文章编号:1000-0550(2015)05-0941-10

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2015.05.010

# 塔里木盆地南缘黄土粒度特征及其环境意义<sup>①</sup>

滕晓华1 张志高2 韩文霞3 方亚会4 叶程程4

(1.兰州大学西部环境与气候变化研究院西部环境教育部重点实验室 兰州 730000;2.安阳师范学院资源环境与旅游学院 河南安阳 455002;3.中国科学院青海盐湖研究所 西宁 810008;4.中国科学院青藏高原研究所 大陆碰撞与高原隆升重点实验室 北京 100085)

摘 要 黄土是地质时期沙尘天气形成的粉尘堆积物,其粒度特征记录了粉尘搬运过程中的古大气环流格局和古环 境演化信息。本文对昆仑山北坡克里雅河支流的第5级阶地羊场黄土剖面进行了系统的粒度分析,结果表明,黄土粒 度组成主要以粗粉砂和砂砾为主,分选较好;羊场黄土为塔克拉玛干沙漠的近源风成堆积,粒度指标主要指示沙漠范 围和源区气候干旱程度;粒度结果的详细分析及其与全球其他记录的对比表明,塔里木盆地南缘气候在8.5~ 3.6 ka B.P.较为湿润稳定,3.6 ka B.P.以来气候急剧变干并出现大幅度波动的千年尺度突变事件,与其他地区古气候 记录有较好的一致性。塔里木盆地南缘8.5 ka B.P.以来的气候变化具有季风模式和千年尺度气候振荡的双重特点, 可能同时受低纬度亚洲季风和北半球高纬度地区气候的影响;太阳辐射减弱引起的亚洲夏季风衰退可能导致了3.6 ka B.P.以来盆地的干旱化,同时,受太阳辐射驱动的北半球高纬度地区的气候变化,可能通过增加西风环流的强度及 其波动幅度,进一步加剧了3.6 ka B.P.以来塔里木盆地南缘气候的干旱化和不稳定性。

关键词 粒度 干旱化 克里雅河 塔里木盆地

**第一作者简介** 滕晓华 女 1988 年出生 博士 第四纪地质学 E-mail: tengxh11@ lzu.edu.cn 中图分类号 P512.2 文献标识码 A

## 0 引言

沉积物的粒度主要受搬运介质、搬运方式、沉积 环境和气候等多种因素控制,对揭示古气候和环境变 化具有重要的指示作用。近年来, 粒度分析已被广泛 应用于风成、湖泊、河流、海洋及冰碛物等沉积环境的 对比和鉴别[1-5],尤其在黄土研究中,得到了成功的应 用,并取得了大量的成果<sup>[1,6-14]</sup>。鹿化煜等<sup>[7]</sup>通过对 黄土高原西北—东南方向一条断面上3个末次间冰 期以来的黄土沉积剖面的粒度研究,认为黄土中不同 粒级组分可能具有不同的古气候意义,并证实了较粗 颗粒的含量变化与东亚冬季风强度变化正相关。在 黄土高原地区,黄土粒度已成为广泛接受的反映冬季 风强弱的代用指标<sup>[6-8]</sup>; Ding 等<sup>[9-10]</sup> 对毛乌素沙漠南 侧末次冰期以来的几个黄土剖面进行了研究,发现黄 土沉积中粒度变化尤其是砂粒含量变化主要受沙漠 进退所控制,认为风成沉积中砂粒百分含量的变化可 以反演沙漠进退:此外,相关研究表明较细颗粒组分 含量与风化成壤作用密切相关,间接指示了夏季风强 度的变化[13-14]。塔里木盆地位于我国内陆极端干旱 区,全新世以来经历了巨大的环境变化,生态环境非 常脆弱,研究其气候变化具有极其重要的意义。前人已经在塔里木盆地做了大量工作<sup>[15-16]</sup>,然而全新世以来该地区的气候变化及其机制仍然不清晰。

塔里木盆地南缘和西缘的昆仑山北坡海拔 2 500 ~4 900 m 之间风成黄土沉积广泛发育<sup>[17]</sup>,是塔克拉 玛干沙漠的同期异相沉积<sup>[18-20]</sup>。克里雅河上游地区 是昆仑山北坡黄土沉积厚度最大的区域<sup>[21]</sup>,为探讨 该地区古气候变化提供了理想的材料,然而利用该地 区典型风尘沉积进行的环境研究较少,且缺少精确定 年和分辨率高的气候记录<sup>[22-23]</sup>。本文对位于克里雅 河支流五级阶地上的羊场剖面进行了系统的粒度测 量,在分析了黄土粒度的组成特点及其古气候意义的 基础上,重建并初步探讨了 8.5 ka B.P.以来塔里木盆 地的气候演化历史及其驱动机制。

