

# 青海湖东岸沙地风成沉积物粒度敏感组分及其古气候意义

李腾飞, 李金凤, 鲁瑞洁, 刘小楝, 陈璐

(北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室/防沙治沙教育部工程研究中心/地理科学学部, 北京 100875)

**摘要:** 粒级-标准偏差的计算可用来提取沉积序列的粒度敏感组分。采用线性粒级和对数粒级两种粒度划分方法, 对青海湖东岸沙地多个风成砂-古土壤沉积剖面进行了系统分析。结果表明: 粒级划分对于敏感组分提取结果具有一定的影响, 对数粒级提取的粗粒敏感组分比细粒组分具有更大标准偏差, 而线性粒级的提取结果则显示细粒组分对于环境变化更为敏感; 两种方法提取的细粒敏感组分差异较大, 而较粗组分和粗粒组分较为一致。在运用粒级-标准偏差法提取环境敏感粒度指标时, 两种划分方法都能有效地提取粗粒敏感组分, 而在提取细粒敏感组分方面线性粒级较对数粒级划分法能取得更好的效果。采用线性粒级-标准偏差法提取了青海湖东岸沙地风成沉积物粒度敏感组分, 发现黏粒组分( $0\sim 4\ \mu\text{m}$ )可以作为夏季风强度变化的替代性指标, 中细砂组分( $144\sim 321\ \mu\text{m}$ )可以指示风沙活动的强弱, 极细砂组分( $60\sim 126\ \mu\text{m}$ )可能受局部地形的影响较大, 其古气候意义有待进一步查明。

**关键词:** 青海湖; 粒度; 古气候; 风沙活动

**文章编号:** 1000-694X(2017)05-0878-07

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00070

**中图分类号:** P931.3

**文献标志码:** A

## 0 引言

青海湖盆地位于亚洲季风和西风环流的交汇地带, 对于气候变化特别是季风活动的响应尤其敏感<sup>[1]</sup>。青海湖东岸广泛分布风成砂-古土壤沉积序列, 为理解晚第四纪区域气候变化及其对亚洲季风演化的响应提供了重要的地质记录<sup>[2-3]</sup>。

粒度是沉积学研究中非常重要的物理指标之一, 在指示物源<sup>[4]</sup>、搬运机制分析<sup>[5]</sup>以及沉积环境恢复<sup>[6-7]</sup>等研究中得到广泛应用。粒度数据分析方法直接影响到结果的正确与否和动力学机制的解释<sup>[3]</sup>。粒度参数只能近似地从整体上反映环境变化<sup>[8]</sup>, 近些年来, 运用数学方法对多成因的沉积物组分进行分离, 提取对环境变化敏感的粒度组分含量, 来探讨古气候和古环境变化已取得了丰富的成果。Xiao等<sup>[9]</sup>和孙有斌等<sup>[10]</sup>用化学方法提纯石英颗粒作为粒度敏感指标, 孙有斌等<sup>[10]</sup>通过对比全样和石英样的粒度曲线, 发现石英样较全样振幅变化大, 更能清晰地反映冬季风强度变化。Prins等<sup>[11]</sup>利用端元法对阿拉伯海近海大陆架的浊流沉积物进行了研

究, 发现端元法可以很好地区别浊流沙、浊流泥、河流相的混合沉积物, 从而反映海平面上涨、山洪等不同环境。孙东怀等<sup>[12]</sup>用 Weibull 函数拟合法探讨了陆相沉积物的粒度组分分布情况, 认为这种方法能很好地分离水成和风成组分。此外, 主成分分析法也在敏感组分提取中得到了很好的应用。汪海斌等<sup>[13]</sup>认为黄土高原西部地区  $>40\ \mu\text{m}$  颗粒的含量能很好地指示冬季风强度; 徐树建<sup>[14]</sup>提取出  $24.70\sim 27.90\ \mu\text{m}$  和  $62.47\sim 68.97\ \mu\text{m}$  两个环境敏感粒级, 认为不同地区的环境敏感粒度指标存在差异; 安福元<sup>[15]</sup>对柴达木盆地察尔汗湖湖相沉积物粒度进行了分析, 认为  $10\sim 70\ \mu\text{m}$  颗粒含量的变化可以作为东亚冬季风的替代指标。

Boulay等<sup>[16]</sup>提出了粒级-标准偏差的粒度组成分析方法, 该方法是根据序列所有样品的某粒级含量变化计算其标准偏差, 标准偏差越大, 表明该粒级在序列中含量变化越大, 可能越敏感响应于某个沉积动力过程。粒级-标准偏差法因其原理简单、操作容易、结果理想在青海湖<sup>[1]</sup>、柴达木盆地<sup>[4]</sup>和黄土高原<sup>[3]</sup>等区域的湖相沉积物、风成沉积物分析中得到了很好的应用。已有研究多采用等对数间距(后文

