

昆仑山北坡黄土粒度特征与环境意义初探

柳加波, 温仰磊, 赵爽, 李冠华, 贾佳, 魏海涛, 夏敦胜

(兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 干旱环境与气候变化协同创新中心, 兰州 730000)

摘要: 昆仑山北坡沉积了极端干旱区巨厚的黄土, 不仅记录了塔克拉玛干沙漠的发生发展过程, 也蕴含了西风环流的演化信息。该地区气候干旱, 成壤作用弱, 靠近物源, 黄土记录了沉积时的粒度特征, 是研究风动力变化的良好载体。本文选取昆仑山北坡的普鲁剖面进行详细的粒度分析, 结果表明黄土颗粒较粗, 是沙漠的近源沉积, 搬运动力较强。通过粒度-标准偏差变化计算, 黄土粒度可以分为粉砂 ($<36\ \mu\text{m}$) 和细砂 ($>36\ \mu\text{m}$) 两个敏感粒度组分。依据塔里木盆地内的现代环流特征, 粉砂组分主要与近地面较弱的环流风场有关, 而细砂组分主要由盆地边缘频发的沙尘暴搬运, 并且沙尘暴对沙尘的搬运作用可能更为显著。

关键词: 昆仑山黄土; 粒度; 敏感组分

中图分类号: P532 文献标志码: A 文章编号: 1674-9901(2014)02-0076-09

Grain-size characteristics of Kunlun Mountains loess and its environmental implication

LIU Jia-bo, WEN Yang-lei, ZHAO Shuang, LI Guan-hua, JIA Jia, WEI Hai-tao, XIA Dun-sheng

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education of People's Republic of China, Collaborative Innovation Centre for Arid Environments and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 73000, China)

Abstract: The Kunlun Mountains loess, depositing on the southern of Tarim basin where formed the extensive Taklimakan desert, have recorded evolutions of desert and wind power. Although the loess here has great potential in paleoclimate research, much less studies have been done by contrast with China Loess Plateau. In this paper, we discuss bulk grain-size at length on a 29 m profile locate in the northern slope of Kunlun Mountains. The results illustrate that Kunlun Mountains loess is much coarser than other areas and its medium diameter (M_d) changes about from $32\ \mu\text{m}$ to $50\ \mu\text{m}$, which is mainly due to closing to the Taklimakan desert and weak pedogenesis. Previous researches have indicated that the Taklimakan desert tend to be steady since the Late Quaternary, and this could be inferred from the slight fluctuation of grain-size in this profile. Consequently, we attribute fluctuation of grain-size in this profile to wind power changes. Based on calculating standard deviation of each grain-size class, we identify two sensitive sedimentary components, silty sand group whose grain-size is less than $36\ \mu\text{m}$, and fine sand group whose grain-size is over $36\ \mu\text{m}$. As different strength of wind power has different transporting capacity, the silty sand ($<36\ \mu\text{m}$) group is more likely carried by weak prevailing wind, and fine sand ($>36\ \mu\text{m}$) group is carried by frequent sand storm. Moreover, the sand storm may play a more important role in dust transporting than we used to realised in Southern Taklimakan desert, but which still need to be further studied.

Key words: Kunlun Mountains loess; grain-size; sensitive fraction

收稿日期: 2013-12-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2010CB950202); 国家自然科学基金项目 (41130102, 41071125)

通讯作者: 夏敦胜, E-mail: dsxia@lzu.edu.cn

沉积物的粒度受到搬运介质、搬运方式、沉积环境和气候等多种因素的控制,对揭示古气候和环境变化具有重要指示作用(Xiao et al, 1995; Ding et al, 2002; Poter et al, 1995)。不同时代黄土粒度的变化可指示搬运黄土风力强度的变化,从而具有古气候学上的意义(刘东生, 2009)。黄土、古土壤的粒度变化作为一种气候指标,在20世纪60年代即受到很多研究者的重视(刘东生, 1966)。不同的黄土粒度组分有着不同的古气候意义,随着研究区域的不同而发生变化(鹿化煜和安芷生, 1998)。将粒度变化应用于古气候研究前,需要明确其古气候意义(刘东生, 2009)。在黄土高原地区,黄土粒度具有全球和区域的气候意义,中值粒径(Md)、平均粒径(Mz)、 $>30\ \mu\text{m}$ 颗粒含量、 $>40\ \mu\text{m}$ 颗粒含量以及石英颗粒含量都被用作东亚冬季风的代用指标(鹿化煜, 1997, 1998, 2000; Sun et al, 2002; 孙东怀等, 2000; 汪海斌等, 2002; Xiao et al, 1995),细粒组分则被认为是西风强度的指示(孙东怀, 2000, 2003)。

分离敏感粒度组分主要有两种方法:Sun et al (2002)以Weibull函数对沉积物单个样品的粒度频率曲线进行拟合,分离不同成因的沉积物粒度组分和百分含量。孙有斌等(2003),肖尚斌和李安春(2005)通过计算全样品粒级-标准偏差变化的方法,得到了中国边缘海沉积物中的敏感粒度组分。徐建树等(2006)通过粒级-标准偏差变化的方法,在黄土高原西部的黄土中分离出了可信的敏感粒度组分,指出整个沉积序列所包含的敏感粒度组分并不都在单个样品中表现出明显的峰值,从单个样品的粒度分布曲线上很难确定沉积物总体所包含的敏感粒度组分的个数,所以要求从沉积物总体中提取对环境变化敏感的组分。