## 1 区域概况

塔里木盆地是中国第一大内陆盆地(图1),位于 北纬36°~42°之间,西起帕米尔高原东麓,东到罗布 泊洼地,北至天山山脉南麓,南到昆仑山脉北麓。地 势由南向北缓斜并由西向东稍倾,边界受东西向和北 西向深大断裂控制。四周高山海拔4000~6000 m, 西部海拔1000 m 以上,盆地中部海拔800~1300 m, 东部罗布泊降到780 m<sup>[24]</sup>。从行星风系来看,塔里 木盆地高空环流主要为中纬度西风带所占据,由于距 海洋较远,盆地周围高大的山地隆起阻挡了来自印度 洋季风和太平洋季风的水汽,只有当西风气流较强 时,少量水汽才可以进入到塔里木盆地,盆地内年降 水量低于100 mm,绝大部分地区降水量都在50 mm 以下。冬季寒冷干燥的蒙古、西伯利亚反气旋作用使 得盆地东南部气候更加干燥,降水量也最为稀少<sup>[25]</sup>。 盆地中心形成我国最大的塔克拉玛干沙漠,面积 337 600 km<sup>2</sup>,也是亚洲最大的粉尘源区。

大气环流的作用为克里雅河上游地区粉尘堆积 提供了强大的搬运力,使该区成为昆仑山北坡黄土沉 积厚度最大的地区<sup>[21]</sup>。羊场剖面(36°13'8.8″ N,81° 31'14" E)(图 1,2)位于普鲁村克里雅河支流的第 5 级阶地上,海拔 2 440 m,黄土剖面厚 18.1 m,位于河 流砂石层之上,主要由砂黄土和发育较弱的浅褐色古 土壤组成(图 2)。光释光和经过日历年代校正后 的<sup>14</sup>C 测年结果表明其形成于 8.5 ka B.P.左右<sup>[26]</sup>。

### 2 采样与实验方法

沿羊场黄土剖面以 5 cm 为间隔进行取样,共获 得样品 360 余块。每个样品称取 0.1~0.2 g 放入烧杯 中,加入 10 mL 浓度为 30%的双氧水(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)去除有 机质,再加入 10 mL 浓度为 10%的稀盐酸并加热去 除碳酸盐。待样品冷却后,将烧杯注满蒸馏水,静置 24 小时后抽去上层清液,加入 0.05 N 六偏磷酸钠 (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>10mL作为分散剂,摇匀后置于超声波振



图 1 塔里木盆地周缘及剖面位置(红色五角星)图(改自 Han et al., 2014)

Fig.1 Location of the Tarim Basin and stratigraphic section (red star ) (modified from Han et al., 2014)



🎹 黄土 🎆 古土壤 💽 石膏 📴 粗砂层 💽 砾石层

图 2 羊场剖面图和岩性描述 Fig.2 Profile photos and petrographic description of the Yangchang cross-section 荡器中振荡 10 min,然后在美国麦奇克公司生产的 Microtrac S3500 激光粒度仪上进行全样测试。仪器 测量范围为 0.02~2 000 μm,多次重复测量误差不超 过 1%。测量结果用 GRADISTAT 程序中修正后的几 何图 解法(Geometric (modified) Folk and Ward (1957)graphical Measures)<sup>[27]</sup>计算平均粒径、中值粒 径、标准偏差、偏度和峰度等粒度参数<sup>[28]</sup>,几何图解 法粒度参数计算公式及其统计描述方法见表 1。以 上粒度实验测试及分析在中国科学院青藏高原研究 所完成。

3 结果

#### 3.1 各粒级组分含量及变化特征

黄土颗粒按粒径大小可以分为黏粒(<5 μm)、细 粉砂(5~16 μm)、中粉砂(16~32 μm)、粗粉砂(32~ 63 μm)以及砂粒(>63 μm)。图3为羊场黄土剖面 各粒级组分随深度的变化曲线。结果表明:羊场剖面 黄土中粗粉砂的含量变化范围在30%~50%之间;黏 粒含量极少,多数不到3%,在剖面上部的某些层位 的黏粒含量接近0;砂粒含量相对较多,大多数在 15%~60%之间;中粉砂与细粉砂含量之和位于10% ~35%之间,大致与砂粒的含量相当。可见,羊场黄 土主要以粗粉砂和砂粒为主,两者相加可以达到 50%~80%,这与黄土高原黄土的粒度组成有着显著 的不同<sup>[18]</sup>。从长期变化趋势来看,粗颗粒组分含量 有逐渐增大的趋势,且在7.5 m 附近有明显的转折。

