

新仙女木期黄河晋陕峡谷古风成沙层年代及其物质来源

张玉柱^{1,2}, 黄春长³, 陈莹璐³, 谭志海⁴, 杨利荣²,

张云翔², 邱海军¹, 刘 波¹, 赵发珠¹

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 西北大学地质系, 西安 710069;

3. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710119; 4. 西安工程大学环境与化学工程学院, 西安 710048)

摘要: 通过对黄河晋陕峡谷壶口至龙门段开展广泛细致的野外考察, 发现了典型的晚更新世以来黄土—土壤层夹古风成沙层剖面—北桑峪剖面(BSY)。结合不同类型沉积物的野外宏观特征、磁化率、粒度成分、石英颗粒表面特征和地球化学元素的对比分析, 确定黄河晋陕峡谷壶口至龙门段BSY剖面中所夹古风成沙层的性质为中沙质细沙, 是在干旱多风环境下形成的沙质沉积物。基于光释光(OSL)测年数据, 确定其沉积年代为12.5-11.6 ka, 记录了黄河中游发生在末次冰消期的极端干旱事件, 其与相邻区域沙漠/黄土过渡带中湖沼沉积和风电黄土—古土壤剖面记录的新仙女木事件相对应。该剖面中古风成沙沉积物的物质来源, 主要来自黄河晋陕峡谷的古河床相沙层物质。这是因为该河段处于干旱半干旱季风气候区, 在新仙女木时期, 黄河晋陕峡谷处于极端干冷的环境之中, 冬季风强盛、夏季风衰弱, 黄河水位下降明显, 河漫滩和江心洲将大面积出露, 大量的沙物质在风力作用下向岸边输移, 成为河谷两侧缓坡台地上古风成沙沉积层出现的主要沙源地。这个研究成果对于进一步揭示黄河中游流域极端干旱事件发生的时间性规律及其与季风气候变化的关系, 具有重要的科学意义。

关键词: 黄河; 晋陕峡谷; 新仙女木; 古风成沙层; 光释光测年

DOI: 10.11821/dlxb201705003

1 引言

第四纪古风成沙是指现代风电沙出现以前, 在第四纪期间干旱多风环境下形成的沙质沉积物, 其存在表明流沙出现或沙地扩张。因此, 它既是干旱多风气候的标志, 又是沙地发展正过程的标志^[1-2]。第四纪古风成沙的沉积学、地球化学、微形态学和年代学等多学科交叉研究, 具有极为重要的科学价值^[3-12]。目前, 国内外学者通过对河流阶地上沉积的古风成沙的上述研究, 揭示出其作为沙漠环境下的标型沉积物, 沉积过程往往表明大江大河在第四纪时期某些时间段, 流域处于干旱多风的环境之中, 记录了流域发生的极端干旱事件^[13-17]。

黄河晋陕峡谷段处于干旱半干旱季风气候区, 素有“十年九旱”之称。干旱历来都

收稿日期: 2016-12-15; 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471071, 41401602); 中国博士后科学基金项目(2016M59289); 陕西省重点科技创新团队计划(2014KCT-27) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41471071, No.41401602; Project Funded by China Postdoctoral Science Foundation, No.2016M592829; Program for Key Science and Technology Innovation Team in Shaanxi Province, No.2014KCT-27]

作者简介: 张玉柱(1987-), 男, 山东临沂人, 博士, 讲师, 中国地理学会会员(S110010398M), 主要从事环境变迁与入地关系演变研究。E-mail: xbdzy05@nwu.edu.cn

是本河段最严重的自然灾害,也是本河段最显著的气候特点。这里干旱灾害不仅发生频率高,而且历时长、范围广、危害大^[18]。诸如“焦地流金,大地生烟,野绝青草,寸粒不收,骨肉相食,十室九空”等对黄河中游旱灾灾情的记述不胜枚举。在全球暖干化影响的新形势下,为更加合理的开发利用黄河中游水资源,更加有效的防旱减灾,都需要准确掌握黄河中游长尺度极端干旱事件发生的时间规律及其与季风气候变化的关系^[19-23]。

然而,从黄河晋陕峡谷河谷两侧的沉积地层中准确鉴别出古风成沙层及其沉积物源,是深入理解黄河中游流域极端干旱事件发生的时间性规律和气候背景的前提和关键。本文选择黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面(BSY)为重点研究对象,通过细致的野外宏观特征和室内沉积学和地球化学元素等指标分析,以准确鉴别出剖面中所夹古风成沙层的沉积学和地球化学特征及其物源。根据光释光(OSL)测年数据,并结合典型剖面地层对比,建立剖面的地层年代框架,确定古风成沙层的沉积年代。这对于进一步揭示流域极端干旱事件发生的时间规律及其与季风气候变化的关系,具有重要的科学意义。

2 研究区概况

黄河中游河口镇至龙门区间(简称晋陕峡谷)干流长723 km,谷坡陡峻,谷道狭窄,除河曲、府谷河谷段较宽外,其余河段宽度多在400~600 m之间,河槽深切入黄土高原的基岩之中,大部分河段由二叠纪、三叠纪沙页岩组成。晋陕峡谷段黄河干流落差为607 m,河道平均比降0.84‰,水力资源较丰富。晋陕峡谷段黄河支流众多,干沟密布,水系发达,以皇甫川、窟野河、无定河、延水、红河、三川河、昕水河等河流为骨干,加上纵横交错的大小支流及毛支沟,形成了树枝状的地表水系网。集水面积111586 km²,占黄河流域面积的14.8%,大部分属于黄土高原地区。

该区域地处温带干旱半干旱季风气候区,总的气候特点是:春季短促,多风沙、常发生干旱;夏季南长北短,湿度大、高温多雨;秋季较短,天气温和;冬季漫长,寒冷、干燥、少雨雪。其年平均降水量在300~550 mm之间,从东南向西北递减。全年的降水量高度集中在7月、8月、9月3个月,占年降水量的61.6%。降水的年际变化大,多雨年份比少雨年份的降水量大2~3倍。区间年平均气温在3.6~11.8℃之间,大体以低纬度向高纬度递减。

3 研究剖面与研究方法

3.1 研究剖面

通过对黄河晋陕峡谷壶口至龙门段进行广泛细致的野外考察,发现该河段地貌以中山和低山为主,地质构造简单,整个岩层倾角平缓,岩性以砂页岩为主,黄河深切于二叠纪、三叠纪砂页岩中,河槽形态规整。在该河段乡韩大桥东端偏上游200 m的缓坡台地上,发现并选择了夹有古风成沙层的晚更新世以来黄土—土壤剖面,进行细致的野外宏观特征和室内磁化率、粒度、石英颗粒形态和地球化学元素指标分析,并采集了研究河段黄河现代河床相沙层和毛乌素沙地东南缘现代沙丘沙层(BTW)进行对比分析,以准确鉴别剖面所夹古风成沙层的沉积学和地球化学特征,并准确揭示出古风成沙的物质来源(图1)。

