

# 山东章丘黄土粒度指示的粉尘堆积过程及古气候意义

孔凡彪<sup>1,2</sup>, 陈海涛<sup>2,3</sup>, 徐树建<sup>2,3</sup>, 苗晓东<sup>2</sup>

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014; 2. 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, 临沂 276000; 3. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590)

**摘要:** 山东黄土堆积过程记录了中国东部季风区大气环流的变化信息, 对揭示东亚季风变化规律与古气候环境演变具有重要价值。本文采用参数化粒度端元分析方法探讨山东章丘剖面沉积物的沉积特征、沉积动力及其环境意义。结果表明: ① 章丘剖面光释光年代(OSL)介于42.24—0.26 ka之间, 为晚更新世以来的沉积物。② 章丘剖面沉积物粒度组分为5个端元, EM1代表成壤作用产生和携带搬运的粘土组分; EM2代表高空西风远距离搬运的细粉砂组分; EM3代表以浮尘形式存在的沉降组分; EM4是该剖面的主要粉尘来源, 代表地方风系作用下低空悬浮搬运的粉砂组分; EM5代表以尘暴形式近地悬移搬运的砂粒组分。EM5组分含量变化对冬季风强度变化具有较好的指示意义, 并记录了晚更新世以来的气候波动事件。③ 根据各端元组分含量、低频磁化率( $\chi_{lf}$ )、土壤颜色(a\*)等指标, 结合OSL结果, 有效指示了晚更新世以来章丘剖面沉积环境的阶段性变化, 体现了全球气候环境变化的区域响应, 但也存在差异性。

**关键词:** 黄土; 粒度端元分析; 粉尘堆积; 环境演变; 山东省

DOI: 10.11821/dlxb202105009

## 1 引言

黄土作为第四纪干旱、半干旱气候条件下的风成土状沉积物, 因沉积较厚且基本连续, 蕴藏着第四纪气候环境演变信息, 同深海沉积物、极地冰芯并称为古气候研究的三大支柱<sup>[1]</sup>。粒度是沉积物的重要物理属性之一, 蕴含沉积物的物源、搬运动力与沉积环境等信息, 是研究沉积特征与气候环境变化的重要指标<sup>[2-3]</sup>。由于黄土在沉积过程中受到多种因素的综合作用, 使得黄土的全样粒度参数只能近似的指示沉积环境的变化<sup>[4]</sup>, 因此, 从全样粒度中将指示不同沉积动力的粒级组分分离出来, 将更有利于对复杂的黄土沉积过程进行分析, 分离出来的与特定沉积动力相关的粒度组分被称为粒度端元<sup>[5-8]</sup>。目前对粒度端元进行分解的方法主要有参数法和非参数法: 参数法认为沉积物总体是由搬运介质和搬运方式一定、搬运动力稳定时, 单因子控制的单组分的自然累积, 利用粒度分布函数从数字特征上可分离出不同成因的粒度组分<sup>[9]</sup>; 非参数法认为不同物源和搬运过程的组合具有分选性, 使沉积物粒度向不同的范围分化, 从而优选出具有某一特征的粒级组合<sup>[10]</sup>。粒度端元分析方法在中国青藏高原和西北等地区的黄土研究中得到成功应用<sup>[11-14]</sup>, 揭示了中国内陆地区黄土沉积的源—汇过程, 反映了粉尘搬运过程与大气环流之间的联系, 并探讨了气候环境意义。

收稿日期: 2019-12-16; 修订日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(4197262, 41472159) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.4197262, No.41472159]

作者简介: 孔凡彪(1992-), 男, 山东济南人, 博士生, 主要从事地貌与环境演变研究。E-mail: kongfanbiao92@163.com

通讯作者: 徐树建(1967-), 男, 山东沂水人, 教授, 主要从事地貌与环境演变研究。E-mail: xushujian1967@163.com

山东黄土位于中国黄土分布的东部边缘,中国现代季风区的东部和海陆交接过渡地带。深入研究山东黄土沉积特征、年代、物源以及所蕴含的环境信息,对认识中国东部沿海地区气候环境变迁以及东亚季风变化规律具有重要意义<sup>[15]</sup>。多年来,学者们采用粒度、磁化率、孢粉、地球化学元素等指标并结合测年数据对山东黄土的成因、物源、年代与沉积环境展开了深入研究,取得了丰硕的成果<sup>[16-20]</sup>,但通过粒度端元分析方法对山东黄土沉积过程与环境演变的研究较少<sup>[21]</sup>。因此,本文基于前人的研究成果,拟采用参数化粒度端元分析方法对山东章丘剖面进行研究,试图揭示该区黄土粉尘的沉积动力组合特征以及大气环流变化等信息,并结合磁化率<sup>[22-23]</sup>和色度<sup>[24-26]</sup>2种气候代用指标探讨该地区的环境演变过程。

## 2 研究剖面概况与样品采集

章丘区位于山东省济南市东部,泰沂山区北麓,与华北平原接壤,属暖温带季风气候,雨热同期。剖面位于济南市章丘区黑峪村(117°31'11"E, 36°32'26"N),剖面底部海拔约260 m,因人工开采形成新鲜垂直断面,出露高度14.5 m,未见底(图1)。基于野外观察沉积物颜色、岩性、沉积结构特征和层间接触关系等,结合剖面的高度将剖面进行地层划分:0~40 cm为现代耕作层,暗灰棕色,结构疏松多孔,含有较多植物根系,受流水和生物扰动明显;40~1450 cm为黄土层,主要为黄色粉砂质土,块状结构,质地均匀,较疏松,垂直节理明显;其中在670~710 cm与1270~1320 cm范围内分布有两期砾石层,砾石粒径较小,以次棱状和次圆状为主,呈叠瓦状排列,主要以石灰岩为主,含有极少量的砂页岩、花岗岩等。本文根据剖面分层在100 cm、250 cm、370 cm、470 cm、717 cm、1260 cm处采集6个光释光年代样品,并以10 cm等间距采集粒度、磁化率、色度样品各137个。

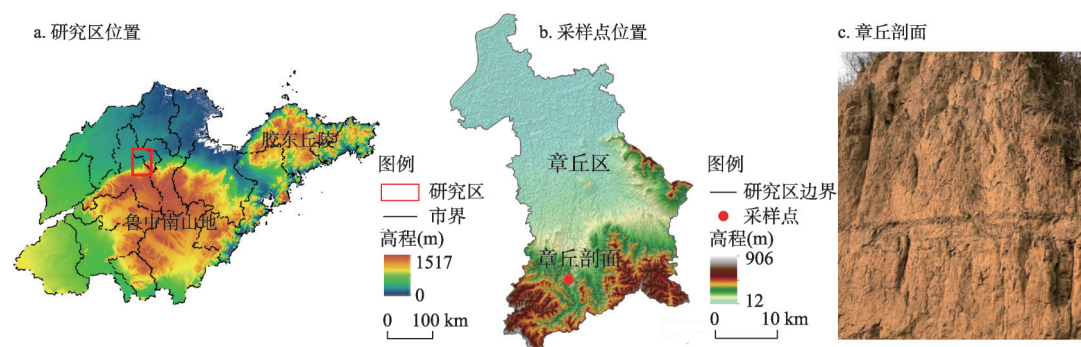


图1 研究区位置及研究剖面

Fig. 1 Map showing the location of the studied loess section

## 3 研究方法

### 3.1 样品测试方法

粒度测试采用英国 Mastersizer 2000 激光粒度仪。粒度测试前处理按照 Liu 等<sup>[27]</sup>操作过程:取0.3~0.4 g的样品置于100 mL的烧杯中,加入5 mL浓度为10%的 $H_2O_2$ 后置于恒温电热板上加热去除有机质;待有机质除尽后加入浓度为10%的HCl去除碳酸盐,待反应完全后将烧杯取下静置24 h后抽掉上层清澈液体;然后加入10 mL浓度为5%的

( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>溶液, 在超声波震荡仪里面震荡 7 min 后放在粒度仪上进行测量。重复测量相对误差小于 2%, 说明样品粒度数据可靠。

年代测试采用丹麦生产的 RisØ DA-20-C/D 释光自动测量系统, 测试方法为简单多片再生法 (SMAR)。在室内弱红光下, 去掉样品顶部和底部可能曝光、污染的部分, 保留中心部位的样品进行等效剂量测定, 其测试过程为: 从中取约 20 g 样品测定含水量和饱和含水量, 之后将样品在低温 (40 °C) 烘干后充分研磨至全部通过 63  $\mu\text{m}$  的筛子供测定样品中 U、Th、K 含量; 将中心样品筛选出 < 300  $\mu\text{m}$  的组分放在 1000 mL 的烧杯中, 加入浓度为 30% 的  $\text{H}_2\text{O}_2$  和 30% 的 HCl 以去除有机质和碳酸盐类, 待充分反应后加入氨水中和, 并用高纯水反复冲洗至中性; 将反应完全的样品筛选出 < 90  $\mu\text{m}$  的粒组, 用静水沉降法分离出 4~11  $\mu\text{m}$  的粒组, 低温 (40 °C) 烘干后再分别加入浓度为 40% 的 HF 和 10% 的 HCl 以去除长石和氟化物, 然后用高纯水清洗至中性, 检验无长石残留后将样品低温 (40 °C) 烘干, 最后制成细颗粒测片待测。

磁化率测试采用英国 Bartington 公司生产的 MS2 磁化率仪, 测试过程为: 取低温 (40 °C) 烘干后的样品放进玛瑙研钵中, 在不损伤颗粒结构的前提下进行研磨并装满容积为 8  $\text{cm}^3$  的磁学专用样品塑料盒; 压实、密封后称取塑料盒中样品的质量并计算其密度; 然后将样品移至 MS2 磁化率仪测量低频 (0.47 KHz)、高频 (4.7 KHz) 磁化率, 所有样品重复测试 3 次后取其平均值。

色度测试采用日本柯尼卡美能公司生产的 CM-700d 分光测色计, 先取 10 g 低温 (40 °C) 烘干后的样品放入玛瑙研钵中均匀研磨至 200 目以下, 并将研磨后的样品放入模具中压实、抹平; 然后将样品放入仪器中进行测试, 同一样品在不同区域测量 3 次后取其平均值, 使误差小于 0.07。其中测试参数为 CIED65 标准光源 (色温 6500 K), 观察视野为 10°, 孔径为 8 mm, 色度值的标准偏差值小于  $\Delta E \times ab$  (0.04), 测量范围为 360~850 nm, 扫描间隔为 1 nm, 使用硫酸钡制作的标准白板。

其中, 年代样品送至美国 University of Illinois Urbana-Champaign 释光年代学实验室进行测试, 粒度、磁化率与色度测试均在山东省水土保持与环境保育重点实验室进行。

### 3.2 参数化粒度端元分析方法

Paterson 等<sup>[28]</sup>于 2015 年提出一种新的广义 Weibull 函数参数化粒度端元分析法, 该方法基于协方差数据的非参数端元分析, 利用非负矩阵因子分解法对参数化粒度端元进行估算, 进而将样品的粒度数据分解为一组单峰分布的参数端元来表达。该方法弥补了 Weibull 函数只能对单个样品数据进行分解, 以及没有考虑粒度分布地质背景而不能准确的解释端元组分沉积动力过程等问题, 从而使各粒度端元组分的统计学与物理学意义更具有可描述性<sup>[10,13]</sup>。本文使用基于 Matlab 程序语言开发的 AnalySize 程序并选择 Gen-Weibull 方法对剖面样品粒度数据进行参数化粒度端元分析。

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 年代结果分析与地层对比

章丘剖面光释光年代样品测试结果如表 1。剖面深度 100 cm、250 cm、370 cm、470 cm、717 cm、1260 cm 处的年代结果分别为 (0.264±0.017) ka、(15.7±0.7) ka、(20.4±1.4) ka、(23.6±1.4) ka、(32.0±2.0) ka、(39.0±2.0) ka, 剖面年代数据基本连续且未发生倒置。利用光释光年代数据进行多项式回归分析建立年代模型 (图 2), 推测章丘剖面出露部分的底部年代约为 42.24 ka, 与同区域内埠西剖面<sup>[15]</sup>的年代数据较为接近, 初步表明二者为同期沉积, 也进一步表明章丘剖面出露部分主要为晚更新世以来的沉积物。通过光

表 1 章丘剖面OSL测年结果

Tab. 1 OSL dating results of the samples in the Zhangqiu section

实验 编号	野外 编号	埋深 (cm)	U (Bq/kg)	Th (Bq/kg)	K (Bq/kg)	实测含 水量(%)	环境剂量率 (Gy/ka)	等效剂量 (Gy)	年龄 (ka)
16-OSL-523	HY01	100	28.1±1.9	48.5±0.5	659±10	11±5	3.42±0.14	0.90±0.04	0.264±0.017
16-OSL-524	HY02	250	28.7±2.6	46.0±0.5	656±10	18±5	3.13±0.12	49.1±1.1	15.7±0.7
16-OSL-525	HY03	370	26.5±1.7	45.4±0.5	654±10	12±5	3.27±0.13	67±3	20.4±1.4
16-OSL-526	HY04	470	27.4±2.6	45.0±0.5	653±10	17±5	3.10±0.12	73±3	23.6±1.4
16-OSL-521	HY05	717	31.3±2.1	48.3±0.5	602±10	10±5	3.22±0.13	101±5	32.0±2.0
16-OSL-522	HY06	1260	31.1±1.6	47.2±0.5	617±10	9±5	3.23±0.14	126±5	39.0±2.0

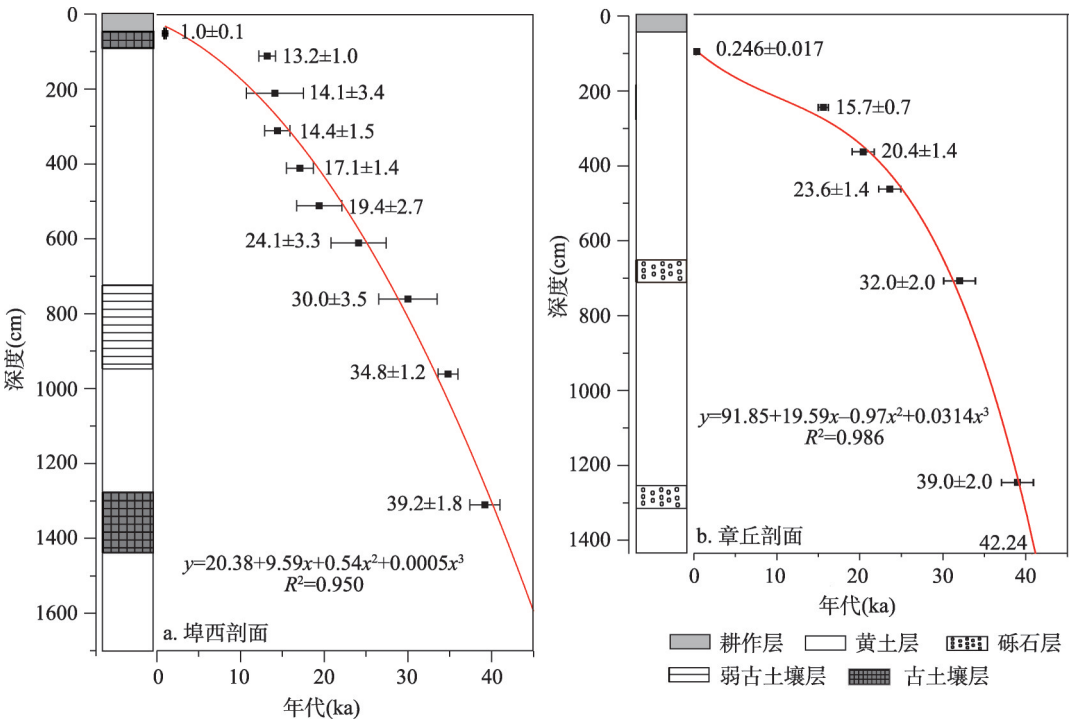


图 2 章丘与埠西剖面光释光年代—深度模型  
Fig. 2 Age-depth models of the Zhangqiu and Buxi sections

