

山东埠西黄土剖面沉积特征及古气候环境意义

徐树建¹, 丁新潮^{1,2}, 倪志超^{1,2}

(1. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院/水土保持与环境保育研究所, 临沂 276005;

2. 山东师范大学人口·资源与环境学院, 济南 250014)

摘要: 对山东济南章丘埠西黄土剖面进行了系统的野外调查, 并对山东章丘埠西黄土剖面进行了粒度、磁化率以及光释光测年等指标研究分析, 结果表明: ① 根据粒度测量数据和粒度参数变化特征, 并运用萨胡判别公式对其沉积环境进行判别, 可知山东埠西剖面黄土沉积主要为风成沉积。通过粒度—标准偏差方法提取的环境敏感粒级分别为 $7.08\sim 8.91\ \mu\text{m}$ 和 $39.81\sim 50.12\ \mu\text{m}$; ② 磁化率变化与不同粒级百分含量的变化之间具有明显的相关性, 其中低频磁化率变化范围为 $32.38\times 10^{-8}\sim 138.46\times 10^{-8}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$, 高频磁化率在 $30.62\times 10^{-8}\sim 123.31\times 10^{-8}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ 之间变化, 其变化特征一定程度上反映了埠西黄土剖面形成时的古气候环境信息; ③ 结合光释光年代的测量数据与前人的研究成果, 可将该黄土剖面划分为3个黄土层和3个古土壤层, 该剖面记录了末次冰期以来该区域古气候环境的变化历史过程。

关键词: 山东埠西; 黄土; 粒度; 磁化率; 光释光

DOI: 10.11821/dlxb201411011

中国黄土高原巨厚的风尘堆积序列, 记录了晚新生代以来亚洲内陆干旱化过程和东亚季风的演化历史^[1-5], 被视为研究区域与全球气候环境变化的天然档案^[6-7]。位于中国黄土带最东端的山东黄土也灵敏地记录了气候系统的变化, 对古气候环境的重建具有重要意义, 山东黄土可以分为两大区域: 渤海湾滨海与岛屿区和鲁中山前区^[8-10]。

早在20世纪80年代, 刘东生^[1]就对山东黄土进行了总体性的描述, 指出在末次冰期最盛时期山东半岛和滨海部分地区除了接受大量从西北以尘暴形式搬运来的粉尘外, 还接受了从东部沿海出海露架吹来的粉尘, 这种观点已被大多数研究者所接受^[9-12]。20世纪80年代末期以来, 众多学者对山东黄土进行了广泛的研究, 使我们从整体上认识和理解山东地区黄土成因内涵, 曹家欣等^[9]对山东庙岛群岛地区黄土进行了细致调查研究, 研究认为该群岛黄土堆积与冰期气候控制的低海面时期相吻合; 李培英等^[10]通过对粒度指标的分析, 对发育较好的青州黄土成因及沉积环境进行了探索, 认为中更新世中后期本期气候开始转冷, 到末次冰期气候变得更为干冷, 到全新世气候向现代气候转变, 但在转暖的过程中有短期回冷事件; 于洪军^[8]对山东半岛北部沿海和水下“陆架黄土”进行了系统的成因研究, 并提出了末次冰期陆架荒漠化和山东黄土的风成近源成因观点。近年来, 随着粒度、磁化率以及测年等分析技术的发展, 众多学者对山东地区黄土进行了更系统、更精细的研究, 徐树建^[12]通过对山东庙岛群岛长岛黄土粒度的精细研究, 并与兰州砂金坪剖面进行对比分析, 认为末次冰期气候存在6次气候变冷、渤海湾海面下降和6次气候变暖、渤海湾海面上升的事件。

收稿日期: 2014-08-09; 修订日期: 2014-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172160; 41472159); 国家自然科学基金国际合作交流项目 (41210304041; 41310104020) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41172160; No.41472159; Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China, No.41210304041; No.41310104020]

作者简介: 徐树建 (1967-), 男, 山东临沂人, 教授, 硕士生导师, 从事风尘堆积与区域环境演变研究。

E-mail: xushujian1967@163.com

关于黄土研究的环境代用指标,其中粒度和磁化率经过中外学者大量的研究,已经成为了研究黄土成熟的古环境指标,粒度变化指示了搬运粉尘风动力变化以及沉积环境变化,是晚新生代气候环境变化较为敏感的替代性指标^[13-14],而磁化率能很好地反映很多古气候波动的细节,是区域环境变化的良好的信息载体^[15-18]。近年来测年技术越来越多的应用到黄土剖面的研究中,精确地测年数据逐渐成为研究黄土不可或缺的重要数据指标,而光释光测年技术已经成为第四纪沉积物测年的一个主要方法^[19-20]。

山东黄土对研究山东区域古气候环境具有重要的指示作用,虽然前人对山东黄土已经做了一定研究,但是由于缺乏精确的测年数据,山东黄土成因及其所蕴含的古气候环境变化信息等方面的研究尚不成熟。因此,在进行了系统野外调查的基础上,本文选取山东章丘埠西剖面进行研究,对该剖面的粒度及磁化率特征进行研究分析,并结合光释光(OSL)测年技术对该剖面所指示的古气候环境进行初步的探讨,以期得到第四纪末期以来该剖面所在区域气候环境的变化过程以及变化特征。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

山东章丘位于黄河东南方向,三面为低山丘陵区,地势比较低洼(图1)。埠西剖面位于章丘埠村镇埠西村,地理位置:36°23'21.37"N, 117°16'42.60"E,海拔:107.4 m。剖面点原为河流阶地,由于人工挖土,致使剖面出露,去除表土后剖面出露厚度1710 cm,未见底。剖面所在地区属于暖温带季风气候,降水集中,雨热同期,年平均降水量一般在500~900 mm之间,剖面黄土组成物质以粉砂为主,质地均一,垂直节理发育,在深度为910~950 cm范围内可见发育很好的钙结核层,结核直径为5~60 mm,质地坚硬。

根据前人的研究资料^[9-11, 21],并结合系统的野外实地考察,在山东各地剖面中自西向东选取了济南平阴龙桥,淄博齐陵四女坟,潍坊青州云门,潍坊朱里,烟台蓬莱林格庄和南长山岛仙境源进行地层剖面对比(图2),山东黄土出露以潍坊青州云门山傅家庄剖面最为典型,厚30 m以上,地层划分可达到L9,其它山东黄土剖面(如庙岛群岛黄土,莱州湾黄土等)厚度一般在几米到十几米之间不等,均为末次冰期以来形成的黄土堆积,据此可以判断埠西黄土剖面为末次冰期以来的沉积。对剖面以5 cm间隔取样,共采集粒度及磁化率样品各344个,在剖面厚度50 cm, 110 cm, 210 cm, 310 cm, 410 cm, 510 cm,

