III、层 IV 在细粒端($3 \sim 4 \mu\text{m}$)存在一个隐峰,粗粒端隐峰则更加明显,表明物质来源和搬运的复杂性。

3.2 石英颗粒表面特征

石英颗粒表面特征对于不同成因的石英颗粒并无强烈的专属性,若只用某一特征进行成因类型的鉴定则有失偏颇^[15, 32]。因此本文采用统计分析的方法对样品中的颗粒表面特征进行频率统计分析,用定量分析的方法判断沉积环境。

3.2.1 表面特征

石英颗粒的磨圆度对搬运动力、搬运距离和沉积环境均具有一定的指示意义,本文根据鲍威尔圆度等级划分原则划分等级^[33]。其中磨圆度高的颗粒一般是经历长距离的搬运或强劲的流水作用,而

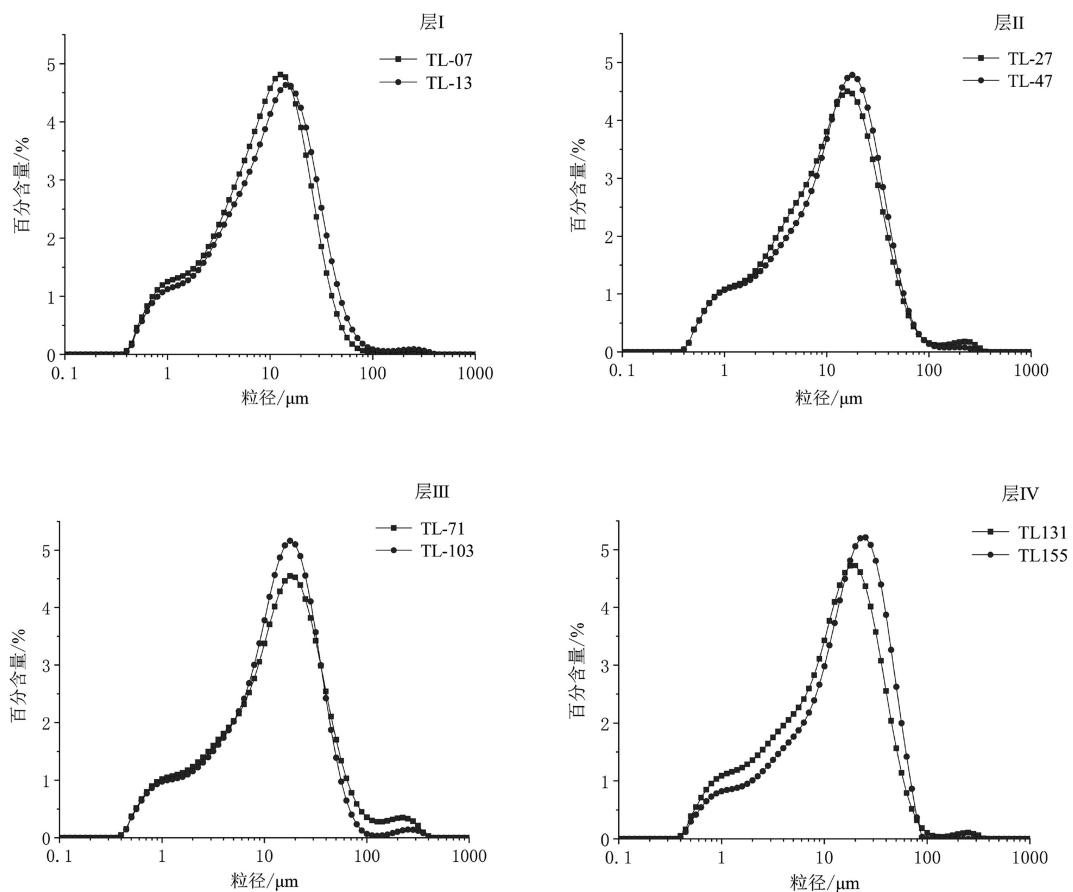


图 3 铜陵剖面石英粒度频率曲线分布图
Fig.3 Quartz grain size frequency curves in Tongling section

磨圆较差的颗粒则一般是经历较短距离的搬运或微弱的流水作用^[31, 34]。

石英颗粒表面的机械特征常常是受到诸如风力、流水、冰川等后期搬运动力的作用,不同的搬运动力会在颗粒表面形成不同的机械特征^[27, 35-36]。水下磨光面、V型坑、三角型坑等特征被认为是流水作用形成,是典型的水成特征;而碟型坑、新月型坑和麻坑等被认为是典型的风成特征^[15]。

在扫描电镜下观察石英颗粒表面特征,选取主要的 18 种表面特征进行统计,借助这些指标得出铜陵剖面 4 个层组的石英颗粒表面特征频率统计表(表 2),来分析不同层面石英颗粒表面特征,以此来判断物质的来源和受到的外动力。

3.2.2 表面特征统计分析

(1) 棕黄色网纹红土层(层 I)

由频率统计图(图 4)可知,石英颗粒磨圆度较差,多为次棱角状和次圆状,未出现圆状颗粒。水下磨光面(图 5D)和 V 型撞击坑(图 5A)出现明显,频率分别为 51% 和 38%,碟型坑(图 5F)、三角型坑、阶梯状断口(图 5B)、贝壳状断口出现较多,频率分别为 15%、13%、10%、11%,相比之下平行解理

(图 5C)、新月型撞击坑(图 5E)、麻坑等特征则有少量出现,撞击沟、擦痕等特征出现则少于 5%。

(2) 典型网纹红土层(层 II)

由频率统计图(图 6)可知,层 II 中颗粒磨圆变好,次圆状颗粒占 47%,次棱角和棱角状颗粒比重均降低。水下磨光面、V 型撞击坑和三角型坑(图 7B)仍出现频率较高,分别占 49%、39% 和 24%。具有风成特征的颗粒数量则有所增加,碟型坑占 22%,新月型撞击坑占 16%,麻坑(图 7D)占 11%。贝壳状断口(图 7A)、撞击沟(图 7F)也均有出现。部分石英颗粒出现叠加作用,在经流水作用下的磨光面上叠加风力搬运形成的碟型坑或新月型坑(图 7E),这表明沉积物可能先经历流水作用,后又经风力二次搬运沉积。还有少部分颗粒表面新鲜,棱角、断块(图 7C)明显,反映颗粒距源区较近。

