

Mastersizer3000 激光粒度仪测定哀牢山土壤样品颗粒组成

实验设计与验证

字肖萌¹, 许丽梅², 何丽萍¹, 张薇¹, 沙丽清^{1,3}

(1.中国科学院西双版纳热带植物园 公共技术中心, 云南昆明 650223; 2.普洱学院 生物与化学学院, 云南普洱 665000; 3.中国科学院西双版纳热带植物园 热带森林生态学重点实验室, 云南勐仑 666303)

摘要: 使用马尔文 Mastersizer3000 型激光粒度仪测定哀牢山土壤样品颗粒组成数据, 对称样质量以及进样转速、超声强度等仪器重要参数进行摸索, 完成激光法测定最佳实验方案设计: 称样质量: 0.8 g, 进样转速设定 2300 rpm, 超声分散强度 30%, 持续 25 s 后测定。选取 8 个土壤样品, 分别用传统沉降法和激光衍射法进行土壤粒径含量测定, 对比两种方法测定结果并进行线性拟合, 得到可将激光法测定体积百分数 (x) 转换为质量百分数 (y) 的转换方程: 黏粒 ($< 2 \mu\text{m}$): $y=0.8345x-13.656$ ($R^2=0.8685$); 砂粒 ($50-2000 \mu\text{m}$): $y=0.9213x+2.8074$ ($R^2=0.855$)。两种方法所测结果黏粒和砂粒含量具有较好的相关性。分析激光法转换后测算质地与传统沉降法实测质地结果显示, 转换后质地判断结果准确率达 68.75%, 验证该实验设计方案具有一定的可行性及准确性。

关键词: Mastersizer3000 激光粒度仪; 土壤颗粒组成; 传统沉降法; 激光衍射法; 土壤质地; 转换模型

Design and validation of the determination on particle size distribution in soil sample from Ailao Mountains by Malvern Mastersizer3000 Laser Particle Analyzer

Zi Xiaomeng¹, Xu Limei², He Liping¹, Zhang Wei¹, Sha Liqing^{1,3}

(1. Institutional Center for Shared Technologies and Facilities of Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming, 650223, China; 2. School of Biological and Chemical Science, Pu'er University, Pu'er, 665000, China; 3. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun, 666303, China)

Abstract: This study determined particle size distribution in soil samples from Ailao Mountains by Malvern Mastersizer3000 Laser Particle Analyzer, exploring the optimal experimental scheme with specifications as 0.8 g sample weight, 2300 rpm stirrer speed, ultrasonic sound of 25 s duration and level of 30%. Using two different methods-Sedimentation / Laser Diffraction Method-to compare and linear fitting the quality percentage and volume percentage results: Clay ($< 2 \mu\text{m}$): $y=0.8345x-13.656$ ($R^2=0.8685$), sand ($50-2000 \mu\text{m}$): $y=0.9213x+2.8074$ ($R^2=0.855$). The fitting result of clay and sand has good correlation between two methods. Classification of

soil texture using calibration data measured by Laser Diffraction Method has got 68.75% accurate comparing with Pipette Method, which has verified the feasibility and accuracy of our experimental scheme.

Keywords: Malvern Mastersizer3000 Laser Particle Analyzer; soil particle size distribution, Sedimentation Method (Pipette Method); Laser Diffraction Method; soil texture; alternative model

土壤颗粒组成也称土壤机械组成，是反映组成土壤基质的不同比列、不同形状、大小各异的颗粒其粒径分布情况^[1]。土壤颗粒分布是土壤重要的物理性质之一，表示不同粒径土粒的分量，它与土壤理化性质有着密切的关系，可以反映其母质来源及发育程度，是划分土壤质地的基础，也是划分土壤类型的重要依据^[2]。

常见的土壤粒径分布测试手段有筛分法、沉降法（包括吸管法和密度计法），和激光衍射法等。吸管法是传统测定土壤颗粒分布的常用方法，该方法依据司笃克斯（Stokes）定律为基础测定土壤颗粒的粒径分布，操作步骤繁琐，准确性差，耗时长^[3]。近年来，由于激光衍射法分析土壤粒径分布具有操作简单、效率高、测试样品用量小、测定范围广、相对误差小^[3]、适合批量样品测定的特点，其在土壤粒径分布的测定中得到越来越广泛的应用^[4]。但由于其出现时间短，尚未形成一套成熟的试验体系，对其结果的精确性尚未达成统一的认识，目前还难以用该法直接取代传统的测定方法^[5]。利用传统方法和激光衍射法法同时进行土壤粒度分布测定，通过线性回归分析建立二者之间的转换方程^[6-10]，把激光法测定的体积分数转换成质量分数，再进行土壤质地的划分^[7]，可明显降低与传统法实测数据之间的误差，使得利用激光法快速判断土壤质地类型具有极高的可行性和准确性^[11-13]。

然而，目前对于激光衍射法测定土壤颗粒组成还没有统一的模型^[4]，还因为土壤类型的多样化使得传统沉降法与激光衍射法的转换也没有完整的、确定的方法，且不同实验过程中因称样量减少所带入的称样误差，以及仪器参数设定如：样品和分散剂折射率和吸收率、激光遮光率、进样转速、超声分散强度及时间等都是影响结果的因素^[14-15]，使得激光法测定不同类型土壤样品颗粒组成的实验设计需要进一步研究探讨。

本研究探索设计准确有效的激光衍射实验方法用于分析哀牢山送检土壤样品的粒径分布情况，通过对传统沉降法和激光衍射两种方法所测数据进行分析比对并实现线性拟合，以期能建立激光衍射法测量土壤颗粒组成的数据转换模型，实现利用激光法快速准确判断土壤质地特性的可能。