释光年代数据与年代模型对 670 cm（第二砾石层上部）和 1320 cm（第一砾石层下部）处的年代进行计算，结果表明，670 cm 处的年代约为 31.2 ka，1320 cm 处的年代约为 40.87 ka。从年代结果与地层对比来看，章丘剖面第二砾石层与埠西剖面 740~950 cm 范围内的弱古土壤层相对应，第一砾石层与埠西剖面 1300~1450 cm 范围内的古土壤层相对应，均指示温暖湿润的气候条件。

4.2 粒度分析

章丘剖面样品粒度分布范围在 0~125 μm 之间，粒度频率曲线主要呈双峰分布，主峰集中在 20~60 μm 之间，次峰小于 1 μm，总体呈正偏—似正偏分布（图 3）。国内外对于粒度划分标准并不统一，同时因激光粒度仪和传统沉降法获得的粘土、粉砂和砂粒级之间的界线存在差异<sup>[13, 29]</sup>，本文选择将剖面沉积物分为粘土（< 5 μm）、粉砂（5~63 μm）和砂（> 63 μm）3 种粒级组分来进行分析。章丘剖面中粉砂组分含量最高，变化范围为



58.71%~81.95%，平均含量为73.72%；粘粒组分含量变化范围为11.40%~30.90%，平均含量为22.08%；砂粒组分含量最低，变化范围为0.72%~12.34%，平均含量为4.19%。章丘剖面粒度组成与洛川<sup>[30]</sup>典型风成黄土的粒度组成非常相似（粉砂组分平均含量为75.90%，粘粒组分平均含量为21.02%，砂粒组分平均含量为3.08%），表明章丘剖面具有风成沉积的典型特征。

#### 4.3 端元结果分析

章丘剖面沉积物样品粒度数据执行参数化粒度端元分析结果

如图4所示：当端元数为2时，线性相关（ $R^2 = 0.945$ ）已达到0.9以上，但角度偏差（ $\theta = 8.1^\circ$ ）大于 $5^\circ$ ；当端元数为3、4、5和6时，线性相关（ $R^2$ 分别为0.987、0.994、0.998和0.999）逐渐增加并接近于1，此时角度偏差（ $\theta$ 分别为 $4.7^\circ$ 、 $2.5^\circ$ 、 $1.7^\circ$ 和 $1.2^\circ$ ）均小于 $5^\circ$ 并逐渐趋于稳定，表明随着端元数量增加，粒度端元与样品粒度数据之间的拟合性逐渐变好<sup>[4, 13]</sup>；此外，当端元数为5时，端元相关性为0.076，均小于3个端元（0.104）、4个端元（0.203）和6个端元（0.210）时的端元相关性，因此本文最终选择5个端元来进行分析。

在章丘剖面的5个端元组分中（图5、表2），EM1的众数粒径为 $0.89\ \mu\text{m}$ ，主要为粘土组分；EM2的众数粒径为 $5.62\ \mu\text{m}$ ，为极细粉砂组分，该组分中粉砂含量较高，并含有较多的粘土组分，同时该组分的分选性最差；EM3的众数粒径为 $14.12\ \mu\text{m}$ ，为细粉砂组分，主要为粉砂组分，粘土与砂含量较少，分选性较差，仅次于EM2组分；EM4的众

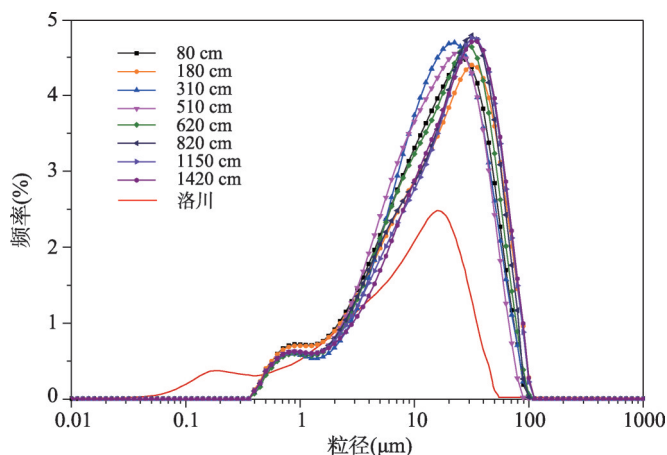


图3 章丘剖面粒度频率分布曲线

Fig. 3 Grain-size frequency distribution curve of the Zhangqiu section

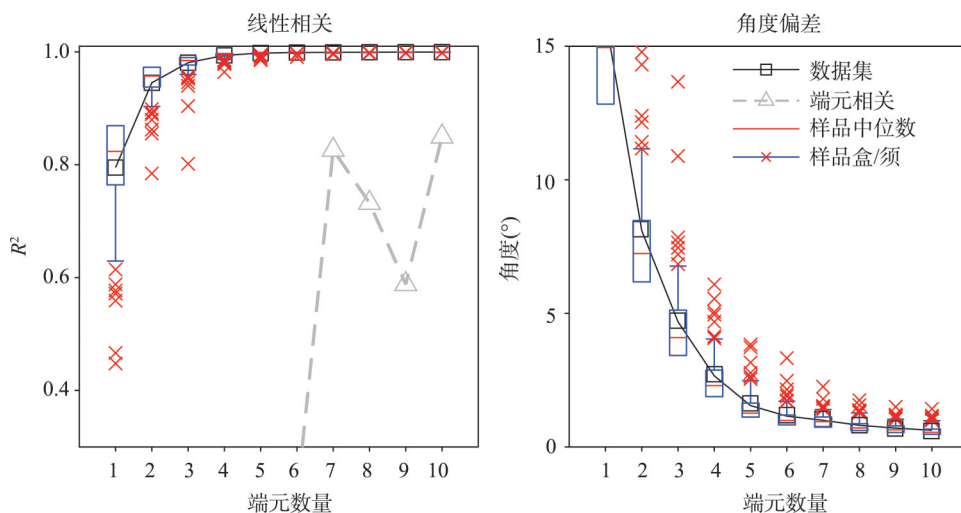


图4 参数化端元的拟合特性和端元数量选取

Fig. 4 Fitting characteristics and number selection of parametric end elements

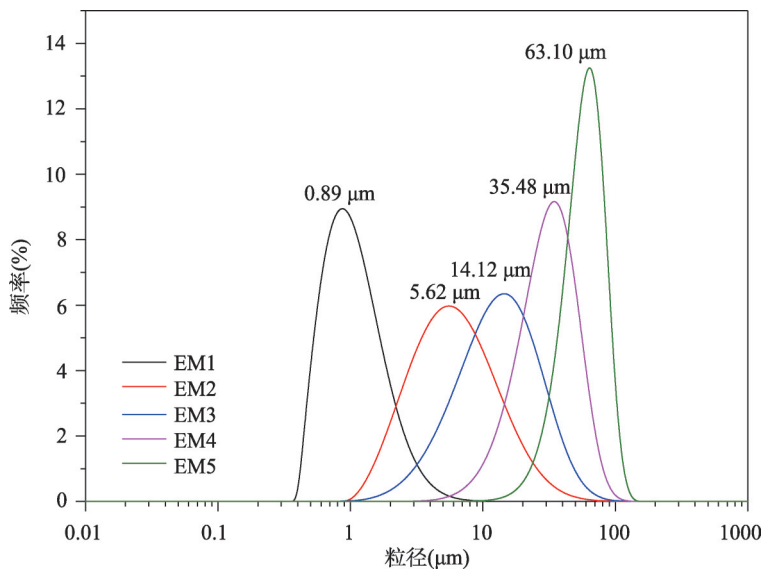


图5 章丘剖面各端元粒度频率曲线图

Fig. 5 Grain size frequency distribution curves of end members in the Zhangqiu section

