

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.02.004

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. 土壤, 2020, 52(2): 247–253.

激光衍射法测定土壤粒径分布的研究进展^①

段世航, 崔若然, 江荣风, 范明生, 袁会敏*

(中国农业大学资源与环境学院/植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 北京 100094)

摘要: 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)、激光衍射法等。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、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。本文介绍了激光衍射法测定土壤粒径分布的基本原理和分析方法, 综述了该技术在测定土壤粒径分析方面的国内外研究进展, 重点分析了激光衍射法测定土壤粒径分布的影响因素, 并对激光衍射法测定土壤粒径分布的应用前景进行了展望。研究表明, 激光衍射法通过转换方程可以获得精确的结果。在保证足够大的样本量、土壤样本包含多种质地类型, 且完善的前处理条件下, 可以建立稳定的、适用于大范围预测的模型。激光衍射法测定土壤粒径分布虽然受到一些因素的影响, 例如前处理方法、仪器设置以及样品用量等, 但是激光粒度仪为粒度测定提供了高效快速的技术手段, 为精准农业和数字农业的发展提供了先进的技术支撑。

关键词: 激光衍射法; 土壤粒径分布; 土壤质地

中图分类号: S210.5010 **文献标志码:** A

Research Advance in Determining Soil Particle Size Distribution by Laser Diffraction Method

DUAN Shihang, CUI Ruoran, JIANG Rongfeng, FAN Mingsheng, YUAN Huimin*

(College of Resources and Environment, China Agricultural University/Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, Beijing 100094, China)

Abstract: Current methods in measuring soil particle size distribution (PSD) include sieving method, sedimentation method (including pipette method and densitometer method), laser diffraction (LD) method, and so on. In recent years, due to the advantages of simple operation, high efficiency, small amount of test samples and suitability for batch sample determination, LD method has been widely applied in analyzing soil PSD. This article introduced the basic principle and analysis method of soil PSD by LD method, and reviewed the research advance and influence factors of LD method. Researches indicate LD method can obtain more accurate results. A stable prediction model for large scale can be established on condition of enough sample size, many different soil texture types, and feasible pretreatment methods. Although some influence factors can influence the accuracy of LD method, such as pretreatment methods, instrument settings, amount of test sample and so on, LD method provides an efficient and quick technological means for soil PSD determination and advanced technical support for precise agriculture and digital agriculture.

Key words: Laser diffraction (LD) method; Soil particle size distribution; Soil texture

土壤粒径组成是土壤一个稳定的自然属性, 土壤颗粒大小、级配和粒组含量是土体工程分类的重要依据。土壤颗粒大小与土壤物理、化学以及生物性质密切相关, 所以土壤的粒径分析是地质、农业、环境等学科领域的重要研究内容^[1]。土壤粒径分布 (particle size distributions, 简称 PSD) 传统测定方法分为筛分法和沉降法, 后者又分为密度计法和吸管法, 被国际

土壤学界视为土壤粒径测定的标准方法。根据 GB/T50123—1999《土工试验标准》规定, 对于粒径大于 0.075 mm 且小于 60 mm 的粗土, 一般采用筛分法; 粒径小于 0.075 mm 的黏土采用沉降法^[2]。传统的试验方法所得的结果代表性较好、理论性较强, 不足之处在于操作繁琐、测试时间长。近年来, 基于光散射、衍射理论的激光衍射 (laser diffraction, 简称 LD)

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200403, 2017YFD0200201, 2016YFD0200401, 2016YFE0101100)资助。

* 通讯作者(hmyuan@cau.edu.cn)

作者简介: 段世航(1995—), 女, 辽宁营口人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤快速测定。E-mail: simone.duan@foxmail.com

技术已经广泛应用于土壤粒径的测定,激光粒度分析仪测定土壤 PSD 具有测量范围广、适用范围广、重现性好、准确度高、测量时间短、操作简单等优点^[3-4],为快速准确地测定大批量样本提供了手段。因此本文介绍了 LD 法测定土壤 PSD 的基本原理和分析方法,综述了该技术在测定土壤 PSD 方面的国内外研究进展,重点分析了 LD 法测定土壤 PSD 的影响因素,并对 LD 法测定土壤 PSD 的应用前景进行了展望。

