

土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比*

杨金玲 李德成 张甘霖[†] 赵玉国 赵文君 唐先干

(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 用激光衍射法(LD法)和吸管法实测了60个富铁土土样的颗粒粒径分布(PSD)数据,在此基础上分别计算了颗粒的质量分形维数 D_m 和体积分形维数 D_v 。结果发现:由于LD法“低估”了黏粒部分,因此 D_v 相对低于 D_m ;由于 D_v 和 D_m 之间呈现出了一定的正相关性($p < 0.001$),且 D_v 与其实测黏粒之间呈一定的正相关性,因此 D_v 在一定程度上也能够用于表征土壤的某些基本属性;LD法可以对粒径进行更多的分级,但不同的粒径分级会对 D_v 产生影响,对粒径的再细分会导致 D_v 略微降低。

关键词 分形维数;激光衍射;吸管法;粒径;富铁土

中图分类号 S152 **文献标识码** A

分形(fractal)理论已成为描述自然界中复杂和不规则空间形体特征一个有效工具,土壤是具有分形特征的系统。自Tyler和Wheatcraft提出了土壤颗粒粒径分布(PSD)的质量分形维数(D_m)计算公式以来^[1],便在土壤科学研究上得到了广泛应用。许多研究表明, D_m 能够用于反映土壤结构、土壤属性和肥力、土壤退化程度等^[2~9]。实际上,Tyler和Wheatcraft首先提出的是PSD的体积分形维数(D_v),但由于当时分析技术很难准确地获取颗粒体积的PSD信息,他们通过假设同一土壤的颗粒具有相同的密度(这显然与土壤的实际情况不符^[10]),通过吸管法或比重计法获取颗粒质量的PSD信息,进而计算出对应的 D_m ^[11]。

激光衍射(Laser Diffraction,LD)技术能够获取土壤颗粒的体积PSD信息,而且分析速度快,独立于颗粒质量,能够提供包括黏粒部分($< 2 \mu\text{m}$)在内的更多级别的PSD信息,因此一些研究通过比较后认为LD技术在土壤学上具有很好的应用前景^[11~18]。但比较研究也发现,LD法实测的黏粒低于吸管法,土壤黏粒的颗粒形状不规则性是导致吸管法“高估”黏粒和LD法“低估”黏粒的主要原因^[16~18]。由于黏粒对于PSD分形维数有明显的影响,因此LD法对黏粒的“低估”势必会对 D_v 产生一定的影响。虽然有研究利用LD法分析了不同土地利用方式下土

壤的 D_v 特征及其与土壤部分性质之间关系^[15],但是迄今为止尚无有关 D_v 和 D_m 之间关系的报道。

LD法和吸管法实测结果不一致主要表现在黏粒部分,而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^[19,20]。为此,本研究选择江西黏粒含量较高的富铁土作为研究对象,在利用LD法和吸管法获取土样的PSD信息后,计算和比较其对应的 D_m 和 D_v ,以探讨LD法在分析富铁土PSD体积分形维数上的应用可行性。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土样为1992年采集的江西9个林地富铁土剖面,共60个土样,剖面基本信息见表1。根据美国土壤质地三角图有37个属于黏土,23个属于壤土。用吸管法测定的黏粒含量为23.9%~55.8%,用LD法测定的黏粒含量为14%~33.6%。土样预处理为:室温风干后的土样过2mm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和蒸馏水淋洗土样除去 Ca^{2+} 和 Cl^- ;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,10~15 min)。

* 国家自然科学基金项目(No. 40625001; 40601040)和土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金资助

[†] 通讯作者, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介: 杨金玲(1973~),女,硕士,助理研究员,主要从事土壤发生和土壤地球化学研究。E-mail: jlyang@issas.ac.cn