收稿日期: 2016-03-29; 改回日期: 2016-05-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571184, 41171159); 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB956001)

作者简介: 李腾飞(1988—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 研究方向为干旱区地理与环境研究。E-mail: ltf8822@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 李金凤(E-mail: jinfengli@mail.bnu.edu.cn)

简称对数粒级法)划分粒级<sup>[8,16-18]</sup>,随着粒径增大,级差越来越大,可能会因为粒级间距不一致,放大了粗颗粒变化的敏感程度而忽视细颗粒变化的情况。本文采用等对数间距和等线性间距(后文简称线性粒级法)两种划分方法分别提取粒度敏感组分,分析粒级划分对粒度敏感组分的影响,并探讨粒度环境敏感指标的气候意义。

## 1 材料与方 法

用于粒度分析的样品取自青海湖东岸的湖东沙地。通过野外考察,选取 8 个风成砂-古土壤沉积剖面(图 1),自下而上对样品进行了系统的采集,采样间距为 5 cm。样品采用传统方法<sup>[19]</sup>进行预处理后,

在北京师范大学环境演变与自然 灾害教育部重点实验室,利用 Mastersizer 2000 激光粒度仪完成粒度测量,测量范围为 0.02~2 000 μm。

对沉积物粒度结果的初步分析发现,大部分样品 >600 μm 的颗粒含量接近于 0,因此,仅对 0~600 μm 的颗粒进行粒级划分并 对其含量变化进行标准偏差的计算。在粒级划分中,对数粒级-标准偏差法是将 0~600 μm 以等对数间距划分为 100 个粒级,而线性粒级-标准偏差法是将 0~600 μm 以等线性间距方式划分为 100 个粒级。两种方法划分的部分粒级如表 1 所示,可以发现随着粒级的增大,对数粒级法划分的级差增大,而线性粒级法划分的级差保持不变。

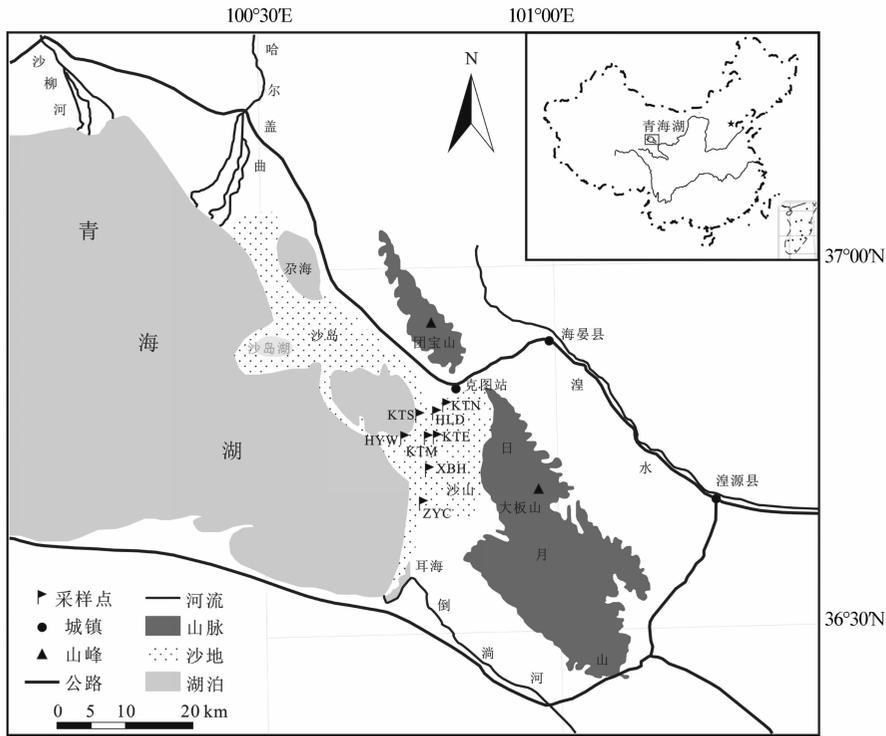


图 1 青海湖东岸样点位置图

Fig. 1 Location of sampling sites in the eastern shore of Qinghai Lake

表 1 对数粒级与线性粒级两种划分方法的级差对比

Table 1 Comparison of logarithmic graded-standard deviation and linear fraction-standard deviation of grain size