(3) 紫红色网纹红土层(层 III)

由频率统计图(图 8)可知,层 III 中颗粒磨圆度(图 9A)与层 II 相似,其中圆状颗粒出现频率增加。水下特征明显,水下磨光面(图 9B)占 38%,V 型撞击坑占 25%,三角型坑(图 9C)占 8%,相比层 I 层 II 比重有所降低,平行解理(图 9E)出现较

表 2 铜陵剖面石英颗粒表面各特征统计
Table 2 Surface characteristics of quartz particles, Tongling section

编号	形貌特征	层I		层II		层III		层IV	
		粒数/颗	频率/%	粒数/颗	频率/%	粒数/颗	频率/%	粒数/颗	粒数/颗
1	棱角状	13	21	29	15	16	13	7	10
2	次棱角状	26	43	72	37	48	38	23	33
3	次圆状	22	36	93	47	60	47	37	53
4	圆状	0	0	3	2	4	3	3	4
5	阶梯状断口	6	10	16	8	11	8	1	1
6	贝壳状断口	7	11	32	16	28	22	6	8
7	碟型坑	9	15	40	20	58	45	24	33
8	新月型撞击坑	5	8	30	15	22	17	10	14
9	水下磨光面	31	51	90	46	49	38	26	36
10	三角型坑	8	13	44	22	11	8	6	8
11	V型坑	23	38	71	36	32	25	27	38
12	平行解理	4	7	17	9	19	15	11	15
13	撞击沟	1	2	8	4	7	5	1	1
14	解理破碎	1	2	3	2	5	4	0	0
15	解理面	1	2	1	1	8	6	6	8
16	裂纹	3	5	8	4	5	4	1	1
17	擦痕	2	3	9	5	8	6	6	8
18	麻坑	2	3	21	11	15	12	6	8

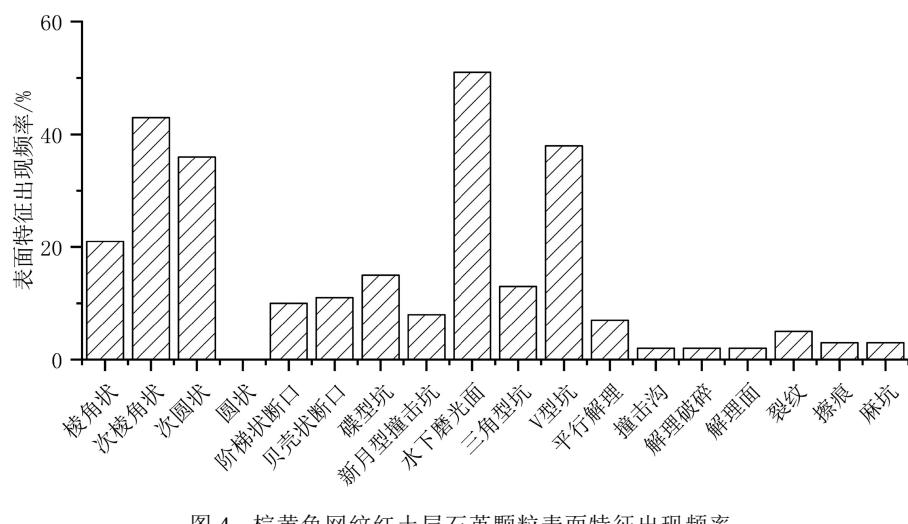


图 4 棕黄色网纹红土层石英颗粒表面特征出现频率

Fig.4 Frequency of quartz particles surface characteristics in brown vermicular red clay layer

多。风力作用颗粒明显增加, 碟型坑(图 9D)占比高达 45%, 新月型撞击坑占 17%, 麻坑(图 9F)占 12%。仍有部分颗粒表面出现叠加作用, 例如碟型坑或新月型坑叠加在水下磨光面上。

(4) 网纹化的下蜀黄土层(层 IV)

由频率统计图(图 10)可知, 层 IV 颗粒磨圆度最高, 次圆状比重高达 52%, 棱角状颗粒(图 11A)只占 10%, 出现少量圆状颗粒(图 11B)。水成特征仍较明显, 水下磨光面(图 11E)占 36%, V 型撞击坑(图 11F)占 38%, 三角型坑占 8%。风力作用更加显

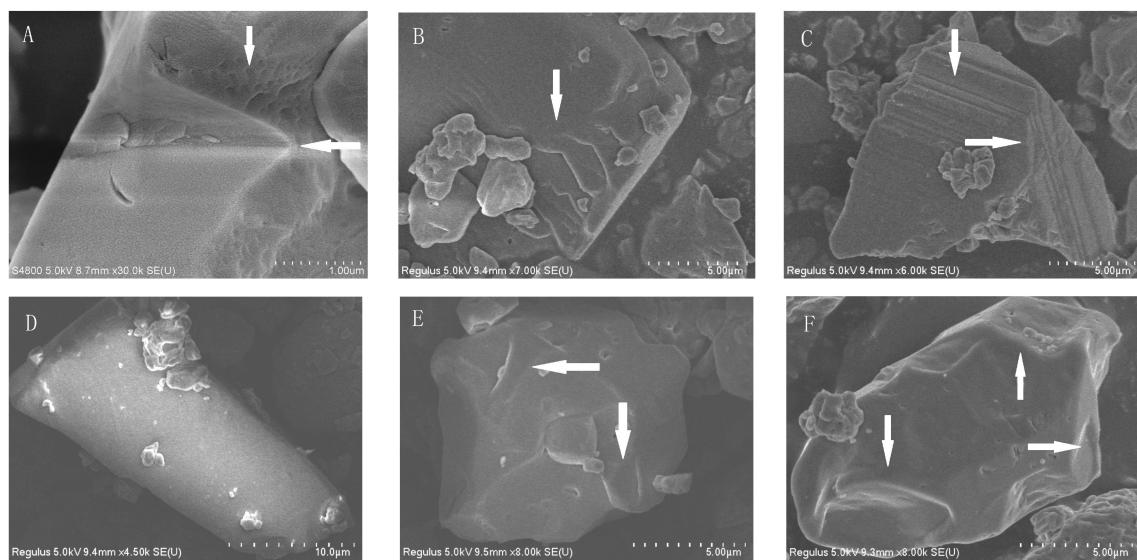


图 5 棕黄色网纹红土层石英颗粒表面特征

A. V型撞击坑、三角型坑, B. 阶梯状断口, C. 平行解理, D. 水下磨光面, E. 新月型坑, F. 碟型坑。

Fig.5 Surface characteristics of quartz particles in brown vermicular red clay layer

A. V-shaped pits, triangular impact crater, B. Step-like fracture, C. Parallel cleavage surface,
D. Underwater polished surfaces, E. Crescent-shaped pits; F. Dish-shaped pits.

