

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019031201

MS2000 激光粒度仪测量第四纪沉积物粒度的定量进样研究

李华勇¹, 唐倩玉², 张虎才³, 李婷⁴, 段立曾³

1. 安阳师范学院资源环境与旅游学院, 安阳 455000

2. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029

3. 云南大学生态与环境科学学院, 高原湖泊生态与污染治理研究院, 昆明 650504

4. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650500

摘要: 粒度是第四纪古气候与古环境重建的常用替代指标, 目前通常采用 Mastersizer2000 激光粒度仪进行分析, 该测试仪器优点是速度快、精度高、重复性好, 缺点是进样过程未实现定量化, 对部分沉积样品的分析结果出现一定的随机性和不确定性, 分析结果易产生人为误差。为探究样品量和进样方法对测试结果可能造成的影响, 本研究选取 6 类代表性第四纪松散沉积物, 预处理后分别采用倾倒法、吸管法及定量进样法进行多次重复实验。结果显示: 粒度组分越单一, 不同进样方法造成的结果误差越小; 如果沉积物含有多个粒度组分, 而预处理样品量过多, 倾倒法容易造成粒度结果偏细, 吸管法往往造成实验结果偏粗, 定量进样法实验结果居于前两者之间。采用烧失量法计算沉积物中碳酸盐、有机质含量, 结合马尔文激光粒度仪测试原理及多次定量重复实验结果, 计算了一次实验所需样品量, 发现其与中值粒径和碳酸盐、有机质(合称杂质)含量呈线性正相关。根据该线性关系式, 在分析第四纪沉积物中值粒径范围及杂质含量的前提下, 可计算一次测试所需样品量, 将全部预处理后样品倒入测试烧杯中, 可有效避免样品量和进样方法对样品粒度实验结果造成的误差。

关键词: 第四纪沉积物; 粒度; 样品量; 进样方法; 定量实验; MS2000 激光粒度仪

中图分类号: P534.63

文献标识码: A

Quantitative sampling for grain size analysis by MS2000 laser analyzer

LI Huayong¹, TANG Qianyu², ZHANG Hucui³, LI Ting⁴, DUAN Lizeng³

1. School of Resource Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455000, China

2. School of Urban and Environment, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

3. Institute for Ecological Research and Pollution Control of Plateau Lakes, School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650504, China

4. College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

Abstract: Grain size is a proxy commonly used for Quaternary paleoclimate and paleoenvironment reconstruction. The Mastersizer 2000 laser analyzer is widely adopted to measure the grain size. The facility is advantaged by fast speed, high precision and good repeatability. However, the sampling introduction of it is not quantified and there may occur great randomness and uncertainty prone to human errors. In order to study the possible influences of sample amount and sample introduction methods on the test results, six types of representative Quaternary sediments were selected for repeated experiments, respectively with methods of dumping, pipette and quota sample introduction after pretreatment. The results show that the more uniform the grain size component, the smaller the difference in various sample introduction methods. If the sediment contained multiple types of grain size components and the pretreated sample amount was much enough, the grain size result of the dumping method was prone to be finer, while that of the pipette method was often coarser, and the quota sample introduction method resulted in between. Loss-of-ignition was used to calculate the content of carbonate and organic matter in the sediments. Upon the principle of the Mastersizer 2000 laser grain size analyzer and the results of repeated quantification experiments, we calculate the sample amount needed for one test. It is found that the needed amount has positive linear correlation with median grain size and impurity content. Afterwards the linear relation was calculated. Based on the universal linear relation, the median diameter range and the content of carbonate and organic matter and other impurities in the

资助项目: 国家自然科学基金项目“云南阳宗海沉积物中细菌脱镁叶绿素含量的气候学意义及全新世古气候定量重建”(41807447); 云南省领军人才项目(2015HA024); 云南省高端人才引进项目(2010CII11); 安阳师范学院博士科研启动项目

作者简介: 李华勇(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究湖泊沉积与气候变化, E-mail: lihuayong2010@hotmail.com

通讯作者: 张虎才(1962—), 男, 博士, 博士生导师, 主要研究湖泊沉积和生态与第四纪气候变化, E-mail: zhanghc@ynu.edu.cn

收稿日期: 2019-03-12; **改回日期:** 2019-06-17. 蔡秋蓉编辑

Quaternary sediments, the sample amount needed for one test could be calculated. Pouring all the pretreated samples into the test beaker could effectively avoid the unknown impacts on experimental results caused by sample amount and sample introduction methods.

