

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020082601

临汾盆地黄土粒度分布的端元模型研究

赵格格¹, 田庆春¹, 杜五喜¹, 裴瑜¹, 鄂崇毅^{2,3}

1. 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000

2. 青海师范大学青藏高原资源与环境教育部重点实验室, 西宁 810008

3. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008

摘要: 为了解黄土高原东南缘临汾盆地黄土沉积物粒度分布特征及其气候意义, 运用参数化端元分析模型对临汾盆地黄土沉积物粒度数据进行分析, 提取对气候变化反映敏感的粒级组分。通过对临汾盆地黄土-古土壤序列运用谢帕德三角分类法, 发现黄土主要由粉砂和黏土质粉砂组成, 分布较为集中; 对临汾盆地黄土粒度进行 Gen.Weibull 函数分布的参数化端元模型反演得出了 3 个端元, EM1 可能是黄土在夏季风作用下的风化和成壤过程中形成的, EM2 可能代表的是高空西风搬运的远源沉积物, EM3 可能代表的是较强的冬季风所搬运的近源沉积物以及冬季短时间尘暴所带来的物质。结合 OSL 测年结果, 临汾盆地黄土粒度端元组分、磁化率与深海氧同位素对比分析, 发现临汾盆地与深海氧同位素一致, 说明临汾盆地气候演化受全球冰量控制, 但在每个阶段的内部波动上又表现出一定的区域特征。

关键词: 粒度; 黄土; 端元分析; 临汾盆地

中图分类号: P532

文献标识码: A

End member model analysis of grain size for the loess in Linfen Basin, China

ZHAO Gege¹, TIAN Qingchun¹, DU Wuxi¹, PEI Yu¹, E Chongyi^{2,3}

1. College of Geography Science, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China

2. Key Laboratory of Qinghai-Tibetan Plateau Environmental and Resource(MOE), Qinghai Normal University, Xining 810008, China

3. Qinghai Institute of Salt Lake, Chinese academy of sciences, Xining 810008, China

Abstract: In order to understand the grain size distribution pattern of the loess sediments and its bearing on climatic changes in the Linfen Basin on the southeastern margin of the Loess Plateau, the method of Parametric End-member Modeling was used to analyze the grain size data of the loess sediments through extraction of the grain-size fraction sensitive to climate changes. According to Shepard's classification, the Loess-paleosol sequence in the Linfen Basin is mainly composed of silt and clayey silt. Three general Weibull distribution end members (EM) are recognized. Our results suggest that the EM1 may indicate the product of weathering and pedogenesis of loess under the influence of summer monsoon in the East Asia, while the EM2 indicate the remotely sourced dust by the high-altitude airflow under the control of the westerly belt. The EM3 represents near source dust brought by the East Asia winter monsoon and short-term dust storms in winter. Through the correlation with OSL results, grain size end-member of the loess, magnetic susceptibility and SPECMAP data, it is found that the oxygen isotope of Linfen Basin is consistent with that of SPECMAP, indicating that the climate evolution of the Basin is controlled by global ice amount. However, the internal fluctuation within each stage shows regional features.

Key words: grain size; loess; End member analysis; Linfen Basin

粒度作为反映古气候、搬运方式和物质来源的重要指标, 被广泛地运用于黄土^[1-3]、海洋^[4]和湖泊^[5]的古环境变化研究中。刘东生等^[1]对中国黄土高原的典型马兰黄土样品的粒度分析表明, 自西北向东南方向依次为砂黄土带、黄土带、黏化黄土带, 粒度逐渐变细, 黄土的粒度变化一般被解释为受控于

风力强度的改变, 被用作东亚冬季风变化的替代性指标。黄土-古土壤的沉积序列是在不同物源、多种搬运动力和复杂沉积环境下共同作用的结果, 但是不同的粒级对环境变化的敏感程度是不同的, 因此环境敏感粒级的提取对充分获得复杂的古环境变化信息来说是十分重要的。目前, 提取敏感的环境

资助项目: 国家自然科学基金项目“临汾盆地高分辨率黄土记录的 MIS3 阶段气候变化过程”(41701223)

作者简介: 赵格格 (1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为全球变化与第四纪环境演化, E-mail: 903598190@qq.com

通讯作者: 田庆春 (1982—), 男, 副教授, 研究方向为全球变化与第四纪环境演化, E-mail: tianqch2006@126.com

收稿日期: 2020-08-26; 改回日期: 2020-12-17. 文凤英编辑

境粒度方法有端元模型^[6-11]、粒级-标准偏差和主成分分析等,端元模型对黄土高原粒度数据进行反演应用已经非常广泛,且取得了大量成果^[12-13]。

临汾盆地位于黄土高原东南缘,地处中国温带季风气候区,季风气候是这一地区最活跃的环境变迁因子,为获取地区高分辨率气候特征,一些研究者从粒度、磁化率、全铁以及有机质等指标对临汾盆地黄土-古土壤做了一定工作^[14-15],但关于沉积物环境敏感粒度组分的研究相对较少,缺乏使用其他数学方法来捕捉更高分辨率粒度组分的气候信息。不同区域颗粒组分指示的环境存在一定差异^[16],没有科学的分析很难对沉积环境有详细了解,而端元分析模型是识别多组分沉积物来源和查明搬运方式的有效工具,在古环境重建中得到广泛的应用。对此,本文选择临汾盆地丁村剖面黄土-古土壤序列为研究对象进行工作,通过对比参数化与非参数化端元分解方法的差异^[17],讨论两种方法对临汾盆地粒度数据的适用性后,选择参数化端元分析法提取环境敏感粒组的基础上,结合年代结果,揭示各端元的变化规律以及它们指示的古气候意义,并与深海氧同位素^[18]为载体的气候代用指标进行对比分析,来揭示黄土高原东南缘临汾盆地的粒度分布特征及其环境意义。

