

冷子禾, 张天宇. 激光衍射法和吸管法测定东北黑土区土壤机械组成的比较研究[J]. 土壤学报, 2026,

LENG Zihé, ZHANG Tianyu. Comparison of Soil Particle Size Distribution in the Black Soil Region of Northeast China Measured by Laser Diffraction Method and the Sieve-Pipette Method[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

激光衍射法和吸管法测定东北黑土区土壤机械组成的比较研究*

冷子禾¹, 张天宇^{1,2†}

(1. 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024; 2. 长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室, 长春 130024)

摘要: 激光衍射法(简称“激光法”)因具备操作简便、测定效率高等优势,近年来在土壤机械组成测定中得到广泛应用。然而,受测定原理和实验流程尚未统一等因素影响,激光法所得土壤机械组成与传统吸管法之间的可比性仍然不足。本研究旨在比较激光法与吸管法测定东北黑土区土壤机械组成的差异特征,并分别基于回归分析法和林氏一致性相关系数法构建激光法向吸管法体系转换的校正模型。为此,采集了该地区36个主要土种的土样,分别采用激光法和吸管法开展土壤机械组成测定。结果表明:(1)两种方法所得土壤机械组成存在显著差异。相较于吸管法,激光法低估了所有土样的黏粒含量,高估所有土样的粉粒含量,而对砂粒含量的差异因样品而异。黏粒、粉粒和砂粒含量的平均绝对差异分别为-30.1%、34.5%和-4.4%。(2)回归分析法校正后,激光法的黏粒、粉粒和砂粒含量的平均绝对差异分别降低至0.9%、0.5%和-1.4%。采用林氏一致性相关系数法优化粒径分级阈值后,黏粒、粉粒和砂粒含量的平均绝对差异降低至1.3%、-3.4%和2.1%。两种方法均显著提高了激光法与吸管法结果的一致性,但回归分析法在计算过程上更为简便。(3)激光法直接判定土壤质地类型的准确率仅为5.6%,表明其原始结果不宜直接用于判定土壤质地分类。经校正后,判定准确率可提升至35%以上。

关键词: 土壤机械组成; 土壤质地; 激光衍射法; 吸管法

中图分类号: S152.3

文献标志码: A

Comparison of Soil Particle Size Distribution in the Black Soil Region of Northeast China Measured by Laser Diffraction Method and the Sieve-Pipette Method

LENG Zihé¹, ZHANG Tianyu^{1,2†}

(1. School of Geographic Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security of Changbai Mountains, Ministry of Education, Changchun 130024, China)

Abstract: 【Objective】 The Laser Diffraction Method(LDM) has been increasingly adopted for determining Soil Particle Size Distribution(PSD) due to its rapid measurement speed, high degree of automation, and minimal labor requirement. These advantages make LDM particularly attractive for large-scale soil surveys, laboratory routine analysis, and studies requiring high-resolution particle-size information. Nevertheless, substantial discrepancies persist between PSD measured by LDM and that obtained from the traditional Sieve-Pipette Method(SPM), which remains the reference method in most national and international soil texture classification systems. These

* 国家自然科学基金项目(42477345, 41401304)和国家重点基础研究发展计划项目(2018YFC0507005)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42477345, 41401304) and National Key Basic Research and Development Program Project (No. 2018YFC0507005)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: Tianyu.Zhang100@foxmail.com

作者简介: 冷子禾(2002—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀和土壤地理研究。E-mail: leng156077@163.com

收稿日期: 2025-09-27; 收到修改稿日期: 2026-07-23; 网络首发日期(www.cnki.net):

inconsistencies arise mainly from differences in measurement principles, contrasting assumptions regarding particle shape and density, the optical models used in LDM instruments, and the absence of unified sample pretreatment protocols. As a result, the direct use of LDM-derived PSD for soil texture classification often yields biased or inconsistent outcomes. Therefore, this study aims to: 1) comprehensively compare PSD measured by LDM and SPM for major soil types in the Black Soil Region(BSR) of Northeast China; and 2) develop and evaluate calibration models based on regression analysis and Lin's Concordance Correlation Coefficient(CCC) to convert LDM results into an SPM-compatible reference framework. **【Method】** Soil samples representing 36 dominant soil series across the BSR, including black soil, chernozem, chestnut Soil, and aeolian Sandy Soil, were collected in the field. After air-drying, the samples were gently ground using a mortar and passed through a 2 mm sieve. PSD for each sample was determined using both LDM and SPM following their respective protocols. Differences in clay, silt, and sand fractions were quantified to characterize systematic deviations. Two calibration strategies were developed: one based on regression analysis, which establishes quantitative relationships between LDM and SPM values using linear regression models; and the other based on Lin's CCC, which adjusts particle-size cutoff thresholds in LDM to maximize consistency with SPM and identify optimized boundary values for clay, silt, and sand. Model performance was evaluated based on reductions in mean absolute differences and improvements in soil texture classification accuracy using the USDA textural classification system. **【Result】** 1) Pronounced discrepancies were observed between LDM and SPM. Relative to SPM, LDM consistently underestimated clay content and substantially overestimated silt content across all soil types, whereas deviations in sand content varied depending on sample-specific characteristics. The mean absolute differences for clay, silt, and sand were -30.1%, 34.5%, and -4.4% respectively. 2) Following regression-based correction, the mean absolute differences decreased to 0.9%, 0.5%, and -1.4%, and the accuracy of soil texture classification improved markedly to 36.1%. 3) Lin's CCC-based calibration further reduced the mean absolute differences to 1.3%, -3.4%, and 2.1%, yielding a classification accuracy of 38.9%. Although both calibration approaches substantially improved agreement between LDM and SPM, the regression-based method was more computationally efficient to apply in routine laboratory workflows. **【Conclusion】** Uncorrected LDM-derived PSD is unsuitable for direct soil texture classification in the BSR. However, applying appropriate calibration models, whether regression-based or Lin's CCC-based, effectively harmonizes LDM data with SPM reference values, significantly enhancing its reliability and practical utility. These findings offer a methodological foundation for integrating LDM into soil survey, monitoring, and classification programs, and provide valuable guidance for improving the comparability of PSD data obtained using different analytical techniques.

