

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*

杨艳芳^{1,2} 李德成^{2†} 杨金玲² 张甘霖² 赵玉国² 赵文君²

(¹南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(²土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要 激光衍射技术(Laser diffraction technique, 简称 LD 法)近年来被认为是一种有效的分析土壤颗粒粒径分布(Particle size distribution, PSD)的手段。为检验 LD 法在黏粒含量高的富铁土上应用的可行性,用 LD 法和传统的吸管法实测了 6 个黏性富铁土剖面(黏粒含量 > 40%)不同层次土样的 PSD 数据,比较发现:LD 法能够提供更多颗粒粒径级别,尤其是黏粒部分(< 2 μm)的 PSD 信息,且分析耗时短,效率高。但是 LD 法与吸管法测定的不同粒级土壤颗粒的含量存在一定的差异。两种方法相比,激光衍射法“低估”黏粒和“高估”粉粒,或者沉降法“高估”了黏粒和“低估”了粉粒。虽然在黏性富铁土的黏粒部分未发现两种方法的线性关系,但粉粒和砂粒分别存在显著的线性相关。供试土壤黏粒含量高且分布范围窄是导致上述差异的主要原因。经过模型转换后,LD 法和吸管法 PSD 实测数据之间的误差明显降低,这说明 LD 法可以用于黏性土壤的 PSD 分析。但是 LD 法 PSD 测定结果尚不能直接用于目前基于沉降法的土壤质地三角图,需要一定的数据转换。应该尽快通过对各类代表性土壤进行系统化和规范化的对比研究,提高 LD 技术的可靠性和实用性,建立起基于 LD 技术的新的土壤质地三角图,以便进一步深化其在土壤科学上的应用。

关键词 颗粒粒径分布;激光衍射;吸管法;富铁土

中图分类号 S152 文献标识码 A

颗粒粒径分布(Particle size distribution, PSD)是土壤的一个基本特性,与土壤分类^[1]和土壤持水曲线^[2~4]、导热性^[5]以及保肥性等^[6,7]土壤性质密切相关。

近年来,激光衍射技术(Laser diffraction technique, 简称 LD 法)逐步被用于土壤 PSD 分析^[8~13],与传统的基于沉降原理的 PSD 分析方法(吸管法和比重计法)相比,LD 法具有的优势在于:(1)速度快,在前期处理相同或类似的条件下,LD 法分析一个土样仅需 5~15 min,而沉降法在分析 0.005 mm 和 0.001 mm 颗粒时分别需要 1~2 h 和 24~48 h^[14];(2)是基于体积的 PSD 分析,独立于颗粒密度。而沉降法是基于质量的 PSD 分析,建立在同一土壤粒径不同的颗粒具有相同密度的假设上,这显然与土壤实际情况不同^[15];(3)能够提供更多级别的 PSD 数据,尤其是能够提供一定的黏粒(< 2 μm)的 PSD

数据。而沉降法一般仅提供 < 0.002、0.002~0.02、0.02~0.05、0.05~0.1、0.1~0.25、0.25~0.5、0.5~1 和 1~2 mm 8 个级别的信息,如要获得更多的粒度分布信息,则需要花费更多的时间,因而一般不提供黏粒的 PSD 数据,也无法提供非常详细的 PSD 分布^[16,17]。

现有的研究一般选择不同质地的土壤作为分析对象,将 LD 法与沉降法进行比较^[8,9,11,13],得出的结论也基本一致:第一,与沉降法实测结果相比,LD 法会“低估”黏粒部分,不同的研究“低估”的程度不尽相同;第二,LD 法与沉降法分析的黏粒、粉粒和砂粒的数据之间存在一定的线性关系,可以通过适当的线性模型进行相互转换。

颗粒密度、LD 法分析时的折射指数、颗粒形状被认为是影响 PSD 分析的主要因素^[11,13,18,19],而其中土壤颗粒形状的不规则性被认为是最重要因

* 国家杰出青年科学基金项目(40625001)、国家自然科学基金项目(40601040、40771091)和土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金联合资助

† 通讯作者:李德成(1965~),男,安徽淮南人,博士,副研究员,主要从事土壤资源方面的研究。E-mail: deli@issas.ac.cn

作者简介:杨艳芳(1983~),硕士研究生,土壤资源专业。E-mail: 2006103076@njau.edu.cn; yfyang@issas.ac.cn

收稿日期:2006-12-06;收到修改稿日期:2007-04-30

素^[18,19]。造成 LD 法“低估”黏粒部分的主要原因是:黏粒部分不是绝对的球状,而类似于铁饼状^[20]。沉降法中,非球状粒在液体中沉降时一般趋于以最大横切面垂直于运动方向的形式沉降,这导致沉降时间延长,等于缩小了颗粒当量直径,部分 $> 2 \mu\text{m}$ 的颗粒被“误判”为黏粒($< 2 \mu\text{m}$)。而 LD 法中,非球状的颗粒横切面一般大于同一体积的理论球状颗粒,因此部分小的非球状颗粒的当量直径被夸大,而被“误判”为粉粒。