1 区域概况

临汾盆地位于山西省南部,北依韩侯岭,南为峨眉台地,东至霍山,西抵罗云山,属于温带大陆性季风气候,年均气温 11.7~13.2℃,年降水量 453~547 mm,自然植被区带属暖温带落叶阔叶林带,山地与平原相接处,不同时代的黄土分布广泛,午城黄土和离石黄土主要分布于盆地边缘丘陵地带的冲沟当中,出露面积很小,马兰黄土分布广泛,覆盖在山麓丘陵、平原及高阶地之上,厚 5~20 m。马兰黄土之上覆盖全新世黄土-古土壤,分布在盆地的南部和北部,蕴含着丰富的古气候演化信息。本研究选择襄汾县城南部汾河右岸丁村遗址附近的一黄土剖面(丁村剖面)为研究对象(如图 1),经纬坐标为 35°49'34"N、111°25'32"E,海拔高度 406.5 m。

2 研究方法

2.1 样品采集

通过野外考察,我们选择丁村古人类遗址附近

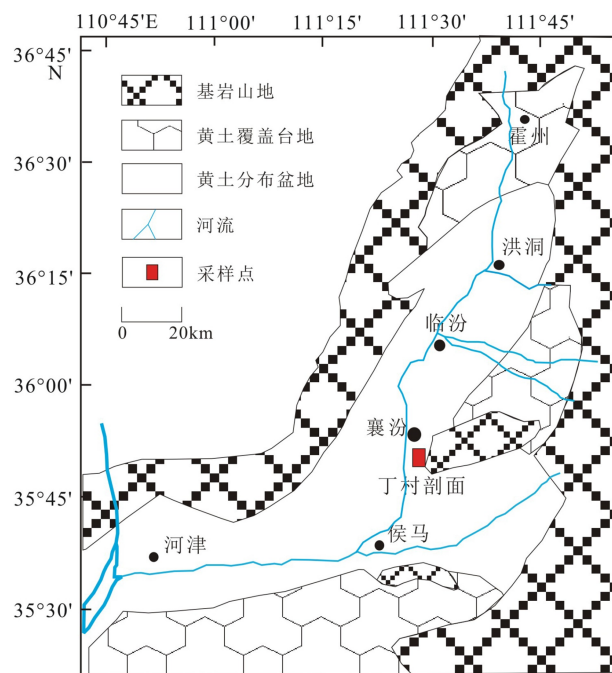


图 1 丁村剖面位置图

Fig.1 The site of the Dingcun profile

黄土-古土壤剖面为研究对象,命名为丁村剖面。剖面位于汾河三级阶地^[19],野外可清晰分辨出 S_1 古土壤层,从剖面顶部以 2 cm 间隔进行样品的采集,一直采集到 S_1 底部,共采集了 310 个样品,所采剖面总厚度约 620 cm。同时使用长 40 cm,直径 4.5 cm 的不锈钢管进行光释光年代样品的采集,以 50~100 cm 不等距间隔采集 8 组光释光(OSL)样品。

2.2 分析测试方法

2.2.1 粒度测试方法

粒度参数首先对样品进行前处理,前处理方法见参考文献^[20],然后使用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行测试,测试范围 0.02~2 000 μm ,重复测量误差 <1%。

2.2.2 OSL 测试方法

OSL 样品在青海师范大学光释光年代学室测定,使用 Risø TL/OSL-DA-20-C/D 型热/光释光仪进行测试(具体步骤见参考文献^[21]),选择 180~250 μm 粒级组分的粗颗粒钾长石为测年物质,采用富钾长石 pIRIR 法^[22-23],对钾长石进行多次 IR 激发的同时增加样品的测量温度可以将没有异常衰减的 IRSL 信号分离出来,每一个测量温度下产生的 IRSL 信号可以获得一个 D_0 值和年龄。

2.2.3 端元分析法

端元分析可以把粒度数据中的一些混合信息分解成很多端元,这些端元是由特定的动力机制分

选出来的,通过对粒度数据进行不同的处理方式而分为两种方法:(1)参数组分分离是通过对单个样品进行拟合,设定最佳参数,以达到分离出样品亚组分的目的。Paterson 等^[17]研究出了参数化的端元分析法,认为通过特定的动力方式所沉积的黄土具有单峰形态,与曲线拟合方法的结果较为一致。在程序中设置了多种拟合方法,输入全样本数据并设置拟合函数值后,即可得到最终的端元拟合结果,即为最优结果。(2)非参数组分分离是通过对整体样品进行拟合,目的是分离出几种具有相同频率分布的粒度组分,Weltje^[11]等开发了一种综合考虑多个数据并根据可能的动力来源进行分解的非参数方法,该方法应用比较广泛,但分解结果可能具有多个峰值形状,与曲线拟合方法的结果有些不同,对动力来源的解释存在困难。对丁村剖面黄土的粒度数据,应用沉积物粒度端元模型进行分析,Weltje 等^[7,10-11]认为,沉积物粒度组分是在不同的搬运或改造动力方式共同作用下由不同物质来源的颗粒物沉积形成,因此提出了沉积物端元组分的概念,是根据一组样品的沉积学粒度特征,从统计学意义上对各不同端元组分进行鉴别,Paterson 等^[17]在此基础上基于 MATLAB 软件进行了改良,使用参数组分分离方法对单个样品进行拟合。