Key words: Quaternary sediments; grain size; sample amount; sampling method; quantitative experiment; MS2000 laser analyzer

粒度对环境变化敏感、响应快速,是第四纪古气候与古环境重建的常用代用指标^[1-3]。目前粒度多采用马尔文激光粒度仪进行分析,该测试方法样品需求量少、速度快、精度高、结果重复性好、数据丰富且具有很强的再编辑能力^[4-7]。然而,利用粒度数据再加工及重建古环境的前提,是其原始分析结果具有很高的可靠性和精确性,而这方面的研究却鲜有报道^[8-9]。马尔文激光粒度仪测试方法的主要缺陷在于其进样过程未实现量化,因而可能对测试结果产生不可知影响,造成实验数据不能真实反映粒度组成,而关于马尔文激光粒度仪湿样法测试中进样量和进样方法的研究,几乎为空白。目前业内通常采用倾倒法和吸管法两种进样方式,不论哪种进样方法均未实现量化,因而可能造成实验结果存在潜在误差。本文选取 6 类代表性第四纪松散沉积物用以重建区域古气候和古环境^[10-15],分别为深水湖相沉积物(抚仙湖)、洛川黄土、河流相沉积物(珠江河口段)、浅海相沉积物(南海)、风成沙(内蒙古东部地区)以及三角洲相沉积物(珠江三角洲),粒度指标广泛应用于该 6 类沉积物中。设计多轮次多方法重复实验,探究样品量和进样方法对粒度测试结果产生的影响,计算一次实验所需样品量,并推算其与杂质含量、中值粒径等的通用关系式,以确定粒度测试的样品量,进一步保证分析数据的可靠性和精确性。

1 实验样品与测试方法

1.1 粒度预处理方法

选取 6 类代表性第四纪松散沉积物各一个,取适量样品放入烧杯中,参考前人粒度前处理方法^[16]:加入足量浓度为 10% 的 HCl 溶液,加热使其充分反应,除去样品中碳酸盐;气泡完全排完后,放置冷却,加入足量浓度为 10% 的 H₂O₂,加热使其充分反应,除去有机质;气泡排完后,注满蒸馏水静置 24 h,抽去上层清液,加入 10 mL 浓度为 0.05 mol/L 的 (NaPO₃)₆ 进行分散,搅拌均匀后置于超声波振荡仪上振荡 10 min。粒度分析采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,该仪器测量范围为 0.02~2 000 μm。实际分析中每个样品重复

2 次,取其平均值,保证重复测量相对误差小于 1%。

1.2 碳酸盐、有机质含量测定方法

样品中碳酸盐、有机质含量采用烧失量法进行测定:将恒重坩埚清洗干净,放入 105 ℃ 恒温鼓风烘箱加热 8 h,取出放入干燥器至室温后称重并记录 M1;取充分干燥的粉末状样品至称量好的坩埚中,放入 105 ℃ 恒温鼓风烘箱加热 6~8 h,取出放入干燥器冷却至室温后称重并记录 M2;将称重后的坩埚及样品放入设定温度为 550 ℃ 的马弗炉内加热 2 h,放入干燥器中冷却至室温后称重并记录 M3;再将称过后的坩埚放入 950 ℃ 马弗炉里烧 1 h,关掉马弗炉冷却至 250 ℃,用镊子取出放入干燥器至室温后称重并记录 M4。根据称量结果,进行数学换算,有机质含量和碳酸盐含量分别通过公式(1)和公式(2)换算得到。

$$\text{有机质}\% = (M2 - M3) / (M2 - M1) \quad (1)$$

$$\text{碳酸盐}\% = (M3 - M4) / (M2 - M1) \quad (2)$$

1.3 粒度实验设计

第一轮实验(倾倒进样法):称取 6 类沉积物干样 5~10 g 不等,预处理后采用倾倒法进样,每次倾倒前均搅拌均匀,控制遮光度在 15% 左右,溶剂量 1 000 mL,重复实验直至样品全部倾倒完毕。

第二轮实验(吸管进样法):称取干样各 5 g,预处理后采用吸管进样法,充分搅拌后使用一次性软吸管从浑浊液下部吸取样品,遮光度控制在 15% 左右,重复实验 1—4 次不等。

第三轮实验(定量进样法):根据前两轮样品量与实验次数关系,计算一次实验所需样品量 m ,预处理后全部倒入测试烧杯中。重复实验 3 次,样品量分别大致为 $0.7m$ 、 $1m$ 、 $1.3m$,溶剂量均为 1 000 mL。

粒度及烧失量实验均在云南师范大学高原湖泊生态与全球变化重点实验室完成。

2 实验结果

2.1 频率曲线

粒度频率曲线可直观反映粒度整体粗细程度及组分构成,不同类型沉积物频率曲线形态各异^[17-22]。

三轮实验粒度频率曲线结果如图1所示。

第一轮实验随倾倒次数增加,粒度分析结果发生粗偏。粒度整体越细,分选越好,粗偏越不明显,如深湖相沉积物(图1a)和黄土(图1b);如果沉积物含有多个粒度组分,砂含量较大,则会出现最初几次实验结果偏细,而最后几次实验结果偏粗的现象,如河流砂、浅海相沉积物、风成砂、三角洲相沉积物(图1c—f);如沉积物中含有粗砂组分(中值粒径 $200\sim 300\mu\text{m}$),即使倾倒前已充分搅拌,前几次实验也很难将其倒入测试烧杯中,导致MS2000激光粒度仪无法检测出该组分(图1d, f),而粗砂组分属敏感组分,往往蕴含丰富的环境信息^[22],该有效信息的缺失可能使古环境重建结果失真。