Key words: Soil particle size distribution; Soil texture; Laser diffraction method; Sieve-pipette method

土壤机械组成, 又称土壤颗粒组成, 是指土壤固相中不同粒径范围矿质颗粒的相对含量, 通常以黏粒 (<0.002 mm)、粉粒 (0.002~0.05 mm) 和砂粒 (0.05~2 mm) 的百分含量来表示^[1]。作为土壤最基本的性质之一, 土壤机械组成对土壤有机质含量与稳定性、阳离子交换能力、导水率和导热率等诸多理化性质具有直接影响。土壤机械组成还是土壤质地分类的定量依据。美国农业部土壤质地分类标准将土壤机械组成归纳为 12 个土壤质地类型, 如砂土、粉质壤土和壤土等^[2]。与土壤机械组成相比, 土壤质地类型更为直观。在一些土壤相关的模型中, 例如土壤与水评估工具 (SWAT), 是采用土壤质地类型作为输入参数, 而非土壤机械组成^[3]。

土壤机械组成的常用测定方法主要包括吸管法、比重计法和激光衍射法 (又称激光粒度仪法, 以下简称“激光法”)。吸管法基于 Stokes 定律, 通过在特定时间和深度吸取出悬液中理论上小于某一粒径的土壤颗粒, 再经烘干、称重和计算得到其含量。该方法的优点是仪器成本低和原理直观, 缺点是操作繁琐和耗时较长。吸管法包括样品预处理、过筛、搅拌、沉

降、烘干和称重等步骤。通常单人单批次仅能处理约十几个样品,且耗时超过 48 h。尽管如此,吸管法被广泛视为测定土壤机械组成的标准方法,积累了大量数据,常用于校准其他测量方法^[4]。比重计法是对吸管法的改进。它省去了烘干和称重等环节,减少了耗时。但比重计法的准确性低于吸管法,尤其是在黏粒含量较低时^[5]。激光法的出现比吸管法晚近 50 年^[6]。该方法基于光散射原理,通过颗粒散射光角度与粒径之间的反比关系测定颗粒粒径及其分布,所采用的专用测试设备通常称为激光粒度仪。在测定过程中,激光粒度仪将激光束照射至土壤悬浮液,通过检测不同角度的散射光信号,经模型转换后获得土壤机械组成数据^[7]。激光法的优点是高效、用样量小和结果更为详尽。与吸管法和比重计法相比,激光法尤为高效,单个样品测试时间仅为 5 min。然而,该方法的缺点在于结果可比性差。首先,大量研究表明,激光法测定的黏粒含量显著低于吸管法的测定值,且二者之间缺乏统一的转换关系^[8-12]。这不仅降低了激光法和吸管法所得数据之间的可比性,也使激光法的测定结果难以与基于吸管法建立的既有土壤数据库实现有效衔接,进而制约了其应用价值。其次,即便同属激光法,不同实验方法所获结果也难以直接比较,其主要原因在于样品前处理流程、分散条件和仪器配置等方面缺乏统一标准^[13-17]。这均削弱了激光法结果之间的可比性。

尽管激光法存在以上缺点,但其高效的优点使其在实践中仍被广泛应用。为兼顾测定效率和数据可比性,已有研究通常以吸管法或比重计法的测定结果作为标准,对激光法测定结果进行校正。现有的校正方法主要归纳为两类。第一类基于回归分析,通过构建激光法测定值与标准方法测定值之间的回归关系,对激光法结果进行数值校正^[18]。第二类通过调整激光法的粒径分级阈值来提高两种方法测定结果的一致性,该方法又可分为主观调整和客观调整。主观调整主要依赖研究者的经验判断,人为设定新的粒径分级界限,例如将黏粒粒径上限由 2 μm 调整至 8 μm ^[19];客观调整则基于林氏一致性相关系数等统计指标,筛选能够最大程度提高两种方法测定结果一致性的最优粒径分级阈值^[20]。

东北黑土区是我国重要的粮食生产基地,准确测定土壤机械组成是科学保护与利用黑土资源的重要基础。近年来,已有研究针对该地区对比了激光法与吸管法的土壤机械组成测定结果,并尝试建立二者间的转换关系。然而,现有研究涉及的土壤类型有限,且土样空间分布较为集中^[21-24]。东北黑土区地域广阔,土壤类型与质地类型多样,现有成果的代表性仍有不足。为此,本研究选取该区域 4 个主要土类下的 36 个典型土种耕作层土壤,系统比较激光法与吸管法在土壤机械组成和质地类型判定方面的差异,并分别采用回归分析法与林氏一致性相关系数法构建激光法的校正模型,以期为该地区土壤机械组成的快速、准确测定提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 土壤采样与制备

依据第二次全国土壤普查公布的省级土种志,从黑土、黑钙土、栗钙土和风沙土 4 个土类中,分别筛选出 18 个、12 个、4 个和 2 个耕地面积较大的主要土种,总计 36 个。随后,依据土种志记载的位置信息,逐一开展实地采样。在每个选定样点布设一个 20 m $\times$ 20 m 的样方,采用梅花布点法采集混合土样,总质量不少于 5 kg,采样深度为耕作层厚度,通常为 20 cm。将土样带回实验室,手工掰成直径约为 1 cm 的土块。土样自然风干后,以研钵轻磨,过 2 mm 筛。随后采用四分法从过筛土样中分取约 500 g 样品,用于土壤机械组成的测定。

1.2 土壤机械组成测定

(1) 吸管法。吸管法实验方法主要参考《土壤农业化学分析方法》^[25]。首先, 去除土壤中的有机质和碳酸钙等胶结物质。对于黑土, 仅需去除有机质, 步骤如下: ①称取 10~20 g 土样置于 500 mL 三角瓶中, 按每 10 g 土壤加入 20 mL 6% 双氧水的比例添加试剂, 充分摇匀后静置 30 min 以上; ②将三角瓶置于电热板上加热, 以去除残余双氧水。对于黑钙土、栗钙土和风沙土, 先去除碳酸钙, 再去除有机质, 步骤如下: ①称取 10~20 g 土样放入 50 mL 塑料离心管中, 逐次滴加少量 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 稀盐酸, 充分振荡至无气泡产生; ②加入去离子水定容至 50 mL, 在 $2500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下离心 5 min, 弃去上清液, 重复该步骤直至上清液呈中性; ③将处理后的土样转移至 500 mL 三角瓶中, 进一步去除有机质, 方法同上。其次, 分散土壤颗粒。每 10 g 土样加入 10 mL $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 六偏磷酸钠溶液, 浸泡过夜。之后, 向三角瓶中加入 400 mL 超纯水, 充分搅拌混匀。将三角瓶置于电热板上加热, 持续沸腾 1 h 后取下。最后, 采用筛分法测定砂粒含量, 采用吸管法测定黏粒含量。粉粒含量通过 100% 减去砂粒与黏粒含量之和计算得出。每个土样设 3 次重复试验, 结果取平均值。粒径分级采用美国制标准, 黏粒与粉粒的粒径分界为 0.002 mm, 粉粒与砂粒的粒径分界为 0.05 mm。