3 年代结果

年代学结果见表 1,由于 OSL 只能得到地层的年代框架,因此以 5 个准确的 OSL 数据为控制点,选择前人提出的粒度-年龄模型^[24],带入中值粒径得到了丁村剖面年代框架(图 2),570 cm 处(S_1 底界)年代约为 128.5 ka,与前人建立的黄土地层年代标尺 S_1/L_2 界限年龄为 128.8 kaBP 较为一致^[25],说明我们的年代-深度模型是正确的。剖面顶部年代约 20 ka (0~20 ka 的地层可能受到侵蚀),说明本剖面包含与深海氧同位素一致的 MIS5、MIS4 和 MIS3 这 3 个阶段。通过野外观察与测年数据,将剖面自上

而下分为 4 层:0~60 cm, L_1L_1 黄土层;60~190 cm, L_1S_1 弱古土壤层;190~420 cm, L_1L_2 黄土层;420~570 cm, S_1 古土壤层,为浅红棕色黏土。

4 结果分析

4.1 临汾黄土粒度分类结果

谢帕德三角分类法^[26-27]被广泛地接受,并应用到黄土-古土壤的粒度分类研究当中^[28]。沉积物分类图可以显示剖面样品的粒度组成情况,可以非常明显地看出剖面沉积物粒径属于哪一类别。故使用谢帕德三角分类法对临汾盆地黄土-古土壤进行分类,结果如图 3。丁村剖面黄土-古土壤粒径主要分布在粉砂和黏土质粉砂中,分布较为集中。

4.2 端元模型结果分析

4.2.1 端元数量的确定

本文在 MATLAB 环境下,运用 Paterson 等人^[17]编写的 Analysize-masters 程序,导入丁村剖面的全样粒度数据,在假设端元数为 1~10 的基础上,进行参数化和非参数化分析,然后通过对线性相关和角度离差进行综合分析。参数化方法是在 Weibull 分布函数中增加了一个附加位置参数的 Gen.Weibull 分布函数来进行分解,是为了在形状上有很大的灵活性并且能很好地控制偏度。关于选择最优端元数量,主要考虑 3 个指标^[29]:线性相关度,是为了说明原数据集与端元的总体相关度,相关度越高拟合程度越好,当线性相关度大于 0.9 时,满足拟合要求,线性拟合也很良好;角度离差,是原样粒度曲线与端元在进行形状拟合时产生的偏差,偏差值越小则端元曲线在形状拟合的误差越小,当偏差值小于 5°时拟合结果越理想;端元相关度,是分解得到的每个端元之间的相关度,相关度越高各个端元之间的分布有较高的重合,说明其独立性差、拟合过度。

表 1 丁村剖面 OSL 年代结果
Table 1 OSL dating results of Dingcun profile

样品	深度/m	U/(mg·kg ⁻¹)	Th/(mg·kg ⁻¹)	K/%	环境剂量率/(Gy·ka ⁻¹)	含水/%	测片	等效剂量/Gy	年代/ka
DC1-1	1.35	2.46±0.4	11.41±0.7	2.03±0.04	3.85±0.20	15±7	6	160.61±2.74	41.773±2.43
DC3-1	3	2.20±0.4	12.21±0.7	2.12±0.04	3.87±0.20	15±7	6	247.30±13.38	63.85±4.99
DC5-1	4	2.17±0.4	12.34±0.7	2.16±0.04	3.87±0.21	15±7	6	279.23±7.88	72.09±4.57
DC7-1	5	2.04±0.4	10.26±0.7	1.94±0.04	3.53±0.19	15±7	6	345.19±8.10	97.76±5.98
DC8-1	5.5	1.86±0.3	11.09±0.7	1.93±0.04	4.09±0.24	15±7	6	449.59±20.94	109.96±8.63

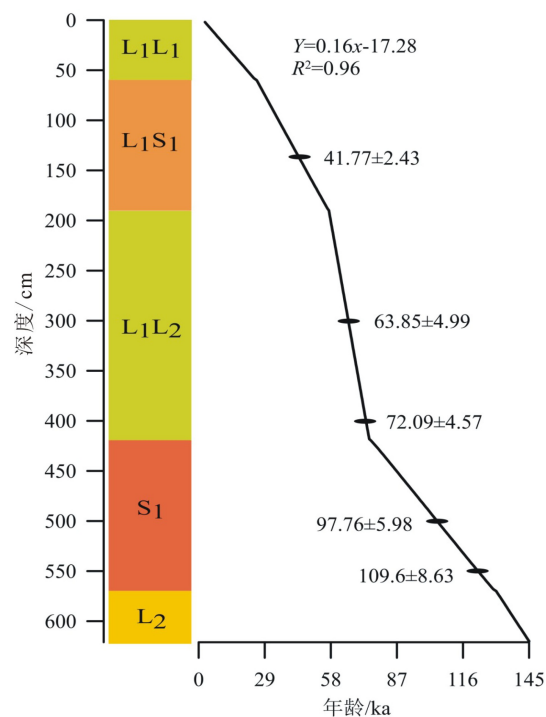


图 2 丁村剖面年龄模型
Fig.2 Age model of Dingcun profile

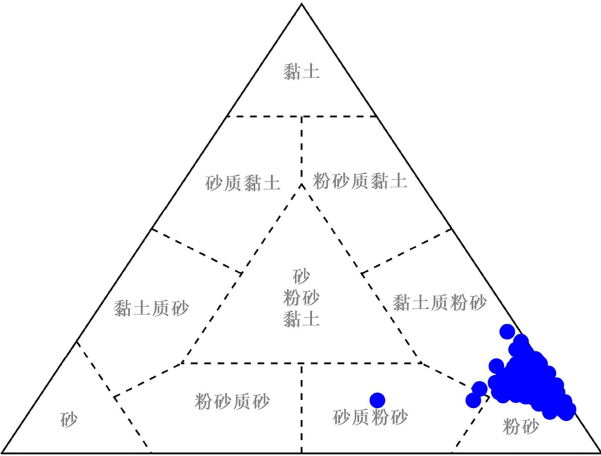


图 3 谢帕德三角分类
Fig.3 Shepard's classification

然后通过综合分析两种方法的线性相关度、角度偏差和端元相关度确定了最优的端元数量,其拟合特性见表 2、图 4。非参数方法的线性相关度小于参数化方法;非参数化方法的端元标准偏差均值却远大于参数化方法;非参数化方法的端元相关度