昆仑山北坡沉积了巨厚的黄土,记录了丰富的气候信息(方小敏等, 2001; Zan et al, 2010; 李保生等, 2008)。与其他地区的黄土相比,昆仑山黄土的沉积环境独特,是塔克拉玛干沙漠的近源沉积物,受到沙漠的深刻影响;而且位于极端干旱区,降水量小,沉积后成壤作用微弱,昆仑山黄土的粒度记录了沉积时期搬运动力的变化。本文通过计算全样品的粒级-标准偏差方法分离出敏感粒度组分,结合现在的风动力条件,探讨不同敏感粒度组分的环境意义。

1 研究区域概况

昆仑山北坡是我国重要的黄土分布区之一,在塔里木盆地内大气环流的作用下,海拔4000 m

以下的山坡和谷地中,风成黄土广泛发育(高存海和张青松, 1991a, 1991b)。塔里木盆地的大气环流主要有两支,东部主要受到“倒灌东风”控制,西部主要受弱西风控制(凌裕泉, 1988)。整个塔克拉玛干沙漠以偏东北和偏西北风为主,偏东北风作用范围包括沙漠东部、中部以及北部偏东区域;偏西北风作用区域包括沙漠西部、西南部以及南部偏西区域(俎瑞平等, 2005)。在沙漠南缘的于田一带,西北风和东北风相互交汇,同时受到近地表气流辅合线以及昆仑山北坡的影响,形成偏北风,同时还形成南风以及西南风,出现金字塔状沙丘(凌裕泉, 1988)。

除了常年存在的盛行风,塔里木盆地还是中国大陆沙尘暴活动最为频繁的地方(Guodie et al, 1983)。塔克拉玛干沙漠南缘的沙尘暴,不论是发生频率,还是持续时间,都要高于其他地区,据王旭等(2003)对1961—1999年共39 a南疆42个气象观测站的沙尘暴天气资料统计,塔克拉玛干沙漠南缘以及昆仑山北麓出现的沙尘暴明显多于其他周边地区,年平均日数在13~35 d,而且持续时间较长,1.5~2.5 h的沙尘暴占总数的15%~17%。在塔里木盆地内大气环流以及沙尘暴共同作用下,沿沙漠南缘的克里雅河谷地由北向南,沉积物明显分异为四个地带,海拔1400 m以下为沙漠;1400~2000 m为戈壁;2000~2500 m为亚砂土丘陵;2500~4500 m为黄土分布区;4500 m以上为裸露基岩(杨小平, 2000)。

本文研究剖面位于克里雅河上游普鲁村附近一个新形成的冲沟中,海拔3054 m,处于黄土和亚砂土带交替的地带。该地区在大陆高压以及地形的共同作用下,多年平均降水量不足200 mm(黄玉英等, 2008),气候特征主要表现为干旱,风力作用强盛。现代植被是以耐旱的银穗草、针茅为主的山地草原。普鲁剖面厚29 m,质地为砂黄土,颜色以黄褐色为主,剖面整体成壤较弱,仅顶部颜色较暗;剖面钙积作用也相对较弱,仅部分层位有钙菌丝的零星分布。

2 实验方法

以10 cm为间隔选取了291个样品进行粒度及相关实验测量。粒度实验方法为:称取0.5~0.6 g黄土样品放入烧杯中,注入10 mL浓度为 $10\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的双氧水(H_2O_2),放置于电热板上加热,以分解有机质,消煮约40分钟左右,直至变清且没有

细小泡沫。再注入 10 mL 浓度为 $2.87 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的稀盐酸 (HCl), 以分解碳酸盐, 烧至沸腾, 待样品完全沉淀, 然后停止加热, 将烧杯取出冷却。向烧制好的样品溶液中注满蒸馏水, 静置 12 个小时之后, 用橡皮管将上层的清水抽出, 剩余约 20 mL

液体。再加入 10 mL 浓度为 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的分散剂 (NaPO_3), 并放入超声波振荡仪中震荡 5 分钟, 随后进行测量。粒度测量使用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行, 测量范围为 $0.02 \sim 2000 \mu\text{m}$ 。