(2) 激光法。首先, 去除有机质和碳酸钙等胶结物质。对于黑钙土、栗钙土和风沙土样品, 先去除碳酸钙, 步骤如下: ①称取通过 2 mm 筛的风干土壤样品 0.5 g, 置于 15 mL 离心管中, 加入 5 mL 10% 稀盐酸, 轻轻振荡离心管使土样与酸液充分接触, 室温静置反应至无明显气泡产生; ②反应完成后, 加入超纯水至 50 mL, 混匀后在 $2500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心 5 min, 弃去上清液, 重复该步骤 3~5 次, 直至上清液呈中性。之后, 对全部土壤样品进行有机质去除处理, 向离心管中加入 5 mL 6% 双氧水, 轻轻振荡混匀, 室温反应至无气泡产生。反应结束后, 按上述相同离心和清洗步骤处理, 直至上清液为中性, 以彻底去除残留双氧水。其次, 分散土壤颗粒。向离心管中加入约 5 mL $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 六偏磷酸钠溶液, 使用超声波清洗仪在加热和振荡条件下处理 15 min, 确保样品充分分散。最后, 进行上机测试。激光粒度仪型号为 Microtrac S3500。该仪器配备三束 780 nm 红光激光器、光学检测系统、样品分散与进样单元及数据处理系统, 测量范围为 $0.02 \sim 2800 \mu\text{m}$ 。用胶头滴管吸取 2~3 mL 已充分分散的土壤悬浮液, 缓慢注入仪器样品池中, 控制样品浓度处于加样指示范围内。粒度计算采用 Mie 散射模型。由于激光粒度仪在测定过程中采用固定的粒径分级设置, 未包含 $2 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m}$ 的划分界限, 因而在本研究中选取相邻的 $2.31 \mu\text{m}$ 与 $52.32 \mu\text{m}$ 作为黏粒、粉粒和砂粒的分界粒径。每个土样制备一个悬浮液, 并重复吸取和测定 3 次, 结果取平均值。

依据土壤机械组成数据, 采用美国农业部土壤质地分类标准判定土壤质地类型。

1.3 数据分析

首先, 采用配对样本 t 检验或 Wilcoxon 符号秩检验分析吸管法与激光法测定各粒级含量结果之间的差异。其次, 以吸管法测得的各粒级质量含量(%)作为自变量, 激光法测得的体积含量(%)作为因变量, 使用回归分析法建立线性回归模型。再次, 计算林氏一致性相关系数, 评价两种方法在黏粒、粉粒和砂粒含量方面的一致性, 并据此确定激光法在计算土壤机械组成时的最优“黏粒-粉粒-砂粒”分级阈值。分析和制图借助 IBM SPSS Statistics 27、R4.4.2 和 Origin 2024 等软件完成。

林氏一致性相关系数是用于综合评估两种测量方法一致性的统计量, 其核心在于同时考虑变量间的线性相关性与系统偏差^[26]。计算公式为:

$$\text{林氏一致性相关系数 } r = \frac{2\rho\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\mu_x - \mu_y)^2} \quad (1)$$

式中, ρ 为皮尔逊相关系数, σ_x^2 和 σ_y^2 分别为两组数据的方差, μ_x 和 μ_y 为两组数据的均值,

取值范围为[-1, 1], 数值越接近 1 表示一致性越好。在使用林氏一致性相关系数 r 优化激光法黏粒、粉粒和砂粒分级阈值的过程中, 以吸管法测定结果为参照, 按照激光粒度仪的粒径分级逐步调整各组分的分界阈值, 并分别计算不同阈值条件下激光法与吸管法测定结果的林氏一致性相关系数。最终, 将林氏一致性相关系数达到最大值时所对应的粒径分界点确定为最优分级阈值。

2 结果与讨论

2.1 两种方法测定的土壤机械组成的差异

激光法与吸管法的测定原理不同, 二者并无绝对的优劣之分。但考虑到吸管法作为土壤机械组成的标准测定方法, 本文以其结果为基准进行表述。结果表明, 激光法与吸管法在黏粒、粉粒和砂粒含量上均存在显著差异 ($P<0.05$, 图 1、图 2、表 1)。具体表现为: 激光法系统性低估了全部土样的黏粒含量, 高估了全部土样的粉粒含量; 对于砂粒含量, 激光法高估了 38.9% 的土样, 低估了 61.1% 的土样。

在黏粒方面, 激光法测定结果的变化范围为 0.2%~10.7%, 平均值为 4.9%。而吸管法结果的变化范围为 6.4%~52.2%, 平均值为 35.0% (表 1)。激光法系统性低估了全部土样的黏粒含量, 平均低估了 30.1%。黏粒含量的绝对差异介于 -43.8%~-3.1%, 相对差异范围为 -99.4%~-47.7% (表 2)。

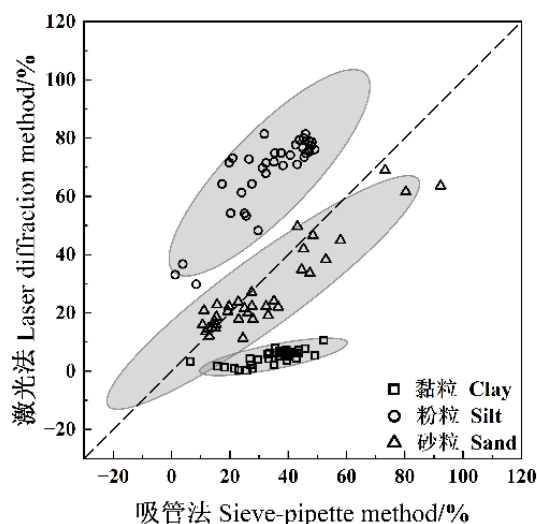
在粉粒方面, 激光法的测定结果的变化范围为 29.8%~81.4%, 平均值为 68.1%。而吸管法结果的变化范围为 1.3%~49.1%, 平均值为 33.6% (表 1)。激光法系统性高估了全部土样的粉粒含量, 平均高估 34.5%。粉粒含量的绝对差异介于 18.6%~52.2%, 相对差异范围为 54.9%~2459.3% (表 2)。其中, 2459.3% 这一最大值出现在风沙土土样中。此外, 另一个风沙土土样的相对差异也高达 847.4%。除这 2 个风沙土以外, 其余土样的相对差异处于 54.9%~269.5% 之间。风沙土出现极高相对差异的主要原因是激光法在砂粒含量高的土样中会显著低估砂粒和黏粒含量, 从而导致粉粒含量被明显高估。

