

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.09.015

王凤香, 蒙薪赞, 慈恩, 等. 吸管法和激光法测定紫色土机械组成对比研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(9): 164-172.

吸管法和激光法测定紫色土机械组成对比研究

王凤香¹, 蒙薪赞¹, 慈恩^{1,2}, 刘彬¹, 高佳佳^{1,2}, 唐江³1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400715;
3. 中化作物保护品有限公司, 上海 200126

摘要: 吸管法是测定土壤机械组成的经典方法, 激光法是测定土壤机械组成的简便方法. 为探究两者在紫色土机械组成测定上的差异以及两者之间的联系, 分别采用两种方法测定 145 个紫色土样品的机械组成, 并建立线性方程、随机森林回归(Random Forest Regression, RFR)模型和支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)模型进行比较分析. 结果表明: ① 相较于吸管法, 激光法所测紫色土黏粒含量和粉粒含量均偏高, 所测砂粒含量则偏低; ② 随着土壤砾石含量的增加, 两种方法所测的相同粒级含量差值逐渐增大, 且差值从大到小依次为: 砂粒、粉粒、黏粒; ③ 相比于 pH>7.5 的紫色土, 两种方法所测的相同粒级含量差值明显大于 pH≤7.5 的紫色土, 且差值从大到小依次为: 砂粒、粉粒、黏粒. 总体来看, 紫色土的砾石含量是影响两种方法所测机械组成关联效果的一个关键因素, 对于砾石含量≤5%的紫色土, 两种方法的测定结果有很好的关联性, 可采用激光法替代吸管法, 但测定结果需要校正, 建议选用拟合效果较好的 RFR 或 SVR 模型进行校正.

关键词: 紫色土; 机械组成; 激光法; 吸管法

中图分类号: S152.3 文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)09-0164-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparative Study on Mechanical Composition of Purple Soil Determined by Pipette Method and Laser Diffraction Method

WANG Fengxiang¹, MENG Xinyun¹, CI En^{1,2},
LIU Bin¹, GAO Jiajia^{1,2}, TANG Jiang³1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Engineering Research Center of Agricultural Non-Point Source Pollution Control in Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715, China;
3. Sinochem International Crop Care Company Limited, Shanghai 200126, China

Abstract: The pipette method is a classical technique for determining the mechanical composition of soil, while laser diffraction method is a simplified approach. In order to investigate the disparities in mechanical composition between purple soils and their relationship, both methods were employed to analyze 145 sam-

收稿日期: 2023-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977002).

作者简介: 王凤香, 硕士研究生, 主要从事土壤物理学研究.

通信作者: 慈恩, 教授, 博士研究生导师.

pls. Linear equations, random forest regression (RFR) models, and support vector regression machines (SVR) were established for comparative analysis. The findings indicate that: ① Compared to the pipette method, the laser diffraction method yielded higher measurements of clay and silt content in purple soils, but lower measurements of sand content. ② As gravel content increased in soil samples, differences between the two methods gradually became more pronounced for each grain size category, with sand exhibiting the greatest disparity followed by silt and clay. ③ In comparison to purple soil with a $\text{pH} \leq 7.5$, the difference in particle size measured by the two methods was significantly greater for purple soil with a $\text{pH} > 7.5$, and the difference followed the order of: sand, powder, clay. The gravel content of purple soil was generally considered as a key factor affecting the correlation between particle size distribution measurements obtained from both methods. When the gravel content was $\leq 5\%$, measurement results of two methods had good correlation, and laser diffraction method could be used to replace the pipette method. However, calibration of measurement results is necessary when using laser diffraction method, and it is recommended to use RFR or SVR model for calibration due to their better fitting effect.

Key words: purple soil; particle size distribution; laser diffraction method; pipette method

