

激光衍射法与湿筛—吸管法测定中国 3 种 典型土壤粒径分布的差异分析

白雪^{1,2}, 杨扬^{1,2}, 黄婷婷^{1,2}, 吴欣桐^{1,2}, 何涛^{1,2}, 王丽娟³, 刘宝元²

(1.北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2.北京师范大学 地理科学学部 地理学院, 北京 100875; 3.北京市十三陵林场, 北京 102200)

摘要:为探究激光衍射法(Laser Diffraction Method, LDM)与湿筛—吸管法(Sieve-Pipette Method, SPM)测定不同土壤粒径分布的差异,以中国 3 种典型土壤——黑土、褐土和紫色土为研究对象,采用 LDM 和 SPM 分别测定其 250~2 000 μm , 100~250 μm , 53~100 μm , 20~53 μm , 10~20 μm , 5~10 μm , 2~5 μm 和 <2 μm 粒级的百分比含量,并对 SPM 所得各粒级土壤悬液进行了 LDM 测定。结果表明:LDM 相比 SPM 显著高估了 3 种土壤 10~20 μm , 5~10 μm , 2~5 μm 粒级含量,低估了 <2 μm 粒级含量,且二者的绝对差异随粒级减小而增大;两种方法在 >20 μm 各粒级的差异因土壤类型而异。LDM 在 SPM 所得 250~2 000 μm , 100~250 μm 悬液中仅分别检出 34.6%~70.1% 和 58.1%~70.6% 的对应粒级颗粒。在 SPM 所得 <100 μm 各粒级悬液中, LDM 检出的对应粒级占比介于 52.7%~98.4%;偏大颗粒主要分布在对应悬液的相邻粒级,且占比随悬液粒级减小呈增大趋势。LDM 与 SPM 在土壤粒径分布测定方面的差异主要源自土壤颗粒尤其是细颗粒的不规则形状,二者之间的具体差异因土壤类型和粒级而异。

关键词:土壤粒径分布; 激光衍射法; 湿筛—吸管法; 中国典型土壤

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0084-07

Comparison of Particle Size Distributions Measured by Laser Diffraction Method and Sieve-Pipette Method of Three Typical Soils in China

BAI Xue^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, HUANG Tingting^{1,2}, WU Xintong^{1,2},

HE Tao^{1,2}, WANG Lijuan³, LIU Baoyuan²

(1.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.School of Geography, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3.Beijing Ming Tombs Forest Farm, Beijing 102200, China)

Abstract: To investigate the differences of soil particle size distributions (PSD) measured by laser diffraction method (LDM) and the sieve-pipette method (SPM), eight size fractions of 250~2000 μm , 100~250 μm , 53~100 μm , 20~53 μm , 10~20 μm , 5~10 μm , 2~5 μm and <2 μm in three typical soils in China, i.e., black, cinnamon and purple soils were analyzed using LDM and SPM, and the particle size distributions were systematically compared. The results showed that in contrast to SPM, LDM consistently overestimated the fractions of 10~20 μm , 5~10 μm and 2~5 μm and underestimated the clay fractions <2 μm . Although the magnitude of either overestimation or underestimation varied among soil types, the absolute differences of particle fractions measured by LDM and SPM generally increased, as the particle size decreased. For the size fractions >20 μm , by comparison, the proportions determined by LDM could be higher or lower than, or statistically similar with those by SPM, depending on soil types. In the sieved particles of 250~2 000 μm and 100~250 μm obtained by SPM, LDM detected 34.6%~70.1% and 58.1%~70.6% of the corresponding size fractions, respectively, whereas, for those suspensions of the particles <100 μm obtained by SPM, LDM

收稿日期:2020-09-10

修回日期:2020-09-25

资助项目:国家自然科学基金(41601277, 41730748)

第一作者:白雪(1996—),女,陕西延安人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:baixue@mail.bnu.edu.cn

通信作者:杨扬(1987—),女,福建将乐人,博士,讲师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:yang.yang@bnu.edu.cn

detected 52.7%~98.4% of the corresponding size fractions. The larger particles determined by LDM mostly fell in their neighboring size fractions, and the corresponding percentages exhibited increasing trends as the particle size decreased. The disparate soil PSDs measured by LDM and SPM result from the non-spherical shapes of the soil particles, especially the fine ones, and the specific difference depends on variation among soil types and size fractions.

