

四川汉源大树剖面沉积物年代与粒度特征初步研究*

蒙 丽^{1,5}, 张自森³, 王书兵^{2,4}, 刘加强⁵, 傅建利^{2,4}, 蒋复初^{4,6}

(1 重庆地质矿产研究院, 外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室重庆 400042)

(2 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081)

(3 河南有色地勘局, 郑州 450016)

(4 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

(5 中国地质大学(北京), 北京 100083)

(6 中国科学院湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘 要: 汉源大树剖面厚 11.2m, 光释光测年结果显示其地质时代为中更新世晚期-晚更新世中期. 频率曲线有两峰 a型、三峰 b型和带粗尾巴的三峰 c型三种类型, 具有 1-2 Φ 、3-4 Φ 、4-5 Φ 、5-6.5 Φ 、6.5-8 Φ 、10-11 Φ 等 6 个众数, 各众数在地层纵向各层段上变化趋势明显; 具有 a型频率曲线特征的沉积物反映湖水较深, 而其余的则可能指示了水体较浅的滨浅湖相. 粒度组成以粉砂为主, 分选性较好, 中值粒径平均为 18.12 μ m. 粘土与细粉砂、粉砂含量曲线呈正相关关系; 中值粒径与砂、粗粉砂含量曲线也呈正相关关系, 并与粘土含量曲线呈负相关关系. 大树剖面粒度组成可分为八个沉积阶段, 构成从细到粗的三个沉积旋回, 各沉积阶段分别指示了不同的水动力条件.

关键词: 汉源; 年代; 粒度特征; 大树剖面

Age and grain-size characteristics of Das hu sediment section in Hanyuan County, Sichuan Province

MENG Li^{1,5}, ZHANG Zisen³, WANG Shubing^{2,4}, LIU Jiaqiang⁵, FU Jianli^{2,4} & JIANG Fuchu^{4,6}

(1 Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, P.R.China)

(2 Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, P.R.China)

(3 Henan Nonferrous Geological Prospecting Bureau, Zhengzhou 450016, P.R.China)

(4 Institute of Geomechanics CAGS, Beijing 100081, P.R.China)

(5 China University of Geosciences, Beijing 100083, P.R.China)

(6 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract The results of OSL dating of five lacustrine deposit samples from one 11.2m thick profile, Dashu Village in Hanyuan County, show that they have been deposited since the Middle Pleistocene to Late Pleistocene. There were three types in the frequency curve of sedimentology, including a type with two peaks, b-type with three peaks and c type with three peaks and a thick tail showing six modes of 1-2 Φ 、3-4 Φ 、4-5 Φ 、5-6.5 Φ 、6.5-8 Φ 、10-11 Φ respectively in each layers and presented significant trends in the mode changes. The a type reflected characteristics of deep water sediments, and the rest two types indicated a shallow water in the offshore lake. The suspended sediments are mainly composed of better sorting silt with the median of 18.12 μ m. Significantly positive correlations are between clay and fine silt, silt. The median size is positive correlated with sand, but negative correlation with clay. The profile from the bottom upwards can be divided into eight sedimentary stages, constituting three depositional cycles from fine to coarse grains and suggesting the different hydrodynamic conditions.

Keywords Hanyuan County; age; grain size characteristics; Dashu section

* 地质力学研究所基本科研业务费项目 (DZLXK200710) 和国家自然科学基金项目 (40672111) 联合资助. 2010-01-14收稿; 2010-05-10收修改稿. 蒙丽, 女, 1983年生, 硕士研究生; E-mail: menglicugl@qq.com.

粒度是沉积物和沉积岩的主要特征之一, 它可以作为沉积物分类的一个定量指标, 也可以反映沉积过程中水动力的强弱, 同时也可以作为分析沉积环境的一个依据^[1-7]. 粒度分析的方法众多, 在近一个世纪的研究中, 无论从沉积物粒度的定义和粒度标定方法, 还是从粒径的测试技术都有很大的提高^[8-10]. 同时, 用于描述粒度特征的方法也越来越多. 沉积物的粒度分布主要受搬运介质、搬运方式和沉积环境等多方面因素控制^[11-12]. 因此, 通过沉积物的粒度分布特点就可以大致了解沉积物所处的沉积环境^[13-14], 反映气候的变化趋势^[15-16], 恢复古环境和古气候等^[17-21].