1 材料与amp;方法

1.1 研究材料

表 1 土样样品性质

Table 1. soil property

样品原编 号/实验 编号	土壤 颜色	样品原编 号/实验 编号	土壤 颜色	样品原编 号/实验 编号	土壤 颜色	样品原编 号/实验 编号	土壤 颜色	样品原编 号/实验 编号	土壤 颜色
T-A-1 (a)	黑色	T-C-1 (1)	褐色	C-A-4 (3)	黄色	D-A-5 (5)	黑色	D-C-4 (7)	黄色
T-A-2 (b)	褐色	C-A-3 (2)	褐色	C-C-4 (4)	黑色	D-B-5 (6)	黑色	D-C-5 (8)	黄色

从中心已完成测定的实验样品中，随机挑选 10 个采集自哀牢山生的土壤样品。样品性质见表 1。

1.2 试剂

1:4 过氧化氢溶液 (H_2O_2): 500 mL 过氧化氢 (分析纯) 与 2000 mL 纯水混合摇匀。

0.5 mol/L 氢氧化钠 (NaOH) 溶液: 20 g 氢氧化钠 (分析纯)，加纯水溶解并定容到 1 L。

1.3 仪器设备

1.3.1 传统沉降法 (吸管法) 所用自制玻璃装置

土壤颗粒分析吸管、搅拌棒、1 L 平口量筒、50 ml 小烧杯 (图 1)。



图 1. 传统沉降法所用自制玻璃装置

Figure 1. Glass Pipette device of Sedimentation Method

1.3.2 激光衍射法 (激光法) 所用仪器设备

马尔文 Mastersizer3000 型激光粒度仪 (Mastersizer3000, 图 2)。



图2 马尔文激光粒度仪 (Mastersizer3000)

Figure 2. Malvern Mastersizer3000 Laser Particle Analyzer

1.4 实验方法

1.4.1 传统沉降法

参照方法《森林土壤颗粒组成（机械组成）的测定》^[16]（LY/T 1225-1999）：

（1）称样：选取实验编号为 1~8 的土壤样品，分别称取过 2 mm 筛孔的 10 g 风干土样各 2 份于 250 ml 烧杯中。

（2）去除有机质：倒入 25 mL 1 : 4 过氧化氢溶液，摇晃烧杯使其充分反应，待到土色变淡，有机质完全被氧化（再加入过氧化氢溶液无明显现象）为止。多余过氧化氢溶液加热除去。

（3）制备悬浊液：去有机质的土样用蒸馏水洗入 500 mL 锥形瓶中。（注意：液面控制在 250 mL 左右）加 10 mL 0.5 mol/L 氢氧化钠于锥形瓶中，摇匀于电热板上煮沸 1 小时，并经常摇动锥形瓶使样品充分分散；分散好的样品转移到 1 L 量筒内，并定容至 1 L。

（4）颗粒沉降分析：测量当时实验室水温，按水温计算出相应粒径沉降至 10 cm 所需时间。

（5）测定：用搅拌棒上下匀速搅拌悬液 1 min，注意搅拌棒的多孔片不要提出液面。搅拌完毕的时间即为开始沉降的时间，按计算出的时间静置后吸液（注意吸液前 15 s 要将吸管轻轻插至悬液 10 cm 深度）。吸出悬液转至事先准备好的已记录恒重的 50 mL 小烧杯中，将小烧杯置于电热板加热蒸干（特别注意防止蒸干过程中悬液飞溅），再移至 105 °C 烘箱 6 h 后称量。计算测定结果（森林土壤颗粒组成（机械组成）的测定^[16] LY/T 1225-1999）。

1.4.2 激光衍射法粒度分析实验方法设计

1.4.2.1 仪器准备

- a. 激光粒度仪开机预热半小时，激光强度需达到 70 %以上^[14]
- b. 打开附件清洗系统^[17]
- c. 利用 SiO₂（稳定试剂样品，蒸馏水分散）检查仪器稳定性

1.4.2.2 最适称样质量筛选实验

(1) 称样：选择实验编号为 a 和 b 的 2 份土壤样品，分别称取 0.5 g、0.6 g、0.7 g、0.8 g、0.9 g、1.0 g 过 2 mm 筛孔的风干土样各 2 份于 100 mL 三角锥形瓶中。

(2) 去除有机质：倒入 10 mL 1 : 4 过氧化氢溶液，摇晃烧杯使其充分反应，待到土色变淡，有机质完全被氧化（再加入过氧化氢溶液无明显现象）为止。多余过氧化氢溶液加热除去。

(3) 制备悬浊液：往 100 mL 锥形瓶中加入蒸馏水至溶液总体积约为 50 mL，加 2 mL 0.5 mol/L 氢氧化钠于锥形瓶中，摇匀于电热板上煮沸 1 小时，并经常摇动锥形瓶使样品充分分散。

(5) 测定：逐一将制备好的待测悬浊液用少量蒸馏水完全转入激光粒度仪湿法进样器已备好的盛有 500 mL 蒸馏水的烧杯内，按照设定好的程序进行测定^[17]，测量 2 次求平均。

1.4.2.3 最佳进样转速确定实验

(1) 称样：选择实验编号为 a 的土壤样品，称取筛选出的最适称样质量过 2 mm 筛孔的风干土样各 5 份。

(2) 样品前处理其他步骤同 1.4.2.2。

(3) 测量：逐一将制备好的待测悬浊液用少量蒸馏水完全转入激光粒度仪湿法进样器已备好的盛有 500 mL 蒸馏水的烧杯内，分别以 1700 rpm、2300 rpm、3000 rpm、3500 rpm 的转速，按照设定好的程序进行测定^[17]，测量 10 次求平均。