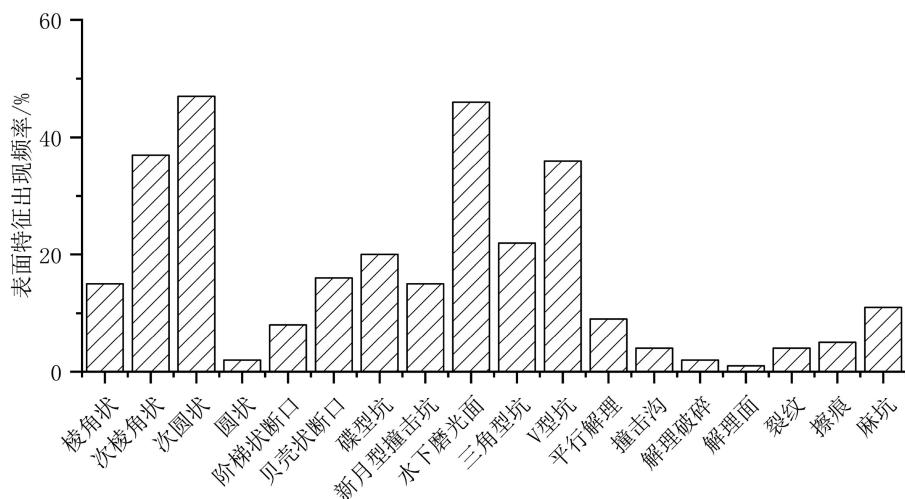


图 6 典型网纹红土层石英颗粒表面特征出现频率

Fig.6 Frequency of quartz particles surface characteristics in typical vermicular red clay layer

著, 碟型坑(图 11C)占 33%, 新月型撞击坑占 14%, 麻坑(图 11D)占 8%。颗粒表面的叠加现象仍有出现, 流水作用形成的磨光面上叠加有风力搬运形成的碟型坑或新月型坑。

4 讨论

4.1 石英粒度特征分析

铜陵剖面石英粒度特征表现出粒径偏细、粉砂含量高以及粒度频率分布曲线的双峰特征, 与北方

风成黄土粒度特征相似^[17], 其中风尘沉积的“基本粒组”含量平均值为 52.30%。研究表明<20 μm 的粉尘是组成远源风尘物的主要部分, 可以在空气中以悬浮的方式被风力进行长距离搬运, 而>100 μm 的组分不能被风力进行远距离搬运^[26, 37]。铜陵剖面中<20 μm 的颗粒平均值高达 68.32%, 而>100 μm 的颗粒的平均含量仅为 1.26%, 含量非常低, 同时剖面不同层面的粒度数据具有一致性特征, 这些特征都表明了铜陵剖面可能具有风成沉积的特征。风成沉积需要满足物源、搬运风力和地形的条件^[38-39]。铜陵剖面堆积年代应早于 0.9 Ma^[22], 深海沉积记录^[40]

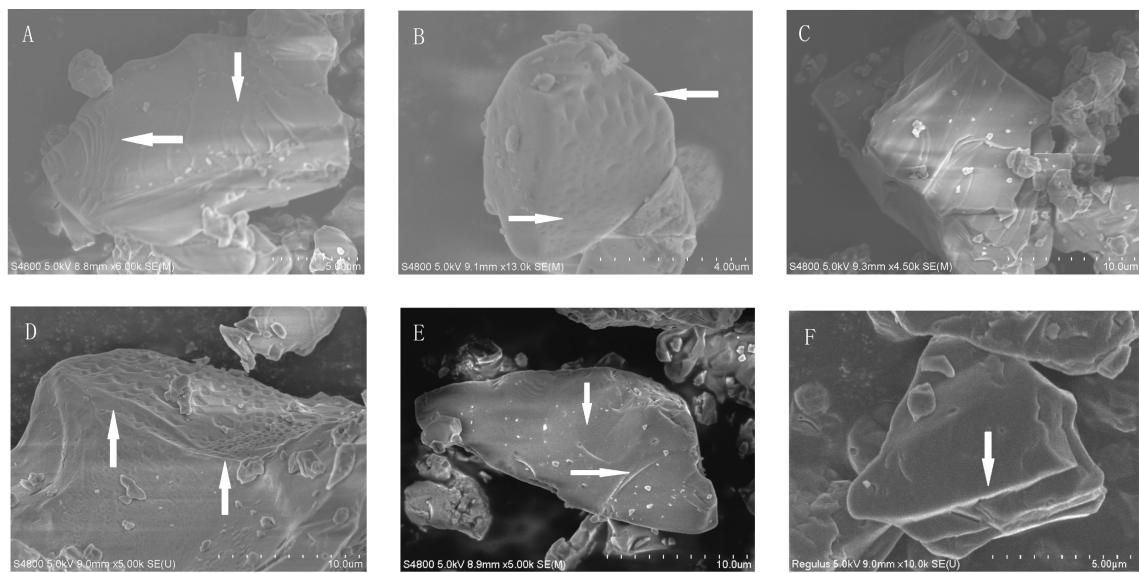


图 7 典型网纹红土层石英颗粒表面特征

A. 贝壳状断口, B. 三角型撞击坑, C. 断块, D. 麻坑, E. 碟型坑和麻坑叠加在水下磨光面之上, F. 撞击沟。

Fig. 7 Surface characteristics of quartz particles in typical vermicular red clay layer

A. Conchoidal fractures, B. Triangular impact crater, C. Broken surface, D. Pockmark, E. Dish-shaped pits and pockmark are superimposed on the underwater polished surface; F. Deep trough.