1 激光粒度仪测量原理

应用激光粒度仪对土壤 PSD 进行测量时,光束穿过悬浮颗粒流发生衍射,产生的衍射光通过凸透镜成像在探测器上,便能够获取不同衍射角的散射光强度。同时,不发生衍射的光线,经凸透镜聚焦于探测器中心,不影响发生衍射的光线,因此颗粒流经过激

光束时产生一个稳定的衍射谱^[5]。激光粒度仪通过 Mie 模型和 Fraunhofer 模型两种光学模型来处理土壤 PSD 的原始数据。Mie 模型最早由 Gustav Mie 基于电磁散射理论创立, Fraunhofer 模型是 Mie 模型的一个特例^[6]。在 Mie 散射中的散射光强度由入射光波长、粒子径、粒子和介质的相对折射率来确定^[3-4,7-9]。其实光线照射到球形粒子上可产生 3 类光,第一类:通过粒子表面,进入粒子内部,经粒子内表面的反射光;第二类:通过粒子内部的折射光;第三类:在粒子表面的衍射光。但是这些现象与粒子大小无关,均可以作为散射光处理^[4]。颗粒的多少、粒径的大小决定了散射光各个特性参数的变化,通过测量光强、偏振度、衰减比等激光参数的空间分布来获得待测颗粒的信息^[10]。图 1 为激光粒度仪的经典光学结构图^[5]。

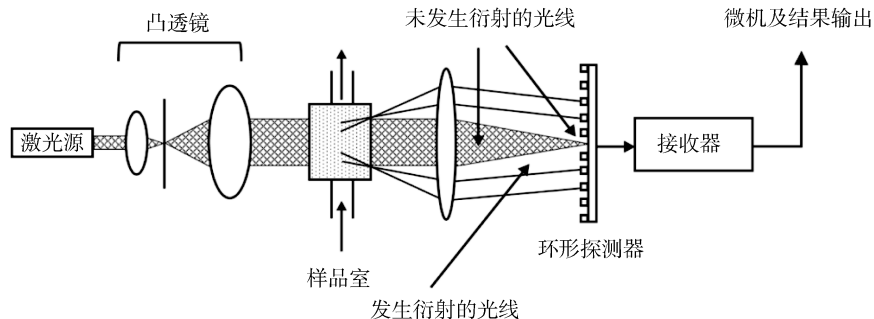


图 1 激光粒度仪经典光学结构图

Fig.1 Classic optical structure diagram of laser particle size analyzer

2 激光衍射法在土壤粒径分布分析中的应用

2.1 激光衍射法测定土壤质地的方法流程

目前对于 LD 法测定土壤 PSD 的研究有很多,大多数研究集中在该方法与传统方法之间的对比分析,通过建立两种方法之间的转换方程,运用 LD 法确认土壤的质地类型。根据前人经验,将 LD 法测定土壤质地的方法流程总结如下:通常取 0~20 cm 耕层土壤,风干或烘干后过 2 mm 筛备用,根据使用的仪器类型称取 0.1~5 g 土壤样品(一般来说,黏质土壤颗粒较小加样量适当减少,砂质土壤颗粒较大加样量适当增加),加入 H₂O₂ 除去有机质,过量的 H₂O₂ 加热除去,自然冷却至室温,根据样品 pH 加入不同种类分散剂,静置 2 h 使样品充分分散,电沙浴煮沸 1 h,设置好仪器参数后上机测定,即可获得土壤 PSD 信息。由于 LD 法测定的结果不够准确,只能判断出土壤质地的大致范围,因此需要用传统方法和 LD 法同时进行土壤 PSD 的测定,通过线性回归分析建立二者之间的转换方程,把 LD 的数据转换成质量分数,

再进行土壤质地的划分^[11-12]。

2.2 激光衍射法测定土壤 PSD 的国内外研究进展

经过多年的研究和发展,LD 技术已经成为一种快速测定土壤 PSD 的方法,显著提高了工作效率。国外学者 McCave 等^[13]早在 1986 年就将 LD 法应用到土壤 PSD 检测并将其与传统方法进行比较。许多研究表明,LD 法与传统方法测定结果有差异,存在某种粒级之间相关性较差的情况,并且与传统方法相比,LD 法测定土壤 PSD 时会出现低估黏粒、高估粉粒含量的现象^[14-18],这是由于 LD 法多采用超声对样品进行分散,导致黏粒部分片状颗粒增多^[19],会将原本的“黏粒”测定为“粉粒”。LD 法与传统方法测定结果产生差异的原因有很多。主要有以下两方面原因:①两种方法测定原理不同。沉降法遵循 Stokes 定律,据 Stokes 在 1851 年的研究结果指出,球体颗粒在静水中沉降,其沉降的速率与球体半径平方呈正比,而与介质的黏滞系数呈反比,因此测定的是土壤颗粒的当量粒径,反映的是颗粒的沉降速率^[1];并且沉降法所测的 PSD 是各级土粒质量占总质量的百分