粒级划分	粒级 1	粒级 20	粒级 40	粒级 60	粒级 80	粒级 100
对数粒级/μm	0.01~0.011	0.081~0.09	0.73~0.815	6.593~7.36	59.53~66.454	537.489~600
线性粒级/μm	0.01~6.010	114.01~120.01	234.01~240.01	354.01~360.01	474.01~480.01	594.01~600

## 2 结果

### 2.1 两种标准偏差法提取的粒度敏感组分

在大多数剖面中,不同粒级的标准偏差变化均

呈现出 3 个峰值(图 2),将峰值处相邻的 3 个粒级范围确定为敏感组分,分别命名为细粒组分、较粗组分和粗粒组分。

从对数粒级的标准偏差变化可以看出:标准偏差的最高值对应的粒级均大于 60 μm,其中 KTE 剖

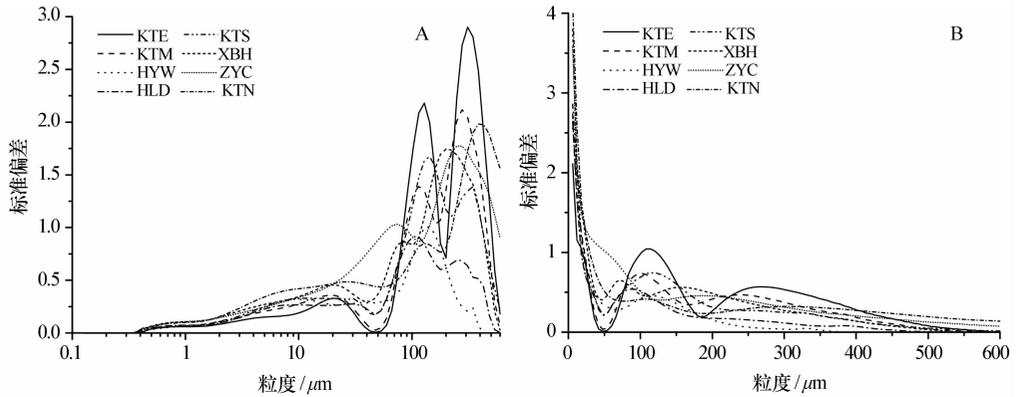


图 2 对数粒级法(A)与线性粒级法(B)得出的标准偏差变化曲线

Fig. 2 Curves of logarithmic graded-standard deviation (A) and linear fraction-standard deviation (B) of grain size

面中标准偏差最高值为 2.90, 而粒级  $< 20 \mu\text{m}$  的标准偏差值均小于 0.5, 未表现出明显的峰值; ZYC 剖面细粒组分不敏感, 可能是由于 ZYC 剖面离高大沙山近, 颗粒本身偏粗, 细颗粒含量较低; 在粗粒组分方面, KTN 剖面的敏感组分最粗, 为  $346 \sim 481 \mu\text{m}$ , HYW 剖面的细粒组分最细, 为  $8 \sim 11 \mu\text{m}$ , 但粗粒组分含量变化差异较小, 可能是由于 HYW 剖面离海晏湾近, 水分条件较好, 颗粒偏细(图 2A)。综合 8 个剖面的粒度敏感组分的情况(表 2), 确定青海湖东岸沙地的细粒敏感组分应为  $8 \sim 34 \mu\text{m}$ , 较粗敏感组分应该为  $60 \sim 160 \mu\text{m}$ , 粗粒敏感组分应该为  $179 \sim 481 \mu\text{m}$ 。

所有剖面的线性粒级-标准偏差结果均表现出

相似的变化特征(图 2B), 即在  $0 \sim 18 \mu\text{m}$  处呈现出高数值, 而且明显高于其他粒级的标准偏差值; 不同剖面中风成沉积物中的较粗组分和粗粒组分略有差异, KTS 剖面 and HYW 剖面的较粗组分最粗, 而 HYW 剖面未提取出粗粒敏感组分, 这可能与 HYW 剖面颗粒总体偏细有关; ZYC 剖面提取了细粒敏感组分, 但未提取到较粗敏感组分, 这明显区别于对数粒级法提取的结果。由此发现, 对于某一组分, 颗粒含量直接影响到相应粒级含量的离散程度。同对数粒级-标准偏差法的处理方式一样, 从线性粒级-标准偏差图中提取出 3 个敏感组分(表 2), 得出青海湖东岸沙地的细粒敏感组分为  $0 \sim 18 \mu\text{m}$ , 较粗敏感组分为  $60 \sim 126 \mu\text{m}$ , 粗粒敏感组分为  $144 \sim$