四川省汉源县地处横断山脉北段东缘, 为川西高原与四川盆地之间的过渡地带, 大渡河下游. 而大渡河是流经我国青藏高原和二级地貌阶梯的过渡地带, 其形成与演化与青藏高原、川西高原隆升、季风演化、川西南河谷区的地理环境密切相关. 汉源大树剖面是一个典型的湖相沉积剖面, 记录了高分辨率的环境演化信息. 对其进行粒度测试, 并将其粒度特征曲线进行综合对比分析, 对其成因进行了初步研究, 可为大渡河下游流域古气候重建提供参考和依据, 同时对于重建西南季风的演变研究, 具有十分重要的科学意义.

1 地层剖面与年代

大树剖面 ($29^{\circ}19.088'N$, $102^{\circ}37.826'E$) 位于四川汉源县城西南的大树镇摆鱼村五组, 海拔为 788m (图 1). 从野外地貌观察看, 该剖面构成大渡河三级阶地基座. 所采剖面陡直, 并受后期地质构造的影响变形.

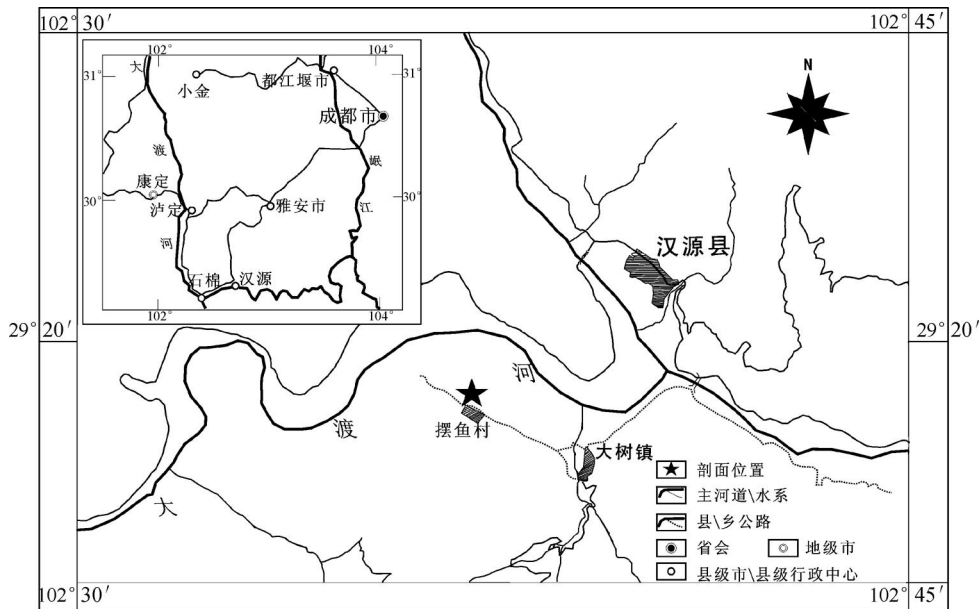


图 1 大树剖面地理位置示意

Fig 1 The location of Dashu section

1.1 地层剖面

大树剖面出露厚度为 11.2m, 自上而下可以分为以下 8 层.

- (1) 0-0.95m, 土黄、浅灰、红褐色粘土、粉砂、粘土、粘土粉砂互层, 层较薄.
- (2) 0.95-2.10m, 土黄、浅灰、红褐色粘土、粉砂粘土、粘土粉砂薄互层; 与黄色细砂层间互, 两者厚度相当.
- (3) 2.10-2.50m, 土黄、浅灰、红褐色粘土粉砂、粉砂粘土、细砂互层.
- (4) 2.50-3.75m, 土黄、灰白色细砂层夹两层土黄、青灰、浅红、青灰色粘土、粉砂粘土互层. 3.20m 处产状: $10^{\circ} \angle 9^{\circ}$.

(5) 3.75-4.55m, 青灰、浅红褐、灰白色粘土、粉砂粘土与粘土粉砂薄层互层. 顶部有一约 0.02m 厚的钙质粘土层 (青灰色), 很硬.

(6) 4.55-6.00m, 灰、黑灰色细砂层, 夹青灰、灰白、红褐色粘土、粉砂粘土薄互层. 靠底部含钙结核, 水平不连续成层.

(7) 6.00-8.65m, 灰白、青灰、红褐色粘土, 钙质粘土互层, 与青灰、黑灰色细砂层互层; 近底部 (8.35m) 处有一紫红色粘土条带. 在 7.90-8.00m 间有波浪纹. 本层底部产状: $345^{\circ} \angle 12^{\circ}$.