在砂粒方面, 激光法的测定结果的变化范围为 11.3%~68.9%, 平均值为 27.0%。而吸管法的结果变化范围为 10.7%~92.3%, 平均值为 31.4% (表 1)。激光法高估了 38.9% 土样的砂粒含量, 低估了 61.1% 土样的砂粒含量。砂粒含量的绝对差异介于 -28.7%~9.6%, 相对差异范围为 -54.0%~85.9% (表 2)。进一步分析表明, 当土壤在吸管法测得砂粒含量低于约 20% 时, 激光法倾向于高估其含量; 而当在吸管法测得砂粒含量高于约 20% 时, 激光法则倾向于低估。

东北黑土区已有研究与本研究结果总体一致。王大安等^[23]对 18 个东北黑土区侵蚀泥沙样品的分析表明, 激光法测得的黏粒含量平均偏低 31.5%, 粉粒含量平均偏高 34.1%, 砂粒含量平均偏低 2.6%, 其差异的趋势和幅度与本研究的发现最为接近。另有部分研究显示, 两种方法所得结果的差异幅度相对较小, 激光法对黏粒含量的低估幅度约为 20%, 对粉粒的高估幅度约为 15%, 砂粒含量则呈现高估或低估的不一致趋势^[21-22,24]。造成不同研究间差异幅度波动的主要原因可能与土壤质地类型有关。已有研究中土壤多集中于粉质黏壤土和粉质黏土等质地类型, 其土壤机械组成相对均匀, 差异范围相对有限。而本研究中土壤涉及砂土、砂质壤土、壤土、砂质黏壤土、砂质黏土、黏壤土、粉质黏壤土、粉质黏土和黏土等 9 种质地类型, 各粒级含量差异较大, 导致激光法在高、低含量区间表现出更为明显的系统性偏差。

导致激光法和吸管法测定结果差异的原因是多方面的, 涉及方法学原理、土壤颗粒性质和预处理等。吸管法基于 Stokes 定律反演质量分布, 通常假设颗粒为密度统一的球体 ($2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。但实际土壤颗粒的非球形形态、密度差异及布朗运动均可能使得测定结果并不准确, 尤其使 $<1 \mu\text{m}$ 颗粒的测定结果不可靠^[27-28]。激光法依据光散射原理反演体积分布, 受预

处理方式、颗粒形态和仪器性能等影响较大。六偏磷酸钠溶液结合超声振荡虽能使团聚体有效分散,但也导致了黏粒部分片状颗粒含量增多^[29]。激光法的测量原理使片状黏粒更易被识别为粉粒,出现黏粒低估、粉粒高估的情况。同时,仪器型号和性能亦是重要因素,如 Microtrac S3500 在高浓度土壤悬浊液中可能出现遮蔽效应,降低亚微米颗粒检测灵敏度^[30]。近年来数字图像技术为两种方法的差异提供了新视角,有学者认为吸管法高估小粒径颗粒含量,激光法更为准确^[31-32]。



注: 椭圆为 95%置信水平下的置信椭圆图。Note: The ellipses represent 95% confidence ellipses.

图 1 激光法和吸管法定测定的土壤机械组成对比

Fig. 1 Comparison of soil particle size distribution determined by laser diffraction method(LDM) and sieve-pipette method(SPM)

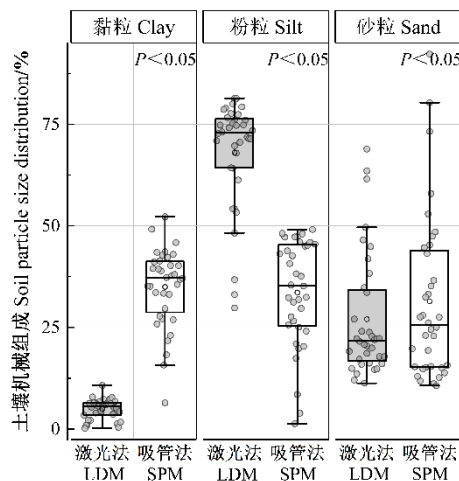


图 2 激光法和吸管法定测定的土壤机械组成的箱线图

Fig. 2 Box plots of soil particle size distribution determined by laser diffraction method(LDM) and sieve-pipette method(SPM)

表 1 激光法和吸管法定测定的土壤机械组成

Table 1 Soil particle size distribution determined by laser diffraction method(LDM) and sieve-pipette method(SPM)

方法 Method	黏粒 Clay (<2 μm) /%			粉粒 Silt (2~50 μm) /%			砂粒 Sand (50~2000 μm) /%		
	最大 Max	最小 Min	平均 Average	最大 Max	最小 Min	平均 Average	最大 Max	最小 Min	平均 Average
激光法 LDM	10.7	0.2	4.9±2.4	81.4	29.8	68.1±13.5	68.9	11.3	27.0±15.2
吸管法 SPM	52.2	6.4	35.0±9.6	49.1	1.3	33.6±13.1	92.3	10.7	31.4±20.4

表 2 激光法测定土壤机械组成的绝对差异和相对差异

Table 2 Absolute and relative differences of soil particle size distribution determined by laser diffraction method(LDM)

差异 Difference	黏粒 Clay (<2 μm) /%			粉粒 Silt (2~50 μm) /%			砂粒 Sand (50~2000 μm) /%		
	最大 Max	最小 Min	平均 Average	最大 Max	最小 Min	平均 Average	最大 Max	最小 Min	平均 Average
绝对差异 AD/%	-3.1	-43.8	-30.1±8.0	52.2	18.6	34.5±7.6	9.6	-28.7	-4.4±8.4
相对差异 RD/%	-47.7	-99.4	-85.8±8.4	2459.3	54.9	199.6±410.7	85.9	-54.0	-5.4±28.4

注：绝对差异=（激光法百分含量-吸管法百分含量）×100%；相对差异=[（激光法百分含量-吸管法百分含量）/吸管法百分含量]×100%。Note: Absolute difference(AD) = (laser diffraction percentage-sieve-pipette percentage) ×100%; Relative difference(RD) = [(laser diffraction percentage-sieve-pipette percentage) / sieve-pipette percentage] ×100%.

