

# MS2000 和 LS13320 激光粒度仪测定 沉积物粒度结果的差异\*

陈莹璐<sup>1,3</sup>, 张玉柱<sup>2</sup>, 谭子辉<sup>2</sup>, 邹明博<sup>2</sup>

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710062;

2. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

3. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062 )

**摘要:** 目前国内外有多种分析仪器可对沉积物粒度成分进行测定, 分析结果可能难以对比, 在某种程度上影响了研究结论的可靠性。本文详细对比分析了普遍使用的两种激光粒度仪 (MS2000 和 LS13320) 对典型的黄土 ( $L_0$ 、 $L_1$ )、古土壤 ( $S_0$ ) 和古洪水滞流沉积物 (SWD) 粒度成分的测量结果, 结论如下: ① 应用 MS2000 和 LS13320 激光粒度仪对沉积样品测量结果的重复性都很好, 两种仪器得到的粒度分析结果, 完全可以作为恢复古环境信息和鉴别地层的一种非常有效的手段。② 对于同一个样品中含量相对较少的细颗粒成分 (粘粒、细粉沙) 和粗颗粒成分 (中沙), LS13320 激光粒度仪的检测效果要优于 MS2000 激光粒度仪, 因此在实际工作中, 要注意使用的数据要建立在同一测量系统内, 以便进行资料对比。

**关键词:** MS2000; LS13320; 激光粒度仪; 土壤沉积物

**中图分类号:** P333.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 04-0048-08

## Comparison of particle-size results of sediments measured by the MS2000 and LS13320 laser diffraction particle-size analyzers

CHEN Yinglu<sup>1,3</sup>, ZHANG Yuzhu<sup>2</sup>, TAN Zihui<sup>2</sup>, ZOU Mingbo<sup>2</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

3. State key laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University,  
Shanghai 200062, China)

**Abstract:** There are many kinds of laser diffraction particle-size analyzers used to study the particle-size of soil sediments in recent years. The analysis results may be difficult to compare, which affects the reliability of the research conclusion to some extent. The particle-sizes of the loess, paleosol and palaeoflood slackwater deposits (SWD) were measured with Mastersizer2000 by Malvern Instruments and LS13320 by Beckm an Coulter. The repeatedly measured results of an individual sample are very good. Both of two analyzers can be used for extracting palaeoenvironmental information of soil sediments. The LS13320 by Beckm an Coulter is better than the Mastersizer2000 by Malvern Instruments in the detective effect of relatively fine and coarse particles with rather few content. Therefore, the particle size of samples should be

\* 收稿日期: 2017-05-10

**基金项目:** 国家重点研发计划课题 (2017YFC1502501); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2018JQ4036); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (17JK077); 西北大学大学生创新创业训练计划 (2018263)

**作者简介:** 陈莹璐 (1993 年生), 女; 研究方向: 环境变迁与人地关系演变研究; E-mail: m18089209061@163.com

**通信作者:** 张玉柱 (1987 年生), 男; 研究方向: 环境变迁与人地关系演变研究; E-mail: xbdzyz05@nwu.edu.cn

obtained and analyzed by the same method in order to compare them with different references.

**Key words:** MS2000; LS13320; laser diffraction particle-size analyzer; soil sediments

粒度分析是土壤沉积物研究的最基本的手段,其结果能够很好的指示沉积物的物质来源、搬运介质和动力、沉积环境及其变化等<sup>[1-3]</sup>。另外还可作为地层的鉴别辅助手段<sup>[4]</sup>。

可用于土壤沉积物粒度分析的方法主要有筛析法、沉降法、图像分析法和激光法等<sup>[5-8]</sup>。在这些粒度分析方法中,激光法具有分析速度快重现性好、测量范围宽等优点,近年来在第四纪环境研究与地层划分、环境学、古海洋学研究等方面得到了广泛的应用<sup>[9-18]</sup>。这些研究主要采用了英国 Malvem 公司和法国 Cilas 公司生产的仪器,目前美国 Beckman Coulter 生产的仪器也得到了广泛的使用。所有激光粒度仪的制造都是以激光衍射原理为基础,即当光束照射到颗粒样品后发生散射,而颗粒的大小与散射角密切相关,将检测器上得到的散射角信息进行分析处理,从而得到颗粒大小的分布信息。但是,由于采用的粒度分析方法或仪器的差异,相应的测试结果也不尽相同<sup>[19]</sup>。目前国内外学者对于不同类型仪器测量结果之间的差异已有部分研究<sup>[19-23]</sup>。其中,MS2000 和 LS13320 型号的激光粒度仪是国内目前相对广泛的仪器,但是对比分析应用这两种激光粒度仪测定土壤沉积物粒度结果的研究很少。

