

巫山地区三类黄土沉积物的粒度特征及物源启示

朱晓雨¹, 刘连文¹, 孟先强²

1. 表生地球化学教育部重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

2. 湖泊与环境国家重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

摘要: 长江三峡地区的巫山黄土位于润湿地区, 其来源及成因具有重要的古气候意义。黄土的粒度常用于指示其成因及源区, 目前关于巫山黄土成因和来源还是存在许多争议, 并且过去对巫山黄土粒度的研究主要集中于单一剖面, 缺乏空间上的系统对比研究。基于此, 对长江三峡巫山地区三个海拔梯度变化明显的黄土剖面进行系统的粒度组成分析, 结果表明: 顶部望天坪、中部圣泉和底部江东嘴剖面的粒度频率曲线大多表现为不对称的多峰特征。圣泉剖面以粉砂级粒径含量为主的特点说明它的风成成因, 物源主要来自近缘河谷; 江东嘴剖面呈现出两种完全不一样的峰型, 可能由两种不同成因混合而成; 位于望天坪剖面沉积物粒径要细得多, 推测为远源风成物质。

关键词: 长江三峡地区; 巫山黄土; 粒度

Grain size characteristics and source enlightenment of the Wushan loess in the Yangtze Three Gorges area

ZHU Xiaoyu¹, LIU Lianwen¹, MENG Xianqiang²

1. Ministry of Education Key Laboratory of Surficial Geochemistry, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: Background, aim, and scope The Wushan loess in the Three Gorges region of the Yangtze River is located in the wet area, and its source and genesis have important paleoclimatic significance. Previous studies have been conducted on the formation, provenance and times of Wushan loess, but the origin and provenance of Wushan loess are still controversial. Different scholars choose different locations in different regions to study Xiashu loess, which may be the main reason for the debate on its origin. The grain size composition of the sediment directly reflects the dynamic condition, sedimentary environment and transportation direction of the transport medium, which is often used as a discriminant index for the origin and origin of loess. However, in the past, studies on loess particle size of Wushan mainly focused on a single section, lacking systematic

收稿日期: 2018-11-28; 录用日期: 2019-03-26; 网络出版: 2019-04-01

Received Date: 2018-11-28; **Accepted Date:** 2019-03-26; **Online first:** 2019-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41991321, 41690111)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41991321, 41690111)

通信作者: 刘连文, E-mail: liulw@nju.edu.cn

Corresponding Author: LIU Lianwen, E-mail: liulw@nju.edu.cn

引用格式: 朱晓雨, 刘连文, 孟先强. 2019. 巫山地区三类黄土沉积物的粒度特征及物源启示 [J]. 地球环境学报, 10(6): 579–589.

Citation: Zhu X Y, Liu L W, Meng X Q. 2019. Grain size characteristics and source enlightenment of the Wushan loess in the Yangtze Three Gorges area [J]. Journal of Earth Environment, 10(6): 579–589.

comparative studies in space, and lacking comparative studies on different sedimentary types. Based on this, this paper systematically analyzed the grain size of three loess profiles with obvious changes in elevation gradient in Wushan area of the Three Gorges of Yangtze river in China, and discussed the origin and material source of Wushan loess. **Materials and methods** This paper collected three loess profiles of different heights on both sides of the Yangtze river in Wushan area, they are the Jiangdongzui profile at the bottom of the east bank of the Yangtze river at an elevation of about 190.4 m, the middle Shengquan profile near Chengnanjiu wharf in Wushan county at an elevation of about 248.6 m, and the top Wangtianping peak profile at the south bank of the Yangtze river in Wushan county at an elevation of about 1413.5 m, opposite the entrance of Daning river and the Yangtze river. These sections are developed on the limestone of the Triassic, and the lithology of the sections is relatively uniform, mainly composed of brown and yellow silty sand and sandy clay, containing a small amount of calcareous nodules. Soil weathering degree is weak, no obvious ancient weathering layer. According to the data, the loess in the study area belongs to the late Pleistocene loess. The three sections have a vertical span of 1223 m and a horizontal span of only 5 km, which may represent different loess accumulation types in the Three Gorges area of the Yangtze river. Based on this, this paper analyzes the systematic grain size composition of three loess sections with obvious elevation gradients. Particle size testing was completed in particle size analysis laboratory, key laboratory of surface geochemistry, ministry of education, Nanjing university, with the Mastersizer 2000 laser particle size analyzer produced by Malvern, UK. The testing range was 0.02—2000 μm , and the error of repeated measurement was less than 2%. **Results** The results show that the average particle size of the top Wangtianping, middle Shengquan and bottom Jiangdongzui sections is 9.9 μm , 30.8 μm , 73.9 μm , respectively. The particle size frequency curves of Wushan loess mostly show asymmetric multi-peak characteristics. **Discussion** The characteristics of the particle size distribution on the particle size frequency curve of Shengquan section indicate the aeolian genesis. The source of the material is mainly from the near valley. The particle size frequency curve of the Jiangdongzui section shows two completely different peak shapes may be mixed by two different causes. The first peak type is basically consistent with the Shengquan section, showing similar aeolian genesis; the second type shows that the coarse grain content is high, which may be affected by the later river reform, presumably except for the near-river valley dust and the later river sediment. The contribution of the material; the particle size of the sediment in the Wangtianping section is much finer than that of the sediments in the middle Shengquan section and the bottom Jiangdongzui section, which is presumed to be a distant source of wind. **Conclusions** Based on the above analysis, it can be concluded that the distant source of dust in north China may be the main source region of loess in the Wangtianping profile. While the Shengquan profile is mainly the near source valley eolian deposition, the Jiangdongzui profile is mainly the near source valley eolian deposition and/or fluvial facies deposition. **Recommendations and perspectives** In this paper, the grain size analysis of three loess profiles in Wushan area of the Three Gorges of the Yangtze River, which have obvious changes in elevation gradient and may be different in origin, is carried out systematically, to explore the origin and material source of Wushan loess, this study will help to identify the location, properties and transport routes of sediment sources of dust, and is of great significance to explain regional and global climate and environmental changes.