2.2 两种方法测定土壤质地类型的差异

激光法与吸管法在土壤质地类型判定上差异显著（图 3）。吸管法结果在质地三角图中分布较为分散，涵盖砂土、砂质壤土、壤土、砂质黏壤土、砂质黏土、黏壤土、粉质黏壤土、粉质黏土和黏土等 9 种质地类型。而激光法结果则集中分布于三角图底部，仅涉及 3 种类型，且以粉质壤土为主。在全部 36 个土样中，仅 2 个土样被两种方法判定为同一质地类型。造成该差异的主要原因是激光法显著低估了黏粒含量，导致散点在三角图中整体下移，质地类型判定向砂质或粉质方向偏移。

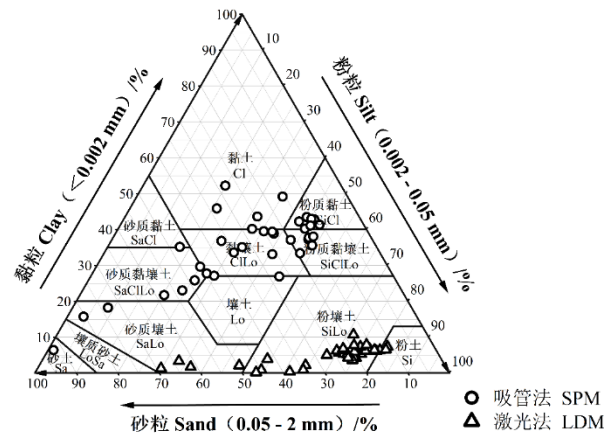


图 3 激光法与吸管法测定的土壤质地类型

Fig. 3 Soil texture types determined by laser diffraction method(LDM) and sieve-pipette method(SPM)

2.3 激光法测定土壤机械组成的回归校正模型

激光法与吸管法定测的黏粒、粉粒及砂粒含量之间均表现出高度线性相关，且两种方法的测定结果存在显著相关性（图 1）。由于风沙土的土壤机械组成特征显著区别于其他土壤类型，且对回归分析结果产生明显影响，在建立回归模型时将 2 个风沙土样本予以剔除，最终实际样本量为 34 个。回归分析结果表明，黏粒、粉粒和砂粒的模型决定系数（ R^2 ）分别为 0.63、0.54 和 0.80。为确保计算结果具有实际意义，在回归模型计算得到各粒级含量后，将它们按照原有比例进行调整，使各粒级含量之和为 100%。

$$\text{黏粒: } Y_{\text{校正(黏)}} = 2.57Y_{\text{实测(黏)}} + 23.39 \quad R^2 = 0.63, n = 34 \quad (2)$$

$$\text{粉粒: } Y_{\text{校正(粉)}} = 0.74Y_{\text{实测(粉)}} - 16.34 \quad R^2 = 0.54, n = 34 \quad (3)$$

$$\text{砂粒: } Y_{\text{校正(砂)}} = 1.09Y_{\text{实测(砂)}} + 0.96 \quad R^2 = 0.80, n = 34 \quad (4)$$

式中， $Y_{\text{实测(黏/粉/砂)}}$ 指通过激光法得到的实测土壤机械组成含量，单位为百分比（%）； $Y_{\text{校正(黏/粉/砂)}}$ 指通过回归模型校正后的估算值，用于修正激光法实测结果与吸管法结果之间的偏差，单位为百分比（%）。

已有大量研究尝试通过回归分析法建立激光法与吸管法之间的转换关系，以校正激光法定测的土壤机械组成。然而，即便是在东北黑土区的相关研究中，不同研究得出的回归模型及其拟合优度仍存在显著差异（表 3）^[21-24]。模型的函数形式及参数取值在很大程度上依赖于土壤类型、实验方法及仪器型号等因素，表现出明显的局限性。王彬等^[21]所用土样的质地类型较为单一，仅涉及粉质壤土、粉质黏壤土和粉质黏土三类，其回归模型的适用性可能受限。王大安等^[23]的研究中所用土样的粒级与本研究接近，所用激光粒度仪型号与本研究一致，但回归模型仍存在一定区别。本研究中黏粒回归模型的斜率较高，这可能与黑土样品本身黏粒含量较高有关。已有研究表明，土壤黏粒含量越高，激光法对黏粒的低估程度往往越显著，从而导致激光法与吸管法之间的偏差增大，在回归模型中表现为斜率上升^[33]。此外，分散方法的差异也可能是导致回归模型不同的原因。本研究在激光法前处理中采用超声分散法，而王大安等^[23]则使用煮沸法进行分散。超声分散可能导致更多片状黏粒颗粒发生解离^[29]。这些解离的细小颗粒在激光衍射过程中易被识别为粉粒，从而进一步提高粉粒含量和降低黏粒含量，最终导致黏粒的回归模型中斜率的增大。Polakowski 等^[34]的研究也证实，化学分散与超声分散会导致激光法测定结果出现显著差异。

表 3 东北黑土区激光法与吸管法之间的回归模型及其拟合优度

Table 3 Regression models and their goodness of fit between laser diffraction method(LDM) and sieve- pipette method(SPM) in the black soil region of Northeast China