本文选择泾河下游杨官寨(YGZ)晚更新世以来风成黄土土壤剖面中关键沉积层样品作为研究对象,从粒度分布特征角度对 MS2000 和 LS13320 激光粒度仪的分析结果进行对比分析,为利用土壤沉积物粒度分析结果进行古环境重建研究提供依据。

## 1 实验仪器与研究方法

实验所用仪器一个为英国 Malvem 公司生产的 MS2000 激光粒度仪,进样器为 Hydro2000MU 型;另一个为美国 Beckman Coulter 公司生产的 LS13320 激光粒度仪,带有 ALM (Aqueous Liquid Module) 进样器。两个仪器的测量范围分别为 0.02 ~ 2 000  $\mu\text{m}$  和 0.375 ~ 2 000  $\mu\text{m}$ ,土壤沉积物粒径分布范围一般介于 1 ~ 1 000  $\mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>,因此上述两仪器的测量范围都能满足实验需要。

选择采自泾河下游杨官寨(109°1'43"E, 34°27'52.9"N)全新世风成黄土土壤剖面,共选取了

剖面中的 4 个样品(风成黄土样品 2 个,古土壤样品 1 个,古洪水滞流沉积物样品 1 个)。杨官寨(YGZ)剖面是夹有典型古洪水滞流沉积层的风成黄土土壤剖面<sup>[24]</sup>,样品采自 2009 年 10 月。

前处理方法对沉积物粒度的测量结果尤为重要<sup>[25-28]</sup>,对于土壤沉积物样品采用去除有机质和碳酸盐、加入分散剂、利用振荡器或者超声波分散等传统的前处理方法<sup>[26]</sup>。本实验按照以上胶结物方法对所有样品进行严格的前处理,方法如下:在样品袋中取自然风干样约 0.8 g 加入烧杯,先后加入 7 mL  $\varphi = 10\%$  的  $\text{H}_2\text{O}_2$  和 7 mL  $\varphi = 10\%$  的 HCl 除去有机质和钙质胶结物,在电热板上加热直到反应完成;然后加水静置 72 h;最后抽去上层清水后加入适量 ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub> 使颗粒充分分散,摇匀后上机测量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 测量结果的重复性

重复性是指同一样品经过多次测量,所得测量结果之间的重合程度,是反映仪器精度的一个重要指标。本文采取 2 种方法:其一,分别取同一个样品放入 MS2000 和 LS13320 激光粒度仪中重复测量 5 次;其二,分别取同一个样品中的 5 个子样放入 MS2000 和 LS13320 激光粒度仪中测量 5 次(如表 1, 2)。实验中所用样品是选取了杨官寨(YGZ)剖面中典型的晚更新世马兰黄土( $L_1$ ),它是典型的沙尘暴沉积物,以粉沙为主,质地均一,疏松多孔。其中放入 MS2000 激光粒度仪中测量的子样名称记为  $L_1-1 \sim L_1-5$ ,放入 LS13320 激光粒度仪中测量的子样名称记为  $L_1-6 \sim L_1-10$ 。

根据测量结果统计,MS2000 激光粒度仪对单个样品的 5 次测量结果见表 1,粒度参数的相对标准偏差(RSD)都介于 0.19% ~ 1.78% 之间,其变化都小于 2%;分别取同一个样品中的 5 个子样测量,各子样粒度参数平均值的 RSD 都介于 0.41% ~ 2.80% 之间。LS13320 激光粒度仪对单个样品的 5 次测量结果见表 2,粒度参数的 RSD 都介于 0.12% ~ 0.57% 之间,其变化都小于 1%;分别取 5 个子样测量,各子样粒度参数平均值的 RSD 都介于 0.59% ~ 3.83% 之间。从重复性测量结果来

表 1 马兰黄土样品在 MS2000 激光粒度仪上的重复测量结果

Table 1 Repeated measurement results of Malan Loess measured by the MS2000 laser diffraction particle-size analyzer