表2 章丘剖面各端元参数特征

Tab. 2 Parameter characteristics of end members in the Zhangqiu section

剖面	平均粒径(Mz/μm)	分选系数	偏度(Sk)	峰度(Kg)	粘土(%)	粉砂(%)	砂(%)
EM1	1.06	1.66	0.64	3.25	98.93	1.07	0.00
EM2	6.01	2.08	0.24	2.76	32.38	67.53	0.08
EM3	12.66	2.04	-0.27	2.89	6.89	92.71	0.40
EM4	29.84	1.67	-0.52	3.29	0.06	95.95	3.99
EM5	56.20	1.44	-0.73	3.82	0.00	63.86	36.14

数粒径为35.48 μm，为粗粉砂组分，主要为粉砂组分并含有部分砂粒组分，粘土组分几乎不存在；EM5的众数粒径为63.10 μm，为极细砂组分，主要为粉砂组分并含有较多的细砂组分，不含有粘土组分，同时该组分的峰态较高且分选性最好。

4.4 粒度端元环境意义分析

EM1为粘土组分。研究认为，黄土中粒径< 2 μm的粘土组分与成壤作用有关，并反映了黄土堆积时气候的干湿变化<sup>[31-32]</sup>。在对黄土高原黄土进行粒度组分分离时发现，黄土高原黄土中普遍存在粒径为0.4 μm左右的超细粒组分，并通过分析其矿物成分认为该粒级组分与成壤作用密切相关<sup>[33]</sup>；新疆伊犁则克台黄土中也识别出众数粒径为0.8 μm且主要由粘粒构成的端元组分，并将该组分看作成壤组分<sup>[34]</sup>；同时有研究表明，黄土中的粘土组分也能以聚集体的形式或粘附在较粗颗粒表面进行搬运<sup>[33, 35-36]</sup>。通过对端元组分与中值粒径之间的相关性可以看出（表3），EM1与中值粒径之间存在较低的负相关性，表明EM1组分可能无法提供搬运动力等有关信息<sup>[37]</sup>；而EM1与EM2组分之间存在相对较高的正相关性，与其他端元组分之间的相关性较低或存在较高的负相关性可能表明，章丘剖面中的粘土组分除了有当地成壤作用产生的以外，也有部分粘土组分是在粉尘源区经过成壤作用产生后，粘附在EM2组分颗粒表面搬运而来。

EM2为极细粉砂组分。通过研究可知黄土中平均粒径< 20 μm的细颗粒组分被风吹起后很容易被抬升并分散在几千米高度的大气中，并在高空气流作用下进行上千公里

的远距离悬浮搬运，因此该粒级组分通常被认为与高空气流有着密切的关系<sup>[38-39]</sup>。Vandenbergh<sup>[40]</sup>认为黄土中出现的细粉砂组分为高空远距离悬浮搬运的粉尘物质；Nottebaum等<sup>[41]</sup>在祁连山北部一系列黄土剖面中分解出众数粒径为9  $\mu\text{m}$ 的细粒组分，并认为主要分布在6~20  $\mu\text{m}$ 范围的端元组分是高空远距离悬浮搬运的粉尘物质；Sun等<sup>[42]</sup>对黄土高原多个黄土剖面进行端元分解时发现这一粒级组分的众数粒径分布在2~8  $\mu\text{m}$ 范围内，并认为该组分的搬运与西风之间存在密切联系，在某种程度上指示高空西风气流的强度；相同的端元组分也在新疆等地黄土的粒度端元分解中被识别出来，并将其看作高空西风搬运的粒度组分<sup>[34]</sup>。章丘剖面沉积物EM2组分与新疆等地区的相似组分相比，粒径较小且含量波动变化较大，推测可能与粉尘物质长距离搬运过程中西风强度由西部源区向东部沉积区逐渐减弱有关<sup>[40]</sup>，同时该组分的分选性较差体现了黄土粉尘在远距离搬运过程中的混合过程。结合以往研究可知，西北内陆地区的粉尘物质可以通过高空气流携至山东地区<sup>[1, 20]</sup>，因此本文认为EM2组分为高空西风搬运的粉尘物质。

EM3为细粉砂组分。虽然该组分平均粒径也小于20  $\mu\text{m}$ ，但该组分与EM2组分之间呈现出的负相关性表明二者可能并非是一搬运动力下的粉尘物质。研究表明，粒径小于20  $\mu\text{m}$ 的颗粒除了可能来自远距离粉尘物源区外，也可能来自邻近的粉尘源区<sup>[38, 43]</sup>。EM1组分中除了包含风化作用产生的粘土组分外还通过粘附在EM2组分表面被远距离搬运而来，因此，EM3与EM1、EM2组分之间表现出的负相关性可能指示粉尘物源区之间的差异。现代降尘研究表明，空气中的细粉砂组分能以颗粒的形式发生沉降且该组分的含量随浮尘出现时间的增加而增加<sup>[35, 44]</sup>。在新疆伊犁黄土粒度端元分解中识别出众数粒径为15.02  $\mu\text{m}$ 的端元组分并将其看作大气中以浮尘形式存在的沉降组分<sup>[13]</sup>。EM3组分与粗粒级组分（EM4和EM5）之间明显的负相关性体现了它们搬运机制的差异性，结合EM3组分相对较差的分选性，本文认为EM3组分也是以浮尘形式存在并在风力强度减弱或停止后发生沉降的粒级组分。但与新疆伊犁黄土的细粉砂组分相比，章丘剖面中细粉砂组分的众数粒径较小且含量相对较少，这可能与两地尘暴事件的发生频率与强度存在差异有关。

EM4为粗粉砂组分。黄土中平均粒径在20~70  $\mu\text{m}$ 的粒级组分很少能在空气中悬浮较长时间，主要为低空短距离悬浮搬运的粉尘物质<sup>[38-40]</sup>；在对黄土高原<sup>[42]</sup>、祁连山<sup>[41]</sup>等地的黄土粒度进行端元分解时均提取出相似的粒级组分，并将该组分看作低空或近地表悬浮搬运的粉尘物质；同时在青藏高原东部黄土粒度端元分解中也提取出相似的端元组分，并将其看作高原季风或局地环流影响的粒级组分<sup>[11]</sup>。EM4组分是章丘剖面粉尘物质的主要来源形式（平均含量为36.96%），已有研究表明，鲁中地区位于莱州湾滨海平原盛行风系（北向风）的下风区，该区黄土主要由低空地方风系搬运的近源粉尘物质堆积而成，其物质来源为莱州湾和黄泛平原的松散沉积物<sup>[20]</sup>，因此本文认为EM4组分是地方风系作用下低空短距离悬浮搬运的粉尘物质。

EM5为极细砂组分。砂粒级组分普遍存在于靠近河流或者河流阶地的黄土沉积中，并认为是风力作用搬运的河流沉积物<sup>[40-41, 45]</sup>。因为砂粒级组分的粒径较粗，所需的搬运动