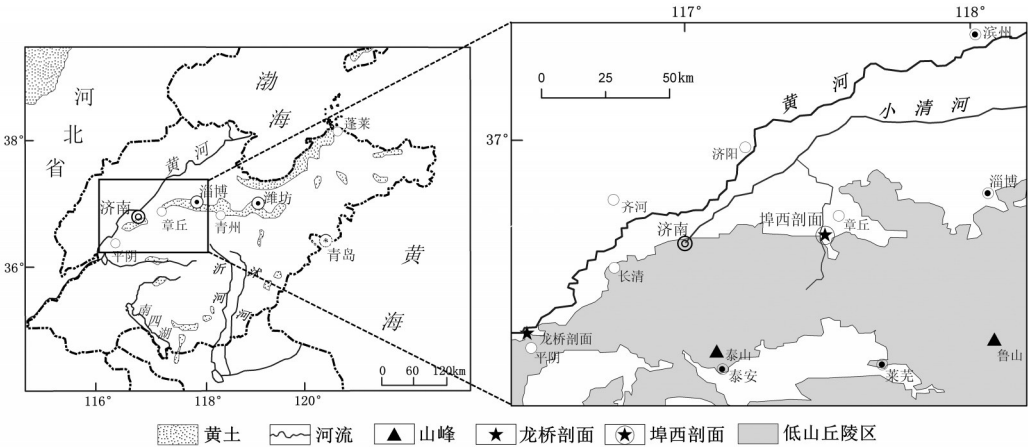


图1 山东章丘埠西黄土剖面位置图

Fig. 1 The sites of Buxi loess section in Buxi section in Zhangqiu City, Shandong Province

610 cm, 760 cm, 960 cm 和 1310 cm 处避光采集光释光样品 10 个。

1.2 样品的测试

粒度样品的测量在山东省水土保持与环境保育重点实验室进行。取 0.2~0.4 g 的样品至 100 ml 的烧杯中, 加入 10ml 双氧水 (H₂O₂) 加热去除有机质, 烧至变清且没有细小泡沫时; 再加入 10 ml 的 10% 盐酸 (HCl) 溶液并煮沸以去除碳酸盐, 然后给烧杯注满蒸馏水, 静置 12 小时后去除清液以去掉 Ca²⁺、H⁺ 等絮凝性较强的离子; 最后加入 10ml 的 10% 的分散剂六偏磷酸钠 (NaPO₃)₆, 用超声波震荡 10 min 后进行测量。经前处理后粒度样品在英国生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪上测量, 粒度测量范围为 0.02~2000 μm, 重复测量误差小于 2%, 说明样品的处理方法可行, 粒度数据可靠。

磁化率的样品测量同样在山东省水土保持与保育重点实验室完成。测定时, 首先将磁化率样品风干后, 在 40 °C 温度下烘干一周, 经干燥处理的样品在不损伤颗粒结构的前提下进行研磨; 然后将将制备好的样品装满容积为 8 cm³ (V, 单位为 cm³) 的磁学专用样品塑料盒, 压实、密封; 再采用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率测量系统, 测定每一样品的低频 (0.47 KHz) 容积磁化率 K_{lf}、高频 (4.7KHz) 容积磁化率 K_{hf}, 每一样品重复测试 3 次, 取其平均值, 同时在电子天平上称取每一样品的质量 (W, 单位为 g), 计算其平均密度大小。

光释光年代样品的测量是在山东省地震工程研究院土力学与年代学实验室完成, 光释光测量仪器为 Risø TL/OSL-DA-20, 采用的方法是单片再生计量法。

2 结果分析

2.1 粒度特征

沉积物的粒度特征是恢复古气候环境的重要代用指标^[22], 包括粒度分布参数特征、粒度组分和沉积环境分析以及环境敏感因子的提取。粒度分布参数是描述粒度分布特征的数值, 与沉积物形成环境具有很好的相关性^[23], 其中平均粒径 (Mz) 可以反映沉积物形成动力以及物质来源的综合情况, 是全样粒度组成的总体粗细状况^[24]; 标准差 (σ₁) 反映数据离散趋势最常用重要指标, 可以反映观测值的分选程度; 偏度 (SK1) 可以判别粒度频率分布的对称性; 峰态 (KG) 可以衡量分布曲线的峰凸程度。粒度组分特征, 表述碎屑类沉积物特征的重要指标之一, 可以用以追溯沉积物形成的力学性质、物质来源、输送介质和沉积环境等^[25]。但是由于沉积物的沉积动力与物质来源的复杂性, 沉积物普遍表现出多成因组分混合的特点^[26], 而沉积物的全样粒度特征只是沉积动力、物质来源以及古气候环境变化的综合反映^[27]。并非所有的粒级组分都对环境敏感, 不同的粒级组分对不同的环境变化的指示作用也不同。因此, 环境敏感粒度组分的提取对研究沉积物环境变迁具有重要的意义。