样品名称	测量次数	$M_d/\mu\text{m}$	$M_z/\mu\text{m}$	$O'$	SK	Kg	S
L <sub>1</sub> -1	第 1 次	32.15	34.32	1.45	0.38	1.57	0.72
	第 2 次	32.05	34.21	1.45	0.39	1.57	0.72
	第 3 次	31.95	34.05	1.45	0.39	1.57	0.73
	第 4 次	31.81	33.93	1.46	0.39	1.56	0.73
	第 5 次	31.65	33.74	1.46	0.39	1.56	0.73
	平均值	31.92	34.05	1.45	0.39	1.57	0.73
	RSD/%	0.62	0.67	0.39	0.53	0.25	0.42
L <sub>1</sub> -2	第 1 次	32.13	34.26	1.44	0.38	1.57	0.72
	第 2 次	31.89	33.90	1.44	0.39	1.57	0.72
	第 3 次	31.78	33.78	1.45	0.39	1.57	0.72
	第 4 次	31.66	33.60	1.45	0.39	1.57	0.72
	第 5 次	31.49	33.44	1.45	0.39	1.57	0.73
	平均值	31.79	33.80	1.45	0.39	1.57	0.72
	RSD/%	0.76	0.93	0.40	1.10	0.19	0.37
L <sub>1</sub> -3	第 1 次	31.96	34.12	1.44	0.38	1.58	0.72
	第 2 次	31.76	33.78	1.44	0.39	1.57	0.72
	第 3 次	31.57	33.55	1.45	0.39	1.57	0.72
	第 4 次	31.32	33.19	1.45	0.40	1.56	0.72
	第 5 次	31.26	33.13	1.45	0.40	1.56	0.73
	平均值	31.57	33.55	1.45	0.39	1.57	0.72
	RSD/%	0.93	1.23	0.37	1.78	0.41	0.42
L <sub>1</sub> -4	第 1 次	32.08	34.15	1.42	0.39	1.59	0.71
	第 2 次	31.98	34.05	1.43	0.39	1.58	0.71
	第 3 次	31.97	34.03	1.43	0.39	1.58	0.71
	第 4 次	31.87	33.92	1.44	0.39	1.58	0.72
	第 5 次	31.59	33.51	1.44	0.39	1.58	0.72
	平均值	31.90	33.93	1.43	0.39	1.58	0.71
	RSD/%	0.59	0.74	0.33	1.01	0.28	0.38
L <sub>1</sub> -5	第 1 次	32.14	34.32	1.43	0.38	1.57	0.72
	第 2 次	32.03	34.20	1.44	0.38	1.57	0.72
	第 3 次	31.76	33.81	1.44	0.39	1.57	0.72
	第 4 次	31.69	33.73	1.44	0.39	1.56	0.72
	第 5 次	31.64	33.67	1.44	0.39	1.56	0.72
	平均值	31.85	33.95	1.44	0.39	1.57	0.72
	RSD/%	0.69	0.87	0.33	1.08	0.21	0.31
RSD/%		2.80	3.69	0.59	0.78	0.41	0.67

表 2 马兰黄土样品在 LS13320 激光粒度仪上的重复测量结果

Table 2 Repeated measurement results of Malan Loess measured by the LS13320 laser diffraction particle-size analyzer