Key words: Three Gorges area of the Yangtze River; Wushan loess; grain size

中国黄土分布面积广，堆积时间长，沉积连续，是世界上最典型的黄土沉积，记录了内陆干旱化与东亚古季风变迁历史（刘东生，1985；Ji et al., 2001；Guo et al., 2002；Liu et al., 2006；An, 2014；Meng et al., 2015；Meng et al., 2018）。亚洲

国内外学者对分布在中国北方地区黄土的成因与来源进行了系统研究，详细论证了黄土高原地区黄土为风成成因（刘东生，1985），其粉尘物质的来源尽管存在争议，但一般认为主要来自于西北广袤的干旱区（刘东生，1985；Sun, 2002；Chen et al,

2007; Maher et al, 2009; 陈骏和李高军, 2011; 曾方明等, 2014; Fenn et al, 2017)。

除黄土高原黄土外, 长江中下游地区也分布了大量的黄土沉积, 主要由下游的下蜀黄土、巢湖黄土、宣城黄土及中游的巫山黄土等组成。长江中下游黄土的成因与来源较复杂, 宣城黄土主要来自于长江以北的临近洪泛区 (Hao et al, 2010); 下蜀黄土主要物源为长江河谷及东海大陆架 (Liu et al, 2014; Li et al, 2018; Wang et al, 2018; Qian et al, 2018); 而淮河河漫滩, 湖泊和沿岸沉积区的细粒沉积物是巢湖黄土重要的物质来源 (Guan et al, 2016)。

长江三峡地区的巫山黄土是中国第四纪黄土沉积物中的一种独特类型, 是中国黄土分布的南界, 同时沉积于山区, 其物质来源具有重要的古气候古环境 (刘东生, 1985)。前人对于巫山黄土的形成、物源和时代进行了一些研究 (王建明等, 2009; 黄臻等, 2010), 但巫山黄土的成因与物源仍存在争议 (Zhao et al, 1995; 卢佳和王立强, 2011; Zeng et al, 2016), 一些学者对巫山黄土的磁组构、粒度、元素地球化学特征等进行研究, 认为巫山黄土主要为风成成因, 在风力作用下, 由于多种因素共同作用, 使得黄土高原的粉尘不断向南部扩张, 在长江三峡库区形成了黄土状堆积物 (李长安等, 2010; 张玉芬等, 2010); 另外一些研究认为长江三峡地区巫山黄土为冲积成因, 是多期次的洪水堆积物, 推测该地区黄土是经流水搬运而来在此沉积的次生黄土 (柯于义等, 2007); 谢明 (1991) 也认为长江三峡地区巫山黄土与河漫滩堆积物相似, 为河流沉积物, 因此, 需要对巫山黄土的成因与源区进行更为深入的研究。总之, 下蜀黄土的成因较复杂, 具体情况应作具体分析。不同学者在不同的区域, 选择了不同的位置来研究下蜀黄土, 可能是导致其成因争论的一个主要原因。从其形成过程中作用营力的先后、主次看, 风力是第一位的, 流水作用是第二位的, 成因应以风积为主 (郑乐平等, 2002)。

沉积物的粒度组成直接反映了搬运介质的动力条件、沉积环境和搬运方向, 常作为黄土成因与来源的判别指标 (Ding et al, 2005; Sun et al, 2006)。但过去对巫山黄土粒度的研究主要集中在单一剖面, 缺乏空间上的系统对比研究, 对不同沉积类型的对比研究不足。基于此, 对中国长江

三峡巫山地区海拔梯度明显变化的、成因上可能有所区别的三个黄土剖面进行系统的粒度分析, 探讨巫山黄土的成因及物质来源。

1 样品与方法

1.1 样品采集

巫山黄土位于巫山县境内, 境内地势南北高, 中间低, 地形十分复杂, 山地占 96%, 丘陵平坝占 4%, 全县海拔最低仅为 73.1 m, 最高为 2680 m, 具有典型的喀斯特地貌, 该地区属亚热带季风气候, 年均温度为 18.4 °C, 年均降水量为 1040 mm (黄臻等, 2010)。

采集巫山地区长江两岸不同高度的三个黄土剖面, 分别为靠长江东岸海拔约 190.4 m 的底部江东嘴剖面 (31°04'N, 109°53'E)、巫山县城南九码头附近海拔约 248.6 m 的中部圣泉剖面 (31°47'N, 109°53'E) 和位于巫山县长江南岸正对着大宁河与长江的入口处海拔约 1413.5 m 的顶部望天坪山顶剖面 (31°03'N, 109°54'E) (图 1)。这些剖面均发育在岩性较为单一的灰岩之上, 主要是由褐黄色的粉砂和砂质黏土组成, 含有少量的钙质结核, 剖面基本无层理, 垂直节理发育, 空隙明显; 土壤风化程度较弱, 未见明显的古风化层。据年代数据, 研究区黄土属于晚更新世黄土 (吴可等, 2014); 三个剖面垂直跨度 1223 m, 水平跨度仅 5 km, 可能代表了长江三峡峡谷地区不同的黄土堆积类型。

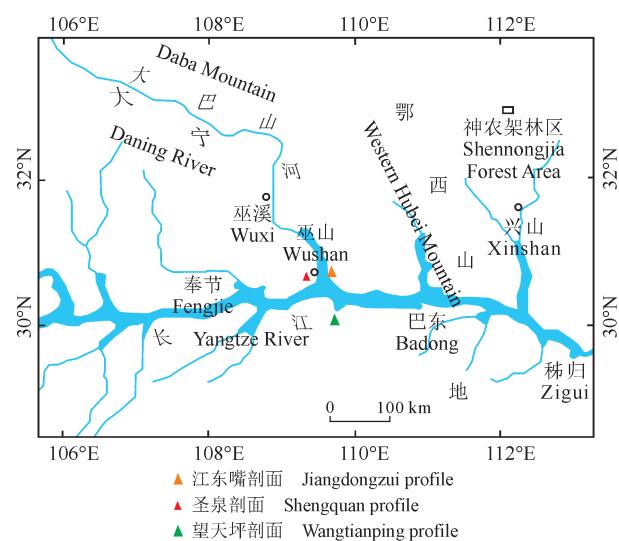


图 1 中国长江三峡巫山地区简图
Fig.1 Map of Wushan area in the Three Gorges of the Yangtze River in China

顶部望天坪剖面位于长江南岸山顶自然植被较为稀少的缓坡上，剖面厚约 2.5 m，该剖面下部土壤颜色土白而其上部土壤颜色偏黄，比较松散，从剖面顶部开始，以 20 cm 间隔连续取样，共采集样品 13 个；中部圣泉剖面厚度约 17 m，剖面上部为褐黄色粉砂，含有少量钙结核，下部土壤湿度较大，主要为砂质黏土，以 50 cm 间隔连续取样，共采集样品 35 个；底部江东嘴剖面厚度约 3.6 m，为偏棕色的土状堆积，剖面上部土壤颜色较深，且在 40—80 cm 处土壤颜色偏黑，下部颜色较浅为土黄色，并可见较多钙结核；从剖面顶部开始，以 5 cm 间隔连续取样，共采集样品 72 个。

