

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

朱瑜, 张卓栋, 刘畅, 张欣

(北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875)

摘要:激光粒度仪法作为测量土壤机械组成的新型方法,具有操作简单、速度快的优势,但其适用性与可靠性尚未达成广泛共识。为探究激光粒度仪测定土壤机械组成的准确性与适用性,采集 7 种退化程度共 21 份栗钙土土样,使用激光粒度仪与吸管法测定土样机械组成并对比分析。结果显示:激光法测定结果黏粒偏小,而砂粒、粉粒偏大,且随粒径减小误差增大。将两种测定结果进行回归分析,发现砂粒与粉粒转换模型拟合效果理想,黏粒拟合效果差。建立质地三角图发现两种方法得到的质地差异较大,采用转换后数据分析质地,发现质地接近、正确率高,转换效果好。通过扫描电镜对土粒形态观察,发现标准流程不同分散方法下土粒形状与数量均有差异,推测分散方法会影响土壤机械组成的测定结果。激光粒度仪的适用性据测定对象的不同而有差异,对黏粒精度要求高的情况下不宜使用该法,而其他情况下需要对测定结果进行数据转换。

关键词:土壤机械组成;激光粒度仪;吸管法;扫描电镜;栗钙土

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0062-06

Comparison of Laser Diffraction Method and Pipette Method on Soil Particle Size Distribution Determination —A Case Study of Various Degraded Kastanozem

ZHU Yu, ZHANG Zhuodong, LIU Chang, ZHANG Xin

(Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The laser diffraction method (LDM) has become a new method for particle size analysis. It is simple and convenient. However, its applicability and reliability have not been fully confirmed yet. In order to investigate the reliability and applicability of LDM, 21 Kastanozem soil samples with seven different degradation levels were collected and their particle size distributions were measured using both LDM and pipette method. The results showed that LDM underestimated the clay content and overestimated the sand and silt contents. The difference of the results measured by the two methods increased as particle sizes decreased. Regression analysis showed that there were high correlations between the sand and silt contents determined by these two methods, but there was no correlation for the clay content. Triangle coordinate diagram was applied to compare the textures determined by these two methods. The results agreed well after a transformation based on regression analysis compared to the original results. The morphology of soil particles was observed using a scanning electron microscope. The results showed that the shape and number of soil particles were different under different standard dispersive treatments which were involved in different methods, and would influence the results of particle size distribution. The applicability of LDM depends on the types of soil samples. If there are high precision requirements of clay content, LDM is not a good choice, in other cases, LDM is a feasible solution but the results should be carefully checked and transformed.

Keywords: particle size distribution; laser diffraction method; pipette method; scanning electron microscope; Kastanozem

土壤机械组成是土壤的基本性质,确定土壤机械组成、判断土壤质地是对土壤相关问题进行深入研究的基础^[1]。土壤机械组成精确、高效的测定对土壤研究有重要意义。目前主要的土壤机械组成测定方法有吸管法、激光粒度仪法两种,两种方法各有优劣,对两种测定方法的比较是近年土壤研究中的一个重要问题^[2-3]。

吸管法是一种传统的土壤机械组成测定方法,其依据 Stokes 定律测定土壤颗粒质量,20 世纪 10 年代应用以来,已形成一套完整的试验方法体系,是目前被普遍接受的标准的测定方法^[4],但存在操作繁琐、耗时长^[5]等问题。20 世纪 90 年代以来,激光粒度仪法成为一种新型测定方法,该方法依据 Fraunhofer 衍射和 Mie 散射原理,操作简便、速度快^[6]、具广阔的应用前景,但由于其出现时间短,尚未形成一套成熟的试验体系,对其结果的精确性尚未达成统一的认识,目前还难以用该法直接取代传统的测定方法。