1.4.2.4 最适超声分散强度筛选实验

(1) 称样：选择实验编号为 a 的土壤样品，称取筛选出的最适称样质量过 2 mm 筛孔的风干土样各 5 份。

(2) 样品前处理其他步骤同 1.4.2.2。

(3) 测量：逐一将制备好的待测悬浊液用少量蒸馏水完全转入激光粒度仪湿法进样器已备好的盛有 500 mL 蒸馏水的烧杯内，设置固定进样循环转速为筛选出的最佳转速，分别以 10 %、20 %、30 %、40 %、50 % 的超声分散强度处理 25 s 后等待 1 min，按照设定好的序进行测定^[17]，测量 10 次求平均。

1.4.3 激光衍射法粒度分析与传统沉降法测定结果比对与验证

(1) 称样：选取实验编号为 1~8 的土壤样品，称取 0.8 g 过 2 mm 筛孔的风干土样各 2

份。

(2) 样品前处理其他步骤同 1.4.2.2。

(3) 测量：逐一将制备好的待测悬浊液用少量蒸馏水完全转入激光粒度仪湿法进样器已备好的盛有 500 mL 蒸馏水的烧杯内，设置固定进样循环转速为筛选出的最佳转速 2300 rpm，以 30 % 的超声强度分散处理 25 s 后，按照设定好的序进行测定^[17]，测量 3 次求平均。

(4) 按照国际制土壤质地三角图的划分标准，整理分析两种方法测定黏粒 (<2 μm)、粉粒 (2-50 μm)，及砂粒 (50-2000 μm) 的粒级含量结果，对激光法测定的三种粒级体积百分数与吸管法测定的质量百分数结果进行对比分析，验证激光法测定结果转化后进行质地判断的准确性。

2 结果与讨论

激光粒度仪测定不同样品粒径需根据样品性质对仪器参数进行实验摸索，设计样品测定的实验方法，确定仪器参数，包括设定样品颗粒类型，分散剂吸收率、折射率、激光遮光率、进样循环转速，以及是否进行超声分散剂超声强度及时间等。

2.1 称样质量

激光粒度仪测量土壤样品颗粒组成数据时，对加入样品后的激光遮光率有一定要求 (15~70 %)，在适宜遮光率条件下测定能确保检测数据的稳定性和可靠性。传统沉降法，每个样品需称量 10 g 进行测定，激光法测定时需考虑遮光率这一参数，故而仅能称取较少样品量进行实验。称样量过小可能造成土壤取样不均匀，造成样品粒级组成代表性较低，测定结果精确度及准确度降低；称样量过大则可能造成激光遮光度过高而发生多重散射。二者均会使得样品重复测定结果产生较大差异，故而实验前需要进行实验方法摸索，选择适宜的称样质量。

不同称样质量的样品经前处理后全部转入进样器，使得仪器测定时的遮光率有所不同 (表 2)，测得的粒级含量数据也有一定影响。同一样品的黏粒粒级含量的测定结果随着称样量的增加而明显增加 (表 2，图 3)，粉粒粒级含量的测定结果则随着称样量的增加而明显下降 (表 2，图 3)，砂粒粒级含量结果受称样量影响无明显趋势。这是由于称样越多，所检测的颗粒数越多，体积小的颗粒占比也越高，故而粘粒粒级含量体积百分比增加。从测定结果的精确度来看，a 样品在称样量为 0.8 g 和 0.9 g 时，无论黏粒、粉粒还是砂粒粒级含量结果均有较高的精确性，b 样品则在称样量为 0.8 g 时，其三个粒级含量结果有极高精确性 (图 3)。从结果可靠性、准确性及可重复性等多方面考虑，选定 0.8 g 作为土壤样品激光粒度仪测定实验最优称样质量。

表 2 不同称样质量对粒度测定的影响

Table 2. The effect on particle size determination result between different sample weight

样品 编号	称样质量 (g)	遮光度 (%)	黏粒 (< 2 μm)		粉粒 (2-50 μm)		砂粒 (50-2000 μm)	
			含量 (%)		含量 (%)		含量 (%)	
			平均值 Mean	标准误 SE	平均值 Mean	标准误 SE	平均值 Mean	标准误 SE
a	0.5	40.87	25.06	0.68	55.70	0.41	18.74	1.21
a	0.6	43.94	26.79	0.20	56.09	0.68	16.08	0.73
a	0.7	48.45	27.50	0.16	53.69	0.29	17.47	0.35
a	0.8	53.94	28.56	0.11	52.04	0.14	17.94	0.19
a	0.9	58.48	30.03	0.12	49.78	0.09	18.63	0.13
a	1.0	63.45	33.62	0.03	48.66	0.35	16.48	0.31
b	0.5	47.86	23.49	0.81	66.22	1.08	10.09	0.33
b	0.6	51.19	23.30	0.85	64.96	1.44	11.49	0.50
b	0.7	56.49	23.13	0.46	67.75	0.33	9.12	0.17
b	0.8	61.79	24.81	0.13	64.55	0.16	10.64	0.22
b	0.9	67.62	26.25	0.32	61.21	0.62	12.19	0.32
b	1.0	70.36	25.75	0.34	60.27	0.50	13.29	0.17