土壤机械组成是指土壤中各粒级的相对含量(或称颗粒组成), 可由其确定土壤质地, 是土壤的一项重要属性指标^[1]. 紫色土养分储量高且循环速度快, 是我国西南地区农业发展的重要土壤资源^[2], 其土壤机械组成的快速、准确测定对于区域土壤调查的高效实施具有重要现实意义. 吸管法是测定土壤机械组成的经典方法, 但较为费时费力且耗样量大^[3], 激光法(又称激光衍射法或激光粒度仪法)则有效克服了上述问题, 已成为土壤机械组成测定新兴方法的代表. 自 20 世纪 90 年代以来, 就有学者将这两种方法测定的土壤粒度进行比较^[4]. 不少研究表明, 相较于吸管法, 用激光粒度仪测得的黏粒含量偏低, 粉粒含量偏高^[5-9]. 杨金玲等^[3]用吸管法和激光法测得的土壤砂粒含量各有高低, 白雪等^[5]认为两种方法所测的砂粒含量高低因土壤类型而异, 李学林等^[6]研究则显示吸管法测定的砂粒含量大于激光法所测. 此外, 有不少学者对吸管法和激光法测得的土壤机械组成结果进行转换研究, 多采用建立线性方程的方法^[3-9], 但拟合结果各不相同, 普适性有限, 也有人使用多项式回归和指数回归进行拟合^[10]. 然而, 有关这两种方法测定紫色土机械组成的对比研究非常缺乏, 制约了人们对其测定效果差异的全面认识. 为此, 本研究基于紫色土, 详细探讨两种方法测定其颗粒组成的差异及关联效果, 以期为实现紫色土机械组成的快速、准确测定提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市地处四川盆地东部, 地势起伏大, 层状地貌明显且形状各异, 以山地、丘陵为主. 重庆市有丰富多样的土壤类型, 根据《重庆市第三次全国土壤普查土壤发生分类暂行方案》可分为 5 个土纲、8 个亚纲、12 个土类. 西部丘陵区广泛分布着紫色土和水稻土; 中部平行岭谷区, 紫色土、黄壤、石灰(岩)土呈带状相间分布; 东北部和东南部则主要分布着黄壤、黄棕壤和山地草甸土等. 紫色土是重庆市分布面积最广的土类. 虽然紫色岩层的形成年代非常久远, 且一般情况下, 成土时间越长, 土壤发育越成熟, 但受多种因素的影响, 全新统以前风化发育的土壤多被侵蚀殆尽, 现在的紫色土仍处于相对年龄较小的幼年阶段^[11-12].

1.2 供试土壤

本研究采集重庆市境内的 145 个紫色土样品为供试土壤^[13]. 土壤类型涉及 3 个亚类和 8 个土属, 基本覆盖了四川盆地的主要紫色土类型(表 1), 其中 $\text{pH} \leq 6.5$ 的土壤样品为酸性紫色土, $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 的土壤样品为中性紫色土, $\text{pH} > 7.5$ 的土壤样品为石灰性紫色土.

表 1 供试土壤的类型分布

亚类	土属	样品数/个
酸性紫色土	红紫泥土、酸紫泥土	67
中性紫色土	灰棕紫泥土、暗紫泥土、脱钙紫泥土	27
石灰性紫色土	棕紫泥土、红棕紫泥土、原生钙质紫泥土	51

1.3 机械组成测定

1.3.1 吸管法

吸管法测定土壤机械组成的具体步骤见文献[14].

1.3.2 激光法

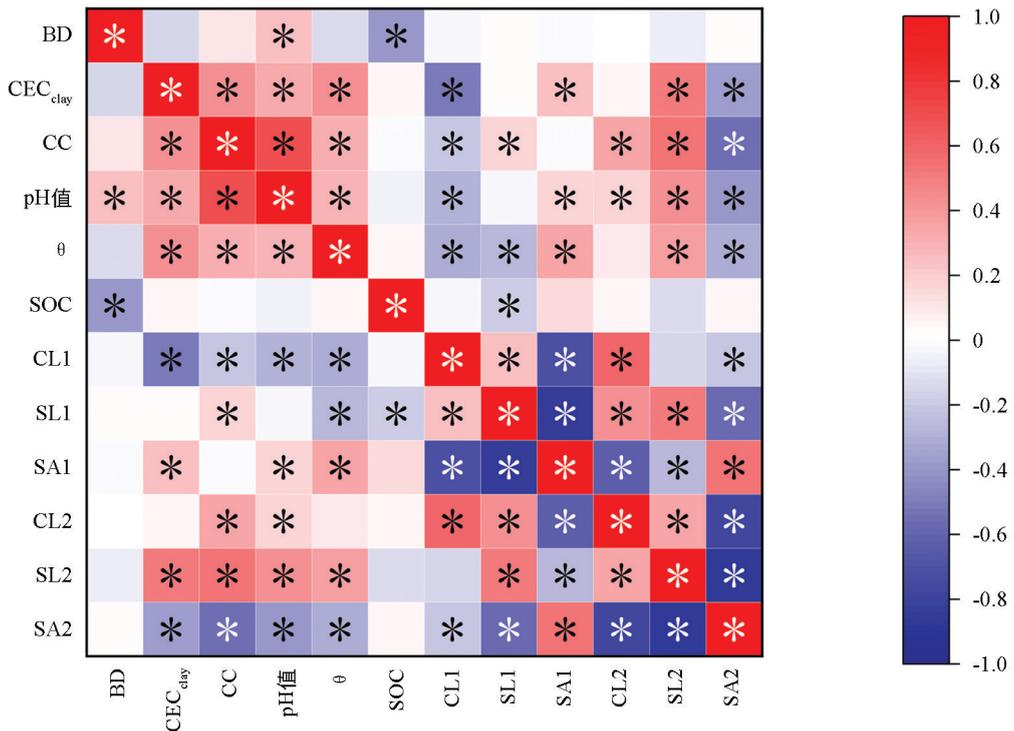
称取 0.5 g 过 2 mm 筛的风干土样, 加入 10 mL 6% 的 H_2O_2 去除有机质, 待样品颜色变淡, 不再有反应时置于电炉上加热以除去过量的 H_2O_2 ; 逐滴加入 0.2 mol/L 的 HCl 搅拌去除样品中的碳酸盐, 直至无气泡产生, 将上述溶液以 7 000 r/min 离心 10 min, 倒掉上清液以除去 Ca^{2+} 和 Cl^- . 不同 pH 值的样品加入不同的分散剂, 石灰性紫色土、中性紫色土、酸性紫色土分别加入体积为 10 mL 0.5 mol/L 的 $1/6(NaPO_3)_6$ 溶液、0.5 mol/L 的 $Na_2C_2O_4$ 溶液、0.5 mol/L 的 NaOH 溶液进行搅拌, 静置 24 h 后, 利用激光粒度仪测定各粒级含量^[14-15].