大于参数化方法。因此,我们最终确定使用参数化分解方法,选取 3 个端元对丁村剖面粒度数据进行端元反演。

4.2.2 端元组分分析

通过端元模型对临汾盆地丁村剖面黄土粒度进行分析,反演得出了 3 个端元粒度频率分布曲线图(图 5),将 3 个端元粒度组分分别命名为 EM1、EM2 和 EM3,分布都接近正态分布,分选由差变好。EM1 在 2.51 μm 的粒径时含量占比最多,曲线分布宽平,范围更广,峰值较低;EM2 在 12.61 μm 的粒径时含量占比最多,曲线分布范围较窄,较为陡峭;EM3 在 35.56 μm 的粒径时含量占比最多,曲线分布范围最窄,更集中在粗粒端,曲线窄而尖,峰值更高且陡峭,变化幅度大。从 3 个端元含量变化图中可以看出(图 5),EM1 的含量变化在 3 个端元中相对较为平缓,冷暖波动不明显,整体曲线没有明显的变化趋势;EM2 含量变化也有比较大的波动,在 0~60 cm 出现低值,60~190 cm 为高值,190~420 cm 为低值,420~570 cm 为高值,EM3 含量变化具有较大的波动。

5 讨论

5.1 端元的环境意义

EM1 的众数粒径为 2.51 μm ,与中值粒径的相关系数仅为 0.090,几乎没有相关性(图 6),一些学者研究认为黄土沉积后又经过了风化成壤作用,使用端元分析,从沉积物中分解出在风化与成壤作用下形成的平缓端元,因此众数粒径为 2.51 μm 的 EM1 是通过高空长距离搬运而来的远源细颗粒物,且这些细颗粒物是一直存在于大气中的本底粉尘,同时黄土沉积后,因为一系列的成壤风化过程也会对几微米以下的粒径产生影响^[30-31];与中国黄土众数粒径 2~6 μm 的细颗粒组分具有一致性^[32],故推测 EM1 可能是黄土在夏季风作用下的风化和成壤过程中形成的。

EM2 的众数粒径为 12.61 μm ,与中值粒径的相关性较强($R^2=0.492$)(图 6),根据大气动力学的研究

表 2 丁村剖面黄土粒度参数化与非参数化端元拟合特性
Table 2 Fittings of parametric and nonparametric EMA for the Dingcun profile

方法	端元数	线性相关性	角度偏差	端元相关度	端元标准偏差均值
参数化	3	0.992	4.240	0.070	5.674
非参数化	2	0.990	4.580	0.216	7.221