激光粒度仪与吸管法测定土壤机械组成的测定结果在不同粒级上表现不同。对黏粒,学者普遍认为激光粒度仪测定结果低于吸管法^[6-14];对粉粒,部分研究者^[6-7]认为激光粒度仪测定结果高于吸管法,另有研究通过测定黄土和古土壤土样后发现二者各有高低^[8];对砂粒,则呈现激光粒度仪测定结果高于^[9]、低于^[10]、各有高低^[11-12]或近于^[13]吸管法结果,总体而言两种方法测定砂粒含量的结果较其他粒级更为相近。各研究对两种方法测定结果间的相关性与转换关系的认识差异较大,例如王大安等^[10]、杨金玲等^[11]的研究认为两种方法测定的黏粒、粉粒、砂粒间均具有良好相关性,Eshel^[12]则认为 3 种粒级之间相关性均较差。这些不同结果主要是由于各研究使用的土壤类型、仪器型号不同。已研究土样涵盖黄土、潮土、风沙土、灌淤土、褐土等土类^[8,13-14],多使用 Beckman Coulter^[12]或 MasterSizer 2000^[15]等型号的激光粒度仪测量。过往研究中,多使用两种测定方法对多种土壤进行土壤机械组成的测定研究,而少有考虑到不同方法测定同种土壤时的差异性。此外,激光粒度仪应用于土壤机械组成测定的时间较短,操作处理尚缺乏统一规范,不同的前处理如土样制备、分散等会造成测定结果的不同。吸管法标准流程中物理分散方法为煮沸分散,而激光粒度仪方法中物理分散方法配备有超声分散,物理分散方式的差别对测定结果的影响在过往比较两种方法的研究中还较少得到关注,需要进一步进行探究。

锡林郭勒草原属于我国北方典型农牧交错带,地带性土壤为草原栗钙土,因草原土地资源的不合理利用造成了风力侵蚀为主的土地退化,改变了土壤机械

组成等土壤理化特性^[16-17]。本研究以不同退化程度的草原栗钙土为例,对比激光粒度仪、吸管法测定土壤机械组成的差异并分析其原因。本文可弥补已有的土壤机械组成测定方法比较研究中较少用到栗钙土的空白,同时分析两种测定方法在同种土壤内部适用性的差异。并运用扫描电镜深入分析不同测定方法造成测定结果差异的本质原因,探讨两种测定方法分别使用的煮沸分散与超声分散两种不同物理分散方式对测定结果的影响,为更科学、全面地评价两种测定方法的适用性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与预处理

本研究使用样品采自内蒙古自治区中部、锡林河流域南部(43°33'20"—43°33'40"N,116°29'40"—116°41'20"E)。研究区内主要土地利用方式为放牧草地及少量的耕地,由于放牧程度的差别,土地有不同程度的退化。本研究选取不同退化程度共 7 块典型地块采样,每个典型地块重复取三份表层 1—6 cm 土样,采集的样品经过风干与研磨,过 2 mm 筛备用。

1.2 试验方法

土壤过 0.1 mm 标准筛筛分出 2~0.1 mm 颗粒。对吸管法,将<0.1 mm 土壤颗粒洗入沉降筒,对激光粒度仪法,将<0.1 mm 土壤颗粒进行后续处理与测定。吸管法过程参照《土壤理化分析》^[18]进行前处理,并测定<0.05 mm、<0.02 mm、<0.01 mm、<0.005 mm、<0.002 mm、<0.001 mm 共 6 个粒级土壤颗粒含量。激光粒度仪法使用美国 Microtrac 公司生产 Microtrac S3500 型激光粒度仪进行测定,测定范围为 0.021 5~2 000 μm ,每个土样重复测定三次取平均值。

为进一步探究不同测定方法结果差异的原因,比较两种方法操作标准流程中的有差别的分散方式对测定结果的影响,即在相同的化学分散方式之下,研究后续的不同物理分散方式,即吸管法的煮沸分散与激光粒度仪的超声分散对测定结果的影响,使用日本日立高新技术株式会社生产的 S-4800 型冷场发射扫描电子显微镜对不同分散处理的土壤颗粒进行扫描分析,将样品分为三组:

(1) 样品 1(化学分散),按每 1 g 土加入 1 ml 分散剂的比例加入六偏磷酸钠,静置过夜;

(2) 样品 2(化学+煮沸分散),在样品 1 的基础上置于电热板上煮沸 1 h;