(8) 8.65-11.20m, 红褐、土黄、青灰、灰白色粘土、钙质粘土互层, 顶部夹薄层黑灰色细砂层, 下部钙质含量较高, 尤其是青灰色粘土层. 未见底.

1.2 地层时代

对采自大树剖面的 5 个光释光 (OSL) 年代样品经国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心测定, 结果见表 1

表 1 大树剖面光释光年代测试结果

Tab 1 The OSL age of Dashu section

野外编号	深度 (m)	U (mg/kg)	Th (mg/kg)	K (%)	等效剂量 E. D (Gy)	年剂量 Dy (Gy/ka)	含水量 (%)	年龄 (kaBP)
DSOSL-1	0.40	3.47	13.9	2.13	409.76 ± 34.84	4.63 ± 0.23		88.5 ± 8.7
DSOSL-2	3.00	3.95	15.8	2.20	676.72 ± 46.94	4.71 ± 0.24	22.23	143.6 ± 12.3
DSOSL-3	5.80	3.45	12.8	1.94	670.45 ± 23.71	3.89 ± 0.19	30.43	172.2 ± 10.5
DSOSL-4	8.60	3.53	14.7	2.27	792.69 ± 22.95	4.17 ± 0.21	39.27	190.0 ± 11.0
DSOSL-5	11.10	2.75	12.4	2.59	835.21 ± 24.76	4.05 ± 0.20	37.66	206.1 ± 12.0

从年代-深度序列 (图 2) 中, 样品年龄与深度呈现较好的线性关系, 沉积速率没有发生大的变化, 测试的年代结果是可靠的. 大树剖面底部年龄为 206.74kaBP, 顶部年龄为 80.55kaBP, 地质时代为中更新世晚期-晚更新世中期.

2 粒度特征分析

2.1 样品采集与分析测试方法

以 2.5cm 间距采集粒度分析样品 448 个, 粒度测试在中国地质科学院地质力学研究所第四纪地质与环境实验室进行, 所用仪器为英国 Malvern 公司生产的 MasterSize2000 粒度分析仪, 仪器测量范围为 0.02-2000 μ m, 重复测量误差小于 0.3%.

选取适量样品 (约 0.2-0.5g) 放入 100ml 烧杯内, 先加入 10ml 10% 双氧水 (H₂O₂), 加热煮沸至完全去除样品中的有机质; 待充分反应后, 再加入 10ml 20% 盐酸 (HCl), 继续加热直至完全去除样品中碳酸盐; 反应完全后, 再加入纯净水至杯满, 静止 24h 后抽去上部清液, 加入 10ml 六偏磷酸钠 (NaPO₃)₆, 超声震荡 10min 上仪器进行测量.

2.2 频率曲线特征

沉积物的频率曲线特征是判断沉积作用形式的主要手段之一, 频率曲线的峰态变化反映沉积作用形式的变化^[22-28]. 大树剖面代表性样品频率曲线显示 (图 3N), 频率曲线有三种类型 (实线): 两峰 (a), 三峰 (b) 和带粗尾巴的三峰 (c). 其中两峰类型根据向粗端偏移的量还有一种亚型 a1; 三峰类型依据第一众数和第二