由于该研究剖面位于北桑峪村附近,故命名为北桑峪剖面(BSY)。该剖面顶部海拔

405~408 m, 高出黄河平水位 15~18 m, 剖面层次清楚, 未经人为扰动, 其土壤学和沉积学特征明显 (图2)。基于野外沉积剖面的宏观特征进行细致观察分析的基础上, 确定了其基本的地质划分框架 (表1)。然后, 在古风成沙层的上部和下部、马兰黄土层, 共采集沉积学样品 3 个, 并且利用直径为 5 cm 的不锈钢管, 在剖面的上述关键层位采集了 4 个光释光样品。对比沉积学样品主要分别采自研究河段黄河现代河床相沙层和毛乌素沙地东南缘现代沙丘沙层, 共 2 个。

3.2 研究方法

为了确保实验结果能够真实反映古风成沙的沉积学和地球化学特征, 对于采集的古风

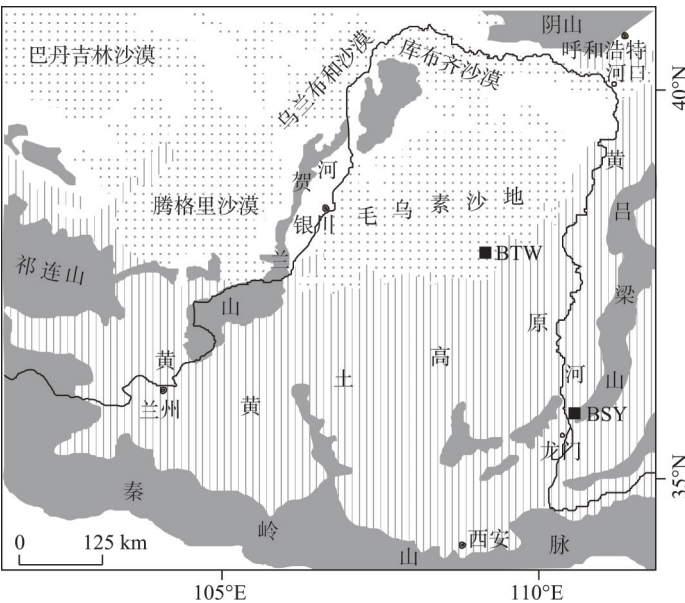


图1 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面位置

Fig. 1 Map showing the location of the Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River

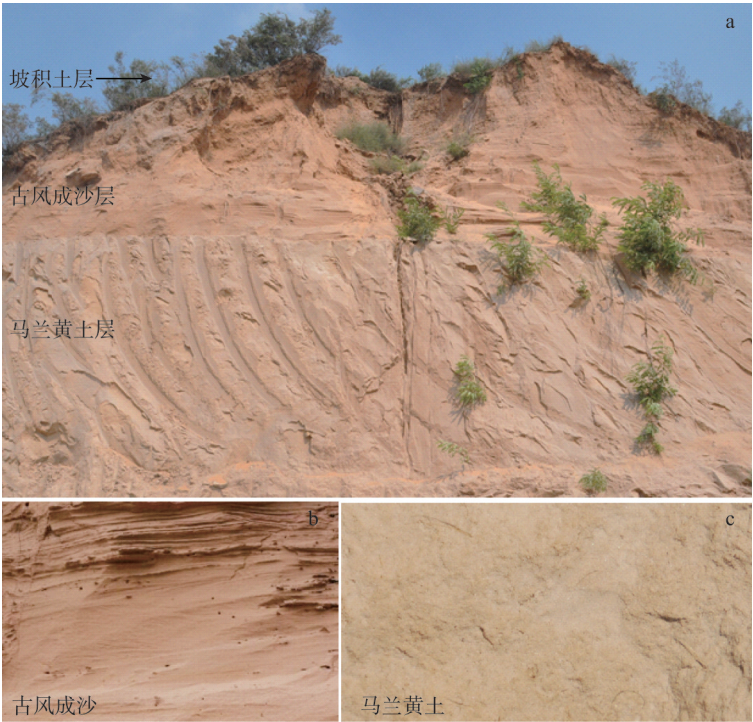


图2 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面及其所夹古风成沙层

Fig. 2 The Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile containing paleo-aeolian sand layers at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River

表1 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面地层划分及描述

Tab. 1 Pedo-stratigraphic subdivision and description of the Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River

沉积地层	地层符号	颜色	地层描述
坡积土层 (20~0 cm)	Slope deposit (SD)	灰黄色	坡积石渣土, 分选极差, 含有中间夹有坡积物角砾石块, 厚度在10~20 cm之间。
古风成沙层 (500~20 cm)	Aeolian sand	灰黄色	中沙质细沙, 分选极好, 很疏松, 马兰黄土地形面延展, 厚度在50~400 cm之间, 水平延伸距离达10 m, 高度由顶部至两坡侧逐渐降低, 直至尖灭, 古风成沙层中可见到明显的风成层理, 包括了厚度极薄(小于或等于1~2 mm)的加积纹层构成的水平层理, 厚度在几毫米至数厘米前积纹层构成的倾向偏南的平板状或楔形交错层理, 以及由加积纹层与前积纹层组成的水平—交错层理。
马兰黄土层 (> 500 cm)	Malan loess (L ₁)	浊黄橙色	极细沙质粉沙, 分选好, 块状构造, 疏松多孔, 厚度大于500 cm, 未见底。
现代河床相沙层	Riverbed sand	灰黄色	粉沙质中沙, 分选较好, 很疏松。
现代沙丘沙层	Modern dune sand	棕黄色	中沙质细沙, 分选极好, 很疏松。

成沙样品, 在实验室内对所采样品进行充分混合, 并且均匀取样分析测试。分别进行了磁化率、粒度、地球化学元素和石英表面形态指标的测定。磁化率采用英国Bartington公司生产的MS-2B型磁化率仪测定, 取研磨后的风干样品10 g, 将样品放入小塑料盒中, 分别对每个样品进行高频和低频测量, 将3次测量结果进行平均后取值。粒度分析是取约1 g (精度为0.001 g) 的风干样品, 先用10%的H₂O₂和10%HCl去除有机质和钙质胶结物, 经过72 h后加入适量六偏磷酸钠使颗粒充分分散, 用英国Malvern公司生产的MS-2000型激光粒度仪测量, 测量精度为1%。石英表面形态特征是将去除碳酸盐矿物、氧化铁和有机质的石英颗粒干燥后, 放入日立台式扫描电子显微镜TM3000下观察分析。样品化学元素分析采用荷兰Panalytical公司生产的PW2403型X-Ray荧光光谱仪。在测量过程中, 为了保证数据质量, 加入国家标准土壤参比物质样品, 保证测定误差小于5%。