第二轮实验采用吸管从烧杯下部吸取样品均匀混合液的方法,可以有效减少倾倒法造成的人为分选,避免粗颗粒组分的缺失,因此,实验结果相对准确。缺点是该方法仍然具有不可控性,多次实验重复性差,尤其是前几次实验,存在粗砂组分含量

偏高的现象(图1c, d, f),这与吸管从烧杯下部吸取了过多粗颗粒物质有关。

第三轮实验结果频率曲线与吸管进样法结果接近,但结果中粗颗粒组分含量略低,重复性更好,表明实验误差小。

2.2 砂含量

砂含量是粒度指标中最常用到的参数之一,其含量高低可以指示物源、搬运动力或沉积环境的变化^[23-27]。6类沉积物样品三轮实验砂含量结果如图2所示。

第一轮实验,深湖相沉积物和风成黄土最后1—2次实验结果砂含量明显偏高(图2a, b),主要因为该两类沉积物粒度整体较细(图1a, b),前期倾倒主要倒去悬浮细颗粒,从而造成人为性砂组分富集;河流砂样品表现则恰好相反(图2c),前1—2次实验砂含量明显偏低,河流相沉积物以砂为主,而且粒径较粗,但在粗砂表面仍附有黏土和细粉砂,

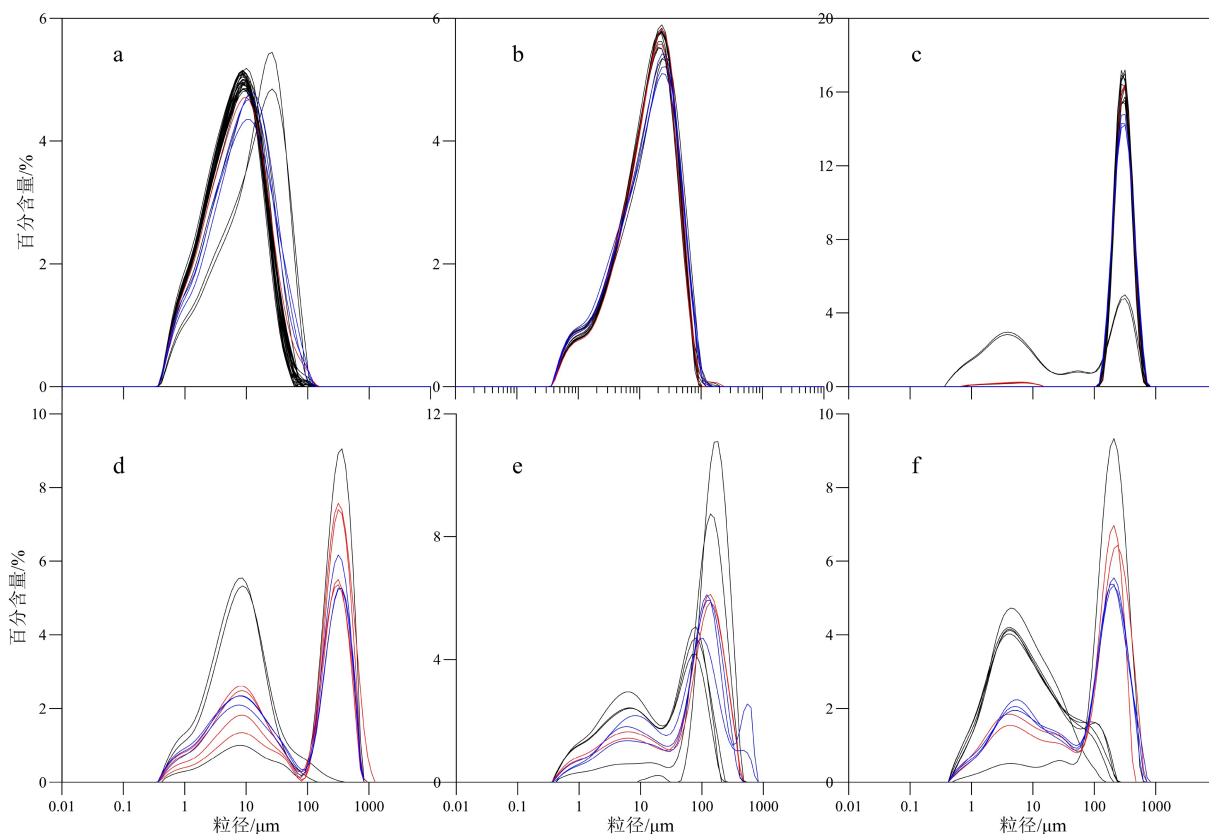


图1 6类沉积物频率曲线

黑线为第一轮实验,红线为第二轮实验,蓝线为第三轮实验; a. 深湖相沉积物, b. 黄土, c. 河流相沉积物, d. 浅海相沉积物, e. 风成沙, f. 三角洲相沉积物。

Fig.1 Frequency distribution curves of the 6 kinds of sediments

black lines: the first round of experiments, red lines: the second round, blue lines: the third; a. deep lake sediments, b. loess, c. river sediments, d. neritic sediments, e. aeolian sand, f. delta sediments.