1.4 土壤颗粒分级和质地分类

本研究的土壤颗粒分级标准和质地分类标准分别采用美国农业部制土壤颗粒分级标准(黏粒 <0.002 mm、粉粒 $0.002\sim0.05$ mm、砂粒 $0.05\sim2$ mm)和美国农业部制土壤质地分类标准^[16].

1.5 模型建立

本研究用吸管法测定样品机械组成的结果作为因变量, 激光法测定样品机械组成的结果作为自变量建立线性方程. 使用 Origin 对容质量、黏粒阳离子交换量(CEC)(cmol/kg)、碳酸钙($CaCO_3$)相当物含量(g/kg)、pH 值、砾石含量(%), 有机质含量(g/kg)以及两种方法测得的机械组成结果进行相关性分析, 如图 1 所示.



BD 表示容质量; CEC_{clay} 表示黏粒阳离子交换量(cmol/kg); CC 表示 $CaCO_3$ 相当物含量(g/kg); θ 表示砾石含量(%); SOC 表示有机质含量(g/kg); CL1 表示吸管法黏粒含量(%); SL1 表示吸管法粉粒含量(%); SA1 表示吸管法砂粒含量(%); CL2 表示激光法黏粒含量(%); SL2 表示激光法粉粒含量(%); SA2 表示激光法砂粒含量(%); * 表示 $p \leq 0.05$.

图 1 相关性分析热力图

根据相关性选取黏粒 CEC、 $CaCO_3$ 相当物含量、pH 值、砾石含量 4 种理化性质和激光粒度仪测定的各粒级结果建立随机森林回归(Random Forest Regression, RFR)模型和支持向量回归机(Support Vector

Regression, SVR)模型, 共同预测吸管法测定的各粒级结果^[17-18]. 以砾石含量和 pH 值分组使用 spsspro 建立线性方程、RFR 模型和 SVR 模型. 随机抽选 80% 的数据进行模型训练, 20% 的数据进行模型测试. 通过 3 个量化指标来衡量模型预测效果, 均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE): 均方误差的平方根, 取值越小, 模型准确度越高; 平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE): 绝对误差的平均值, 能反映预测值误差的实际情况, 取值越小, 模型准确度越高; 决定系数(R^2): 将预测值与只使用均值的情况相比, 结果越接近 1, 模型准确度越高^[19].

1.6 数据处理

分别以砾石含量和 pH 值对数据进行分组, 基于建立模型对数据量的要求, 将 pH 值进行以下分组: $\text{pH} \leq 4.6$, $4.6 < \text{pH} \leq 5.5$, $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$, $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$, $\text{pH} > 7.5$. 对两种方法所测相同粒级含量差值的平均值分组进行变异分析, 以砾石含量分组时剔除 10 组异常数据, 以 pH 值分组时剔除 15 组异常数据^[19].