3.3 年代确定

黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面(BSY)年代框架的建立, 主要通过典型剖面地层对比和对剖面沉积物的OSL测年来解决。黄土高原晚更新世以来黄土—土壤剖面地层以及环境变迁年代框架已相当成熟^[24]。黄河晋陕峡谷壶口至龙门段BSY剖面古风成沙沉积层直接覆盖于晚更新世马兰黄土层(L₁)之上, 这说明其沉积于晚更新世以来。在陕西师范大学环境变迁实验室用Risø TL/OSL DA-20型释光断代仪, 直接对剖面关键沉积层位的光释光样品进行了OSL年龄测定(表2)。可知黄河晋陕峡谷壶口至龙门段BSY剖面古风成沙沉积层中上部22.5 cm和52.5 cm处, OSL年龄

表2 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面样品的OSL测年结果

Tab. 2 OSL dating results of the samples of the Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River

样品 编号	地层 层位	深度 (cm)	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	含水量 (%)	等效剂量 De (Gy)	环境剂量 Dy (Gy ka ⁻¹)	年龄 (ka)
BSY-1	古风成沙层	22.5	1.02±0.05	4.97±0.17	2.16±0.06	14.0	30.39±1.64	2.64±0.06	11.6±0.7
BSY-2	古风成沙层	52.5	0.81±0.05	3.89±0.14	2.21±0.06	14.0	27.98±1.02	2.34±0.06	11.9±0.5
BSY-3	古风成沙层	497.5	1.10±0.06	4.72±0.17	2.18±0.06	14.0	32.02±1.02	2.55±0.06	12.5±0.5
BSY-4	马兰黄土层	502.5	2.46±0.10	11.30±0.32	1.76±0.06	15.8	36.73±1.20	2.92±0.07	12.6±0.5

分别为 11.6 ± 0.7 ka 和 11.9 ± 0.5 ka, 古风成沙层下部 497.5 cm 处, OSL 年龄为 12.5 ± 0.5 ka。这样就比较准确的确定了古风成沙层的沉积年代为 12.5-11.6 ka。即剖面中覆盖于马兰黄土层 (L_1) 之上的古风成沙层沉积于末次冰消期, 即末次冰期向冰后期 (全新世) 过渡的一个关键时段^[25]。

4 结果分析

4.1 沉积学特征

4.1.1 磁化率 磁化率能够指示沉积物中铁磁性矿物的多少, 反映沉积物风化成壤作用的强弱^[24]。在黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面 (BSY) 中 (表 3), 马兰黄土层 (L_1) 的磁化率呈现低值, 结合野外宏观结构构造特征, 可知其堆积于气候相对冷干的时期, 风尘堆积作用旺盛, 几乎未受到风化成壤作用的影响。古风成沙层上部和下部磁化率相较于马兰黄土层, 则呈现极低值, 可知其作为沙漠环境下的标型沉积物, 堆积于气候更加寒冷干旱多风的时期。晋陕峡谷壶口至龙门段黄河现代河床相沙层磁化率值呈现低值, 这主要是受到其物源磁学特征的影响, 同样说明其作为新鲜的河流沉积物, 沉积之后尚未受到风化成壤作用的影响。毛乌素沙地现代沙丘沙层磁化率呈现最低值, 这说明其作为现代沙漠环境下的标型沉积物, 气候干旱多风, 也未受到风化成壤作用的影响。

4.1.2 粒度 粒度能够反映沉积物的性质、成因和沉积环境。结合粒度和磁化率指标, 可以揭示沉积物的物质来源、沉积动力和次生条件变化的影响^[26]。按照沉积学分级标准, 在黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面 (BSY) 中 (表 4), 马兰黄土层粒度成分以粉沙 ($2\sim63\ \mu\text{m}$) 为主, 其次是极细沙 ($63\sim125\ \mu\text{m}$) 和粘土 (<2

表 3 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面样品与其他沉积物磁化率对比

Tab. 3 A comparison of magnetic susceptibility between the samples of the Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River and other sediments

沉积地层	低频磁化率($\times 10^{-8}\ \text{m}^3/\text{kg}$)	高频磁化率($\times 10^{-8}\ \text{m}^3/\text{kg}$)	频率磁化率(%)
古风成沙层上部	27.12	26.46	2.43
古风成沙层下部	28.54	26.38	7.57
马兰黄土层	34.65	33.24	4.07
现代河床相沙层	25.80	24.43	5.31
现代沙丘沙层	14.52	14.33	1.31

表 4 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面样品与其他沉积物粒度成分对比

Tab. 4 A comparison of grain size distribution between the samples of the Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River and other sediments

沉积地层	粘土 ($<2\ \mu\text{m}$, %)	粉沙 ($2\sim63\ \mu\text{m}$, %)	极细沙 ($63\sim125\ \mu\text{m}$, %)	细沙 ($125\sim250\ \mu\text{m}$, %)	中沙 ($250\sim500\ \mu\text{m}$, %)	粗沙 ($>500\ \mu\text{m}$, %)
古风成沙层上部	0.00	2.87	12.20	45.86	36.82	2.25
古风成沙层下部	0.00	2.79	13.80	45.59	35.19	2.63
马兰黄土层	5.92	71.07	20.77	1.71	0.41	0.12
现代河床相沙层	2.97	24.94	12.03	17.39	31.58	11.09
现代沙丘沙层	0.83	2.26	11.70	58.80	25.60	0.83

μm), 细沙 (125~250 μm)、中沙 (250~500 μm) 和粗沙 (> 500 μm) 极少。中值粒径 (Md) 和平均粒径 (Mz) 分别为 38.02 μm 和 31.34 μm, 质地为极细沙质粉沙。但是, 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段 BSY 剖面古风成沙层上部 and 下部粒度成分以细沙为主, 其次是中沙和极细沙, 粉沙和粗沙含量较少, 不含粘土。中值粒径和平均粒径分别介于 216.21~219.05 μm 和 209.30~213.17 μm 之间, 质地为中沙质细沙。综合磁化率和粒度指标分析表明, 这表明古风成沙层与马兰黄土层的形成, 应该具有不同的风动力条件和物质来源。晋陕峡谷壶口至龙门段黄河现代河床相沙层粒度成分以中沙为主, 其次是粉沙和细沙, 极细沙、粗沙和粘土含量也较高。中值粒径和平均粒径分别为 203.49 μm 和 140.98 μm, 质地为粉沙质中沙。这是由于研究地点处于黄河峡谷河段, 河流比降较大, 水流湍急, 河流的搬运动力较强, 河床相沉积物中粗颗粒含量就会较高。毛乌素沙地现代沙丘沙层粒度成分以细沙为主, 其次是中沙和极细沙, 粉沙、粗沙和粘土含量极少。中值粒径和平均粒径分别为 196.50 μm 和 178.70 μm, 质地为中沙质细沙。该研究结果与前人对毛乌素沙地流动沙丘沙的粒度分析结果相一致, 即其主要由细沙和中沙组成, 几乎不含极粗和极细组分^[27-29]。