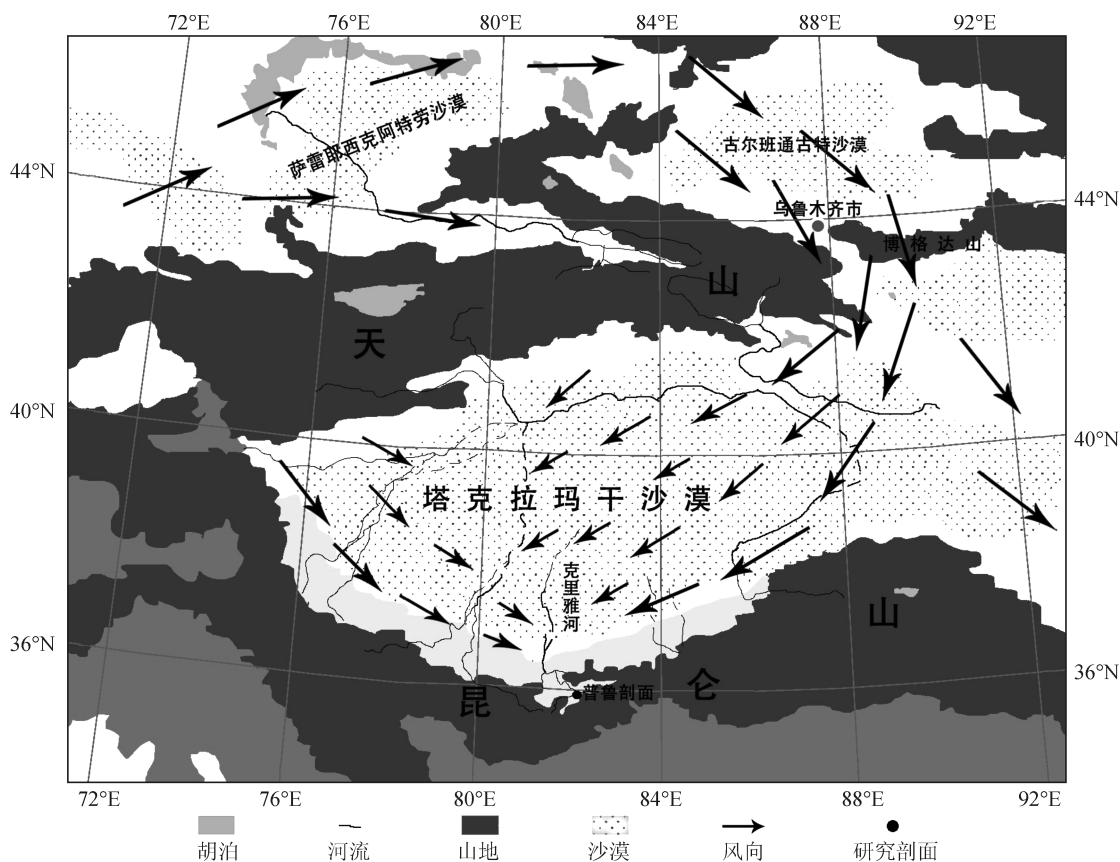


图1 研究区域和剖面位置示意图

Fig.1 Study area and its atmospheric circulation pattern

磁化率的测量方法为: 将样品在室内自然风干, 研磨后称重约 5.5 g, 用保鲜膜包紧, 装进塑料盒中, 并用胶带封紧。使用 Bartington MS2 型磁化率仪进行低频 (0.47 kHz) 和高频 (4.7 kHz) 磁化率的测量, 高低频磁化率 (χ_{hf} , χ_{lf}) 均重复测量两遍, 然后计算百分比频率磁化率 ($\chi_{\text{fd}}\%$)。碳酸盐的测量使用简易气量法: 称取约 1 g 样品并记重, 与 15 mL 浓度为 $2.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的稀盐酸 (HCl) 在锥形瓶中完全反应, 根据实验所产生的 CO_2 体积数, 计算 CaCO_3 的质量, 得到 CaCO_3 含量的百分比。磁性矿物颗粒微形态使用 SEM 扫描电镜进行观察拍照。

粒度、磁化率和碳酸盐实验在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。扫描电镜 (SEM) 实验在兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室完成。

3 结果与分析

3.1 普鲁黄土粒度特征

粒度结果表明, 普鲁剖面黄土粒度明显较粗, 粉砂 ($5 \sim 63 \mu\text{m}$) 含量一般超过 50%, 变化范围 53%~72%; 砂含量 ($>63 \mu\text{m}$) 平均含量达 29%, 高于黄土高原 (鹿化煜, 1997, 1998) 以及天山地区黄土 (叶玮, 2000; 宋友桂等, 2010a; 李传想等, 2011); 黏粒 ($<5 \mu\text{m}$) 含量最低, 仅为 5%~11.5%。全样的粒度组成差异较小, 在粒度组成图中集中分布于中下方。不同层位样品的粒度频率分布曲线 (图 2) 均呈现出单峰、正偏态的特征, 不同粒级的组分变化也很小。普鲁剖面中黄土的粒度组成图和频率分布曲线都显示出, 整个剖面的粒径较粗, 不同样品之间的差异较小, 这与研究区稳定的沉积环境, 较强的搬运动力以及临近塔克拉玛干沙漠都有一定的关系。

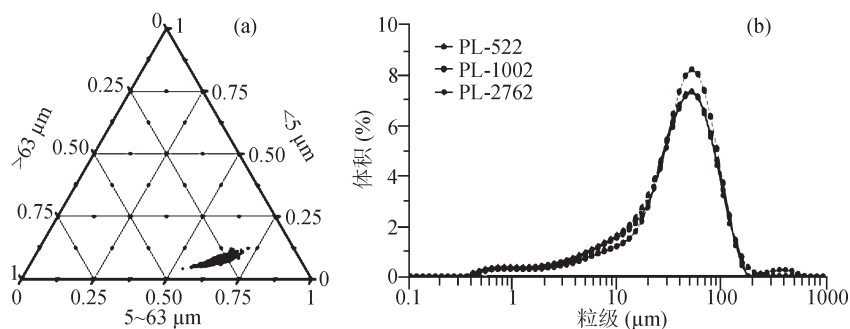


图2 黄土粒度组成 (a) 与典型样品的粒度频率曲线 (b)
Fig.2 Textural features of loess(a) and grain-size distribution curves of typical specimens(b)