表3 章丘剖面各端元组分及中值粒径的相关性

Tab. 3 Correlation between end members and Md in the Zhangqiu section

	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5	Md
EM1	1					
EM2	0.349***	1				
EM3	-0.318***	-0.246***	1			
EM4	0.011	-0.424***	-0.679***	1		
EM5	-0.152	-0.330***	-0.641***	0.550***	1	
Md	-0.094	-0.610***	-0.499***	0.730***	0.805***	1

注：\*\*\*表示在0.01水平上显著相关

力较强且搬运距离相对较近<sup>[12, 38]</sup>，所以普遍认为黄土中出现的砂粒级组分是尘暴天气中近距离悬移或近地面跃移的粉尘物质<sup>[13, 39, 41]</sup>。章丘境内河流分布广泛且章丘剖面位于清野河下游的河流阶地，可为章丘剖面沉积物提供砂粒级组分；EM4与EM5组分之间较高的正相关性表明2个组分之间存在相似的搬运方式，粒径分选的结果可能是由于风力强度不同<sup>[37]</sup>。与EM4相比，EM5频率分布较窄，峰态高且分选性较好，表明EM5组分的搬运高度与搬运距离更加有限，因此，EM5组分可能是冬季风动力驱动下以尘暴形式近地面悬移搬运的粉尘物质。研究表明，东亚冬季风环流对近地面气流的强度起主导作用<sup>[9, 42]</sup>，并且黄土中的粗粒级组分对冬季风强度具有较好的指示意义<sup>[4, 15, 46]</sup>。章丘剖面沉积物的粗粒级组分（EM4与EM5）与中值粒径之间存在较高的正相关性，表明章丘剖面的粗粒级组分是冬季风强度变化的敏感组分，其中EM5组分的相关性更高，表明EM5组分对冬季风强度的变化具有更好的指示意义。

4.5 搬运动力与沉积环境演变分析

章丘剖面沉积物的堆积过程是一个由多种搬运动力综合作用以及堆积后受成壤作用影响的复杂过程。由于章丘剖面分离出的EM1组分中可能有粘附在EM2组分颗粒上携带搬运的粉尘物质，所以仅通过EM1组分的含量不能直接用来反映成壤作用的强度变化，对此本文近似的将EM1/EM2比值看作EM1组分中通过粘附搬运的组分含量，从而来表示章丘剖面堆积过程中成壤作用强度的变化。同时磁化率和色度指标的变化与气候之间存在密切联系，从而将其看作成壤强度和夏季风强度的指标<sup>[22-26]</sup>。因此，本文通过端元组分含量变化，结合低频磁化率和色度指标对章丘剖面堆积过程中粉尘搬运动力与气候环境进行分析。通过章丘剖面地层年代和各指标变化与深海氧同位素对比可知，章丘剖面堆积过程总体上经历了MIS3、MIS2和MIS1共3个阶段（图6）。

在MIS3阶段（500~1450 cm），EM5组分（平均含量为6.10%）多在低于剖面平均值（7.04%）的一侧波动变化；EM4组分含量呈现在平均值附近的波动变化，但该组分平均含量（36.15%）较低于剖面平均值（36.87%）；EM3组分波动变化较大且平均含量（28.91%）低于剖面平均值（29.02%）；EM3~EM5含量变化表明该阶段内冬季风强度较弱且尘暴天气出现频率较低。EM2组分（平均含量为20.61%）多在高于剖面平均值

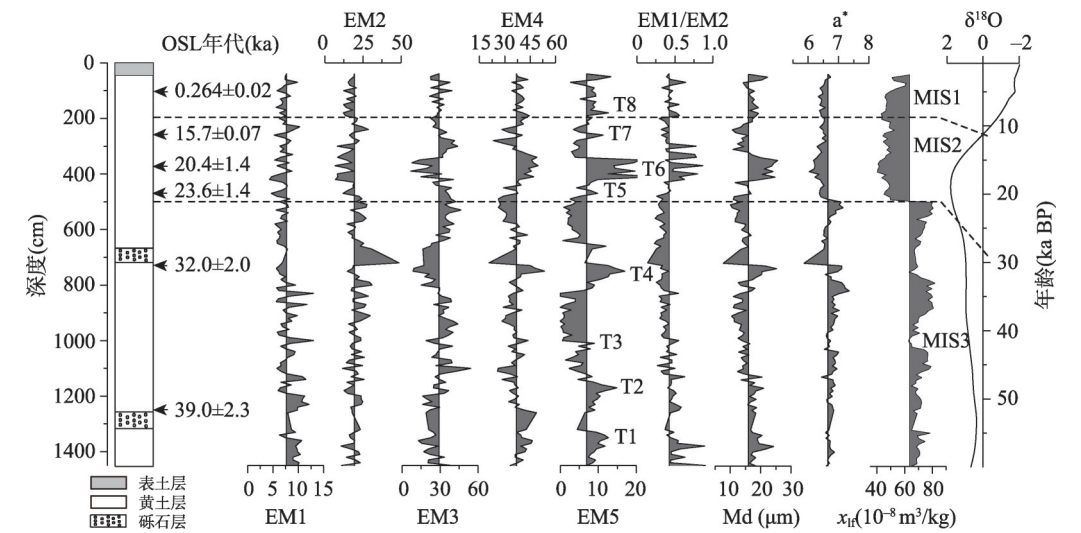


图6 章丘剖面沉积记录与深海氧同位素对比

Fig. 6 Comparison of records between the Zhangqiu section and deep-sea oxygen isotope



(19.05%)一侧的波动变化,表明此时的西风环流强度较强,远距离搬运的粉尘物质较多;EM1组分(平均含量为7.99%)略高于剖面平均值(7.68%),EM1/EM2比值(0.40)略低于剖面平均值(0.43),并且低频磁化率与红度值(平均值分别为71.87和6.77)均高于剖面平均值(63.84和6.66),表明该阶段内的成壤作用较强,夏季风较为强盛,整体与该阶段暖湿气候存在较好的对应关系。EM5组分在该阶段内出现4次明显增加的波动(T1~T4),其中T1(年代大致为33—32 ka)和T4(年代大致为41—40 ka)对应同区域埠西黄土的古土壤发育阶段,从而表明该时期为暖湿气候条件<sup>[34, 47-49]</sup>,初步推断该时期粗粒级组分的增加可能并非因气候变冷使得风力作用增强所致;T1和T4两次波动均发生在砾石层的下部层位,在野外调查中发现距该剖面约30 m(垂直距离河流中心线约20 m)有一剖面无砾石层出现,结合当前典型河流阶地砾石层的研究<sup>[50-51]</sup>本文认为,章丘剖面中存在的砾石层为本区域短时间的快速水文事件,由此本文推测,章丘剖面中T1和T4的两次波动可能受到砾石层形成过程的影响。通过与同区域埠西黄土剖面的对比发现,T2(年代大致为39—38 ka)与T3(年代大致为37—36 ka)发生在气候条件干冷,冬季风作用较强的堆积阶段。将T2与T3与气候事件记录对比后发现,T2大致与冷事件(H4)相对应;波动变化相对平缓且峰值较低的T3则大致与气候事件DO7~DO8之间的冷阶段相对应。