比。在实际测定中,土壤颗粒的密度通常假设为 2.65 g/cm^3 ,但是不同的土壤密度不同,且不同粒径的土粒密度也不同。而 LD 法依据光学原理,反映颗粒的横截面特征,测定的 PSD 是各级土粒体积占总体积的百分比,与密度无关^[5,20];两种方法测定的是同一种颗粒的不同特征,因而造成了测量结果的不同。②土壤颗粒形状不同。通常砂粒和粉粒更接近于球体,而有些黏粒是扁平的圆盘状,这取决于黏粒中所含黏土矿物的类型^[21]。非球形颗粒倾向于以垂直于运动方向的最大横截面尺寸沉降,导致颗粒的等效直径减小,沉降时间增加,因此会“高估”扁平圆盘状的黏粒含量^[15,22]。此外,LD 法中的超声分散使黏粒部分单体片状颗粒增多^[19],非球形颗粒反射的横截面积

大于相同体积的球体,测量得到的颗粒直径大于同体积球体的当量直径^[23-24],这会导致颗粒的等效直径增加,低估黏粒的含量。

因此,如果直接利用 LD 法测定结果判断土壤质地,误差较大,但是 LD 法数据经过转换方程转换之后,与传统法实测数据之间的误差明显降低,对质地判断的准确度会大幅度提高^[25-27]。前人得出的方程式差异较大(表 1),普适性有限^[14,18,21,28],在保证传统测定方法一致时,转换方程的差异与仪器型号、所测样品的母质及土壤类型有密切的关系。目前,国内外实验室应用较多的激光粒度仪有 Mastersizer 2000、Microtrac S3500、Beckman Coulter LS13320、LA960 等。激光粒度仪均以激光衍射原理为理论基础进行制

表 1 不同研究的转换方程及模型精度
Table 1 Conversion equations and model accuracies in different literatures

作者	仪器类型	样本信息	样本数量	转换方程
吴焕焕等 ^[12]	LS 13320	全国:潮土、红壤、黑土等	20	砂粒: $y = 1.10x_{LD} + 24.16 (R^2=0.93)$ 粉粒: $y = 0.78x_{LD} - 32.75 (R^2=0.67)$ 黏粒: $y = 1.84x_{LD} - 84.51 (R^2=0.94)$
Konert 等 ^[15]	Fritsch A22	荷兰	158	黏粒: $y_{LD}=0.36x-0.23 (R^2=0.92)$
李慧茹等 ^[18]	Mastersizer 2000	东北地区:风沙土等	5	砂粒: $y=0.77x_{LD} + 19.18 (R^2=0.86)$ 粉粒: $y=0.48x_{LD} + 3.89 (R^2=0.72)$ 黏粒: $y=2.66x_{LD} + 1.10 (R^2=0.77)$
朱瑜等 ^[19]	Microtrac S3500	内蒙古:栗钙土	21	砂粒: $y = 1.05x_{LD} - 6.55 (R^2=0.94)$ 粉粒: $y = 0.69x_{LD} - 1.76 (R^2=0.94)$ 黏粒: $y = 3.63x_{LD} + 13.06 (R^2=0.54)$
杨金玲等 ^[28]	LS 13320	红壤、棕壤等	265	砂粒: $y=1.03x_{LD}-0.37 (R^2=0.93)$ 粉粒: $y=0.91x_{LD}-7.31 (R^2=0.87)$ 黏粒: $y=1.43x_{LD}+3.44 (R^2=0.84)$
Vdović 等 ^[29]	Sedi Graph 5100	克罗地亚	12	砂粒: $y = 1.00x_{LD} + 0.10 (R^2 = 0.98)$ 粉粒: $y = 1.11x_{LD} - 1.78 (R^2 = 0.91)$ 黏粒: $y = 0.91x_{LD} - 1.09 (R^2 = 0.72)$
	Counter TA II			砂粒: $y = 1.00x_{LD} - 0.10 (R^2 = 0.98)$ 粉粒: $y = 1.00x_{LD} - 3.40 (R^2 = 0.92)$
	Mastersizer 2000			砂粒: $y = 1.25x_{LD} - 17.25 (R^2 = 0.86)$ 粉粒: $y = 1.11x_{LD} - 16.33 (R^2 = 0.72)$ 黏粒: $y = 25.00x_{LD} - 2.50 (R^2 = 0.74)$
Yang 等 ^[30]	Mastersizer 2000	黄土高原	235	砂粒: $y = 0.81x_{LD} + 6.83 (R^2 = 0.79)$ 粉粒: $y = 0.68x_{LD} + 10.3 (R^2 = 0.65)$ 黏粒: $y = 5.76e^{-0.10x_{LD}} + 2.17 (R^2 = 0.67)$
李晓玲等 ^[31]	Microtrac S3500	广东:红壤	20	砂粒: $y = 1.00x_{LD} (R^2=0.99)$ 粉粒: $y = 1.28x_{LD} (R^2=0.95)$ 黏粒: $y = 0.22x_{LD} (R^2=0.91)$
		黑龙江:黑土	19	砂粒: $y = 1.10x_{LD} (R^2=0.97)$ 粉粒: $y = 1.77x_{LD} (R^2=0.91)$ 黏粒: $y = 0.16x_{LD} (R^2=0.90)$