2 结果与分析

2.1 两种方法测定结果的差异分析

由表 2 可知, 随着砾石含量 θ 的增大, 吸管法和激光法所测的砂粒含量差值 δ 平均值逐渐增大, 从 5.36% 增加至 50.74%, 黏粒和粉粒含量逐渐降低(黏粒和粉粒差值平均值的绝对值逐渐增大), 分别从 -1.75% 和 -3.61% 下降至 -15.05% 和 -35.69%. 在 θ 相同的条件下, 除 $5\% < \theta \leq 10\%$ 时, 两种方法所测的粉粒差值平均值的绝对值小于黏粒差值平均值的绝对值, 其余从大到小均为: 砂粒、粉粒、黏粒. 如图 2b 所示, 吸管法所测数据中, 砂粒含量随着 θ 增加而增加, 粉粒和黏粒的含量大致呈降低的趋势. 如图 2c 所示, 激光法所测数据中, 随着 θ 的增加, 黏粒含量无明显变化, 粉粒含量逐渐增加, 砂粒含量逐渐降低. 由表 3 可知, 随着 pH 值增大, 砂粒的差值平均值逐渐增大, 由 0.32% 增加至 26.46%. 如图 2d 所示, 随着 pH 值的升高, 黏粒和粉粒含量大体呈逐渐降低的趋势. 两种方法测得的紫色土砂粒、粉粒和黏粒含量差值平均值随 θ 和 pH 值增加的变化趋势基本一致(图 2a、图 2d).

表 2 以砾石分组的两种方法所测相同粒级含量差值(δ)

粒级	$\delta(\text{均值})/\%$						
	$\theta=0$	$0 < \theta \leq 5$	$5 < \theta \leq 10$	$10 < \theta \leq 20$	$20 < \theta \leq 40$	$40 < \theta \leq 60$	$60 < \theta \leq 90$
黏粒	-0.82	-1.75	-7.16	-7.22	-11.67	-11.45	-15.05
粉粒	-5.45	-3.61	-5.60	-10.63	-16.68	-20.72	-35.69
砂粒	6.27	5.36	12.76	17.84	28.35	32.17	50.74

注: 差值 δ 为吸管法和激光法所测相同粒级含量之差; θ 为砾石含量(体积百分比).

表 3 以 pH 值分组的两种方法所测相同粒级含量差值(δ)

粒级	$\delta(\text{均值})/\%$				
	$\text{pH} \leq 4.6$	$4.6 < \text{pH} \leq 5.5$	$5.5 < \text{pH} \leq 6.5$	$6.5 < \text{pH} \leq 7.5$	$\text{pH} > 7.5$
黏粒	3.51	-3.09	-2.96	-1.87	-11.65
粉粒	-3.83	-0.79	-6.61	-9.61	-14.81
砂粒	0.32	3.87	9.58	11.47	26.46

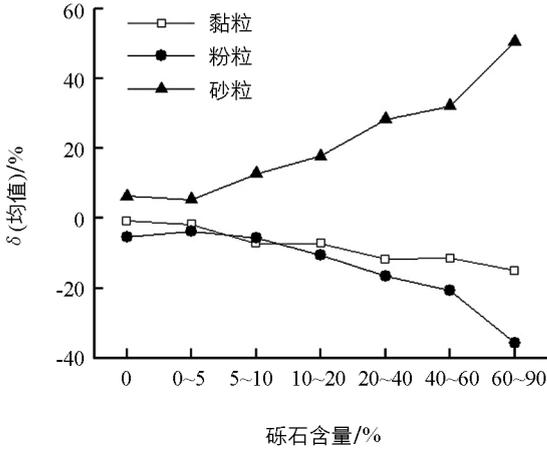
注: 差值 δ 为吸管法和激光法所测相同粒级含量之差.

2.2 两种方法测定结果的关联分析

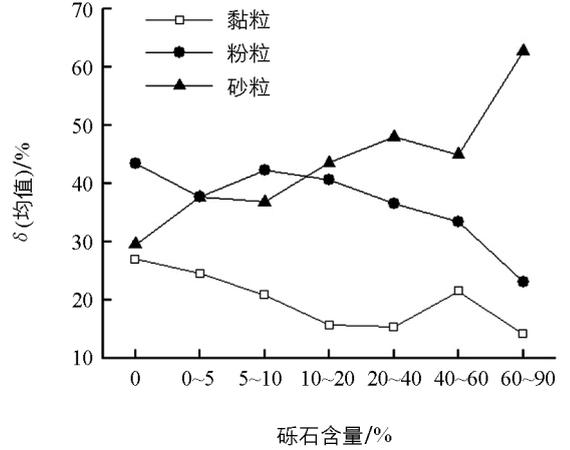
2.2.1 黏粒

由表 4 可知, 在 $\theta=0$ 的条件下, 吸管法和激光法之间的线性方程 R^2 为 0.903; 当 $0 < \theta \leq 5\%$ 时, R^2 降低至 0.604; $\theta > 5\%$ 时, 吸管法和激光法测得的黏粒含量之间相关性无统计学意义($p > 0.05$)^[19]. RFR 模