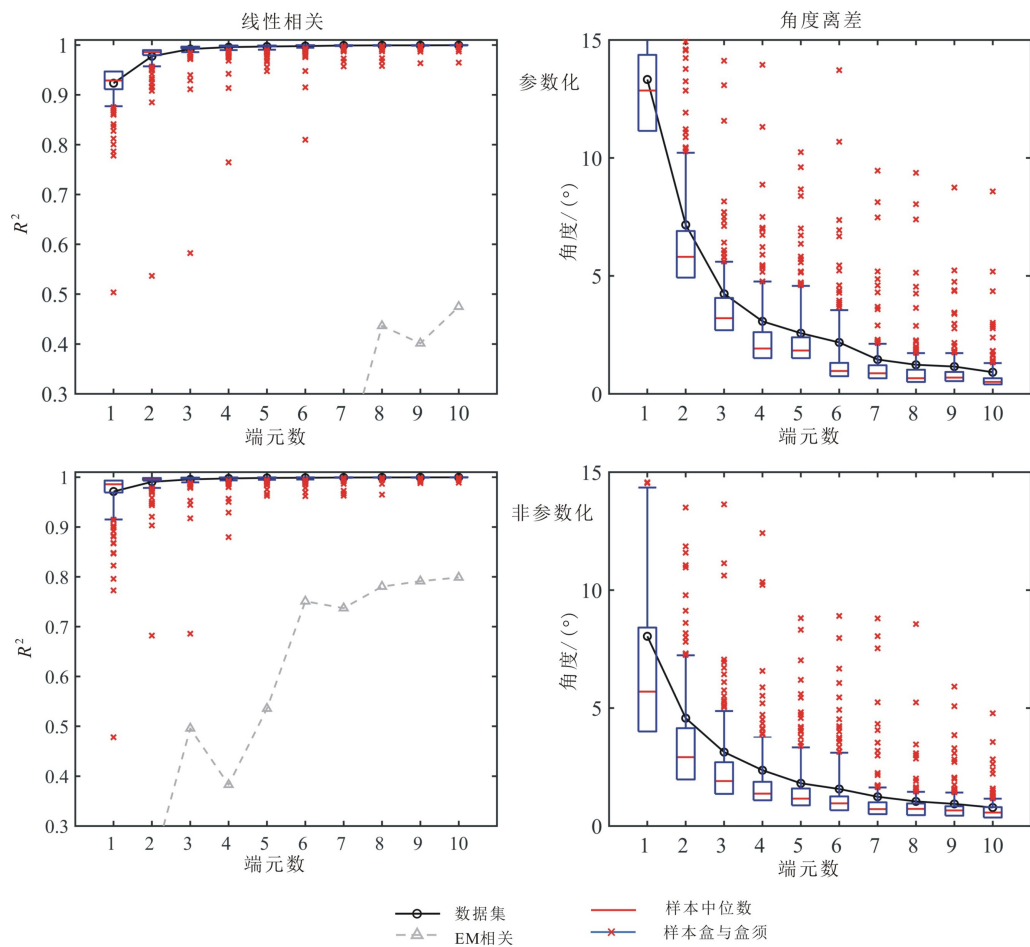


图4 丁村剖面黄土粒度非参数化与参数化端元分解结果与相关判别指标

Fig.4 Frequency distribution curves of each end-member in the Dingcun profile

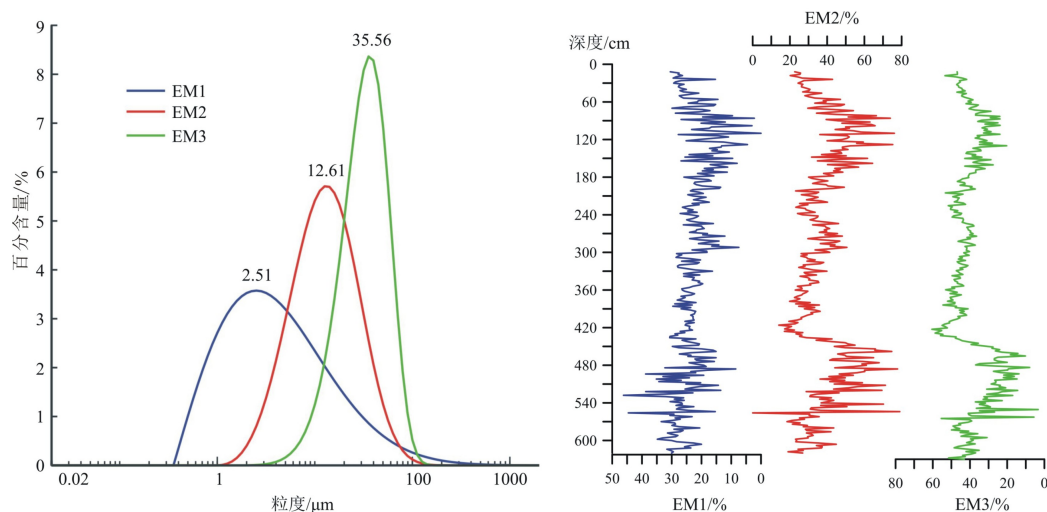


图5 EM1、EM2、EM3 频率分布与含量变化曲线

Fig.5 Frequency distribution and content variations curves of EM1、EM2、EM3

结果, 粒径范围 $2\sim 16\mu\text{m}$ 的细粉砂在风力的作用下可以被搬运到距离地面几千米的高空, 它们长期漂浮在高空大气中, 在风力减小时降落到全球任一地方沉积^[33]; 而且 Vriend 等^[34] 对黄土高原地区多个剖

面进行研究, 对黄土粒度运用端元分析后, 也提出了细颗粒端元是被高空远距离搬运的, 称之为远源端元; 王兆夺等^[13] 对长城塬剖面的研究提出了细粒度组分, 认为物源较远, 是在搬运动力减弱的情