(3) 样品 3(化学+超声分散),在样品 1 的基础上,使用激光粒度仪进行超声分散(60 s,40 W)后收

集废液。

使用离心法分离土样粉粒与黏粒并分别进行扫描电镜观察,每份溶液根据实际情况至少制备 5 份样品。

1.3 数据分析

运用 SPSS Statistics 19 软件进行统计分析,对两种方法测定的各粒级的均值、标准差等描述性统计量进行分析,并对两种方法测定结果进行差异性检验。通过建立两种方法间的回归关系,得到各粒级间的转换模型。此外,由于机械组成的差异会造成土壤质地的判定结果不一致,本文依照美国农业部土壤质地三角图对两种方法得到的土壤质地类型进行对比。

表 1 激光粒度仪与吸管法测定砂粒、粉粒、黏粒颗粒含量的比较

方法	黏粒/%				粉粒/%				砂粒/%			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
吸管法	27.57	11.03	17.31	4.05	32.92	11.21	22.31	6.34	77.76	41.33	60.38	10.15
激光粒度仪法	4.38	0.32	1.15	0.81	50.65	21.08	34.95	8.90	78.60	47.55	63.89	9.39
绝对误差 k_1	23.19	10.37	16.15	3.50	-6.64	-17.74	-12.64	3.21	0.15	-9.86	-3.51	2.54
相对误差 k_2	97.37	84.10	93.67	2.70	-37.02	-90.49	-58.50	12.94	0.26	-19.75	-6.33	5.26

注: k_1 :绝对误差=吸管法测定结果-激光粒度仪测定结果 k_2 :相对误差=绝对误差/吸管法测定结果 $\times 100\%$ 。

黏粒的激光粒度仪测定结果小于吸管法测定结果,且对不同样品激光粒度仪测定值相同或相似;粉粒的激光粒度仪测定结果大于吸管法;砂粒的激光粒度仪测定结果略大于吸管法(图 1)。本研究结果与刘雪梅^[13]、王彬^[19]等研究一致,二者使用 MasterSizer 2000 对包括黑土、潮土、褐土在内的多种土样取 0.05~0.3 g 进行测定,认为激光粒度仪高估砂粒、粉粒而低估黏粒。本研究与王伟鹏^[6]、吴焕焕^[20]等研究者结果主要在粉粒与砂粒部分存在一定差异,两种方法在粉粒和砂粒上的测定结果的数量关系尚未有定论,可能原因为土壤类型不同^[11]、硬件设备区别^[21]、样品质量不同^[22]等。

>0.1 mm 土壤颗粒由筛分法得到,为深入比较两种方法测定<0.1 mm 土壤颗粒的差异,对各样品

2 结果与分析

2.1 激光粒度仪与吸管法测定结果比较

本研究土壤颗粒分级采用美国制(砂粒 2~0.05 mm,粉粒 0.05~0.002 mm,黏粒<0.002 mm),激光粒度仪与吸管法砂粒($p<0.001$)、粉粒($p<0.001$)、黏粒($p<0.001$)的测定结果差异均显著,且在粉粒、黏粒部分差异相比砂粒更为明显(表 1),两种方法差异显著性表现为粒级越小,误差越大。除极少部分样品的砂粒外,对其余样品,其各粒级内激光粒度仪与吸管法测定结果大小关系趋于一致。

<0.05 mm、<0.02 mm、<0.01 mm、<0.005 mm、<0.002 mm、<0.001 mm 各粒级颗粒百分含量进行逐一对比(表 2)。随粒级减小,平均相对误差值依次增大,其中<0.001 mm 粒级的绝大部分样品误差值达 100%,仅一个样品测定出少量该粒级颗粒。