Keywords: particle size distribution; laser diffraction method; sieve-pipette method; Chinese typical soils

湿筛—吸管法(Sieve-Pipette Method, SPM)是土壤粒径分布(Particle Size Distribution, PSD)测定的传统方法。其步骤是先利用湿筛分离粗颗粒(如砂粒);再根据 Stokes 公式得到的不同粒级细颗粒(如粉粒和黏粒)的沉降时间,采用吸管依次吸取,烘干称重后计算各粒级颗粒的质量百分比^[1]。该方法原理简单、成本低廉、操作方便,但步骤繁琐且耗时较长。随着科技的发展,新兴的土壤 PSD 测定方法层出不穷,如 X 射线衍射法、电子显微镜法和激光衍射法(Laser Diffraction Method, LDM),其中以 LDM 的应用最为广泛。LDM 基于 Full Mie 理论或 Fraunhofer 衍射模型,利用测得的颗粒平均横截面积计算等效圆直径,进而得到不同粒级颗粒的体积百分比^[2]。该方法测定效率高,可得到土壤粒径的连续分布曲线,优势明显。

LDM 与 SPM 的测定原理存在本质差异,所测土壤 PSD 结果也不尽相同。总体而言,LDM 较 SPM 高估了土壤粉粒含量,低估了黏粒含量;在砂粒含量方面则互有高低^[3-4]。土壤颗粒的不规则形状是造成 LDM 与 SPM 所测 PSD 结果差异的主要原因^[3,5]。随着粒级的减小,土壤颗粒偏离球形的程度往往越来越高,LDM 与 SPM 的差异也相应增大^[6]。Taubner 等^[7]对比了 LDM 与 SPM 所测土壤 6.3~20, 2~6.3 和 <2 μm 粒级的颗粒含量,发现二者之间的差异随粒级减小逐渐增大。Buurman 等^[8]分析了不同沉积物样品 32~50 μm , 16~32 μm , 8~16 μm , 4~8 μm , 2~4 μm 粒级含量,发现 LDM 相比 SPM 高估了海洋沉积物 2~50 μm 范围内各粒级含量,且高估程度随粒级减小而增大;但对于黄土沉积物,LDM 仅高估了 4~8 μm , 2~4 μm 粒级含量,在 16~32 μm 与 8~16 μm 粒级与 SPM 无显著差异。可见,在砂粒、粉粒和黏粒基础上进一步划分土壤粒级时,LDM 与 SPM 之间的差异随样品类型而异,目前尚未取得一致结论。

土壤 PSD 是土壤最基本的理化性质之一,可直接影响土壤抗蚀性能。因此,目前广泛应用的通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)和水蚀预报

模型(Water Erosion Prediction Project, WEPP)都将土壤 PSD 作为估算土壤可蚀性的重要参数^[9-10]。LDM 与 SPM 测得的土壤 PSD 不同,土壤侵蚀模型模拟结果也必将有所差异。因此,有必要针对不同土壤,对 LDM 与 SPM 所测不同粒级含量进行系统的对比分析,厘清二者之间的差异。本研究以中国水蚀区的 3 种典型土壤——黑土、褐土和紫色土为研究对象,分别采用 LDM 和 SPM 测定 250~2 000 μm , 100~250 μm , 53~100 μm , 20~53 μm , 10~20 μm , 5~10 μm , 2~5 μm 和 <2 μm 共 8 个粒级的颗粒含量并分析两种方法之间的差异;在此基础上,利用 LDM 测量 SPM 所得不同粒级土壤悬液的 PSD,探讨 LDM 与 SPM 所测 PSD 差异的来源,以期土壤侵蚀模拟和预报提供参数支持,为区域水土流失评价和水土保持规划提供参考。

1 研究区概况

本研究使用的 3 种土壤分别采自黑龙江省嫩江市(48°57'N, 125°12'E)、北京市密云区(40°13'N, 116°39'E)和四川省屏山县(28°37'N, 104°11'E)。其中,嫩江市属我国水土保持区划一级区的东北黑土区^[11],区内土壤肥沃、有机碳含量高,但降雨集中且强度大、地形起伏且坡面长,再加上长期不合理的耕作、水土保持措施的缺乏,部分地区侵蚀强烈,发育了大量侵蚀沟。北京市密云区属北方土石山区,该区降雨集中、多暴雨,地面坡度大,土层薄且粉砂粒含量多、黏粒少,土壤抗侵蚀能力较弱,水力侵蚀广泛分布。四川省屏山县属西南紫色土区,雨量充沛且多发生在夏季,土壤类型为紫色页岩风化而成的紫色土,土壤结构较差,有机质含量低,再加上人口密度大,山坡垦殖率高,该区已成为我国水土流失最严重的区域之一^[12]。