研究者 Author	采样地 Sampling site	样本数量 Sample size	土壤类型 Soil type	土壤质地 Soil texture	激光粒度仪仪器 型号 Laser diffraction instrument model	回归模型及其拟合优度 Regression model and its goodness of fit
王彬等 [21]	宾县	178	黑土	粉质壤土、粉质黏壤土、粉质黏土	Malvern Master Sizer 2000	黏粒（<2 μm）： $Y_{\text{校正(黏)}} = 100 - (Y_{\text{校正(粉)}} + Y_{\text{校正(砂)}})$ 粉粒（2~50 μm）： $Y_{\text{校正(粉)}} = -0.76Y_{\text{实测(粉)}} + 117.67$ （ $R^2 = 0.32$ ） 砂粒（50~2000 μm）： $Y_{\text{校正(砂)}} = 0.48Y_{\text{实测(砂)}} - 0.25$ （ $R^2 = 0.22$ ）
李晓玲等 [22]	嫩江市	19	黑土	/	Microtrac S3500	黏粒（<2 μm）： $Y_{\text{校正(黏)}} = 0.16Y_{\text{校正(黏)}} + 0.90$ （ $R^2 = 0.90$ ） 粉粒（2~50 μm）： $Y_{\text{校正(粉)}}$

						$=1.77Y_{\text{实测(粉)}} \text{ (} R^2=0.91 \text{)}$
						砂粒 (50~2000 μm) : $Y_{\text{校正(砂)}}$
						$=1.10Y_{\text{实测(砂)}} \text{ (} R^2=0.97 \text{)}$
王大安 等 ^[23]	嫩江市	18	泥沙	/	Microtrac S3500	黏粒 (<2 μm) : $Y_{\text{校正(黏)}}=0.88Y_{\text{校正(黏)}}+32.77 \text{ (} R^2=0.84 \text{)}$
						粉粒 (2~50 μm) : $Y_{\text{校正(粉)}}$
						$=0.73Y_{\text{实测(粉)}}-11.86 \text{ (} R^2=0.80 \text{)}$
						砂粒 (50~2000 μm) : $Y_{\text{校正(砂)}}$
						$=0.86Y_{\text{实测(砂)}}+3.84 \text{ (} R^2=0.93 \text{)}$
Bai 等 ^[24]	嫩江市	51	黑土		Malvern Master Sizer 2000	壤质砂土、砂质壤土、砂质黏壤土、壤土、粉质壤土、粉质黏壤土、粉质黏土
						黏粒 (<2 μm) : $Y_{\text{校正(黏)}}=0.96Y_{\text{校正(黏)}}+18.77 \text{ (} R^2=0.18 \text{)}$
						粉粒 (2~53 μm) : $Y_{\text{校正(粉)}}$
						$=0.49Y_{\text{实测(粉)}}+7.63 \text{ (} R^2=0.53 \text{)}$
						砂粒 (53~100 μm) : 未建立
						砂粒 (100~2000 μm) : $Y_{\text{校正(砂)}}$
						$=0.72Y_{\text{实测(砂)}}+16.29 \text{ (} R^2=0.64 \text{)}$

经回归分析法校正后,黏粒、粉粒和砂粒的平均绝对差异分别从校正前的-30.1%、34.5%和-4.4%显著降低至 0.9%、0.5%和-1.4% (图 4)。校正后,所有样品的粉粒含量绝对差异均有所下降。绝大多数样品的黏粒含量绝对差异也明显降低。仅有一份风沙土样品在校正后与吸管法的差异反而增大。砂粒含量的校正效果相对复杂,有 50%的样品在校正后与吸管法的差异不降反升。因此,基于回归分析法的校正模型对砂粒含量的校正效果不理想。

经回归分析法校正后,土壤质地类型判别的准确率由原来的 5.6%提升至 36.1%(图 5)。由于校正后黏粒含量普遍提高,土壤质地三角图中散点呈现整体向左上方移动的趋势,土壤质地类型向偏黏性方向移动。

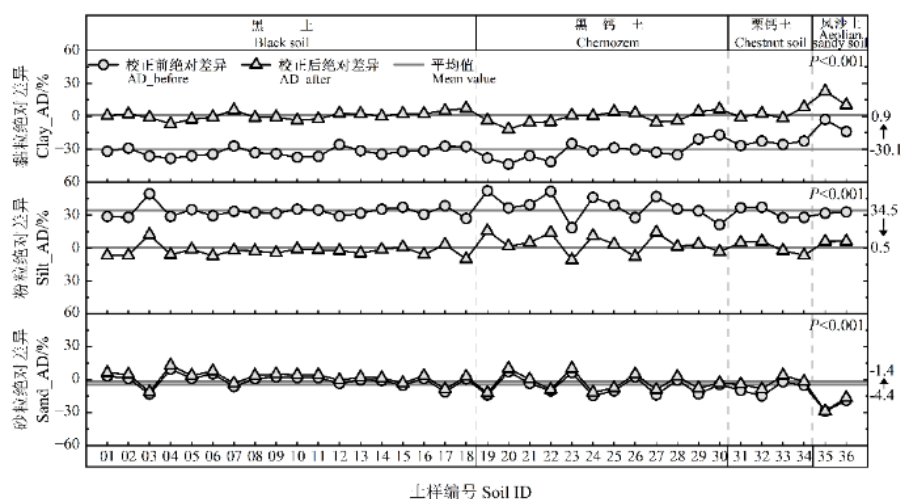


图 4 回归分析法校正前后绝对差异的比较图

Fig. 4 Comparison of absolute differences before and after regression-based correction

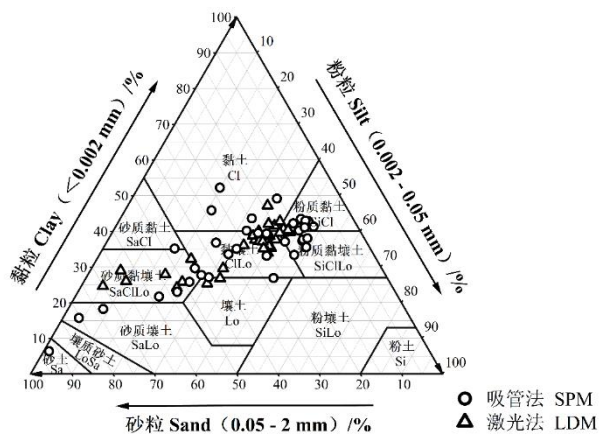
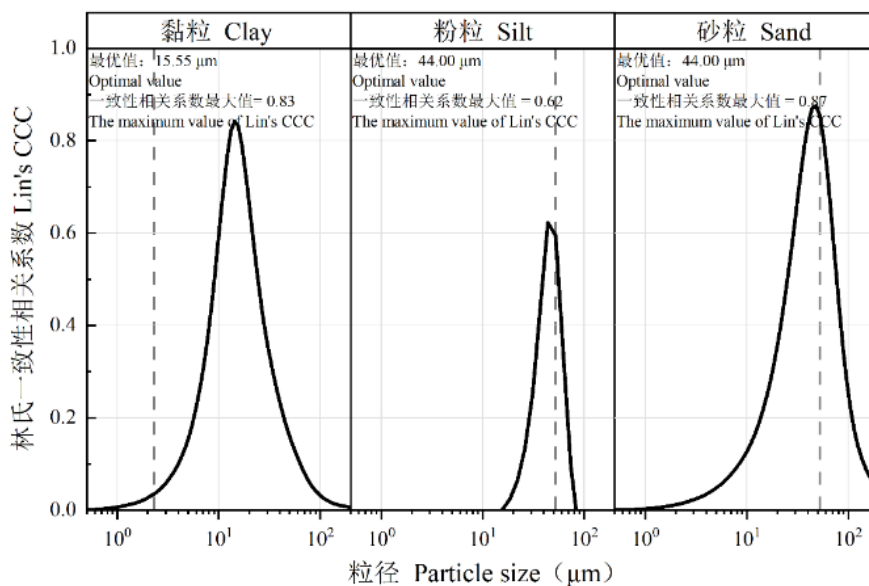