在研究沉积环境时, 标准偏差 (σ) 或者分选系数 (S) 可用于分析沉积环境的动力条件和沉积物的物质来源。这常用于分析沉积环境的动力条件和沉积物的物质来源。偏度 (SK) 表示沉积物粗细分布的对称程度, 是偏态的定量描述。峰态 (Kg) 反映粒度分布曲线的尖锐或钝圆的程度, 是衡量频率曲线尖峰凸起程度的参数。在黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面 (BSY) 中 (表 5), 马兰黄土层标准偏差和分选系数呈现较低值, 分选程度好, 偏态为极正偏, 峰态很尖窄。黄河晋陕峡谷壶口至龙门段 BSY 剖面全新世古风成沙层上部 and 下部标准偏差和分选系数呈现极低值, 分选程度极好, 偏态为近对称, 峰态中等。黄河晋陕峡谷壶口至龙门段黄河现代河床相沙层标准偏差和分选系数呈现较高值, 分选程度较好, 偏态为极正偏, 峰态中等。毛乌素沙地现代沙丘沙层标准偏差和分选系数呈现最低值, 分选程度极好, 偏态为负偏, 峰态中等。

表 5 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面样品与其他沉积物粒度参数值对比
Tab. 5 A comparison of grain size parameters between the samples of the Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River and other sediments

沉积地层	中值粒径(Md , μm)	平均粒径(Mz , μm)	标准偏差(σ)	分选系数(S)	偏态(SK)	峰态(Kg)
古风成沙层上部	219.05	213.17	0.73	0.49	0.09	0.99
古风成沙层下部	213.17	228.12	0.75	0.51	0.09	0.99
马兰黄土层	38.02	31.34	1.60	0.79	0.41	1.56
现代河床相沙层	203.49	140.98	2.04	1.33	0.49	1.11
现代沙丘沙层	196.50	178.70	0.60	0.39	0.10	1.09

粒度自然分布频率曲线更好地呈现了这些不同类型沉积物样品在粒度特征上的区别 (图 3)。在黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面 (BSY) 中 (图 2), 古风成沙层上部 and 下部粒度自然分布频率曲线较马兰黄土层, 明显偏向右侧粗颗粒级。其与晋陕峡谷壶口至龙门段黄河现代河床相沙层和毛乌素沙地现代沙丘沙层粒度自然分布频率曲线也有着很大差异。

4.2 石英颗粒形态特征

坚硬的石英表面能够很好的记录作用过它的动力过程, 其具有高处侵蚀、低处沉淀

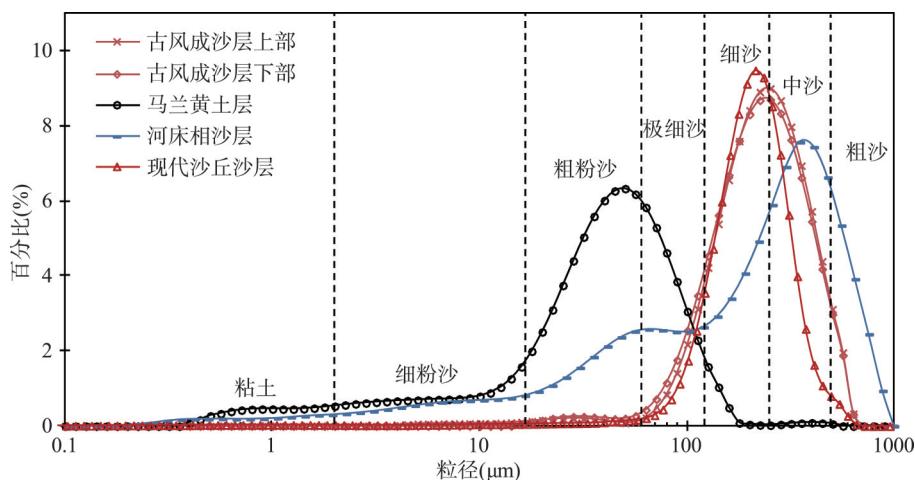


图3 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面样品与其他沉积物粒度自然分布频率曲线对比

Fig. 3 A comparison of grain size distribution frequency curves between the samples of Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River and other sediments

的基本特征。同时，不同的动力过程所形成的石英表面特殊形态组合特征与相互关系，能够清晰地反映出颗粒所经历的不同沉积环境^[30-31]。

扫描电镜观测结果显示（图4），在黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面（BSY）中，马兰黄土层的石英颗粒磨圆度较好，多为流线型、水滴形或者次棱角状的长形颗粒，颗粒表面具有一些撞击坑、撞击点以及次生硅质沉淀，其具有典型风成黄土的特征形态（图4d、4e和4f）。尤其是流线型的颗粒，表明了沙粒悬浮于气流之中，经过长时间（长距离）的搬运，颗粒本身亦沿长轴螺旋形转动，经风力摩擦而渐渐形成这种旋转形态特征^[20-21]。黄河晋陕峡谷壶口至龙门段BSY剖面古风成沙层的石英颗粒磨圆度很好，多为圆形、次圆形和具有光滑的次圆脊的长条形颗粒，颗粒表面具有风力搬运作用过程中形成的碟形坑等撞击痕迹。同时颗粒表面保存了河流沙才具有的一些浅洼坑和贝壳状断口（图4a、4b和4c），这意味着沙地物源曾经流水搬运作用到达该区域^[32]。晋陕峡谷壶口至龙门段黄河现代河床相沙层石英颗粒磨圆度很好，多为光滑的次圆至圆形颗粒，颗粒表面具有一些浅碟形的凹面、V形坑和三角痕等（图4g、4h和4i），这表明其经过了流水长距离搬运磨圆，且由于水流的冲击与沙粒间的碰撞产生了一些宽约数十微米的三角形撞击痕^[31]。毛乌素沙地现代沙丘沙层颗粒磨圆度较好，多为光滑的长形（边角呈浑圆状）、次棱角至次圆形颗粒，颗粒表面具有明显的碟形坑、新月形坑、麻坑以及次生硅质沉淀（图4j、4k和4l），这都很好地反映出当时风沙流的沉积环境特征，在干旱且昼夜温差较大的环境下，石英砂颗粒曾经历过较长时间（长距离）的风力搬运分选，搬运过程中颗粒间相互磨蚀撞击频繁^[33]。

4.3 地球化学特征

沉积物的元素地球化学特征在指示古环境、古气候变化和物源示踪研究中，具有重要的意义^[35-36]。在黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面（BSY）中（表6），马兰黄土层的常量元素 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和微量元素Ba、Rb、Sr、Cu、Cr、Zr的含量与黄土高原黄土的平均化学成分含量非常接近^[37]。这说明它们作为典型的风成沉积物，其物质皆来源于西北内陆荒漠区^[24]。黄河晋陕峡谷