表 2 对数粒级法和线性粒级法在各剖面中提取的敏感组分

Table 2 The sensitive grade extracted by the method of logarithmic graded-standard deviation and linear fraction-standard deviation

剖面	对数粒级法			线性粒级法		
	细粒组分/ $\mu\text{m}$	较粗组分/ $\mu\text{m}$	粗粒组分/ $\mu\text{m}$	细粒组分/ $\mu\text{m}$	较粗组分/ $\mu\text{m}$	粗粒组分/ $\mu\text{m}$
HLD	25~34	92~128	223~310	0~18	84~102	—
KTE	17~25	103~143	277~386	0~18	102~120	258~276
KTS	10~14	115~160	277~386	0~18	108~126	—
KTM	15~22	103~143	248~346	0~18	90~108	228~246
XBH	18~25	74~103	179~249	0~18	60~78	144~162
ZYC	—	60~83	223~310	0~18	—	180~198
HYW	8~11	115~160	—	0~18	108~126	—
KTN	22~31	115~160	346~481	0~18	96~114	303~321
全区域	8~34	60~160	179~481	0~18	60~126	144~321

$321 \mu\text{m}$ 。

## 2.2 不同敏感组分在剖面中的变化对比

为更直观地对比两种粒级划分方法对敏感粒级

组分提取的影响, 选取 4 个代表性剖面进行分析。4 个剖面敏感组分对数粒级的细粒、较粗、粗粒组分分别与线性粒级的细粒、较粗、粗粒组分变化随深度变化趋势基本一致(图 3), 说明两种粒级划分方法下

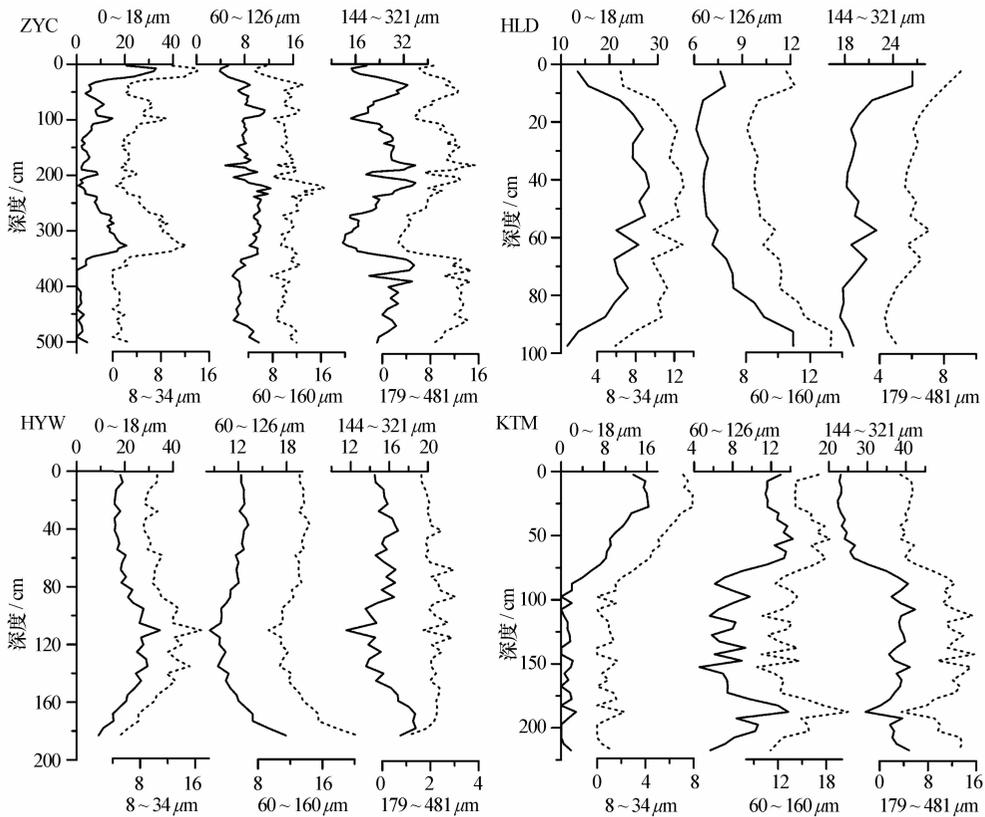


图 3 对数粒级和线性粒级两种划分方式下提取出的 3 种敏感指标随剖面深度的百分比含量变化  
 Fig. 3 The change of three sensitive index extracted by logarithmic graded-standard deviation (dotted line) and linear fraction-standard deviation (solid line)