样品	测量次数	$M_d/\mu\text{m}$	$M_z/\mu\text{m}$	$O'$	SK	Kg	S
L <sub>1</sub> -6	第 1 次	29.58	30.54	1.68	0.45	1.43	0.88
	第 2 次	29.46	30.34	1.68	0.46	1.43	0.88
	第 3 次	29.43	30.32	1.68	0.45	1.43	0.88
	第 4 次	29.39	30.23	1.68	0.46	1.42	0.88
	第 5 次	29.39	30.26	1.68	0.45	1.42	0.88
	平均值	29.45	30.34	1.68	0.45	1.43	0.88
	RSD/%	0.27	0.41	0.12	0.40	0.28	0.18
L <sub>1</sub> -7	第 1 次	31.45	32.40	1.66	0.45	1.51	0.83
	第 2 次	31.38	32.30	1.67	0.46	1.50	0.84
	第 3 次	31.34	32.31	1.67	0.45	1.50	0.84
	第 4 次	31.26	32.21	1.68	0.46	1.50	0.84
	第 5 次	31.22	32.17	1.68	0.46	1.49	0.85
	平均值	31.33	32.28	1.67	0.45	1.50	0.84
	RSD/%	0.29	0.27	0.36	0.40	0.47	0.57
L <sub>1</sub> -8	第 1 次	31.50	32.40	1.66	0.46	1.55	0.82
	第 2 次	31.58	32.53	1.67	0.45	1.55	0.82
	第 3 次	31.51	32.41	1.67	0.46	1.55	0.82
	第 4 次	31.44	32.31	1.67	0.46	1.55	0.82
	第 5 次	31.43	32.32	1.68	0.46	1.55	0.83
	平均值	31.49	32.39	1.67	0.46	1.55	0.82
	RSD/%	0.19	0.27	0.40	0.29	0.20	0.44
L <sub>1</sub> -9	第 1 次	32.23	33.00	1.65	0.46	1.60	0.80
	第 2 次	32.18	32.95	1.65	0.46	1.60	0.80
	第 3 次	32.15	32.89	1.66	0.46	1.60	0.80
	第 4 次	32.10	32.84	1.66	0.46	1.60	0.80
	第 5 次	32.11	32.87	1.67	0.46	1.61	0.80
	平均值	32.15	32.91	1.66	0.46	1.60	0.80
	RSD/%	0.17	0.19	0.40	0.27	0.32	0.09
L <sub>1</sub> -10	第 1 次	31.79	32.91	1.63	0.44	1.53	0.81
	第 2 次	31.62	32.44	1.64	0.46	1.56	0.81
	第 3 次	31.57	32.37	1.65	0.46	1.56	0.81
	第 4 次	31.52	32.31	1.66	0.46	1.57	0.81
	第 5 次	31.51	32.35	1.66	0.46	1.57	0.81
	平均值	31.56	32.37	1.65	0.46	1.57	0.81
	RSD/%	0.14	0.15	0.46	0.24	0.19	0.23
RSD/%		3.28	3.10	0.59	0.68	4.42	3.83

看, MS2000 激光粒度仪和 LS3320 激光粒度仪的测试精度都很高。然而, 相比于 MS2000 激光粒度仪, LS13320 激光粒度仪对单个样品多次测量的重复性更好, 精度更高。这可能是由于样品前处理效果的差异以及测量时间的不同造成的, MS2000 激光粒度仪对样品测量一次需要 8 s, 而 LS13320 激光粒度仪对样品测量一次则需要 1 min。同时, 将两种激光粒度仪对同一样品中的 5 个子样测量结果与单个样品的 5 次测量结果相比较, 5 个子样品的

粒度参数平均值的 RSD 呈现较高值, 变化幅度较大。鉴于两种激光粒度仪测量自身的精度都很高, 结果的差异主要是因取样带来的误差影响造成的。激光粒度仪在测量时需将颗粒在充分分散到溶液中, 所需的样品量很少, 而过少的样品量很难具有充分的代表性。所以, 为了使样品充分接近样品的真实分布状况, 以下对比中所使用的数据都是 5 个子样测量结果数据的平均值。

## 2.2 测量结果的趋势性差异

粒度自然分布频率曲线可以反映沉积物的来源及沉积物的某些重要粒度特征,如众数、偏度和峰态<sup>[1-2]</sup>。如图 1 所示,杨官寨 (YGZ) 剖面中风成黄土 ( $L_0$ 、 $L_1$ )、古土壤 ( $S_0$ )、古洪水 SWD 样品的粒度分布差异,在 MS2000 和 LS3320 激光粒度仪得到的自然分布频率曲线上都有很好的体现。总体上看,风成黄土古土壤和古洪水 SWD 的自然分布频率曲线都为正偏态,最大峰值都集中在粗粉沙段。但古土壤 ( $S_0$ ) 的自然分布频率曲线最大峰值偏左,峰态中等,分选差,且粘粒和细粉沙含量较高,这说明古土壤  $S_0$  形成时期气候温暖湿润,降水量多,淋溶与富集作用强烈,风化成壤作用强。风成黄土 ( $L_0$ 、 $L_1$ ) 的自然分布频率曲线主峰较古土壤  $S_0$  偏右,峰态尖窄,这说明黄土是沙尘暴的沉积物,其本身分选良好,以粉沙为主,且在其沉积过程中,气候冷干,沙尘暴堆积旺盛,成壤作用微弱。古洪水 SWD 是河流悬移质在高水位滞流环境中沉积形成的。其自然分布频率曲线最大峰值较黄土古土壤偏右,峰态尖窄,分选很好,粒度很集中,这也说明了该剖面全新世古洪水 SWD 的来源主要是泾河上游黄土广泛分布的半干旱区域,黄土是沙尘暴的沉积物,其本身分选良好,在暴雨洪水期,它们又受到河流洪水的进一步搬运分选最终在高水位滞流环境下沉积下来的,从而呈现出较马兰黄土分选更好的沉积特征。这反映了两种仪器所得的结果都可以很好的反映沉积物的物质来源及沉积物的偏态、峰态、分选性等重要的粒度特征。