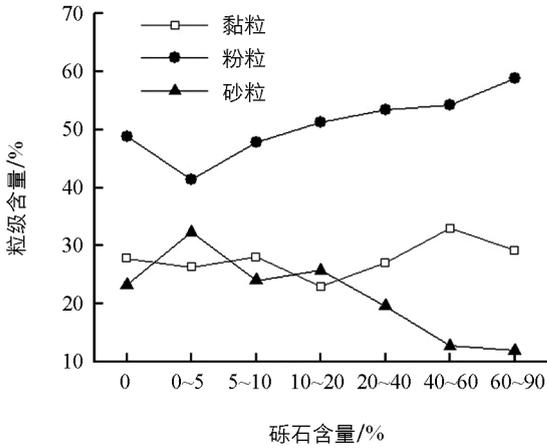
型、SVR 模型在线性方程的基础上分别提高 R^2 至 0.957, 0.920 和 0.941, 0.880, 并且拟合效果与线性方程拟合效果变化趋势一致。



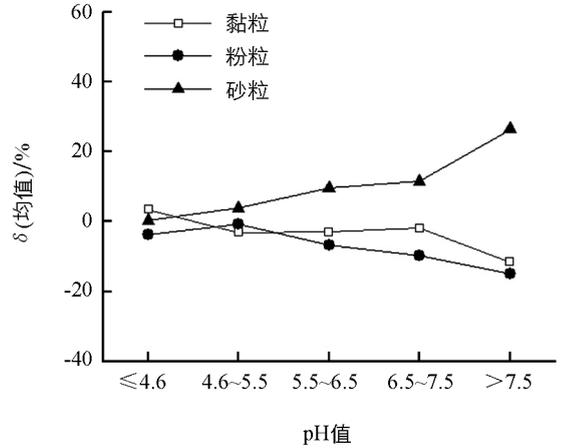
a. δ 随砾石含量的变化



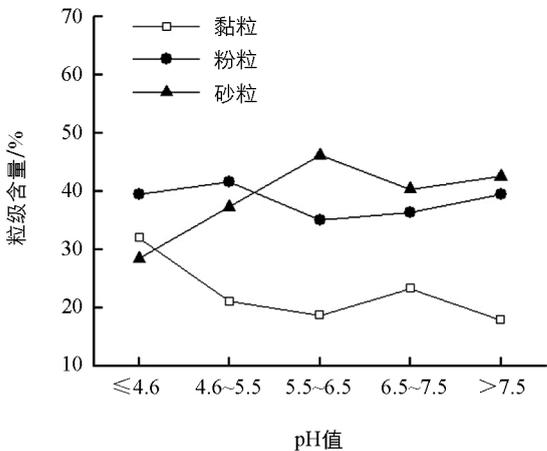
b. 吸管所测不同粒级含量随砾石含量的变化



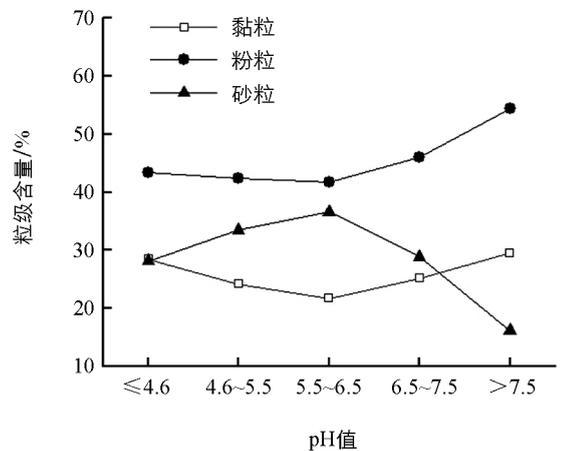
c. 激光法所测不同粒级含量随砾石含量的变化



d. δ 随pH值的变化



e. 吸管所测不同粒级含量随pH值的变化



f. 激光法所测不同粒级含量随pH值的变化

a,d 分别为吸管法和激光法所测相同粒级含量差值 δ 随砾石含量和 pH 值的变化; b,e 分别为吸管法所测不同粒级含量随砾石含量和 pH 值的变化; c,f 分别为激光法所测不同粒级含量随砾石含量和 pH 值的变化。

图 2 两种方法所测紫色土不同粒级含量随砾石含量和 pH 值的变化

表 4 以砾石分组的两种方法所测黏粒的关联分析

砾石含量/ %	线性方程			RFR 模型			SVR 模型			样本数/ 个
	线性方程	R^2	p	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	
$\theta=0$	$y=1.179x-5.798$	0.903	<0.001	2.261	1.686	0.957	1.751	1.673	0.941	15
$0<\theta\leq 5$	$y=0.738x+5.164$	0.604	<0.001	2.980	2.515	0.920	4.476	3.619	0.880	53
$5<\theta\leq 10$			0.161							18
$10<\theta\leq 20$			0.229							19
$20<\theta\leq 40$			0.128							12
$40<\theta\leq 60$			0.457							9
$60<\theta\leq 90$			0.540							9

由表 5 可知, 以 pH 值分组吸管法和激光法之间的线性方程 R^2 均小于 0.8, pH >7.5 时, R^2 最小, 为 0.259. RFR 模型、SVR 模型在线性方程的基础上均提高了拟合效果. 当 pH ≤ 7.5 时, SVR 模型的 R^2 均在 0.8 以上.