提取的敏感粒级在指示环境方面具有类似的效果。同时,两种粒级划分方法的粒级-标准偏差所提取的粒度敏感组分也有许多不同之处。

在对数粒级下提取的敏感组分中,粗粒的标准偏差较细粒更大,说明粗颗粒比细颗粒对于环境的变化更敏感,而线性粒级-标准偏差法的分析结果则显示细颗粒比粗颗粒更敏感。

用对数粒级方法得到的 3 种敏感粒级都比线性粒级得到的 3 种敏感粒级偏粗,而且敏感组分的粒径范围偏大。对数粒级法提取的细粒组分和粗粒组分分级差分别为 24 μm 和 302 μm,而线性粒级法提取的细粒组分和粗粒组分分级差分别为 18 μm 和 177 μm。两种方法提取的细粒敏感组分有所区别:对数粒级提取的主要是细粉砂或较粗粉砂,线性粒级提取的则为黏土细粉砂;而较粗组分和粗粒组分较为一致,说明粒级划分对于敏感组分提取结果具有一定的影响,尤其是对细粒敏感组分影响较大,对较粗、粗粒组分则影响较小,两种粒级划分方式均可用于提取粗粒敏感组分。

线性粒级得到的敏感粒级变化幅度约是对数粒级得到的敏感粒级变化幅度的 1~2 倍,细粒组分和

粗粒组分表现尤为明显。比如,在 ZYC 剖面中,0~18 μm 和 8~34 μm 的含量分别是 32.9% 和 14.03%,144~321 μm 和 179~481 μm 的含量分别是 24.13% 和 12.68%;在 KTM 剖面中,0~18 μm 和 8~34 μm 的含量分别为 16.28% 和 7.92%,144~321 μm 和 179~481 μm 的含量分别是 20.05% 和 12.30%。

对于风成沉积物而言,颗粒总体偏粗,细颗粒含量较低。相较于线性粒级,在对数粒级下,含量较低的细颗粒被分散到更多的粒级。例如,<20 μm 颗粒在线性粒级下包含了 4 个粒级,而在对数粒级下被分散到 70 个粒级中。正如前文所提及,颗粒含量直接影响到相应粒级含量的离散程度。所以,在对数粒级下,细颗粒的变化可能被忽视。总体而言,在运用粒级-标准偏差法提取环境敏感粒度指标时,两种方法都能有效地提取粗粒敏感组分,而在提取细粒敏感组分方面线性粒级较对数粒级划分法能取得更好的效果。

### 2.3 细颗粒敏感组分的进一步提取

为了弄清楚所提取敏感组分的古气候意义,采

用线性粒级法对细粒敏感组分  $0\sim 18\ \mu\text{m}$  进一步分离,凸显此粒级范围内起决定作用的粒级组分。以  $1\ \mu\text{m}$  间距划分为 18 级,计算标准偏差并绘制线性粒级-标准偏差曲线(图 4)。除 HLD 剖面外,其他剖面均在  $2\ \mu\text{m}$  处出现峰值,随着粒级的增大,标准偏差值逐渐降低。我们选取与峰值相邻的 4 个粒级

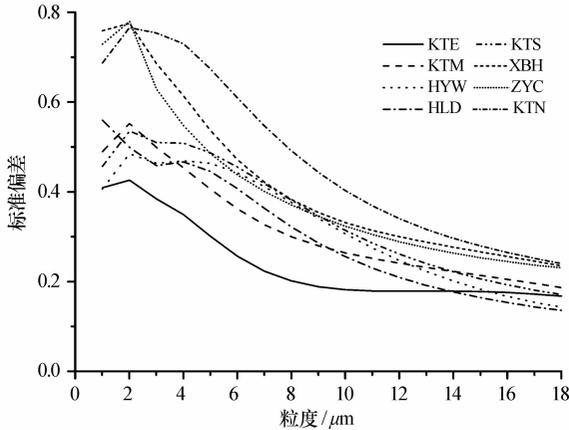


图 4 粒级  $0\sim 18\ \mu\text{m}$  的线性粒级-标准偏差曲线

Fig. 4 The linear fraction-standard deviation curves of  $0\sim 18\ \mu\text{m}$  fraction