#### 3.2 粒度参数特征

沉积物的粒度参数主要包括平均粒径 (Mz)、中 值粒径(Md)、标准偏差( $\sigma$ )、偏度(Sk) 和峰度(Kg) 等,与形成环境具有密切的关系。羊场剖面黄土粒度 参数随深度的变化曲线(图4)显示,平均粒径和中值 粒径分别变化于 30~90 μm 和 40~65 μm 之间(图 4d,e),明显高于黄土高原黄土,可能与其距塔克拉 玛干沙漠较近有关;偏度值较小,在-0.2~0.3之间, 属于近对称的范围,且随着粒径的变粗有逐渐接近正 态分布的趋势(图 4a 和图 5a):峰度值在 1.1~1.5 之 间,属于窄峰的范围,且峰度值与平均粒径在70 µm 以下存在很好的对应关系(图 4b、图 5b)。羊场黄土 的标准偏差介于 1.5~2.5 之间(图 4c), 按照表 1 中 的划分标准,大部分样品的分选程度属于较好或中等 的范围,明显好于黄土高原地区的黄土堆积<sup>[29]</sup>,且随 着粒径变粗,标准偏差越小,分选程度越好(图 5c)。 从长期变化趋势来看,所有粒度参数在7.5 m 附近均 有明显的转折,7.5 m 以上样品平均粒径较大,分选 性较好,且所有粒度参数波动幅度明显增大。

#### 3.3 粒度频率分布和累积曲线及 C-M 分布特征

不同沉积物类型的粒度频率分布曲线和累积曲 线具有不同特征,所以常用于沉积相的判别<sup>[30]</sup>。图 6a分别为羊场黄土、西昆仑山黄土、洛川黄土以及沙 尘暴沉积物的粒度频率分布曲线。结果显示羊场剖



Fig.3 Grain size fractions distribution of the loess at Yangchang cross-section with the depth

① Teng X H, Han W X, Yu L P, et al. Holocene climate variability inferred from aeolian sediments from southern margin of the Tarim Basin, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, In review.

Table 1 Geometric (mounicu) Fork and Ward (1957) graphical measures					
平均粒径			标准偏差		
$MG = \exp \frac{\ln P16 + \ln P50 + \ln P84}{3}$			$\sigma G = \exp\left(\frac{\ln P 16 - \ln P 84}{4} + \frac{\ln P 5 - \ln P 95}{6.6}\right)$		
偏度			峰度		
$SkG = \frac{\ln P16 + \ln P84 - 2(\ln P50)}{2(\ln P84 - \ln P16)} + \frac{\ln P5 + \ln P95 - 2(\ln P50)}{2(\ln P25 - \ln P5)}$			$Kg = \frac{\ln P5 - \ln P95}{2.44(\ln P25 - \ln P75)}$		
分选程度	标准偏差	偏态	偏度	峰态	峰度
极好	<1.27	极细偏	-1.0~-0.3	很宽	<0.67
好	1.27~1.41	细偏	-0.3~-0.1	宽	$0.67 \sim 0.90$
较好	1.41~1.62	对称	-0.1~0.1	中等	0.90~1.11
中等	$1.62 \sim 2.00$	粗偏	0.1~0.3	窄	1.11~1.50
较差	$2.00 \sim 4.00$	极粗偏	0.3~1.0	很窄	1.50~3.00
很差	4.00~16.00			极窄	>3.00
极差	>16.00				

表 1 修正后的 Folk 和 Ward(1957)几何图解法粒度参数计算公式及其统计描述方法<sup>[27]</sup> Table 1 Geometric (modified) Folk and Ward (1957) graphical measures<sup>[27]</sup>



图 4 羊场剖面黄土粒度参数随深度的变化





Fig.5 The relationship between the grain size parameters and average particle size of loess at Yangchang section



(西昆仑山黄土、洛川黄土及沙尘暴样品数据来自文献[31])

Fig.6 Curves of grain size distribution of loess at the Yangchang section and west Kunlun Mountains and duststorm samples<sup>[31]</sup>

面黄土粒度频率分布曲线与西昆仑山黄土和沙尘暴 样品的粒度频率分布曲线非常相似[31],都呈标准的 单峰分布,<2 μm 的颗粒含量极少,说明羊场黄土同 西昆仑山黄土和沙尘暴沉积物一样属于风成沉积。 7.5 m之上的样品粒度频率分布曲线主峰相对升高 且右偏,说明这些样品颗粒较粗且分选性较好。洛川 黄土与羊场黄土相比,其粒度频率分布曲线峰态较宽 且平坦,在细颗粒组分处呈明显的细尾分布,主峰也 显著降低,粒度分布相对分散,分选程度较差,表明羊 场黄土与洛川黄土沉积条件不同。累积曲线(图 6b) 也显示出羊场黄土与沙尘暴样品及西昆仑山样品具 有极高的相似性,均呈单段型,表明极细和极粗部分 含量很少,线形较陡且比较平滑,反映出原始粉尘经 过了良好的分选,这与洛川黄土的累积曲线形态有着 明显的不同。此外,羊场剖面黄土粒度 C-M 分布与 黄土高原朝那黄土<sup>[32]</sup>(图7)也存在明显差异,这种 差异可能是由研究区离物源比较近导致的。