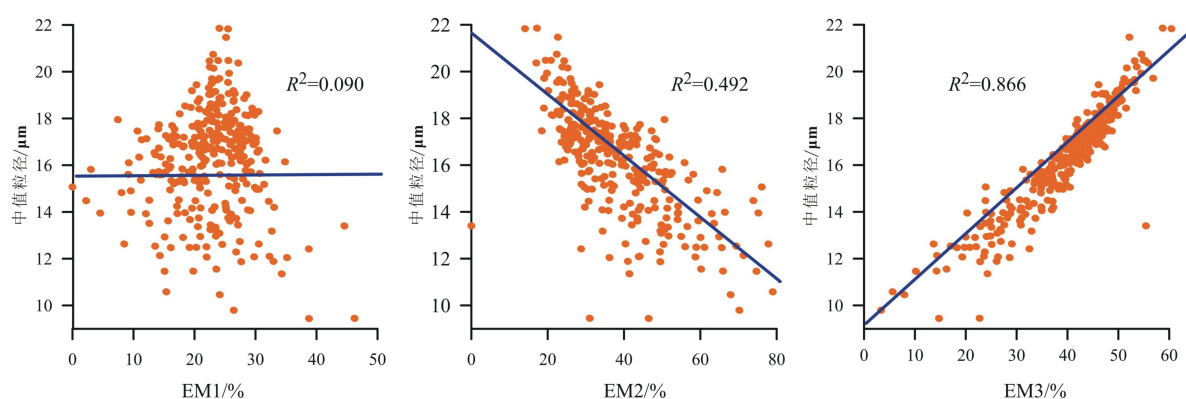


图 6 EM1、EM2、EM3 与中值粒径的相关性分析

Fig.6 Correlations of EM1、EM2、EM3 with median grain size

下沉积, 因此它可能代表了西风带控制的由高空气流搬运的远源粉尘。基于上述研究, 推测 EM2 可能代表的是高空西风搬运的远源沉积物。

EM3 的众数粒径为 $35.56\ \mu\text{m}$, 与中值粒径之间表现出非常明显的相关性且呈正相关(图 6), 相关系数很高 ($R^2=0.866$), 且 EM3 的粒径范围为 $3.34\sim 60.45\ \mu\text{m}$, 而中值粒径的范围为 $9.44\sim 21.85\ \mu\text{m}$, EM3 的粒径变化幅度大于中值粒径。Pye^[35] 总结出 $20\sim 70\ \mu\text{m}$ 的中粗粉砂和细砂在尘暴中做短距离的悬移运动, 一般在大气中的运动范围只有几百米的距离, 待风力减小时降落到地面上, 大于 $30\ \mu\text{m}$ 的颗粒物质在较强风暴条件下最多迁移至距离源区 $30\ \text{km}$ 的地方, 极端风暴条件下也只是迁移至距离源区几百千米的地方, 而且搬运的方式主要是短时间的近地面悬移; 孙东怀在对黄土高原粒度组分的研究中^[31], 通过计算发现粗粒组分的平均粒径在 $21\sim 54\ \mu\text{m}$ 范围内, 认为该范围内的黄土由冬季风沉积, 且搬运距离近, 为低空搬运; 在 Prins 等^[36] 对黄土高原多个剖面的研究中, 把粗粒组分划分为两个端元, 一个为 $40\ \mu\text{m}$ 左右的组分, 该组分的黄土可能是短距离的悬移搬运, 认为可以反映冬季风的变化情况, 另一个为大于 $60\ \mu\text{m}$ 的组分, 该组分可能为短距离跃移, 也可以反映冬季风的变化情况。因此基于上述原因, 推测 EM3 可以反映冬季风的变化情况, 可能代表的是较强的冬季风所搬运的近源沉积物以及冬季短时间尘暴所带来的物质。

5.2 古环境和古气候变化

根据 Gen.Weibull 函数分布的参数化端元分析法, 并将临汾盆地各环境指标与深海氧同位素记录^[18] 对比(如图 7), 对末次间冰期以来气候演化特征进行分析:

128.8 ka 之前 ($570\ \text{cm}$ 以下), 磁化率和频率磁

化率在该阶段为低值, EM1 和 EM2 细颗粒组分的含量减少, 中值粒径和 EM3 粗颗粒组分的含量增加, 说明该区冬季风增强, 沉积物主要由冬季风带来, 对应于 MIS6 晚期。

$128.8\sim 75\ \text{ka}$ ($570\sim 420\ \text{cm}$), 对应于 MIS5, 磁化率和频率磁化率在该阶段急剧增高, 在整个曲线出现最高值, EM1 和 EM2 细颗粒组分的含量增加, 中值粒径减小和 EM3 粗颗粒组分的含量减少, 表明该阶段东亚冬季风较弱而夏季风较强, 磁化率与 EM3 组分的变化与深海氧同位素的变化较为相似, 表明临汾盆地与全球气候表现一致, 处于温暖湿润时期。深海氧同位素在该阶段分为 a、b、c、d、e 五个明显的冷暖变化亚阶段, 呈现暖-冷-暖-冷-暖的气候变化趋势, 本区气候在该阶段虽然也有冷暖变化, 但是没有表现出特别明显的冷暖波动, 可能与临汾盆地距离冬季风的源区较远有关, 沉积速率相对较低, 加上后期强烈的成壤作用^[37] 和淋溶作用^[38], S_1 古土壤大多由 1 层或 3 层古土壤叠置而成^[39], 可能影响其气候记录。

$75\sim 57\ \text{ka}$ ($420\sim 190\ \text{cm}$), 对应于 MIS4, 磁化率和频率磁化率在该阶段急剧降低, 在整个曲线出现最低值, EM1 和 EM2 细颗粒组分的含量减少, 中值粒径和 EM3 粗颗粒组分的含量增加, 表明该阶段冬季风强劲, 气候转冷, 深海氧同位素在该阶段指示全球冰量增加, 全球处于寒冷的时期, 但内部有短暂回暖, 可能受北大西洋千年尺度气候影响^[40], 但具体的对应关系还有待进一步研究。

$57\sim 25\ \text{ka}$ ($190\sim 60\ \text{cm}$), 对应于 MIS3, 磁化率和频率磁化率在该阶段缓慢增加, EM1 和 EM2 细颗粒组分的含量增加, 中值粒径和 EM3 粗颗粒组分含量减少, 表明该阶段气候较温暖, 且与三阶段全球弱暖期一致, 出现两次暖期, 一次冷期, 呈现暖-冷-暖气候变化趋势, 但是该区域的冷暖变化趋