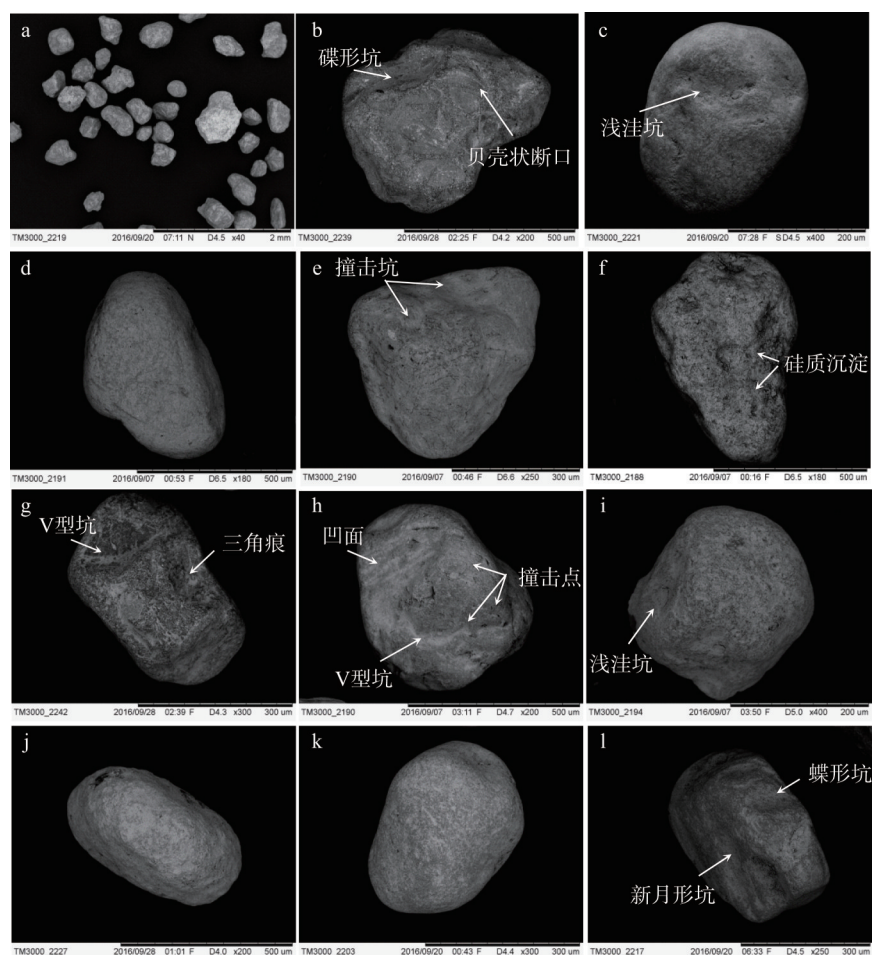


图4 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面样品与其他沉积物石英颗粒表面形态特征对比

(a, b, c - 古风成沙层; d, e, f - 马兰黄土层; g, h, i - 现代河床相沙层; j, k, l - 现代沙丘沙层)

Fig. 4 A comparison of surface textures of quartz sand between the samples of the Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River and other sediments

壶口至龙门段BSY剖面古风成沙层上部和下部的常量元素 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和微量元素Ba、Rb、Sr、Cu、Cr、Zr的含量显著区别于马兰黄土层和毛乌素沙地现代沙丘层,却与晋陕峡谷壶口至龙门段黄河现代河床相沙层非常接近。沉积物地球化学元素与UCC比率变化曲线也很好的指示了黄河晋陕峡谷壶口至龙门段BSY剖面古风成沙层上部和下部与晋陕峡谷壶口至龙门段黄河现代河床相沙层的曲线非常相似,而显著区别于剖面中马兰黄土层和毛乌素沙地现代沙丘沙层(图5)。

5 讨论

5.1 古风成沙层的鉴别

第四纪古风成沙是在第四纪期间干旱多风环境下形成的沙质沉积物。结合黄河晋陕

表6 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面样品与其他沉积物地球化学元素含量对比

Tab. 6 A comparison of geochemical elements between the samples of Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River and other sediments

沉积地层	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	Ba (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Cu (ppm)	Cr (ppm)	Zr (ppm)
古风成沙层上部	1.53	61.42	8.76	0.64	2.58	3.37	631.60	66.00	269.60	2.80	22.80	183.40
古风成沙层下部	1.58	59.08	8.47	0.68	2.72	3.15	603.90	65.90	272.60	2.30	25.90	166.90
马兰黄土层	4.12	55.51	11.31	1.92	5.96	1.46	498.80	84.60	180.30	17.60	59.20	256.60
现代河床相沙层	1.38	66.84	6.43	0.57	2.71	2.17	530.70	62.10	168.40	4.00	21.50	158.50
现代沙丘沙层	1.49	81.29	7.13	0.62	1.06	1.48	497.10	55.80	113.30	6.40	119.30	119.80

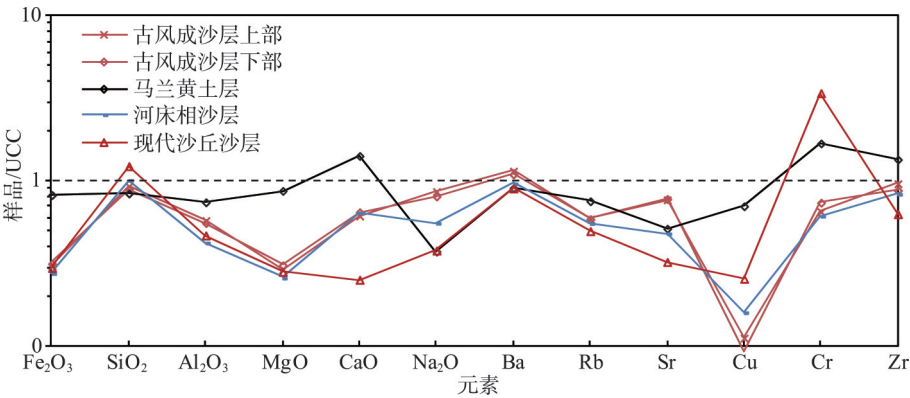


图5 黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面样品与其他沉积物样品/UCC^[34]比率曲线对比

Fig. 5 A comparison of sample/UCC^[34] ratio curves between the samples of Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile at the Beisangyu site (BSY) in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River and other sediments

峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面（BSY）中古风成沙层的保存状态，可将其划分为埋藏古风成沙^[1-2]。河谷地区埋藏古风成沙层的准确鉴别，是深入理解和探究大江大河流域极端干旱事件发生的时间规律和气候背景的前提和关键。