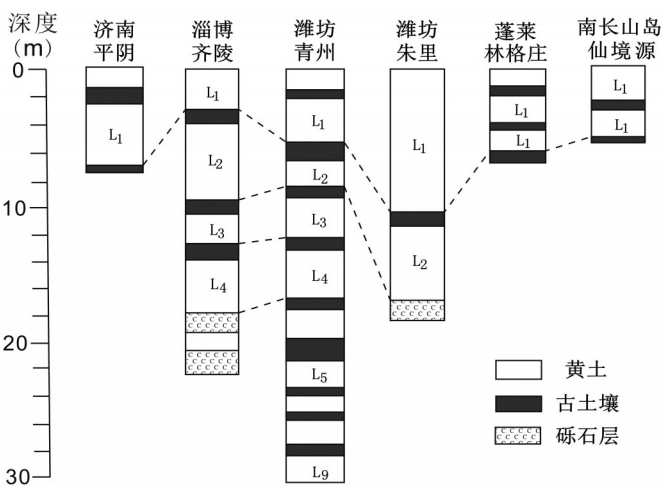


图2 山东省各地黄土地层剖面对比图
Fig. 2 Loessial strata profiles of Shandong Province

2.1.1 粒度组成特征 根据福克和沃德样品统计值图解法的计算公式分别计算了样品的平均粒径 Mz 、标准差 σ_1 、偏度 SK_1 和峰态 K_G (图 3a)。该剖面平均粒径 (Mz) 在 $5.19\sim7.05\phi$ 范围内变化, 平均粒径平均值为 5.92ϕ 。样品标准差 (σ_1) 变化范围为 $1.16\sim1.81$, 属于分选较差的类型。偏度 (SK_1) 变化范围为 $-0.37\sim0.13$, 以负偏样品居多, 即多数样品平均值将向中位数较粗方向移动。峰态 (K_G) 值为 $0.77\sim1.28$, 说明剖面粒度频率分布曲线包括了从平坦到中等再到比较尖锐三个等级^[28]。本文将粒度组分为砂粒 ($> 63\mu m$)、粉砂粒 ($5\sim63\mu m$) 和黏粒 ($< 5\mu m$), 剖面粒度是以粉砂为主, 其含量在 $65.35\%\sim85.89\%$ 之间, 平均值为 78.68% ; 其次是黏粒含量, 约占总含量的 $6.87\%\sim33.76\%$ 之间, 平均值为 14.86% ; 砂粒含量最低, 变化范围仅在 $0.71\%\sim15.69\%$ 之间, 平均值为 6.46% 。与蓬莱林格庄 (砂粒含量的变化范围为 $3.50\%\sim24.45\%$, 平均值为 13.28% ; 黏粒含量变化范围为 $6.33\%\sim16.51\%$, 平均值为 11.46%) 以及山东济南平阴剖面 (砂粒含量在 $10.7\%\sim44.7\%$ 之间; 黏粒百分含量变化范围为 $10.9\%\sim25.4\%$) 相比, 粒径明显比较细 (图 3b), 剖面堆积比较厚。BX 剖面与山东其他剖面黄土形状存在极大的一致性, 又有其特殊性, 因此该剖面对研究山东区域古气候环境变化具有重要意义。

粒度参数特征可以反映沉积物的形成环境^[29], 萨胡通过对大量的砾石、沙、粉沙等碎屑物质进行采样分析, 建立了风成、海滩、浅海、河流 (三角洲) 以及浊流五种环境间的判别公式^[28, 30]。用萨胡公式对埠西黄土剖面的沉积环境进行判别: $Y = (\text{风和海滩}) = -3.5688Mz + 3.7016\sigma_1^2 - 2.0766SK_1 + 3.1135K_G$ (若 $Y < -2.7411$, 说明样品形成于风成沉积环境; 若 > -2.7411), 说明是样品形成环境是海滩环境。将所计算的粒度参数 (Mz 、 σ_1 、 K_1 和 K_G) 带入该公式, 结果显示 (图 3c): 样品 Y 值变化范围为 $-4.415\sim-16.522$, 均小于 -2.7411 ,

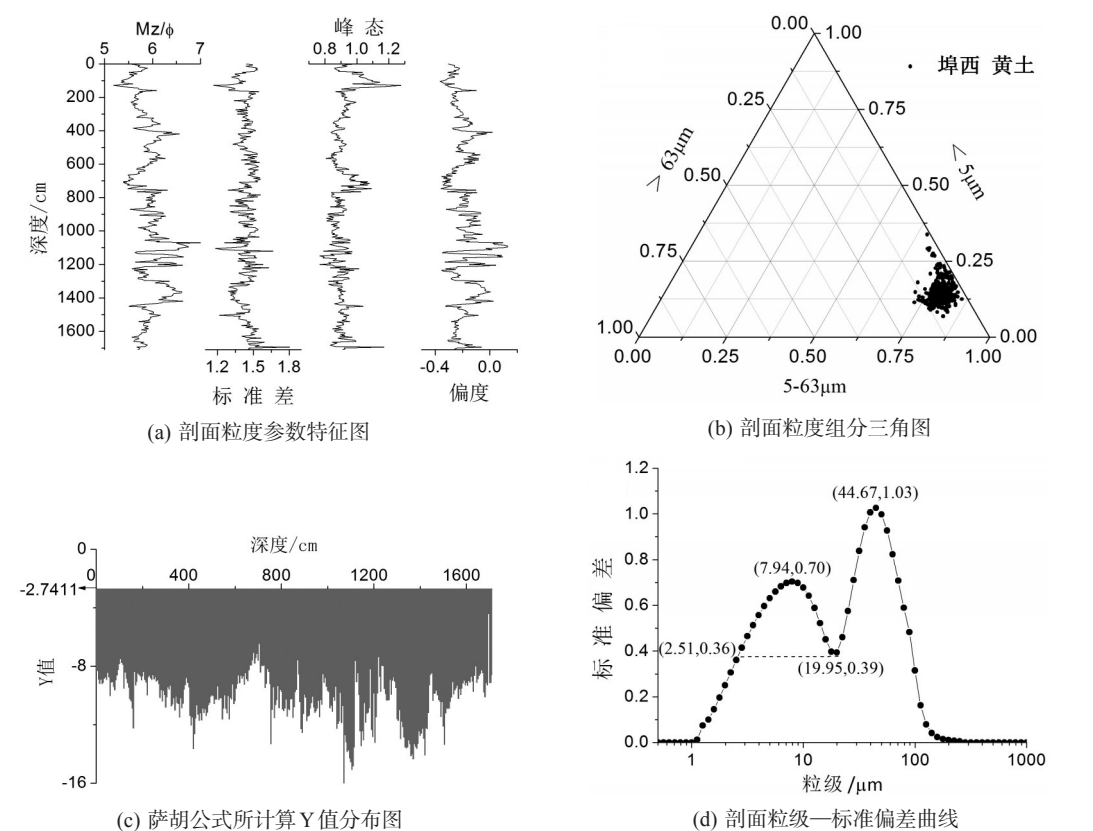


图 3 山东章丘埠西剖面粒度特征分布图

Fig. 3 Grain size characteristics of Buxi section in Zhangqiu City, Shandong Province

说明该剖面为风成堆积物。因此,该黄土剖面沉积物的沉积特征可以指示冬夏季风的变化。

2.1.2 环境敏感粒度组分提取 环境敏感因子提取方法主要有 Weibull 函数为拟合函数^[31]、端元模型法^[32]、主成分因子分析法以及粒级—标准偏差法等^[33]。孙有斌等^[32]利用端元粒度模型法和粒级—标准偏差法提取了冲绳海槽以及琉球海沟两个重力柱状沉积物的环境敏感粒度组分,结果显示所获得粒度组分个数相同。陈桥等^[33]以烟台四十里湾3个柱状沉积物粒度数据为基础,对比分析粒级—标准偏差和主成分因子分析两种方法提取的环境敏感粒级,结果显示两种方法提取的环境敏感粒级具有较好的一一对应关系,表明两种方法具有一致性和兼容性,即粒级—标准偏差法和主成分因子分析法所都能提取相同环境变化信息,对相同环境变化信息具有较好的指示意义。