4 讨论

#### 4.1 羊场剖面黄土的粒度分布特征及其古气候意义

羊场剖面黄土与西昆仑山钻孔黄土剖面<sup>[31]</sup>的粒 度分析结果非常一致,主要以粗颗粒物质为主,粗粉 砂和砂粒相加可以达到 50%~80%,细颗粒含量极 少,这与黄土高原黄土的粒度组成有着显著的不同。 标准偏差介于 1.5~2.5 之间,分选性较好,且随着平 均粒径的增加,粒度频率分布逐渐接近正态分布的趋 势,标准偏差变小,分选程度变好(图 4,5)。此外,羊 场剖面黄土粒度频率分布曲线和累积曲线与西昆仑 山黄土和沙尘暴样品非常相似(图 6),说明羊场黄土





可能与西昆仑山黄土和沙尘暴沉积物一样属于短距 离悬浮沉积,同时与洛川黄土粒度频率分布曲线和累 积曲线有显著差别,表明羊场黄土与洛川黄土沉积条 件不同,可能是由于羊场黄土为塔克拉玛干沙漠的近 源风成堆积的原因。以上特征与典型黄土剖面粒度 分布特征<sup>[16]</sup>差异明显,可能暗示粒度参数所指示的 古气候意义也不同。

黄土的粒度组成主要受风力大小[1,6,11]、源区的

干旱程度和范围<sup>[9-10]</sup>及沉积后的风化作用<sup>[13-14]</sup>所控制。由于研究区降水量少,植被稀疏,沉积后的风化 成壤作用极其微弱,且粒度结果也表明该区<5 μm 黏粒含量极少,可以排除成壤作用对粒度的影响;羊 场剖面位于塔克拉玛干沙漠的下风向,黄土粒度组成 主要以粗粉砂和砂粒为主,粗粉砂只能在低空作短距 离的悬浮<sup>[33]</sup>,而>63 μm 砂粒一般只能以跃移和滚动 的方式做短距离的搬运,代表了近源沉积,主要反映 沙漠范围的变化<sup>[9-10]</sup>。因此羊场剖面黄土粒度主要 受控于源区的干旱程度和范围,黄土粒度组成的变化 主要指示了塔里木盆地南缘干旱程度的变化。

4.2 塔里木盆地 8.5 ka 以来的气候变化及其区域 对比

羊场黄土平均粒径和>63 μm 的砂粒含量变化 曲线波动特征相似,呈现出长期变粗的趋势(图8), 尤其在3.6 ka B.P.(7.5 m)以来平均粒径迅速增大, 砂粒含量也迅速增加。据此,可以将羊场剖面划分为 2 个阶段:阶段 I(8.5~3.6 ka B.P.),粒度组成较稳 定,颗粒较细,平均粒径为45 μm 左右,>63 μm 的砂 粒含量约为30%,可能指示8.5~3.6 ka B.P.期间塔里 木盆地南缘气候相对湿润和稳定;阶段 II(3.6~ 0 ka B.P.),>63 μm 的砂粒含量急剧增多,粒径显著 变粗,且具有大幅度波动的特点,可能反映了气候的 急剧变干和不稳定。

上述粒度分析结果显示,塔里木盆地南缘气候在 8.5~3.6 ka B.P.期间相对湿润和稳定,而 3.6 ka B.P. 以来气候急剧变干且不稳定,这种气候变化趋势也得 到了邻近地区相关研究的支持。如汪海燕等[34]通过 研究新疆北天山东段巴里坤山北麓巴里坤湖及周边 地区的7个剖面,发现在8.0~4.0 ka B.P.期间东天 山地区气候温暖湿润,其后湖泊逐渐萎缩;刘冰等[35] 通过对青藏高原东北部共和盆地泥炭的研究,认为该 区中全新世(7.1~3.8 ka B.P.)为气候适宜期,晚全新 世(3.8~0.5 ka B.P.)气候变得冷干;柴达木盆地的相 关研究揭示,风成砂砾层于3.4~3.2 ka B.P.期间在盆 地南缘形成<sup>[36]</sup>;Yu 等<sup>[37]</sup>在柴达木盆地东部的研究 表明,8.3~3.6 ka B.P.期间气候湿润稳定,而在 3.6 ka B.P.以来气候变得干旱(图 8g),并认为北半球 36°N 太阳辐射减弱导致的亚洲夏季风衰退可能是该 区气候变干的原因;董哥洞石笋氧同位素记录<sup>[38]</sup>显 示,约3.5 ka B.P.之后夏季风迅速衰退,气候向干旱 化发展(图 8h)。