由于 LD 法和沉降法实测结果不一致主要表现在黏粒部分,而且黏粒由于其矿物学特性和高的比表面,是影响土壤中物质吸附和交换最主要的部分^[21,22],因此有必要对黏性土壤进行专门的对比分析。本研究选择江西鹰潭地区黏性富铁土(黏粒含量 $> 40\%$,颗粒密度 $1.3\sim 1.9 \text{ mg g}^{-3}$)作为研究对象,利用 LD 法和吸管法^[14]分别对其进行 PSD 分析,旨在比较 LD 法和吸管法在黏性富铁土 PSD 分析结果上的差异,探讨 LD 法在黏性土壤 PSD 分析的可行性,以进一步扩展 LD 法在土壤科学研究上的应用。

1 材料与方法

1.1 激光衍射技术分析颗粒粒径分布原理

激光粒度仪测定是依据光学衍射原理(Fraun-

hofer 衍射理论和 Mie 理论)的当量直径,反映颗粒的横截面特征。激光器发出的单色光,经光路变换为平面波的平行光,射向光路中间的透光样品池,分散在液体分散介质中的大小不同颗粒遇光发生不同角度的衍射、散射,衍射、散射后产生的光投向布置在不同方向的光信息接收器(检测器),经光电转换器将衍射、散射转换的信息传给微机进行处理,从而可以转化成粒子的分布信息。目前的激光衍射仪自身都带有从光学信息到粒度分布的转换模块,使用者直接可以获取 $0\sim 2\,000 \mu\text{m}$ 内土壤不同粒径颗粒的体积分布,不再需要自己进行专门的换算。

1.2 采样与分析

供试土样为 1992 年采集的江西鹰潭地区 6 个林地富铁土剖面,剖面基本信息见表 1。土样预处理为:室温风干后的土样过 2 mm 筛,用 6% H_2O_2 除去有机质,用 0.2 mol L^{-1} HCl 除去碳酸盐,用 0.05 mol L^{-1} 的稀 HCl 和蒸馏水淋洗土样去除 Ca^{2+} 离子和氯化物;加入 0.5 mol L^{-1} NaOH 溶液搅拌后放置过夜^[14],用超声仪进行分散(160 W , $10\sim 15 \text{ min}$)。预处理后的土样用吸管法(每个样品称取 10 g)和激光粒度仪(Beckman Coulter LS230, USA: He-Ne 激光,能量 5 mW,波长 750 nm,测试粒径范围 $0.04\sim 2\,000 \mu\text{m}$,每个样品称取 0.1 g 左右)进行 PSD 分析。

1.3 数据处理

所有分析数据的统计处理采用 SPSS 11.0 进行。

表 1 供试林地富铁土剖面的基本信息

Table 1 Basic information of studied forestry red soil profiles

剖面 Profile No.	位置 Location	USDA 分类 ^[23] USDA Classification	植被类型 Vegetation type	成土母质 Parent material
MSJ05	28° 22' N, 116° 24' E	Typical Paleudult	油茶 Tea oil	花岗岩 Granite
MSJ06	28° 23' N, 116° 13' E	Typical Paleudult	杉树 Fir	第四纪红黏土 Quaternary red clay
MSJ08	28° 12' N, 116° 55' E	Typical Paleudult	马尾松 Horsetail pine	第四纪红黏土 Quaternary red clay
MSJ13	28° 23' N, 116° 57' E	Typical Halpludult	马尾松 Horsetail pine	硅质砂岩 Siliceous sandstone
MSJ19	27° 52' N, 117° 45' E	Typical Dystrochrept	灌木、竹子、杉树 Shrub, bamboo, fir	花岗岩 Granite
MSJ22	28° 16' N, 117° 47' E	Typical Dystrochrept	油茶 Tea oil	砂页岩 Sandy shale

2 结果与分析

2.1 LD 法和吸管法的分级和效率比较

本实验研究结果从两个方面来表明 LD 法分析

土壤 PSD 的优越性,一是根据 LD 法实测的土壤 PSD 曲线,在 $0.04\sim 2\,000 \mu\text{m}$ 范围内,LD 法可将颗粒粒径级别划分为 103 个级别;在 $0.04\sim 2 \mu\text{m}$ 范围内,LD 法可进一步再细分为 34 个级别,因此能够提供黏粒的部分 PSD 信息(图 1)。而吸管法则一般仅提

表 2 LD法和吸管法 PSD分析和质地诊断结果比较

Table 2 Comparison between the LD and pipette methods in findings of PSD analysis and texture diagnosis