为敏感粒级,发现细粒部分的最敏感粒级是黏粒组分( $0\sim 4\ \mu\text{m}$ )。

### 3 讨论

风成沉积物的粒度主要受源区距离、风力、风化成壤等因素影响<sup>[3,20]</sup>。本研究中采用线性粒级-标准偏差分析发现黏土( $<4\ \mu\text{m}$ )含量对于环境的变化最为敏感, $<4\ \mu\text{m}$ 颗粒含量与磁化率的变化相似(图 5),二者的相关系数可达 0.89,这充分体现了细颗粒组分对磁化矿物的贡献性。在风成沉积序列中,磁化率与成壤作用密切相关,常作为反映亚洲夏季风变迁的良好替代性指标<sup>[21-23]</sup>。黏土颗粒组分含量高低经常用来反映粉尘沉积后成壤作用的强弱<sup>[24-26]</sup>,管清玉等<sup>[27]</sup>将 $<5\ \mu\text{m}$ 黏土含量作为反映东亚夏季风的替代性指标。在中国东亚季风区,一般认为成壤作用与夏季风变化密切相关<sup>[25,28]</sup>,鹿化煜等<sup>[28]</sup>认为较细和细颗粒组分含量增加与风化成壤作用的加强有关,并指示了夏季风强度变化。青海湖盆地位于亚洲季风和西风环流的交汇处,末次

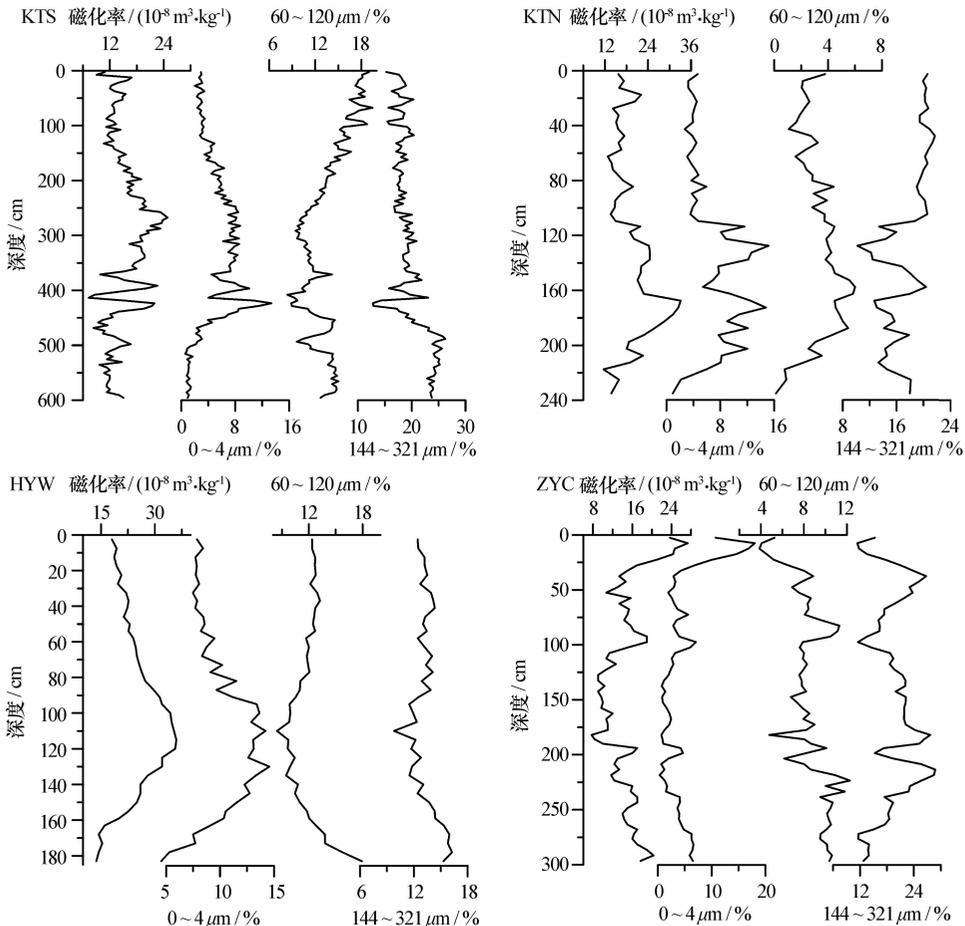


图 5 不同敏感组分和磁化率指标随剖面深度的变化曲线

Fig. 5 The change curves of three sensitive populations and magnetic susceptibility index

冰期主要受控于西风环流的影响,进入全新世则主要受亚洲季风的控制<sup>[1]</sup>。当夏季风增强时,区内气候以温暖、湿润为主<sup>[1]</sup>,地表广泛分布的植被影响了沉积物粒配<sup>[29-30]</sup>,植被固定了表土沉积物,细颗粒不易流失,大气降尘也能够被植物捕获并且保存下来;同时,生物化学作用增强,成壤作用增强,地层中发育古土壤,细颗粒含量增加。因此, $<4\ \mu\text{m}$ 颗粒组分可以用于指示亚洲夏季风的变迁。