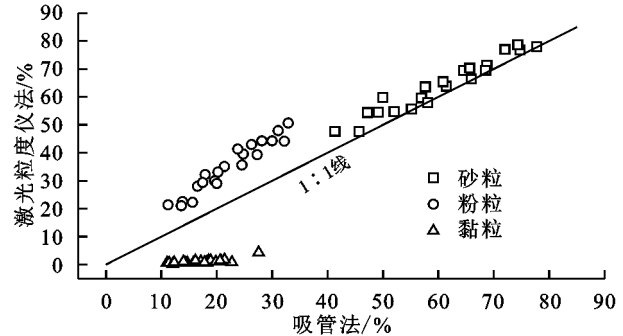


图 1 两种方法测定砂粒、粉粒、黏粒颗粒百分含量对比

表 2 激光粒度仪与吸管法测定<0.1 mm 颗粒含量的比较

方法	<0.05 mm/%				<0.02 mm/%				<0.01 mm/%			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
吸管法	58.67	22.24	39.62	10.15	44.17	17.71	28.11	6.97	37.90	15.10	23.28	5.66
激光粒度仪法	52.45	21.40	36.11	9.39	35.38	12.19	21.08	5.74	24.76	6.88	12.63	3.97
绝对误差	9.86	-0.15	3.51	2.54	15.45	3.61	7.03	2.59	17.35	6.87	10.65	2.53
相对误差	19.71	-0.36	8.80	5.84	40.25	14.63	25.17	6.64	57.04	34.39	46.25	6.35

方法	<0.005 mm/%				<0.002 mm/%				<0.001 mm/%			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
吸管法	33.03	13.12	20.30	4.91	27.57	11.03	17.31	4.05	19.57	10.13	14.48	2.75
激光粒度仪法	14.87	3.07	6.23	2.46	4.38	0.32	1.15	0.81	0.92	0.00	0.04	0.20
绝对误差	19.58	9.41	14.07	3.04	23.19	10.37	16.15	3.50	19.57	10.13	14.43	2.72
相对误差	76.64	54.96	69.88	5.43	97.37	84.10	93.67	2.70	100.00	94.46	99.74	1.18

在土样<0.1 mm 各粒级颗粒两种方法的测定结果中,随粒级减小,数据点分布远离 1:1 线(图

2)。<0.05 mm、<0.02 mm、<0.01 mm、<0.005 mm 各粒级内使用两种方法对土样进行测定分异性均良好,

激光粒度仪测得数据可信用度较高。 $<0.002\text{ mm}$ 、 $<0.001\text{ mm}$ 两个粒级内不同土样激光粒度仪测定数据接近乃至相同,各土样不具有明显分异性,激光粒度仪不适