样本编号 Sample No	深度 Depth (cm)	吸管法 Pipette method				激光衍射法 LD method				误差 Error: LD-Pipette		
		黏粒	粉粒	砂粒	质地	黏粒	粉粒	砂粒	质地	黏粒	粉粒	砂粒
		Clay	Silt	Sand	Texture	Clay	Silt	Sand	Texture	Clay	Silt	Sand
MSJ05-2	10~20	46.3	40.2	13.5	SiC	28.2	56.8	15.0	SiCL	-18.1	16.6	1.5
MSJ05-3	20~30	48.7	34.1	17.2	SiC	28.2	57.1	14.7	SiCL	-20.5	23.0	-2.5
MSJ05-4	30~40	46.2	35.9	17.9	C	26.4	57.0	16.6	SiL	-19.8	21.1	-1.3
MSJ05-5	40~50	41.2	40.2	18.6	C	26.5	60.2	13.3	SiL	-14.7	20.0	-5.3
MSJ05-6	50~60	45.6	33.0	21.4	C	26.6	60.9	12.5	SiL	-19.0	27.9	-8.9
MSJ05-7	60~70	43.5	40.5	16.0	C	25.0	60.3	14.6	SiL	-18.5	19.8	-1.4
MSJ05-8	80~90	52.4	30.5	17.1	SiC	26.6	56.1	17.3	SiL	-25.8	25.6	0.2
MSJ06-1	0~10	47.5	45.6	6.9	C	28.5	64.3	7.1	SiCL	-19.0	18.7	0.2
MSJ06-2	10~20	48.1	46.4	5.5	C	29.8	63.7	6.5	SiCL	-18.3	17.3	1.0
MSJ06-3	20~30	50.5	44.5	5.0	SiC	30.7	62.1	7.2	SiCL	-19.8	17.6	2.2
MSJ06-4	30~40	47.4	43.5	9.1	C	26.8	66.5	6.7	SiL	-20.6	23.0	-2.4
MSJ06-5	40~50	49.9	38.4	11.7	C	26.7	66.6	6.7	SiCL	-23.2	28.2	-5.0
MSJ06-6	50~60	48.3	43.6	8.1	C	29.6	63.5	7.0	SiCL	-18.7	19.9	-1.1
MSJ06-7	60~70	49.0	43.0	8.0	SiC	31.3	62.7	6.1	SiCL	-17.7	19.7	-1.9
MSJ06-9	100~110	50.7	44.2	5.1	C	28.5	64.4	7.1	SiCL	-22.2	20.2	2.0
MSJ06-10	130~140	51.4	42.3	6.3	SiC	24.3	65.8	10.0	SiL	-27.1	23.5	3.7
MSJ06-11	160~170	50.8	36.8	12.4	C	28.2	62.0	9.8	SiCL	-22.6	25.2	-2.6
MSJ08-1	0~10	40.5	41.4	18.1	SiC	27.8	50.6	21.6	SiCL	-12.7	9.2	3.5
MSJ08-2	10~20	40.7	43.3	16.0	C	25.1	50.6	24.3	SiL	-15.6	7.3	8.3
MSJ08-3	20~30	45.1	40.5	14.4	SiC	29.5	51.2	19.3	SiL	-15.6	10.7	4.9
MSJ08-4	30~40	48.7	38.6	12.7	SiC	29.3	51.2	19.5	SiCL	-19.4	12.6	6.8
MSJ08-6	50~60	53.4	36.9	9.7	C	27.8	54.8	17.4	SiCL	-25.6	17.9	7.7
MSJ08-7	60~70	50.8	36.4	12.8	C	29.0	52.7	18.3	SiCL	-21.8	16.3	5.5
MSJ08-8	70~80	49.7	37.9	12.4	SiC	28.5	51.4	20.1	CL	-21.2	13.5	7.7
MSJ08-9	90~100	55.4	35.6	9.0	SiC	30.2	50.8	19.0	SiCL	-25.2	15.2	10.0
MSJ08-10	110~120	53.2	30.3	16.5	SiC	29.1	49.6	21.3	CL	-24.1	19.3	4.8
MSJ08-11	130~140	54.4	37.6	8.0	C	29.9	52.3	17.8	SiCL	-24.5	14.7	9.8
MSJ08-12	150~160	54.9	36.4	8.7	SiC	30.1	52.9	17.0	SiCL	-24.8	16.5	8.3
MSJ08-13	180~200	49.1	41.7	9.2	C	31.9	51.5	16.6	SiCL	-17.2	9.8	7.4
MSJ08-14	250~300	55.9	38.0	6.1	SiC	33.1	53.5	13.3	SiCL	-22.8	15.5	7.2
MSJ08-15	>300	54.0	40.1	5.9	C	30.5	54.4	15.1	SiCL	-23.5	14.3	9.2
MSJ13-2	5~15	49.7	33.4	16.9	C	33.6	54.0	12.4	SiCL	-16.1	20.6	-4.5
MSJ13-3	25~35	47.2	34.6	18.2	C	32.5	51.8	15.7	SiCL	-14.7	17.2	-2.5
MSJ13-4	50~60	40.4	37.9	21.7	C	31.5	52.4	16.1	SiCL	-8.9	14.5	-5.6
MSJ19-1	0~10	42.6	31.5	25.9	C	25.3	48.1	26.7	SiCL	-17.3	16.6	0.8
MSJ19-3	25~35	40.2	31.7	28.1	C	25.4	51.0	23.6	SiL	-14.8	19.3	-4.5
MSJ22-2	15~25	48.9	35.0	16.1	SiC	36.8	52.2	10.9	SiCL	-12.1	17.2	-5.2
MSJ22-3	30~40	48.2	36.2	15.6	C	34.9	54.3	10.7	SiCL	-13.3	18.1	-4.9
MSJ22-4	55~65	48.5	33.6	17.9	SiC	37.3	49.5	13.2	SiCL	-11.2	15.9	-4.7
MSJ22-5	85~90	45.8	32.2	22.0	C	33.4	52.2	14.5	SiCL	-12.4	20.0	-7.5