全样的众数粒径为 $45\sim 61\ \mu\text{m}$, 也显示出较粗的特征, 且只有单一众数, 说明黄土沉积受到某一种搬运动力的作用强烈, 同时受到临近沙漠的影响。粒度分选系数值 $1.61\sim 2.07$, 分选程度较好, 在没有经历长距离的搬运的情况下, 可能主要受到源区物质的影响。全部样品的粒度结果都包含 $>150\ \mu\text{m}$ 的组分, 部分样品甚至含有大于 $200\ \mu\text{m}$ 的组分, 这些较粗的颗粒一般难以被风力抬升并搬运, 因此可能由研究区附近频发的沙尘暴携带至剖面中。

中值粒径 (Md) 是粒度累积曲线上含量 50% 处的粒径大小, 反映了全样粒度组成的总体粗细状况, 黄土高原黄土的 Md 一般分布在 $18\sim 50\ \mu\text{m}$, 常用作指示冬季风的强度 (Xiao et al, 1995)。普鲁剖面的 Md 范围在 $32\sim 50\ \mu\text{m}$ (图 3), 相对较粗, 分布更窄而且偏向粗粒端。 $>63\ \mu\text{m}$ 的粗颗粒主要以跃移的方式在近地面移动, 难以被风力吹至高空

进行长距离输送, 其含量变化主要受风力强度变化控制, 以及源区距离的影响 (丁仲礼等, 1996)。普鲁剖面中 $>63\ \mu\text{m}$ 的组分含量平均在 30% 左右 (图 3), 与 Md 的含量一致反映出研究剖面中颗粒较粗, 除了受到近源的塔克拉玛干沙漠影响, 与塔里木盆地南缘频发的沙尘暴也有关系。 $<5\ \mu\text{m}$ 的组分含量与 $>63\ \mu\text{m}$ 的组分含量以及 Md 的粒径变化呈现明显的反相变化, 可能是昆仑山北坡与西风沉降有关的背景粉尘, 相对含量受粗粒组分控制, 也有可能是在粒度实验中, 较粗的团粒结构被振荡打散, 具体原因有待进一步研究。

CaCO_3 含量 $13\%\sim 16\%$ (图 3), 整体含量很高, 但是相对变化较小, 在剖面中也没有发现明显的钙质富集, 只有部分层位有零星的钙质斑点。研究区现代多年平均降水量不足 $200\ \text{mm}$, 淋溶作用弱, 指示黄土中的碳酸钙应以原生为主, 且在干旱环境下, 沉积后得到较好的保存。

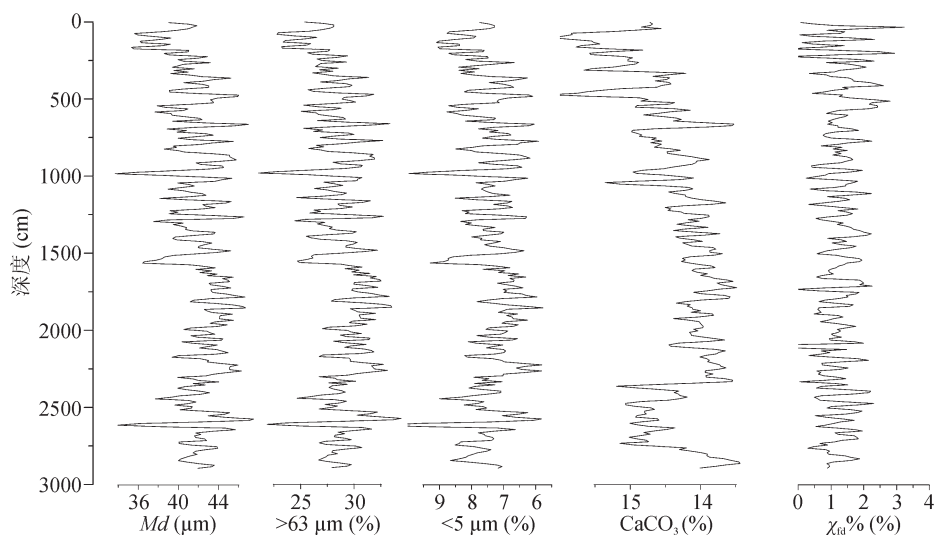


图3 普鲁剖面粒度、碳酸钙含量和百分比频率磁化率随深度的变化

Fig.3 Grain-size, carbonate content and percentage frequency-dependent magnetic susceptibility ($\chi_{fd}\%$) of Pulu profile

百分比频率磁化率 ($\chi_{fd}\%$) 反映的是位于超顺磁 / 稳定单畴 (SP/SSD) 临界点附近的磁性颗粒变化, 只有 SP/SSD 颗粒的粒径分布变化不大时, 才能够代表 SP 颗粒含量的变化。黄土高原地区的研究表明, $\chi_{fd}\%$ 能够用来衡量成壤作用形成 SP 颗粒的贡献 (刘青松等, 2007)。在普鲁剖面中, $\chi_{fd}\%$ 的值明显偏低, 平均只有 1% 左右 (图 3), 没有明显的变化趋势, 和天山地区 (贾佳等, 2012; 宋友桂等, 2010b) 以及黄土高原地区 (Liu et al, 1990) 都显著不同,