Fig. 5 Comparison of the sieve-pipette method(SPM) results and the regression-corrected laser diffraction method (LDM) results

2.4 林氏一致性相关系数校正模型

采用林氏一致性相关系数法对激光法的粒级划分标准进行了优化。优化后,黏粒与粉粒的分级阈值由 0.002 mm 调整为 0.016 mm,粉粒与砂粒的分级阈值由 0.05 mm 调整为 0.044 mm (图 6)。与已有研究相比,本研究确定的黏粒-粉粒阈值相对较高。Makó 等^[33]在研究激光法与吸管法对比时指出,无论是否去除有机质,黏粒-粉粒阈值均应上调,未去除有机质时建议调整为 0.0066 mm,去除有机质后建议为 0.0058 mm,均低于本研究提出的阈值。Fisher 等^[35]则认为,传统方法中<0.002 mm 的黏粒阈值在激光法中约等效于 0.009 mm。Svensson 等^[36]提出最优黏粒-粉粒阈值为 0.0039 mm,也低于本研究的取值。在粉粒-砂粒分级阈值方面,现有研究相对较少。本研究确定的 0.044 mm 显著低于传统吸管法中的 0.05 mm。

经校正后,激光法测得的黏粒、粉粒和砂粒含量平均绝对差异分别由原来的-30.1%、34.5%和-4.4%显著降低至 1.3%、-3.4%和 2.1% (图 7), Wilcoxon 符号秩检验结果表明两种方法之间存在极显著差异 ($P<0.001$)。校正效果在不同粒级上表现不同。所有样品的粉粒含量绝对差异均有所下降。绝大多数样品的黏粒含量绝对差异也明显降低,仅有一个风沙土样品在校正后与吸管法的差异略有增大,但增幅较小,为 1.4%。同样,砂粒含量的校正效果相对复杂,共有 19 个样品在校正后与吸管法的差异呈现增加趋势,表明该方法在砂粒段的改进幅度有限。土壤质地类型判别的准确率从 5.6%提高至 38.9% (图 8)。校正后,土壤质地三角图中散点整体向左上方移动,更接近于吸管法的散点分布。



注：灰色虚线代表原始的粒径分级阈值。Note: The gray dashed line denotes the original particle-size classification thresholds.

图 6 林氏一致性相关系数法调整最佳粒径分级阈值

Fig. 6 Adjustment of optimal particle size classification thresholds using the Lin's Concordance Correlation Coefficient(Lin's CCC) method

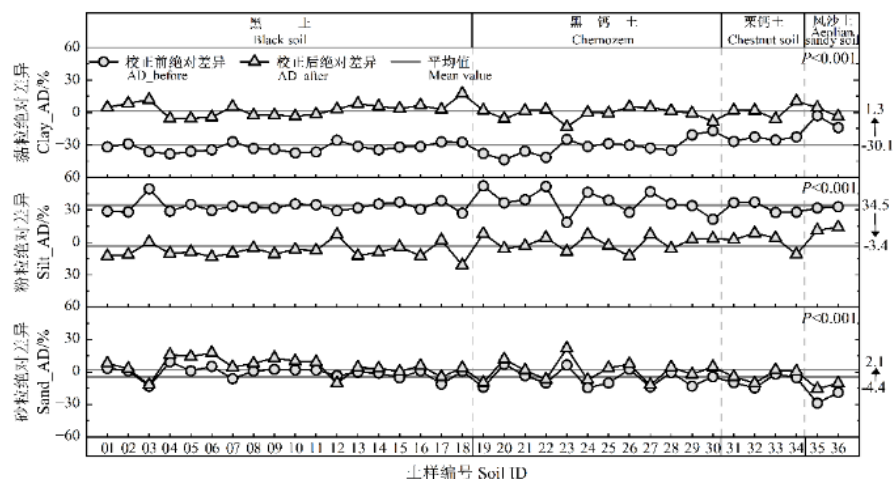


图 7 林氏一致性相关系数法校正前后绝对差异比较图

Fig. 7 Comparison of absolute differences before and after Lin's Concordance Correlation Coefficient-based correction

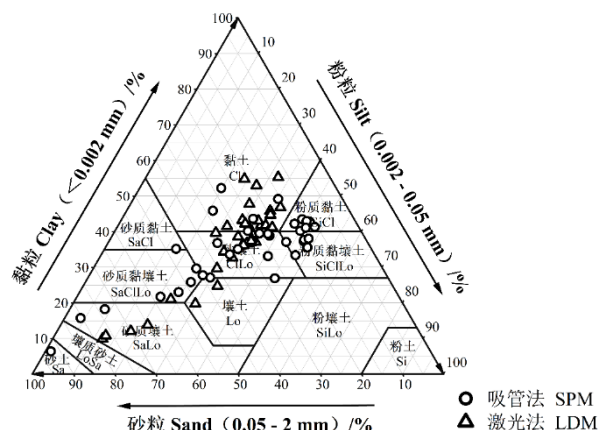


图 8 吸管法与林氏一致性相关系数法校正后激光法结果比较

Fig. 8 Comparison of the sieve-pipette method (SPM) results and the laser diffraction method (LDM) results corrected using Lin's Concordance Correlation Coefficient