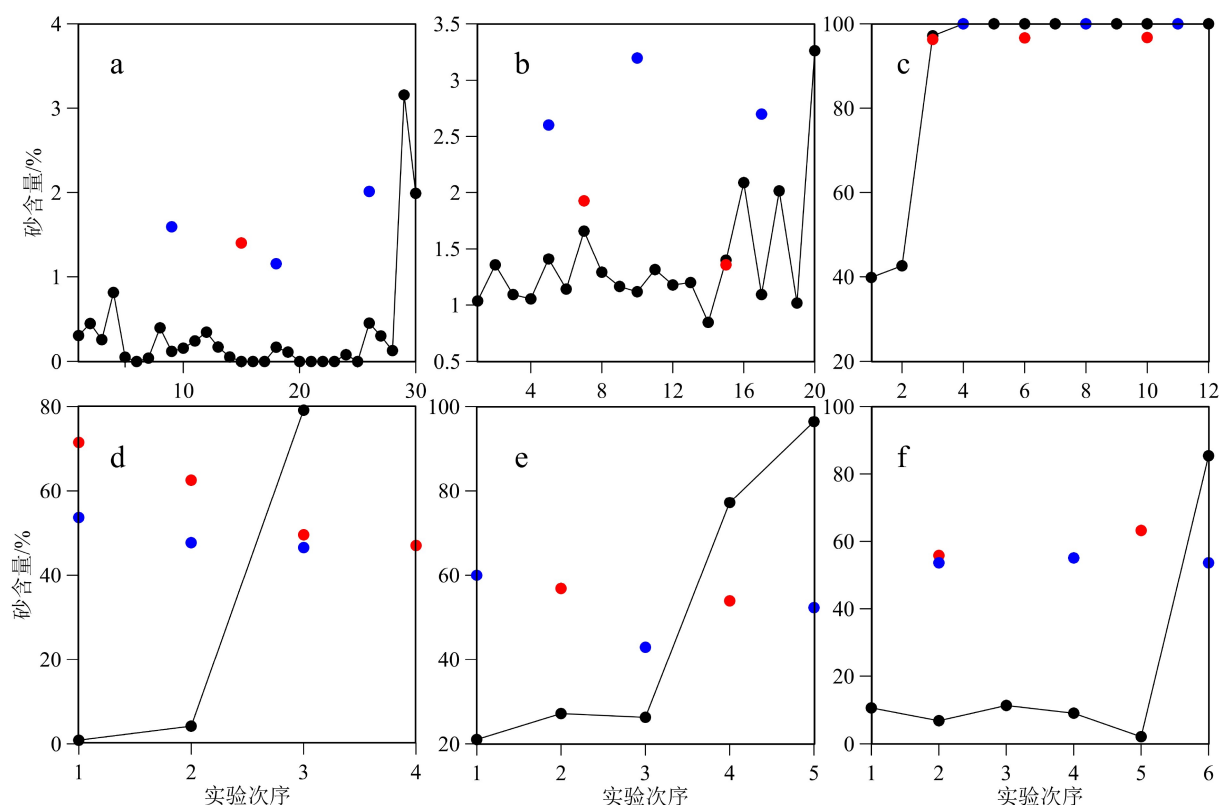


图 2 6 类沉积物砂含量

黑点为第一轮实验, 红点为第二轮实验, 蓝点为第三轮实验; a. 深湖相沉积物, b. 黄土, c. 河流相沉积物, d. 浅海相沉积物, e. 风成沙, f. 三角洲相沉积物。

Fig.2 Sand contents of the 6 kinds of sediments

black spots: the first round of experiments, red spots: the second round, blue spots: the third; a. deep lake sediments, b. loess, c. river sediments, d. neritic sediments, e. aeolian sand, f. delta sediments.

倾倒方法前 1—2 次实验主要将悬浮态细组分倒出, 从而导致砂含量显著偏低; 浅海相、风成沙及三角洲相沉积物粒度采用倾倒法砂含量前后波动较大, 在于这 3 类沉积物同时含有细粉砂和粗砂组分, 采用搅拌倾倒的进样方法, 极易造成二者分离, 从而导致前几次实验砂含量偏低, 而后几次砂含量偏高(图 1d—f)。

第二轮实验吸管进样方法从烧杯底部吸取混合较为充分的悬浊液, 可有效避免人为性二次分选, 但随机性太大, 容易造成实验误差, 而且如果样品中含有多个粒度组分, 采用吸管进样方法会造成砂含量相比第一轮和第三轮实验结果偏高(图 2d, e)。

第三轮实验结果重复性较好, 多次实验砂含量测量结果稳定, 最大限度避免了人为原因造成的实验误差。

2.3 三轮实验测试精度

为比较三轮实验重复实验精度, 计算了 6 类沉积物三轮实验后中值粒径和砂含量标准偏差(表 1),

标准偏差越大表明数据变异程度越大, 指示实验结果重复性差; 反之则相反。深湖相沉积物第二轮实验只进行一次测试, 因此没有计算其砂含量和中值粒径的标准偏差; 风成沙第三轮实验砂含量和中值粒径标准偏差高于第二轮结果(表 1), 反映实验结果相比吸管进样法离散度较大(图 2e), 其原因很可能是由第三轮 3 次实验取样误差导致的, 定量实验所需样品量较少, 取样本本身易造成样本间差异, 因此实验离散度较大; 除此之外, 其余 5 类沉积物实验结果均显示第三轮测试结果标准偏差最小, 指示定量实验法相比倾倒进样法和吸管进样法, 测试精度较高。