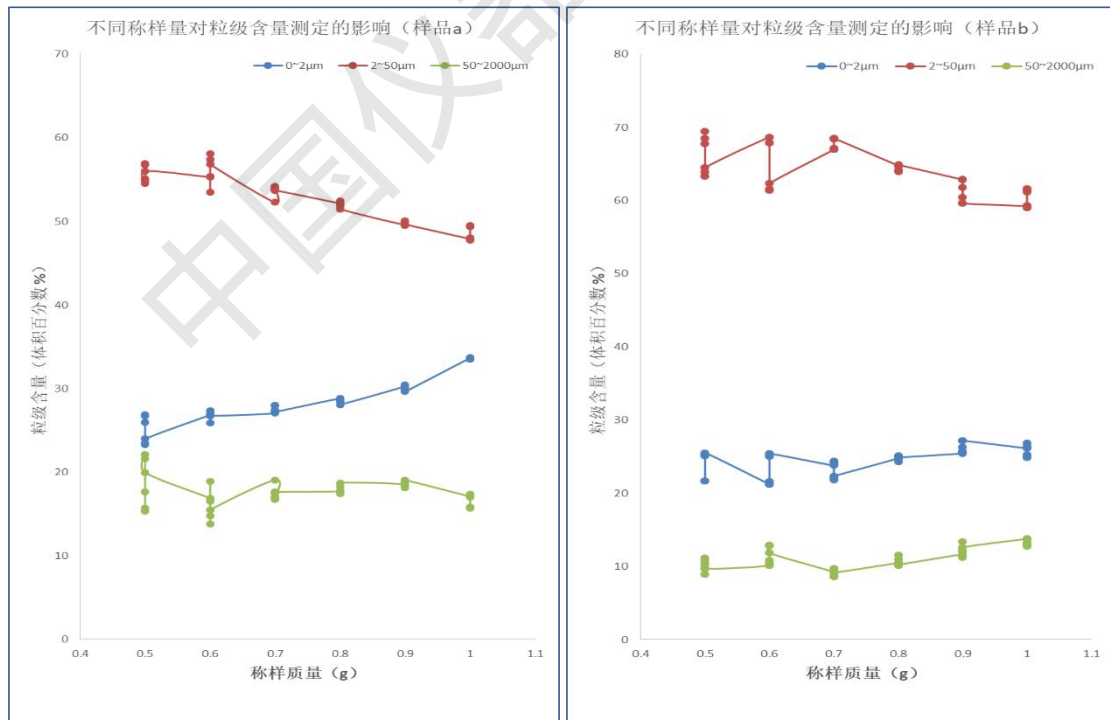


图 3 不同称样质量对粒度测定的影响

Figure 3. The effect on particle size determination result between different sample weight

2.2 进样转速

激光粒度仪测量过程中最常见的也是最不可忽视的问题是气泡。气泡会被视作颗粒计入结果，所以气泡的存在会影响结果的准确性。进样器转速是影响结果的重要因素，转速过大会产生影响结果的气泡，转速太小则无法将样品中的较大颗粒循环带入检测室而使得大颗粒检测不到。

表 3 不同循环转速对粒度测定的影响

Table 3. The effect on particle size determination result between different stirrer speed

样品 编号	转速 (rpm)	黏粒 (< 2 μm)		粉粒 (2-50 μm)		砂粒 (50-2000 μm)	
		含量 (%)		含量 (%)		含量 (%)	
		平均值 Mean	标准误 SE	平均值 Mean	标准误 SE	平均值 Mean	标准误 SE
a	1700	22.56	0.09	66.06	0.22	11.08	0.27
a	2300	22.51	0.08	62.39	0.24	14.51	0.27
a	3000	22.46	0.12	62.01	0.31	14.86	0.38
a	3500	23.47	0.05	60.49	0.13	16.03	0.18

同一样品在不同转速条件下测定结果有较大差异。在 1700 rpm 测定时，砂粒粒径含量明显低于其他转速下测定结果（表 3，图 4），可能原因在于进样转速太小，使得大颗粒沉积于烧杯底部而无法循环到检测舱室而导致部分大颗粒检测不到。在 3500 rpm 测定时，黏粒及砂粒粒级含量均较其他转速条件下有明显升高（表 3，图 4），分析原因可能是转速过大产生了不同大小的气泡，使得测定出的无论大颗粒还是小颗粒数量均有明显增加，而影响了黏粒和砂粒粒级含量的测定值。在 2300 rpm 和 3000 rpm 测定时，三种粒级含量检测结果基本一致，且数高度集中（表 3，图 4），且在 2300 rpm 测定时，结果数据具有更高的精确性（三种粒级含量均有最低的标准误差，表 3），故而选定 2300 rpm 为实验最佳进样转速。

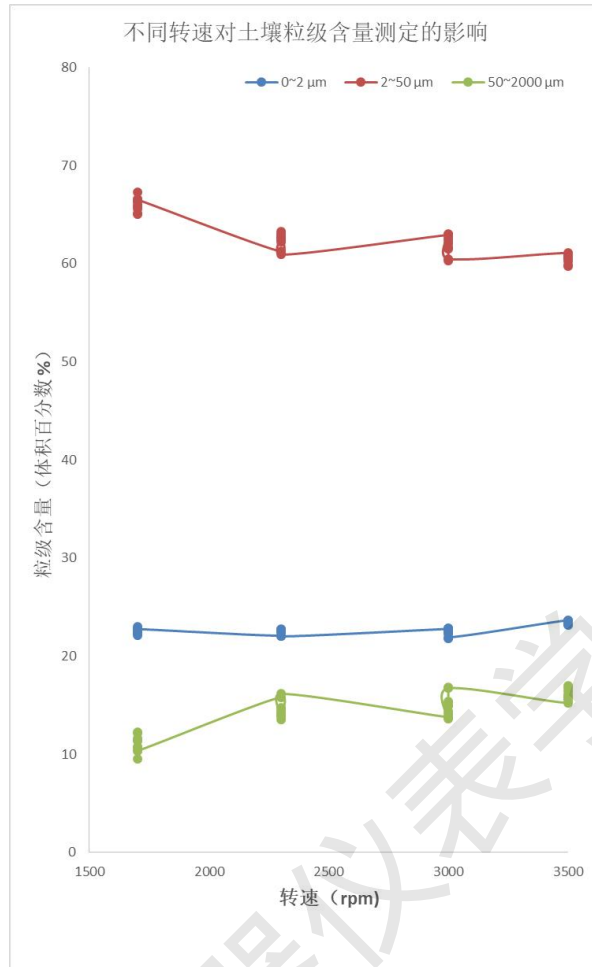


图 4 不同转速对粒度测定的影响

Figure 4. The effect on particle size determination result between different stirrer speed