表 5 以 pH 值分组的两种方法所测黏粒的关联分析

pH 值	线性方程			RFR 模型			SVR 模型			样本数/ 个
	线性方程	R^2	p	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	
pH ≤ 4.6	$y=1.045x+2.236$	0.656	<0.001	2.498	1.724	0.752	4.940	4.659	0.868	15
$4.6<pH\leq 5.5$	$y=0.742x+3.155$	0.796	<0.001	2.408	2.160	0.832	4.256	3.516	0.835	24
$5.5<pH\leq 6.5$	$y=0.954x-1.952$	0.694	<0.001	1.386	1.091	0.971	1.915	1.370	0.960	24
$6.5<pH\leq 7.5$	$y=1.019x-2.351$	0.761	<0.001	2.706	2.490	0.854	3.916	3.165	0.920	16
pH >7.5	$y=0.416x+5.602$	0.259	<0.001	2.138	1.671	0.695	4.394	2.774	0.774	51

2.2.2 粉粒

由表 6 可知, 在 $\theta\leq 20\%$ 时, 吸管法和激光法线性方程的 R^2 随着 θ 增加而增加, 由 0.523 增加至 0.855; 当 $20\%<\theta\leq 40\%$ 时, R^2 为 0.336; $\theta>40\%$ 时, 吸管法和激光法所测结果之间没有相关性. RFR 模型、SVR 模型在线性方程的基础上提高了 R^2 , 当 $\theta\leq 20\%$ 时, R^2 均在 0.8 以上. 当 $20\%<\theta\leq 40\%$ 时, RFR 模型、SVR 模型分别将 R^2 提高至 0.502, 0.454.

表 6 以砾石分组的两种方法所测粉粒的关联分析

砾石含量/ %	线性方程			RFR 模型			SVR 模型			样本数/ 个
	线性方程	R^2	p	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	
$\theta=0$	$y=0.992x-5.055$	0.523	0.002	2.384	2.360	0.892	3.155	2.816	0.816	15
$0<\theta\leq 5$	$y=1.099x-7.692$	0.714	<0.001	2.196	1.887	0.954	3.072	2.587	0.930	53
$5<\theta\leq 10$	$y=1.000x-5.614$	0.748	<0.001	3.513	3.398	0.864	3.171	3.045	0.942	18
$10<\theta\leq 20$	$y=0.842x-2.507$	0.855	<0.001	3.750	3.467	0.933	2.656	2.489	0.945	19
$20<\theta\leq 40$	$y=0.804x-6.231$	0.336	0.048	8.352	7.992	0.502	8.930	6.412	0.454	12
$40<\theta\leq 60$			0.297							9
$60<\theta\leq 90$			0.058							9

由表 7 可知, pH ≤ 4.6 时吸管法和激光法线性方程的 R^2 最大, 为 0.924, $5.5<pH\leq 6.5$ 时, R^2 为 0.876, 其余 R^2 均小于 0.8. RFR 模型、SVR 模型在线性方程的基础上均提高了 R^2 . 当 pH ≤ 7.5 时, SVR 模型得到的 R^2 均在 0.8 以上.

表 7 以 pH 值分组的两种方法所测粉粒的关联分析

pH 值	线性方程			RFR 模型			SVR 模型			样本数/ 个
	线性方程	R^2	p	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	
$\text{pH} \leq 4.6$	$y = 1.343x - 18.702$	0.924	< 0.001	2.026	2.025	0.982	0.736	0.676	0.993	15
$4.6 < \text{pH} \leq 5.5$	$y = 1.134x - 6.479$	0.777	< 0.001	4.091	3.459	0.920	4.603	3.828	0.887	24
$5.5 < \text{pH} \leq 6.5$	$y = 0.844x - 0.132$	0.876	< 0.001	1.353	1.202	0.981	2.829	2.343	0.968	24
$6.5 < \text{pH} \leq 7.5$	$y = 0.684x + 4.907$	0.554	0.001	4.614	4.086	0.737	3.954	3.623	0.829	16
$\text{pH} > 7.5$	$y = 0.678x + 2.668$	0.185	0.002	7.658	5.951	0.618	8.241	7.152	0.438	51

2.2.3 砂粒

由表 8 可知, 当 $\theta > 20\%$ 时, 吸管法和激光法之间无相关性, RFR 模型、SVR 模型在线性方程的基础上均将 R^2 提高至 0.8 以上, R^2 随 θ 增加而减小。