2 材料与方法

2.1 土壤样品采集

土壤样品共 31 个,包括黑土 10 个、褐土 11 个、紫色土 10 个。其中,黑土样品于 2018 年 7 月采自黑龙江省嫩江市鹤北小流域的典型土壤剖面,每个土壤

剖面深 100~200 cm 不等,划分为 4~5 个发生层,共采集代表性样品 52 个;褐土于 2016 年 8 月采自北京市密云区的一块典型耕地,在耕地内选取一条长 125 m 的样带,以 1~5 m 的水平间距设置采样点,在每个样点每隔 10 cm 采集分层土壤样品直至 100 cm 深,采集土样共计 277 个;紫色土样品则是 2018 年 7 月在四川省宜宾市屏山县采集的表层土壤(0~20 cm),涉及草地、耕地、林地和园地 4 种土地利用类型,样品共计 50 个。根据 SPM 所测黏粒含量对 3 种土壤样品分别进行排序,然后等间距选取 10~11 个代表性样品进行试验分析和对比。

2.2 土壤样品预处理

所有土壤样品风干后,过 2 mm 筛去除草根、枯落物和砾石。分别利用盐酸和双氧水去除土样中的碳酸钙和有机质。分散剂因土样 pH 值而异,呈酸性的黑土使用氢氧化钠作为分散剂,呈碱性的褐土和紫色土则使用六偏磷酸钠作为分散剂^[1]。

2.3 湿筛一吸管法(SPM)

称取 20 g 土样,将充分分散后的悬液依次通过 250,100 μm 筛,获得 250~2 000,100~250 μm 粒径的土壤悬液,烘干称重后得到对应粒级的质量百分比。剩余悬液转入 1 L 的量筒中,根据 Stokes 定律计算的沉降时间将 <53 μm , <20 μm , <10 μm , <5 μm 和 <2 μm 粒级的土壤悬液吸取至烧杯中,烘干称重后计算得到 20~53 μm , 10~20 μm , 5~10 μm , 2~5 μm 与 <2 μm 的土壤颗粒含量。53~100 μm 的颗粒占比则由 100%减去其余粒级含量获得。随机抽取 80%的样品进行重复试验,取平均值作为最终 PSD 结果。

2.4 激光衍射法(LDM)

称取 3 g 土样,经充分分散后直接采用 Malvern Mastersizer 2000 进行测定。该仪器基于 Full Mie 理论,粒径测量范围是 0.01~2 000 μm 。在测定过程中,颗粒折射系数和吸收系数分别设为 1.52,0.1^[13]。其中,褐土样品的测定步骤略有不同:分散土样依次通过 250,100 μm 筛,烘干称重得到对应质量百分比;剩余悬液则利用 LDM 进行 PSD 测定,颗粒折射系数与吸收系数保持不变。所有样品均重复测定 3 次后取平均值。

2.5 激光衍射法测定不同粒级土壤悬液的粒径分布

重复 2.3 中 SPM 的步骤,得到 250~2 000 μm , 100~250 μm , <100 μm , <53 μm , <20 μm , <10 μm , <5 μm 和 <2 μm 粒级的土壤悬液,采用 LDM 分别进行测定,颗粒折射系数和吸收系数与之前一致,分别为

1.52,0.1。每个样品重复测定 3 次后取平均值。

2.6 数据分析

所有统计分析如描述统计、配对样本 t 检验、单因素方差分析和 Pearson 相关关系分析均采用 IBM SPSS Statistics 20 进行。绘图则采用 Origin 2019b 完成。