收稿日期:2006-12-27;收到修改稿日期:2007-06-11

表 1 供试林地富铁土剖面的基本信息

Table 1 Basic information of Ferrosol profiles in the studied forestland

剖面 Profile No.	位置 Location	中国土壤系统分类 ^[22] CST Classification	美国土壤系统分类 ^[23] USDA Classification	成土母质 Parent material
MSJ02	28 15 N, 116 14 E	黏化湿润富铁土 Agric-Udic Ferrosols	Typical Halpludult	千枚岩 Phyllite
MSJ05	28 22 N, 116 24 E	黏化湿润富铁土 Agric-Udic Ferrosols	Typical Paleudult	花岗岩 Granite
MSJ06	28 23 N, 116 13 E	强育湿润富铁土 Hiweatheri-Udic Ferrosols	Typical Paleudult	第四纪红黏土 Quaternary red clay
MSJ08	28 12 N, 116 35 E	黏化湿润富铁土 Agric-Udic Ferrosols	Typical Paleudult	第四纪红黏土 Quaternary red clay
MSJ09	28 14 N, 116 34 E	黏化湿润富铁土 Agric-Udic Ferrosols	Typical Paleudult	第四纪红黏土 Quaternary red clay
MSJ13	28 23 N, 116 37 E	黏化湿润富铁土 Agric-Udic Ferrosols	Typical Halpludult	硅质砂岩 Siliceous sandstone
MSJ19	27 52 N, 117 45 E	筒育湿润富铁土 Hapli-Udic Ferrosols	Typical Dystrochrept	花岗岩 Granite
MSJ21	28 03 N, 117 46 E	强育湿润富铁土 Hiweatheri-Udic Ferrosols	Typical Dystrochrept	花岗岩 Granite
MSJ22	28 16 N, 117 47 E	筒育湿润富铁土 Hapli-Udic Ferrosols	Typical Dystrochrept	砂页岩 Sandy shale

预处理后的土样用吸管法^[21] (每个样品称取 10 g 左右)和激光衍射法 (Beckman Coulter LS230, USA, 测试粒径范围 0.04 ~ 2 000 μm , 每个样品称取 0.1 g 左右)进行 PSD 分析。所有分析数据的统计处理采用 SPSS11.0.0 Standard Version, SPSS INC, 1989 ~ 2001) 进行。

1.2 D_m 和 D_v 计算方法

计算 D_m 和 D_v 的公式可简单地表示如下^[1,3,15] :

$$\frac{M(< \bar{d}_i)}{M_0} = \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right)^{3-D_m} \quad (1)$$

$$\frac{V(< \bar{d}_i)}{V_0} = \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right)^{3-D_v} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, \bar{d}_i 表示相邻两个粒级 d_i 与 d_{i+1} 间平均粒径,即 $\bar{d}_i = (d_i + d_{i+1})/2$, d_{\max} 为最大粒级的平均粒径, $M(< \bar{d}_i)$ 为粒径小于 \bar{d}_i 的颗粒累积质量, M_0 表示各粒级颗粒的质量之和, $V(< \bar{d}_i)$ 为粒径小于 \bar{d}_i 的颗粒累积体积, V_0 表示各粒级颗粒的体积之和。

D_m 和 D_v 计算步骤为:(1)以各分级区间的上下限的算术平均值来表示平均粒径;(2)统计出大于各区间代表粒径的累积质量或体积,然后转化为对数-对数形式;(3)获取拟合相关直线的斜率,即 $3 - D_m$ 或 $3 - D_v$,从而可以求出分形维数 D_m 和 D_v 。

2 结果与讨论

2.1 D_m 和 D_v 比较分析

Beckman Coulter LS230 可以自动统计出 PSD 各类形式的信息和曲线,图 1 是累积体积的 PSD 曲线。从图 1 中也可以看出,LD 法能够提供黏粒部分 ($< 2 \mu\text{m}$)的 PSD 信息。

以往的粒径分形维数研究基本是按美国土壤质地分类系统的土壤粒径分级进行: < 0.002 、 $0.002 \sim 0.05$ 、 $0.05 \sim 0.1$ 、 $0.1 \sim 0.25$ 、 $0.25 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 1$ 和 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 共 7 个级别^[1, 11~18]。表 2 列出了应用 7 个粒径级别的累积质量和累积体积所计算出的质量分形维数 D_m 和体积分形维数 D_v 及其相应的相关系数。从表 2 的相关系数 r 可以看出,60 个土壤样本的直线斜率都达到了极显著相关,说明所计算的 D_m 和 D_v 是可靠的。从表 2 中的 $(D_m - D_v)/D_m \times 100\%$ 可以看出,60 个土壤样本 D_v 均低于对应的 D_m ,相对低幅为 1.14% ~ 4.20%,平均低 2.47%。37 个黏土的统计数据表明, D_v 低于对应的 D_m 为 1.14% ~ 2.81%,平均低 2.17%;23 个壤土的统计数据表明, D_v 低于对应的 D_m 为 1.55% ~ 4.20%,平均低 2.97%。通过比较发现,黏土的 D_v 与对应的 D_m 的低幅小于壤土,说明黏粒含量越高,低幅越小。