造,但是由于制造工艺、仪器参数和精度等方面的差别,不同仪器对于同一样品的测定结果仍会有差异。杨金玲等^[28]与吴焕焕等^[12]均使用 Beckman Coulter LS 13320 激光粒度仪对红壤、黑土、水稻土等土壤样品进行测定,他们所建立的砂粒、粉粒、黏粒转换方程较为相似。而 Vdović 等^[29]使用 3 种型号仪器 (Sedi Graph 5100、Counter TA II、Mastersizer 2000) 对同一批土壤样品进行测定,所取得的转换方程明显不同。王君波等^[32]应用 Beckman Coulter LS 13320 和 Mastersizer 2000 两种激光粒度仪对同一样品进行 PSD 测定,研究表明 Mastersizer 2000 的测定结果重现性好,而 Beckman Coulter LS13320 对于细颗粒组分和粗颗粒组分的检测效果更好,说明不同型号的仪器对 PSD 的测定结果有影响。

3 激光衍射法测定土壤粒径分布的影响因素

LD 法测定土壤 PSD 影响因素主要有以下几方面:样品采集及用量、样品前处理过程、仪器参数设置等。

3.1 样品采集及用量

激光粒度仪测定土壤 PSD 所需样品量很少,因此要保证测定样品具有代表性要注意以下几点:采集土壤样品需要混合均匀,通常同一层位的土壤其性质也会有较大区别,所测数据是样品所在层位的平均状态,因此取得混合均匀的样品是关键^[7]。不能过度研磨,通常使用玻璃或陶瓷器皿将土样粉碎过 2 mm 筛,从而保证测试样品的原始信息不被过度破坏。此外,激光粒度仪测定土壤 PSD 得到的是各粒径体积分数的结果,此结果的获得与单次样品称样量无关,一般地,就同样重量的土壤而言,黏粒数量越多,砂粒数量越少,因此黏质土壤样品用量相对少,砂质土壤的样品用量相对多。同时有机质及碳酸盐含量高的土壤取样量应适当增多,有机质含量低的土壤取样量可适当减少,以保证达到仪器测定要求的最佳颗粒含量范围^[28]。

3.2 样品前处理过程

前处理的主要目的是使样品充分分散的同时,尽量保证样品原始信息不被破坏。前处理步骤通常包括:①消解:去除有机质,去除碳酸钙;②分散:化学分散,物理分散。

3.2.1 消解 土壤有机质将矿物颗粒聚集到土壤团聚体中,是确保土壤结构稳定性的重要物质^[33]。在小于 2 μm 的黏粒级分中,有机质以纳米级或微米级团聚体的形式紧密结合在矿物颗粒表面上,使其更