应用 MS2000 和 LS3320 激光粒度仪就不同成

因沉积物单个样品所得的自然分布频率曲线来看 (图 2),按照沉积学粒度分级标准,在粘粒 ( $< 2 \mu\text{m}$ )、细粉沙 ( $2 \sim 16 \mu\text{m}$ )、粗粉沙 ( $16 \sim 63 \mu\text{m}$ )、极细沙 ( $63 \sim 125 \mu\text{m}$ )、中沙 ( $> 125 \mu\text{m}$ ) 段,两种激光粒度仪对于样品的测量的结果有差异。尤其在细粉沙和粗粉沙段,两种激光粒度仪的测量的结果差异较大。相比于 LS3320 激光粒度仪,MS2000 激光粒度仪测量所得的粗粉沙含量较高。

## 2.3 测量结果的绝对数值

MS2000 和 LS13320 激光粒度仪都能够很好的反映风成黄土 ( $L_0$ 、 $L_1$ )、古土壤 ( $S_0$ ) 和古洪水 SWD 不同的物质来源及粒度特征 (图 1)。但是就单个样品的自然分布频率曲线来看,两种激光粒度仪对于样品的测量的结果有显著差异 (图 2)。沉积物的粒度特征值的分析结果 (表 3),也更好的呈现了两种激光粒度仪所得结果间的差异。

MS2000 和 LS13320 激光粒度仪对单个样品的测量结果,在粒度分布和粒度参数上存在显著差异 (表 3)。杨官寨 (YGZ) 剖面中风成黄土 ( $L_0$ 、 $L_1$ )、古土壤 ( $S_0$ ) 和古洪水 SWD 的粘粒、细粉沙和中沙含量结果表明,MS2000 比 LS13320 激光粒度仪结果要小,而粗粉沙和极细沙的结果则相反。从粒度参数上看,MS2000 相比于 LS13320 激光粒度仪所得的中值粒径 ( $M_d$ ) 和平均粒径 ( $M_z$ ) 结果更大一些。这说明,对于单个样品在不考虑样品本身差异 (如取样的代表性等) 的前提下,LS13320 激光粒度仪对于含量相对较少的细颗粒组分 (粘粒、细粉沙) 和粗颗粒组分 (中沙) 比 MS2000 激光粒度仪更为敏感,检测的效果更好一些<sup>[19]</sup>。

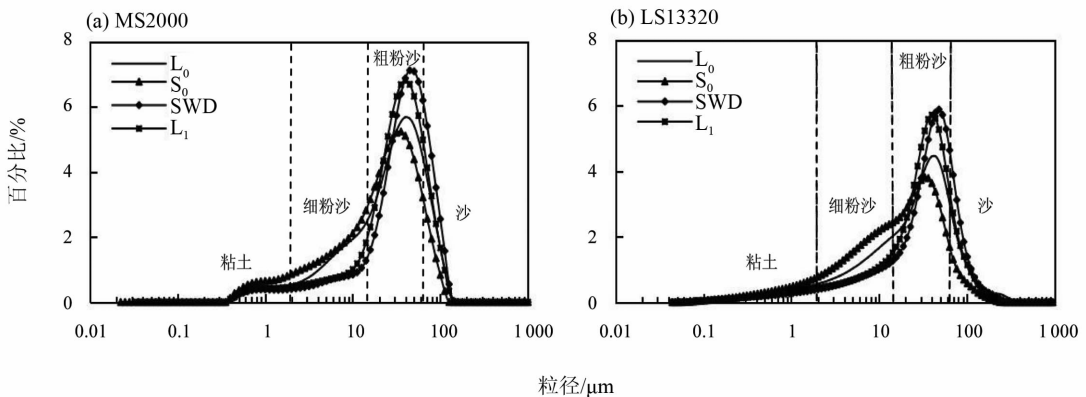


图 1 不同成因沉积物样品在两种激光粒度仪上的自然分布频率曲线

Fig. 1 Particle-size distribution frequency curves of samples measured by the MS2000 and LS13320 laser diffraction particle-size analyzers