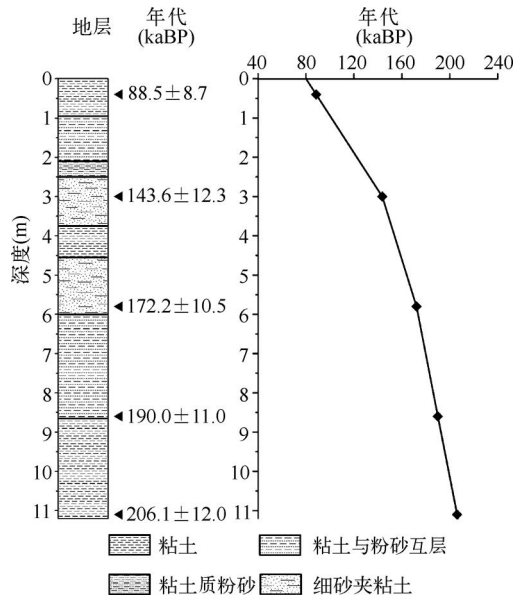


图 2 大树剖面岩性地层及深度-年代序列
Fig 2 The lithology and depth-age sequence of Dashu section

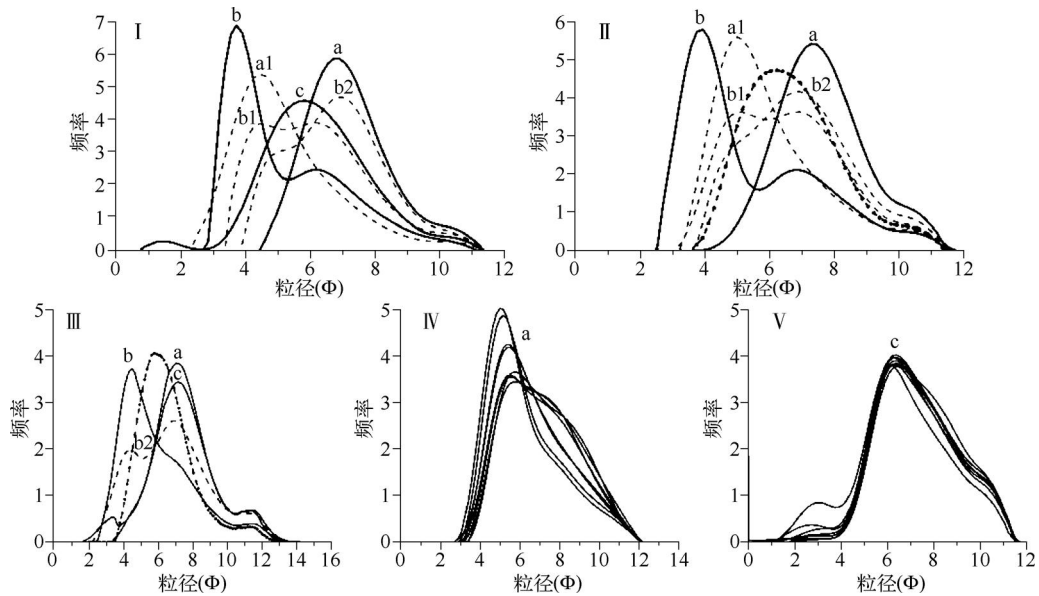


图 3 汉源大树湖相^[17]、云南龙街粉砂^[20]、内蒙古岱海湖芯^[17]、四川甘孜黄土^[29]和安徽宣城河流漫滩相^[24]代表性样品频率曲线特征

Fig 3 Grain size distribution curves of representative sample from Dashu section, Longjie silt Lake Dahai Ganzhi loess and Xuancheng fluvial sediments

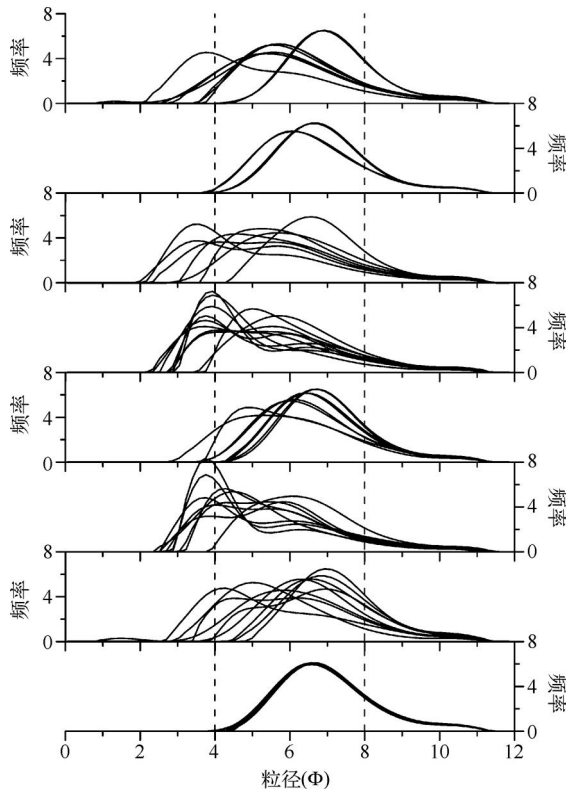


图 4 大树剖面各层段代表性样品频率曲线变化趋势 (从上至下为地层 1 至 8 层)

Fig 4 Grain size distribution trend of representative sample in Dashu section

众数出现频率的多少又有两种亚型, b1 型的第一众数频率基本和第二众数频率相等, b2 型的第一众数频率远小于第二众数频率. 尽管频率曲线只有三种类型, 但众数出现的位置却有 6 处, 分别在 1-2Φ、3-4Φ、4-5Φ、5-6.5Φ、6.5-8Φ、10-11Φ 各众数在纵向地层各层段上变化趋势明显 (图 4), 集中出现的 3-4Φ 指示粗粒组分, 6-8Φ 指示细粒组分, 10-11Φ 指示粘粒组分. 第一众数在 6-8Φ 具有 a 型频率曲线特征的沉积物反映湖水较深, 而其余的则可能指示了水体较浅的滨浅湖相, 尤其第一众数在 3-4Φ 以及带有粗尾众数 1-2Φ 的沉积物.