1.2 粒度测试分析

粒度测试在南京大学表生地球化学教育部重点实验室粒度分析实验室完成，仪器为英国 Malvern 公司产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪，其测试范围为 0.02—2000 μm ，重复测量误差小于 2%。粒度分析包括样品的前处理和上机测试，将全部样品在低温烘干后充分混合均匀，取适量粉末样品进行前处理。

前处理流程为：在每个样品中加入 10 mL 10% 的 H_2O_2 超声加热直至不再有气泡产生，静置过夜，吸取上清液；再往残留物中加入 10 mL 10% 的 HCl 继续加热煮沸，静置过夜，吸取上清液；再加入 30 mL 蒸馏水静置一夜后倒去上清液，除去溶液中的 Cl^- 、 Ca^{2+} 等离子。上机测试之前加入 10 mL 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的六偏磷酸钠 ($(\text{NaPO}_3)_6$) 对样品进行分散，用超声波清洗机振荡 10 min，制成悬浮液以供测试。最后对样品进行粒度上机测试，每个样品重复测试 3 次。

采用中国制土壤颗粒分级标准系统分析巫山黄土的粒度特征，分别采用以直径为 50 μm 、10 μm 和 5 μm 作为砂粒/粗粉砂、粗粉砂/细粉砂以及细粉砂/黏粒的分界线。

基于沉积学上应用最广泛的温德华粒级分类 (Wentworth, 1922) 及福克和沃克值粒级 (Folk and Ward, 1957) 参数统计，得到了巫山黄土的粒径组成及包括平均粒径 (M_z)、标准偏差 (σ_i)、偏度 (SK_z) 和峰度 (KG) 在内的粒径参数。

2 结果

2.1 巫山黄土粒度特征

粒度一般可以作为衡量搬运该沉积物的介质能量与其沉积环境的一种尺度，一般而言，粗颗粒沉积物多出现于高能沉积动力环境下，而细颗粒沉积物多出现于低能沉积动力环境下。

三种巫山黄土剖面样品的粒度分布频率曲线表现为不对称的多峰特征 (图 2)，而这种双峰模式是在不同时代以及不同剖面风成黄土中普遍存在，少数剖面样品出现多峰 (图 2)，表明遭受新环境的改造作用强 (孙东怀等, 2000)。在不同高程的黄土样品粒径分布频率曲线差别较大，呈现出三种不同的粒度频率曲线，高海拔的望天坪剖面 (海拔为 1413.5 m) 粒度频率曲线表现为不对称的“双峰”，双峰位置分别在粒径 $\sim 1 \mu\text{m}$ 、 $\sim 10 \mu\text{m}$ 处，平均粒径为 9.9 μm ；中部圣泉剖面 (海拔为 248.6 m) 粒度频率曲线为“三峰”，除了以上两峰之外，还在粒径较粗的 $\sim 50 \mu\text{m}$ 处有一峰；平均粒径为 30.8 μm ；而底部的江东嘴剖面 (海拔为 190.4 m) 表现为复杂的“四峰”，除了以上三峰之外，在粒径更粗的 $\sim 250 \mu\text{m}$ 处还有一峰，平均粒径为 73.9 μm 。

2.1.1 望天坪剖面

高海拔的望天坪剖面 (海拔为 1413.5 m) 粒度频率曲线表现为不对称的“双峰”，平均粒径为 9.9 μm ，主要以黏粒为主，粗粉砂次之，再次为细粉砂，砂砾最少。第 1 众数出现在 5—20 μm ，颗粒较细；粒径 $< 2 \mu\text{m}$ ，样品出现小峰，为第 2 众数，对应区间的颗粒稍微偏细，为细粒粉尘，主要是在高空长距离悬浮或依附于大颗粒搬运而来，也包含成壤作用 (刘冬雁等, 2010；于秋莲等, 2010)。该剖面曲线符合中国黄土粒度普遍出现的双峰特征 (孙东怀等, 2000；孙东怀和鹿化煜, 2007)。

2.1.2 圣泉剖面

中部圣泉剖面 (海拔为 248.6 m) 粒度频率曲线为“三峰”，平均粒径为 30.8 μm ，以粗粉砂为主，细砂粒次之，再次为黏粒，细粉砂最少。第 1 众数出现在 15—63 μm ，众数粒径向粗粒端减小的速率比向细粒端快，表明其搬运动力较弱，粗颗粒物质不足，其中有个别样品在粒径 $> 100 \mu\text{m}$ 出现一个小峰，可能为采样过程中大颗粒的混入；第 2 众数出现在 2—15 μm ，该区间颗粒稍微偏细，在空气中易浮动，为主要的风力悬浮搬运对象，而随粒径变大，搬运系数变小，在空气中的浮动性能越来越差；第 3 众数出现在 $< 2 \mu\text{m}$ 时，颗粒较细，可能为黏土或细粉砂 (金秉福, 2012)。该剖面曲线表现为以粉砂级粒径含量为主，说明主要为风成成因 (Pye and Tsoar, 1987)。