MIS2阶段(200~500 cm)内各指标的变化总体呈现出两阶段的变化,其中在末次冰盛期(300~500 cm)内,EM5组分含量明显增加(平均含量为10.02%)且呈现出高值波动变化,EM4组分含量也明显增加(平均含量为39.44%),从而表明末次冰盛期内的冬季风作用明显增强且尘暴天气频率增加,此时地方风系强度明显增强,搬运较多的粗粒级组分;EM3组分含量减小(平均含量为28.52%)可能与低空气流强度的增强使空气中的粉尘难以沉降或者沉积后再悬浮有关<sup>[36, 48]</sup>;EM1与EM2组分(平均含量分别为6.72%和15.11%)呈现低于平均值一侧的波动变化,EM1/EM2比值较高(0.49),低频磁化率与红度值明显减小(分别为45.95和6.39),表明该阶段内西风环流和夏季风强度减弱,总体与末次冰盛期的干冷气候之间存在较好的对应关系。在MIS2阶段的后期(200~300 cm),EM5与EM4组分含量明显减小(平均含量分别为6.47%和34.23%),EM3组分含量明显增加(平均含量为32.25%),表明此时的冬季风强度减弱,粗粒级组分搬运减少,空中含有较多的粉尘物质,在低空气流强度减弱后得到较多沉降;EM1与EM2组分含量增加(平均含量分别为7.72%和19.53%)并且EM1/EM2比值减小(0.42),低频磁化率和红度值增加(分别为47.94和6.48),表明西风环流与夏季风强度有所增强,气候逐渐向暖湿过渡。对于EM5组分含量在该阶段内明显增加的波动变化(T5~T7),通过与气候事件记录对比本文认为T5(年代大致为25—24 ka)和T7(年代大致为16—15 ka)是冷事件(H2和H1)的区域性响应<sup>[12, 34, 49]</sup>;EM5组分在T6(年代大致为21—19 ka)的波动变化也在新疆黄土敏感粒级组分对古气候重建中被识别出来<sup>[12]</sup>,新疆黄土敏感组分(众数粒径为75.29  $\mu\text{m}$ ,平均粒径约为40.67  $\mu\text{m}$ 的粗粒组分)与章丘剖面中的敏感粒级组分EM5(众数粒径为63.10  $\mu\text{m}$ ,平均粒径约为56.20  $\mu\text{m}$ 的粗粒组分)为同一组分类型,可能表明该时期内的粗粒组分在两地剖面之间的波动变化存在着联系;虽然两地黄土之间的距离较远,但进一步对比后发现2个剖面均堆积于河流阶地,对此本文初步猜测在末次冰盛期冬季风作用显著、尘暴事件频繁发生的干冷气候背景下也存在明显的气候波动,由于堆积在河流阶地的黄土有充足的砂粒级组分供给,使该事件被更好的记录。当然,对于该事件的猜测需要结合更多指标和手段进行验证。

MIS1阶段(40~200 cm)内的EM5与EM4组分含量较高(平均含量分别为6.10%和36.15%),总体呈现高于平均值一侧的波动变化,EM3组分含量在平均值两侧波动变化

并且平均含量减少 (28.79%), 从而表明该阶段内地方风系的冬季风效应较明显, 同时空中浮尘的沉降受到影响; EM1 与 EM2 组分含量总体呈现低于平均值一侧的波动变化并且平均含量相对较低 (7.16% 和 16.25%), EM1/EM2 比值相对较高 (0.46), 低频磁化率和红度值 (46.35 和 6.48) 低于剖面平均值, 表明此时的西风环流和夏季风强度较弱, 气候较为干冷。通过与气候事件记录对比, 本文认为 EM5 组分在此阶段明显增加的波动变化 T8 (年代大致为 13—12 ka) 可能是新仙女木冷期 (YD) 事件的区域性响应<sup>[34, 48, 52]</sup>。综上所述, 章丘剖面记录的环境演变信息体现了全球气候环境变化的区域性响应, 但也因地理位置等因素影响呈现出区域性差异。

#### 4.6 章丘剖面粉尘堆积过程

章丘剖面样品参数化粒度端元分解进一步表明该剖面沉积物多物源性和粉尘搬运复杂性特点, 结合各端元组分含量变化可以发现, 来自西北内陆的细粒粉尘物质 (EM2 组分和部分 EM1 组分) 可通过高空西风的搬运成为章丘剖面黄土的组成物质, 但短距离搬运的近源粉尘 (EM4 和 EM5 组分) 则是章丘剖面沉积物的主要粉尘物质来源, 而且章丘剖面沉积物中以浮尘形式沉降的组分 (EM3) 也主要来自于近源。低空地方风系是章丘剖面粉尘物质的主要搬运动力, 并且其动力变化与冬季风强度变化之间表现出正相关性, 表明受西伯利亚高压控制的冬季风是章丘剖面粉尘搬运的主要驱动因素。此外, 由章丘剖面年代框架可以看出, 气候相对暖湿的 MIS3 阶段堆积明显厚于气候干冷的 MIS2 阶段 (图 2、图 6), 其沉积速率与粉尘搬运动力之间出现矛盾, 然而从粉尘搬运与堆积的整个过程来看, 粉尘源区的供给、粉尘搬运距离与动力强弱以及地表捕获粉尘的能力都影响粉尘物质的堆积<sup>[36, 48, 53]</sup>。由章丘剖面各端元组分含量变化及其指示的搬运动力之间的相关性本文认为, 近源物质丰厚为粉尘搬运与堆积提供了有利条件, 在相对暖湿的气候条件下, 除了西风搬运的粉尘物质增加以外, 相对较弱的近地风对空中浮尘物质沉降过程的阻碍作用减弱; 同时地表较多的植被增加了对粉尘的捕捉能力, 进而使通过多种搬运方式而来的粉尘物质得到了较好的沉积。而对于冬季风作用明显增强的干冷气候时期, 西风环流强度的减弱使其搬运的粉尘物质减少, 并且较强的近地风对浮尘物质沉降过程的阻碍作用增强; 虽然风力作用的增强使章丘剖面沉积物中的粗粒物质含量增加, 但干冷的气候条件使地表植被对粉尘的捕获能力减弱, 并且粉尘物质在强风作用下可能出现二次搬运。由此本文认为, 在相对暖湿的气候条件下, 除了远距离搬运的粉尘增加以外, 通过各种方式搬运来的粉尘均可发生较好的沉积是章丘剖面 MIS3 阶段沉积较厚的主要原因, 而且突发水文事件形成的砾石层对 MIS3 阶段沉积物的厚度可能也存在影响。通过与埤西剖面对比发现, 章丘剖面中并未发现有与全新世大暖期相对应的古土壤层, 对于同区域内 2 个剖面记载的全新世气候环境之间存在的差异本文认为, 章丘剖面与埤西剖面虽然都处在河谷之中, 但 2 个剖面在堆积地形上存在差异, 其中埤西剖面的堆积地形主要以盆地为主, 而章丘剖面的堆积地形主要为山地, 并且章丘剖面可能因受水文事件和人类活动的影响未能保存全新世大暖期的黄土堆积, 从而进一步表明了黄土堆积过程区域性差异。

## 5 结论

本文采用参数化粒度端元分析方法对章丘剖面样品粒度进行端元组分分解, 探讨该剖面沉积物的搬运动力与搬运方式等信息, 结合光释光年代 (OSL) 结果、低频磁化率 ( $\chi_{lr}$ ) 与色度 ( $a^*$ ) 指标提取了章丘剖面沉积过程的气候环境演变信息, 得出以下结论:

(1) 章丘剖面出露部分光释光年代介于42.24—0.26 ka之间,表明章丘剖面主要为晚更新世以来的沉积物。

(2) 章丘剖面沉积物粒度组分分解为5个端元:EM1代表成壤作用产生和携带搬运的粘土组分;EM2代表高空西风远距离搬运的细粉砂组分;EM3代表以浮尘形式沉降的粒级组分;EM4代表地方风系作用下低空悬移搬运的粉砂组分;EM5代表以尘暴形式近地悬移搬运的砂粒组分。EM5对冬季风强度的变化具有更好的指示意义,并记录了晚更新世以来的气候事件。