表 8 以砾石含量分组的两种方法所测砂粒的关联分析

砾石含量/ %	线性方程			RFR 模型			SVR 模型			样本数/ 个
	线性方程	R^2	p	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	
$\theta = 0$	$y = 1.350x - 1.878$	0.801	< 0.001	2.651	1.733	0.964	1.548	1.317	0.992	15
$0 < \theta \leq 5$	$y = 0.989x + 5.714$	0.895	< 0.001	2.698	2.304	0.957	3.371	2.785	0.969	53
$5 < \theta \leq 10$	$y = 0.626x + 21.757$	0.694	< 0.001	5.973	5.693	0.837	3.114	2.711	0.960	18
$10 < \theta \leq 20$	$y = 0.643x + 27.042$	0.763	< 0.001	7.447	6.390	0.824	7.253	6.972	0.836	19
$20 < \theta \leq 40$			0.545							12
$40 < \theta \leq 60$			0.345							9
$60 < \theta \leq 90$			0.059							9

由表 9 可知, 吸管法和激光法线性方程 R^2 随 pH 值升高而降低, RFR 模型、SVR 模型在线性方程的基础上均提高 R^2 , SVR 模型相对 RFR 模型效果较好, 可将 R^2 提高至 0.8 以上. 综上可知, 对于酸性、中性紫色土以及 $\theta < 20\%$ 的石灰性紫色土, SVR 模型 R^2 均能达到 0.8 以上, 且 SVR 模型 R^2 始终高于线性方程。

表 9 以 pH 值分组的两种方法所测砂粒的关联分析

pH 值	线性方程			RFR 模型			SVR 模型			样本数/ 个
	线性方程	R^2	p	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	
$\text{pH} \leq 4.6$	$y = 1.112x - 2.847$	0.974	< 0.001	1.668	1.644	0.978	3.089	3.007	0.988	15
$4.6 < \text{pH} \leq 5.5$	$y = 1.116x + 0.005$	0.929	< 0.001	2.654	2.461	0.971	3.924	3.696	0.971	24
$5.5 < \text{pH} \leq 6.5$	$y = 0.832x + 15.724$	0.838	< 0.001	2.955	2.386	0.938	2.703	2.362	0.968	24
$6.5 < \text{pH} \leq 7.5$	$y = 0.907x + 14.172$	0.650	< 0.001	5.296	3.839	0.853	4.016	3.621	0.937	16
$\text{pH} > 7.5$	$y = 0.464x + 35.109$	0.149	0.005	6.178	5.319	0.757	6.346	5.073	0.845	51

将吸管法和激光法所测数据进行土壤质地分类(表 10), 结果发现, 使用激光法未能测出壤质砂土和砂质黏壤土这两种土壤质地类型, 说明吸管法相较激光法所测得的土壤质地类型更丰富. 因此不建议直接使用激光法所测紫色土机械组成数据划分土壤质地. 需要对激光法测得的数据进行校正, 以获得更准确的土壤质地类型^[20-22].

表 10 供试样品的土壤质地类型

土壤质地	样本数/个		土壤质地	样本数/个	
	吸管法	激光法		吸管法	激光法
壤质砂土	1	0	粉质黏壤土	13	44
砂质壤土	34	12	黏壤土	16	9
粉壤土	21	30	粉质黏土	4	9
壤土	45	36	黏土	3	5
砂质黏壤土	8	0	总计	145	145

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究运用两种方法(吸管法和激光法)对紫色土机械组成进行测定,结果发现,相较于吸管法,激光法测得的紫色土黏粒含量和粉粒含量偏高,砂粒含量偏低(表1)。这与以往基于其他土壤的研究结果不同^[5-9]。究其原因,可能与紫色土自身特性和样品分散有关。不少紫色土样品或多或少含有一定量的泥质岩(如泥岩、页岩)碎屑,在其研磨、过筛(2 mm)时,会有部分该类岩屑被破碎为<2 mm的砂粒级泥质岩屑^[23],其大小和砂粒类似,两种方法所选用的分散剂(如盐酸)对砂粒级泥质岩屑有强烈的破坏作用,但由于激光法所需的样品量远小于吸管法^[14, 24],使得其分散处理对待测紫色土样品内的砂粒级泥质岩屑破坏得更为彻底,基本上被分散为黏粒和粉粒,从而导致该方法所测的砂粒含量低于吸管法,而黏粒和粉粒含量则相对偏高。此外,结果显示,对于pH>7.5的石灰性紫色土,两种方法所测相同粒级含量的差值明显大于pH≤7.5的酸性和中性紫色土,以砂粒最为明显(图2d)。这可能与石灰性紫色土发育度不高且富含钙质胶结物质有关^[2],该特性会显著增加吸管法的样品分散难度,从而导致两种方法所测结果差异较大。