因此,本文采取粒级—标准偏差进行环境敏感因子的提取。粒级—标准偏差法是依据样品粒度的每一粒级所对应的标准偏差值的大小变化来提取环境敏感粒级^[34]。标准偏差反映的是数据离散程度的指标^[35],其值越大表明观测值的离散程度越大,对环境变化的响应越敏感,对古环境变化信息具有较好的指示意义。环境敏感因子的提取结果见图3d,图中较高标准偏差值所对应的粒级即为对沉积环境敏感的粒度粒级,分别为:7.08~8.91 μm 和39.81~50.12 μm 。结合前人的研究^[14, 36],超细颗(<2 μm)粒受成壤作用影响较大,而较粗颗粒不如粗颗粒(>30 μm)的百分含量作为冬季风的指示更合适。所以,对于埠西剖面,可以提取细粒径(2.51~8.91 μm)含量和粗粒径(>50.12 μm)含量作为环境敏感粒度指标进行讨论分析。

2.2 磁化率特征

磁化率是物质被磁化难易程度的一种度量,大致反映了样品中亚铁磁性矿物的富集程度^[37],现在多数学者普遍认为黄土磁化率的增强与气候的相对暖湿—冷干有关,气候暖湿,成壤作用增强,磁化率增强;反之,磁化率低,故其可以作为成壤强度和夏季风强度的指标^[18, 36-40]。根据样品的高频和低频容磁化率测量结果,分别计算每一样品的高频质量磁化率 χ_{hf} ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)、低频质量磁化率 χ_{lf} ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)和频率磁化率 χ_{rd} (%)。其中,质量磁化率 χ 反映样品中磁性矿物含量的多少,通常与样品中含有磁性矿物种类、粒度大小及含量多少有直接关系,其计算公式为: $\chi = K/\rho$,公式中 ρ 为样品的平均密度, $\rho = W/V$,单位为 kg/m^3 。频率磁化率 χ_{rd} 反映样品中超顺磁性的亚铁磁矿物超细晶粒(粒径<0.03 μm)的存在与否及其含量变化,其计算公式为: $\chi_{\text{rd}} = (\chi_{\text{lf}} - \chi_{\text{hf}}) / \chi_{\text{lf}} \times 100\%$ 。

因为高、低频磁化率具有很好的一致性,所以,可以用低频质量磁化率代表质量磁化率进行分析、讨论和对比。频率磁化率与高、低频磁化率同样具有一定的相关性,但是在一些时段存在一定差异。从整体剖面来看,高频磁化率的变化范围为 $30.62 \times 10^{-8} \sim 123.31 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为: $69.47 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$;低频磁化率的变化范围为 $32.38 \times 10^{-8} \sim 138.45 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为: $75.57 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,高频与低频质量磁化率的变化基本相当。频率磁化率变化范围为-11.43%~15.88%,平均值为7.66%。从图中可以看出,低频质量磁化率曲线,与深海氧曲线具有很好的对应关系,除了一些时段比较小的变化外低频磁化率曲线呈明显的“三峰两谷”的变化,这与粗颗粒百分含量曲线所反映的峰值与谷值基本相吻合。因此,可以认为该剖面在形成过程中气候经历了明显的干湿冷暖的变化,并且剖面形成过程中夏季风随气候暖湿干冷的变化经历了强弱的交替性变化。为剖面层次的划分提供了重要的依据。

2.3 光释光(OSL)年代测定结果

2.3.1 基本原理 光释光(optically stimulated luminescence, OSL)测年是在热释光测年研究的基础上发展起来的,已经逐渐成为了第四纪沉积物测年的重要方法^[41-43]。其测年范围可从几十年到十几万年^[44-45],具有测年范围大、测年物质丰富、对沉积物的直接定年、

测年精度较高等明显优势^[46]。光释光测年的基本原理就是将经历最后一次曝光的沉积物重新埋藏之后接收的辐射总量除以接收的速率速率，可以得出埋藏时间，即沉积年代。光释光的测年物质主要是石英和长石，对于沉积物光释光测年，若沉积物在沉积过程中石英、长石等矿物的光释光信号被晒退归零，同时矿物在沉积后基本处于恒定的电离辐射场中(即环境辐射剂量率恒定)，那么，石英、长石等矿物的光释光信号强度与矿物所吸收的电离辐射剂量的时间成正相关的函数关系，沉积地层的年龄就可通过测定石英、长石等矿物天然光释光信号强度所对应的电离辐射剂量即等效剂量 (DE) 和环境剂量率 (D) 来获得，简要表示如下：

$$\text{年龄(A)} = \text{等效剂量 (D}_E\text{)}/\text{环境剂量率 (D)}$$

2.3.2 样品的测定与结果

(1) 等效剂量 (D_E) 测定 样品等效剂量的测试的丹麦 Risoe DA-20-C/D型热/光释光自动测量系统上完成，样品的天然释光等效剂量 (即古剂量) 测定采用粗颗粒石英矿物测试，光源选择蓝光激发。采用单片再生法 (SAR) 获得所有样品的等效剂量。单片再生法在计算等效剂量时，选取前 1.6s (前 10 个通道积分值) 的释光信号值，进行线性或指数拟合建立光释光信号的剂量响应曲线即光释光生长曲线，确定样品的等效剂量 (D_E) 值。

(2) 境剂量率 (D) 测定 环境剂量率是释光测年的重要参数之一。样品所吸收的环境辐射剂量是由其本身及周围沉积物中放射性核素 (238U、232Th 和 40K) 的α、β和γ衰变产生的电离辐射所提供的，同时也有宇宙射线的少量贡献。样品 U、Th、K 及其衰变子体对环境剂量率的贡献通过等离子体质谱仪及全谱直读等离子体发射光谱仪测量获得。由于前处理过程中 HF 已经刻蚀掉受α照射的石英表层和少量的β辐射，计算环境剂量时不考虑α射线的贡献，同时计算β辐射剂量时乘以系数 0.9。因为水对β和γ辐射具有一定的吸收作用，样品埋藏层的含水量对样品的环境剂量的影响也不容忽视，如果忽略含水量，环境剂量率将偏大，其最终年龄结果偏小，在计算时均考虑了含水量和少量宇宙射线对样品的影响，保证了最终结果的准确性。

(3) 测年结果 样品的光释光测年结果的可靠性在很大程度上与样品的释光性质有关^[19]。单片再生剂量法 (SAR)，要求所测样品光释光信号以快组为主，并且释光信号未饱和^[47-49]。样品光释光信号符合这样的要求，即样品光释光信号容易被阳光晒退且未达到饱和。因此，样品适合应用单片再生剂量法进行等效剂量测量，保证了数据的准确性。在所测结果中，所有光释光样品数据均没有倒置现象且基本连续，与地层层序一致，说明这些年龄数据应该是可靠的。埠西剖面光释光样品年龄值介于 (1.0±0.1)~ (39.2±1.8) ka 之间 (表 1)，说明该黄土剖面是形成于晚更新世和全新世的沉积物。