2.3 超声分散强度

激光粒度仪测量过程中需进行消泡处理，避免由于产生气泡而影响测定结果。消除气泡的方法如下：首先用于盛放样品和分散剂的烧杯应清洗干净，这使气泡易爆开，然后在测量样品之前加超声波处理，超声波不仅更好的将样品分散了，还能驱除溶解的气体，当超声结束时，气泡将上升至存放样品和分散剂的烧杯的表面并破裂^[18]。超声能帮助样品更好分散，但超声强度太大或时间太长可能会使颗粒破碎，强度太小又达不到充分分散的效果，所以对于测定前超声处理的强度及时间的确定也必不可少。

同一样品在不同超声强度相同分散时间（25 s）处理下，测定结果存在一定差异（表 4）。砂粒粒级含量在 10~30 % 强度处理下，测量值随超声强度的增加而升高，当达到 40 % 及以上强度时，砂粒粒级含量骤然降低且呈递减趋势（表 4，图 5），原因可能在于不断增强的超声强度分散了团聚在一起的多个大颗粒，但当超声强度过大时，则又使得部分单个大颗粒破碎而引起测定结果出现偏差。

为满足既要使样品充分分散又要保证颗粒不被破坏的条件，分析判断土壤颗粒所能承受最大超声强度，选取强度 30 %，时间 25 s 作为土壤样品颗粒组成激光法测定的最优超

声方案。

表 4 不同超声强度对粒度测定的影响

Table 4. The effect on particle size determination result between different ultrasonic level

样品 编号	超声强度 (%)	黏粒 (< 2 μm)		粉粒 (2-50 μm)		砂粒 (50-2000 μm)	
		含量 (%)		含量 (%)		含量 (%)	
		平均值 Mean	标准误 SE	平均值 Mean	标准误 SE	平均值 Mean	标准误 SE
a	10	22.82	0.13	61.18	0.35	15.81	0.41
a	20	22.75	0.11	61.05	0.30	16.03	0.35
a	30	22.45	0.10	60.43	0.25	16.90	0.27
a	40	23.19	0.07	62.45	0.18	14.33	0.24
a	50	23.36	0.04	63.09	0.12	13.52	0.15

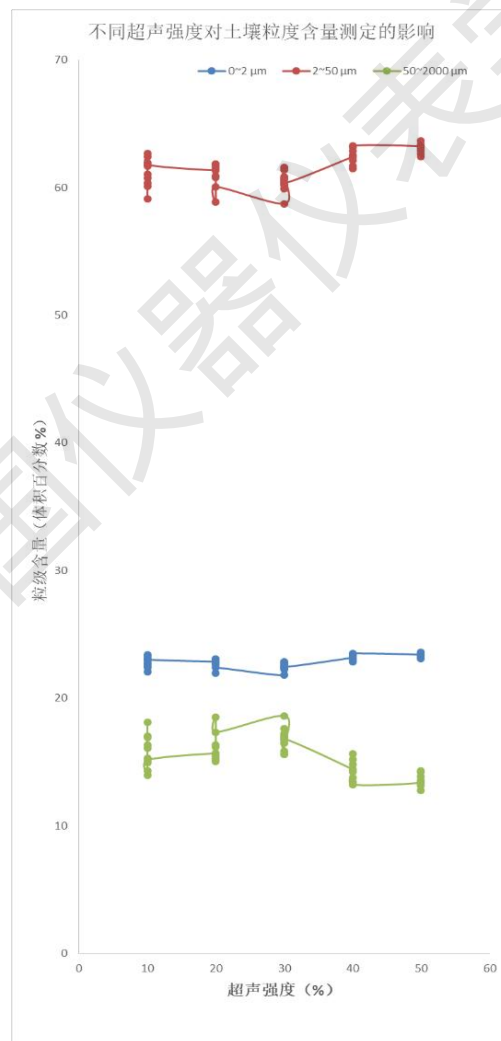


图 5 不同超声强度对粒度测定的影响

Figure 5. The effect on particle size determination result between different ultrasonic level

2.4 两种方法测定结果对比

传统沉降法（吸管法）测量得出粒级含量结果为质量百分比，激光衍射法（激光法）测量得出结果为体积百分比，数据存在较大差异（表 5）。

以激光衍射法测定的体积百分比为 X 轴，传统沉降法测定的质量百分比为 Y 轴，绘制同一样品两种方法测定结果散点图，分别绘制三个不同粒径含量数据分布情况（图 6、图 7、图 8），结果显示两种不同方法测定的数据结果成带状分布，可对二者进行线性拟合，拟合结果如下。

$$\text{黏粒} (< 2 \mu\text{m}) : y=0.8345x-13.656 (R^2=0.8685)$$

$$\text{粉粒} (2-50 \mu\text{m}) : y=1.1685x+18.856 (R^2=0.4214)$$

$$\text{砂粒} (50-2000 \mu\text{m}) : y=0.9213x+2.8074 (R^2=0.855)$$

上式中 y 为吸管法测定粒径的质量百分数，x 为激光法测定的体积百分数。

由以上结果可以看出两种方法测定的黏粒和砂粒之间存在较好的相关性，尽管粉粒含量结果相关性较差，但粉粒含量可以通过 100 %减去黏粒及砂粒含量计算得出，故而通过激光法测定出黏粒及砂粒粒级含量的体积百分数，可转换出样品黏粒、粉粒及砂粒粒级含量质量百分数数据，查阅国际制土壤质地三角图（图 9），可对土壤样品的质地类型进行分析判断（表 5）。