根据本文对黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面（BSY）中古风成沙层野外实际调查和室内分析结果，将其沉积地点所处的地貌条件、分布条件和沉积物特征，总结如下：① 地貌条件：古风成沙位于黄河晋陕峡谷左侧的缓坡台地之上（图2a）；② 分布条件：古风成沙层沿马兰黄土地形面延展，厚50~400 cm之间，水平延伸距离达10 m，高度由顶部至两坡则逐渐降低，直至尖灭（图2a）；③ 沉积物特征：古风成沙层呈灰黄色，颗粒分选极好，很疏松，不含有砾石和钙结核（图2a）；可见到明显的风成层理，包括了厚度极薄（小于或等于1~2 mm）的加积纹层构成的水平层理，厚度在几毫米至数厘米前积纹层构成的倾向偏南的平板状或楔形交错层理，以及由加积纹层与前积纹层组成的水平—交错层理（图2a、2b）；粒度组成以细沙为主，其次是中沙和极细沙，粉沙和粗沙含量较少，不含粘土（图3）；石英颗粒磨圆度很好，多为圆形、次圆形和具有光滑的次圆脊的长条形颗粒，颗粒表面具有风力搬运作用过程中形成

的碟形坑等撞击痕迹。同时颗粒表面保存了河流沙才具有的一些浅洼坑和贝壳状断口(图4d、4e和4f)。

黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面(BSY)中古风成沙层的上述的某些沉积地点的地貌条件、分布条件和沉积物特征,与前人总结的第四纪古风成沙的特征十分相似^[1-2],这表明其为典型的古风成沙沉积物,是在干旱多风环境下形成的沙质沉积物。

基于OSL测年数据,可知黄河晋陕峡谷壶口至龙门段BSY剖面古风成沙层的沉积年代为12.5-11.6 ka,记录了黄河中游发生在末次冰消期的极端干旱事件(表2)。这次极端干旱事件在时间坐标上与其与相邻区域沙漠/黄土过渡带中湖沼沉积和风成黄土—古土壤剖面记录的新仙女木事件(Younger Dryas, YD)很好对应。即在相邻区域沙漠/黄土过渡带的上述沉积剖面中,共同记录了YD时期东亚季风气候存在着干冷特征,沙地具有总体扩张的趋势^[38-40]。

5.2 古风成沙层的物源

通过广泛细致的野外考察,可知黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面(BSY)中古风成沙层为中沙质细沙,呈现出灰黄色,其与剖面中风成黄土土壤层构成的景观色调差异明显。

在实验室内,通过磁化率、粒度、石英颗粒形态特征和地球化学元素等指标分析,表明黄河晋陕峡谷壶口至龙门段BSY剖面中所夹古风成沙层呈现极低值,这说明它作为沙漠环境下的标型沉积物,堆积于气候更加干旱寒冷多风的时期,沉积之后未受到风化成壤作用的影响。该古风成沙层粒度组成以细沙为主,其次是中沙和极细沙,粉沙和粗沙含量较少,不含粘土,粒度自然分布频率曲线偏向右侧粗颗粒级,分选极好,这与剖面中的马兰黄土层和毛乌素沙地现代沙丘沙层相比较,粒度自然分布频率曲线明显偏向右侧粗颗粒级。但是,该古风成沙层与晋陕峡谷壶口至龙门段现代河床相沙层相比较,后者粒度自然分布频率曲线更偏向右侧粗颗粒级。古风成沙层的常量元素 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和微量元素Ba、Rb、Sr、Cu、Cr、Zr的含量显著区别于马兰黄土层和毛乌素沙地现代沙丘层,却与晋陕峡谷壶口至龙门段黄河现代河床相沙层非常接近,尤其是通过对石英颗粒磨圆度很好,多为圆形、次圆形和具有光滑的次圆脊的长条形颗粒,颗粒表面具有风力搬运作用过程中形成的碟形坑等撞击痕迹,同时颗粒表面保存了河流沙才具有的一些浅洼坑和贝壳状断口。

据此,可以推断黄河晋陕峡谷壶口至龙门段BSY剖面所夹古风成沙沉积物的物质来源,主要来自黄河晋陕峡谷的古河床相沙层物质。这是因为该河段处于干旱半干旱季风气候区,对于全球变化响应敏感。在新仙女木时期,黄河晋陕峡谷段处于在极端干冷的环境之中,冬季风强盛、夏季风衰弱,黄河水位下降明显,河漫滩和江心洲大面积出露,大量的沙物质在风力作用下向岸边输移,成为河谷两侧缓坡台阶上古风成沙沉积层出现的主要沙源地^[41]。而且,通过对黄河晋陕峡谷壶口至龙门段BSY剖面所夹古风成沙层与晋陕峡谷壶口至龙门段现代河床相沙层的粒度分析结果对比,表明其也存在风成沙沉积物的沉积分选规律,即古风成沙的源区物质(古黄河河床相沙层)经风力吹蚀搬运发生沉积分异,在风力这种有效分选介质的作用下,古黄河河床相沙层的尘埃状物质被搬运到远处,细颗粒粉沙含量减小,中等颗粒百分比相对增加,粗颗粒物质留在原地或搬运不远,古风成沙层的粒度特征在空间上表现为沿主导风向由物源区向沉积区沙粒变细,分选性变好^[28, 42]。

6 结论

结合不同类型沉积物的野外宏观特征、磁化率、粒度成分、石英颗粒表面特征和地球化学元素的对比分析,对黄河晋陕峡谷壶口至龙门段北桑峪晚更新世以来黄土—土壤剖面(BSY)中古风成沙层的沉积学和地球化学特征及其沉积物源获得了明确的认识。剖面中古风成沙层沉积地点的地貌条件、分布条件和沉积物特征,符合典型第四纪古风成沙的特征,这表明其为典型的古风成沙沉积物,是在干旱多风环境下形成的沙质沉积物。基于OSL测年数据,确定了剖面中古风成沙的沉积年代为12.5-11.6 ka,处于末次冰消期,即末次冰期向冰后期(全新世)过渡一个关键时段。进而揭示出该古风成沙层记录了黄河中游发生在末次冰消期的极端干旱事件,其与相邻区域沙漠/黄土过渡带中湖沼沉积和风成黄土—古土壤剖面记录的新仙女木事件记录的YD事件相对应,即在相邻区域沙漠/黄土过渡带的上述沉积剖面中,共同记录了YD时期东亚季风气候存在着干冷特征,沙地具有总体扩张的趋势。

黄河晋陕峡谷壶口至龙门段BSY剖面所夹古风成沙沉积物的物质来源,主要来自黄河晋陕峡谷的古河床相沙层物质。这是因为该河段处于干旱半干旱季风气候区,在YD时段,黄河中游晋陕峡谷段处在极端干冷的环境之中,冬季风强盛、夏季风衰弱,黄河水位下降明显,河漫滩和江心洲大面积出露,大量的沙物质在风力作用下向岸边输移,成为河谷两侧缓坡台阶上古风成沙沉积层出现的主要沙源地。