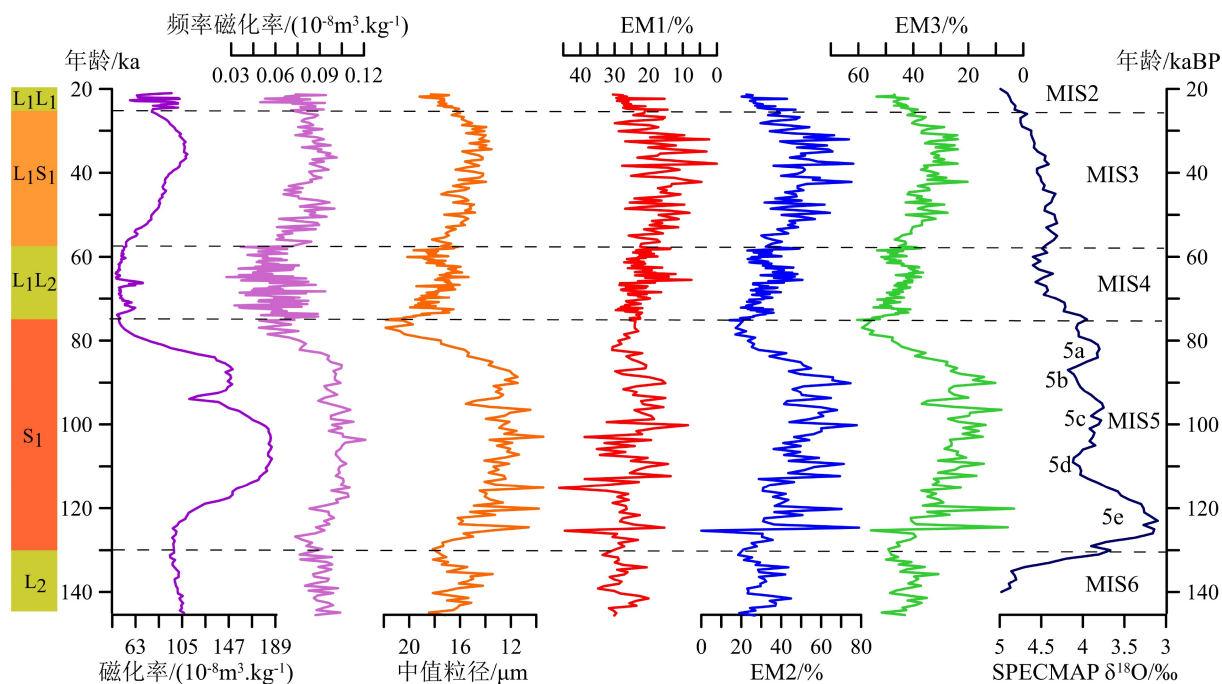


图7 丁村剖面磁化率、频率磁化率、中值粒径、EM1、EM2和EM3与深海氧同位素记录^[18]

Fig.7 Comparison of the magnetic susceptibility, frequency magnetic susceptibility, median grain size, EM1, EM2 and EM3 of the Dingcun profile with SPECMAP $\delta^{18}\text{O}$ record^[18]

势比深海氧同位素大,可能与东亚冬季风强度快速变化有关^[41]。

25~20 ka(60 cm 以上), EM1 和 EM2 细颗粒组分的含量减少,中值粒径和 EM3 粗颗粒组分的含量增加,磁化率和频率磁化率值降低,与深海氧同位素指示的全球冰量增加相一致,说明气候开始变冷,对应于 MIS2 早期。

临汾盆地黄土沉积物各指标波动特征与深海氧同位素一致,说明临汾盆地气候演化受全球冰量控制,但在每个阶段的内部波动上又表现出一定的区域特征,对我们研究黄土高原东南缘临汾盆地的粒度分布特征及其环境具有一定意义。

6 结论

(1)根据谢帕德三角分类,临汾盆地丁村剖面黄土主要由粉砂和黏土质粉砂组成,分布较为集中,以粉砂为主,黏土质粉砂含量较少。

(2)对临汾盆地黄土粒度进行参数化端元模型反演得出了3个端元:认为 EM1 可能是黄土在东亚夏季风的风化和成壤作用下而形成的;EM2 可能代表的是高空西风搬运的远源沉积物;EM3 可能代表的是较强的冬季风所搬运的近源沉积物以及冬季短时间尘暴所带来的物质。

(3)通过临汾盆地黄土粒度端元组分、磁化率

与深海氧同位素对比分析,发现临汾盆地与深海氧同位素一致,说明临汾盆地气候演化受全球冰量控制,但在每个阶段的内部波动上又表现出一定的区域特征。

参考文献 (References)

- [1] 刘东生.黄土与环境[M].北京:科学出版社,1985:1-192.[LIU Tungsheng. Loess and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-192.]
- [2] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2002, 17(3): 5-15-21.
- [3] An Z S. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1-5): 171-187.
- [4] Stuut J B W, Temmesfeld F, De Deckker P. A 550 ka record of aeolian activity near North West Cape, Australia: inferences from grain-size distributions and bulk chemistry of SE Indian Ocean deep-sea sediments [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 83: 83-94.
- [5] Liu X X, Vandenberghe J, An Z S, et al. Grain size of Lake Qinghai sediments: Implications for riverine input and Holocene monsoon variability [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 449: 41-51.
- [6] Zhang X N, Zhou A F, Wang X, et al. Unmixing grain-size distributions in lake sediments: a new method of endmember modeling using hierarchical clustering [J]. *Quaternary Research*, 2018, 89(1): 365-373.
- [7] Weltje G J, Prins M A. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate