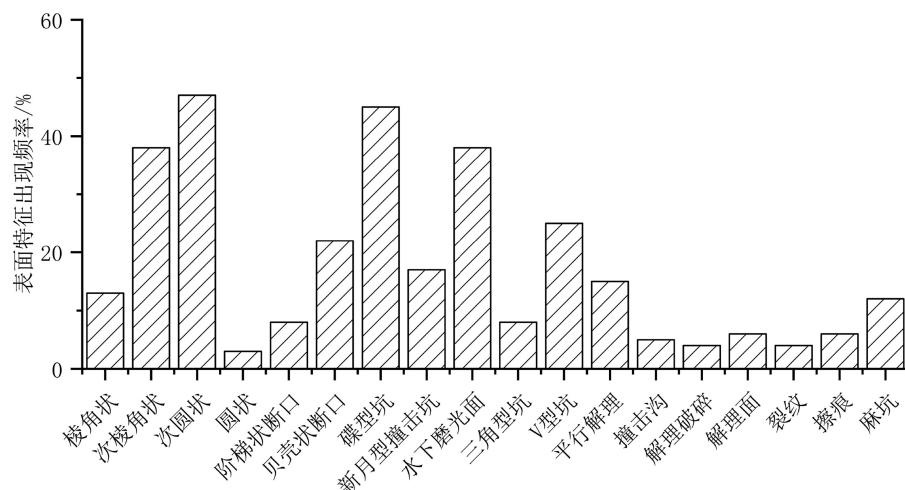


图 8 紫红色网纹红土层石英颗粒表面特征出现频率

Fig. 8 Frequency of quartz particles surface characteristics in fuchsia vermicular red clay layer

和陆相沉积记录^[41]反映了在约 0.9 Ma 发生了“中更新世气候革命”，冬季风突然增强^[42]，为风尘沉积提供了搬运动力。同时由于季风加强和干旱程度的加剧使得河流水量减少，大面积的河谷出露，也为风尘堆积提供了物源^[38]。铜陵地区北部地势平坦开阔，南部有低山丘陵阻挡，利于物质的搬运沉积。由以上推断可以判定铜陵剖面具有风尘沉积特征的可能性。

由铜陵红土石英颗粒粒度组成（图 2）可知，剖面石英颗粒粒度自下而上逐渐增粗，剖面最下部棕黄色网纹红土层（层 I）石英颗粒平均粒径最细，而

剖面上部层面石英颗粒粒径逐渐增粗，推测层 I 堆积时风力搬运最弱，但是随着季风作用的加强，表现出随着深度减小而石英粒度逐渐增加的特征。铜陵红土的粒度频率分布曲线（图 3）显示，剖面各层具有可比性，表示各层的物源具有相似性，但相比剖面最下部棕黄色网纹红土层，剖面上部层 II、层 III、层 IV 在细粒端（3~4 μm）和粗粒端（>100 μm）存在隐峰，显示剖面物质来源具有差异性。

4.2 石英表面特征分析

石英颗粒的磨圆度对搬运动力、搬运距离和沉

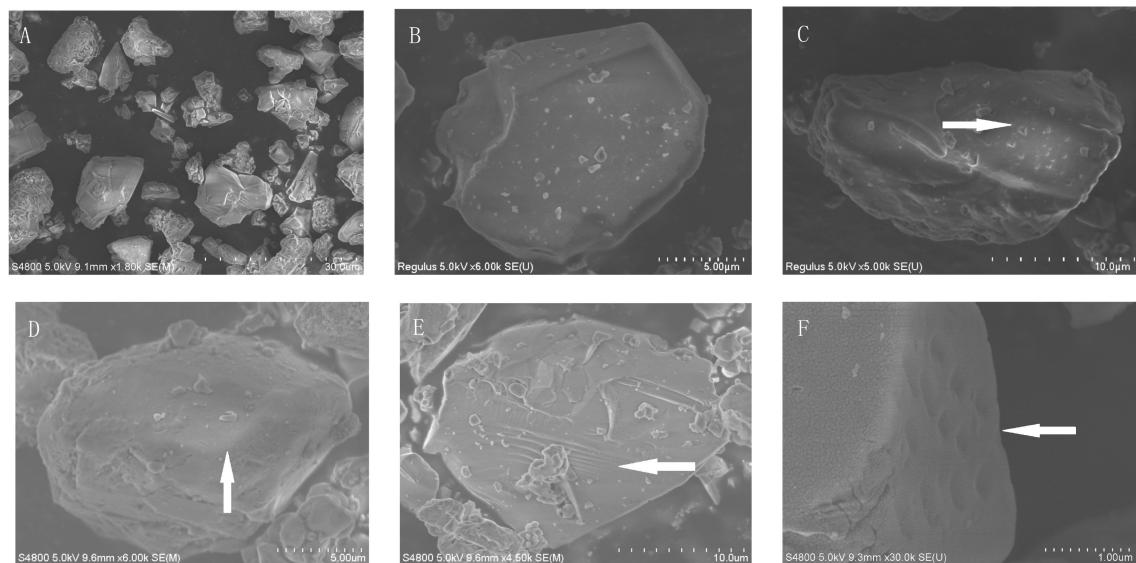


图 9 紫红色网纹红土层石英颗粒表面特征出现频率

A. 石英颗粒形态, B. 水下磨光面与撞击坑, C. 三角型撞击坑, D. 碟型坑, E. 平行解理, F. 麻坑。

Fig.9 Surface characteristics of quartz particles in fuchsia vermicular red clay layer

A. Surface textural of quartz grains, B. Underwater polished surfaces, deep trough, C. Triangular impact crater,
D. Dish-shaped pits, E. Parallel cleavage surface,F. Pockmark.