为探讨西南季风控制区湖相沉积物频率曲线特征, 选取时代特征、沉积环境相似的云南龙街粉砂代表性样品频率曲线 (图 30), 可以看出, 龙街粉砂具有 a、a1、b、b1 和 b2 型特征频率曲线, 没有 c 型特征频率曲线, 各众数出现的位置分别在 3-4Φ、4-5Φ、5-6.5Φ、6.5-8Φ 和 10-11Φ 与大树剖面代表性样品众数出现的位置相同, 只是各众数位置向更细的方向偏移了一些, 并缺失粗尾众数 1-2Φ.

在我国北方干旱-半干旱区的湖泊沉积物, 其频率曲线也具有 6 个众数^[12, 21-22], 这里以岱海为例 (图 30), 频率曲线显示 a、b、c 和 b2

型,其众数位置分别在 3-4 Φ 、4-5 Φ 、5-6.5 Φ 、6.5-8 Φ 和 11-12 Φ ,缺少众数 1-2 Φ ,这可能与所获取的粒度有关^[17],而在岱海 DL04孔有明显的表现^[21].总体上看,岱海各众数出现的位置比大树剖面样品偏右,粒度更细一些.

另外,对比风成沉积(图 3 $\hat{0}$)和河流漫滩相沉积物(图 3 $\hat{0}$)的频率曲线,川西甘孜黄土只具有 a型频率曲线,众数出现在 4-6 Φ 和 7-9 Φ ;河流漫滩相沉积物显示有 c型频率曲线,众数出现在 2-4 Φ 、5.5-7.5 Φ 和 10-11 Φ .从频率曲线特征,可以明显区分湖相沉积和河流相沉积.

2.3 粒度结构散点图

粒度图解参数散点图是区分不同成因沉积物类型的有效方法^[30-35].图 5为大树湖相与云南龙街粉砂、内蒙古岱海沉积物、川西甘孜黄土以及安徽宣城河流沉积物的粒度图解参数散点图对比.在峰度与平均粒径散点图(图 5a)上,大树湖相与龙街粉砂投影区基本重叠,位置偏右;岱海湖芯影区偏左,可以隐约(图中实线为分区线)把不同季风环境控制下的湖相沉积物区分开来.在峰度与标准偏差(图 5b)和峰度与偏度(图 5c)散点图上,大树湖相、龙街粉砂与岱海湖芯投影区几乎完全重叠,很难区分开来.但湖相沉积与风成沉积、河流沉积物相比,投影区差别显著,很容易区分开来.这种特征表明,利用粒度结构散点图来区分不同沉积环境下的沉积物,效果明显;但对同一成因的湖相沉积物,要区分沉积环境还不理想,还需经过更多对比研究,或者更多的寻求其它方法.

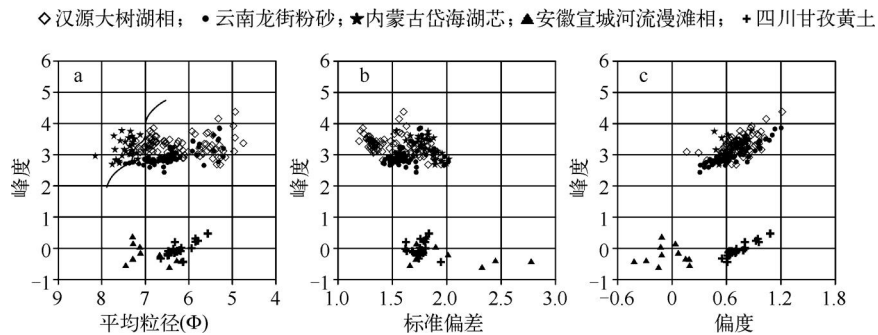


图 5 大树湖相沉积、龙街粉砂、岱海湖芯、甘孜黄土和宣城河流沉积物的结构散点图

Fig 5 Scattering maps of grain size parameters of Dashu section, Longjie silt, Lake Daisei, Ganzi loess and Xuancheng fluvial sediments

2.4 剖面粒度组成

沉积物粒度组成分析是判别沉积环境的重要手段,在古环境研究方面有重要意义^[36].按照国家海洋局 1975 年粒度分级 $\Phi^{[37]}$ 标准,以 4 Φ (63 μm)和 8 Φ (4 μm)作为砂粒、粉砂、粉砂、粘粒的分界线,大树剖面的各粒级组成(图 3)有如下特征.