C: 黏土 Clay, CL: 黏壤土 Clay loam, SiC: 粉砂质黏土 Silty clay, SiL: 粉砂壤土 Silty loam, SiCL: 粉砂质黏壤土 Silty clay loam

供 < 2 μm、2~ 50 μm、50~ 100 μm、100~ 250 μm、250~ 500 μm、500~ 1 000 μm 和 1 000~ 2 000 μm 的 7 个级别的数据, < 2 μm 没有再细分。二是从土壤样本实测耗时来看, 在土样经过类似的预处理后, LD 法分析一个土样平均仅需 10 min, 而吸管法至少需要 7 h 以上。

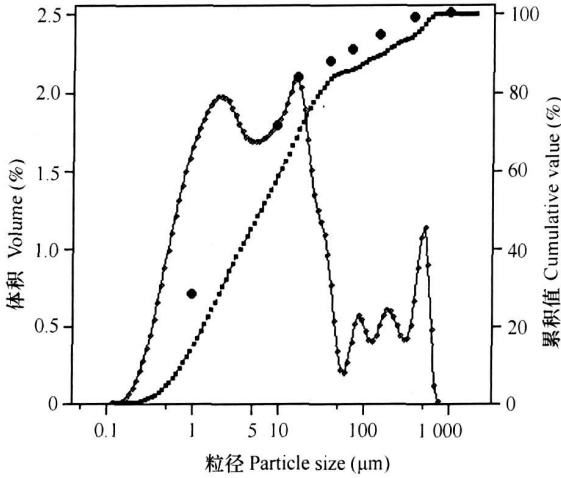


图 1 LD 法和吸管法实测土样 PSD 数据比较

Fig. 1 Comparison between the LD and pipette methods in PSD measurement of the soil samples

土样: MSJ05 2 Soil sample: MSJ05 2

• 吸管法的累积质量 Cumulative mass of the pipette method
 — LD 法的体积 Volume of the LD method — LD 法的累积体积 Cumulative volume of the LD method

2.2 两种方法实测值的差异

表 2 是根据 LD 法测试和吸管法实测的黏粒、粉粒和砂粒的统计结果。激光衍射仪测出的是 0~ 2 000 μm 内众多连续粒径级别土壤颗粒对应的体积(%), 可自动统计出 < 2 μm (黏粒)、2~ 50 μm (粉粒) 和 50~ 2 000 μm (砂粒) 三个级别体积(%). 所选择的土壤均为黏粒含量大于 40%, 表中所缺层次土样的黏粒含量较低。由表 2 可见, 与吸管法相比, LD 法“低估”了黏粒, “低估”幅度为 8.9%~ 27.1%, 平均“低估”19.0%。由于“低估”了黏粒, LD 法相应地就会“高估”了粉粒, “高估”幅度为 7.3%~ 28.2%, 平均“高估”18.0%。而对于砂粒, 有 18 个土样砂粒被“低估”, 22 个土样砂粒被“高估”, 相差幅度为 0.2%~ 10.0%, 平均相差 4.6%。

由于 LD 法实测的黏粒、粉粒和砂粒与吸管法不一致, 因此在质地类型诊断^[24] 上相应地也可能出现差异, 表 2 中 40 个土层的 LD 法和吸管法诊断的质地均不一致, 总体上看, 与吸管法相比, LD 法由于“低估”了黏粒和“高估”了粉粒, 自然就会导致质地