羊场粒度曲线(图 8d,e)与董哥洞石笋氧同位 素<sup>[38]</sup>和柴达木盆地东部有效湿度指数(EMI)<sup>[37]</sup>等 记录的对比表明,羊场粒度记录与上述记录变化趋势 一致,说明塔里木盆地南缘 8.5 ka B.P.以来的气候变 化具有季风模式的特点,中全新世以来北半球 36° N 太阳辐射的减弱<sup>[39]</sup>可能驱动了3.6ka B.P.以来盆地



图 8 羊场黄土粒度变化曲线(d、e)与 NGRIP 氧同位素<sup>[43]</sup>(a),北大西洋赤铁矿颗粒含量变化曲线<sup>[44]</sup>(b),北大西洋 浮冰碎屑记录<sup>[44]</sup>(c),新疆 TKP 磁化率<sup>[42]</sup>(f),柴达木盆地东部 EMI<sup>[37]</sup>(g)及董哥洞石笋氧同位素<sup>[38]</sup>(h)的对比 Fig.8 Comparison diagram of grain-size in Yangchang section with δ<sup>18</sup>O record from NGRIP<sup>[43]</sup>(a), concentration of hematite grains and ice-rafting events in North Atlantic<sup>[44]</sup>(b and c), magnetic susceptibility in TKP section<sup>[42]</sup>(f), Effective moisture index (EMI) of the eastern Qaidam Basin(QB)<sup>[37]</sup>(g) and Dongge Cave<sup>[38]</sup>(h)

南缘的干旱化。关于亚洲夏季风能否深入到亚洲内 陆的问题,20世纪80年代在南疆若羌地区曾发生过 夏季风带来的大雨事件,说明夏季风强盛时能够深入 到亚洲腹地<sup>[40]</sup>;相关研究表明,在全新世亚洲季风的 最盛期,整个新疆和内蒙古地区都在夏季风影响范围 之内[41]。此外,在整体变干的趋势上,塔里木盆地区 域气候变化还被一系列的千年尺度的干旱事件所打 断(图 8),这些短尺度干旱事件在3.6 ka B.P.以来变 得尤为显著。凌智永等[42]通过对新疆伊犁河谷塔克 尔莫乎尔沙漠腹地 TKP 剖面的研究,认为中亚内陆 地区的气候变化受西风环流的影响并与北大西洋区 域的气候变化呈现一定的遥相关。3.6 ka B.P.以来 羊场粒度曲线与 TKP 磁化率曲线波动趋势非常一致 (图 8f). 且这些千年尺度的突变事件在红原泥 炭<sup>[35]</sup>、董哥洞石笋氧同位素<sup>[38]</sup>和 NGRIP 氧同位素 曲线中也有记录<sup>[43]</sup>(图8a,h),同时也与北大西洋浮 冰碎屑记录和赤铁矿颗粒含量记录也有很好的对 应<sup>[44]</sup>,说明这些千年尺度的气候突变事件可能通过 西风与北半球高纬度地区气候遥相关。

综上所述,塔里木盆地南缘气候自 3.6 ka B.P.以 来逐渐变干,并出现大幅度波动的千年尺度干旱事 件,具有季风模式和千年尺度气候振荡的双重特点, 可能同时受低纬度亚洲季风和北半球高纬度地区气 候的影响。新疆巴里坤湖全新世气候的研究表明新 疆地区的气候演变并非简单地遵循某种单一气候变 化模式,不同气候系统(如西风、季风)在该地区的强 弱对比状况,可能对气候环境变化模式有重要影 响<sup>[45]</sup>。唐自华等<sup>[20]</sup>通过对昆仑山北坡 KMA 剖面砂 含量和总有机质序列的功率谱分析,检测到多种与太 阳辐射或太阳活动相关的显著变化周期,认为塔里木 盆地环境变化的主要驱动因素与太阳辐射强迫有关: 此外,对北大西洋地区深海沉积物、Greenland 冰芯中 的<sup>10</sup>Be 和大气<sup>14</sup>C 产率的交叉谱分析也支持太阳辐射 强度是全新世气候变化的最可能原因[46]。因此,我 们认为太阳辐射减弱导致的亚洲夏季风衰退可能导 致了 3.6 ka B.P.以来盆地南缘的干旱化,同时,受太 阳辐射强迫驱动的北半球高纬度地区的气候变 化[47],通过增加西风环流的强度[48]及其波动幅度, 进一步加剧了 3.6 ka B.P.以来塔里木盆地南缘气候 的干旱化和不稳定性。

5 结论

(1) 羊场黄土粒度组成主要以粗粉砂和砂砾占

优势,基本不含黏粒组分,分选较好,且自剖面底部到 顶部,随着平均粒径的增加,粒度频率分布逐渐接近 正态分布的趋势,且分选程度变好。粒度频率分布曲 线和累积曲线指示羊场黄土为塔克拉玛干沙漠的近 源风成堆积,与西昆仑山黄土和沙尘暴沉积物一样以 短距离悬浮沉积为主,黄土粒度组成的变化主要指示 了塔里木盆地南缘干旱程度的变化。