表 1 山东章丘埠西剖面样品的 OSL 测年结果

Tab. 1 OSL dating results of the samples from Buxi section in Zhangqiu City, Shandong Province

样品编号	野外样品 编号	埋深 (m)	K ₂ O (%)	Th (ppm)	U (ppm)	含水量 (%)	环境剂量率 (Gy/ka)	等效剂量 (Gy)	估计释光年龄 (ka)
14-120	osl-1	0.5	2.4	12.5	2.4	11	4.4±0.5	4.4±0.5	1.0±0.1
14-121	osl-2	1.1	2.3	14.9	3.0	8	5.2±0.6	68.7±5.0	13.2±1.0
14-122	osl-3	2.1	2.4	11.2	2.1	15	4.4±0.5	62.7±15.1	14.1±3.4
14-123	osl-4	3.1	2.5	12.8	2.4	15	4.8±0.5	69.5±5.6	14.4±1.5
14-124	osl-5	4.1	2.7	13.9	2.3	20	5.0±0.5	84.7±7.6	17.1±1.6
14-125	osl-6	5.1	2.6	13.6	2.3	21	5.0±0.5	95.7±13.3	19.4±2.7
14-126	osl-7	6.1	2.4	11.5	2.1	15	4.7±0.5	112.7±15.4	24.1±3.3
14-127	osl-8	7.6	2.5	10.5	1.9	21	4.4±0.4	131.7±5.8	30.0±3.5
14-128	osl-9	9.6	2.3	12.7	2.3	17	4.6±0.5	159.7±5.6	34.8±1.2
14-129	osl-10	13.1	2.6	13.9	2.7	23	5.1±0.5	203.1±8.8	39.2±1.8

3 讨论

黄土剖面粒度与磁化率变化曲线对气候冷暖干湿以及季风强度的变化具有重要的指示作用,而光释光技术除可以提供沉积剖面的年龄框架外,还可以根据年龄—深度模式,计算出样品的长期堆积速率,沉积物的堆积速率也可提供样品沉积古环境气候的一些信息^[45]。上述剖面在形成过程中沉积速率具有明显的变化,说明剖面沉积过程中的古环境气候发生过明显的变化,沉积动力以及物质来源比较复杂。

根据粒度、磁化率特征以及光释光技术所测得的一系列样品测年数据,该剖面的堆积可以分成明显的三期(图4),与SPECMAP时间表几乎相同:

剖面顶部至100 cm深度,年代结果在12 ka BP前后范围内。与深海氧同位素第1阶段(MIS-1)相对应,末次冰期的冰后期,为全新世黄土。顶部0~50 cm为现代耕作层不做讨论。在50~100 cm之间,为古土壤层,见植物根系。粒度成分以粉砂(5~63 μm)为主,平均含量为80.93%,低频和高频磁化率值比较高,平均值分别为:87.69×10⁻⁸ m³ kg⁻¹和78.72×10⁻⁸ m³ kg⁻¹,这表明气候暖湿,夏季风增强,古土壤比较发育。

深度100~740 cm范围内为剖面堆积的第二阶段,年代结果在11~28 ka BP左右的范围内。与深海同位素第2阶段(MIS-2)相对应,末次冰期冰盛期(LGM),该阶段为马兰黄土堆积。粒度分析结果显示,该阶段粒度变细,平均粒径平均值减小到5.800,无水平节理,具有典型风尘沉积特征。磁化率呈现较低值,该阶段样品低频磁化率和高频磁化率平均值为:61.13×10⁻⁸ m³ kg⁻¹和58.62×10⁻⁸ m³ kg⁻¹,反映了晚更新世晚期气候总体上寒冷干旱,降水量较少,冬季风比较强盛,剖面沉积速率比较大,无论是西北内陆还是渤海陆架所带来的沙尘物质,都得到很好的堆积,黄土未经过明显的风化成壤改造作用。

深度740 cm至剖面底,年代结果在28~54 ka BP左右的范围内。与深海氧同位素第3a和3b阶段(MIS-3a和MIS-3b)相对应,作者认为这一阶段气候具有冷暖干湿的变化,并不

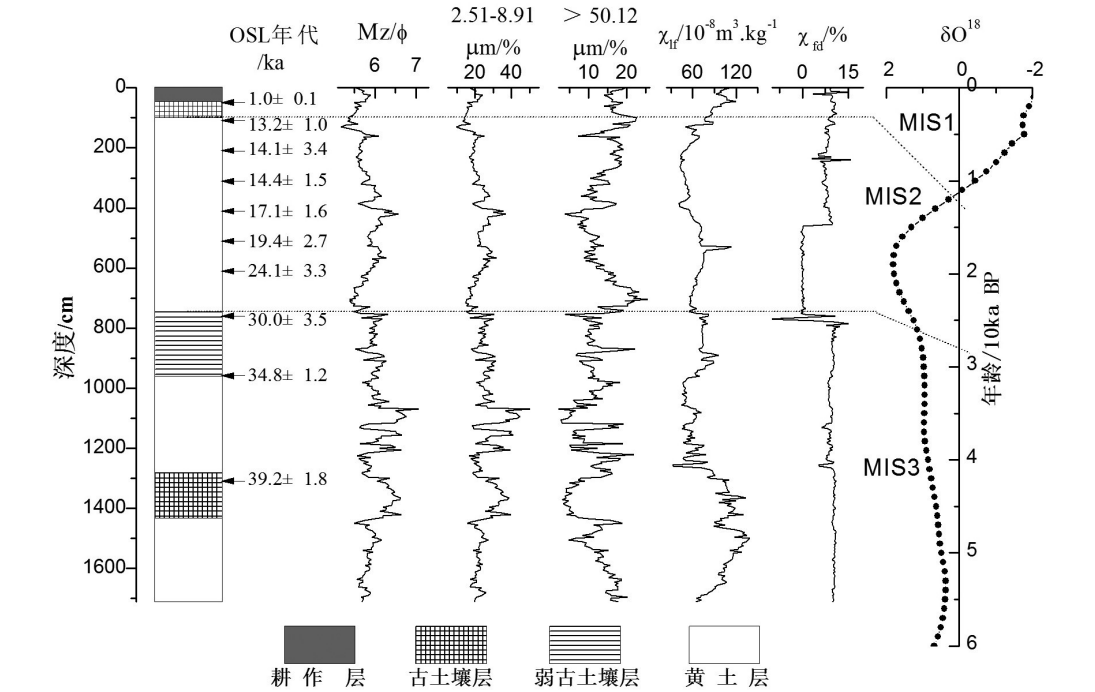


图4 埠西剖面沉积记录与深海氧同位素对比
Fig. 4 Comparison of records between Buxi section and SPECMAP