于对该粒级进行测量。激光粒度仪对不同样品测定结果分异的敏感性随粒级减小而降低,因此在对黏粒的测量有精确要求的情况下需谨慎应用该方法。

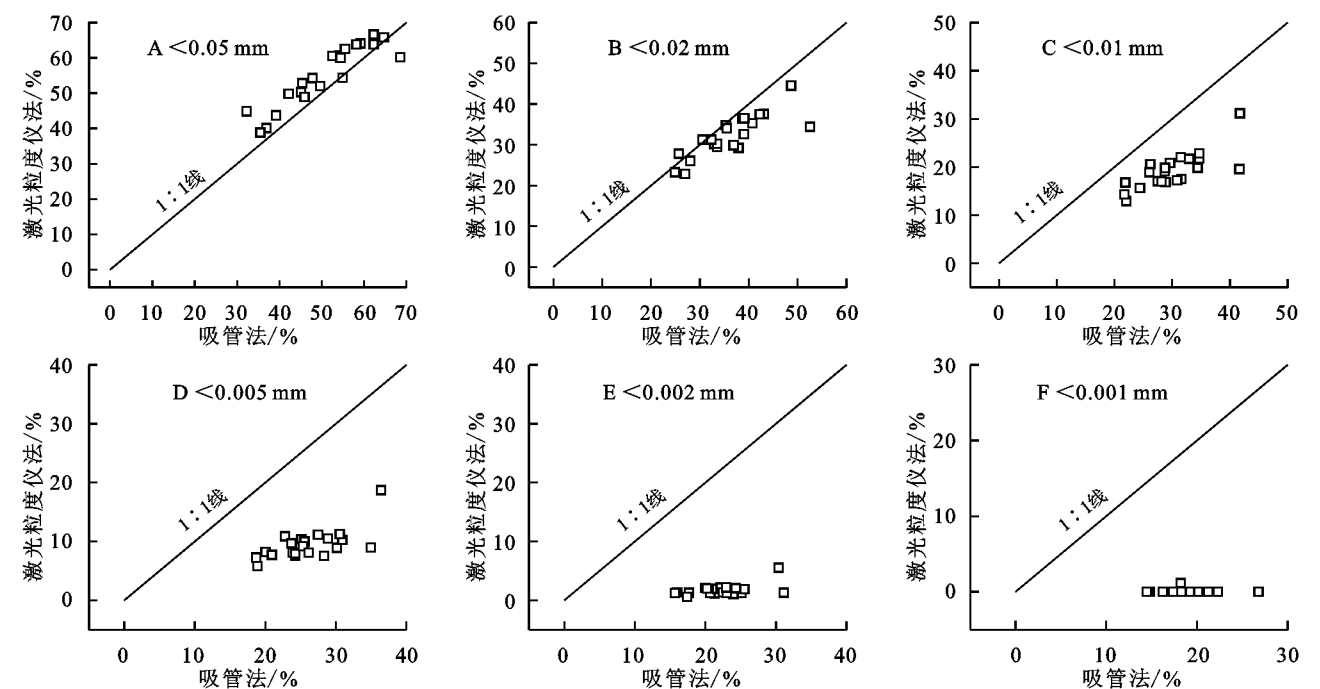


图 2 两种方法测定 $<0.1\text{ mm}$ 各粒级颗粒百分含量对比

2.2 激光粒度仪与吸管法测定结果转换模型

已有研究中激光粒度仪与吸管法的转换关系主要有线性关系^[7,16]、幂关系^[12]两种形式,本研究中经对比发现线性模型拟合效果最优,转换公式如下:

砂粒: $P=1.048L-6.550$
($R^2=0.939, p<0.001, n=21$)
粉粒: $P=0.689L-1.760$
($R^2=0.935, p<0.001, n=21$)
黏粒: $P=3.686L+13.059$
($R^2=0.541, p<0.001, n=21$)

式中: L 为激光粒度仪测定结果; P 为吸管法测定结果。

砂粒与粉粒回归公式决定系数均大于 0.93, 拟合效果理想; 黏粒由于激光粒度仪测定的大量数据均小于 1%, 拟合效果差。本结果与杨金玲^[11]研究类似, 两种方法的相关性表现为砂粒最高、粉粒次之、黏粒最低, 与部分研究者^[2,12]粉粒、砂粒相关性微弱的结果有一定差异。砂粒转换公式的斜率同样与杨金玲研究结果相近, 但截距差距较大, 其研究中两种方法砂粒测定结果更为接近。粉粒、黏粒转换公式同前人研究结果^[9-12]有差异, 表现为粉粒转换公式与过往研究结果的差异无明显大小规律, 黏粒转换式中截距与斜率均较大, 即两种方法黏粒测定结果差异大于先前研究。可以认为已有研究中的转换关系不适用于本研究, 两种方法测定的结果不具有统一的转换关