耐降解^[34-35]。因此,在前处理的样品制备过程中旨在破坏土壤团聚体,常用的处理方法是 H_2O_2 溶液配合加热法去除样品中的有机质^[36]。通常来说,有机质含量越高的土壤,对 LD 法测试结果影响更大^[12,31],以大颗粒有机质或胶结作用为有机质主要作用方式的土壤,去除有机质后,土壤细颗粒含量增加,黏粒含量测定结果随之增加。在有机质去除过程中,颗粒平均粒径呈稳定增加的趋势^[37],去除有机质后会改善 LD 法“低估黏粒含量”的情况,减小两种方法之间的差异。

消解过程中加入的试剂应适量,过量的 H_2O_2 溶液可加热除去,过量的 HCl 溶液必须彻底洗去。关于消解过程中是否使用 HCl 去除碳酸盐,研究者们根据所测样品的土壤类型做出了不同选择。对于胶结较弱的黄土类样品,各研究者的前处理方法基本相同:加入 H_2O_2 溶液和 HCl 溶液彻底去除有机质和碳酸盐,再加入六偏磷酸钠可以使样品充分分散,并得到可比性良好的测定结果^[20,38-39];何艳花等^[40]研究前处理过程对云南高原碳酸盐岩红土粒径测定结果的影响,发现加入 HCl 和 H_2O_2 的样品测试稳定性较好,但是 HCl 的加入会导致中值粒径平均值增大,前处理只加入 H_2O_2 不加入 HCl 的试验方案,样品测定结果最可能反映土壤样品的真实粒度特征;贺蕊等^[41]进行滇东高原红壤样品粒径测定时也发现经过 HCl 处理后平均粒径结果增大;Schulte 等^[42]对索霍多剖面的黄土-古土壤序列样品进行测定时发现,加入 HCl 引起的土壤粒径变化与碳酸钙含量之间无显著联系,而有机质含量、沉积物风化程度、团聚体以及有机矿物复合物的存在对 PSD 影响较大,省略 HCl 处理不会影响 PSD 结果,因此在黄土-古土壤序列的样品粒径分析中应避免使用 HCl。还有一些研究将 HCl 处理应用于整个样本集,未考虑土壤类型和碳酸盐来源^[12,15,43]。

3.2.2 分散 土壤 PSD 分析前处理的主要目的就是使样品充分分散的同时,尽量保证样品原始信息不被破坏。土壤样品分散通常分为物理分散和化学分散。

超声波振荡是最常用的物理分散方法。超声波分散是利用超声波的超声空化作用提供一定的能量将团聚的颗粒进行分散,可以有效地分散超细粉体悬浮液。超声波分散时间和强度的正确选择十分重要,若超声波强度太低,土壤颗粒仍呈团聚状态;而强度太高,则可能使土壤颗粒破碎。庞奖励等^[20]对汉江上游黄土进行测定时发现,经过 H_2O_2 、HCl 和六偏磷

酸钠处理的样品,超声波振荡作用对样品 PSD 的影响一般超过 50%。分散时间直接影响粒径的测试结果。实际测定中,超声分散时间应根据土壤样品的分散难易程度而确定。殷杰等^[44]在连云港软土颗粒的研究中,鉴于土壤样品含水量高、黏性大,将超声波分散时间设置在 10 ~ 20 min。但是李兰和石玉成^[39]及何艳花等^[40]分别对黄土粉体和云南高原碳酸盐岩红土进行测定时发现,超声分散时间为 2 min 就已取得良好的分散效果。综上所述,当土壤细颗粒含量多、黏性较大时,可以适当增加超声振荡时间,但是对于黏性较小的土壤,振荡时间过长会导致测定结果偏小,并且对土体的分散效果不再明显。

化学分散与物理分散相结合对样品的分散效果最佳。化学分散即在土壤样品中加入分散剂,起到“抗凝”作用。前处理过程中加入的分散剂种类及用量也是激光粒度仪测试技术研究的重要内容。分散剂种类的选择要考虑土壤的 pH,当样品溶液 pH>7.5 时,加入 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠溶液;当样品溶液 pH 为 6.5 ~ 7.5 时加入 0.5 mol/L 的草酸钠溶液;当样品溶液 pH<5.5 时,加入 0.5 mol/L 氢氧化钠溶液,静置 2h 或更长时间使样品充分分散^[45]。分散剂用量对颗粒分散也有影响,实际测定中要根据所测土壤类型及样品用量来确定分散剂用量,通常每 1 g 土壤加入 3 ~ 5 ml (浓度为 0.5 mol/L) 分散剂即可。何艳花等^[40]对云南高原碳酸盐岩红土进行测定时,单次土壤样品用量为 0.2 g,六偏磷酸钠用量超过 15 ml (浓度 0.05 mol/L) 以后,加入剂量的变化对测试结果影响不大。