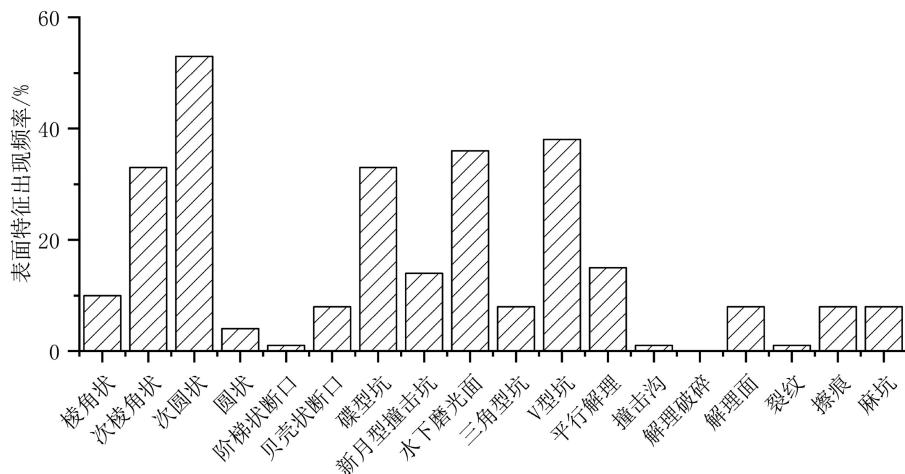


图 10 网纹化的下蜀黄土层石英颗粒表面特征出现频率

Fig.10 Frequency of quartz particles surface characteristics, the Xiashu Loess layer

积环境均具有一定的指示意义^[42]。磨圆度好的颗粒可能是经历远距离搬运或者不稳定的水动力环境; 磨圆度较差则相反。铜陵剖面的石英颗粒中次棱角和次圆状居多, 棱角状颗粒次之, 颗粒形态的磨圆度特征和第四纪黄土、新近纪风尘沉积的石英颗粒特征相似^[18], 指示了风动力的搬运过程。部分颗粒表面具有明显的水成特征(如水下磨光面、V型坑等)且颗粒磨圆度较差, 表明颗粒受过流水作用, 可能来自附近河漫滩沉积; 部分石英颗粒表面出现明显风成特征(如碟型坑、新月型坑、麻坑等), 且没有表现出水成的特征, 表明其并不是来自于河漫滩, 而是受到风力的长距离搬运, 源区相对

较远; 少量颗粒还出现两种特征叠加现象, 表明石英颗粒可能受到过流水和风力共同作用, 或者存在先流水后风力的搬运改造过程。

前人通过对比研究, 认为海岸沙丘的石英颗粒受到流水、风力和海洋动力的共同作用, 而后期的风力作用会在颗粒表面形成碟型坑等机械特征^[43-44]。范庆斌也发现我国南方第四纪风尘沉积物的石英颗粒表面出现风成特征和水成特征同时存在的现象^[45]。由此可推测铜陵剖面的部分石英颗粒来源于附近河漫滩沉积物, 先由流水作用使颗粒磨圆, 形成磨光面, 出露地表后受风力作用二次搬运再沉积。李越等通过对我国新疆伊犁尼勒克黄土石英

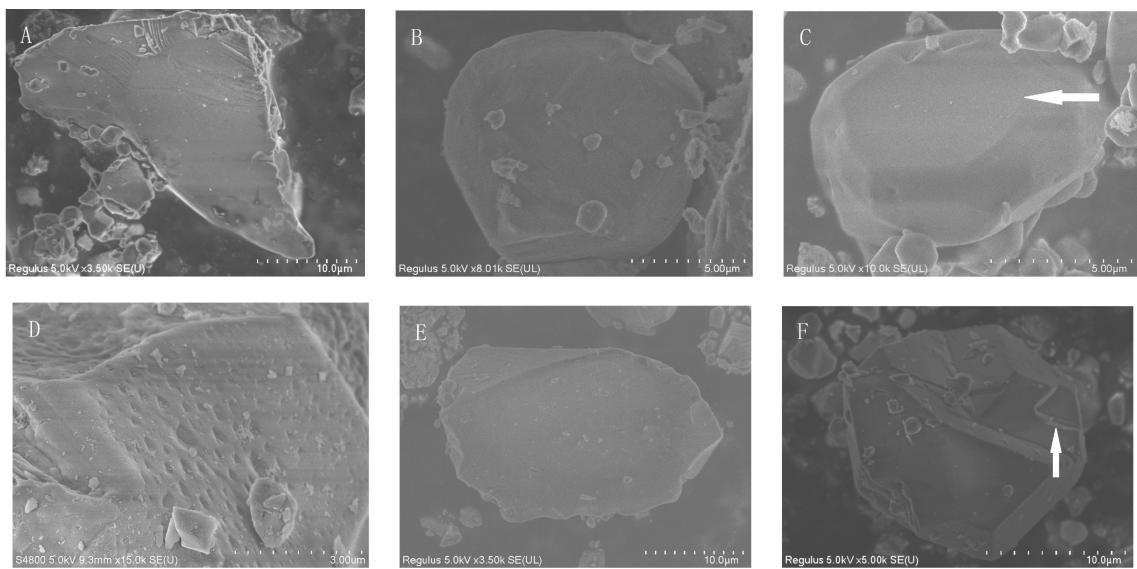


图 11 网纹化的下蜀黄土层石英颗粒表面特征

A. 平行解理和尖角, B. 圆状颗粒, C. 碟型坑, D. 麻坑, E. 水下磨光面, F. V 型坑。

Fig.11 Surface characteristics of quartz particles in the Xiashu Loess layer

A. Parallel cleavage surface, sharp corner, B. Rounded,C. Dish-shaped pits,D. Pockmark,E. Underwater polished surfaces; F.V-shaped pits.

颗粒的研究,证实其在风力短距离搬运之前受到过流水和冰川的作用,颗粒磨圆度差,表面具有明显的冰川和流水作用,同时高能的流水作用也会造成颗粒的粉碎和粒级的变细^[46]。由此可知,铜陵剖面沉积物可能部分为远源物质,部分来自附近河漫滩沉积物,其中附近河漫滩的部分因风力短途搬运保留了水成的特征。

由铜陵剖面石英表面特征的不同可知物源区存在差异。剖面最下部层 I 石英颗粒磨圆度最差,水成特征表现明显,碟型坑等风成特征虽有出现但出现频率低,表明该层石英颗粒受到过流水作用,物源区可能较近;层 II、层 III 颗粒磨圆度有变好趋势,风成特征出现频率明显增加,同时部分颗粒开始出现两种特征叠加的现象,表明风力作用的加强;层 IV 石英颗粒磨圆度最好,两种特征叠加颗粒出现频率上升,水成特征仍较明显,相比其他层,此层颗粒风成特征明显增多,表明受到风力长距离搬运的远源物质增多。