说明成壤程度极低。咎金波等 (2010) 对昆仑山黄土的磁学研究结果也表明, 在昆仑山北坡极端干旱的沉积环境下, 黄土的成壤作用微弱。

在对底部 23 m 的样品中强磁性矿物的 SEM 电镜扫描结果 (图 4) 可以发现, 存在大量粗颗粒的原生磁性矿物, 多为棱角状, 也有典型的四方八面体状 (典型原生磁铁矿晶形), 少有圆形颗粒, 指示在这种极端干旱的气候环境下, 黄土沉积后的改造作用弱, 黄土粒度的特征在沉积后能够得到很好的保存。

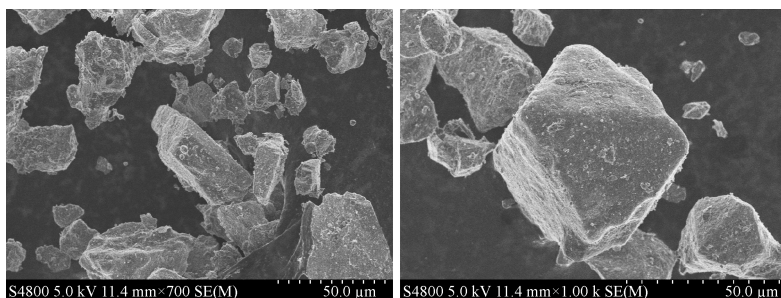


图 4 23 m 位置样品的扫描电镜 (SEM) 结果

Fig.4 Scanning electron microscopy (SEM) images of the specimen of 23 m in depth

粒度实验的结果表明, 昆仑山黄土颗粒较粗, 受到近源沙漠和较强的搬运动力共同作用。单个样品的粒度频率分布曲线呈现高起的单峰特征, 可能受到某一沉积动力的强烈影响。整个剖面的粒度参数波动平缓, 指示了持续稳定的沉积环境, 与塔里木盆地长期干旱的气候特征相一致。CaCO₃ 和 $\chi_{fd}\%$ 的变化特征, 表明黄土是在持续干旱的环境下沉积的, 在沉积后没有明显的成壤作用, SEM 电镜扫描结果进一步说明黄土中磁性矿物以原生为主, 指示昆仑山黄土能够记录沉积时的粒度特征, 可以用来指示搬运动力的变化。

3.2 粒度组分分离

前人对黄土高原西部等地的风成堆积物粒度的系统研究表明, 通过计算粒级-标准偏差可以获得风成堆积物的环境敏感组分, 不同区域的环境敏感粒度组分的范围明显不同, 环境敏感粒度组分同样受到源区、沉积后作用等因素的影响 (徐建树等, 2006)。粒级-标准偏差曲线的峰值越高代表标准偏差越大, 样品在该粒级含量的波动也就更大, 其对应的粒级就是对环境变化越敏感的粒级。从图 5 中可以看出, 普鲁剖面的粒级-标准偏差曲线中有 144 μm 、75 μm 和 19 μm 三个敏感粒级, 大致对应着细砂、极细砂和粉砂这三

个组分, 分界点约在 131 μm 和 36 μm , 细粒端和粗粒端都没有明显的峰值。而细砂组分和极细砂组分之间的界限也并不明显, 因此, 将这两个组分合并在一起, 作为细砂组分 ($>36 \mu\text{m}$); 而将 $<36 \mu\text{m}$ 作为粉砂组分。

在粒度频率分布曲线 (图 2) 中, $>36 \mu\text{m}$ 和 $<36 \mu\text{m}$ 两个组分的分异并不明显。 $>36 \mu\text{m}$ 含量很高, 有明显的主峰; 而 $<36 \mu\text{m}$ 含量较低, 且没有明显的峰值。说明 $>36 \mu\text{m}$ 的组分与主要的搬运动力有关, 且强度较大, 甚至掩盖了 $<36 \mu\text{m}$ 组分在频率分布曲线中的特征。

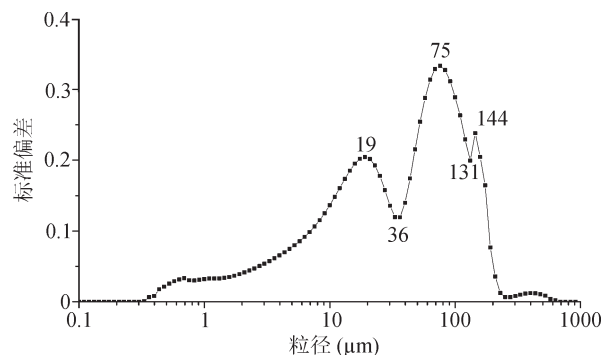


图 5 粒级-标准偏差曲线

Fig.5 Standard deviation curve of grain-size classes in Pulu profile

4 讨论与结论

粒度的变化主要受物源,沉积环境和搬运动力的影响。昆仑山北坡黄土是塔克拉玛干沙漠的同源异相沉积(方小敏等,2001),沙漠的进退控制着近源黄土沉积中颗粒的变化,尤其是砂含量变化(丁仲礼,1999),解释黄土粒度波动的意义需要考虑沙漠范围变化的影响。塔克拉玛干沙漠位于塔里木盆地之中,周围被高山和高原环绕,限制了沙漠的扩张,即使在末次盛冰期,塔克拉玛干沙漠的范围也仅向南扩张了60~100 km(Lu et al, 2003)。表明晚第四纪以来,塔克拉玛干沙漠的范围没有发生大规模的变化,为昆仑山北坡的黄土沉积提供了相对稳定的物源,在普鲁剖面中表现为 $>63\ \mu\text{m}$ 组分的含量波动较小。此外,沙漠南缘的荒漠带(Zu et al, 2008)以及山前的冲、洪积扇(孙继敏,2004)也为昆仑山北坡的黄土沉积提供了大量的沙尘物质。不同的物质来源会影响黄土中粒度的构成,但是在研究区域,不论是近地面的环流风场,还是春夏频发的沙尘暴,都会将不同源区沙尘进行充分混合(咎金波等,2011),因而在本区域的研究中,可以将其视为同一物源。