- from size distributions of deep-sea clastics [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162 (1-2): 39-62.
- [8] Yu S Y, Colman S M, Li L X. BEMMA: a hierarchical bayesian end-member modeling analysis of sediment grain-size distributions [J]. *Mathematical Geosciences*, 2016, 48 (6): 723-741.
- [9] Rea D K, Hovan S A. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediments: Lessons from the North Pacific [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 1995, 10 (2): 251-258.
- [10] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem [J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29 (4): 503-549.
- [11] Weltje G J, Prins M A. Genetically meaningful decomposition of grain-size distributions [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202 (3): 409-424.
- [12] 王兆夺, 黄春长, 周亚利, 等. 关中东部全新世黄土—古土壤序列粒度组分变化特征及古气候意义[J]. *地球科学进展*, 2018, 33 (3): 293-304. [WANG Zhaoduo, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. Characteristics of Holocene loess-palaeosol particle size composition and paleoclimatic significance in East Guanzhong, Shaanxi Province [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33 (3): 293-304.]
- [13] 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[J]. *地理科学*, 2018, 38 (5): 818-826. [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 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38 (5): 818-826.]
- [14] 卫蕾华, 蒋汉朝, 何宏林, 等. 末次冰期山西洪洞高分辨率粒度和磁化率记录的H5事件及其气候演化意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38 (4): 193-202. [WEI Leihua, JIANG Hanchao, HE Honglin, et al. Heinrich-5 Event revealed by high-resolution grain-size and magnetic susceptibility records and its significance of climate evolution in the last glacial at Hongtong, Shanxi, China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38 (4): 193-202.]
- [15] 田庆春, 杜五喜, 韩军青, 等. 末次间冰期以来临汾盆地气候演化特征: 以丁村古人类遗址东沟剖面为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33 (12): 139-144. [TIAN Qingchun, DU Wuxi, HAN Junqing, et al. Climate evolution of Linfen basin since the last interglacial period-Case study of Donggou section near the ancient human site of Dingcun [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33 (12): 139-144.]
- [16] 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*, 1998, 41 (6): 626-631. [LU Huayu, AN Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 1998, 41 (6): 626-631.]
- [17] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16 (12): 4494-4506.
- [18] Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy [J]. *Quaternary Research*, 1987, 27 (1): 1-29.
- [19] 贾兰坡. 山西襄汾县丁村人类化石及旧石器发掘报告[J]. *科学通报*, 1955 (1): 46-51. [JIA Lanpo. Excavation report of human fossils and Paleolithic artifacts in Dingcun, Xiangfen county, Shanxi Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1955 (1): 46-51.]
- [20] 鹿化煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究[J]. *科学通报*, 1997, 42 (23): 2535-2538. [LU Huayu, AN Zhisheng. Experimental study on the influence of pretreatment on grain size measurement of loess sediments [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42 (23): 2535-2538.]
- [21] Thomsen K J, Jain M, Murray A S, et al. Minimizing feldspar OSL contamination in quartz UV-OSL using pulsed blue stimulation [J]. *Radiation Measurements*, 2008, 43 (2-6): 752-757.
- [22] Buylaert J P, Jain M, Murray A S, et al. A robust feldspar luminescence dating method for middle and late Pleistocene sediments [J]. *Boreas*, 2012, 41 (3): 435-451.
- [23] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. *Nature*, 1995, 375 (6529): 305-308.
- [24] Lu Y C, Wang X L, Wintle A G. A new OSL chronology for dust accumulation in the last 130,000 yr for the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Research*, 2007, 67 (1): 152-160.
- [25] 聂高众, 刘嘉麒, 郭正堂. 渭南黄土剖面十五万年以来的主要地层界线 and 气候事件: 年代学方面的证据[J]. *第四纪研究*, 1996, 16 (3): 221-231. [NIE Gaozhong, LIU Jiaqi, GUO Zhengtang. The major stratigraphic boundaries and climatic events in Weinan loess section since 0.15 Ma B. P.: based on chronological evidences [J]. *Quaternary Sciences*, 1996, 16 (3): 221-231.]
- [26] 王中波, 何起祥, 杨守业, 等. 谢帕德和福克碎屑沉积物分类方法在南黄海表层沉积物编图中的应用与比较[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28 (1): 1-8. [WANG Zhongbo, HE Qixiang, YANG Shouye, et al. Comparison and application of Shepard's and folks' classifications to the subsurface mapping in the south yellow sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28 (1): 1-8.]
- [27] 薛春汀. 两种碎屑沉积物分类的比较[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14 (2): 109-113. [XUE Chunting. Comparison of two classifications of clastic sediments [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14 (2): 109-113.]
- [28] Pye K, Tsao H. The mechanics and geological implications of dust transport and deposition in deserts with particular reference to loess formation and dune sand diagenesis in the Northern Negev, Israel [J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 1987, 35 (1): 139-156.
- [29] 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[J]. *地球与环境*, 2018, 46 (4): 331-338. [LI Shuai, YANG Shengli, LIANG Minhao, et al. The end member model analysis on grain size of loess in the eastern Tibetan plateau [J]. *Earth and Environment*, 2018, 46 (4): 331-338.]
- [30] 孙东怀, 鹿化煜, REA D, et al. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 2000, 18 (3): 327-335. [SUN Donghuai, LU Huayu, REA D, et al. Bimode grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18 (3): 327-335.]

- [31] 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. Super-fine grain size components in Chinese Loess and their palaeoclimatic implication [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 928-936.]
- [32] Qiang M, Lang L, Wang Z. Do fine-grained components of loess indicate westerlies: Insights from observations of dust storm deposits at Lenghu (Qaidam Basin, China) [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1232-1239.
- [33] Shao Y P, Wyrwoll K H, Chappell A, et al. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science [J]. *Aeolian Research*, 2011, 2(4): 181-204.
- [34] 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 [J]. *Quaternary International*, 2011, 240(1-2): 167-180.
- [35] Pye K. Aeolian dust and dust deposits[M]. London: Academic Press, 1987.
- [36] Prins M A, Vriend M. Glacial and interglacial eolian dust dispersal patterns across the Chinese Loess Plateau inferred from decomposed loess grain-size records [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 8(7): Q07Q05.
- [37] 冯兆东, 陈发虎, 张虎才, 等. 末次冰期一间冰期蒙古高原与黄土高原对全球变化的重要贡献[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(2): 171-177. [FENG Zhaodong, CHEN Fahu, ZHANG Hucui, et al. Contribution to global change of Mongolian plateau and loess plateau in the last glaciation and interglacial periods [J]. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(2): 171-177.]
- [38] Ding Z L, Ren J Z, Yang S L, et al. Climate instability during the penultimate glaciation: evidence from two high-resolution loess records, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B9): 20123-20132.
- [39] Sun D H, Wu X H, Liu T S. Evolution of the summer monsoon regime over the Loess Plateau of the last 150 ka [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 39(5): 503-511.
- [40] 管清玉. 末次冰期旋回气候高度不稳定性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006. [GUAN Qingyu. A study of the highly unstable climate in last glacial cycle[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.]
- [41] 谢一璇, 杨小强, 张伙带, 等. 西太平洋深海沉积物记录的~80 ka以来风尘物质输入与东亚冬季风强度[J]. *古地理学报*, 2019, 21(5): 855-868. [XIE Yixuan, YANG Xiaoqiang, ZHANG Huodai, et al. Eolian input and East Asian winter monsoon records in deep-sea sediment from Western Pacific since ~80 ka [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2019, 21(5): 855-868.]