4.3 成因分析与物源探讨

剖面最下部的棕黄色网纹红土层(层 I)石英颗粒平均粒径为 $14.26 \mu\text{m}$, 相比剖面上部层面粒径更细, 表明早期网纹红土的沉积动力相对较弱。石英颗粒特征显示该层颗粒磨圆度最差, 表面具有明显的水下环境特征, 兼有少量磨圆度好、风成特征显著的颗粒, 表明主要物质距源区较近, 且经历过流水作用, 推测多为近源河漫滩沉积。刘东生等认为

0.85 MaBP 之前, 冰期和间冰期气候反差相对较弱, 冬、夏季风不如现在强盛^[47]。由测年数据可知铜陵剖面形成略早于 0.9 MaBP^[22], 结合石英粒度表现出的风尘特征和表面形态, 推测铜陵红土物质来源集中于附近河漫滩沉积, 在早期沉积中受到较弱风力的搬运用, 主要搬运细粒颗粒, 因风力较弱且搬运距离较短, 颗粒仍明显表现出流水作用的特征。

研究表明中等风暴条件下 $>20 \mu\text{m}$ 的颗粒只能在距源区 30 km 以内地区迁移^[26], 即便是极端猛烈的风暴条件, $>30 \mu\text{m}$ 也只能在几百千米内迁移^[48], 铜陵剖面中沉积物石英颗粒 $>20 \mu\text{m}$ 的颗粒平均含量达到 31.68%, $>30 \mu\text{m}$ 颗粒平均含量达到 15.09%, 结合石英表面形态可知, 剖面中应存在搬运距离较短的物质。Liu^[49] 通过对泰山新村和幕府山剖面下蜀黄土的研究发现, $>40 \mu\text{m}$ 颗粒中的锆石 U-Pb 年龄谱与长江河漫滩沉积物较为一致。对于同样距离长江较近的铜陵第四纪红土, 长江河漫滩物质完全有能力对其进行物质输送。

剖面中部的典型网纹红土层(层 II)和紫红色网纹红土层(层 III)石英颗粒粒径自下而上逐渐增粗, 风尘沉积“基本粒级”含量也逐渐增加, 同时颗粒磨圆度相较层 I 变好, 表面具有明显风成特征颗粒增多, 并开始出现两种特征叠加的现象, 表明此时风力对物质搬运能力的增强。研究认为 0.85 MaBP 后东亚冬季风强度增强^[49], 0.7 MaBP 后全球冰量显著增加, 冬季风得到进一步强化^[50], 为粉尘远距离搬运和沉积提供动力, 同时陈骏等认为青藏高原的抬

升也为远距离的风尘沉积提供了充足的粉砂物质^[51]。由此推测伴随东亚冬季风的增强, 远源物质对铜陵红土的贡献程度增加。而剖面最上部的网纹化下蜀黄土层(层 IV), 石英颗粒平均粒径最粗($16.66\sim24.48\text{ }\mu\text{m}$), 相比其他层偏度值更高(0.84), 分选性也较差, 颗粒磨圆度最好, 且出现较多表面具有明显风成特征的颗粒, 这些颗粒表面并未出现水成特征, 证明这些物质并非来自附近河漫滩, 而是经过远距离搬运沉积。

铜陵红土石英颗粒特征的剖面差异显示, 不同层的物质来源存在差异, 推测剖面下部物质来源主要为附近河漫滩沉积, 由剖面向上, 远源物质贡献程度增加, 应为近源和远源物质相混合。有学者研究认为在第四纪气候变化期间, 远源与近源物质的含量也会随着冬季风的强弱变化而转变, 冬季风强盛时期远源物质含量增加, 冬季风减弱则近源物质含量增加^[52]。黄颖等对庐山北麓 JL 红土剖面的粉砂组分($4\sim63\text{ }\mu\text{m}$)进行地球化学特征分析, 认为剖面中下部的网纹红土物源更接近长江沉积物, 而上部黄棕色土物源更接近北方黄土, 受东亚冬季风增强影响, 远源物质的含量趋于增加, 自下而上近源物质的贡献略有减少, 远源物质的贡献则趋于增加^[15]。Han 同样认为长江下游风尘沉积是对中更新世气候变迁的一个区域环境响应^[13]。这也证实了东亚季风的变化会使得远源和近源物质都成为铜陵剖面的可能物源区, 并随着冬季风强度变化不同源区物质含量也发生改变。石英粒度表现出分选性较差、峰态尖锐的参数特征, 也指示了铜陵红土可能是由远源和近源物质共同堆积而形成^[53]。

5 结论

(1) 石英粒度风尘“基本粒级”($10\sim50\text{ }\mu\text{m}$)为众数粒级, $<20\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒含量较多, 粒度频率分布曲线总体呈现出双峰特征且主峰明显, 以及剖面粒度表现出较好一致性, 都表明铜陵剖面具有风尘沉积特征。而石英粒度在不同层面表现出的变化, 以及分选性差、正偏态、峰型尖锐的参数特征, 也表明铜陵红土物源的复杂性。

(2) 石英颗粒表面形态主要为次棱角状和次圆状, 部分颗粒表面有明显水成特征(水下磨光面、V型坑等), 部分颗粒则有明显风成特征(碟型坑、新月型坑等), 同时有些颗粒出现两种特征叠加现象, 表明沉积物可能部分为远源物质, 部分来自附近河漫滩沉积物, 其中附近河漫滩的部分因风力短

途搬运保留了水成的特征。层 I 颗粒表面具有明显水成特征, 自剖面向上颗粒风成特征出现明显增多, 石英表面特征的剖面差异显示了物源区的差异。

(3) 剖面最下部棕黄色网纹红土层平均粒径最细, 颗粒表面形态中流水作用明显, 推测在气候转型前风力较弱的情况下风力对附近河漫滩物质的搬运作用; 剖面上部层面粒径变粗, 颗粒磨圆度变好, 表面形态显示风成特征增多, 并出现叠加现象, 可能为东亚季风加强后远源物质的增多, 使得近源物质与远源物质共同沉积。季风的变化也使得不同物源区物质贡献程度产生变化。

参考文献 (References)