(1) 砂(< 4 Φ 或 > 63 μm)含量为 0-44.94%,平均 9.21%;粉砂粒级(4-8 Φ 或 4-63 μm)在粒度组成中占绝对优势,含量为 48.27%-87.58%,平均含量可达 76.50%,其中粗粉砂(20-63 μm)平均含量为 28.04%,细粉砂(4-20 μm)平均含量为 48.45%;粘土(> 8 Φ 或 < 4 μm)含量为 5.34%-28.89%,平均值为 14.29%.

(2) 粘土与细粉砂、粉砂含量曲线呈正相关关系,粘土与细粉砂含量曲线更为相似.中值粒径与砂、粗粉砂含量曲线也呈正相关关系,并与粘土含量曲线呈负相关关系.中值粒径、砂、粗粉砂和粘土含量曲线的相关性极好.

(3) 大树剖面的中值粒径平均为 18.12 μm .中值粒径曲线显示,下部(> 9m)中值粒径变化不大,曲线呈小幅度波动;上部中值粒径变化明显,出现多次大幅度波动.

(4) 大树剖面的粒度分布曲线大致可以分为 8 个沉积阶段,构成从细到粗的三个沉积旋回:

1 沉积旋回 N: 包括沉积阶段 1-3

阶段 1: 8.65-11.2m,各组分含量变化不大,除粘土和粗粉砂含量曲线的波动较强外,其他的含量曲线变

化不大,中值粒径处于最小阶段,波动性也极小,指示较弱的水动力。

阶段 2 6.0-8.65m, 砂的含量极少,粗粉砂含量也相对较少;中值粒径较阶段 1 波动性大,最小值仍然与阶段 1 相近;波动性较强,指示较强的水动力。

阶段 3 4.55-6.0m, 粘土和细粉砂含量较低,而粗粉砂和砂含量较高.粗粉砂、砂含量整体处于剖面的主波段,指示本阶段水动力较强,且远强于阶段 2

° 沉积旋回 0: 包括沉积阶段 4-6

阶段 4 3.75-4.55m, 中值粒径含量主要集中在 10% 左右,变化不大;砂的含量极少;粗粉砂与细粉砂、粘土含量曲线出现多次大幅度波动.此阶段波动性较小,表明此阶段水动力较弱。

阶段 5: 2.50-3.75m, 粘土和细粉砂含量较低,而粗粉砂和砂含量较高,指示本阶段水动力较强,但弱于阶段 3

阶段 6 0.95-2.50m, 本阶段有三个次一级的小旋回,并存在着三个峰值,这从中值粒径以及砂、粉砂、粘土含量曲线可以明显看出,粗粉砂和砂出现多次大幅度波动,而粘土和细粉砂含量曲线呈小幅度波动,指示本阶段水动力强-弱波动幅度最大。

» 沉积旋回 0: 包括沉积阶段 7-8

阶段 7: 0.50-0.95m, 中值粒径变化不大.粉砂、砂以及中值粒径含量曲线波动较小,显示较弱的水动力。

阶段 8 0-0.50m, 中值粒径以及砂、粉砂、粘土都有一定的相似性,变化明显,并且在具有一个较大峰值和一个较小峰值.波动性较大,指示较强的水动力,与阶段 2 相似。