应该将该阶段全部划归为暖湿的大间冰期。通过对粒度和磁化率环境代用指标,结合 OSL 测年结果的综合分析,认为剖面又可细分为 2 个黄土层、1 个古土壤层和 1 个弱古土壤层。(1) 在剖面深度 740~950 cm 之间,为弱古土壤层。平均粒径平均值为 5.97ϕ ,低频和高频磁化率平均值分别为: $75.12 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 和 $68.588 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,说明黄土经过了一定的成土改造作用,该时段气候属于弱湿温期;(2) 深度 950~1300 cm 之间,该层为黄土层,粒度变粗,砂粒含量平均值增大到 5.37%,低频和高频磁化率平均值分别减小为 $59.18 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 、 $53.74 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 。反映了该时期气候寒冷干旱,冬季风强烈,黄土并没有经过明显的成土作用,夏季风较弱;(3) 深度 1300~1450 cm 之间,为古土壤层,粒度变细,砂粒物质 ($>63 \mu\text{m}$) 含量的平均值减少到 2.93%,平均粒径的平均值增大为 6.27ϕ ,并且磁化率值在末次冰期中的沉积中最高。表明该时期气候非常的非常暖湿,湿热的气候使得黄土经过了强烈的成壤改造作用,形成古土壤;(4) 深度 1450~1710 cm 范围内,为黄土层。砂粒物质 ($>63 \mu\text{m}$) 逐渐增加,平均粒径平均值减小为 5.83ϕ 。该时期气候寒冷干旱,冬季风比较强烈,成土作用非常微弱。

BX 剖面粒度特征和 OSL 测年结果显示:图 2 与图 4 对比可知,该剖面黄土堆积与山东其他剖面相比沉积比较厚,沉积速率比较快,而一定区域内气候条件变化过程基本相同,根据物源距离越近沉积速率越快的规律,说明该剖面的沉积物源不同于山东地区其它剖面,沉积物近源物质贡献大于远源物质;但是该剖面沉积物的中值粒径变化范围为 $9.22 \sim 30.43 \mu\text{m}$,平均值为 $19.40 \mu\text{m}$,与蓬莱林格庄剖面(中值粒径变化范围为 $13.74 \sim 36.12 \mu\text{m}$,平均值为 $22.93 \mu\text{m}$)、潍坊朱里剖面(中值粒径在之间 $68.32 \sim 86.88 \mu\text{m}$,平均值为 $77.98 \mu\text{m}$) 和济南平阴龙桥剖面($25.51 \sim 56.83 \mu\text{m}$, $38.04 \mu\text{m}$) 相比要细得多,这与物源距离越近沉积物粒径越粗沉积速率越快的规律不相吻合;从图 1 可知, BX 剖面三面均为低山丘陵区,地势比较低洼,有利于沉积物沉积,且临近黄河。综上所述,我们做出了这样的推测:该剖面黄土沉积有来自于黄河岸滩的二次沉降。这还需要进一步的研究验证。

4 结论

通过对章丘埠西的野外勘察、剖面取样、室内试验分析,并对粒度、磁化率特征以及 OSL 测年结果进行分析,探讨了剖面形成过程的古气候环境变化,得到以下结论:

(1) 运用萨胡公式对该剖面的沉积环境进行判别,可知该黄土剖面形成环境主要是风成沉积。并采用粒级一标准偏差提取的该剖面的环境敏感粒级为 $7.08 \sim 8.91 \mu\text{m}$ 和 $39.81 \sim 50.12 \mu\text{m}$,提取作为该剖面的环境敏感因子指标。

(2) 由于低频 (χ_{lf}) 和高频质量磁化率 (χ_{hf}) 具有很好的一致性,因此可用低频质量磁化率 (χ_{lf}) 代替高频质量磁化率 (χ_{hf}),而低频质量磁化率 (χ_{lf}) 变化曲线与深海氧同位素具有很好的对应关系,指示了该剖面形成过程中气候的暖湿—冷干的变化。

(3) 按深海氧同位素阶段对该剖面进行相对应,该剖面大致可分为三个阶段,每个阶段所反映的沉积古环境气候不同。其中第三阶段又可细分为 2 个黄土层和 2 个古土壤层,说明 MIS3 阶段气候具有明显的冷暖干湿变化,该时期并不都是暖湿的间冰期。

参考文献 (References)

- [1] Liu Dongsheng. Loess and Environment. Beijing: Science Press, 1985: 191-207. [刘东生. 黄土与环境. 北京:科学出版社, 1985: 191-207.]
- [2] An Zhisheng, Liu Tungsheng, Lu Yanchou et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China. Quaternary International, 1990, 7/8: 91-95.
- [3] Chen Mingyang. The evolution of Chinese aeolian deposits and global aridification. Quaternary Sciences, 1991, (4):