3 结果与分析

3.1 湿筛一吸管法与激光衍射法所测土壤粒径分布对比

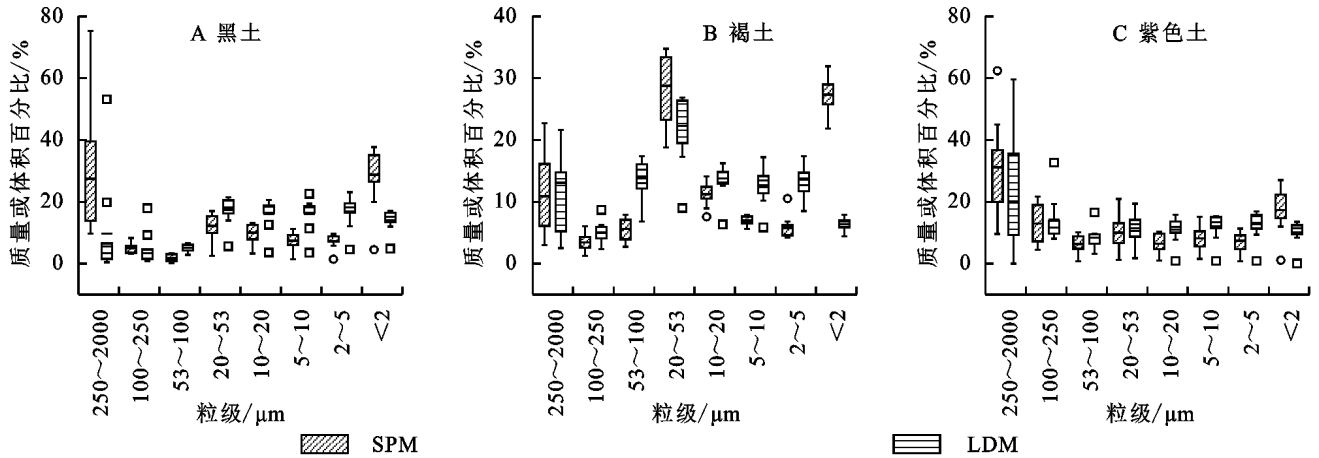
图 1 对比了 SPM 和 LDM 测得的黑土、褐土与紫色土 PSD。与湿筛结果相比,LDM 显著低估了黑土和紫色土 250~2 000 μm 粒级的颗粒含量($p < 0.01$),平均差值分别为 -17.7%, -11.0%(图 1A, C)。但对于两种土壤的 100~250 μm 粒级,LDM 与湿筛法并无显著差异。利用 LDM 分析褐土样品时,先利用湿筛获得 250~2 000,100~250 μm 粒级颗粒并对其百分比含量进行计算。然而,利用激光粒度仪测定余下土壤悬液时仍发现了上述粒级颗粒的存在,因此根据 LDM 所得体积百分比结果对上述粒级含量进行校正。结果表明,LDM 与湿筛法所得 250~2 000 μm 颗粒含量无显著差异;但前者相比后者显著高估了 100~250 μm 颗粒含量($p < 0.01$),对应平均差值为 1.5%。可见,对于不同土壤,传统湿筛法与 LDM 在 >100 μm 的 2 个粒级可能得到完全不同的结果。冯腾等^[14]发现 LDM 相比湿筛法低估了喀斯特地区土壤 250~2 000 μm 颗粒含量;Yang 等^[4]则发现 LDM 高估了黄土 250~2 000 μm 颗粒含量。

对于 53~100 μm , 20~53 μm 粒级,LDM 较 SPM 显著高估了黑土这 2 个粒级的百分比含量($p < 0.01$),平均差值分别为 3.4%, 5.2%;显著高估了褐土 53~100 μm 粒级含量,低估了 20~53 μm 含量($p < 0.01$),平均差值分别为 8.2%, -6.4%;但 LDM 与 SPM 所测紫色土结果之间并无显著差异。对于 <20 μm 的 4 个粒级,除褐土 10~20 μm 粒级外,LDM 与 SPM 相比显著高估了 3 种土壤 2~20 μm 各粒级含量,低估了 <2 μm 粒级含量。并且,除紫色土 5~10 μm 粒级在 0.05 的置信水平显著外,其他粒级均在 0.01 水平显著。此外,LDM 与 SPM 间的绝对差异随粒级减小总体呈增大趋势(图 1)。

将上述 8 个粒级根据美国农业部制土壤粒径分级标准^[15]划分为砂粒(53~2 000 μm)、粉粒(2~53 μm)和黏粒(<2 μm)。根据配对样本 t 检验,LDM 相比 SPM 显著高估了黑土、褐土和紫色土的粉粒含

量($p<0.01$),平均差值分别为 29.4%,9.1%,15.0%;低估了 3 种土壤的黏粒含量($p<0.01$),平均差值分别为-14.6%,-21.0%,-7.3%(表 1)。这与大多数学者的研究结果一致^[4,16],即 LDM 相比 SPM 均表现出对粉粒含量的高估和对黏粒含量的低估。然而,在砂粒含量方面,二者的对比结果因土壤类型而异。与 SPM 相比,LDM 显著低估了黑土的砂粒含量,高

估了褐土的砂粒含量($p<0.01$);但两种方法得到的紫色土砂粒含量之间并无显著差异。刘雪梅等^[17]同样发现 LDM 和 SPM 在砂粒含量方面无显著差异。杨金玲等^[18]则发现 LDM 相比 SPM 可能高估也可能低估砂粒含量。LDM 与 SPM 的对比结果因土壤类型、粒径范围而异,有必要针对不同粒级,深入探究其具体差异及可能来源。