从黏土和壤土的 D_v 看,黏土的 D_v 大于 2.800,而壤土的 D_v 小于 2.800。所以可以认为富铁土在美国

制的 7 级颗粒分级基础上, D_v 大于 2.800 可以认定为黏土。

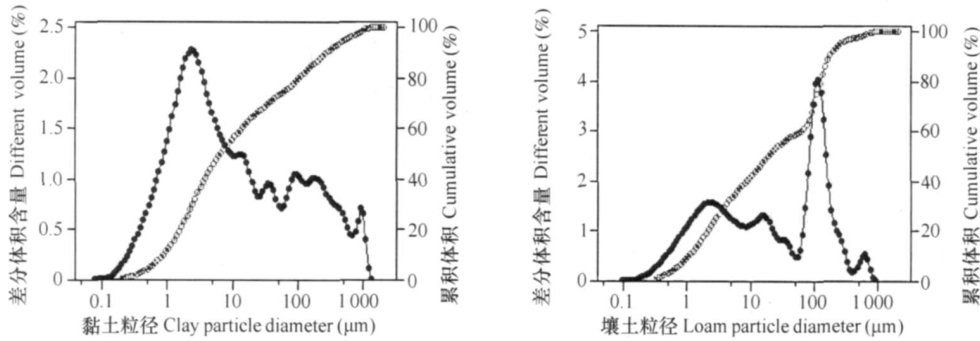


图 1 代表性的黏土 (MSI19) 和壤土 (MSI09) LD 法测定分布和累积体积粒径分布曲线

Fig. 1 Diameter-specific and cumulative volumetric curves of PSD of typical clayey (MSI19) and loamy (MSI09) Ferrosol samples obtained by LD technique

表 2 质量分形维数 D_m 和体积分形维数 D_v 的统计比较

Table 2 Statistics of comparison between D_m and D_v

类型	项目	样品数	平均值	最小值	最大值	标准差
Type	Item	Sample number	Mean	Minimum	Maximum	Std. Deviation
黏土	r_m	37	0.921 4	0.869 0	0.980 7	0.035 8
	r_v	37	0.897 2	0.856 2	0.960 9	0.026 0
	D_m	37	2.898	2.854	2.923	0.017 5
	D_v	37	2.835	2.813	2.861	0.012 7
	$(D_m - D_v) / D_m \times 100 \%$	37	2.17	1.14	2.81	0.421 9
壤土	r_m	23	0.955 0	0.880 7	0.990 9	0.031 0
	r_v	23	0.950 4	0.846 9	0.991 1	0.045 4
	D_m	23	2.852	2.804	2.900	0.026 3
	D_v	23	2.767	2.731	2.795	0.015 7
	$(D_m - D_v) / D_m \times 100 \%$	23	2.97	1.55	4.20	0.734 2
总计	r_m	60	0.934 3	0.869 0	0.990 9	0.037 6
	r_v	60	0.917 6	0.846 9	0.991 1	0.043 1
	D_m	60	2.880	2.804	2.923	0.031 0
	D_v	60	2.809	2.731	2.861	0.036 2
	$(D_m - D_v) / D_m \times 100 \%$	60	2.47	1.14	4.20	0.682 2

D_m 和 r_m : 质量分形维数及其相关系数; D_v 和 r_v : 体积分形维数及其相关系数。 D_m and r_m denote mass fractal dimension and its corresponding correlation coefficient. D_v and r_v denote volume fractal dimensions and its corresponding correlation coefficient

根据式 (1) 和式 (2), 相关直线的斜率 3-D 与黏粒含量成反向关系, 即黏粒含量高, 直线斜率 3-D 值就低, 由此 D 值就高, 黏粒被认为是影响 D 的最主要因素^[1, 11~18]。实测的 60 个土壤样本的数据表明, LD 法实测的黏粒含量为 14.0% ~ 33.6%, 平均为 24.6%, 较吸管法实测的黏粒含量 (23.9% ~ 55.8%, 平均为 42.2%) 相对低 20.1% ~ 62.6%, 平均低 41.33%。LD 法对黏粒的“低估”也导致了“高估”, LD 法实测的粉粒部分为 27.8% ~ 79.3%, 平均为 50.3%, 吸管法实测的粉粒含量为