3 定量进样方法探究

3.1 第三轮实验结果

本轮实验的思路是根据前两轮实验结果, 计算一次实验所需样品量 m , 预处理后全部倒入测试烧

表 1 三轮实验砂含量及中值粒径标准偏差
Table 1 Standard deviation of the median grain size and sand contents of the three rounds of experiments

沉积物类型	砂含量标准偏差/%			中值粒径标准偏差/ μm		
	第一轮实验	第二轮实验	第三轮实验	第一轮实验	第二轮实验	第三轮实验
深湖相	0.66	—	0.43	1.33	—	0.40
黄土	0.54	0.40	0.32	0.48	0.85	0.49
河流相	22.79	0.24	0.00	103.16	2.28	1.60
浅海相	44.26	11.46	3.80	142.57	100.71	2.22
风成沙	34.70	2.09	8.55	64.70	3.99	19.42
三角洲相	31.76	5.24	0.84	66.23	24.72	3.70

杯中,防止进样过程中造成人为误差。3 次定量重复实验,样品量分别约为 0.7×m、m、1.3×m,遮光度最低约为 10%,最高 20%~25%,实验结果具有较好的重复性(图 1 蓝线,表 2),表明遮光度对实验结果影响不大,尤其是深湖相、黄土、河流相沉积物,粒度频率曲线为近似正态分布的单峰状,组分单一,分选较好,重复性尤为高。浅海相、三角洲相、风成沙样品实验结果离散度相对较高,与该 3 类沉积

物组分构成复杂,取样时样品之间存在差异有关。

3.2 烧失量结果

沉积物中的有机质和碳酸盐是进行粒度测试过程中需要去除的常见组分,相对粒度分析而言则可被视为“杂质”,其存在会对粒度测试结果产生影响^[28],尤其是内源有机质和自生碳酸盐,不具有沉积动力方面的指示意义,一般采用加酸和 H₂O₂ 的

表 2 第三轮实验数据和测试结果
Table 2 Results of the third round of experiments

沉积物类型	样品量/g	溶剂量/mL	遮光度/%	中值粒径/ μm	砂含量/%	系数 a
深湖相	0.12	1 000	10.83	7.55	1.60	17.49
	0.17	1 000	14.22	8.27	1.16	17.24
	0.24	1 000	19.98	7.60	2.01	17.59
黄土	0.18	1 000	10.48	14.11	2.60	15.40
	0.29	1 000	16.48	13.97	3.20	15.44
	0.36	1 000	20.37	13.20	2.70	15.71
河流相	4.11	1 000	9.61	279.33	100	7.22
	6.21	1 000	12.52	276.18	100	7.49
	8.22	1 000	17.09	277.31	100	7.42
浅海相	0.49	1 000	12.23	35.95	53.64	12.58
	0.71	1 000	17.67	38.94	47.69	12.23
	0.99	1 000	20.86	34.61	46.55	12.98
风成沙	0.42	1 000	10.94	85.52	59.94	8.80
	0.62	1 000	14.78	68.48	52.29	9.90
	0.84	1 000	25.92	46.78	42.88	11.16
三角洲相	0.50	1 000	11.64	92.61	55.11	8.59
	0.75	1 000	16.63	85.75	53.64	9.00
	1.08	1 000	24.30	86.83	53.67	8.93

注: a 为等式系数,后文介绍。

方法除去。本文采用烧失量法计算 6 类沉积物中碳酸盐和有机质含量(公式 1, 2), 平均含量均低于 3%(表 3), 为后文定量计算一次实验所需样品量提供了数据支撑(公式 3)。

表 3 6 类沉积物烧失量数据及结果
Table 3 Results of loss of ignition of the 6 kinds of sediments

样品类型	M1/g	M2/g	M3/g	有机质含量/%	M4/g	碳酸盐含量/%
深湖相	12.39	12.67	12.66	3.27	12.65	2.18
黄土	12.19	12.48	12.47	3.69	12.46	4.70
河流相	12.31	12.72	12.72	0.00	12.72	0.49
浅海相	12.45	12.77	12.76	3.22	12.74	4.18
风成沙	12.58	12.95	12.93	3.51	12.93	1.35
三角洲相	12.44	12.77	12.76	3.10	12.75	3.10

3.3 定量关系式建立

通过三轮实验结果可知, 样品量和进样方法会对粒度测试结果产生较大影响。因此, 计算不同类型沉积物一次实验所需样品量, 全部倒入测试烧杯中, 是消除人为误差的最佳方法。

根据马尔文激光粒度仪工作原理^[29], 设计如下等式:

$$m \times (1 - (Z) \%) = V \times S \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times \left(\frac{Md}{10000} \right)^3 \right] \times \rho \times 2^a$$
 (3)