结果显示,随着紫色土砾石含量的增加,两种方法所测机械组成结果的差距逐渐增大(图2a);当砾石含量>5%时,两种方法所测黏粒含量之间相关性无统计学意义($p>0.05$),当砾石含量>40%时,两种方法所测砂粒含量之间也无统计学意义($p>0.05$)。但以pH值分组时,都表现为相关性有统计学意义($p<0.05$)。这不仅充分反映紫色土的砾石含量是影响两种方法所测机械组成关联效果的一个关键因素,同时表明,对于紫色土,要想采用激光法替代吸管法并能很好地进行转换校正,所测样品的砾石含量最好不要超过5%。在以往对其他土壤的研究中,两种方法结果的转换效果因土壤不同而效果不同,一些研究发现黏粒和砂粒转换效果较好,粉粒转换效果不理想($R^2=0.403$),如水稻土和黄土^[6]。分析其产生差异的原因可能为土壤样品质地不同、实验操作过程中产生的误差以及两种方法原理的不同^[25]。

目前,关于两种方法所测土壤机械组成进行转换的研究,主要集中在对各粒级进行这两种方法结果的直接转化分析,很少涉及基于属性分组的关联研究^[3-9],本研究将各粒级以砾石含量和pH值进行分组,使每组受砾石含量或pH值的影响大致相同,建立线性方程和机器学习模型,提高线性方程和机器学习模型的拟合效果^[26]。RFR模型和SVR模型是本研究引入机器学习回归模型中,预测吸管法所测机械组成结果相对准确的模型。碳酸盐含量和黏粒阳离子交换量与土壤各粒级土粒含量密切相关同时也相互影响^[27-28]。因此,相较于单独使用激光法所测各粒级含量转化得到的吸管法各粒级含量,加入碳酸钙相当物含量、阳离子交换量、砾石含量、pH值的RFR模型和SVR模型拟合效果更好,预测准确性更高。

3.2 结论

1) 相较于吸管法,激光法测得的紫色土黏粒含量和粉粒含量偏高,测得的砂粒含量偏低;随着紫色土砾石含量的增加,两种方法所测的相同粒级含量差值逐渐增大,且差值从大到小依次为:砂粒、粉粒、黏粒;对于pH>7.5的紫色土,两种方法所测的相同粒级含量差值明显大于pH≤7.5的紫色土,且差值从大到小依次为:砂粒、粉粒、黏粒。

2) 紫色土的砾石含量是影响两种方法所测机械组成关联效果的一个关键因素;对于砾石含量≤5%的紫色土,两种方法测定结果有很好的关联性,可采用激光法替代吸管法,但测定结果需要校正,建议选用拟合效果较好的RFR模型或SVR模型进行校正。

参考文献:

- [1] 吕贻忠,李保国. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [2] 何毓蓉. 中国紫色土-下篇 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 白雪, 杨扬, 黄婷婷, 等. 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 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 84-90.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] IGAZ D, AYDIN E, ŠINKOVIČOVÁ M, et al. Laser Diffraction as an Innovative Alternative to Standard Pipette Method for Determination of Soil Texture Classes in Central Europe [J]. *Water*, 2020, 12(5): 1232.
- [11] 慈恩. 中国土系志·重庆卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [12] 高美荣, 唐家良, 况福虹. 四川盆地紫色岩及其风化壳地球化学特征研究数据集(1990 年以前) [J]. *中国科学数据*, 2021, 6(2): 254-260.
- [13] 张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [14] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999.
- [16] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 刘彬, 慈恩, 刘俊延, 等. 酸性紫色土盐基饱和度和 pH 值的关联分析及分类学意义 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(4): 65-72.
- [18] 杨家伟, 王天巍, 包莹莹, 等. 黏粒阳离子交换量估测模型的优化研究 [J]. *土壤学报*, 2021, 58(2): 514-525.
- [19] S. 伯恩斯坦, R. 伯恩斯坦. 统计学原理(下册)——推断性统计学 [M]. 史道济, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 钟守琴, 刘波, 魏朝富, 等. 紫色泥岩土壤 < 2 mm 岩屑及其对抗剪强度的作用机制 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4846-4858.
- [24] 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): 247-253.
- [25] 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.
- [26] ŠINKOVIČOVÁ M, IGAZ D, KONDRLOVÁ E, et al. Soil Particle Size Analysis by Laser Diffractometry; Result Comparison with Pipette Method [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 245: 072025.
- [27] 杨寻, 汪时机, 李贤, 等. 三峡库区紫色土土-水特征曲线模型对比研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(8): 201-210.
- [28] SPIELVOGEL S, KNICKER H, KÖGEL-KNABNER I. Soil Organic Matter Composition and Soil Lightness [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167(5): 545-555.