13.0% ~ 59.5%, 平均为 34.4%。但两种方法在实测的砂粒含量上比较复杂, 相互有高低。上述分析可以表明导致 D_v 相对低于 D_m 的直接原因是 LD 法实测的黏粒含量低于吸管法。

LD 法与吸管法测定的黏粒含量差异较大主要是因为二者的测定原理不同和土壤颗粒的不规则形状^[24], 传统的沉降法是建立在 Stokes 定律基础上的当量直径, 反映颗粒的沉速; 而激光粒度仪测定的是依据光学衍射原理 (Fraunhofer 衍射理论和 Mie 理论) 的当量直径, 反映颗粒的横截面特征, 这两种方

法测量的是同一颗粒的不同特征^[24,25]。当然不同粒级的颗粒密度不同对体积的大小和吸管法的沉降速率的影响也是两种方法测定结果不同的主要差异原因之一。

2.2 D_v 应用的可行性分析

现有的 D_m 研究均认为其可以表征土壤某些属性,但实际上 Tyler 和 Wheatcraft 首先提出的是 PSD 的体积分形维数 D_v ^[11],因此 D_v 应该也具有这一作用,且更切合实际。对 D_v 和 D_m 进行相关分析发现,虽然 D_m 和 D_v 存在一定的差异,但两者之间呈现出了一定的正相关性(图 2),说明两者之间能够进行一定的数据转换。其转换方程式为 $D_v = 0.9846D_m - 0.0271$,其中 $r = 0.8420$, $p < 0.001$ 。

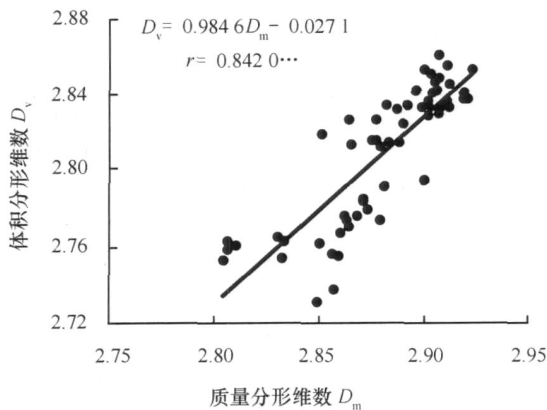


图 2 LD 法的 D_v 和吸管法的 D_m 之间的相关性

Fig. 2 Correlation between D_v and D_m obtained by LD and pipette methods

很多研究表明, D_m 能够表征土壤的某些属性,如 D_m 与黏粒质量含量之间呈显著的正相关性^[1, 11~18]。本研究发现,LD 法的 D_v 与其实测的黏粒体积百分含量之间也呈现出了显著的正相关性(图 3, $p < 0.001$)。同时, D_m 与砂粒的质量百分含量,

D_v 与砂粒的体积百分含量均各自具有极显著的相关性。虽然 D_m 与粉粒的质量含量不具有相关性,但 D_v 与实测的粉粒体积百分含量具有极显著相关性。这说明 D_v 与 D_m 一样能够反映土壤的特性,甚至能够较 D_m 更好地反映土壤的特性。王国梁等的研究也表明了用 LD 获得的分形维数与土壤的黏粒、粉粒和砂粒分别具有相关性^[15]。但王国梁等采用的是对数模拟方程,本研究采用的是直线方程,这其中的原因有待于进一步的研究。从图 3 还可以看出,虽然 D_v 与黏粒、粉粒和砂粒均分别具有显著的相关性,但从离散程度看, D_v 与粉粒和砂粒的离散程度远远大于黏粒。由此可见, D_v 与黏粒的关系更加紧密。同样, D_m 也具有该性质。