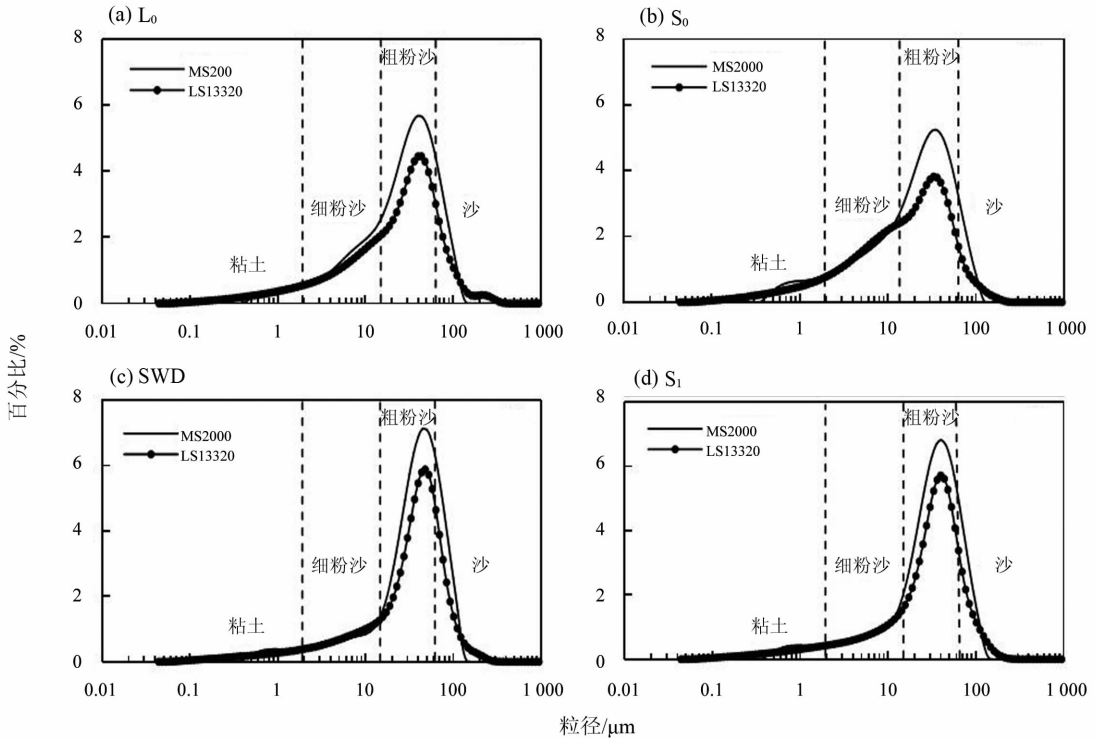


图 2 不同成因沉积物单个样品在 MS2000 和 LS13320 激光粒度仪上的自然分布频率曲线

Fig. 2 Particle-size distribution frequency curves of one sample measured by the MS2000 and LS13320 laser diffraction particle-size analyzers

表 3 不同成因沉积物样品在 MS2000 和 LS13320 激光粒度仪上的粒度特征值

Table 3 Particle-size parameters of samples measured by the MS2000 and LS13320 laser diffraction particle-size analyzers

仪器	样品	不同粒度比例 / %					$M_d / \mu\text{m}$	$M_z / \mu\text{m}$
		$< 2 \mu\text{m}$	$2 \sim 16 \mu\text{m}$	$16 \sim 63 \mu\text{m}$	$63 \sim 125 \mu\text{m}$	$> 125 \mu\text{m}$		
MS2000	$L_0$	5.07	26.25	56.29	12.36	0.03	27.78	30.70
	$S_0$	8.68	30.98	53.19	7.15	0.00	21.69	24.57
	SWD	4.88	13.69	63.09	18.29	0.05	36.94	38.71
	$L_1$	5.55	16.50	64.99	12.93	0.04	31.81	33.85
LS13320	$L_0$	8.11	27.70	51.41	10.39	2.40	26.25	29.52
	$S_0$	10.65	37.70	45.30	5.48	0.83	16.96	21.17
	SWD	6.54	17.70	58.75	14.96	2.11	35.94	36.22
	$L_1$	7.12	19.04	61.25	11.21	1.36	31.20	32.06

### 3 结 论

激光粒度分析方法具有精密度高、重现性好、分析速度快等优点，在测试粒度分布范围窄的样品方面优势突出，并在第四纪环境研究方面得到了广泛的应用。但是由于不同仪器参数和制造工艺的不同，其性能也会有显著的差异，如仪器的测量范围、检测器数目、结果计算模型等，因而在对一样品的测量过程中会得出不同的结果。但从实验过程来看，也不排除由于人为操作所以对测量结果带来