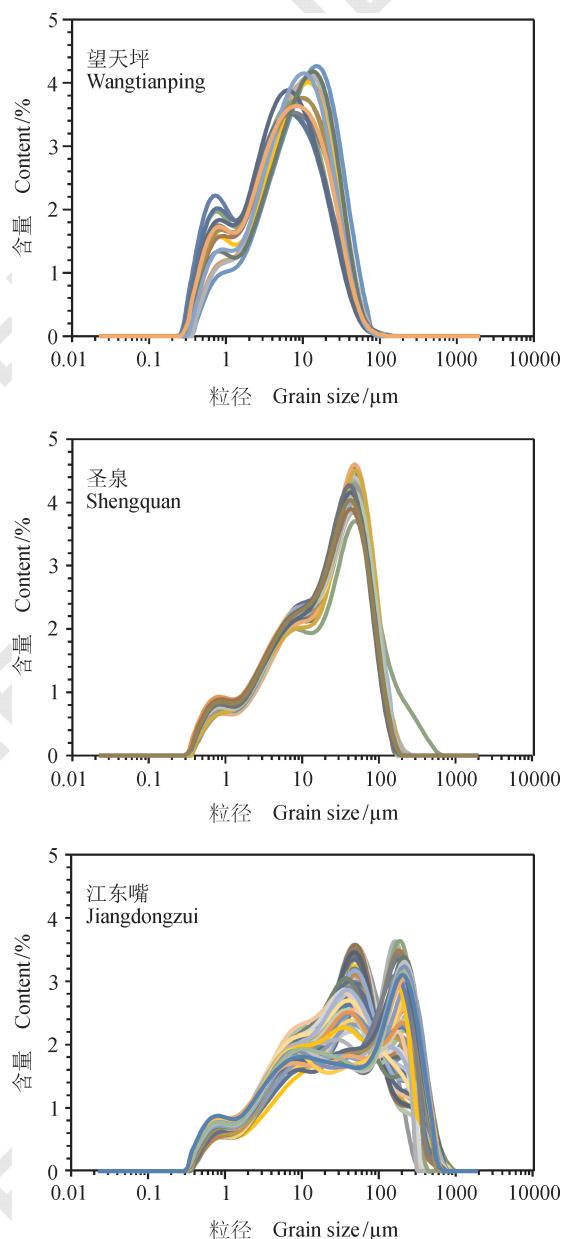


图2 巫山黄土粒度频率曲线
Fig.2 Grain size frequency distribution curves of Wushan loess

2.1.3 江东嘴剖面

而底部低海拔的江东嘴剖面（海拔为190.4 m）表现为复杂的“四峰”，平均粒径为 $73.9 \mu\text{m}$ ，以细砂粒为主，粗粉砂次之，且两者差别较小，再次为黏粒、细粉砂。该剖面较为复杂，同一剖面不同深度出现两种粒度分布曲线，以采样深度180 cm为节点，第一种峰型基本与圣泉剖面一致，主要粒径范围为 $10-50 \mu\text{m}$ ；第二种峰型显示粗颗粒含量较多， $>50 \mu\text{m}$ 颗粒偏多，明显粗于中部圣泉黄

土和顶部望天坪黄土，且两种“峰”形态差别较大。在 $180-360 \text{ cm}$ 粒度曲线的第1众数出现在 $63-280 \mu\text{m}$ ，第2、3众数分别位于 $0-2 \mu\text{m}$ 、 $2-15 \mu\text{m}$ ，而对其平均粒径偏大贡献较多的是 $>63 \mu\text{m}$ 颗粒的含量。

总体来说，三个黄土剖面的样品粒度据海拔高度自底部向顶部逐渐变细。位于望天坪的剖面沉积物粒径要比中部圣泉剖面、底部江东嘴剖面沉积物的粒径要细得多。而现代河流沉积物粒度以细砂粒为主，黏粒次之，且含量变化范围大，明显区别于巫山黄土的粒度组成特征（表1）。

3 讨论

3.1 影响粒度变化的因素

中国的气候和自然环境深受东亚季风影响，黄土是第四纪以来由东亚冬季风带来的粉尘堆积形成，东亚冬季风的建立直接的诱导因素是青藏高原的隆升，风尘沉积过程是第四纪全球性气候变化特定条件下形成的产物，所以风力大小一般是控制风尘沉积物颗粒大小的主要因素。粒度作为衡量搬运该沉积物的介质能量与其沉积环境的一种尺度，一般而言，粗颗粒沉积物多出现于高能沉积动力环境下，而细颗粒沉积物多出现于低能沉积动力环境下。细颗粒在空气中最易浮动，为主要的风力悬浮搬运对象，在高空长距离悬浮或依附于大颗粒搬运而来，也包含成壤作用，而随粒径变大，搬运系数变小，在空气中的浮动性能越来越差，且在重力作用下下沉，使得该区域粒度随着地势的升高粒度不断减小；并且由于该区域土壤风化较弱，未见较明显的古土壤层，所以下期风化对于黄土粒度影响较小，主要受风力大小控制。

3.2 巫山地区黄土粒度特征探讨

3.2.1 巫山黄土地质分类三角图

根据沉积物三因分类法，将三个剖面的样品投影到土壤质地分类三角图上（图3）。从图中可以看出：望天坪剖面的黄土基本为黏土，圣泉和江东嘴剖面的黄土为黏土质粉砂，与黄土高原典型风成黄土（刘东生，1985）和巢湖下蜀土质地相似，明显不同于现代河流沉积物，其分布较为分散，且主要以砂质为主；而巫山黄土颗粒中砂粒含量比北方黄土多，且跨度较大，这可能是因

为剖面处在峡谷中，地势较低，在一定的动力条件下将附近山地较粗的颗粒混入引起的。值得关注的是，江东嘴剖面部分样品与河流沉积物较为相似，显示出较复杂的成因。

表 1 巫山黄土粒度组成与其他沉积类型的比较

Tab.1 Comparison of grain size compositions between Wushan loess and other sediments

地点 Site	粒度组成 Grain size composition /%				
	>50 μm	10—50 μm	5—10 μm	<5 μm	
江东嘴 Jiangdongzui	最大值 Maximum	45.62	37.51	13.04	22.11
	最小值 Minimum	29.61	22.94	8.34	14.22
	平均值 Average	39.44	31.32	10.87	18.38
圣泉 Shengquan	最大值 Maximum	30.86	46.23	13.43	24.32
	最小值 Minimum	19.21	36.61	11.63	18.19
	平均值 Average	23.35	42.93	12.76	20.96
望天坪 Wangtianping	最大值 Maximum	2.31	46.93	23.44	51.52
	最小值 Minimum	0.57	26.82	20.82	29.75
	平均值 Average	1.10	35.32	21.79	41.79
现代河流沉积物 Modern fluvial sediment	最大值 Maximum	91.60	45.40	25.50	45.05
	最小值 Minimum	30.80	2.30	4.32	5.58
	平均值 Average	77.40	15.80	16.15	24.60
洛川 Luochuan	马兰黄土 Malan loess	6.80	53.00	12.50	27.40
	离石上部 Upper of Lishi	10.00	52.70	11.00	26.30
	离石下部 Lower of Lishi	5.30	50.30	12.30	31.20

现代河流沉积物数据来源于李长安等 (2010)；洛川剖面数据来源于 Lu et al (2004)。

Modern river sediment data are from Li et al (2010); Luochuan profile data come from Lu et al (2004).