2.3 更多的粒径分级可能对 D_v 的影响

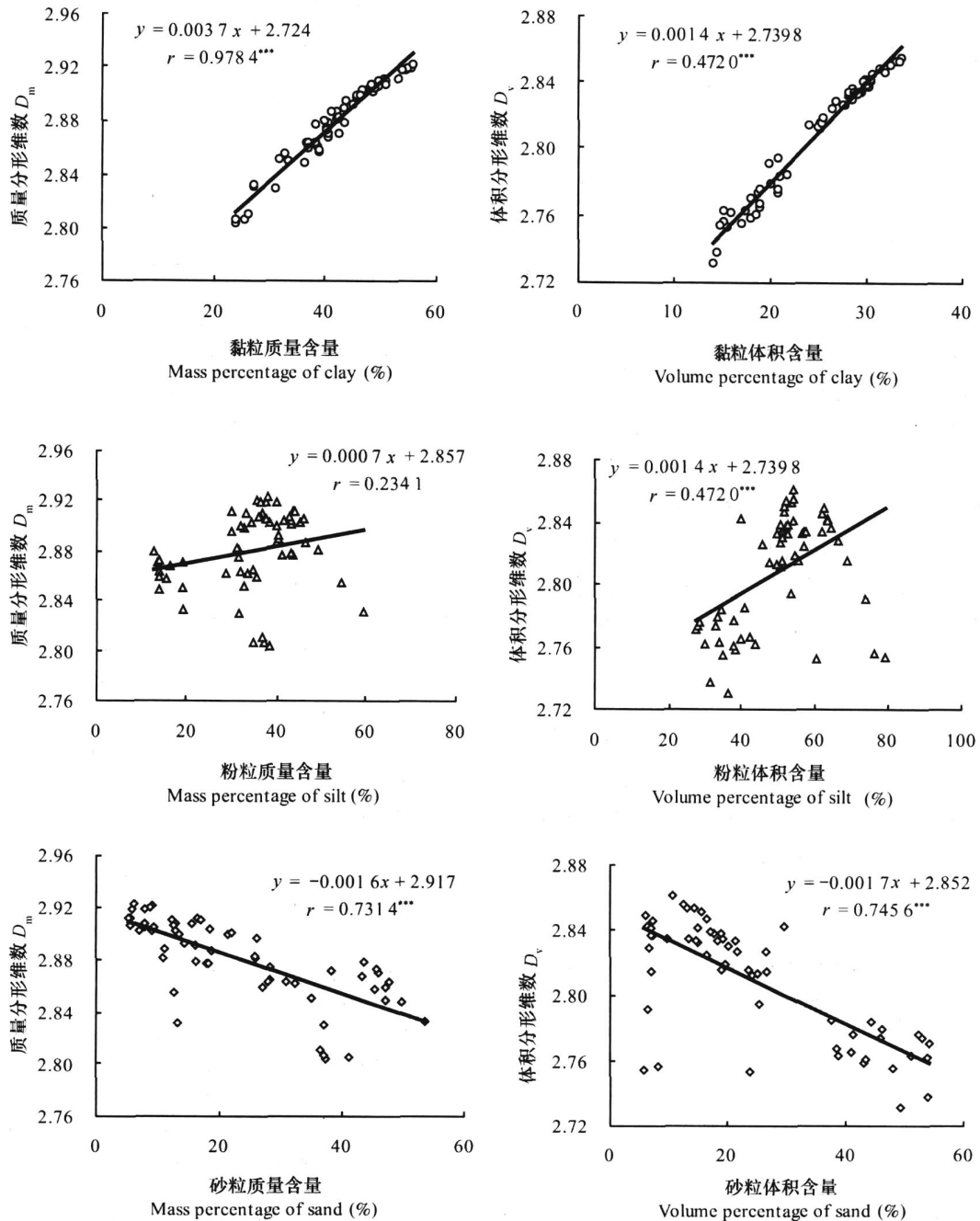
与吸管法相比,LD 法可以对粒径进行更多的分级,也就是说可以获取更多粒径级别的 PSD 信息。那么,不同的粒径分级会对 D_v 产生什么影响呢?显然,如果将黏粒部分($< 2\mu\text{m}$)再细分,无疑会进一步提高式(1)和式(2)中斜率 $3 - D_v$ 的值,从而导致 D_v 的降低。为此,在前文提到 7 个级别的基础上,在各级之间再均分出一个级别,即 < 0.001 、 $0.001 \sim 0.002$ 、 $0.002 \sim 0.025$ 、 $0.025 \sim 0.05$ 、 $0.05 \sim 0.075$ 、 $0.075 \sim 0.1$ 、 $0.1 \sim 0.175$ 、 $0.175 \sim 0.25$ 、 $0.25 \sim 0.375$ 、 $0.375 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 0.75$ 、 $0.75 \sim 1$ 、 $1 \sim 1.5$ 、 $1.5 \sim 2 \text{ mm}$ 共 14 个级别,然后依据式(1)和式(2)分别计算出各土样的 D_v (见表 3)。通过比较发现,60 个土壤样本的 14 个粒径分级的 D_v 为 2.706 ~ 2.823,平均为 2.767。较 7 级粒径分级的 D_v 略微降低 0.10% ~ 2.11%,平均降低 1.39%。虽然 D_v 的降低幅度不大,但从黏土来看,部分土样的 D_v 已经小于 2.800 了。所以,不能简单地认为 D_v 大于 2.800 就是黏土,同时还应当考虑粒径的分级标准。