本文研究成果对于揭示黄河晋陕峡谷古风成沙的沉积学和地球化学特征,鉴别其沉积物源,对于进一步揭示流域极端干旱事件发生的时间规律及其与东亚季风气候变化的关系,具有重要的科学意义。

参考文献(References)

- [1] Dong Guangrong, Li Baosheng, Gao Shangyu, et al. Significances of the Quaternary ancient eolian sands in the Ordos Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(16): 998-1001. [董光荣, 李保生, 高尚玉, 等. 鄂尔多斯高原第四纪古风成沙的发现及其意义. *科学通报*, 1983, 28(16): 998-1001.]
- [2] Dong Guangrong, Li Baosheng, Gao Shangyu, et al. The Quaternary ancient eolian sands in the Ordos Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 1983, 38(4): 341-347. [董光荣, 李保生, 高尚玉, 等. 鄂尔多斯高原的第四纪古风成沙. *地理学报*, 1983, 38(4): 341-347.]
- [3] Rognon P. Late Quaternary climatic reconstruction for the Maghreb (North Africa). *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1987, 58(1/2): 11-34.
- [4] Stokes S, Thomas D S G, Washington R. Multiple episodes of aridity in southern Africa since the last interglacial period. *Nature*, 1997, 388: 154-158.
- [5] Sun Jiming, Ding Zhongli, Liu Tungsheng, et al. 580000-year environmental reconstruction from aeolian deposits at the Mu Us Desert margin, China. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18: 1351-1364.
- [6] Yang Xiaoping, Preusser F, Radtke U. Late Quaternary environmental changes in the Taklamakan Desert, western China, inferred from OSL-dated lacustrine and aeolian deposits. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(9/10): 923-932.
- [7] Zhou Yali, Lu Hayu, Zhang Jiafu, et al. Luminescence dating of sand - loess sequences and response of Mu Us and Otindag sand fields (north China) to climatic changes. *Journal of Quaternary Science*, 2009, 24(4): 336-344.
- [8] He Zhong, Zhou Jie, Lai Zhongping, et al. Quartz OSL dating of sand dunes of Late Pleistocene in the Mu Us Desert in northern China. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(2/3): 102-106.
- [9] Li Shenghua, Sun Jimin. Optical dating of Holocene dune sands from the Hulun Buir Desert, northeastern China. *The Holocene*, 2006, 16: 457-462.
- [10] Long Hao, Lai Zhongping, Fuchs M, et al. Palaeodunes intercalated in loess strata from the western Chinese Loess Plateau: Timing and palaeoclimatic implications. *Quaternary International*, 2012, 263: 37-45.

- [11] Zhao Hui, Li Guoqiang, Sheng Yongwei, et al. Early-middle Holocene lake-desert evolution in northern Ulan Buh Desert, China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2012, 331/332: 31-38.
- [12] Li Guoqiang, Jin Ming, Chen Xuemei, et al. Environmental changes in the Ulan Buh Desert, southern Inner Mongolia, China since the middle Pleistocene based on sedimentology, chronology and proxy indexes. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 128: 69-80.
- [13] Lepper K, Scott G F. Late Holocene aeolian activity in the Cimarron River valley of west-central Oklahoma. *Geomorphology*, 2005, 70: 42-52.
- [14] Veiga G D, Spalletti L A. The Upper Jurassic (Kimmeridgian) fluvial-aeolian systems of the southern Neuquén Basin, Argentina. *Gondwana Research*, 2007, 11: 286-302.
- [15] Kadlec J, Kocurek G, Mohrig D, et al. Response of fluvial, aeolian, and lacustrine systems to Late Pleistocene to Holocene climate change, Lower Moravian Basin, Czech Republic. *Geomorphology*, 2015, 232: 193-208.
- [16] Jin Heling, Dong Guangrong, Liu Yuzhang, et al. The sandfield evolution and climatic changes in the middle course area of Yarlung Zangbo River in Tibet, China since 0.80 Ma B.P. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(2): 97-104. [靳鹤龄, 董光荣, 刘玉璋, 等. 0.8 Ma B.P.以来西藏雅鲁藏布江中游地区沙地演化和气候变化. *中国沙漠*, 1998, 18(2): 97-104.]
- [17] Cao Xinguang, Wang Jianli. The environment information recorded in Zhangjiawan loess since 230 ka BP. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2012, 34(4): 123-129. [曹新光, 王健力. 山陕峡谷张家湾 230 ka BP 以来黄土记录的环境信息. *西南大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(4): 123-129.]
- [18] Bureau of Hydrology and Water Resources in the Middle Reaches of the Yellow River. *Hydrology of the Middle Reaches of the Yellow River*. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2005. [黄河中游水文水资源局. *黄河中游水文*. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.]
- [19] deMenocal P B. Culture responses to climate change during the late Holocene. *Science*, 2001, 292: 667-673.
- [20] Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Variations of long-term Palmer drought index in recent 354 year in Yili based on tree-ring record. *Plateau Meteorology*, 2011, 30: 355-362.
- [21] Kang Shuyuan, Yang Bao, Qin Chun, et al. Extreme drought events in the years 1877-1878, and 1928, in the southeast Qilian Mountains and the air-sea coupling system. *Quaternary International*, 2013, 283: 85-92.
- [22] Huang Jianping, Ji Mingxia, Liu Yuzhi, et al. An overview of arid and semi-arid climate change. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2013, 9(1): 9-14. [黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 等. 干旱半干旱区气候变化研究综述. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 9-14.]
- [23] Gou Xiaohua, Deng Yang, Chen Fahu, et al. Tree ring based streamflow reconstruction for the upper Yellow River over the past 1234 years. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(33): 3236-3243. [勾晓华, 邓洋, 陈发虎, 等. 黄河上游过去 1234 年流量的树轮重建与变化特征分析. *科学通报*, 2010, 55(33): 3236-3243.]
- [24] Liu Tungsheng. *Loess and Environment*. Beijing: Science Press, 1985. [刘东生. *黄土与环境*. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [25] Rasmussen S O, Bigler M, Blockley S P E, et al. A framework for robust naming and correlation of past abrupt climatic changes during the recent glacial period based on three synchronised Greenland ice-cores. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 106: 14-28.
- [26] Wang Jian, Liu Zechuan, Jiang Wenying, et al. A relationship between magnetic susceptibility and grain-size and minerals, and their paleo-environmental implications. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(2): 155-160. [王建, 刘泽纯, 姜文英, 等. 磁化率与粒度、矿物的关系及其古环境意义. *地理学报*, 1996, 51(2): 155-160.]
- [27] Shu Peixian, Niu Dongfeng, Li Baosheng, et al. Grain size characteristics of modern dune sand and its significance in the Mu Us Sandy Land, China. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(1): 158-166. [舒培仙, 牛东风, 李保生, 等. 毛乌素沙地现代沙丘沙的粒度特征及其意义. *中国沙漠*, 2016, 36(1): 158-166.]
- [28] Ha Si, Zhuang Yanmei, Wang Lei, et al. Grain-size variation on a transverse dune and response to wind direction changes on southern edge of Mu Us Desert. *Progress in Geography*, 2006, 25(6): 42-51. [哈斯, 庄燕美, 王蕾, 等. 毛乌素沙地南缘横向沙丘粒度分布及其对风向变化的响应. *地理科学进展*, 2006, 25(6): 42-51.]
- [29] Wu Zheng. *Geomorphology of Wind-drift Sands and Their Controlled Engineering*. Beijing: Science Press, 2003. [吴正. *风沙地貌与治沙工程学*. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [30] Xie Wenyu. *Micrograph Atlas of Surface Texture Features of Quartz Sand in China*. Beijing: China Ocean Press, 1985. [谢文予. *中国石英砂表面结构特征图谱*. 北京: 海洋出版社, 1985.]
- [31] Wang Ying, Deonarine B. *Model Atlas of Surface Textures of Quartz Sand*. Beijing: Science Press, 1985. [王颖, 迪纳瑞]