注:图中散点分别为 SPM 与 LDM 所测颗粒含量的异常值。

图 1 湿筛—吸管法和激光衍射法所测 3 种典型土壤的粒径分布对比

表 1 湿筛—吸管法与激光衍射法测定 3 种典型土壤砂粒、粉粒和黏粒含量的平均差值和标准差 %

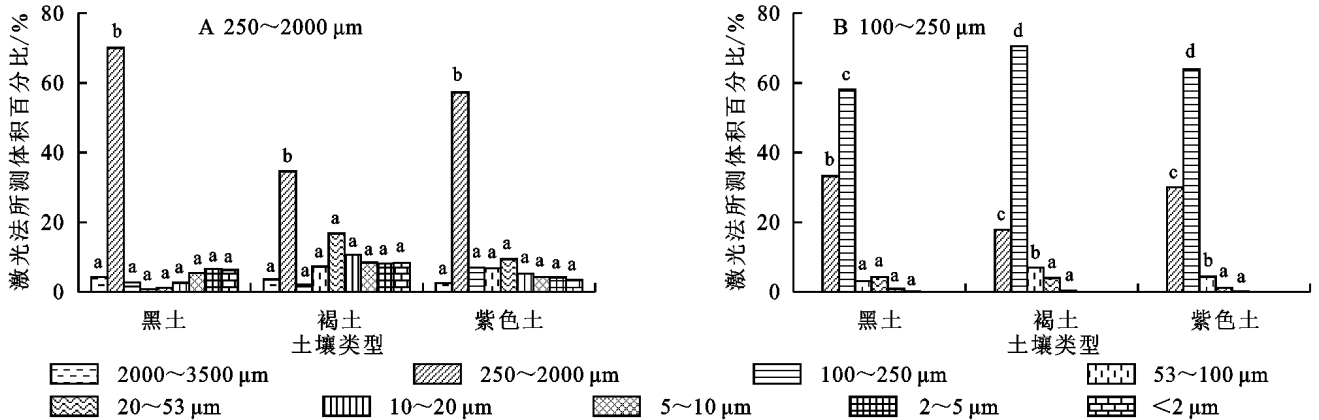
土壤类型	砂粒	粉粒	黏粒
黑土	-14.8±9.7*	29.4±10.4	-14.6±7.0
褐土	11.9±7.5*	9.1±6.6	-21.0±2.3
紫色土	-7.8±13.3*	15.0±11.5	-7.3±4.3

注: * 表示差异在 0.05 的置信水平不显著。

3.2 湿筛—吸管法所得>100 μm 土壤颗粒的激光衍射粒径分布

采用 LDM 测量 SPM 所得 250~2 000,100~250 μm 粒级悬液 PSD,各土壤类型的平均结果见图 2。在黑土、褐土和紫色土的 250~2 000 μm 粒级悬

液中,LDM 测得的 250~2 000 μm 颗粒平均占比分别为 70.1%,34.6%,57.3%。除检出 2.5%~4.3%直径>2 000 μm 的颗粒外,其余颗粒均分布在<250 μm 的各个粒级中(图 2A)。其中,黑土主要集中在<10 μm 的 3 个粒级,占比总和为 18.4%;褐土则多分布在<100 μm 的各粒级,以 20~53 μm 粒级含量最高,对应占比 16.8%;紫色土占比较多的是 20~250 μm 范围内的 3 个粒级,各粒级占比介于 6.8%~9.4%。在 3 种土壤 100~250 μm 悬液中,LDM 测得的 100~250 μm 颗粒平均占比分别为 58.1%,70.6%,64.0%(图 2B)。其余颗粒主要分布在大于该粒级的 250~2 000 μm,平均占比分别为 33.2%,17.8%,30.1%。

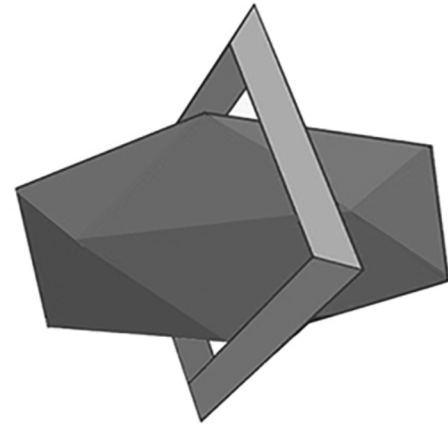


注:不同字母表示粒级含量差异显著($p<0.05$),下同。

图 2 激光衍射法所测 3 种典型土壤 250~2 000,100~250 μm 粒级悬液的平均粒径分布

Konert 等^[6]利用 LDM 测量 SPM 筛分所得天然土壤悬液时也得到了类似的结果,即 LDM 检出了粒径大于或小于对应筛分粒级的颗粒。然而,当研究对象为规则球形的玻璃珠时,LDM 得到的结果与筛分粒径基本一致。因此,造成 LDM 和 SPM 结果差异的主要原因在于土壤颗粒的不规则形状。当体积相等时,不规则颗粒的平均横截面积较球体大。LDM