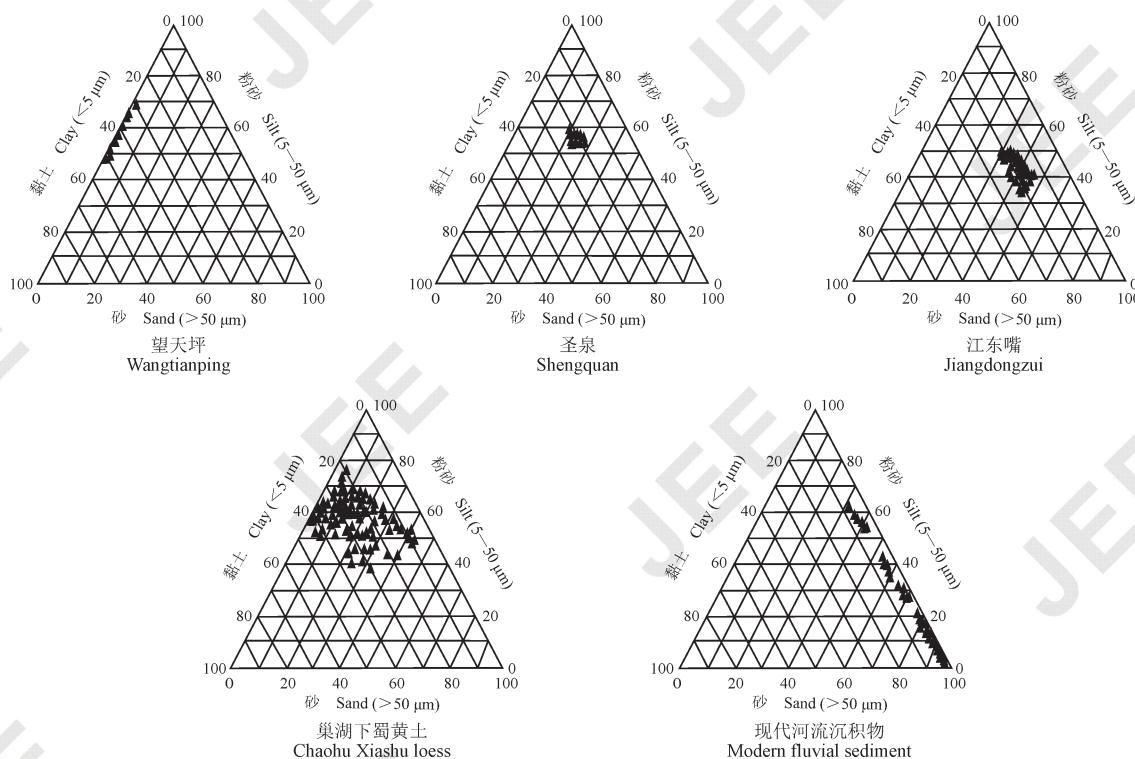


图 3 巫山黄土与巢湖下蜀黄土、现代河流沉积物岩性三角图

Fig.3 Clay-silt-sand triangular plots of Wushan loess, Xiashu loess and modern fluvial sediments

3.2.2 巫山黄土粒度象特征对比及对成因的指示

C-M 图是基于每个样品的 C 值和 M 值绘成的

图形。C 是粒度分析资料累积曲线上颗粒含量 1% 处对应的粒径，M 值是累积曲线上 50% 处对应的

粒径, 即粒度中值。 C 值与样品中最粗颗粒的粒径相当, 代表了搬运动力搅动开始搬运的最大能量; M 值是中值, 代表了搬运动力的平均能量。 $C-M$ 图一般可用于风成沉积研究, 通过将研究区样品投影到图解中, 与已知成因的河流沉积物等样品投影区域进行对比, 以此来确定研究区样品的沉积环境(刘东生, 1985)。巫山黄土和与河流沉积物的 $A\text{-}M$, $L\text{-}M$, $C\text{-}M$ (A 、 L 分别小于 $4 \mu\text{m}$ 和 $31 \mu\text{m}$ 的粒度百分含量) 粒度象图解如图 4 所示, 从图中可以看出: 巫山黄土分布区域明显区别于河流沉积物, 而且研究区黄土分布较为集中, 现代河流沉积物分布区域较广, 说明两者成因及沉积环境明显不同, 但江东嘴剖面有些样品与河流沉积物较为相似, 显示出较复杂的成因。

3.2.3 粒度参数散点图特征

粒度参数散点图也可间接指示巫山黄土的成因及沉积环境。如图 5 所示: 巫山黄土粒度参数散点图和现代河流沉积物有较大的区别, 而与巢湖盆地下蜀黄土的分布区域基本一致, 可能意味着巫山黄土的成因应与下蜀土风积成因一致, 显示风成成因。但江东嘴剖面有些样品与河流沉积物较为相似, 显示出除风成成因之外的较复杂的河流成因。

利用鉴别沉积环境的判别函数, 可以更清楚地表明沉积物的成因。根据 Folk and Ward (1957)、鹿化煜和安芷生 (1999) 的方法, 分别计算了上述三种沉积的风成成因指数。 $Y = -3.5688M_z + 3.7016\sigma_i^2 - 2.0766SK_z + 3.1175KG$, 式中: Y 为判别参数, M_z 、 σ_i 、 SK_z 和 KG 分别是平均粒径、标准差、偏度和峰态。一般来说, 风成沉积物的判别值 <-2.74 。经计算, 圣泉和望天坪剖面的样品, 其风成成因指数均 <-2.74 , 显示典型的风成成因, 而江东嘴剖面, 有 30% 左右的样品, 其风成成因指数均 >-2.74 , 显示这些样品可能是河流沉积或其沉积受到河流的改造作用。

3.3 三类黄土沉积物的成因与物源探讨

基岩原地风化以及河流、风尘和冰川搬运都有可能形成类似黄土的碎屑沉积岩。没有证据表明第四纪晚期三峡河谷发育有大规模冰川, 该地区的地形也不利于成份如此均一的冰川黏土的形成, 因此, 冰川黏土成因可以排除。灰岩原地风化有可能形成较厚的碎屑沉积层, 其中, 厚度较小的望天坪剖面是最有可能这种成因的。望天坪剖面发育在灰岩之上, 灰岩母岩风化过程中, 石

英粒度分布特征是可以继承的, 灰岩风化剖面的石英粒度明显比碎屑岩风化壳的粗, 且黏粒含量较低(Xiao et al., 1995)。根据矿物组成分析结果(未发表数据), 望天坪剖面 90% 以上是石英颗粒, 中值粒径基本代表了石英的中值粒径, 该粒径远小于一般风化剖面中的石英中值粒径($20\text{--}40 \mu\text{m}$) (冯志刚等, 2009), 说明望天坪剖面不是下伏灰岩风化形成的, 风尘是该剖面最可能的来源(He et al., 2015)。