3.3 仪器参数设置

3.3.1 光学参数设定 当采用 Mie 模型进行数据分析时,需要设置 3 个参数,分别为土壤悬浮液折射系数、土壤颗粒折射系数(soil particles' refractive index, SRI)和土壤颗粒吸收系数(soil particles' absorption index, SAI)。土壤悬浮液通常采用去离子水为溶剂,其折射系数为 1.33。SRI 代表光在真空中的传播速度与其在待测介质中传播速度的比值。SAI 反映的是土壤介质的透度与吸收度。SRI 与 SAI 值主要取决于土壤的成土母质^[46-48]。国内外学者对于光学参数的确定已经进行过相关研究,通常将 SRI 设置在 1.50 ~ 1.60, SAI 设置为 0.01^[43,45,49-50]。有研究发现,黏粒含量较高的土壤样品对 SRI 的变化更为敏感,因此对于黏粒含量较高的土壤,应将 SRI 值设定在 1.60 以上的范围^[45,49]。当 SAI 值大于 0.01 时,样本的 PSD 曲线的形变基本可以忽略不计,对激光粒

径仪测定结果的影响很小^[45,47]。

3.3.2 分散介质及泵速选择 激光粒度仪在分析样品时,分散介质的选择对样品的检测结果有一定的影响,而合适的分散介质可以使整个测试过程达到优化,操作简便,节省实验材料。常用的分散介质有去离子水、去离子水+甘油、乙醇、乙醇+甘油、乙醇+去离子水、丙酮等。粉体颗粒较细小时,可以选择乙醇、乙醇+去离子水、去离子水为分散介质;粉体颗粒较粗大时,为了降低颗粒的沉降速度,可以选择去离子水+甘油作为分散介质^[39,51]。土壤样品测定分散介质通常为去离子水。

测量过程中为确保大小颗粒都被检测到,选择合适的泵速是保证检测效果的关键,特别是使用湿法分散系统时,泵速选择尤为重要。泵速的大小将决定能否将不同粒径的颗粒输送到样品池,泵速太小,则大颗粒无法传送;泵速太大则会使样品槽中的液体出现涡流,而诱导气泡进入悬浮液中,使测量结果失真^[44]。

3.3.3 透过率确定 透过率为任一时刻光速中样品数量的度量,用百分比(%)表示,一定范围内的透过率才能保证测量的准确性。通常透过率高于 90% 时,样品中的颗粒数大大减少,检测不到足够的信号,测量精度下降,导致结果变异性大;透过率低时,可能出现多重散射使测定结果产生误差,平均粒径偏大,PSD 范围变宽。Marvel 和 Horiba 公司在传统反傅里叶结构的基础上,又增加了 LED 光束,从而拓宽了测量下限^[52]。LD 光源为红色光,LED 光源为蓝色光,土壤大颗粒散射角度小,对红色光较敏感,小颗粒散射角度大,对蓝光散射效果更好,因此当两种光源的透过率无法同时处于最佳范围内时,应优先保证蓝光透过率。在实际测定中,研究者根据仪器型号、土壤类型不同,所确定的透过率范围也有所不同^[1,12,38,44]。王保田等^[1]采用 BT-9300 激光粒度仪对 8 种不同质地(从黏质土到砂质土)的土样进行粒度分析试验,发现透过率范围为 65% ~ 70% 时,测试结果重复性最高。周素红和陈紫^[4]建议使用 LA920 测量土壤粒径时,透过率为 70% ~ 90% 时结果重复性较好;李兰和石玉成^[39]应用 WINNER 2000 激光粒度分析仪对黄土进行测定,认为黄土透过率宜保证在 96.5% ~ 97.5% 范围内。