总体来看,阶段 1、4、7 波动性较小,指示较弱的水动力;阶段 2、3、5、6、8 波动性较大,指示较强的水动力。

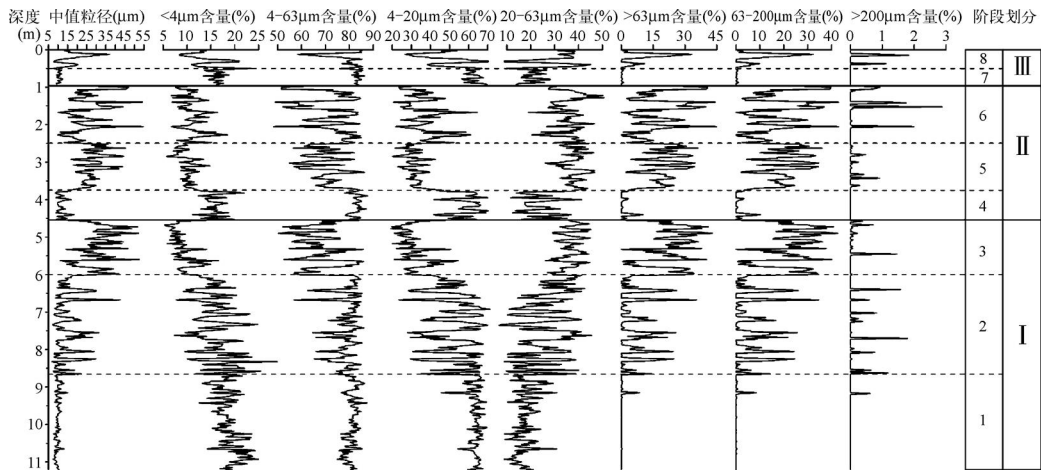


图 6 汉源大树剖面粒度分布曲线

Fig 6 Grain size distribution curves of Dashu section

3 结论

汉源大树剖面地质时代为中更新世晚期-晚更新世中期. 频率曲线有两峰 a 型、三峰 b 型和带粗尾巴的三峰 c 型三种类型, 其中两峰类型根据向粗端偏移的量还有一种 a1 亚型; 三峰类型依据第一众数和第二众数出现频率的多少有 b1 和 b2 两种亚型, 前者第一众数频率基本和第二众数频率相等, 后者第一众数频率远小于第二众数频率. 众数分别在 1-2Φ, 3-4Φ, 4-5Φ, 5-6. 5Φ, 6. 5-8Φ, 10-11Φ 等 6 个位置, 各众数在地层纵向各层段上变化趋势明显. 第一众数在 6-8Φ, 具有 a 型频率曲线特征的沉积物反映湖水较深, 而其余的则可能指示了水体较浅的滨浅湖相, 尤其第一众数在 3-4Φ 以及带有粗尾众数 1-2Φ 的沉积物. 粒度结构散点图

显示,不同季风控制区的湖泊沉积可以微弱区分,与不同沉积成因的黄土及河流相沉积区分显著.粒度组成以粉砂为主,分选性较好,中值粒径平均为 18.12 μm .粘土与细粉砂、粉砂含量曲线呈正相关关系,粘土与细粉砂含量曲线更为相似.中值粒径与砂、粗粉砂含量曲线也呈正相关关系,并与粘土含量曲线呈负相关关系.大树剖面粒度分布曲线可分为八个沉积阶段,构成从细到粗的三个沉积旋回,各沉积阶段分别指示了不同的水动力条件.

致谢:华东师范大学孙千里博士提供内蒙古岱海湖相沉积粒度数据,中国地质科学院地质力学研究所乔彦松博士提供安徽宣城河流相沉积粒度数据,在此一并感谢.