(3) 章丘剖面沉积物堆积过程先后经历了冬季风强度较弱、西风环流与夏季风较强,气候暖湿的间冰期;冬季风强度增强、夏季风与西风强度减弱,气候干冷的末次冰盛期;冬季风强度减弱、西风环流与夏季风增强的末次冰消期;以及末次冰期向全新世转换阶段,西风环流、夏季风的强度较弱,冬季风效应较明显的干冷时期。近源物质丰厚、近地风强度较弱以及地表植被较多是章丘剖面MIS3阶段堆积较厚的重要原因。

(4) 本文初步表明参数化粒度端元分析方法在山东地区黄土沉积动力、物质来源及其沉积环境等研究中具有可行性,但是关于章丘剖面砾石层形成对于黄土堆积的影响还需展开进一步的研究。

## 参考文献(References)

- [1] 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.]
- [2] Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Chen Yinglu, et al. Age and provenance of Younger Dryas paleo-aeolian sand layers in the Jin-Shaan Gorges of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(5): 790-803. [张玉柱, 黄春长, 陈莹璐, 等. 新仙女木期黄河晋陕峡谷古风成沙层年代及其物质来源. *地理学报*, 2017, 72(5): 790-803.]
- [3] Liu X X, Vandenberghe J, An Z S, et al. Grain size of Lake Qinghai sediments: Implications for riverine input and Holocene monsoon variability. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 449: 41-51.
- [4] Wang Zhaoduo, Huang Chunchang, Yang Hongjin, et al. Loess provenance characteristics and evolution indicated by grain size since late Pleistocene at the eastern foot of Liupan Mountains, China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(5): 818-826. [王兆夺, 黄春长, 杨红瑾, 等. 六盘山东麓晚更新世以来黄土粒度指示的物源特征及演变. *地理科学*, 2018, 38(5): 818-826.]
- [5] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
- [6] Liang X L, Niu Q H, Qu J J, et al. Applying end-member modeling to extricate the sedimentary environment of yardang strata in the Dunhuang Yardang National Geopark, northwestern China. *CATENA*, 2019, 180: 238-251.
- [7] Dietze E, Kai H, Diekmann B, et al. An end-member algorithm for deciphering modern detrital processes from lake sediments of Lake Donggi Cona, NE Tibetan Plateau, China. *Sedimentary Geology*, 2012, 243/244: 169-180.
- [8] Yu S Y, Colman S M, Li L X. BEMMA: A hierarchical Bayesian end-member modeling analysis of sediment grain-size distributions. *Mathematical Geosciences*, 2016, 48(6): 723-741.
- [9] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 263-277.
- [10] Prins M A, Vriend M, Nugteren G, et al. Late Quaternary aeolian dust input variability on the Chinese Loess Plateau: Inferences from unmixing of loess grain-size records. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26: 230-242.
- [11] Li Shuai, Yang Shengli, Liang Minhao, et al. The end member model analysis on grain size of loess in the eastern Tibetan Plateau. *Earth and Environment*, 2018, 46(4): 331-338. [李帅, 杨胜利, 梁敏豪, 等. 青藏高原东部黄土粒度分布的端元模型研究. *地球与环境*, 2018, 46(4): 331-338.]
- [12] Cheng Liangqing, Song Yougui, Li Yue, et al. Preliminary application of grain size end member model for dust source tracing of Xinjiang loess and paleoclimate reconstruction. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(6): 1148-1156. [程良清, 宋友桂, 李越, 等. 粒度端元模型在新疆黄土粉尘来源与古气候研究中的初步应用. *沉积学报*, 2018, 36(6): 1148-1156.]
- [13] Li Yue, Song Yougui, Zong Xiulan, et al. Dust accumulation processes of piedmont loess indicated by grain-size end



- members in northern Ili Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 162-177. [李越, 宋友桂, 宗秀兰, 等. 伊犁盆地北部山麓黄土粒度端元指示的粉尘堆积过程. *地理学报*, 2019, 74(1): 162-177.]
- [14] Wen Y L, Wu Y Q, Tan L H, et al. End-member modeling of the grain size record of loess in the Mu Us Desert and implications for dust sources. *Quaternary International*, 2019, 532: 87-97.
- [15] Xu Shujian, Ding Xinchao, Ni Zhichao. The sedimentary characteristics of Buxi loess profile in Shandong Province and their paleoclimatic and palaeoenvironment significance. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1707-1717. [徐树建, 丁新潮, 倪志超. 山东埠西黄土剖面沉积特征及古气候环境意义. *地理学报*, 2014, 69(11): 1707-1717.]
- [16] Cao Jiaxin, Li Peiying, Shi Ning. Loess of Miaodao Island in Shandong Province. *Science in China: Series B*, 1987(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.]
- [17] Tian S C, Sun J M, Lu L X, et al. Optically stimulated luminescence dating of late Quaternary loess deposits in the coastal region of North China: Provenance and paleoclimatic implications. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 218: 160-177.
- [18] Xu S J, Kong F B, Jia G J, et al. An integrated OSL chronology, sedimentology and geochemical approach to loess deposits from Tuoji Island, Shandong Province: Implications for the late Quaternary paleoenvironment in East China. *Aeolian Research*, 2018, 31: 105-116.
- [19] Xu S J, Ding X C, Yu L P, et al. Palaeoclimatic implications of aeolian sediments on the Miaodao Islands, Bohai Sea, East China, based on OSL dating and proxies. *Aeolian Research*, 2015, 19: 259-266.
- [20] Liu Lejun, Li Peiying, Wang Yongji. The grain-size properties and genesis of the 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.]
- [21] Li Wubiao, Li Zhiwen, Wang Zhigang, et al. Climatic environment changes during the last interglacial-glacial cycle in Zhifu loess section: Revealed by grain-size end-member algorithm. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(2): 177-187. [黎武标, 李志文, 王志刚, 等. 粒度端元揭示的芝罘剖面末次间冰期: 末次冰期气候环境变化特征. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 177-187.]
- [22] Chen Hui, Yang Shengli, Cheng Ting, et al. The magnetic susceptibility of top soil in the eastern Tibetan Plateau: Features and environmental implications. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1187-1194. [陈慧, 杨胜利, 成婷, 等. 青藏高原东部表土磁化率特征与环境意义. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1187-1194.]
- [23] Song Y G, Fang X M, King J W, et al. Magnetic parameter variations in the Chaona loess/paleosol sequences in the central Chinese Loess Plateau, and their significance for the middle Pleistocene climate transition. *Quaternary Research*, 2014, 81(3): 433-444.
- [24] Baumann K, Schoning L, Schrumpf M, et al. Rapid assessment of soil organic matter: Soil color analysis and Fourier transform infrared spectroscopy. *Geoderma*, 2016, 278: 49-57.
- [25] Wang Qiansuo, Song Yougui, Li Jijun, et al. Characteristics of color in Chaona section and its paleoclimatic significance during the Last Glacial-Interglacial cycle. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(11): 1489-1494. [王千锁, 宋友桂, 李吉均, 等. 末次冰期—间冰期旋回朝那黄土颜色特征及古气候意义. *地理科学*, 2015, 35(11): 1489-1494.]
- [26] Chen Jie, Yang Taibao, Zeng Biao, et al. Chroma characteristics and its paleoclimatic significance in Pamir loess section, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(2): 333-342. [陈杰, 杨太保, 曾彪, 等. 中国帕米尔地区黄土上部色度变化特征及古气候意义. *沉积学报*, 2018, 36(2): 333-342.]
- [27] Liu X X, Sun Y B, Vandenberghe J, et al. Palaeoenvironmental implication of grain-size compositions of terrace deposits on the western Chinese Loess Plateau. *Aeolian Research*, 2018, 32: 202-209.
- [28] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2015, 16: 4494-4506.
- [29] Konert M, Vandenberghe J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: A solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 1997, 44: 523-535.
- [30] Song Y G, Chen X L, Qian L B, et al. Distribution and composition of loess sediments in the Ili Basin, Central Asia. *Quaternary International*, 2014, 334/335(12): 61-73.
- [31] Bronger A, Heinkele T. Mineralogical and clay mineralogical aspects of loess research. *Quaternary International*, 1990, 7/8: 37-51.
- [32] Shi Zhengtao, Fang Xiaomin, Song Yougui, et al. Loess sediments in the north slope of Tianshan Mountains and its indication of desertification since middle Pleistocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(3): 109-114. [史正涛, 方小敏, 宋友桂, 等. 天山北坡黄土记录的中更新世以来干旱化过程. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26