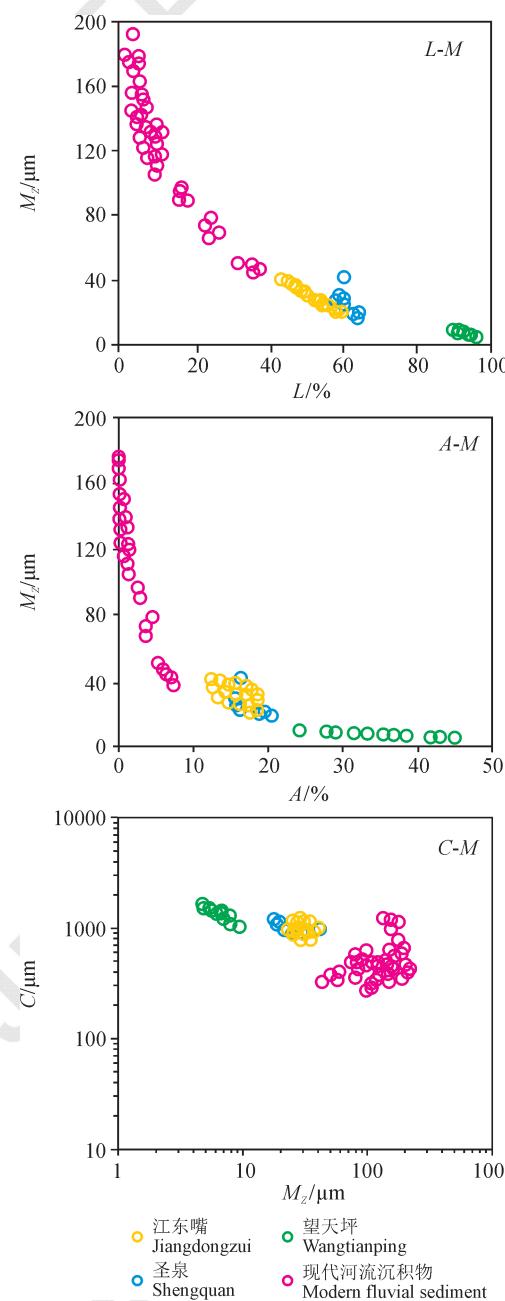


图 4 巫山黄土与河流沉积物粒度特征比较
Fig.4 Comparison of grain size images between Wushan loess and fluvial sediments

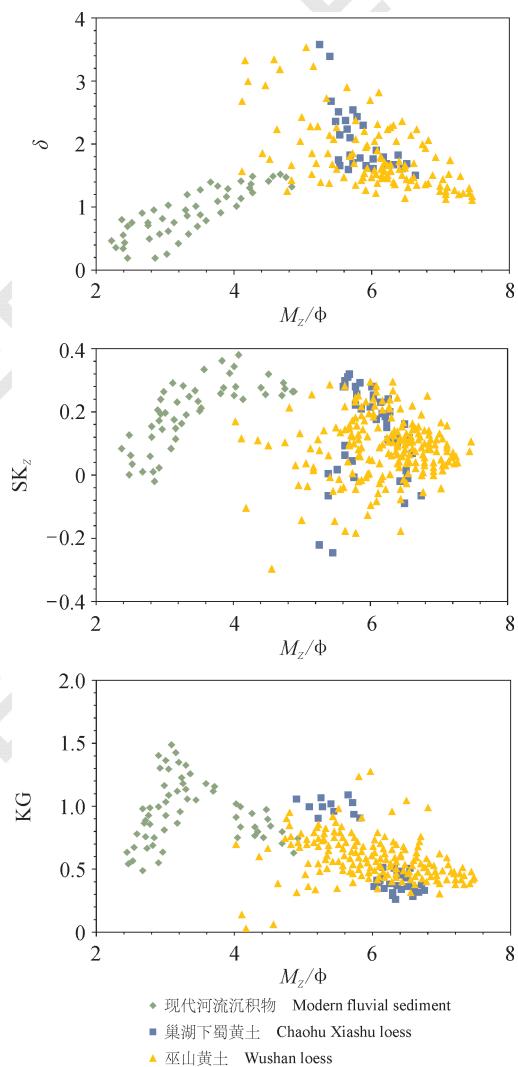


图 5 巫山黄土、河流沉积物和下蜀黄土粒度参数散点图
Fig.5 Grain size parameters scatter grams of Wushan loess, Xiashu loess and fluvial sediments

巫山圣泉剖面的黄土“基本粒组”为 10—50 μm 粗粉砂，其平均含量 42.9%，曲线上所表现的以粉砂级粒径含量为主的特点相应地说明了它的风成成因（孙东怀等，2003）；众数粒径向粗粒端减小的速率比向细粒端快，与北方典型风尘黄土的“基本粒组”基本一致，且与前人研究结果一致（李长安等，2010），主要表现为风成成因。中国长江三峡地区的粉尘有可能来自于北部沙漠戈壁等干旱区。由于西北风自北向南逐渐减弱，导致黄土沉积物自北向南逐渐变细（刘东生，1985），例如在黄土高原地区，南部地区的黄土物质最细，在末次冰期，其平均粒度约为 10—20 μm （Ding et al., 2005; Yang and Ding, 2008）。对巫山黄土粒度与黄土高原南部蓝田剖面末次冰

期黄土的粒度，发现巫山地区除望天坪剖面外，其他两个剖面的黄土粒度明显比蓝田剖面末次冰期黄土（约 15 μm ）（Ding et al., 2005; Yang and Ding, 2008）粗。根据前人研究结果，圣泉剖面的年代为末次冰期（吴可等，2014），并且圣泉剖面黄土地处河谷之中，由此可推测，圣泉剖面黄土主要是在冰期时期风力较强时局部河谷风尘吹扬形成，意味着在末次冰期，长江径流减小，河漫滩大量暴露，为附近的黄土沉积提供了物质。

江东嘴剖面粒度频率曲线呈现出两种完全不一样的峰型，可能由两种不同成因混合而成。第一种峰型基本与圣泉剖面一致，显示出相似的风成成因；第二种峰型显示粗颗粒含量较多， $>50 \mu\text{m}$ 颗粒偏多，导致其“基本粒组”为 10—50 μm 粗粉砂和 $>50 \mu\text{m}$ 细砂粒，两种“峰”形态差别较大。由于江东嘴剖面处于海拔较低处，可能有河漫滩或后期河流改造近源粗颗粒的混入导致颗粒偏粗。