3 结论

激光法和吸管法在测定东北黑土区土壤机械组成时存在显著差异。与吸管法相比,激光法测定的黏粒含量整体偏低,粉粒含量整体偏高,而砂粒含量出现高估和低估的样品比例分别为 38.9%和 61.1%。两种方法测得的黏粒、粉粒和砂粒含量平均绝对差异分别为-30.1%、34.5%和-4.4%。引入校正模型可显著降低激光法与吸管法的差异。其中,回归校正模型将黏粒、粉粒和砂粒含量的平均绝对差异分别缩减至 0.9%、0.5%和-1.4%,质地类型判别正确率提升至 36.1%;林氏一致性相关系数校正模型则将平均绝对差异分别降至 1.3%、-3.4%和 2.1%,质地类型判别正确率提高至 38.9%。鉴于激光法测定结果受土壤类型、仪器型号及实验方法等多种因素影响,建议在实际应用中结合具体条件建立针对性校正模型,以增强两种方法结果的一致性,提升数据的可比性与应用价值。

参考文献 (References)

- [1] Huang C Y, Xu J M. Soil science[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010. [黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.]
- [2] Soil Survey Division Staff. Soil Survey Manual[M]. Washington D.C.: United States Department of Agriculture, 1993.
- [3] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation (version 2009) [R]. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 365. College Station, Texas, USA: Texas A&M University System, 2011.
- [4] International Organization for Standardization. ISO 11277:2009, Soil quality — Determination of particle size distribution in mineral soil material — Method by sieving and sedimentation[S]. Geneva: ISO, 2009.
- [5] Gee G W, OR D. Particle-size analysis[M] // Dane J H, Topp G C. Methods of soil analysis, part 4: Physical methods. Madison, WI: Soil Science Society of America, 2002: 255-294.
- [6] Cornillaut J. Particle size analyzer[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1971, 7(6): 288.
- [7] Weiss E L, Frock H N. Rapid analysis of particle size distributions by laser light scattering[J]. Powder Technology, 1976, 14(2): 287-293.
- [8] Loizeau J L, Arbouille D, Santiago S, et al. Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments[J]. Sedimentology, 1994, 41(2): 353-361.
- [9] 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.
- [10] Yang J L, Zhang G L, Li D C, et al. Relationships of soil particle size distribution between sieve-pipette and laser diffraction methods[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5): 772-780. [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.]
- [11] 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.
- [12] Callesen I, Palviainen M, Armolaitis K, et al. Soil texture analysis by laser diffraction and sedimentation and sieving—method and instrument comparison with a focus on Nordic and Baltic forest soils[J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2023, 6: 1144845.
- [13] Liu X M, Huang Y F. An experiment study on employing laser grain-size analyzer to analyze soil mechanical composition[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(4): 579-582. [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.]
- [14] Vdović N, Obhodaš 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, 61(6): 854-864.
- [15] Faé G S, Montes F, Bazilevskaya E, et al. Making soil particle size analysis by laser diffraction compatible with standard soil texture determination methods[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83(4): 1244-1252.
- [16] Bieganski A, Ryżak M, Socha A, et al. Laser diffractometry in the measurements of soil and sediment particle size distribution[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2018: 215-279.
- [17] Goossens D. Techniques to measure grain-size distributions of loamy sediments: A comparative study of ten instruments for wet analysis[J]. Sedimentology, 2008, 55(1): 65-96.
- [18] Beuselinck L, Govers G, Poesen J, et al. Grain-size analysis by laser diffractometry: Comparison with the sieve-pipette method[J]. Catena, 1998, 32(3/4): 193-208.
- [19] 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.
- [20] Qiu W W, Hu W, Curtin D, et al. Soil particle size range correction for improved calibration relationship between the laser-diffraction method and sieve-pipette method[J]. Pedosphere, 2021, 31(1): 134-144.
- [21] Wang B, Zheng F L, An J, et al. Comparative study of particle size distribution by laser diffraction method and pipette method in black soil region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(2): 134-139, 143. [王彬, 郑粉莉, 安娟, 等. 激光衍射法与吸管法对东北黑土区土壤粒径分布测定的差异性研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 134-139, 143.]
- [22] Li X L, Wen M L, Gao X F. Comparative study on soil particle size distribution measured by pipette method and laser diffraction method[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(3): 57-59, 91. [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.]
- [23] Wang D A, Liu G, Wang X Y, et al. Comparative study on particle size distribution of eroded sediment by laser method and pipette method in black soil region of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(1): 114-122. [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.]
- [24] Bai X, Yang Y, Huang T, et al. Applicability of laser diffraction method for soil particle size distribution analysis of five soil orders in the water erosion region of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 76(4): 303-316.
- [25] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]

- [26] Lin L I. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility[J]. *Biometrics*, 1989, 45(1): 255-268.
- [27] Miller W P, Radcliffe D E, Miller D M. An historical perspective on the theory and practice of soil mechanical analysis[J]. *Journal of Agronomic Education*, 1988, 17(1): 24-28.
- [28] 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.
- [29] Zhu Y, Zhang Z D, Liu C, et al. Comparison of laser diffraction method and pipette method on soil particle size distribution determination—A case study of variously degraded kastanozem[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(3): 62-67, 204. [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.]
- [30] Kowalenko C G, Babuin D. Inherent factors limiting the use of laser diffraction for determining particle size distributions of soil and related samples[J]. *Geoderma*, 2013, 193/194: 22-28.
- [31] Yang Y, Wang L J, 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.
- [32] 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.
- [33] Makó A, Tóth G, Weynants M, et al. Pedotransfer functions for converting laser diffraction particle-size data to conventional values[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(5): 769-782.
- [34] Polakowski C, Makó A, Sochan A, et al. Recommendations for soil sample preparation, pretreatment, and data conversion for texture classification in laser diffraction particle size analysis[J]. *Geoderma*, 2023, 430: 116358.
- [35] Fisher P, Aumann C, Chia K, et al. Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis[J]. *PLoS One*, 2017, 12(5): e0176510.
- [36] Svensson D N, Messing I, Barron J. An investigation in laser diffraction soil particle size distribution analysis to obtain compatible results with sieve and pipette method[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 223: 105450.

(责任编辑: 檀满枝)