在黄土沉积之后,适宜的水热条件以及地表植被的作用,都会对黄土进一步改造。黄土的成壤作用已经得到了广泛的认同,并且成壤作用会改变黄土的粒度特征,使细粒组分显著增加(孙有斌等,2002;孙东怀,2006)。在黄土高原地区,黄土的成壤作用由东南向西北减弱,与等降水量的递减趋势一致(夏敦胜等,2007;王飞等,2012),说明有效的降水对成壤有着显著作用。受地理位置和地形影响,研究区域气候极端干旱,据克里雅河上游努买提兰干站47年的实测水文气象资料,多年平均降水量为126 mm,只有个别年份超过200 mm(黄玉英等,2008)。由于缺乏有效的降水,在普鲁剖面中并不能够观测到明显的古土壤层,百分比频率磁化率($\chi_{fd}\%$)的低值、 CaCO_3 含量的变化以及电镜扫描的结果都表明,黄土在沉积后没有明显的成壤作用。

昆仑山北坡黄土的物质主要来源于塔克拉玛干沙漠,山前的冲、洪积扇以及荒漠带。在沉积后成壤作用微弱,黄土粒度主要反映搬运动力的强

度变化。从地理位置上看,普鲁剖面距离塔克拉玛干沙漠南缘100多公里,但是海拔相差近2000多米,因此沙尘的传输需要较强的搬动力。以往的研究认为,塔里木盆地内的东北向“倒灌东风”和西北向弱西风在于田一带辅合为强大的辅合上升气流(张家宝等,1987),携带大量的粉尘物质堆积于昆仑山北坡(方小敏等,2001)。但是,新的研究结果表明克里雅河流域是塔里木盆地内近地面风场最弱的区域(Zu et al, 2008),可能以携带粉砂组分($<36\ \mu\text{m}$)为主,不能将较粗的细砂组分也吹扬起来。在塔里木盆地南缘,除了存在近地面环流风场外,另一种风动力更不容忽视,作为我国沙尘暴最为频发的地区,盆地南缘和昆仑山北坡沙尘暴的年平均日数可达13~35 d,持续时间较周边地区都更长(王旭等,2003),因而能够将更粗的细砂组分($>36\ \mu\text{m}$)搬运至海拔高出盆地2000多米的昆仑山北坡,并且搬运能力更强。

综上所述,昆仑山北坡黄土颗粒较粗,是沙漠的近源沉积,在长期极端干旱的沉积环境下,成壤作用弱,黄土的粒度特征得到较好保存,记录了风动力的变化。和田至于田一带主要受到较弱地面盛行风场影响,以及春夏季节频发的强沙尘暴作用。对普鲁剖面黄土的粒级-标准偏差分析表明,黄土粒度主要由粉砂组分($<36\ \mu\text{m}$)和细砂组分($>36\ \mu\text{m}$)组成。依据不同粒度组分的搬动力不同,粉砂组分($<36\ \mu\text{m}$)可能与较弱的地面盛行风场有关,而细砂组分($>36\ \mu\text{m}$)则主要由盆地南缘频发的沙尘暴搬运。并且在昆仑山北坡,沙尘暴对黄土物质的搬运比环流风场的作用更为重要。

参考文献

- 丁仲礼,任剑璋,刘东生,等. 1996. 晚更新世季风沙漠系统千年尺度的不规则变化及其机制问题[J]. *中国科学(D辑)*, 26(5): 385-391. [Ding Z L, Ren J Z, Liu T S, et al. 1996. Climatic changes on millennial time scales: evidence from a high-resolution loess record[J]. *Science in China (Series D)*, 26(5): 385-391.]
- 方小敏,吕连清,杨胜利,等. 2001. 昆仑山黄土与中国西部沙漠发育和高原隆升[J]. *中国科学(D辑)*, 31(3): 177-184. [Fang X M, LV Q L, Yang S L, et al. 2001.