敏感指标中的较粗组分( $60\sim 126\ \mu\text{m}$ )与现代沙丘沙的粒径范围十分接近。根据 Bagnold 的实验,起动风速最小的临界粒径为  $70\sim 125\ \mu\text{m}$ <sup>[31]</sup>,推测极细砂组分( $60\sim 126\ \mu\text{m}$ )含量的变化可能代表了更易风蚀的沙丘沙含量的变化。在不同剖面中, $60\sim 126\ \mu\text{m}$ 变化与其他两个敏感粒度变化之间没有一致的规律性(图5),极细砂组分( $60\sim 126\ \mu\text{m}$ )可能受局部地形的影响较大,其古气候意义有待进一步查明。

粗颗粒敏感粒度  $144\sim 321\ \mu\text{m}$  为中细砂组分。隆浩等<sup>[32]</sup>从湖泊沉积物中提取粒度范围  $60\sim 550\ \mu\text{m}$  反映腾格里沙漠的风沙活动变化;在柴达木盆地东南缘地区, $140\sim 250\ \mu\text{m}$  可以作为区域冬季风的替代指标<sup>[4]</sup>;在共和盆地末次盛冰期以来的气候变化研究中则使用  $200\sim 360\ \mu\text{m}$  指示近地面风的强度<sup>[33]</sup>。在研究各剖面中,中细砂组分( $144\sim 321\ \mu\text{m}$ )与细粒敏感组分( $0\sim 18\ \mu\text{m}$ )的含量变化呈反相关(图3),中细砂组分( $144\sim 321\ \mu\text{m}$ )可以指示区域风沙活动的强弱。现代流动沙丘的粒度特征与古风成沙丘粒度极为相似,流动沙丘主要以细砂和中砂为主<sup>[34-36]</sup>,当区内风沙活动强时,流动沙丘增多,植被数量减少,细颗粒组分被带走,导致粗颗粒含量增加。

## 4 结论

运用粒度-标准偏差法提取敏感粒度组分的结果与粒度划分方式有关;对数粒度下粗颗粒比细颗粒更敏感,线性粒度-标准偏差法的分析结果则显示细颗粒比粗颗粒更敏感。两种方法提取的较粗颗粒或粗颗粒敏感组分具有较好的一致性,粗粒敏感组分的变化客观反映了研究区风沙活动动力过程,对于理解区域风沙活动历史具有重要意义。

两种粒度划分方法都能有效地提取粗粒敏感组分,而在提取细粒敏感组分方面线性粒度较对数粒度划分法能取得更好的效果。本研究选用线性粒度-标准偏差法提取敏感粒度,粒度敏感组分提取结果表明,黏粒组分( $0\sim 4\ \mu\text{m}$ )的变化与土壤的成壤作用相关,可作为反映亚洲夏季风变迁的替代指标;中

细砂组分( $144\sim 321\ \mu\text{m}$ )的变化可以用来指示风沙活动强弱。由于不同地区的第四纪沉积环境存在差异,青海湖盆地的风成沉积记录主要集中于晚第四纪风成沉积物中,两种敏感粒度组分是否适用于更长时间尺度的古环境和古气候研究,还有待进一步探讨。

## 参考文献:

- [1] An Z S, Colman S M, Zhou W J, et al. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2(8): 1036-1036.
- [2] 徐叔鹰, 徐德馥. 青海湖东岸的风沙堆积[J]. *中国沙漠*, 1983, 3(3): 11-17.
- [3] 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[J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 183-189.
- [4] 牛光明, 强明瑞, 宋磊, 等. 5 000 a来柴达木盆地东南缘风成沉积记录的冬季风演化[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(5): 1030-1039.
- [5] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polygonal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 263-277.
- [6] Ding Z L, YU Z W, Rutter N W, et al. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13: 39-70.
- [7] Lu H Y, An Z S. Paleoclimatic significances of grain size of loess paleosol deposit in Chinese Loess Plateau[J]. *Science in China; Series D*, 1998, 41(6): 626-631.
- [8] 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[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 83-86.
- [9] Xiao J L, Porter S C, An Z S, et al. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130,000Yr[J]. *Quaternary Research*, 1995, 43: 22-29.
- [10] 孙有斌, 鹿化煜, 安芷生. 黄土-古土壤中石英颗粒的粒度分布[J]. *科学通报*, 2000, 45(19): 2094-2097.
- [11] Prins M A, Postma G, Weltje G J. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: the Makran continental slope[J]. *Marine Geology*, 2000, 169: 351-371.
- [12] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及应用[J]. *自然科学进展*, 2001, 11(3): 269-276.
- [13] 汪海斌, 陈发虎, 张家武. 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 21-26.
- [14] 徐树建. 风成沉积物环境敏感粒度指标的提取及意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(3): 95-98.
- [15] 安福元. 柴达木盆地察尔汗湖相沉积物的粒度分布模式及其环境意义[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 212-220.
- [16] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Mineralogy and sedimentology of pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144)[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*,