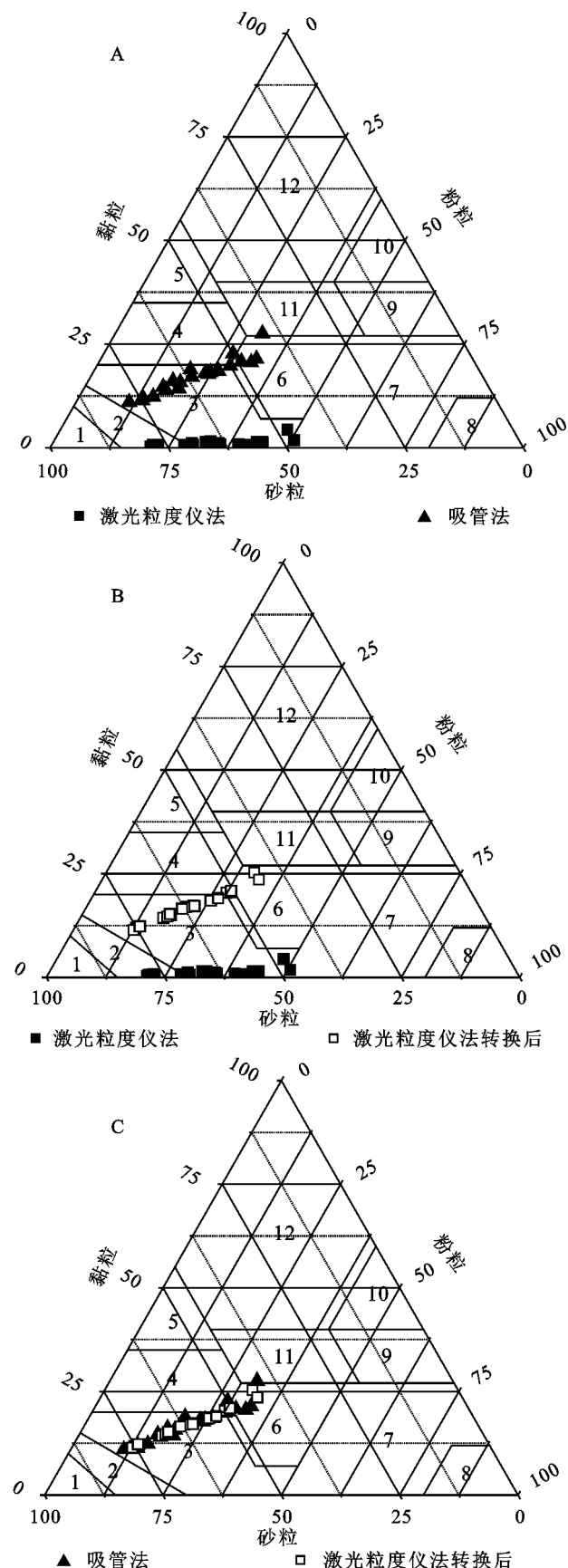
系, 可能原因是采用的土壤类型不同, 亦说明对不同类型的土壤进行两种测定方法比较研究是必要的。

2.3 激光粒度仪与吸管法测定结果在土壤质地类型判定上的差异

激光粒度仪与吸管法所测得的土壤质地有一定差异, 激光粒度仪测定结果分布于壤质砂土(共 5 个)、砂质壤土(共 15 个)与粉壤土(共 1 个), 吸管法测定结果分布于砂质壤土(共 16 个)、壤土(共 3 个)、砂质黏壤土(共 1 个)、黏壤土(共 1 个), 二者数据点均排列成线状(图 3A)。激光粒度仪相比吸管法测定结果土质偏粗, 测得土壤质地类型偏少, 但大部分土样质地判断结果相同, 均为砂质壤土, 这是由于砂质壤土本身质地在各个粒级跨度大、范围广。

运用 2.2 部分提出的模型对激光粒度仪测定结果进行转换计算, 激光粒度仪法转换后结果相比原始数据砂粒含量略微减少, 粉粒含量显著减少, 黏粒含量显著增加, 整体上呈现从砂土至黏壤土方向的变化(图 3B)。激光粒度仪测定结果转换后的数值与吸管法测定值比较(图 3C), 砂粒、粉粒、黏粒的相对误差值均显著降低, 土壤质地转换为砂质壤土(共 15 个)、壤土(共 5 个)、砂质黏壤土(共 1 个)。转换前后土壤质地发生改变的土样达 11 个, 仅 4 个土样被转换为相邻质地, 判断结果与吸管法不同, 转换正确率达 81%。该正确率值与王彬^[19]研究结果相似, 其转换正确率为 83.15%。总体来

说运用转换公式的转换效果良好。



注:1. 砂土 2. 壤质砂土 3. 砂质黏土 4. 砂质黏壤土 5. 砂质黏土 6. 壤土 7. 粉壤土 8. 粉土 9. 粉质黏壤土 10. 粉质黏土 11. 黏壤土 12. 黏土。

图3 激光粒度仪与吸管法测定质地比较(美国农业部)