(2) 塔里木盆地南缘气候在 8.5~3.6 ka B.P.较 为湿润稳定,3.6 ka B.P.以来气候急剧变干并出现大 幅度波动的千年尺度突变事件,与其他地区古气候记 录有较好的一致性。我们认为塔里木盆地南缘 8.5 ka B.P.以来的气候变化具有季风模式和千年尺度气 候振荡的双重特点,可能受低纬度亚洲季风和北半球 高纬度地区气候的共同影响。

(3) 太阳辐射减弱导致的亚洲夏季风衰退可能 导致了 3.6 ka B.P.以来盆地南缘的干旱化,同时,受 太阳辐射驱动的北半球高纬度地区的气候变化,通过 增加西风环流的强度及其波动幅度,进一步加剧了 3.6 ka B.P.以来塔里木盆地南缘气候的干旱化和不 稳定性。

#### 参考文献(References)

- An Zhisheng, Kukla G, Porter S C, et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau [J]. Catena, 1991, 18(2): 125-132.
- 2 陈惠中,金炯,董光荣. 全新世古尔班通古特沙漠演化和气候变化 [J]. 中国沙漠,2001,21(4):333-339. [Chen Huizhong, Jin Jiong, Dong Guangrong. Holocene evolution processes of Gurbantunggut desert and climatic changes[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(4): 333-339.]
- 3 陈敬安,万国江,张峰,等.不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例[J].中国科学(D辑):地球科学,2003, 33(6):563-568. [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Zhang Feng, et al. Sedimental record of lake in different time scale: Evidence from grainsize analysis[J]. Science China(Seri.D): Earth Sciences, 2003, 33 (6): 563-568.]
- 4 吕连清,方小敏,鹿化煜,等. 青藏高原东北缘黄土粒度记录的末次 冰期千年尺度气候变化[J]. 科学通报,2004,49(11):1091-1098. [Lü Lianqing, Fang Xiaomin, Lu Huayu, et al. Millennial-scale climate change since the last glaciation recorded by grain sizes of loess deposits on the northeastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletion, 2004, 49(11): 1091-1098.]
- 5 Dietze E, Wünnemann B, Hartmann K, et al. Early to mid-Holocene lake high-stand sediments at Lake Donggi Cona, northeastern Tibetan Plateau, China[J]. Quaternary Research, 2013, 79(3): 325-336.
- 6 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.

- 7 鹿化煜,安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. 中国 科学(D辑):地球科学,1998,28(3):278-283. [Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau[J]. Science China(Seri.D): Earth Sciences, 1998, 28(3): 278-283.]
- 8 Sun Donghua, Su Ruixia, Bloemendal J, et al. Grain-size and accumulation rate records from Late Cenozoic Aeolian sequences in northern China: Implications for variations in the East Asian winter monsoon and westerly atmospheric circulation [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 264(1/2): 39-53.
- 9 Ding Zhongli, Sun Jimin, Rutter NW, et al. Changes in sand content of loess deposits along a north-south transect of the Chinese loess plateau and the implication for desert variations [J]. Quaternary Research, 1999, 52(1): 56-62.
- 10 Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. 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, 2005, 237(1/2): 45-55.
- 11 孙东怀. 黄土粒度分布中的超细粒组分及其成因[J]. 第四纪研究,2006,26(6):928-936. [Sun Donghuai. Supper-fine grain size components in Chinese loess and their palaeoclimatic implication[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26: 928-936.]
- 12 Qiang Mingrui, Chen Fahu, Wang Zhenting, et al. Aeolian deposits at the southeastern margin of the Tengger Desert (China): Implications for surface wind strength in the Asian dust source area over the past 20, 000 years[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 286(1/2): 66-80.
- 13 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.]
- 14 Wang Hong, Mason J A, Balsam W L. The importance of both geological and pedological processes in control of grain size and sedimentation rates in Peoria Loess [J]. Geoderma, 2006, 136 (1/2): 388-400.
- 15 冯起,苏志珠,金会军. 塔里木河流域 12 ka B.P.以来沙漠演化与 气候变化研究[J]. 中国科学(D辑):地球科学,1999,29(增刊): 87-96. [Feng Qi, Su Zhizhu, Jin Huijun. Desert evolution and climatic changes in the Tarim River basin since 12 ka B.P.[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 1999, 29(Suppl.): 87-96.]
- 16 钟巍,王立国,熊黑钢,等. 塔里木盆地南缘和田绿洲中全新世以 来气候环境变化与人类活动[J]. 中国沙漠,2007,27(2):171-176. [Zhong Wei, Wang Liguo, Xiong Heigang, et al. Climate-environment changes and possible human activity effect since mid-Holocene in Hetian Oasis, southern margin of Tarim Basin[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(2): 171-176.]
- 17 杨小平. 塔里木盆地边缘山地的黄土沉积[J]. 干旱区地理, 2000,23(1):13-18. [Yang Xiaoping. Loess deposits in the surrounding mountains of Tarim Basin, northwestern China[J]. Arid Land Ge-

ography, 2000, 23(1): 13-18.]