- Loess in Mt.Kunlun, desert development in the western regions of china, and the uplift of the Qinghai -Xizang Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 31(3): 177-184.]
- 高存海, 张青松. 1991a. 中昆仑山北坡黄土特征及其环境 [J]. *地理研究*, 4: 40-50. [Gao C H, Zhang Q S. 1991a. Preliminary study on loess and its sedimentary conditions on northern slope of MidKunlun Mts [J]. *Geographical Research*, 4: 40-50.]
- 高存海, 张青松. 1991b. 试论昆仑山北坡的黄土沉积环境 [J]. *干旱区地理*, 3(9): 9-16. [Gao C H, Zhang Q S. 1991b. An approach to sedimentary environment of loess an northern slope of Kunlun Mts [J]. *Arid Land Geography*, 3(9): 9-16.]
- 黄玉英, 刘景时, 商思臣, 等. 2008. 昆仑山克里雅河冬季径流及冻土与气候变化 [J]. *干旱区研究*, 25(2): 174-178. [Huang Y Y, Liu J S, Shang S C, et al. 2008. Study on monthly runoff volume in winter, frozen earth and climate change in the Keriya River Basin in theKunlun Mts [J]. *Arid Land Geography*, 25(2): 174-178.]
- 贾佳, 夏敦胜, 王博, 等. 2012. 黄土高原与伊犁黄土磁学特征对比及启示 [J]. *第四纪研究*, 32(4): 749-760. [Jia J, Xia D S, Wang B, et al. 2012. The comparison between Loess Plateau and Ili loess magnetic properties and their implication [J]. *Quaternary Sciences*, 32(4): 749-760.]
- 刘东生. 2009. 黄土与干旱环境 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 289-299. [Liu T S. 2009. Loess and arid environment [M]. Heifei: Anhui Science & Technology Publishing House, 289-299.]
- 刘秀铭, 刘东生, Heller F, 等. 1990. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换 [J]. *第四纪研究*, 10(1): 42-50. [Liu X M, Liu T S, Heller F, et al. 1990. Frequency-dependent susceptibility of loess and Quaternary paleoclimate [J]. *Quaternary Sciences*, 10(1): 42-50.]
- 鹿化煜, 安芷生. 1998. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义 [J]. *中国科学(D辑)*, 28(3): 278-283. [Lu H Y, An Z S. 1998. Paleoclimatic significance of grain-size of loess-paleosol deposit in Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 28(3): 278-283.]
- 鹿化煜, 安芷生. 1997. 洛川黄土粒度组成的古气候意义 [J]. *科学通报*, 2(1): 66-69. [Lu H Y, An Z S. 1997. Paleoclimatic significance of grain-size of loess-paleosol deposit in Luochuan [J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(1): 66-69.]
- 鹿化煜, Kovan Huissteden, 周杰, 等. 2000. 中国北方更新世极端冷期冬季风的快速变化 [J]. *中国沙漠*, 20(2): 192-196. [Lu H Y, Kovan Huissteden, Zhou J, et al. 2000. East Asian winter monsoon changes on milennial time-scale in Quaternary climatic extremes in north China [J]. *Journal of Desert Research*, 20(2): 192-196.]
- 刘青松, 邓成龙, 潘永信. 2007. 磁铁矿和磁赤铁矿磁化率的温度和频率特性及其环境磁学意义 [J]. *第四纪研究*, 27(6): 955-962. [Liu Q S, Deng C L, Pan Y X. 2007. Temperature-dependency and frequency-dependency magnetic susceptibility of magnetite and maghemite and their significance for environmental magnetism [J]. *Quaternary Sciences*, 27(6): 955-962.]
- 李保生, 温小浩, Zhang D D. 2008. 昆仑山北麓阿羌黄土剖面 AQS3 层段记录的末次间冰阶千年尺度的气候波动 [J]. *第四纪研究*, 28(1): 140-149. [Li B S, Wen X H, Zhang D D. 2008. Millennial-scale climate fluctuations during the last interstadial recorded in the AQS3 segment of the Aqiang loess section in the north piedmont of the Kunlun Mountains[J]. *Quaternary Sciences*, 28(1): 140-149.]
- 李传想, 宋友桂. 2011. 粒度年龄模型在伊犁昭苏黄土地层中的初步应用 [J]. *地球环境学报*, 2(5):613-618. [Li C X, SONG Y G, 2011. Application of grain-size age models on Zhaosu loess stratigraphy in Ili region[J]. *Journal of Earth Environment*, 2(5):613-618]
- 凌裕泉. 1988. 塔克拉玛干沙漠的流场特征与风沙活动强度的关系 [J]. *中国沙漠*, 8(2): 25-37. [Ling Y Q. 1988. The flow field characteristics and its relation to the intensity o drifting sand activity in Taklimakan Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 8(2): 25-37.]
- 孙东怀. 2006. 黄土粒度分布中的超细粒组分及其成因 [J]. *第四纪研究*, 26(6): 928-936. [Sun D. 2006. Supper-fine grain-size components in Chinese loess and their palaeoclimatic implication[J]. *Quaternary Sciences*, 26(6): 928-936.]
- 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 2003. 最近 2.6Ma 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)*, 33(6): 497–504. [Sun D, An Z S, Sun 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, Lu H Y, David Rea, et al. 2000. Bimode grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 327–335.]
- 孙有斌, 高 抒, 李 军. 2003. 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*, 48(1): 83–6. [Sun Y B, Gao S, Li J. 2003. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(1): 83–86]
- 宋友桂, 史正涛. 2010. 伊犁盆地黄土分布与组成特征 [J]. *地理科学*, 30(2): 267–272. [Song Y G, Shi Z T. 2010. Distribution and compositions of loess sediments in Yili Basin, Central Asia [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 30(2): 267–272.]
- 宋友桂, NIE Jun-sheng, 史正涛, 等. 2010. 天山黄土磁化率增强机制初步研究 [J]. *地球环境学报*, 1(1): 66–72. [Song Y G, Nie J S, Shi Z T, et al. 2010. A preliminary study of magnetic enhancement mechanisms of the Tianshan Loess [J]. *Journal of Earth Environment*, 1(1): 66–72.]
- 孙继敏. 2004. 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*, 24(2): 175–183. [Sun J M. 2004. Provenance, forming mechanism and transport of loess in China [J]. *Quaternary Sciences*, 24(2): 175–183.]
- 汪海斌, 陈发虎, 张家武. 2002. 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义 [J]. *中国沙漠*, 22(1): 21–26. [Wang H B, Chen F H, Zhang J W. 2002. Environmental significance of grain-size of loess-paleosol sequence in western part of Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Desert Research*, 22(1): 21–26.]
- 王 旭, 马 禹, 陈洪武, 等. 2003. 南疆沙尘暴气候特征分析 [J]. *中国沙漠*, 23(2): 147–151. [Wang X, Ma Y, Chen H, et al. 2003. Analysis on the climatic characteristics of sandstorms in South Xinjiang [J]. *Journal of Desert Research*, 23(2): 147–151.]
- 王 飞, 孙东怀, 郭 峰, 等. 2012. 黄土高原灵台剖面过去 7 Ma 古温度、古降水的半定量重建 [J]. *地球环境学报*, 3(2): 781–791. [Wang F, Sun D H, Guo F, et al. 2012. Quantitative reconstruction of paleo-temperature and paleo-precipitation of Lingtai profile in Loess Plateau during the past 7 Ma [J]. *Journal of Earth Environment*, 3(2): 781–791.]
- 肖尚斌, 李安春. 2005. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分 [J]. *沉积学报*, 23(1): 122–129. [Xiao S B, Li A C. 2005. A study on environmentally sensitive grain-size population in inner shelf of the East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1): 122–129]
- 徐树建, 潘保田, 高红山, 等. 2006. 末次间冰期–冰期旋回黄土环境敏感粒度组分的提取及意义 [J]. *土壤学报*, 143(12): 183–189. [Xu S J, Pan B T, Gao H S, et al. 2006. Analysis of grain-size populations with environmentally sensitive components of loess during the last Interglacial-glacial cycle and their implications [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 143(12): 183–189.]
- 夏敦胜, 陈发虎, 马剑英, 等. 2007. 黄土高原–阿拉善高原典型断面表土磁学特征研究 [J]. *第四纪研究*, 27(6): 1001–1008. [Xia D S, Chen F H, Ma J Y, et al. 2007. Environmental magnetic investigation of surface soils along a NW–SE transect from the Chinese Loess Plateau to the Alxa Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 27(6): 1001–1008.]
- 叶 玮. 2000. 新疆伊犁地区黄土与黄土状土粒度对比 [J]. *干旱区地理*, 23(4): 310–314. [Ye W. 2000. Comparison of textural features of loess and reworked loess in Yili Area, Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 23(4): 310–314.]
- 杨小平. 2000. 塔里木盆地边缘山地的黄土沉积 [J]. *干旱区地理*, 23(1): 13–18. [Yang X P. 2000. Loess deposits in the surrounding mountains of Tarim Basin, northwestern China [J]. *Arid Land Geography*, 23(1): 13–18.]
- 咎金波, 杨胜利, 方小敏, 等. 2010. 西昆仑山黄土的岩石磁学特征及其磁化率增强机制 [J]. *第四纪研究*, 30(1):