式中 m 为样品质量(g), Z 代表杂质, 一般指碳酸盐、有机质等, V 为溶剂量(mL), S 为遮光度(%), Md 为中值粒径(μm), ρ 为矿物密度(g/cm^3), a 为系数。

马尔文激光粒度仪测试结果为体积百分含量, 取中值粒径代表样品平均粒径, 计算体积, 进一步求得质量, 乘以系数 2^a 使等式成立。代入表 1、表 2 数据, 计算得到系数 a (表 2), 进一步计算可发现系数 a 与中值粒径 Md 具有很好的线性关系(图 3)。

线性关系为:

$$a = -3 \times \ln(Md) + 23.2$$
 (4)

当中值粒径小于 $50 \mu\text{m}$ 时, 系数 a 与中值粒径线性关系最佳, 当样品为风成沙、三角洲或河流沉积物时, 中值粒径较大, 系数 a 偏离线性关系式, 但离散度不大(图 3), 可近似认为两者符合公式(4)中的关系式。

将公式(3)与公式(4)合并得到:

$$m = \frac{V \times S \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times \left(\frac{Md}{10000} \right)^3 \right] \times \rho \times 2^{(-3 \times \ln(Md) + 23.2)}}{1 - (Z) \%}$$
 (5)

溶剂量 V 取 1 000 mL, 遮光度 S 取 15%, 矿物密

度 ρ 取 $25 \text{ g}/\text{cm}^3$, 公式(5)可进一步简化为:

$$m = \frac{0.006\pi}{1 - (Z) \%} \times \left(\frac{Md}{2^{\ln Md}} \right)^3$$
 (6)

基于公式(6), 假定杂质(即碳酸盐和有机质)含量分别为 0、25%、50%、75%, 计算一次实验所需样品量与中值粒径的线性关系, 实验样品量与中值粒径和杂质含量正相关(图 4)。在杂质含量为 0 的前提下, 中值粒径为 $5 \mu\text{m}$ 左右的沉积物约需样品 0.1 g, 部分深湖及深海沉积物、泥炭沉积、大气气溶胶样品属于该类; 黄土中值粒径约为 $20 \mu\text{m}$, 对应样品量 0.3 g 左右; 若中值粒径为 $50 \mu\text{m}$, 对应样品量为 0.7 g 左右(三角洲相沉积物)。

公式(6)基于沉积物矿物密度为 2.5 得到, 实际实验中沉积物矿物种类多样, 密度不尽相同, 需要

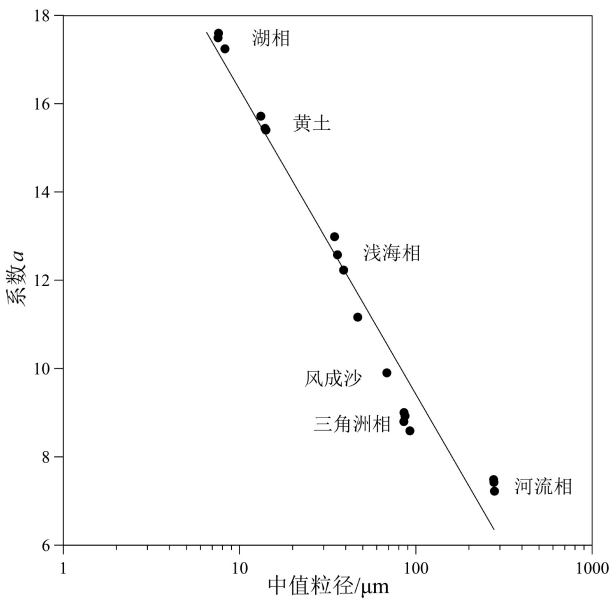


图 3 系数 a 与中值粒径关系图
Fig.3 The correlation between coefficient a and median size

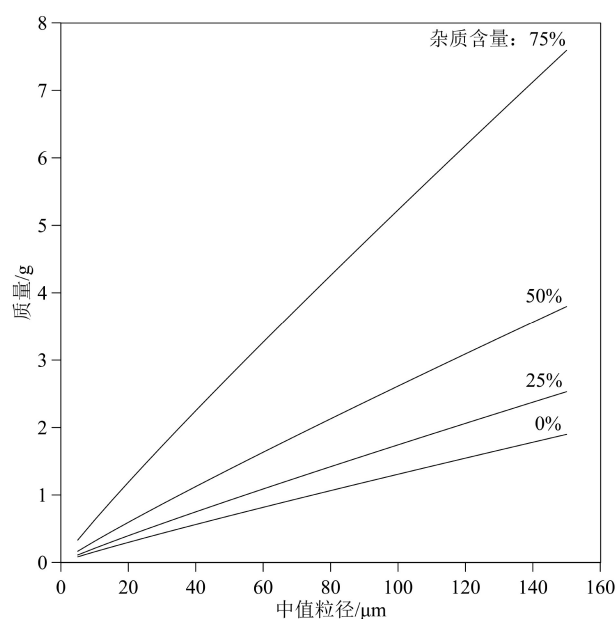


图4 实验样品量与中值粒径、杂质含量关系图

Fig.4 The correlation between sample quantity and the median size and impurity content