- 尔 B. 石英砂表面模式图集. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [32] Yang Lirong, Yue Leping, Gong Hujun. The environmental implication from microscopic texture of eolian sand of Hulun Buir dune land centred on late last glacial maximum and Holocene. *Geographical Research*, 2015, 34(6): 1066-1076. [杨利荣, 岳乐平, 弓虎军. 呼伦贝尔沙地末次冰盛期晚期至全新世风成沙表面矿物特征及环境意义. *地理研究*, 2015, 34(6): 1066-1076.]
- [33] Ou Xianjiao, Li Baosheng, Jin Heling, et al. Sedimentary characteristics of paleo-eolian dune sands in Salawusu Formation of the Salawusu River valley. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(9): 965-975. [欧先交, 李保生, 靳鹤龄, 等. 萨拉乌苏河流域萨拉乌苏组沙丘砂沉积特征. *地理学报*, 2006, 61(9): 965-975.]
- [34] Hu Zhaochu, Gao Shan. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update. *Chemical Geology*, 2008, 253: 205-221.
- [35] Deng Hongwen, Qian Kai. *Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis*. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993. [邓宏文, 钱凯. *沉积地球化学与环境分析*. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993.]
- [36] Mao Guangzhou, Liu Chiyang. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(4): 338-342. [毛光周, 刘池洋. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(4): 338-342.]
- [37] Wen Qizhong, Diao Guiyi, Pan Jingyu, et al. Comparison of average chemical composition of loess in Loess Plateau with Clark values of crust. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(3): 225-231. [文启忠, 刁桂仪, 潘景瑜, 等. 黄土高原黄土的平均化学成分与地壳克拉克值的类比. *土壤学报*, 1996, 33(3): 225-231.]
- [38] Zhou Weijian, Li Xiaoqiang, Dong Guangrong, et al. The high-resolution peat record during Younger Dryas interval in desert-loess transition zone. *Science China (Series D)*, 1996, 26(2): 118-124. [周卫建, 李小强, 董光荣, 等. 新仙女木期沙漠/黄土过渡带高分辨率泥炭记录: 东亚季风气候颤动的实例. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(2): 118-124.]
- [39] Li Xiaoqiang, Zhou Weijian, An Zhisheng, et al. The palaeovegetation record of monsoon evolution in the desert-loess transition zone for the last 13 ka BP. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(8): 868-872. [李小强, 周卫建, 安芷生, 等. 沙漠/黄土过渡带 13 ka BP 以来季风演化的古植被记录. *植物学报*, 2000, 42(8): 868-872.]
- [40] Cheng Huizhong, Zhou Jie, Zhou Weijian. Monsoon climate in East Asia and desert change in eastern China during Younger Dryas period. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(3): 202-204. [陈惠忠, 周杰, 周卫建. Younger Dryas 时期东亚季风气候和中国东部沙区沙漠变化. *中国沙漠*, 1998, 18(3): 202-204.]
- [41] Yang Gensheng, Liu Yangxuan, Shi Peijun. Discussion on blown sand along the bank of Yellow River from Beichangtan to Hequ, Shanxi. *Journal of Desert Research*, 1987, 7(1): 43-54. [杨根生, 刘阳宣, 史培军. 黄河沿岸(北长滩—河曲段)风沙问题的初步探讨. *中国沙漠*, 1987, 7(1): 43-54.]
- [42] Bagnold R A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. 1941. Qian Ning, Lin Bingnan trans. Beijing: Science Press, 1959. [R A 拜格诺. *风沙与荒漠沙漠物理学*. 1941. 钱宁, 林秉南 译. 北京: 科学出版社, 1959.]

Age and provenance of Younger Dryas paleo-aeolian sand layers in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River

ZHANG Yuzhu^{1,2}, HUANG Chunchang³, CHEN Yinglu³, TAN Zhihai⁴, YANG Lirong²,
ZHANG Yunxiang², QIU Haijun¹, LIU Bo¹, ZHAO Fazhu¹

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. College of Tourism and
Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 4. College of Environmental
Sciences and Chemistry Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Fieldwork investigations were carried out in the Hukou-Longmen reach in the Jin-Shaan (Shanxi-Shaanxi) Gorges of the Yellow River. Paleo-aeolian sand layers were found interbedded in the Late Pleistocene and Holocene loess-soil profile—Beisangyu profile (BSY). Analytical results, including field investigation, magnetic susceptibility, grain-size distribution, surface textures of quartz sand, and geochemical elements, indicate that the paleo-aeolian sands are medium-sized sandy fine sands, which were formed in a dry and windy climate. And the extreme drought events recorded by paleo-aeolian sand layers were dated to 12.5-11.6 ka, with optically stimulated luminescence (OSL) dating method. The extreme drought event coincided with the Younger Dryas that was recorded by the lacustrine sediment profiles and the aeolian loess-soil profiles in the desert/loess transitional zone in the adjacent region. The paleo-aeolian sands were sourced mainly from ancient riverbed sands in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River. The Jin-Shaan Gorges is situated in a semi-arid zone with a temperate continental monsoonal climate. The region responds sensitively to global change. During the Younger Dryas period, the region is in an extremely dry and cold environment, with strong winter monsoon and weak summer monsoon. The water level of the Yellow River will decline obviously. Consequently, floodplains and channel bars in the river are exposed in a broad area, and a large quantity of sand material drifts to the banks of the river under the force of the wind, which becomes the main source of the paleo-aeolian sand layer in the platforms on the gentle slopes on both sides of the river valley. These results would be of great significance in further understanding the temporal regularities of the extreme drought event and the relations between extreme drought event and monsoonal climate change.

Keywords: Yellow River; Jin-Shaan Gorges; Younger Dryas; paleo-aeolian sand layer; OSL dating