4 参考文献

- [1] 王苏民. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展. 科学通报, 1999, **44**(6): 579-587.
- [2] 沈 吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 307-313.
- [3] 刘岫峰. 沉积岩粒度分析及应用. 成都地质学院沉积岩研究室, 1981: 21-23.
- [4] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论. 北京: 科学出版社, 1985.
- [5] 肖晨曦, 李志忠. 粒度分析及其在沉积学中应用研究. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2006, **25**(3): 118-123.
- [6] 彭彦嘉. 岱海岩芯沉积的粒度组成与湖区全新世降水变化历史[学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [7] 侯新花, 吴艳宏, 杨丽原. 全新世镜泊湖粒度特征记录的该地区古降水变化历史. 湖泊科学, 2006, **18**(6): 605-614.
- [8] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 粒度分析理论技术进展及其应用. 世界地质, 2005, **4**(2): 203-207.
- [9] 王君波, 鞠建延, 朱立平. 两种激光粒度仪测量湖泊沉积物粒度结果的对比. 湖泊科学, 2007, **19**(5): 509-515.
- [10] 王君波, 朱立平. 不同前处理对湖泊沉积物粒度测量结果的影响带. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 17-23.
- [11] 陈敬安, 万国江, 张 峰等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例. 中国科学(D辑), 2003, **33**(6): 563-568.
- [12] 殷志强, 秦小光, 吴金水等. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究. 第四纪研究, 2008, **28**(2): 345-353.
- [13] 张 平, 宋春晖, 杨用彪等. 稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数的建立及其意义. 沉积学报, 2008, **26**(3): 501-507.
- [14] 沈 吉, 刘兴起, Matsumoto R 等. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化. 中国科学(D辑), 2004, **34**(6): 582-589.
- [15] 沈 吉, 汪 勇, 羊向东等. 湖泊沉积记录的区域风沙特征及湖泊演化历史: 以陕北红碱淖湖泊为例. 科学通报, 2006, **51**(1): 87-92.
- [16] 肖海丰, 沈 吉, 肖霞云. 云南鹤庆钻孔揭示的古生产力轨道尺度演化. 湖泊科学, 2006, **18**(6): 615-620.
- [17] 孙千里, 周 杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 2001, **21**(1): 93-95.
- [18] 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): 138-142.
- [19] 刘兴起, 王苏民, 沈 吉. 青海湖 QH-2000 钻孔沉积物粒度组成的古气候古环境意义. 湖泊科学, 2003, **15**(2): 112-117.
- [20] Peng Y J, Xiao J L, Nakamura T *et al*. Holocene East Asian monsoon precipitation pattern revealed by grain size distribution of core sediments of Dali Lake in Inner Mongolia of north central China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **233**: 467-479.
- [21] Xiao J L, Chang Z G, Si B *et al*. Partitioning of the grain size components of Dali Lake core sediments: evidence for lake-level changes during the Holocene. *Journal of Paleolimnology*, 2009, **42**: 249-260.
- [22] 殷志强, 秦小光, 吴金水等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究. 沉积学报, 2009, **27**(2): 343-351.
- [23] 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.
- [24] 乔彦松, 郭正堂, 郝青振等. 中新世黄土-古土壤序列的粒度特征及其对成因的指示意义. 中国科学(D辑), 2006, **36**(7): 646-653.
- [25] 万世明, 李安春, Jarr-Berend W Stout 等. 南海北部 ODP1146 站粒度揭示的近 20M a 以来东亚季风演化. 中国科学(D辑), 2007, **37**(6): 761-770.
- [26] Bouly S, Colin C, Trentesaux A *et al*. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea

- (ODP Site 1144). In: Prell WL, Wang P, Blum P *et al* eds. Proc ODP, Sci Res. 2003, **184**: 1-21
- [27] Weltje GJ. End-member modeling of compositional data: numerical statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. *J Math Geol*, 1997, **29**: 503-549
- [28] Prins MA, Weltje GJ. End-member modeling of siliciclastic grain size distributions: the Late Quaternary record of eolian and fluvial sediment supply to the Arabian Sea and its paleoclimatic significance. In: Harbaugh J, Watney L, Rankey G *et al* eds. Numerical Experiments in Stratigraphy: Recent Advances in Stratigraphic and Sedimentologic Computer Simulations. SEPM Special Publication. *Soc Sed Geol*, 1999, **62**: 91-111
- [29] 赵志中, 王书兵, 乔彦松等. 青藏高原东缘晚新生代地质与环境. 北京: 地质出版社, 2009: 203-209.
- [30] Friedman GM. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1967, **37**(2): 327-354.
- [31] Dieklas DJ. Grain size indices classification and environment. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1968, **38**(10): 83-100
- [32] Pasaga R. Grain size representation by CM pattern as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1964, **34**: 830-847.
- [33] Meyers PA. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic and paleoclimatic processes. *Organic Geochemical*, 1997, **27**(5-6): 213-250
- [34] Wang Hongya, Liu Hongyan, Cui Haining. Terminal Pleistocene/Holocene paleoenvironmental changes revealed by mineral magnetism measurements of lake sediments for Dali-Nor area, Southeastern Inner Mongolia Plateau. *Palaeoecology Palaeclimatology Palaecology*, 2001, **170**(1-2): 115-132.
- [35] Shuman B, Bravo J, Kaye J. Late Quaternary water-level variations and vegetation history at Massachusetts. *Quaternary Research*, 2001, **56**(3): 401-410
- [36] 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985: 1-400.
- [37] 国家海洋局. 海洋调查范围 (第四分册——海洋地质调查). 北京: 海洋出版社, 1975: 9-88.