据此做出调整。由于松散沉积物可能在样品袋(盒)中发生了二次混合及分选,因此粒度实验应尽量选取块状样品,按公式(6)计算一次实验所需样品量,预处理后全部倒入测量烧杯中,尤其是杯底粗颗粒组分,往往蕴含丰富的环境信息,有必要用洗瓶洗入测试烧杯中,遮光度略微超出额定值(10%~20%),对测量结果影响不大(表2)。

4 结论

(1)沉积物粒度组分越单一,中值粒径越小,样品量和进样方法对测试结果的影响越微弱,实验结果重复性越高,粒度组分越复杂,样品量和进样方法对测试结果造成的误差越大。

(2)通常而言,如果实验准备样品量过多,则极易产生人为性实验误差。倾倒进样法易优先倒入上层悬浮液而丢失下层粗颗粒组分,造成结果偏细;吸管进样法往往吸取过多下层粗颗粒物质导致砂含量增多,使结果偏粗。

(3)采用定量实验法,取一次实验所需样品量,预处理后全部倒入测量烧杯中,可获得最接近真实的粒度值。定量实验所需样品量与中值粒径及碳酸盐和有机质含量线性正相关。

致谢: 感谢中国科学院南海海洋研究所罗传秀研究员提供部分实验样品。

参考文献 (References)

- [1] 舒培仙, 李保生, 牛东风, 等. 毛乌素沙漠东南缘滴哨沟湾剖面DGS1层段粒度特征及其指示的全新世气候变化[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 448-457. [SHU Peixian, LI Baosheng, NIU Dongfeng, et al. Climate variations recorded by the grain-size from the DGS1 segment in the Southeast of China's Mu Us Desert During the Holocene [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(3): 448-457.]
- [2] 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 [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 247-278.
- [3] 孙华杰, 臧淑英, 孙德尧, 等. 呼伦湖沉积物粒度特征及其环境指示意义[J]. 地理科学, 2018, 38(9): 1570-1578. [SUN Huajie, ZANG Shuying, SUN Deyao, et al. Grain-size characteristics and their environmental significance of Hulun Lake sediments [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(9): 1570-1578.]
- [4] 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.
- [5] Qin X G, Cai B G, Liu T S. Loess record of the aerodynamic environment in the east Asia monsoon area since 60, 000 years before present [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B1): B01204.
- [6] Zhang X D, Ji Y, Yang Z S, et al. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(2): 258-267.
- [7] 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[J]. 沉积学报, 2018, 36(6): 1148-1156. [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 [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(6): 1148-1156.]
- [8] 雷国良, 张虎才, 张文翔, 等. Mastersize 2000型激光粒度仪分析数据可靠性检验及意义——以洛川剖面S4层古土壤为例[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 531-539. [LEI Guoliang, ZHANG Hucai, ZHANG Wenxiang, et al. The reliability and significance of the grain-size obtained by Mastersize 2000 laser analyzer: a case study on the typical S4 from Luochuan section [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 531-539.]
- [9] 陈莹璐, 张玉柱, 谭子辉, 等. MS2000和LS13320激光粒度仪测定沉积物粒度结果的差异[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2018, 57(4): 48-55. [CHEN Yinglu, ZHANG Yuzhu, TAN Zihui, et al. Comparison of particle-size results of sediments measured by the MS2000 and LS13320 laser diffraction particle-size analyzers [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2018, 57(4): 48-55.]
- [10] 战庆, 王张华, 陈勇, 等. 长江口水下三角洲沉积物粒度组成及其在减沙背景下的响应[J]. 地质通报, 2016, 35(10): 1715-1723. [ZHAN Qing, WANG Zhanghua, CHEN Yong, et al. Grain size of recent sediments in Yangtze River subaqueous delta and its response to sediments supply decline [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016,