4 激光衍射法测定土壤粒径分布存在的问题

激光粒度仪在测定过程中会产生误差,通过前人经验总结主要与以下几个因素有关:①激光粒度仪样

品用量少,被测样品的代表性很难保证,结果产生偏差是必然的^[7,53];②激光粒度仪量程的中段精度最高,靠近量程边缘的精度则较低^[54];③LD法测定的是土壤颗粒的横截面直径,但是土壤颗粒大多不是标准的球体;④超声分散后土样黏粒部分单体片状颗粒增多,增多的片状颗粒在激光粒度仪法下测定尺寸常偏大^[19];⑤LD法是在假定折射率一定的情况下测定的,而实际上折射率易受到颜色等因素的影响^[21]。

5 结语

本文介绍了 LD 法测定土壤 PSD 的基本原理和方法流程,综述了该方法的国内外研究进展及影响因素,总结了传统吸管法与 LD 法测定结果产生差异的原因,以及 LD 法自身存在的问题,可供读者根据实际情况调整仪器参数,选择样品前处理方法。囿于本文的选题范围,仅介绍了 LD 法在测定土壤 PSD 方面的应用,并未涉及激光粒度仪在粉末冶金、催化剂、制药、食品、建材等领域的应用^[55]。激光粒度仪的使用极大地提高了土壤粒径测试效率,但利用 LD 法测定土壤的颗粒组成、质地类型仅属于对土壤基本结构的探索,而 LD 法在土壤学的应用还有更加广阔的研究方向。未来研究中,可参考前人建议,针对不同土壤类型,分别建立转换方程^[28]。若要建立稳定的、适用于大范围预测的方程,需要保证土壤样本量足够大且包含尽可能多的质地类型。

参考文献:

- [1] 王保田,黄待望,董薇,等.激光粒度仪颗粒分析试验应用研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2015,37(6):34-37.
- [2] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123—1999[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [3] 赵青秀,李雅宁.激光粒度分析仪及其应用刍议[J].生命科学仪器,2010,8(1):51-53.
- [4] 周素红,陈紫.LA-920 激光粒度分析仪的应用[J].现代科学仪器,2003(5):49-51.
- [5] 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):449-455.
- [6] 王乃宁.颗粒粒径的光学测量技术及应用[M].北京:原子能出版社,2000:189.
- [7] 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.
- [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(自然科学版),2002,32(4):608-614.
- [9] 付海龙.LS13320 激光粒度分析仪的应用[J].中国高新技术企业,2007,83(12):100,108.
- [10] 隋修武,李瑶,胡秀兵,等.激光粒度分析仪的关键技术及研究进展[J].电子测量与仪器学报,2016,30(10):1449-1460.
- [11] 张栋良.河套灌区不同尺度土壤特性空间变异规律与 GSWAP 模型的区域土壤水盐动态模拟[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.
- [12] 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.
- [13] McCave I N, Bryant R S, Cook H F. Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for use with natural sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1986, 56(4): 561-564.
- [14] Eshel G, Levy G J, Mingelgrin U, et al. Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 736-743.
- [15] Konert M, Vandenberghe J. Comparison of laser grain-size analysis with pipette and sieve analysis: A solution for the underestimation of the clay fraction[J]. Sedimentology, 1997, 44: 523-535.
- [16] 刘涛,高晓飞.激光粒度仪与沉降—吸管法测定褐土颗粒组成的比较[J].水土保持研究,2012,19(1):16-18,22.
- [17] 刘雪梅,黄元仿.应用激光粒度仪分析土壤机械组成的实验研究[J].土壤通报,2005,36(4):579-582.
- [18] 李慧茹,刘博,王汝幸,等.土壤粒度组成分析方法对比[J].中国沙漠,2018,38(3):619-627.
- [19] 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):62-67,204.
- [20] 庞奖励,乔晶,黄春长,等.前处理过程对汉江上游谷地“古土壤”粒度测试结果的影响研究[J].地理科学,2013,33(6):748-754.
- [21] Pieri L, Bittelli M, Pisa P R. Laser diffraction, transmission electron microscopy and image analysis to evaluate a bimodal Gaussian model for particle size distribution in soils[J]. Geoderma, 2006, 135: 118-132.
- [22] Fisher P, Aumann C, Chia K, et al. Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis[J]. PLOS ONE, 2017, 12(5): 1-20.
- [23] Blott S J, Pye K. Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape[J]. Sedimentology, 2006, 53(3): 671-685.
- [24] Yang Y, Wang L, Wendroth O, et al. Is the Laser Diffraction Method Reliable for Soil Particle Size Distribution Analysis?[J]. The Soil Science Society of America, Inc., 2019, 83(2): 276-287.
- [25] 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.
- [26] 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.

- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Vdović N, Obhodas J, Pikelj K. Revisiting the particle-size distribution of soils: Comparison of different methods and sample pre-treatments[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 4461: 854–864.
- [30] Yang X, Zhang Q, Li X, et al. Determination of Soil Texture by Laser Diffraction Method[J]. *The Soil Science Society of America, Inc.*, 2015, 79(6): 1556–1566.
- [31] 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, 43(3): 57–59, 91.
- [32] 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, 5: 509–515.
- [33] Tisdall J M, Oades J M. Landmark Papers: No. 1. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63: 141–163.
- [34] Chenu C, Plante A F. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: Revisiting the concept of the ‘primary organo-mineral complex’[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57: 596–607.
- [35] Kaiser K, Berhe A A, Sommer M, et al. Application of ultrasound to disperse soil aggregates of high mechanical stability[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175: 521–526.
- [36] Vdović N, Pikelj K, Jurina I, et al. The implications of sample preparation on the particle size distribution of soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182(2): 277–285.
- [37] 赵启, 安萍, 于禄鹏, 等. 有机质去除程度对粒度测量结果的影响及其意义[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2016, 29(4): 39–45, 89.
- [38] 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[J]. 中国科学.D 辑: 地球科学, 2006, 36(7): 646–653.
- [39] 李兰, 石玉成. 激光粒度分析仪测量黄土粉体粒度的应用研究[J]. 甘肃科学学报, 2009, 21(4): 46–50.
- [40] 何艳花, 苏怀, 董铭, 等. 前处理方法对激光粒度仪测试碳酸盐岩红土粒度结果的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 148–152.
- [41] 贺蕊, 苏怀, 李岫峰, 等. 滇东高原红壤酸处理后粒度增粗现象及原因探究[J]. 土壤, 2018, 50(2): 428–433.
- [42] Schulte P, Lehmkuhl F, Steininger F, et al. Influence of HCl pretreatment and organo-mineral complexes on laser diffraction measurement of loess-paleosol-sequences[J]. *Catena*, 2016, 137: 392–405.
- [43] Qiang M, Chen F, Song L, et al. Late Quaternary Aeolian activity in Gonghe Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Quaternary Research*, 2013, 79: 403–412.
- [44] 殷杰, 邓永锋, 徐飞. 激光衍射粒度仪在连云港软土颗粒分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 170(3): 379–383.
- [45] 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.
- [46] Arriaga F J, Lowery B. Response to: Comments on “A fast method for determining soil particle size distribution using a laser instrument”[J]. *Soil Science*, 2007, 172(5): 416–418.
- [47] Arriaga F J, Lowery B. A fast method for determining soil particle size distribution using a laser instrument[J]. *Soil Science*, 2006, 171(9): 663–674.
- [48] 郑奎, 彭杨, 王小波. 不同方法测定土壤粒度分布的对比研究[J]. 科技创新与应用, 2017, 193(9): 18–19.
- [49] Muggier C C, Pape T, Buurman E. Laser grain-size determination in soil genetic studies 2. Clay content, clay formation, and aggregation in some Brazilian oxisols[J]. *Soil Science*, 1997, 162(31): 219–228.
- [50] Jonasz M. Nonsphericity of suspended marine particles and its influence on light scattering[J]. *American Society of Limnology and Oceanography*, 1987, 32(5): 1059–1065.
- [51] 于春梅, 韩丽辉, 梁德兰, 等. 激光粒度仪在分析样品分散方法的比较[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(3): 43–46.
- [52] 李向召, 谢康, 黄志凡, 等. 激光粒度仪的技术发展与展望[J]. 现代科学仪器, 2009, 126(4): 146–148.
- [53] 王成燕, 张丽君. 激光法与传统方法比较测定土壤粒度分布的研究[J]. 北方环境, 2010, 22(6): 57–62.
- [54] 李学林, 李福春, 陈国岩, 等. 用沉降法和激光法测定土壤粒度的对比研究[J]. 土壤, 2011, 43(1): 130–134.
- [55] 梁国标, 李新衡, 王燕民. 激光粒度测量的应用与前景[J]. 材料导报, 2006, 4: 90–93.