本研究中栗钙土随退化程度增加大致表现为从黏壤土到砂质壤土的过渡,三角图上分布呈线状。通过一元线性模型进行数据转换在三角图上的几何意义为原始数据点分布形状的拉伸、平移与旋转,模型对土壤质地判断的有效性受原始数据点分布影响,即对同一土壤不同退化程度的土样转换公式的适用性不同。虽然本研究只选用了一种土壤类型,但可以看到由于受不同土地退化过程影响,其质地覆盖了多种类型,说明本文的土壤样品在质地方面有较为理想的代表性,也说明在选择土壤进行机械组成不同测定方法的比较时,不仅要考虑土壤类型,还应考虑在同种土壤内部的差异性。因此,对不同退化程度土壤按砂粒含量进行分类、分段,按段确立转换关系,能提高转换后土壤质地判断的准确性。

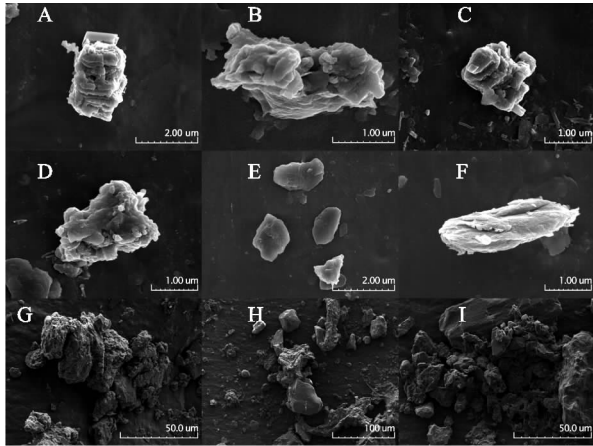
2.4 测定结果差异原因分析

本研究中激光粒度仪与吸管法测定结果的差异主要体现在黏粒含量,使用扫描电镜观察经过不同分散处理的同一份土样以深入探究造成差异的原因(图4)。样品1(图4A,B),2(图4C,D),3(图4E,F)的黏粒均为不规则非球体。对于不规则形态颗粒,激光粒度仪测定过程中将不规则黏粒等效于衍射结果相同的球状颗粒并对其横截面进行衍射分析^[9],由于颗粒的扁平形状,衍射分析所得平均截面尺寸大于等效球状颗粒直径,因而不规则黏粒颗粒常被测定为粉粒,导致黏粒含量测定结果偏低^[11];在吸管法测定过程中其形态有效减慢沉降速度,使黏粒测定结果偏高。土壤颗粒形态对测定结果的影响在前人研究^[23]中被提出,本研究的电镜扫描结果进一步证实了这种不规则形态加剧了两种方法在黏粒测定结果上的差异。

按照试验规范操作流程,本研究中的吸管法与激光粒度仪分别使用煮沸法和超声分散法作为物理分散方法。土壤中的疏松物质在化学分散下(图4G)其黏结程度高、体积大,经煮沸分散(图4H)和超声分散(图4I)后分别呈大体积长条状与小体积块状,黏结程度降低。认为煮沸分散与超声分散均具有较明显的分散效果,且后者分散强度更大,这与章明奎^[24]、汤庆峰^[25]等人此前的发现一致。

分散强度差异导致经超声分散后土样黏粒部分单体片状颗粒增多(图4E,F),而煮沸分散后仍多复层状颗粒(图4C,D),认为超声分散相比煮沸分散其土样中土壤颗粒数量更多。超声分散使土壤颗粒增多的现象同时作用于粉粒与黏粒,与王英杰^[26]等人观点相似。增多的片状颗粒在激光粒度仪法下测定尺寸常偏大,黏粒经超声分散后的片状颗粒可分为被激光粒度仪测定为粉粒与测定为黏粒的两类,推测前者与粉粒经超声分散后

增加的数量之和大于后者,使激光粒度仪测定结果中粉粒比例增加,黏粒含量相对减少。因此,规范流程中使用的不同分散方法也可能是造成测定结果差异的原因之一,这种分散方法的影响在土壤研究中尚未得到足够的重视,可能会产生一系列影响,需要就分散方法对测定结果的影响进行深入研究。