巫山望天坪剖面的黄土“基本粒组”为 $<5 \mu\text{m}$ 黏粒和 10—50 μm 粗粉砂。刘东生（1985）、An (2014) 的研究表明：平均粒径小于 2 μm 的细粒粉尘，一旦被风吹起，可在高空中悬浮较长时间，并被气流搬运到较远的地区；而平均粒径大于 20 μm 的颗粒，很少在空气中悬浮较长的时间，即使被大风吹起也只能在低空短时间悬浮，被搬运的距离也较短，其搬运方式是近地面短距离悬移，风速减弱便回落到地面。北方黄土高原中的细粒组分的众数粒径一般在 2—8 μm ，而北太平洋粉尘只有 1.8—2.2 μm （孙东怀等，2003）。望天坪剖面极高的 $<5 \mu\text{m}$ 黏粒组成明显区别于圣泉剖面黄土，显示其远源特征。这种远源风尘有可能与中国北方黄土高原同一来源。从空间上看，巫山位于黄土高原南边，距离蓝田剖面不足 400 km，望天坪剖面的平均粒径为 9.9 μm ，远低于蓝田剖面 15 μm 的平均粒径，符合平均粒径随搬运距离下降的趋势（董欣欣等，2016）。

结合上述分析可知，中国北方的远源风尘可能为望天坪剖面黄土的主要源区；而圣泉剖面主要是近源河谷风成沉积，江东嘴剖面主要为近源河谷风成沉积和 / 或河流相沉积。

4 结论

综上所述，对巫山地区三个海拔梯度变化的黄土剖面（圣泉、江东嘴和望天坪）的粒度进行系统研究，发现巫山黄土存在三种不同的成因类

型, 且三个剖面的粒度参数存在显著差别。顶部望天坪、中部圣泉和底部江东嘴剖面的平均粒径分别为 9.9 μm、30.8 μm 和 73.9 μm, 呈现海拔越高粒度越细的粒度分布特征; 通过风成成因指数等粒度参数的计算, 海拔较高的圣泉和望天坪剖面为风成成因, 其中, 望天坪剖面可能来自远源粉尘。海拔较低的江东嘴剖面, 存在风成与河流相沉积两种混合。

致谢: 感谢表生地球化学教育部重点实验室焦志敏等在实验测试上的帮助。

参考文献

- 黄臻, 王建力, 王勇. 2010. 长江三峡巫山第四纪沉积物粒度分布特征 [J]. 热带地理, 30(1): 30–33, 39. [Huang Z, Wang J L, Wang Y. 2010. Grain-size features of Quaternary sediments in Changjiang Three Gorge Reservoir of the Wushan area [J]. *Tropical Geography*, 30(1): 30–33, 39.]
- 陈骏, 李高军. 2011. 亚洲风尘系统地球化学示踪研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 41(9): 1211–1232. [Chen J, Li G J. 2011. Geochemical studies on the source region of Asian dust [J]. *Science China: Earth Sciences*, 41(9): 1211–1232.]
- 董欣欣, 杨石岭, 唐自华, 等. 2016. 基于黄土粒度估算粉尘源区-沉积区距离的新方法 [J]. 中国科学: 地球科学, 46(10): 1406–1412. [Dong X X, Yang S L, Tang Z H, et al. 2016. A grain-size-based model for dust source-to-sink distance reconstruction: a case study from Chinese loess [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 46(10): 1406–1412.]
- 冯志刚, 王世杰, 黄伟, 等. 2009. 湘西岩溶区风化壳的物源: 石英粒度分布特征的指示 [J]. 矿物岩石, 29(1): 80–85. [Feng Z G, Wang S J, Huang W, et al. 2009. The provenance of weathering crusts in Karst terrains, western Hunan Province: indication of grain size distribution characteristics of quartz [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 29(1): 80–85.]
- 金秉福. 2012. 粒度分析中偏度系数的影响因素及其意义 [J]. 海洋科学, 36(2): 129–135. [Jin B F. 2012. Influencing factors and significance of the skewness coefficient in grain size analysis [J]. *Marine Sciences*, 36(2): 129–135.]
- 柯于义, 尹华刚, 郭峰, 等. 2007. 三峡库区“巫山黄土”成因研究 [J]. 人民长江, 38(9): 72–73, 76. [Ke Y Y, Yin H G, Guo F, et al. 2007. Study on the genesis of “Wushan loess” in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Yangtze River*, 38(9): 72–73, 76.]
- 李长安, 张玉芬, 袁胜元, 等. 2010. “巫山黄土”粒度特征及其对成因的指示 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 35(5): 879–884. [Li C A, Zhang Y F, Yuan S Y, et al. 2010. Grain size characteristics and origin of the “Wushan loess” at Wushan area [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 879–884.]
- 刘东生. 1985. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社. [Liu T S. 1985. Loess and environment [M]. Beijing: Science Press.]
- 刘冬雁, 李巍然, 彭莎莎, 等. 2010. 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), 40(2): 79–84. [Liu D Y, Li W R, Peng S S, et al. 2010. Current application of grain size analysis in Chinese loess paleoclimatic study [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 40(2): 79–84.]
- 鹿化煜, 安芷生. 1999. 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, 17(2): 226–232. [Lu H Y, An Z S. 1999. Comparison of grain-size distribution of red clay and loess-paleosol deposits in Chinese Loess Plateau [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(2): 226–232.]
- 卢佳, 王立强. 2011. 亚洲粉尘释放的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 39(32): 19813–19817, 19854. [Lu J, Wang L Q. 2011. Research progress of dust emission in Asia [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 39(32): 19813–19817, 19854.]
- 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 2003. 最近 2.6 Ma 中国北方季风环流与西风环流演变的风尘沉积记录 [J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 33(6): 497–504. [Sun D H, An Z S, Su R X, et al. 2003. Eolian sedimentary records for the evolution of monsoon and westerly circulations of northern China in the last 2.6 Ma [J]. *Science in China (Series D)*, 33(6): 497–504.]
- 孙东怀, 鹿化煜, David Rea, 等. 2000. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义 [J]. 沉积学报, 18(3): 327–335. [Sun D H, Lu H Y, Rea D, et al. 2000. Bimode grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 327–335.]
- 孙东怀, 鹿化煜. 2007. 晚新生代黄土高原风尘序列的粒度和沉积速率与中国北方大气环流演变 [J]. 第四纪研究,