- 361-372. [陈明扬. 中国风尘堆积与全球干旱化. 第四纪研究, 1991, (4): 361-372.]
- [4] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*, 2001, 411(6833): 62-66.
- [5] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416(6877): 159-163.
- [6] Sun Donghuai, Lu Huayu. Grain-size and dust accumulation rate of Late Cenozoic aeolian deposits and the inferred atmospheric circulation evolutions. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 251-262. [孙东怀, 鹿化煜. 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. 第四纪研究, 2007, 27(2): 251-262.]
- [7] Wen Qizhong et al. *Geochemistry of Chinese Loess*. Beijing Science Press, 1989: 1-285. [文启忠等著. 中国黄土地球化学. 北京: 科学出版社, 1989: 1-285.]
- [8] Yu Hongjun. A new exploration on the origin of loess in the shelf area of the eastern China seas. *Quaternary Science*, 1999, 7(4): 366-372. [于洪军. 中国东部陆架黄土成因的新探索. 第四纪研究, 1999, 7(4): 366-372.]
- [9] Cao Jiaxin, Li Peiying, Shi Ning. The loess of Miaodao Islands of Shandong. *Science in China: Series B*, 1987, 17(10): 1116-1123. [曹家欣, 李培英, 石宁. 山东庙岛群岛的黄土. 中国科学: B辑, 1987(10): 1116-1123.]
- [10] Liu Lejun, Li Peiying, Wang Yongji. The grain-size properties and genesis of loess in central Shandong Province. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(1): 81-86. [刘乐军, 李培英, 王永吉. 鲁中黄土粒度特征及其成因探讨. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(1): 81-86.]
- [11] Zhang Zulu, Xin Liangjie, Nie Xiaohong. A summary of loessial researches in Shandong. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(6): 746-752. [张祖陆, 辛良杰, 聂晓红. 山东地区黄土研究综述. 地理科学, 2004, 24(6): 746-752.]
- [12] Xu Shujian. Grain size characteristics and its indications of loess in Miaodao Islands, Shandong Province. *Marine Sciences*, 2008, 32(12): 60-63. [徐树建. 山东庙岛群岛黄土的粒度特征及其环境意义. 海洋科学, 2008, 32(12): 60-63.]
- [13] Ding Zhongli, Ren Jianzhang, Liu Dongsheng et al. The mechanisms of the millennium-scale irregular change of the late Pleistocene monsoon-desert system. *Science in China: Series D*, 1996, 26(5): 386-391. [丁仲礼, 任剑璋, 刘东生, 等. 晚更新世季风-沙漠系统千年尺度不规则变化及其机制问题. 中国科学: D辑, 1996, 26(5): 386-391.]
- [14] Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-paleosol deposit in Chinese Loess Plateau. *Science in China: Series D*, 1998, 28(3): 278-283. [鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义. 中国科学: D辑, 1998, 28(3): 278-283.]
- [15] An Zhisheng, Porter S, Kukla G et al. Evidence from magnetic susceptibility of monsoon evolution on the Loess Plateau since the last 130000 years. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(7): 529-532. [安芷生, Porter S, Kukla G 等. 最近13万年黄土高原季风变迁的磁化率证据. 科学通报, 1990, 35(7): 529-532.]
- [16] Liu Xiuming, Liu Tungsheng, Heller F et al. Frequency development susceptibility of loess. *Quaternary Sciences*, 1990, 10(1): 42-50. [刘秀铭, 刘东生, Heller F 等. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换. 第四纪研究, 1990, 10(1): 42-50.]
- [17] Sun Donghuai, Chen Mingyang, Shaw John et al. Magnetostratigraphy and paleoclimate records of late Cenozoic eolian sequence in the Loess Plateau of China. *Science in China: Series D*, 1998, 28(1): 79-84. [孙东怀, 陈明扬, Shaw John 等. 晚新生代黄土高原风尘堆积序列的磁性地层年代与古气候记录. 中国科学: D辑, 1998, 28(1): 79-84.]
- [18] Liu Xiuming, Liu Dongsheng, Heller Friedrich et al. Research of magnetic susceptibility of Chinese loess and Quaternary paleoclimate. *Scientia Geologica Sinica*, 1992, (Suppl.): 279-285. [刘秀铭, 刘东生, Heller Friedrich 等. 中国黄土磁化率与第四纪古气候研究. 地质科学, 1992, (Suppl.): 279-285.]
- [19] Zhang Jiafu, Mo Dowen, Xia Zhengkai et al. Optical dating of sediments from China and its implication for depositional processes. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(1): 23-33. [张家富, 莫多闻, 夏正楷 等. 沉积物的光释光测年和沉积过程的指示意义. 第四纪研究, 2009, 29(1): 23-33.]
- [20] Timar A, Vandenbergh D, Panaiotu E C et al. Optical dating of Romanian loess using fine-grained quartz. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(2/3): 143-148.
- [21] Xin Liangjie. Characteristics of the composition of the Zhangxia loess and its origin. *Geology in China*, 2005, 32(1): 55-61. [辛良杰. 张夏黄土组成特征及其成因分析. 中国地质, 2005, 32(1): 55-61.]
- [22] Wang Qiuliang, Li Changan, Xie Yuanyun et al. Grain-size characteristics of sediments in the Jiangling section and their paleoclimatic significance. *Geology in China*, 2006, 33(6): 1406-1410. [王秋良, 李长安, 谢远云 等. 江陵剖面沉积物的粒度特征及其古气候意义. 中国地质, 2006, 33(6): 1406-1410.]
- [23] Lu Huayu, An Zhisheng. Comparison of grain-size distribution of red clay and loess-paleosol deposits in Chinese Loess Plateau. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(2): 226-232. [鹿化煜, 安芷生. 黄土高原红黏土与黄土古土壤粒度特征对比: 红黏土风成成因的新证据. 沉积学报, 1999, 17(2): 226-232.]
- [24] Liu Dongyan, Li Weiran, Peng Shasha et al. Current application of grain size analysis in Chinese loess paleoclimatic