- 18 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985:1-497. [Liu Dongsheng. Loess and the Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-497.]
- 19 方小敏,吕连清,杨胜利,等.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):地球科学,2001,31(3):177-184. [Fang Xiaomin, Lü Lianqing, Yang Shengli, et al. Loess in Kunlun Mountains and its implications on desert development and Tibetan Plateau Uplift in West China[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2001, 31(3): 177-184.]
- 20 唐自华,穆桂金,陈冬梅,等. 昆仑山北坡近 5000 年以来黄土堆积的环境信息[J]. 第四纪研究,2007,27(4):598-606. [Tang Zihua, Mu Guijin, Chen Dongmei, et al. Eolian deposits in northern slope of Kunlun Mts and their palaeoenvironmental implications during the past 5000 years[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(4): 598-606.]
- 21 高存海,张青松. 中昆仑山北坡黄土特征及其环境[J]. 地理研究,1991,10(4):40-50. [Gao Cunhai, Zhang Qingsong. Priliminary study on loess and its sedimentary conditions northern slope of Mid-Kunlun Mts[J]. Geographical Research, 1991, 10(4): 40-50.]
- 22 李保生,董光荣,张甲坤,等. 塔克拉玛干沙漠及其以南风成相带 划分和认识[J]. 地质学报, 1995, 69(1): 78-87. [Li Baosheng, Dong Guangrong, Zhang Jiakun, et al. Division and recognition of the aeolian facies belts in the Taklimakan desert and areas to its south[J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 69(1): 78-87.]
- 23 邵亚军,李保生. 克里雅河上游流域黄土中孢粉组合与环境[J]. 中国沙漠,1995,15(1):37-41. [Shao Yajun, Li Baosheng. Sporopollen assemblage in the loess of upper reach of the Keriya River and its environment[J]. Journal of Desert Research, 1995, 15(1): 37-41.]
- 24 李玥宏.水资源约束下的乡土聚落景观营造策略研究——以新疆 乡土聚落为例[D].西安:西安建筑科技大学,2011:73-75.[Li Yuehong. Research on creation strategy of vernacular settlement landscape in the perspective of water resource under the constraints—Case study of vernacular settlement in Xinjiang China[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011: 73-75.]
- 25 叶学齐. 塔里木盆地[M]. 北京: 商务印书馆, 1959: 1-98. [Ye Xueqi. Tarim Basin [M]. Beijing: The Commercial Press, 1959: 1-98.]
- 26 Han Wenxia, Yu Lupeng, Lai Zhongping, et al. The earliest well-dated archeological site in the hyper-arid Tarim Basin and its implications for prehistoric human migration and climatic change[J]. Quaternary Research, 2014, 82(1); 66-72.
- 27 Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]: a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3-26.
- 28 Blott S J, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(11): 1237-1248.
- 29 刘进峰.西部黄土高原中新世风尘沉积剖面的磁性地层学和沉积 学研究[D].北京:中国科学院地质与地球物理研究所,2005:20-25.[Liu Jinfeng. Magnetostratigraphy and sedimentology of the Mio-

cene Eolian deposits in western Loess Plateau [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 20-25.]

- 30 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京:地质出版社,1976:1-147. [Northern Shaanxi Team of Chengdu College of Geology. Sedimentary Rocks (Physical) Size Analysis and Its Applications [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1976: 1-147.]
- 31 咎金波. 西昆仑山黄土与亚洲内陆干旱化[D]. 兰州:兰州大学, 2010:65-67. [Zan Jinbo. Loess on west Kunlun Mountains and aridification of Asian Inland[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010: 32-67.]
- 32 李传想,宋友桂,王乐民. 伊犁盆地黄土分布、年代及粉尘来源分析[J]. 地球与环境,2012,40(3):314-320. [Li Chuanxiang, Song Yougui, Wang Lemin. Distribution, age and dust sources of loess in the Ili Basin[J]. Earth and Environment, 2012, 40(3): 314-320.]
- 33 Tsoar H, Pye K. Dust transport and the question of desert loess formation[J]. Sedimentology, 1987, 34(1): 139-153.
- 34 汪海燕,岳乐平,李建星,等. 全新世以来巴里坤湖面积变化及气候环境记录[J]. 沉积学报,2014,32(1):93-100. [Wang Haiyan, Yue Leping, Li Jianxing, et al. Changing of the lake area and records of climate and environment of Barkol Lake during Holocene[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 93-100.]
- 35 刘冰,靳鹤龄,孙忠,等. 青藏高原东北部泥炭沉积粒度与元素记录的全新世千年尺度的气候变化[J]. 冰川冻土,2013,35(3): 609-620. [Liu Bing, Jin Heling, Sun Zhong, et al. Holocene millennial-scale climatic change recorded by grain size and chemical elements of peat deposits in Gonghe Basin, northeastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 609-620.]
- 36 增永丰. 柴达木盆地东部环境演化对古文化的影响[J]. 干旱区 资源与环境,2006,20(2):61-64. [Zeng Yongfeng. Environmental changes and cultural transition at Late Holocene in Qaidam Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(2):61-64.]
- 37 Yu Lupeng, Lai Zhongping. Holocene climate change inferred from stratigraphy and OSL chronology of aeolian sediments in the Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Quaternary Research, 2014, 81(3): 488-499.
- 38 Dykoski C A, Edwards R L, Cheng Hai, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from