的影响。

本文应用 MS2000 和 LS13320 激光粒度仪，对泾河下游杨官寨 (YGZ) 全新世黄土土壤剖面中典型的沉积学样品做了粒度成分对比分析。结果表明：

1) 应用 MS2000 和 LS13320 激光粒度仪对沉积样品测量结果的重复性都很好，两种仪器得到的粒度分析结果，完全可以作为恢复古环境信息和鉴别地层的一种非常有效的手段。

2) 对于同一个样品中含量相对较少的细颗粒

成分 (粘粒、细粉沙) 和粗颗粒成分 (中沙), LS13320 激光粒度仪的检测效果要优于 MS2000 激

光粒度仪, 因此在实际工作中, 要注意使用的数据要建立在同一测量系统内, 以便进行资料对比。

## 参考文献:

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.  
LIU T S. Loess and the environment[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [2] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1981.  
REN M D, WANG N L. An introduction to modern sedimentary environment[M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [3] 谢悦波, 王文辉, 王平. 古洪水平流沉积粒度特征[J]. 水文, 2000, 20(4): 18-20.  
XIE Y B, WANG W H, WANG P. Characteristics of grain size for palaeoflood slackwater deposits[J]. Hydrology, 2000, 20(4): 18-20.
- [4] 张璞, 陈建强, 田明中, 等. 沉积物粒度分析在厦门市第四纪环境研究和地层划分对比中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(1): 88-94.  
ZHANG P, CHEN J Q, TIAN M Z, et al. Application of sediments grain size analysis in Quaternary environmental research and its stratum compartmentalization and contrast function in Xiamen island, Fujian province[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(1): 88-94.
- [5] 肖晨曦, 李志忠. 粒度分析及其在沉积学中应用研究[J]. 新疆师范大学学报, 2006, 25(3): 118-123.  
XIAO C X, LI Z Z. The research summary of grain size analysis and its application in the sedimentation[J]. Journal of Xinjiang Normal University, 2006, 25(3): 118-123.
- [6] 程鹏, 高抒, 李徐生. 激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较[J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 449-453.  
CHENG P, GAO S, LI X S. Evaluation of a wide range laser particle size analyses and comparison with pipette and sieving methods[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 449-453.
- [7] 李文凯, 吴玉新, 黄志民, 等. 激光粒度分析和筛分法测粒径分布的比较[J]. 粉体测试与表征, 2007, 13(5): 10-13.  
LI W K, WU Y X, HUANG Z M, et al. Measurement results comparison between laser particle analyzer and sieving method in particle size distribution[J]. China Powder Science & Technology, 2007, 13(5): 10-13.
- [8] 陈秀法, 冯秀丽, 刘冬雁, 等. 激光粒度分析与传统粒度分析方法相关对比[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(4): 608-614.  
CHEN X F, FENG X L, LIU D Y, et al. Correlation comparison between laser method and pipette sieve method of grain size[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(4): 608-614.
- [9] HUANG C C, PANG J L, ZHA X C, et al. Extraordinary floods of 4100-4000 a BP recorded at the Late Neolithic ruins in the Jinghe River Gorges, Middle Reach of the Yellow River, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 289: 1-9.
- [10] HUANG C C, PANG J L, ZHA X C, et al. Extraordinary floods related to the climatic event at 4200 a BP on the Qishuihe River, middle reaches of the Yellow River, China[J]. Quaternary Science Reviews, 2011, 30: 460-468.
- [11] 靳鹤龄, 肖洪浪, 张洪, 等. 粒度和元素证据指示的居延海 1.5 ka BP 来环境变化[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 233-240.  
JIN H L, XIAO H L, ZHANG H, et al. Evolution and climate changes of the Juyan Lake revealed from grain size and geochemistry element since 1 500 a BP[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 233-240.
- [12] 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[J]. 湖泊科学, 2006, 18(6): 605-614.  
HOU X H, WU Y H, YANG L Y. The paleo-precipitation history recorded by the characteristics of grain-size of Lake Jingpo during Holocene[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, 18(6): 605-614.
- [13] 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[J]. 湖泊科学, 2003, 15(2): 112-117.  
LIU X Q, WANG S M, SHEN J. The grainsize of the core QH-2000 in Qinghai Lake and its implication for paleoclimate and paleoenvironment[J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(2): 112-117.
- [14] 王君波, 朱立平. 藏南沉错沉积物的粒度特征及其古环境意义[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 459-467.  
WANG J B, ZHU L P. Grain-size characteristics and their paleo-environmental significance of Chen Co Lake sediments in Southern Tibet[J]. Progress in Geography, 2002, 21(5): 459-467.
- [15] 刘秀明, 李文宝, 邢春颖. MS2000 激光粒度分析仪