- 35(10): 1715-1723.]
- [11] 刘静玲, 李毅, 史璇, 等. 海河流域典型河流沉积物粒度特征及分布规律[J]. *水资源保护*, 2017, 33(6): 9-19. [LIU Jingling, LI Yi, SHI Xuan, et al. Grain size characteristics and distribution regularities of typical river sediments in Haihe River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(6): 9-19.]
- [12] 杨冰洁, 余凤玲, 郑卓, 等. 南澳岛青澳湾沉积物粒度与烧失量指示的全新世沉积环境变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 41-51. [YANG Bingjie, YU Fengling, ZHENG Zhuo, et al. Changes in Holocene depositional environment of Qin'ao embayment on Nan'ao island inferred from sediment grain-size and loss-on-ignition [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 41-51.]
- [13] 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.]
- [14] 吕安琪, 鹿化煜, 曾琳, 等. 1.08 Ma以来中国东北赤峰地区黄土粒度变化及其揭示的沙地扩张事件[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(4): 659-665. [LYU Anqi, LU Huayu, ZENG Lin, et al. Evolution of Horqin and Otindag dune fields since 1.08 Ma recorded by grain size of loess in Chifeng, Northeastern China [J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(4): 659-665.]
- [15] 吴旭东, 刘国旭, 沈吉. 湛江湖光岩玛珉湖全新世粒度变化特征及古气候意义[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(5): 1115-1122. [WU Xudong, LIU Guoxu, SHEN Ji. Grain size variation and its environmental significance from Huguangyan Maar Lake, Zhanjiang since the Holocene [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(5): 1115-1122.]
- [16] 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(1): 66-69. [LU Huayu, AN Zhisheng. Paleoclimate significance of grain size composition of Luochuan Loess [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(1): 66-69.]
- [17] 王则宇, 崔向新, 蒙仲举, 等. 风水复合侵蚀下锡林河流域不同管理方式草地表土粒度特征[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 819-825. [WANG Zeyu, CUI Xiangxin, MENG Zhongju, et al. Soil particle size distributions of different management styles under complex wind and water erosion in Xilin River Basin [J]. *Soils*, 2018, 50(4): 819-825.]
- [18] 李华勇, 张虎才, 陈光杰, 等. 云南高原湖泊表层沉积物粒度特征及环境指示意义[J]. *沉积学报*, 2017, 35(3): 499-507. [LI Huayong, ZHANG Hucai, CHEN Guangjie, et al. The grain size distribution characteristics of surface sediments from plateau lakes in Yunnan Province and their environmental significances [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 499-507.]
- [19] 陈松, 陈剑, 刘宏, 等. 堰塞湖溃坝堆积物的粒度特征及其沉积环境——以雪隆囊古堰塞湖为例[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(2): 509-516. [CHEN Song, CHEN Jian, LIU Hong, et al. Grain size features and sedimentary environment of the sediments caused by outburst of barrier lake: a case study of the ancient barrier lake (Xuelongnang Lake) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 509-516.]
- [20] 张笑辰, 张文强, 田元, 等. 西南印度洋中脊表层层源沉积物粒度组成及其影响因素[J]. *海洋湖沼通报*, 2016(3): 39-45. [ZHANG Xiaochen, ZHANG Wenqiang, TIAN Yuan, et al. Grain size composition of biogenic sediments in Southwest Indian ridge and its Influence factors [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2016(3): 39-45.]
- [21] 孟洁, 温小浩, 李保生, 等. 腾格里沙漠南缘土门剖面末次冰消期层段粒度特征及其反映的古气候[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(1): 165-176. [MENG Jie, WEN Xiaohao, LI Baosheng, et al. Grain-size distribution along the Tumen section of southern Tengger Desert, Northwestern China and its paleoclimatic implications during the Last Deglacial [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(1): 165-176.]
- [22] 喻薛凝, 战庆, 王张华. 长江口各地貌单元沉积构造和粒度分区特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 1-11. [YU Xuening, ZHAN Qing, WANG Zhanghua. Sedimentary structures and grain size patterns of the geomorphic units in the Yangtze River Mouth [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 1-11.]
- [23] Qiang M R, Chen F H, Zhang J W, et al. Grain size in sediments from Lake Sugan: a possible linkage to dust storm events at the northern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Environmental Geology*, 2007, 51(7): 1229-1238.
- [24] 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, 33(5): 818-826. [WANG Zhaoduo, HUANG Chunchang, YANG Hongjin, et al. Characteristics of holocene loess-palaeosol particle size composition and paleoclimatic significance in East Guanzhong, Shaanxi Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 33(5): 818-826.]
- [25] 章婷曦, 文莹亭, 董丹萍, 等. 太湖北部表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(3): 836-846. [ZHANG Tingxi, WEN Yingting, DONG Danping, et al. Grain size features and sedimentary environment of surficial sediments in the northwest Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(3): 836-846.]
- [26] 杨石岭, 丁仲礼. 黄土高原黄土粒度的空间变化及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(5): 934-944. [YANG Shiling, DING Zhongli. Spatial changes in grain size of loess deposits in the Chinese Loess Plateau and implications for palaeoenvironment [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(5): 934-944.]
- [27] 潘峰, 林春明, 李艳丽, 等. 钱塘江南岸SE2孔晚第四纪以来沉积物粒度特征及环境演化[J]. *古地理学报*, 2011, 13(2): 236-244. [PAN Feng, LIN Chunming, LI Yanli, et al. Sediments grain-size characteristics and environmental evolution of Core SE2 in southern bank of Qiantang River since the Late Quaternary [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(2): 236-244.]
- [28] Vasskog K, Kvisvik B C, Paasche Ø. Effects of hydrogen peroxide treatment on measurements of lake sediment grain-size distribution [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2016, 56(4): 365-381.
- [29] 赵寿刚, 张学义, 杨小平, 等. MS2000激光粒度仪与密度计法的土工颗分对比试验[J]. *南水北调与水利科技*, 2008, 6(5): 70-72. [ZHAO Shougang, ZHANG Xueyi, YANG Xiaoping, et al. Soil granulometric grading comparative experiments of MS2000 laser and densimeter methods [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2008, 6(5): 70-72.]