A 等效直径大于筛孔的颗粒穿过筛网



B 等效直径小于筛孔的颗粒被筛截留

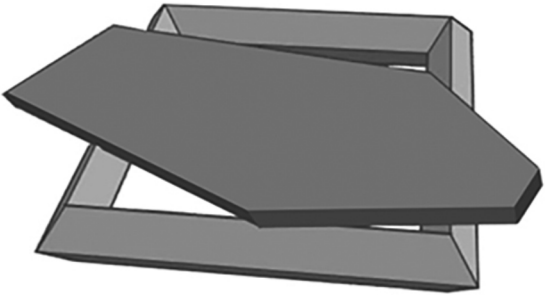


图 3 土壤颗粒不规则形状造成的 2 种湿筛误差

3.3 湿筛—吸管法所得<100 μm 土壤颗粒的激光衍射粒径分布

对吸管法吸取的<100 μm 各级土壤悬液进行 LDM 分析发现,随着土壤悬液粒级的减小,LDM 所得对应粒级的百分比含量也逐渐降低(表 2)。无论黑土、褐土还是紫色土,LDM 在<100 μm 土壤悬液中检出的<100 μm 土壤颗粒均占 96% 以上;而在<2 μm 悬液中,LDM 测得的<2 μm 颗粒皆不到 70%。也就是说,土壤粒径越小,LDM 与 SPM 所测结果的差异越大,这与刘雪梅^[17]、Sochan^[20]等的研究结果一致。

表 2 激光衍射法所测不同粒级土壤悬液中

对应粒级颗粒的百分比

%

土壤类型	<100 μm	<53 μm	<20 μm	<10 μm	<5 μm	<2 μm
黑土	96.1	94.2	92.1	79.1	75.5	66.1
褐土	98.4	87.8	85.9	79.7	73.3	69.6
紫色土	96.7	94.8	89.4	81.7	68.2	52.7

图 4 展示了 LDM 所测黑土、褐土和紫色土<100 μm 各粒级悬液 PSD 的平均结果。对于黑土和紫色土<100 μm 粒级悬液,LDM 测出其颗粒均主要集中在<53 μm 的 5 个粒级,各粒级占比介于 15.5%~20.7%。此外,还有少量颗粒分布于 100~250,250~2 000 μm 粒级,黑土与紫色土对应占比总和分别为 3.9%,3.3%。褐土<100 μm 粒级悬液的颗粒则以 20~53 μm 粒级占比最高,为 27.8%;<100 μm 其余各粒级占比近似,介于 12.9%~15.9%;另有 1.6%的

基于土壤颗粒的平均横截面积计算等效圆直径,其数值相应大于同体积球体的直径^[2]。湿筛法本身也因土壤颗粒形状不规则而存在误差,可能使等效球直径大于湿筛孔径的颗粒通过筛孔^[19](图 3A),从而低估较大粒级的颗粒含量;也可能使等效球直径小于孔径的板状或盘状颗粒截留在筛网上(图 3B),进而高估较大粒级的颗粒含量。

颗粒分布在 100~250 μm 粒级。

随着土壤悬液粒级的减小,对应范围内的各粒级颗粒占比总体呈增加趋势,且各粒级间的比例关系均与<100 μm 悬液中类似。例如,在<53 μm 悬液中,黑土和紫色土<53 μm 的 5 个粒级占比分别介于 17.8%~20.4%,13.2%~23.7%;褐土以 20~53 μm 粒级占比最高,为 29.0%,<53 μm 其余粒级占比介于 13.6%~16.8%。LDM 在这些悬液中同样检出了大于对应粒级的颗粒,主要分布在其相邻粒级中,且占比随悬液粒级减小而增加。例如,在<53 μm 悬液中,黑土、褐土和紫色土>53 μm 的颗粒主要分布在 53~100 μm 粒级,对应占比分别为 4.0%,9.7%,3.2%。对于<2 μm 悬液,LDM 检出的黑土、褐土和紫色土>2 μm 颗粒均主要集中在 2~5 μm 粒级,占比分别增至 27.2%,23.9%,29.1%。