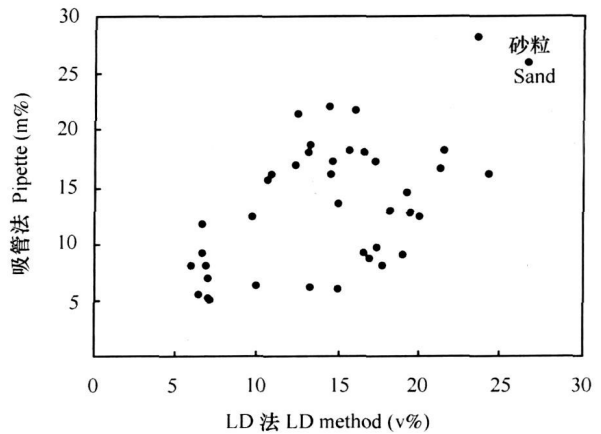
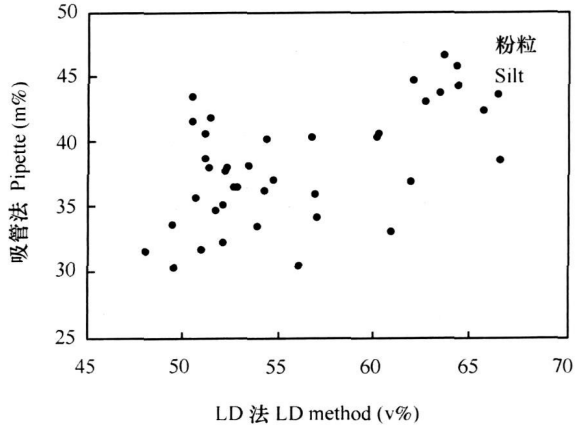
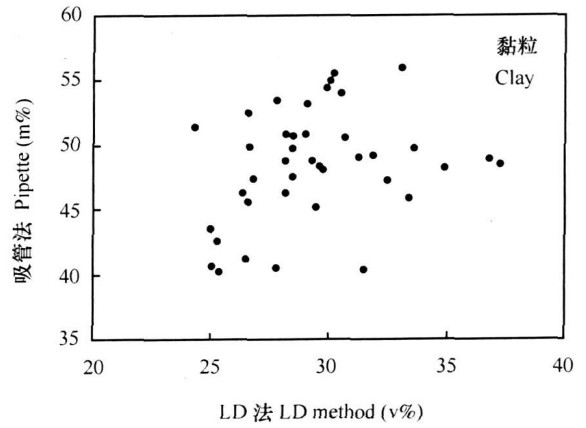


图 2 LD 法和吸管法实测的黏粒、粉粒和砂粒数据的散点图
 Fig. 2 Scattered plots of clay, silt and sand contents obtained with the LD and pipette methods

向“粗”的方向偏移, 偏移方向为: 黏土(C) → 粉砂质壤土(SiL)、粉砂质黏土(SiC) → 黏壤土(CL)、SiC → 粉砂质黏壤土(SiCL)、SiC → SiL。

黏粒、粉粒和砂粒实测结果以及质地诊断的不

一致性表明: 虽然 LD 法可以进行土壤颗粒的 PSD 分析, 但其实测的 PSD 数据尚不能直接用于现有的

基于沉降法的土壤质地分类^[24], 而需先经过适当的转换或新标准的建立。

表 3 LD 法实测的黏粒、粉粒和砂粒数据的转换模型的可靠性检验

Table 3 Reliability test of the models for transformation of PSD data obtained with the LD method

样本编号 Sample No	深度 Depth (cm)	转换后数据 Modified data (%)			误差: $ y' - y_p $ Error' = $ y' - y_p $			转换后质地 Modified texture
		黏粒	粉粒	砂粒	黏粒	粉粒	砂粒	
		y'_{clay}	y'_{silt}	y'_{sand}	Clay	Silt	Sand	
MSJ05 2	10~ 20	47.8	38.4	13.8	1.5	1.8	0.3	C
MSJ05 3	20~ 30	47.9	38.5	13.6	0.8	4.4	3.6	C
MSJ05 4	30~ 40	46.8	38.5	14.8	0.6	2.6	3.1	C
MSJ05 5	40~ 50	47.3	39.9	12.8	6.1	0.3	5.8	C
MSJ05 6	50~ 60	47.5	40.2	12.3	1.9	7.2	9.1	C
MSJ05 7	60~ 70	46.5	40.0	13.6	3.0	0.5	2.4	C
MSJ05 8	80~ 90	46.7	38.1	15.2	5.7	7.6	1.9	C
MSJ06 1	0~ 10	49.1	41.8	9.1	1.6	3.8	2.2	SC
MSJ06 2	10~ 20	49.8	41.5	8.7	1.7	4.9	3.2	SC
MSJ06 3	20~ 30	50.1	40.8	9.1	0.4	3.7	4.1	SC
MSJ06 4	30~ 40	48.4	42.8	8.8	1.0	0.7	0.3	SC
MSJ06 5	40~ 50	48.3	42.8	8.8	1.6	4.4	2.9	SC
MSJ06 6	50~ 60	49.6	41.4	9.0	1.3	2.2	0.9	SC
MSJ06 7	60~ 70	50.5	41.1	8.5	1.5	1.9	0.5	SC
MSJ06 9	100~ 110	49.1	41.8	9.1	1.6	2.4	4.0	SC
MSJ06 10	130~ 140	46.7	42.5	10.8	4.7	0.2	4.5	SC
MSJ06 11	160~ 170	48.6	40.7	10.7	2.2	3.9	1.7	SC
MSJ08 1	0~ 10	46.7	35.6	17.7	6.2	5.8	0.4	C
MSJ08 2	10~ 20	45.0	35.6	19.4	4.3	7.7	3.4	C
MSJ08 3	20~ 30	47.8	35.9	16.4	2.7	4.6	2.0	C
MSJ08 4	30~ 40	47.6	35.9	16.5	1.1	2.7	3.8	C
MSJ08 6	50~ 60	47.3	37.5	15.2	6.1	0.6	5.5	C
MSJ08 7	60~ 70	47.7	36.5	15.8	3.1	0.1	3.0	C
MSJ08 8	70~ 80	47.2	35.9	16.9	2.5	2.0	4.5	C
MSJ08 9	90~ 100	48.1	35.7	16.2	7.3	0.1	7.2	C
MSJ08 10	110~ 120	47.3	35.1	17.6	5.9	4.8	1.1	C
MSJ08 11	130~ 140	48.2	36.4	15.5	6.2	1.2	7.5	C
MSJ08 12	150~ 160	48.4	36.6	15.0	6.5	0.2	6.3	C
MSJ08 13	180~ 200	49.2	36.0	14.8	0.1	5.7	5.6	C
MSJ08 14	250~ 300	50.3	36.9	12.8	5.6	1.1	6.7	C
MSJ08 15	> 300	48.8	37.3	13.9	5.2	2.8	8.0	C
MSJ13 2	5~ 15	50.6	37.1	12.2	0.9	3.7	4.7	C
MSJ13 3	25~ 35	49.6	36.1	14.2	2.4	1.5	4.0	C
MSJ13 4	50~ 60	49.1	36.4	14.5	8.7	1.5	7.2	C
MSJ19 1	0~ 10	44.7	34.5	20.8	2.1	3.0	5.1	C
MSJ19 3	25~ 35	45.3	35.8	18.9	5.1	4.1	9.2	C
MSJ22 2	15~ 25	52.3	36.3	11.4	3.4	1.3	4.7	C
MSJ22 3	30~ 40	51.5	37.3	11.2	3.3	1.1	4.4	C
MSJ22 4	55~ 65	52.2	35.1	12.7	3.7	1.5	5.2	C
MSJ22 5	85~ 90	50.2	36.3	13.5	4.4	4.1	8.5	C