- 27(2): 251–262. [Sun D H, Lu H Y. 2007. Grain-size and dust accumulation rate of Late Cenozoic aeolian deposits and the inferred atmospheric circulation evolutions [J]. *Quaternary Sciences*, 27(2): 251–262.]
- 王建明, 王 勇, 王建力. 2009. 巫山第四纪沉积物粒度特征研究 [J]. 人民长江, 40(13): 13–15, 104. [Wang J M, Wang Y, Wang J L. 2009. Research on granular characteristics of Quaternary deposit in Wushan County [J]. *Yangtze River*, 40(13): 13–15, 104.]
- 吴 可, 彭红霞, 时 冉. 2014. 长江三峡地区黄土粒度特征及其成因分析 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 48(2): 284–289. [Wu K, Peng H X, Shi R. 2014. Analysis on the characteristics and their origin of the grain-size of Wushan loess in the Three Gorges area, China [J]. *Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences)*, 48(2): 284–289.]
- 谢 明. 1991. 长江三峡地区的黄土状堆积物 [J]. 地球化学, 20(3): 292–300. [Xie M. 1991. Loessal deposits in the Three-Gorge area of the Changjiang (Yangtze) River [J]. *Geochimica*, 20(3): 292–300.]
- 于秋莲, 张展适, 杜后发. 2010. 粒度分析在古环境中的应用 [J]. 能源研究与管理, (2): 49–52. [Yu Q L, Zhang Z S, Du H F. 2010. The application of granularity analysis in paleoenvironment [J]. *Energy Research and Management*, (2): 49–52.]
- 曾方明, 向树元, 刘向军, 等. 2014. 黄土高原风尘堆积物源研究进展 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 39(2): 125–140. [Zeng F M, Xiang S Y, Liu X J, et al. 2014. Progress in tracing provenance of eolian deposits in Chinese Loess Plateau [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(2): 125–140.]
- 张玉芬, 李长安, 邵磊, 等. 2010. “巫山黄土”的磁组构特征及成因 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 35(5): 885–890. [Zhang Y F, Li C A, Shao L, et al. 2010. Magnetic fabric characteristics and implications for its origin of “Wushan loess” [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 885–890.]
- 郑乐平, 胡雪峰, 方小敏. 2002. 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, 21(1): 54–57. [Zheng L P, Hu X F, Fang X M. 2002. 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*, 21(1): 54–57.]
- An Z S. 2014. Late Cenozoic climate change in Asia [M]. Dordrecht: Springer.
- Chen J, Li G J, Yang J D, et al. 2007. Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: Implications for the provenances of Asian dust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(15): 3904–3914.
- Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. 2005. Stepwise expansion of desert environment across northern China in the past 3.5 Ma and implications for monsoon evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(1/2): 45–55.
- Fenn K, Stevens T, Bird A, et al. 2017. Insights into the provenance of the Chinese Loess Plateau from joint zircon U-Pb and garnet geochemical analysis of last glacial loess [J]. *Quaternary Research*, 89(3): 645–659.
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1): 3–26.
- Guan H C, Zhu C, Zhu T X, et al. 2016. Grain size, magnetic susceptibility and geochemical characteristics of the loess in the Chaohu lake basin: Implications for the origin, palaeoclimatic change and provenance [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 117: 170–183.]
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 416(6877): 159–163.
- Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y S, et al. 2010. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 29(23/24): 3317–3326.
- He T, Liu L W, Chen Y, et al. 2017. A seven-million-year hornblende mineral record from the central Chinese Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 7: 2382.
- Ji J F, Balsam W, Chen J. 2001. Mineralogic and climatic interpretations of the Luochuan loess section (China) based on diffuse reflectance spectrophotometry [J]. *Quaternary Research*, 56(1): 23–30.
- Li X S, Han Z Y, Lu H Y, et al. 2018. Onset of Xiashu loess deposition in southern China by 0.9 Ma and its implications for regional aridification [J]. *Science China Earth Sciences*, 61(3): 256–269.
- Liu F, Li G J, Chen J. 2014. U-Pb ages of zircon grains reveal a proximal dust source of the Xiashu loess, Lower Yangtze River region, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(20):

- 2391–2395.
- Liu L W, Chen J, Ji J F, et al. 2006. Variation of Zr/Rb ratios in the Chinese loess deposits during the past 1.8 Myr and its implication for the change of East Asian monsoon intensity [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(10). DOI: 10.1029/2005GC001188.
- Lu H Y, Zhang F Q, Liu X D, et al. 2004. Periodicities of palaeoclimatic variations recorded by loess-paleosol sequences in China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 23(18/19): 1891–1900.
- Maher B A, Mutch T J, Cunningham D. 2009. Magnetic and geochemical characteristics of Gobi Desert surface sediments: Implications for provenance of the Chinese Loess Plateau [J]. *Geology*, 37(3): 279–282.
- Meng X Q, Liu L W, Balsam W, et al. 2015. Dolomite abundance in Chinese loess deposits: a new proxy of monsoon precipitation intensity [J]. *Geophysical Research Letters*, 42(23): 10391–10398.
- Meng X Q, Liu L W, Wang X T, et al. 2018. Mineralogical evidence of reduced East Asian summer monsoon rainfall on the Chinese Loess Plateau during the early Pleistocene interglacials [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 486: 61–69.
- Pye K, Tsoar H. 1987. The mechanics and geological implications of dust transport and deposition in deserts with particular reference to loess formation and dune sand diagenesis in the northern Negev, Israel [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 35(1): 139–156.
- Qian P, Zheng X M, Cheng J, et al. 2018. Tracing the provenance of aeolian loess in the Yangtze River Delta through zircon U–Pb age and geochemical investigations [J]. *Journal of Mountain Science*, 15(4): 708–721.
- Sun J M. 2002. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(3/4): 845–859.
- Sun Y B, Lu H Y, An Z S. 2006. Grain size of loess, paleosol and red clay deposits on the Chinese Loess Plateau: significance for understanding pedogenic alteration and palaeomonsoon evolution [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241(1): 129–138.
- Wang X Y, Lu H Y, Zhang H Z, et al. 2018. Distribution, provenance, and onset of the Xiashu loess in Southeast China with paleoclimatic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 155: 180–187.
- Wentworth C K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *Journal of Geology*, 30(5): 377–392.
- Xiao J L, Porter S C, An Z S, et al. 1995. 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*, 43(1): 22–29.
- Yang S L, Ding Z L. 2008. Advance–retreat history of the East-Asian summer monsoon rainfall belt over northern China during the last two glacial-interglacial cycles [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(3/4): 499–510.
- Zeng L, Lu H Y, Yi S W, et al. 2016. New magnetostratigraphic andpedostratigraphic investigations of loess deposits in north-east China and their implications for regional environmental change during the Mid-Pleistocene climatic transition [J]. *Journal of Quaternary Science*, 31(1): 20–32.
- Zhao L, Ji J F, Chen J, et al. 2005. Variations of illite/chlorite ratio in Chinese loess sections during the last glacial and interglacial cycle: Implications for monsoon reconstruction [J]. *Geophysical Research Letters*, 32(L20718). DOI: 10.1029/2005GL024145.