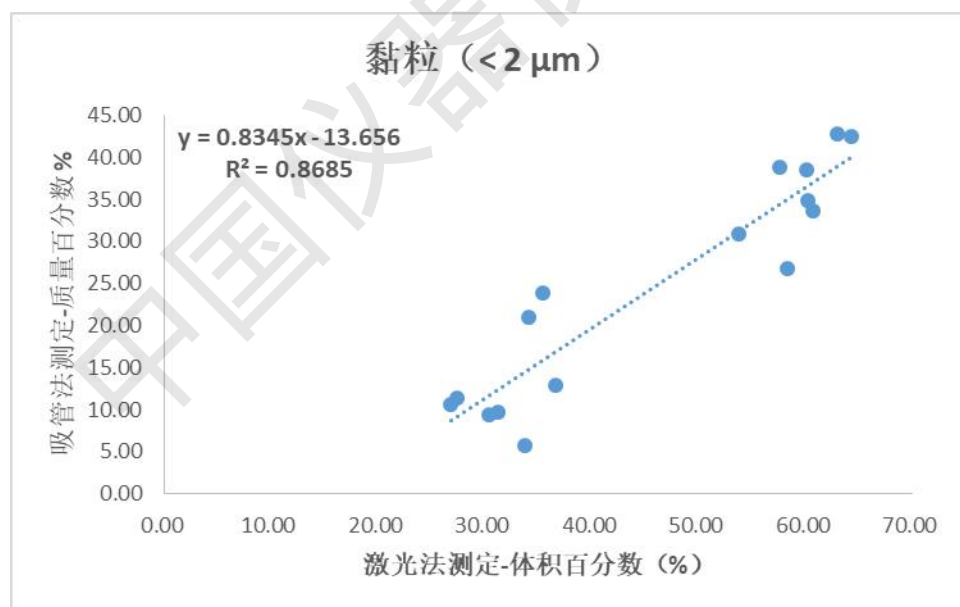


图 6 两种方法测定黏粒粒级含量线性回归方程及相关系数

Figure 6. The linear regression equation and correlation coefficient between two methods on clay content

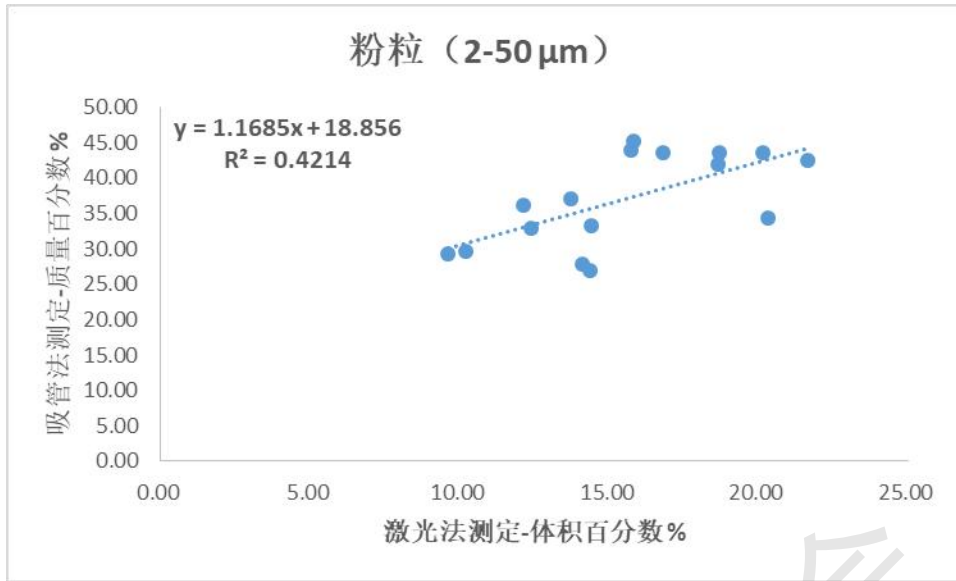


图 7 两种方法测定粉粒粒级含量线性回归方程及相关系数

Figure 7. The linear regression equation and correlation coefficient between two methods on silt content

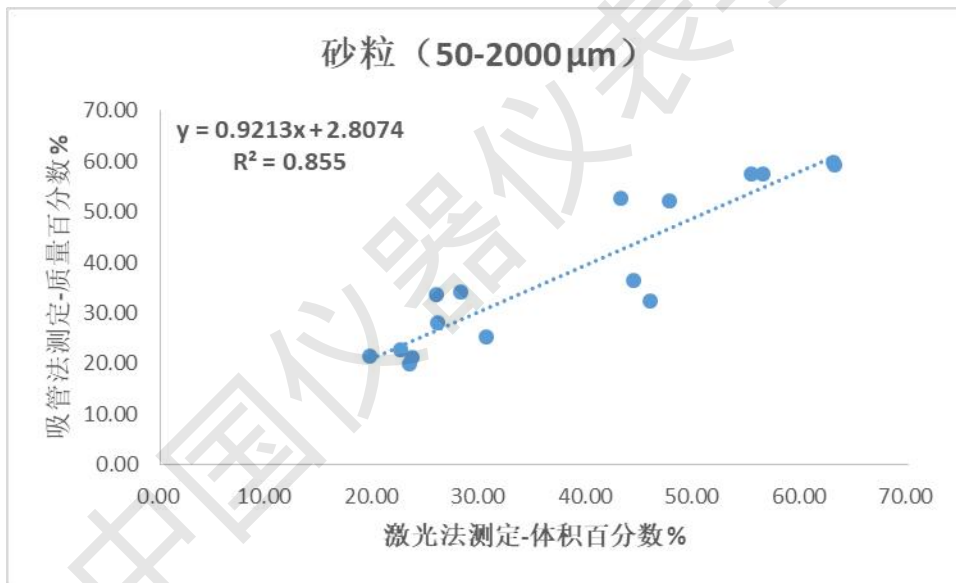


图 8 两种方法测定砂粒粒级含量线性回归方程及相关系数

Figure 8. The linear regression equation and correlation coefficient between two methods on sand content