y_p : 吸管法实测的黏粒、粉粒和砂粒数据 Clay, silt and sand contents measured with the pipette method; C: 黏土 Clay; SC: 粉砂质黏土 Silty clay

2.3 转换模型的建立与可靠性验证

利用 LD 法和吸管法实测的黏粒、粉粒和砂粒数据分别建立对应的散点图(见图 2),通过分析散点图,尝试建立相关的转换模型。

分析图 2,依据相关系数高低,尝试比较了多类相关模型,发现黏粒数据之间对应关系非常复杂,很难为黏粒找到一个适合的转换模型,而粉粒和砂粒可以选择线性相关模型 $y' = ax + b$ 作为转换模型,其中, y' 表示转换后的数据, x 表示 LD 法实测数据:

$$\text{粉粒: } y'_{\text{silt}} = 0.452x_{\text{silt}} + 12.715 \\ (R = 0.575 > R_{0.01}) \quad (1)$$

$$\text{砂粒: } y'_{\text{sand}} = 0.598x_{\text{sand}} + 4.833 \\ (R = 0.549 > R_{0.01}) \quad (2)$$

式中, x_{silt} 和 x_{sand} 分别表示 LD 法实测的粉粒和砂粒数据, y'_{silt} 和 y'_{sand} 分别表示转换过的粉粒和砂粒数据。

考虑到黏粒被低估以及黏粒与粉粒、砂粒三者之间的关系,利用粉粒和砂粒的转换数据来推导黏粒纠正后的数据(y'_{clay}),为此提出式(3):

$$\text{黏粒: } y'_{\text{clay}} = 100 - (y'_{\text{silt}} + y'_{\text{sand}}) \quad (3)$$

表 3 列出了利用式(1)、式(2)和式(3)转换后的 LD 法的黏粒、粉粒和砂粒数据、质地及其与吸管法实测数据之间的绝对误差。可以发现,经过模型转换后,黏粒、粉粒和砂粒的绝对误差均有所降低,其中,黏粒差异幅度降至 0.1% ~ 8.7%,平均降至 3.4%;粉粒差异幅度降至 0.1% ~ 7.7%,平均降至 2.8%;砂粒差异幅度降至 0.3% ~ 9.2%,平均降至 4.2%。通过质地比较可以发现,经过转换后,有 18 个土层质地一致,22 个土层差距降低至相邻的质地。质地变化的方向为: SiCL \rightarrow C、SiCL \rightarrow SiC、SiL \rightarrow C、C \rightarrow SiC。进一步分析可以发现,粉粒含量 > 40% 的土样,转换后质地主要变化方向为 C \rightarrow SiC,而粉粒含量 < 40% 的土样,纠正后质地主要变化方向为 SiC \rightarrow C,这是因为 40% 是 C 和 SiC 的分界线,对于粉粒 > 40% 的土样,LD 法实测数据经过转换后,会“降低”粉粒的含量,一些土样的粉粒含量被降至 40% 以下,因此其质地就由 SiC 转向 C;而对于粉粒含量 < 40% 的土样,LD 法实测数据经过转换后,会“抬高”粉粒的含量,一些土样的粉粒含量被抬高到 40% 以上,因此其质地就由 C 转向 SiC。