导致 LDM 与 SPM 结果差异的原因主要在于土壤颗粒并非完美球形,而呈板状、盘状等不规则形状。SPM 基于球形假设,根据 Stokes 公式计算<100 μm 各粒级颗粒的沉降时间,以此吸取对应的土壤颗粒。土壤粒径越小,沉降时间越久^[1]。然而,土壤颗粒并非球形,沉降时其最大横截面往往垂直于运动方向,因此所需沉降时间也大于 Stokes 公式的计算结果,从而使某些颗粒直径被低估,进而划分至更小的粒级。对 LDM 而言,由于不规则颗粒的平均直径大于同体积的球形颗粒直径^[2],其对土壤颗粒直径的测定结果

往往较其等效球直径大,从而使某些颗粒直径被高估,被划分至更大的粒级^[3]。随着土壤粒级的减小,颗粒形状总体更加偏离球形^[6],因形状不规则带来的 LDM 与

SPM 差异进一步加大。不同土壤类型的矿物组成不同,直接影响土壤颗粒的大小和形状。因此,LDM 与 SPM 的对比关系往往因土壤类型而异。

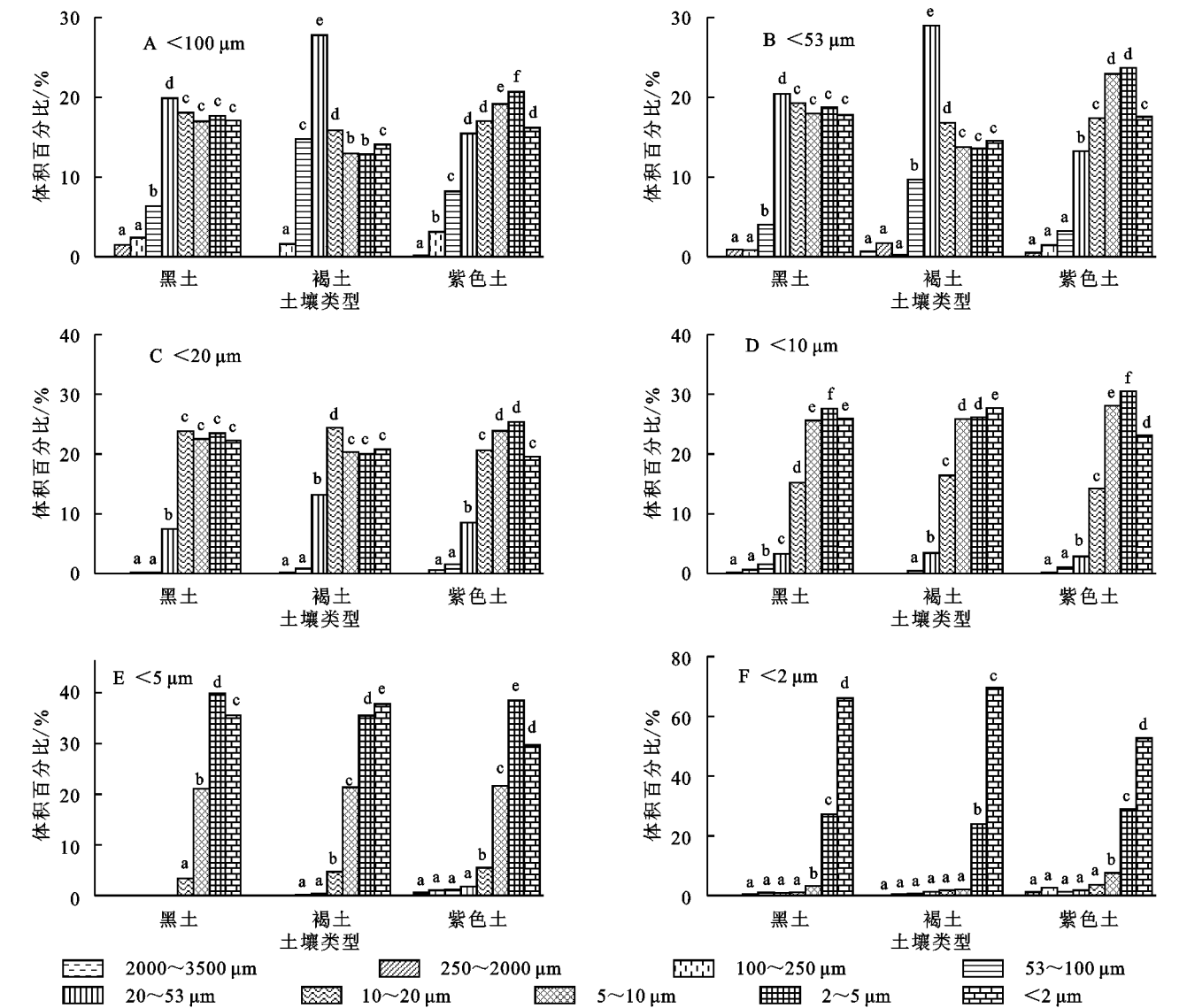


图 4 激光衍射法所测 3 种典型土壤不同粒级悬液的平均粒径分布

4 结论

- (1) 相比 SPM,LDM 显著高估了黑土、褐土和紫色土 2~20 μm 范围内的各粒级百分比,低估了<2 μm 颗粒含量,且两种方法之间的绝对差异随粒级减小呈增大趋势;LDM 和 SPM 在>20 μm 各粒级的差异因土壤类型而异。
- (2) LDM 在 SPM 所得 250~2 000,100~250 μm 悬液中仅分别检出 34.6%~70.1%,58.1%~70.6% 的对应粒级颗粒,其余土壤颗粒分别集中在<250 μm 各粒级与 250~2 000 μm。
- (3) LDM 在 SPM 所得<100 μm 各粒级悬液中检出了 52.7%~98.4% 的对应粒级颗粒;LDM 所得

偏大颗粒主要分布在各悬液的相邻粒级,且对应占比随悬液粒级减小呈增加趋势。在自然界中,土壤颗粒往往呈不规则形状。LDM 与 SPM 都是建立在所测颗粒呈完美球形的基础上,因此对土壤 PSD 的测定都并非完全准确。未来可利用已知直径的标准球形颗粒或土壤颗粒的立体扫描电镜测量结果对两种方法加以验证。本研究系统揭示了 LDM 和 SPM 在中国 3 种典型土壤 PSD 测定中的差异,可为当地土壤可蚀性估算提供借鉴,对区域土壤侵蚀模拟和水土保持规划具有重要意义。

参考文献:
[1] Gee G W, Bauder J W. Particle-size Analysis[M]// Klute A. Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and

- Mineralogical Methods. Madison WI, USA: Soil Science Society of America, 1986.
- [2] Jonasz M. Size, Shape, Composition and Structure of Microparticles from Light Scattering[M]//Syvistki J P M. Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1991.
- [3] Yang Y, Wang L, Wendroth O, et al. Is the laser diffraction method reliable for soil particle size distribution analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019,83(2):276-287.
- [4] Yang X L, Zhang Q Y, Li X Z, et al. Determination of soil texture by laser diffraction method[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(6):1556-1566.
- [5] Bittelli M, Andrenelli M C, Simonetti G, et al. Shall we abandon sedimentation methods for particle size analysis in soils[J]. Soil and Tillage Research, 2019,185:36-46.