A,B:样品1黏粒,C,D:样品2黏粒,E,F:样品3黏粒,G:样品1粉粒,H:样品2粉粒,I:样品3粉粒。

图4 不同分散方式下土壤颗粒扫描电镜照片

3 结论

对于栗钙土,相比吸管法,激光粒度仪测定黏粒含量显著偏小,测定粉粒含量偏大,测定砂粒含量略偏大。两种方法的差别主要体现在黏粒含量测定上,这种差别与土粒形状不规则有关,吸管法中黏粒沉降速度偏慢使该法黏粒测定结果偏大,激光粒度仪法中土粒衍射结果偏大使该法黏粒测定结果偏小。还与两种方法标准流程中分散方式不同有关,激光粒度仪法中的超声分散使更多的黏粒颗粒被测定为粉粒。

激光粒度仪的适用性与测定对象的具体性质相关,对于同一土类的不同土壤质地类型适用性存在差异。对黏粒测定精度要求高的情况下,激光粒度仪法测定结果严重偏小而不适用,其他情况下测定数据经过转换可满足使用要求。

致谢:感谢北京师范大学地理科学学部张科利教授对本研究提出的建议,感谢高晓飞高级实验师对土壤试验部分的指导,感谢硕士研究生孙传龙对土壤样品准备与处理的帮助。感谢北京师范大学物理学系应用光学实验室周固高级工程师对电镜试验部分给予的指导。

参考文献:

[1] 刘广通,海春兴,李占宏.应用吸管法进行风沙土机械组成分析的试验研究[J].水土保持研究,2007,14(2):121-123,126.

[2] Beuselinck L, Govers G, Poesen J, et al. Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method[J]. Catena, 1998,32:193-208.

[3] 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.

[4] Di Stefano C, Ferro V, Mirabile S. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2):205-215.

[5] Syvitski J P M, LeBlanc K W G, Asprey K W. Inter-laboratory, interinstrument calibration experiment [M] // Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis. Syvitski J P M. New York: Cambridge University Press, 1991:174-193.

[6] 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.

[7] Loizeau J, Arbouille D, Santlago S, et al. Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments[J]. Sedimentology, 1994,41:353-361.

[8] 庞奖励,黄春长,贾耀峰.不同方法测定黄土和古土壤样品粒度的比较[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2003,31(4):87-92.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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 American Journal, 2004,68:736-743.

[13] 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):579-582.

[14] 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.

[15] 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,2007,19(5):509-515.

[16] 邱倩倩,张卓栋,孙传龙,等.锡林郭勒草地景观系统土壤容重空间变异及其与风蚀的关系[J].水土保持通报,2016(6):58-62,66.

- [18] 邓红兵,陈春娣,刘昕,等. 区域生态用地的概念及分类[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1519-1524.
- [19] 王琦,汤放华. 洞庭湖区生态—经济—社会系统耦合协调发展的时空分异[J]. 经济地理, 2015, 35(12): 161-167.
- [20] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [21] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
- [22] 孙丕苓,许月卿,王数. 环京津贫困带土地利用变化的地形梯度效应分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 277-288.
- [23] 喻红,曾辉,江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上分布特征研究[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 64-68.
- [24] Costanza R, Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and nature capital [J]. Nature, 1997, 387(15): 253-260.
- [25] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [26] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位数量价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1253.
- [27] 武爱彬,赵艳霞. 坝上高原生态用地时空格局演变与生态系统服务价值分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 283-290.
- [28] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益汇编(2015)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [29] 高俊峰,张琛,姜加虎,等. 洞庭湖的冲淤变化和空间分布[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 269-277.

~~~~~

(上接第 67 页)

- [17] 孙传龙,张卓栋,邱倩倩,等. 基于层次分析法的锡林郭勒草地景观系统风蚀危险性分析[J]. 干旱区地理, 2016(5): 1036-1042.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 481.
- [19] 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): 134-143.
- [20] 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.
- [21] Vdovic 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, 61(6): 854-864.
- [22] 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: 22-28.
- [23] 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.
- [24] 章明奎. 预处理对高铁土壤颗粒分析结果的影响[J]. 浙江农业大学学报, 1996, 22(1): 94-97.
- [25] 汤庆峰,李光军,马黎春. 盐湖沉积物粒度分析的超声波分散方法研究[J]. 矿床地质, 2012(S1): 481-482.
- [26] 王英杰,韩春兰,齐向宇,等. 超声波技术在火山碎屑物发育土壤粒度分析中的应用[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 314-319.