3 讨论

本研究结果也揭示了 LD 法存在“低估”黏粒和

“高估”粉粒的现象^[11, 13],但是目前还无法证实究竟是沉降法“高估”了黏粒,还是 LD 法“低估”了黏粒,或者皆而有之^[13]。与他人的研究相比,本研究获得的 LD 法和沉降法实测数据之间的差异较大,如 Lirida 等^[13] LD 法转换后数据与沉降法实测数据之间的相对误差为:黏粒 0.95% ~ 1.92%,粉粒 9.47% ~ 10.50%,砂粒 7.47% ~ 7.55%;而本研究分别为:黏粒 0.20% ~ 21.53%,平均为 6.99%;粉粒 0.27% ~ 24.92%,平均为 7.65%;砂粒 2.21% ~ 135.6%,平均为 38.12%。另外,本研究未发现 LD 法和吸管法实测的黏粒数据之间存在的线性关系,虽然粉粒和砂粒也存在线性关系,但是本研究建立的转换模型参数与他人的也并不相同,而且本研究的相关系数较低,如 Linda 等^[13]建立的关系式分别为:黏粒, $y = 1.0317x - 0.0715$, $R^2 = 0.986$;粉粒, $y = 0.9306x + 0.1199$, $R^2 = 0.807$;砂粒, $y = 0.9297x + 0.0075$, $R^2 = 0.835$ 。其实,正如其他研究者认为的那样,在 LD 法和沉降法实测的 PSD 结果之间并不存在一个统一的对应关系式^[8, 13]。对于不同类型的土壤,可能还是需要依据具体的实测结果,建立相应的对应关系式。

本研究认为导致不同研究结果出现差异的主要原因在于分析的土壤类型差异。Linda 等^[13]选择的 8 种质地不同的土壤,但仅一个土壤类型的黏粒在 45% 左右,其余土壤类型的黏粒均低于 30%。而本研究选择的供试土壤属于南方黏性富铁土,其黏粒均在 40% 以上,而 LD 法和沉降法差异最敏感恰好就是黏粒部分,因此,本研究土壤由于黏粒含量高,存在着“扩大”LD 法和沉降法 PSD 实测数据之间差异的可能。

上述结果提醒我们,LD 法实测的土壤 PSD 信息尚不能直接用于土壤质地的诊断,这是因为现有的土壤质地三角图是基于沉降法^[24]。虽然 LD 法实测的 PSD 信息可以通过一定的关系式转换后用于土壤质地诊断,但结果仍然存在一定的差异。但是,LD 技术由于自身的优势,如速度快,效率高,独立于颗粒密度,能够提供更多级别的 PSD 数据,尤其是能够提供一定的黏粒(< 2 μm)的 PSD 数据。

4 结论

本研究用 LD 法和吸管法实测了 6 个林地黏性富铁土剖面(黏粒含量 > 40%)不同层次 40 个土样的 PSD 数据,并进行了对比分析,结果表明:

1) 对于黏性土壤, 与吸管法相比, 激光衍射法也确实存在“低估”黏粒和“高估”粉粒的现象。

2) 尝试建立黏性富铁土 LD 法和吸管法的 PSD 实测数据之间转换模型时发现, 尽管粉粒和砂粒存在线性关系, 但是黏粒并不存在线性关系, 黏粒含量高而且分布范围窄是导致上述差异的主要原因。

3) 经过模型转换后, LD 法和吸管法 PSD 实测数据之间的误差明显降低, 说明 LD 法也可以用于黏性土壤的 PSD 分析。应用 LD 法测定土壤 PSD 已成为土壤科学中的一个必然的发展趋势。