- (3): 109-114.]
- [33] Sun D H, Su R X, Li Z J, et al. The ultrafine component in Chinese loess and its variation over the past 7-6 Ma: Implications for the history of pedogenesis. *Sedimentology*, 2011, 58: 916-935.
- [34] Liu Hao, Jia Jia, Lu Caichen, et al. Multi-components separation of loess grain size in Zeketai and the recorded climate fluctuation during the last glacial period. *Arid Land Geography*, 2018, 41(6): 1260-1269. [刘浩, 贾佳, 路彩晨, 等. 则克台黄土粒度组分分离及其记录的末次冰期气候波动. *干旱区地理*, 2018, 41(6): 1260-1269.]
- [35] Qiang M R, Lang L L, Wang Z T. Do fine-grained components of loess indicate westerlies: Insights from observations of dust storm deposits at Lenghu (Qaidam Basin, China). *Journal of Arid Environments*, 2010, 74: 1232-1239.
- [36] Újvári G, Kok J F, Varga G, et al. The physics of wind-blown loess: Implications for grain size proxy interpretations in Quaternary paleoclimate studies. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 247-278.
- [37] Li Y, Song Y G, Fitzsimmons K E, et al. Eolian dust dispersal patterns since the last glacial period in eastern Central Asia: insights from a loess-paleosol sequence in the Ili Basin. *Climate of the Past*, 2018, 14(3): 271-286.
- [38] Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits*. London: Academic Press, 1987.
- [39] Rea D K, Leinen M, Janecek T R. Geologic approach to the long-term history of atmospheric circulation. *Science*, 1985, 227: 721-725.
- [40] Vandenberghe J. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification. *Earth-Science Reviews*, 2013, 121: 18-30.
- [41] Nottebaum V, Stauch G, Hartmann K, et al. Unmixed loess grain size populations along the northern Qilian Shan (China): Relationships between geomorphologic, sedimentologic and climatic controls. *Quaternary International*, 2015, 372: 151-166.
- [42] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Bimodal grain-size distribution of Chinese loess, and its palaeoclimatic implications. *CATENA*, 2004, 55: 325-340.
- [43] Crouvi O, Amit R, Enzel Y, et al. Sand dunes as a major proximal dust source for late Pleistocene loess in the Negev Desert, Israel. *Quaternary Research*, 2008, 70: 275-282.
- [44] Lin Y C, Mu G J, Xu L S, et al. The origin of bimodal grain-size distribution for aeolian deposits. *Aeolian Research*, 2016, 20: 80-88.
- [45] Vriend M, Prins M A, Buylaert J P, et al. Contrasting dust supply patterns across the north-western Chinese Loess Plateau during the last glacial-interglacial cycle. *Quaternary International*, 2011, 240: 167-180.
- [46] 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.]
- [47] Rasmussen S O, Bigler M, Blockley S P, et al. A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: Refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 106: 14-28.
- [48] Sweeney M R, Mason J A. Mechanisms of dust emission from Pleistocene loess deposits, Nebraska, USA. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118: 1460-1471.
- [49] Wang Yongjin, Wu Jiangying, Wu Jinquan, et al. Comparison of stalagmite high resolution climate records in Nanjing with GRIP ice core during the last glacial period. *Science in China: Series D*, 2000, 30(5): 533-539. [汪永进, 吴江滢, 吴金全, 等. 末次冰期南京石笋高分辨率气候记录与GRIP冰芯对比. *中国科学: D辑*, 2000, 30(5): 533-539.]
- [50] Hu Chunsheng, Wu Li, Yang Lihui. Gravel fabric and sedimentary environment of terrace gravel layers of the upper Qingyijiang river at Jingxian county. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(6): 951-958. [胡春生, 吴立, 杨立辉. 青弋江上游泾县阶段地砾石层砾组结构及其沉积环境研究. *地理科学*, 2016, 36(6): 951-958.]
- [51] Cui Zhiqiang, Liu Dengzhong, Meng Qingmin. The origin of the Pleistocene gravel in western Sichuan depression. *Geology in China*, 2009, 36(5): 1065-1078. [崔志强, 刘登忠, 孟庆敏. 川西凹陷地区更新统砾石层沉积成因探讨. *中国地质*, 2009, 36(5): 1065-1078.]
- [52] Zhou Jiaying, Yu Juan, Yang Lijun, et al. Sedimentary characteristics of the early and middle Holocene loess in Tongchuan area and their implications for paleoclimate. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(1): 160-166. [周家兴, 于娟, 杨丽君, 等. 铜川地区早中全新世黄土沉积特征及其古气候意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(1): 160-166.]
- [53] Cheng Liangqing, Song Yougui, Sun Huanyu, et al. Spatio-temporal distribution of dust sedimentation rate of Tianshan loess since MIS3 and its implications. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2019, 39(1): 143-153. [程良清, 宋友桂, 孙焕宇, 等. MIS3以来天山黄土沉积速率时空分布规律及其意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(1): 143-153.]

## Dust accumulation processes and palaeoenvironmental significance of loess indicated by grain size in Zhangqiu, Shandong Province

KONG Fanbiao<sup>1,2</sup>, CHEN Haitao<sup>2,3</sup>, XU Shujian<sup>2,3</sup>, MIAO Xiaodong<sup>2</sup>

(1. School of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276000, Shandong, China; 3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

**Abstract:** The accumulation processes of loess in Shandong Province record atmospheric circulation changes in eastern China, which is significant in revealing the varied characteristics of East Asian monsoons and palaeoenvironmental change. In this study, the parameterized end-member modelling analysis of grain-size distributions is used to discuss the sedimentary characteristics, transport dynamics and environmental significance for a loess section in Zhangqiu, Shandong Province. The results indicated that: (1) The optically stimulated luminescence (OSL) ages of the Zhangqiu section ranged from 0.26 to 42.24 ka, suggesting that sediments have mostly deposited since the late Pleistocene. (2) The grain size components of the sediments in this section were divided into five end members: EM1 represents the mixed clay component of pedogenesis and transported sediment, EM2 represents the fine silt component transported by the high-altitude westerly wind over long distance, EM3 represents material that settles as floating dust, EM4 is the main material source of the profile, which represents the silt component transported by low-altitude suspension under local wind systems, and EM5 represents short-distance suspended materials under dust storm conditions. Change in the EM5 component is a good indicator of winter monsoon intensity change, and has recorded all climate fluctuation events since the late Pleistocene. (3) According to the climatic proxies such as the grain-size end-member content, low frequency magnetic susceptibility ( $\chi_{lf}$ ) and chromaticity ( $a^*$ ), combined with the results of OSL, this effectively indicated the stage change and differences of the sedimentary environment in the Zhangqiu section since the late Pleistocene and reflected the regional response to global climate change.

**Keywords:** loess; end-member modelling analysis of grain-size distributions; dust accumulation; environmental evolution; Shandong Province