- study. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(2): 79-84. [刘冬雁, 李巍然, 彭莎莎 等. 粒度分析在中国第四纪黄土古气候研究中的应用现状. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2010, 40(2): 79-84.]
- [25] Wang H, Liu H, Cui H et al. Terminal Pleistocene/Holocene palaeoenvironmental changes revealed by mineral magnetism measurements of lake sediments for Dali Nor area, southeastern Inner Mongolia Plateau, China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 170: 115-132.
- [26] Chen Hongyun, Sun Youbin. Study on provenance of eolian dust deposits on the Chinese Loess Plateau: Retrospects and prospects. Quaternary Sciences, 2008, 28(5): 892-900. [陈洪云, 孙有斌. 黄土高原风尘沉积的物质来源研究: 回顾与展望. 第四纪研究, 2008, 28(5): 892-900.]
- [27] Ding Xigui, Ye Siyuan, Gong Shaojun et al. Analysis on environmentally sensitive grain-size population and sedimentary environment of ZK1 drilling core in Yellow River Delta. Global Geology, 2010, 29(4): 575-581. [丁喜桂, 叶思源, 宫少军 等. 黄河三角洲 ZK1 孔岩心环境敏感粒度组分及沉积环境分析. 世界地质, 2010, 29(4): 575-581.]
- [28] Chengdu Geological Institute. Sedimentary Particle Size Analysis and Its Application. Beijing: Geological Publishing House, 1976: 31-127. [成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒径分析及其应用. 北京: 地质出版社, 1976: 31-127.]
- [29] Long Hao, Wang Nai-ang, Li Yu et al. Particle size characteristics of deposits from PJHZ section in northern edge of Mu Us Desert and their environmental significance. Journal of Desert Research, 2007, 27(2): 187-193. [隆浩, 王乃昂, 李育 等. 毛乌素沙地北缘泊江海子剖面粒度特征及环境意义. 中国沙漠, 2007, 27(2): 187-193.]
- [30] Li Jiyan, Dong Zhibao, Li Enju et al. Grain-size characteristics of the deposits from Yardang landforms in the Charhan Salt Lake area. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1187-1192. [李继彦, 董治宝, 李恩菊 等. 察尔汗盐湖雅丹地貌沉积物粒度特征研究. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1187-1192.]
- [31] Sun Donghuai, An Zhisheng, Su Ruixia et al. Mathematical approach to sedimentary component partitioning of polymodal sediments and its applications. Progress in Natural Science, 2001, 11(3): 269-276. [孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠 等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用. 自然科学进展, 2001, 11(3): 269-276.]
- [32] Sun Youbin, Gao Shu, Li Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(1): 83-86. [孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析. 科学通报, 2003, 48(1): 83-86.]
- [33] Chen Qiao, Liu Dongyan, Chen Yijun et al. Comparative analysis of grade-standard deviation method and factors analysis method for environmental sensitive factor analysis. Earth and Environment, 2013, 41(3): 319-325. [陈桥, 刘东艳, 陈颖军 等. 粒级—标准偏差法和主成分因子分析法在粒度敏感因子提取中的对比. 地球与环境, 2013, 41(3): 319-325.]
- [34] Xu Shujian, Pan Baotian, Gao Hongshan et al. Analysis of grain-size populations with environmentally sensitive components of loess during the last interglacial-glacial cycle and their implications. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(2): 183-189. [徐树建, 潘保田, 高红山 等. 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. 土壤学报, 2006, 43(2): 183-189.]
- [35] Lin Bingyao. Introduction to Quantitative Geography. Beijing: Higher Education Press, 1985: 29-33. [林炳耀. 计量地理学概论. 北京: 高等教育出版社, 1985: 29-33.]
- [36] Lu Huayu, An Zhisheng. Grain-size composition of Luochuan loess and paleoclimate implication. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(1): 66-69. [鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义. 科学通报, 1997, 42(1): 66-69.]
- [37] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 22-23. [汤普森 R, 奥尔德菲尔德 F. 环境磁学. 北京: 地质出版社, 1995: 22-23.]
- [38] An Zhisheng, Kukla G, Liu Tungsheng. Loess stratigraphy in Luochuan of China. Quaternary Sciences, 1989, (2): 157-168. [安芷生, Kukla G, 刘东生. 洛川黄土地层学. 第四纪研究, 1989, (2): 155-168.]
- [39] Xu Shujian, Wang Tao. Optically stimulated luminescence dating and sedimentary characteristics of loess section at Penglai in Shandong Province. Journal of Desert Research, 2011, 31(2): 295-301. [徐树建, 王涛. 蓬莱黄土剖面光释光年代学及其沉积特征研究. 中国沙漠, 2011, 31(2): 295-301.]
- [40] Fu Jie, Li Yonghua, Zhang Hua et al. Characteristic of magnetic susceptibility and its primarily interpretation of late Cenozoic sediments in Liaodong Peninsula. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(3): 135-141. [伏捷, 李永化, 张华 等. 辽东半岛晚新生代沉积物磁化率特征及初步解释. 干旱区资源与环境, 2014, 28(3): 135-141.]
- [41] Chen Jie, Lu Yanchou, Wei Lanying et al. Optically stimulated luminescence dating of Quaternary sediments: A comparison using different equivalent dose determination methods. Geochimica, 1990, 28(5): 443-452. [陈杰, 卢演涛, 魏兰英 等. 第四纪沉积物光释光测年中等效剂量测定方法的对比研究. 地球化学, 1999, 28(5): 443-452.]
- [42] Ma Yugai, Huang Chunchang, Zhou Yali et al. OSL Dating of the palaeoflood event in the Shangjiahe reach in the upper Hanjiang River valley. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(2): 306-313. [马玉改, 黄春长, 周亚利 等. 汉江上游尚家河段全新世古洪水事件光释光测年研究. 沉积学报, 2014, 32(2): 306-313.]

- [43] Zhang Wei, Yu Yang, Liu Beibei et al. Study on the loess layer in the south of Liaoning Province using the optically stimulated luminescence. *Earth and Environment*, 2013, 41(2): 117-125. [张威, 于洋, 刘蓓蓓 等. 辽南黄土光释光年代地层探讨. *地球与环境*, 2013, 41(2): 117-125.]
- [44] Thomas S, Grzegorz A, Anna F B et al. An abrupt shift in dust source on the Chinese Loess Plateau revealed through high sampling resolution OSL dating. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 82(15): 121-132.
- [45] Lai Zhongping, Ou Xianjiao. Basic procedures of optically stimulated luminescence (OSL) dating. *Progress in Geography*, 2013, 32(5): 683-693. [赖忠平, 欧先交. 光释光测年基本流程. *地理科学进展*, 2013, 32(5): 683-693.]
- [46] Lai Zhongping, Zhang Weiguo, Chen Xi et al. OSL chronology of loess deposits in East China and its implications for East Asian monsoon history. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(2/3): 154-158.
- [47] Wintle A G, Murray A S. A review of quartz optically stimulated luminescence and characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements*, 2006, 41(4): 369-391.
- [48] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 2000, 32(1): 57-93.
- [49] Hu Fangen, Li Zhizhong, Jin Jianhui et al. Coastal environment evolution record from Anshan coastal aeolian sand of Jinjiang, Fujian Province, based on the OSL dating. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(3): 343-356. [胡凡根, 李志忠, 靳建辉 等. 基于释光测年的福建晋江海岸沙丘粒度记录的风沙活动. *地理学报*, 2013, 68(3): 343-356.]

The sedimentary characteristics of Buxi loess profile in Shandong Province and their paleoclimatic and palaeoenvironment significance

XU Shujian¹, DING Xinchao^{1,2}, NI Zhichao^{1,2}

(1. *Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi University, College of Resources and Environment, Institute of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi 276005, Shandong, China;*

2. *College of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China*)

Abstract: Field work was carried out systematically on one loess section at Buxi of Zhangqiu in Shandong Province. Grain size, magnetic susceptibility and optically stimulated luminescence (OSL) dating of Buxi loess section were conducted. Results indicate that: (1) According to Sahu's discrimination formula, it is found that the main sedimentary deposits are formed in aeolian environment. By analyzing grain-size class vs. standard deviation values method, environment-sensitive size fractions of this section are 7.08-8.91 μm and 39.81-50.12 μm respectively; (2) Changes of magnetic susceptibility and percentages of different size fractions are correlated. In this section, the quality of low-frequency and high-frequency magnetic susceptibility changes in the range of: 32.38×10^{-8} - $138.46 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ and 30.62×10^{-8} - $123.31 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (ranges from A to B). The change of magnetic susceptibility can reflect the palaeoclimate variation information to some extent; (3) The section is divided into three loess layers and three paleosol layers, which records the information of climatic change and environmental evolution over the last interglacial stage.

Key words: Buxi of Shandong Province; loess; grain size; magnetic susceptibility; optically stimulated luminescence dating