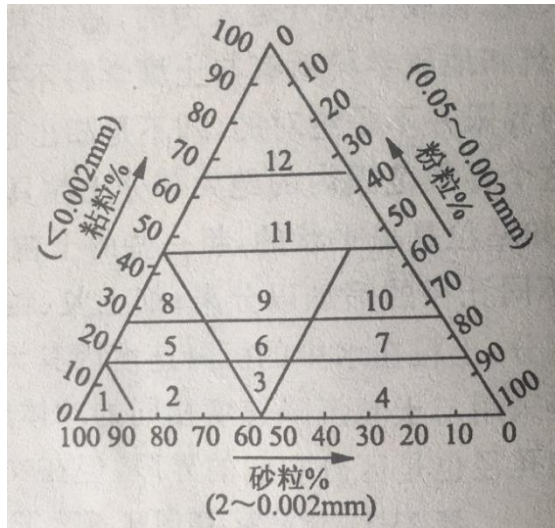


图9 国际制土壤质地三角图

Figure 9. International production of soil texture triangle

(1 砂土及壤砂土, 2 砂壤, 3 壤土, 4 粉壤, 5 砂质粘壤, 6 粘壤, 7 粉砂粘壤, 8 砂粘土, 9 壤粘土, 10 粉粘土, 11 粘土, 12 重粘土)

(1. Sand & Loamy Sand, 2. Sandy Loam, 3. Loam, 4. Silt Loam, 5. Sandy Clay Loam, 6. Clay Loam, 7. Silty Clay Loam, 8. Sand Clay 9. Loam Clay, 10. Silt Clay, 11. Clay, 12. Heavy Caly)

国际制土壤质地三角图判断土壤质地是依据不同粒级的质量百分数结果来划定的, 通过激光法测定的粒级含量结果为体积百分数, 若直接以此结果查阅国际制土壤质地三角图进行质地测算, 所得出的质地结果与利用吸管法实测的质量百分数查出的质地具有天壤之别, 几乎完全无法对应(表5)。长期以来传统方法已有比较成熟的土壤颗粒分类体系, 而且与土壤的其他理化性质之间已经建立了某些数据上的联系^[6], 而激光衍射法目前还没有完整的分级模型。若要对比两种方法的测定结果, 则需基于传统方法多年累积的经验将体积百分比转换为质量百分比, 才能更加准确可靠地判断土壤特性。

表5 两种方法测定土壤颗粒组成结果与质地分析情况

Table 5. Soil particle size distribution and texture result determined by two Methods (Pipette / Laser)

	黏粒 (< 2 μm)			粉粒 (2-50 μm)			砂粒 (50-2000 μm)			质地分析		
	激光法	吸管法	转换	激光法	吸管法	转换	激光法	吸管法	转换	激光法	吸管法	转换后
	含量 (%)	含量 (%)		含量 (%)	含量 (%)		含量 (%)	含量 (%)		测算	实测	测得
1-1	34.12	21.01	14.82	21.65	42.43	41.63	44.23	36.56	43.56	壤粘土	粘壤	壤土
1-2	35.45	23.89	15.93	18.67	43.67	39.00	45.88	32.44	45.08	壤粘土	粘壤	粘壤
2-1	60.68	33.68	36.98	16.82	43.66	39.48	22.50	22.66	23.54	粘土	壤粘土	壤粘土
2-1	60.23	34.93	36.61	20.15	43.66	42.51	19.62	21.41	20.88	粘土	壤粘土	壤粘土
3-1	62.94	42.84	38.87	13.71	37.08	36.81	23.35	20.08	24.32	粘土	壤粘土	壤粘土
3-2	64.27	42.43	39.98	12.15	36.25	35.49	23.58	21.32	24.53	粘土	壤粘土	壤粘土
4-1	33.76	5.81	14.52	18.62	41.91	38.80	47.62	52.28	46.68	壤粘土	壤土	壤土

4-2	36.65	12.86	16.93	20.30	34.44	40.60	43.05	52.70	42.47	壤粘土	壤土	粘壤
5-1	30.35	9.34	11.67	14.39	33.30	34.61	55.26	57.36	53.72	砂粘土	砂壤	壤土
5-2	31.16	9.75	12.35	12.40	32.89	32.85	56.44	57.36	54.81	砂粘土	砂壤	壤土
6-1	57.56	38.89	34.38	14.37	27.02	36.95	28.07	34.08	28.67	粘土	壤粘土	壤粘土
6-2	60.06	38.49	36.46	14.09	27.84	36.91	25.85	33.67	26.62	粘土	壤粘土	壤粘土
7-1	58.31	26.75	35.00	15.80	45.14	38.34	25.89	28.11	26.66	粘土	粉粘土	壤粘土
7-2	53.79	30.93	31.23	15.72	43.89	37.87	30.49	25.18	30.90	粘土	壤粘土	壤粘土
8-1	27.33	11.41	9.15	9.62	29.33	29.95	63.05	59.27	60.90	砂粘土	砂壤	砂壤
8-2	26.79	10.59	8.70	10.19	29.74	30.43	63.02	59.67	60.87	砂粘土	砂壤	砂壤

转换后测得的土壤质地基本与吸管法实测质地一致，其准确率高达 68.75%，仅有 1-1、4-2、5-1、5-2、7-1 这 5 个样品的测算结果存在出入（表 5）。

粘壤和壤土划分依据为砂粒含量 $<55\%$ ，且粉粒含量 $<45\%$ ，区别仅在与壤土黏粒含量要求 $<15\%$ 而粘壤土黏粒含量范围在 15~25%之间。样品 1-1 和 4-2 黏粒含量在转换后恰好越过了 15%这个分界线，而使得质地判断结果出现了偏离，但若只考虑按照三大质地划分，则二者结果均为壤土。