- 46–53. [Zan J B, Yang S L, Fang X M, et al. 2010. Rock-magnetic characteristics and the enhancing mechanism of magnetic susceptibility for West Kunlun Mountains loess [J]. *Quaternary Sciences*, 30(1): 46–53.]
- 咎金波, 方小敏, 聂军胜, 等. 2011. 塔里木盆地风积物表土磁学特征及其与物源物质, 气候条件的关系 [J]. *科学通报*, 56(2): 153–160. [Zan J B, Fang X M, Nie J S, et al. 2011. Magnetic properties of surface soils across the southern Tarim Basin and their relationship with climate and source materials [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(2): 153–160.]
- 俎瑞平, 张克存, 屈建军, 等. 2005. 塔克拉玛干沙漠风况特征研究 [J]. *干旱区地理*, 28(2): 167–170. [Zu R P, Zhang K C, Qu J J, et al. 2005. Study on wind regime characteristics in the Taklimakan desert [J]. *Arid Land Geography*, 28(2): 167–170.]
- 张家宝, 邓子凤. 1987. 新疆降水概论 [M]. 北京气象出版社, 149–255. [Zhang J B, Deng Z F. 1987. A Generality of Rainfall in Xinjiang [M]. Beijing: Meteorological Press, 149–255.]
- Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. 2002. Stacked 2.6-Ma grain-size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record [J]. *Paleoceanography*, 17(3), doi:10.1029/2001PA000725.
- Goudie A S. 1983. Dust storm in space and time [J]. *Process in Physical Geography*, 7(4):502–508.
- Porter S C, An ZS. 1995. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. *Nature*, 375: 305–308.
- Sun D, Bloemendal J, Rea D K, et al. 2002. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components [J]. *Sedimentary Geology*, 152(3): 263–277.
- Xiao J, Porter S C, An Z, et al. 1995. Grain-size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130,000yr [J]. *Quaternary Research*, 43(1): 22–29.
- Zan J B, Fang X M, Yang S L, et al. 2010. A rock magnetic study of loess from the West Kunlun Mountains [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B10), doi:10.1029/2009JB007184.