- [1] 刘良梧, 龚子同. 古红土的发育与演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 37-42. [LIU Liangwu, GONG Zitong. Development and evolution of red paleosols [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(3): 37-42.]
- [2] 赵其国, 杨浩. 中国南方红土与第四纪环境变迁的初步研究[J]. 第四纪研究, 1995, 15(2): 107-116. [ZHAO Qiguo, YANG Hao. A preliminary study on red earth and changes of quaternary environment in South China [J]. Quaternary Sciences, 1995, 15(2): 107-116.]
- [3] 胡雪峰, 朱煜, 沈铭能. 南方网纹红土多元成因的粒度证据[J]. 科学通报, 2005, 50(9): 918-925. [HU Xuefeng, ZHU Yu, SHEN Mingneng. The granularity evidence of multi-cause formation of vermicular red clay [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(9): 918-925.]
- [4] 彭红霞, 詹成, 马瑞元, 等. 江西九江红土生物标志化合物的分布特征及其古气候环境意义[J]. 地球学报, 2019, 40(3): 447-455. [PENG Hongxia, ZHAN Cheng, MA Ruiyuan, et al. Characteristics of biomarkers in Pleistocene Red earth of Jiujiang, Jiangxi Province and its Paleoclimatic and environmental significance [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2019, 40(3): 447-455.]
- [5] 胡雪峰, 龚子同, 夏应菲, 等. 安徽宣州黄棕色土和第四纪红土的比较研究及其古气候意义[J]. 土壤学报, 1999, 36(3): 301-307. [HU Xuefeng, GONG Zitong, XIA Yingfei, et al. Comparative study of yellow-brown earth and Quaternary Red Clay in Xuanzhou, Anhui Province and its palaeo-climate significance [J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(3): 301-307.]
- [6] 杨达源, 韩辉友, 周旅复, 等. 安徽宣城地区中晚更新世风成堆积与环境变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(2): 97-104. [YANG Dayuan, HAN Huiyou, ZHOU Lvfu, et al. Eolian deposit and environmental change of middle-late Pleistocene in Xuancheng, Anhui Province south of the lower reaches of the Changjiang river [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(2): 97-104.]
- [7] 李徐生, 杨达源, 鹿化煜, 等. 皖南第四纪风尘堆积序列粒度特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(4): 73-81. [LI Xusheng, YAGN Dayuan, LU Huayu, et al. The grain-size features of Quaternary aeolian-dust deposition sequence in South Anhui and their significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1997, 17(4): 73-81.]

- [8] 杜丹丹, 郑祥民, 邓黄月, 等. 安徽郎溪县十字镇第四纪红土理化性质及其古环境意义 [J]. 热带地理, 2017, 37(2): 258-268. [DU Dandan, ZHEN Xiangmin, DENG Huangyue, et al. Physical and chemical properties of the Quaternary red clay in Shizi town of Langxi county, Anhui Province and its paleo-environmental significance [J]. Tropical Geography, 2017, 37(2): 258-268.]
- [9] 胡雪峰, 龚子同. 江西九江泰和第四纪红土成因的比较研究 [J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 1-9. [HU Xuefeng, GONG Zitong. Comparative study on the origin of Quaternary red earth in Jiujiang and Taihe, Jiangxi Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 1-9.]
- [10] 夏应菲, 杨浩. 安徽宣城第四纪红土剖面石英颗粒扫描电镜研究 [J]. 南京师大学报: 自然科学版, 1998(1): 124-128. [XIA Yingfei, YANG Hao. SEM scanning of quartz of the Quaternary Red Earth in Xuancheng, Anhui [J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition, 1998(1): 124-128.]
- [11] 魏骥, 胡雪峰, 许良峰, 等. 长江中游地区第四纪红土的二元结构及古环境意义 [J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 826-835. [WEI Ji, HU XueFeng, XU Liangfeng, et al. Dualistic structure of the Quaternary red clay in the middle reaches of the Yangtze river and its paleoenvironmental implication [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 826-835.]
- [12] Hu X F, Wei J, Du Y, et al. Regional distribution of the Quaternary Red Clay with aeolian dust characteristics in subtropical China and its paleoclimatic implications [J]. *Geoderma*, 2010, 159(3-4): 317-334.
- [13] Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y S, 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.
- [14] 黄颖, 朱丽东, 张晓, 等. 庐山北麓JL红土剖面粉砂粒级元素地球化学特征及其物源意义 [J]. 第四纪研究, 2019, 39(5): 1092-1102. [HUANG Ying, ZHU Lidong, ZHANG Xiao, et al. Geochemical characteristics and their provenance implications of the silt fraction from JL red earth section in Lushan region, Jiujiang, South China [J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(5): 1092-1102.]
- [15] 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. [XIE Youyu. Micrograph Atlas of Surface Textural Features of Quartz Sand in China [M]. Beijing: Ocean Press, 1984.]
- [16] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 159-163.
- [17] 刘进峰, 郭正堂, 乔彦松, 等. 秦中新世黄土-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, 2006, 51(1): 117-120. [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*, 2006, 51(1): 117-120.]
- [18] 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. Particle size distribution of quartz particles in loess-paleosol [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(19): 2094-2097.]
- [19] Xiao J L, Porter S C, An Z S, 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.
- [20] 侯圣山. 灵台剖面石英颗粒表面形态初步研究及其古气候意义 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2002, 19(1): 59-68. [HOU Shengshan. Preliminary SEM study of quartz surface features from Lingtae section and its Palaeoclimatic significance [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2002, 19(1): 59-68.]
- [21] 陈钰, 刘兴起. 青藏高原可可西里库赛湖年纹层石英颗粒表面形态特征研究 [J]. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1123-1133. [CHENG Yu, LIU Xingqi. Surface textural analysis of quartz grains from varved sediments of Lake Kusai in the Hoh Xil area, Tibetan Plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(5): 1123-1133.]
- [22] 王彩霞. 铜陵第四纪网纹红土的风化特征及其环境意义 [D]. 浙江师范大学硕士学位论文, 2017. [WANG Caixia. Weathering characteristics and environmental significance of quaternary reticulated red clay in Tongling [D]. Master Dissertation of Zhejiang Normal University, 2017.]
- [23] 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.]
- [24] 谷喜吉. 洞庭湖周边地区第四纪红土物源初探 [D]. 浙江师范大学硕士学位论文, 2014. [GU Xiji. Preliminary research on provenance of Quaternary red earth in Dongting lake area [D]. Master Dissertation of Zhejiang Normal University, 2014.]
- [25] 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.]
- [26] 刘东生. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 191-208. [LIU Dongsheng. Loess and the Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985: 191-208.]
- [27] 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 Zhaoguo, 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.]
- [28] 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, 1978: 1-105. [North Shanxi Team of Chengdu Institute of Geology. *Grain Size Analysis of Sedimentary Rock and its Application* [M]. Beijing: Geological Press, 1978: 1-105.]
- [29] 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.]
- [30] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3-26.
- [31] 范庆斌, 叶玮, 陈渠. 江西南昌横岗“砂山”石英颗粒表面形态特征 [J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 1170-1181. [FAN Qinbin, YE Wei,