- [6] 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(3):523-535.
- [7] Taubner H, Roth B, Tippokotter R. Determination of soil texture: comparison of the sedimentation method and the laser-diffraction analysis[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009,172(2):161-171.
- [8] Buurman P, Pape T, Reijneveld J A, et al. Laser-diffraction and pipette-method grain sizing of Dutch sediments: correlations for fine fractions of marine, fluvial, and loess samples[J]. Netherlands Journal of Geosciences, 2001,80(2):49-57.
- [9] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning[R]//USDA-NRCS. Agriculture Handbook 537. Washington DC, USA:1978.
- [10] Lane L J, Nearing M A. Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation[R]//USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. NSERL Report No.2. West Lafayette, IN, USA: 1989.
- [11] 全国水土保持规划编制工作领导小组办公室,水利部水利水电规划设计总院.中国水土保持区划[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
- [12] 鲍玉海,丛佩娟,冯伟,等.西南紫色土区水土流失综合治理技术体系[J].水土保持通报,2018,38(3):143-150.
- [13] Ryżak M, Bieganski A. Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser diffraction method[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011,174(4):624-633.
- [14] 冯腾,陈洪松,张伟,等.激光粒度仪与沉降吸管法测定喀斯特地区土壤机械组成的对比研究[J].农业现代化研究,2013,34(1):100-103.
- [15] United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS). National soil survey handbook, title 430-VI[EB/OL]. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142_p2_054242.
- [16] 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.
- [17] 刘雪梅,黄元仿.应用激光粒度仪分析土壤机械组成的试验研究[J].土壤通报,2005,36(4):116-119.
- [18] 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.
- [19] Neumann A M, Kramer H J M. A comparative study of various size distribution[J]. Particle and Particle Systems Characterization, 2002,19(1):17-27.
- [20] Sochan A, Bieganski A, Bartmiński P, et al. Use of the laser diffraction method for assessment of the pipette method[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(1):37-42.