- 在沉积物分析中的应用[J]. 实验技术与管理, 2007, 24(9): 49-52.
- LIU X M, LI W B, XING C Y. Application of laser grain analyser MS2000 to deposit analysis[J]. Experimental Technology and Management, 2007, 24(9): 49-52.
- [16] 田岳明, 黄双喜, 吕金城, 等. 激光粒度分布仪在长江泥沙分析研究中的应用[J]. 人民长江, 2006, 37(12): 53-55.
- TIAN Y M, HUANG S X, LV J C, et al. Application of laser granule-size instrument to the sediment in Yangtze River[J]. Yangtze River, 2006, 37(12): 53-55.
- [17] 牛占, 和瑞勇, 李静, 等. 激光粒度分析仪应用于黄河泥沙颗粒分析的实验. 泥沙研究, 2002, (5): 6-14.
- NIU Z, HE R Y, LI J, et al. Application of laser granule-size instrument to the sediment in Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2002, (5): 6-14.
- [18] 徐喜庆, 刘军, 秦春光, 等. 应用激光粒度分析仪测定油田碎屑岩粒度分布. [J]. 粉体测试与表征, 2007, 13(6): 15-17.
- XU X Q, LIU J, QIN C G, et al. Discussion on measuring clastic rock granularity by laser granularity analyzer [J]. China Powder Science and Technology, 2007, 13(6): 15-17.
- [19] 王君波, 鞠建廷, 朱立平. 两种激光粒度仪测量湖泊沉积物粒度结果的对比[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5): 509-515.
- WANG J B, JU J T, ZHU L P. Comparison of lake sediment grain size result measured by two laser diffraction particle size analyzer [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(5): 509-515.
- [20] SINGER J, ANDERSON J B, LEDBETTER M T, et al. The assessment of analytical techniques for the analysis of fine grained sediments[J]. Journal of Sedimentary petrology, 1988, 58: 534-543.
- [21] LOISEAU J L, ARBOUILLE D, SANTIAGO S, et al. Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyzer for use with sediments[J]. Sedimentology, 1994, 41: 353-361.
- [22] KONERT M, VANDENBERGHE J. Comparison of laser grain-size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the under estimation of the clay fraction[J]. Sedimentology, 1997, 44: 523-535.
- [23] 肖尚斌, 李安春, 刘建国, 等. 两种激光粒度仪测量结果的对比[J]. 海洋科学, 2004, 28(12): 11-15.
- XIAO S B, LI A C, LIU J G, et al. Comparison between measurement results from two types of laser particle size analyzers[J]. Marine Sciences, 2004, 28(12): 11-15.
- [24] 张玉柱, 黄春长, 庞奖励, 等. 泾河下游全新世古洪水滞流沉积物研究[J]. 土壤通报, 2012, 30(5): 900-908.
- ZHANG Y Z, HUANG C C, PANG J L, et al. Sedimentary studies of the Holocene flood slackwater deposits in the lower reaches of the Jinghe River[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 900-908.
- [25] 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 H Y, AN Z S. Study on the influence of different pretreatment procedures on the particle-size distribution of loess sediment[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(23): 2535-2538.
- [26] 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[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 17-23.
- WANG J, ZHU L P. Influence of different pretreatments on grain-size measurement of lake sediments[J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(1): 17-23.
- [27] 孙有斌, 高抒, 鹿化煜. 前处理方法对北黄海沉积物粒度的影响[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(6): 665-671.
- SUN Y B, GAO S, LU H Y. Influence of different pretreatment procedures on the particle-size distribution of surficial sediment in the northern Yellow Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(6): 665-671.
- [28] 鹿化煜, 苗晓东, 孙有斌. 前处理步骤与方法对风成红粘土粒度测量的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(3): 129-135.
- LU H Y, MIAO X D, SUN Y B. Pretreatment methods and their influences on grain-size measurement of aeolian "Red Clay" in North China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(3): 129-135.