- CHEN Qu. Surface morphology of quartz grains from the Henggang "sand dune" at Nanchang County, Jiangxi Province [J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(5): 1170-1181.]
- [32] 韩建恩, 余佳, 孟庆伟, 等. 西藏札达盆地沉积物的石英砂表面特征及其环境意义[J]. *地球学报*, 2009, 30(5): 651-658. [HAN Jianen, YU Jia, MENG Qingwei, et al. Quartz grain surface characteristics of sediments from the Zanda Basin of Tibet and their environmental significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(5): 651-658.]
- [33] 王颖, 迪纳芮尔B. 石英砂表面结构模式图集[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 1-134. [WANG Ying, DEONARINE B. *Atlas of Surface Structure Patterns of Quartz Sand* [M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-134.]
- [34] 程涌, 文文明, 吴伟, 等. 场发射扫描电镜在现代河流沉积石英颗粒表面形态特征研究中的应用[J]. *电子显微学报*, 2017, 36(5): 457-465. [CHENG Yong, WEN Yiming, WU Wei, et al. The application of field emission scanning electron microscopy to the study of surface textures of quartz grains from modern fluvial deposits [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2017, 36(5): 457-465.]
- [35] 徐洪阳, 郑祥民, 周立冕, 等. 南京周家山下蜀黄土石英颗粒特征及其物源意义[J]. *沉积学报*, 2016, 34(6): 1176-1186. [XU Hongyang, ZHENG Xiangmin, ZHOU Limin, et al. Characteristics of quartz grains of the Xiashu loess in Zhoujiashan Nanjing and its provenance significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(6): 1176-1186.]
- [36] 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, 49(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, 49(1): 35-40.]
- [37] Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits[M]. London: Academic Press, 1987: 1-165.
- [38] 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研究及其古环境意义[J]. *科学通报*, 2003, 48(19): 2088-2093. [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(19): 2088-2093.]
- [39] 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]. Ji'nan: People's Publishing House in Shandong, 2012: 1-248.]
- [40] Shackleton N J. The 100,000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity [J]. *Science*, 2000, 289(5486): 1897-1902.
- [41] Ding Z L, Yu Z, Rutter N W, et al. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13(1): 39-70.
- [42] 石磊, 张跃, 陈艺鑫, 等. 贡嘎山海螺沟冰川沉积的石英砂扫描电镜形态特征分析[J]. *北京大学学报·自然科学版*, 2010, 46(1): 96-102. [SHI Lei, ZHANG Yue, CHEN Yixin, et al. Quartz grain SEM microtextures analyses of Sub-Glacial deposits at Hailuogou Glacier [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(1): 96-102.]
- [43] 陈方, 朱大奎. 海岸、内陆沙漠与大陆架砂质沉积石英颗粒表面结构的对比研究[J]. *地理学报*, 1999, 54(2): 134-141. [CHEN Fang, ZHU Dakui. A critical evaluation of the hypothesis of Chinese continental shelf desertification [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(2): 134-141.]
- [44] 吴正. 我国内陆沙漠与海岸沙丘石英颗粒表面结构的对比研究[J]. *中国沙漠*, 1995, 15(3): 201-206. [WU Zheng. A comparative study of the surface texture of quartz sand in inland deserts and that in coastal dune, China [J]. *Journal of Desert Research*, 1995, 15(3): 201-206.]
- [45] 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]. 浙江师范大学硕士学位论文, 2014. [FAN Qingbin. Surface features of quartz grains of aeolian deposit in south China and its environmental significance [D]. Master Dissertation of Zhejiang Normal University, 2014.]
- [46] 李越, 宋友桂, 赵井东. 伊犁尼勒克黄土石英颗粒微形态特征及其成因与物源意义[J]. *地球环境学报*, 2016, 7(4): 366-379. [LI Yue, SONG Yougui, ZHAO Jingdong. Micromorphological characters of quartz grain from Nilke loess-paleosol sequences and their implications of origin and provenance [J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, 7(4): 366-379.]
- [47] 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性[J]. *第四纪研究*, 1998(3): 194-204. [LIU Dongsheng, ZHENG Mianping, GUO Zhengtang. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia [J]. *Quaternary Sciences*, 1998(3): 194-204.]
- [48] 熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 赣北红土与北京郊区黄土及沙漠砂的粒度特征对比[J]. *科学通报*, 1999, 44(11): 1216-1219. [XIONG Shangfa, DING Zhongli, LIU Dongsheng. The comparison of particle characteristics among laterite in Northern Jiangxi Province, loess near Beijing and sand of desert [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(11): 1216-1219.]
- [49] Liu F, Li G J, Chen J. 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.
- [50] 邬光剑, 潘保田, 管清玉, 等. 中更新世全球最大冰期与中国沙漠扩张[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(5): 544-549. [WU Guangjian, PAN Baotian, GUAN Qingyu, et al. The maximum glaciation and desert expansion in China during MIS16 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(5): 544-549.]
- [51] 陈骏, 李高军. 亚洲风尘系统地球化学示踪研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 54(9): 1279-1301. [CHEN Jun, LI Gaojun. Geochemical studies on the source region of Asian dust [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(9): 1279-1301.]
- [52] 杨立辉. 长江中下游地区第四纪红土沉积特征与成因机制研究[D]. 华东师范大学博士学位论文, 2017. [YANG Lihui. The study of sedimentary characteristics and red clay in the middle and lower reaches of Yangtze river [D]. Doctor Dissertation of East China Normal University, 2017.]