- 2003, 184: 1—21.
- [17] 向荣, 杨作升, Saito Y, 等. 济州岛西南泥质区近 2300 a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(7): 654—662.
- [18] 万世明, 李安春, Stuut J-B W, 等. 南海北部 ODP1146 站粒度揭示的近 20 Ma 以来东亚季风演化[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 761—770.
- [19] 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.
- [20] 丁仲礼, 孙继敏, 刘东生. 联系沙漠-黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1999, 29(1): 82—87.
- [21] 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[J]. 科学通报, 1990, 20(7): 529—532.
- [22] 孙东怀, 安芷生, 刘东生等. 最近 150 ka 黄土高原夏季风气候格局的演化[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26(5): 417—422.
- [23] 郝青振, 郭正堂. 1.2 Ma 以来黄土-古土壤序列风化成壤强度的定量研究与东亚夏季风演化[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(6): 520—528.
- [24] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [25] 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.
- [26] 黄传琴. 黄土剖面粘粒矿物的组成特征及其环境意义[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [27] 管清玉, 潘保田, 高红山等. 粘粒含量——夏季风的良好替代指标[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(8): 17—19.
- [28] 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, 28(3): 278—283.
- [29] 沈亚萍, 张春来, 李庆, 等. 中国东部沙区表层沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 150—157.
- [30] 崔徐甲, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山沉积物粒度特征及其与植被、地貌关系[J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 857—864.
- [31] Pye K, Tsaoar H. The mechanics and geological implications of dust transport and deposition in deserts with particular reference to loess formation and dune sand diagenesis in northern Negev, Israel[J]. Ecological Society Special Publication, 1987, 35: 139—156.
- [32] 隆浩, 王乃昂, 马海州, 等. 腾格里沙漠西北缘湖泊沉积记录的区域风沙特征[J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 626—631.
- [33] 李明治. 共和盆地末次盛冰期以来的风沙活动历史与气候变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [34] 姚正毅, 李晓英, 肖建华. 青海湖滨土地沙漠化驱动机制[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1429—1437.
- [35] 温小浩, 李保生, 孟洁, 等. 150~20 ka BP 福建东部平潭岛海岸风成沉积的粒度特征及其环境意义[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1473—1482.
- [36] 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[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 158—166.

## Extraction of Grain-size Components with Environmentally Sensitivity of Aeolian Sediments in Eastern Shore of Qinghai Lake and Their Palaeoclimatic Implications

Li Tengfei, Li Jinfeng, Lu Ruijie, Liu Xiaokang, Chen Lu

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology/MOE Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control/Faculty of Geographical Science, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Graded-standard deviation can be used to extract the sensitive grain-size component in sedimentary sequences. In this paper, multiple aeolian sand/paleosol sedimentary sections in eastern Qinghai Lake were analyzed by this method. The results showed that division had an influence on sensitive components extraction result. The coarse sensitive components had larger standard deviation value than fine-grained components extracted by the logarithmic graded-standard deviation, while using linear graded-standard deviation, the extracted fine grained components were more sensitive to environmental changes; Fine grain sensitive component extracted by two methods had a great difference, and coarse grain were relatively consistent, suggesting that graded. When using graded standard deviation method to extract environmental sensitive components, both methods could extract coarse sensitive components effectively, meanwhile linear graded-standard deviation could obtain better effect in extracting fine grained sensitive components. With the method of linear graded-standard deviation, we found that the clay fraction ( $0-4 \mu\text{m}$ ) can be used as a proxy of summer monsoon, while medium and fine sand fraction ( $144-321 \mu\text{m}$ ) should be used for indicating the strength of aeolian activity, and very fine sand component ( $60-126 \mu\text{m}$ ) may be influenced by local terrain, its palaeoclimatic significance remains to be further identified.

**Key words:** Qinghai Lake; grain size; paleoclimate; aeolian activity