Dongge Cave, China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(1/2): 71-86.

- 39 Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years[J]. Quaternary Science Reviews, 1991, 10(4): 297-317.
- 40 李吉均. 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式[J]. 第四纪研究,1990,10(3):197-204. [Li Jijun. The patterns of environmental changes since Late Pleistocene in northwestern China[J]. Quaternary Sciences, 1990, 10(3): 197-204.]
- 41 Morrill C, Overpeck J T, Cole J E. A synthesis of abrupt changes in the Asian summer monsoon since the last deglaciation [J]. The Holocene, 2003, 13(4): 465-476.
- 42 凌智永,李志忠,武胜利,等. 新疆伊犁晚全新世风成沙—古土壤 序列磁化率特征及气候变化[J]. 沉积学报,2012,30(5):928-936. [Ling Zhiyong, Li Zhizhong, Wu Shengli, et al. Late Holocene climate change revealed by the magnetic susceptibility of paleoaeolian sand-paleosol sedimentary sequence in Yili valley of Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 928-936.]
- 43 Rasmussen S O, Andersen K K, Svensson A M, et al. A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2006, 111 (D6): D06102, doi: 10.1029/2005JD006079.
- 44 Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates [J]. Science, 1997, 278(5341): 1257-1266.
- 45 薛积彬,钟巍. 新疆巴里坤湖全新世气候环境变化与高低纬间气候变化的关联[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2011,41(1):61-73. [Xue Jibin, Zhong Wei. Holocene climate variation denoted by Barkol Lake sediments in northeastern Xinjiang and its possible linkage to the high and low latitude climates[J]. Science China(Seri.D): Earth Sciences, 2011, 41(1): 61-73.]
- 46 Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene [J]. Science, 2001, 294 (5549): 2130-2136.
- 47 North Greenland Ice Core Project Members. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period [J]. Nature, 2004, 431(7005): 147-151.
- 48 Bakke J, Lie Ø, Dahl S O, et al. Strength and spatial patterns of the Holocene winter time westerlies in the NE Atlantic region [J]. Global and Planetary Change, 2008, 60(1/2): 28-41.

## Grain-size Characteristics and Its Environmental Significance of Loess from Southern Tarim Basin

TENG XiaoHua<sup>1</sup> ZHANG ZhiGao<sup>2</sup> HAN WenXia<sup>3</sup> FANG YaHui<sup>4</sup> YE ChengCheng<sup>4</sup>

Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education of China, Lanzhou University, Lanzhou 730000;
School of Resource Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang, Henan 455002;

Key Laboratory of Salt Lake Resources and Chemistry & Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008;
Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

**Abstract**: Loess deposit can be formed at geological periods during sandstorm weather and its grain size characteristics can record the atmospheric circulation patterns and paleoenvironmental evolution information during the dust removal process. The Yangchang (YC) loess section in the village of Pulu is situated on the fifth terrace of a tributary of the Keriya River. YC loess is mainly composed of coarse silt and sand with high degree of sorting. The grain size analyses of YC loess indicate that the loess belongs to aeolian deposits from the Taklimakan Desert. Grain-size distribution of YC loess section is mainly controlled by the aridification of the source area, and thus, can indicate the drying process of the south edge of the Tarim Basin. Analysis of the grain-size distribution indicates that the southern margin of the Tarim Basin was relatively humid and stable during  $8.5 \sim 3.6$  ka, and during  $3.6 \sim 0$  ka the climate became dramatically arid with several millennial-scale events, which is in accordance with records from other study areas. We think that the climate at the southern margin of the Tarim Basin has features of both the Monsoon mode and millennial-scale climate oscillation, and might be controlled by both the low latitude Asian Monsoon and high latitude climate from Northern Hemisphere. We speculate that decrease of the ASM intensity in relation to weakening of the solar activity might have caused the aridification of the Tarim Basin since 3.6 ka. And the climate change in high latitude of the Northern Hemisphere might have further strengthened the drying trend and the climate instability since 3.6 ka through intensifying the Westerlies and its amplitude.

Key words: grain size; aridification; Keriya river; Tarim Basin