参考文献

- [1] Gee G W, Bauder J W. Particle size analysis. In: Klute A. ed. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 1986. 383~ 411
- [2] Campbell G S, Shiozawa S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle size distribution and bulk density data. In: van Genuchten M T, Leij F J, Lund L J. eds. *Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. University of California, Riverside, 1992. 317~ 328
- [3] Campbell G S, Jungbauer J D, Bidlake W R, *et al.* Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *Soil Sci.*, 1994, 158: 307~ 313
- [4] 徐绍辉, 张佳宝, 刘建立, 等. 表征土壤水分持留曲线的几种模型的适应性研究. *土壤学报*, 2002, 39(4): 498~ 504. Xu S H, Zhang J B, Liu J L, *et al.* Suitability of models describing soil water retention curve (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(4): 498~ 504
- [5] Wöten J H M, Pachepsky Y A, Rawls W J. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol. (Amst.)*, 2001, 251: 123~ 150
- [6] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 粮田土壤养分的空间格局及其与土壤颗粒组成之间的关系. *中国农业科学*, 2002, 35(3): 297~ 302. Huang S W, Jin J Y, Yang L P, *et al.* Spatial distribution of soil nutrient and relationship between soil nutrient and soil granule composition for grain crop region (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(3): 297~ 302
- [7] 温善菊, 吴景贵, 张显东. 土壤颗粒和肥力关系的研究进展. *延边大学农学学报*, 2005, 27(1): 65~ 71. Wen S J, Wu J G, Zhang X D. Relation of soil particle and fertility (In Chinese). *Journal of Agricultural Science Yanbian University*, 2005, 27(1): 65~ 71
- [8] Beuselinck L G, Govers G, Poesen J, *et al.* Grain size analysis laser diffractometry: Comparison with the sieve pipette method. *Catena*, 1987, 32: 193~ 208
- [9] Wu Q, Borkovec M, Sticher H. On particle size distributions in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 883~ 890
- [10] Martin M A, Montero E. Laser diffraction and multifractal analysis for the characterization of dry soil volume size distributions. *Soil Tillage Res.*, 2002, 64: 113~ 123
- [11] Eshel G, Levy G J, Mingelgrin U, *et al.* Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle size distribution analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68: 736~ 743
- [12] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用. *土壤学报*, 2005, 42(4): 546~ 550. Wang G L, Zhou S L, Zhao Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its application to land use (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 546~ 550
- [13] Linda P, Marco B, Paola R P. Laser diffraction, transmission electron microscopy and image analysis to evaluate a bimodal Gaussian model for particle size distribution in soils. *Geoderma*, 2006, 135: 118~ 132
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化分析*. 上海科学技术出版社, 1983. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil Physical and Chemical Analysis (In Chinese)*. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1983
- [15] Clifton J, McDonald P, Plater A, *et al.* An investigation into the efficiency of particle size separation using Stokes' measurement. *Earth Surf. Process. Landf.*, 1999, 24: 725~ 730
- [16] Shiozawa S, Campbell G S. On the calculation of mean particle diameter and standard deviation from sand, silt, and clay fractions. *Soil Sci.*, 1991, 152: 427~ 431
- [17] Bittelli M, Campbell G S, Flury M. Characterization of particle size distributions in soils with a fragmentation model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 782~ 788
- [18] Konert M, Vandenberghe J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: A solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 1997, 44: 523~ 535
- [19] Dur J C, Elsass F, Chaplain V, *et al.* The relationship between particle size distribution by laser granulometry and image analysis by transmission electron microscopy in a soil clay fraction. *Eur. J. Soil Sci.*, 2004, 55: 265~ 270
- [20] Allen T. *Particle Size Analysis by Image Analysis*. 5th Ed. Particle Size Measurement, vol. 1. Chapman and Hall, London, 1997. 269~ 306
- [21] Hillel D. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, 1998
- [22] 熊毅, 李庆逵. *中国土壤(第二版)*. 北京: 科学出版社, 1990. Xiong Y, Li Q K. *Soils of China (In Chinese)*. 2nd Ed. Beijing: Science Press, 1990
- [23] Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy*. 9th Ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington D C, 2003
- [24] UNEP, ISSS, ISRIC, FAO. *SOTER Procedures Manual*, 1995

COMPARISON BETWEEN LASER DIFFRACTION AND PIPETTE METHODS IN ANALYSES OF PSD OF CLAYEY FERRISOL

Yang Yanfang^{1,2} Li Decheng^{2†} Yang Jingling² Zhang Ganlin² Zhao Yuguo² Zhao Wenjun²

(1 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract The laser diffraction technique (LD method) has been regarded as an effective means of measuring soil particle size distribution (PSD) in recent years. To assess feasibility of applying the LD method to red soil high in clay fraction, soil samples collected from various layers of 6 forestry ferrisol profiles (clay fraction > 40%) were analyzed using the LD and traditional pipette methods for comparison. It was found that the LD method is more efficient and effective and capable of providing PSD information of more particle size fractions, particularly of the clay fraction (< 2 μm), but it might “underate” clay fraction while “overrate” silt fraction. Significant linear relationship was found between the two methods in measured data of silt fraction and sand fraction, but not of clay fraction, because it is high in content but narrow in distribution. Modification of their models has significantly narrowed the difference between the two methods in measurement, which means the LD method can be used for PSD analysis of clayey ferrisol. However, its measurements or PSD data are not yet ready to be used directly in the current sedimentation-based triangular texture diagram to define soil texture before certain data transformation. It is an inevitable trend for LD technique to be used widely in analyzing soil PSD in the future, thus, it is urgent and significant to conduct systematical and standardized comparison studies of various typical soils, so as to improve the reliability and practicability of the LD technique, and build up a new LD-based triangular texture diagram, which will further application of the LD technique in soil science.

Key words Particle size distribution (PSD); Laser diffraction; Pipette; Ferrisol