砂壤和壤土划分依据均要求黏粒含量 $<15\%$ ，区别在于砂壤砂粒含量要求 $>55\%$ 而壤土砂粒含量 $<55\%$ ，样品 5-1 及 5-2 砂粒含量在转换后由 57.36%降低至 53.72%及 54.81%，尽管激光法测定结果转换后数据已经与吸管法实测数据结果非常相近，但因为越过了 55%这条分界线，而使得质地判断出现了一些偏离，但若只考虑按照三大质地划分，则二者结果均为壤土。

粉粘土和壤粘土划分依据均要求黏粒含量范围在 25~45%之间，且砂粒含量 $<55\%$ ，区别在于粉粘土要求粉粒含量 $>45\%$ 而壤粘土粉粒含量则要求 $<45\%$ ，样品 7-1 粉粒含量在转换后由 45.14%降低至 38.34%，传统沉降法测定结果刚好稍稍越过 45%这个分界线而被划定为粉粘土，而使得转换后测算质地判断出现了一定偏离。但若只考虑按照三大质地划分，则二者结果均为粘土。

3 结论

激光衍射法与传统沉降法的原理不同，结果显示也不同。二者各有其优缺点，吸管法设备简易，便于操作，结果较为准确，但该方法太耗时间；激光衍射法节约样品，速度快，测量范围广，重复性好但操作设备昂贵。目前土壤颗粒组成质量百分比已有完善的分析体系，而体积百分比的数据模型与转换模型还待完善。研究者可根据设备条件、时间、样本量和土壤性质选择合理的测量方法。

总体来看，通过对大量不同性质的土壤样品进行传统沉降法及激光衍射法对比试验，摸索最佳称样质量、仪器测量参数，建立方法模型，以及线性拟合数据转换模型，使得激光法测定的粒级含量体积百分数数据可转换为质量百分数数据，参照国际制土壤质地三角

图可对土壤样品的质地特征进行较为准确的判断, 可实现激光法测定土壤样品颗粒组成实验的总体设计。

本次实验仅完成了哀牢山地区采集 8 个土壤样本的土壤质地分析, 仅涉及 5 种(壤土、粘壤、壤粘土、粉粘土、砂壤)质地类型的测定验证, 通过初步实验验证激光法测定土壤颗粒组成具有一定可行性, 但土壤的多样化决定了本次研究所探索的激光粒度仪测量土壤粒度的各项参数及建立的转换模型可能并不能适用于所有土壤, 若要得到更具普遍意义的模型, 则需通过加大样本量, 对包括 12 种质地类型在内的各种不同性质土壤样品进行比对测量, 从而得到更为精确的数据模型。

后续研究思路:

- (1) 加大各类代表性样品及样本量, 进一步研究更具有普遍意义的转换模型。
- (2) 分散剂类型选择研究: 氢氧化钠及六偏磷酸钠作为分散剂的优缺点及必要性, 是否可用超声分散完全替代加入分散剂来完成测定, 实现更加简便、安全且环保的实验操作。

参考文献:

- [1] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 中国农业科技出版社, 2000.
- [2] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[J]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 466 - 536.
- [3] 赵青秀, 李雅宁. 激光粒度分析仪及其应用刍议. 生命科学仪器[J], 2010, 8 (2) : 1-53.
- [4] 段世航, 崔若然, 江荣风, 等. 激光衍射法测定土壤粒径分布的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52 (2) : 7.
- [5] 朱瑜, 张卓栋, 刘畅, 等. 激光粒度仪与吸管法测定土壤机械组成的比较研究——以不同退化程度栗钙土为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25 (3) : 7.
- [6] 杨金玲, 张甘霖, 李德成等. 激光法与湿筛-吸管法测定土壤颗粒组成的转换及质地确定[J]. 土壤学报, 2009, 46 (5) : 772 - 780.
- [7] 吴焕焕, 吕家珑, 段英华等. 激光衍射法测定中国典型土壤颗粒分布的模型建立与验证[J]. 中国农业科学, 2013, 46 (20) : 4293 - 4300.
- [8] 王伟鹏, 刘建立, 张佳宝等. 基于激光衍射的土壤粒径测定法的评价与校正[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (22) : 163 - 169.
- [9] 李晓玲, 温美丽, 高晓飞. 吸管法与激光粒度仪法测定土壤机械组成的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2015 (3) : 57 - 59.
- [10] 王大安, 刘刚, 王翔鹰等. 用激光法和吸管法测定东北黑土区侵蚀泥沙颗粒组成的差异分析[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14 (1) : 114 - 122.

- [11] 张栋良, 张娜, 屈忠义. 基于激光法土壤质地测试分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2014, 35(3):115-118.
- [12] 吴焕焕. 激光衍射法测定土壤质地的方法及其在土壤结构研究中的应用[D]. 西北农林科技大学, 2013.
- [13] 杨艳芳, 李德成, 杨金玲, 等. 激光衍射法和吸管法分析黏性富铁土颗粒粒径分布的比较[J]. 土壤学报, 2008, 45(3):405-412.
- [14] 田岳明, 沙剑. 应用马尔文激光粒度仪分析泥沙数据处理模板[J]. 水资源研究, 2015(6):513-521.
- [15] Qiu W, Wei H U, Curtin D, et al. Soil particle size range correction for improved calibration relationship between the laser-diffraction method and sieve-pipette method – Science Direct[J]. Pedosphere, 2021, 31(1):134-144.
- [16] LY/T 1225-1999, 森林土壤颗粒组成(机械组成)的测定[S]. 中华人民共和国林业行业标准.
- [17] Mastersizer3000 User Manual (MAN0474-06-EN-00)
- [18] 屈利红, 陶海鸿, 刘伟莉等. 马尔文激光粒度仪分析质量检验[J]. 内蒙古水利, 2012(1):138-139.