表 3 14 个分级后的体积分形维数 D_v

Table 3 Volume fractal dimensions, D_v , of soils divided into 14 class in particle size

类型	项目	样品数	平均值	最小值	最大值	标准差	
Type	Item	Sample number	Mean	Minimum	Maximum	Std. deviation	
黏土	r_v	37	0.884 7	0.844 9	0.931 9	0.022 1	
	Clay	D_v	37	2.792	2.759	2.823	0.016 5
		$(D_{v7} - D_{v14}) / D_{v7} \times 100\%$	37	1.51	0.96	2.11	0.242 5
壤土	r_v	23	0.939 7	0.849 8	0.980 4	0.041 8	
	Loam	D_v	23	2.734	2.706	2.792	0.019 4
		$(D_{v7} - D_{v14}) / D_{v7} \times 100\%$	23	1.20	0.10	1.78	0.353 8
总计	r_v	60	0.905 8	0.844 9	0.980 4	0.041 0	
	Total	D_v	60	2.767	2.706	2.823	0.033 6
		$(D_{v7} - D_{v14}) / D_{v7} \times 100\%$	60	1.39	0.10	2.11	0.326 3

D_v 和 r_v : 体积分形维数及其相关系数。 D_v 和 r_v denote volume fractal dimensions and its corresponding correlation coefficient

图3 D_v 和 D_m 与土壤质地之间的相关性Fig. 3 Correlations of soil texture with D_v and D_m

如果将黏粒与邻近粒级的颗粒(如细粉粒)合在一起,然后再细分其他较粗的粒级,又会降低式(1)和式(2)中斜率 $3 - D_v$ 的值,从而导致 D_v 的升高。至于具体采用几级标准,考虑到美国土壤粒径分级标准(7级)已被国际上普遍接受,同时,由其计算出的颗粒分形维数与更多粒径级别的差异较小,已能够准确地反映分形维数,因此出于效率的角度,认为按美国土壤粒径7级标准计算分形维数就可以了。

本研究计算出的 D_v 值相对较高,达 2.7 以上,而王国梁等^[15]对江苏宜兴地区茶园、菜地、农田的 D_v 计算结果为 2.281~2.389,明显低于本研究的 D_v 计算结果。这主要是由于供试土壤类型的黏粒含量差异引起的,本研究所选用的为黏粒含量较高的黏土和壤土,黏粒体积含量为 14.0%~33.6%;而王国梁等的土壤黏粒体积含量仅为 0.20%~1.20%。显然,土壤的高黏粒含量大大提高了计算出的 D_v 值。

因此, D_v 可以作为一个反映土壤的粒级组成和质地信息的函数, 对于富铁土进行美国制的土壤颗粒 7 级分类标准, 2.800 以上的 D_v 值可以用于表征黏性土壤。

3 结 论

1) 激光衍射技术(LD法)推导出的土壤颗粒体积分形维数 D_v 相对低于吸管法推导出的颗粒质量分形维数 D_m , 导致 D_v 相对低于 D_m 的直接原因在于 LD 法实测的黏粒含量低于吸管法。但 D_v 和 D_m 之间呈现出了一定的正相关性 ($p < 0.001$), 其拟合方程为: $D_v = 0.9846 D_m - 0.0271$ 。

2) D_v 与其实测黏粒、粉粒体积含量之间呈一定的正相关性, 与砂粒含量之间具有一定的负相关性, 尽管均达到了极显著相关, 但 D_v 与黏粒的关系更为紧密。因此 D_v 也能够像 D_m 一样在一定程度上用于表征土壤的特性。

3) 对土壤按照美国制的 7 个粒级的分类标准计算得到的 D_v 大于 2.800 时, 可以认为该土壤为黏土。但 D_m 不具有这一特点。LD 法可以对粒径进行更多的分级, 但不同的粒径分级会对 D_v 产生影响, 对黏粒部分再细分会导致 D_v 略微降低。

参 考 文 献

- [1] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 362 ~ 369
- [2] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究. *土壤学报*, 1999, 36(2): 162 ~ 167. Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregation structure under different management patterns (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 162 ~ 167
- [3] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究. *土壤与环境*, 2000, 9(4): 263 ~ 265. Li D C, Zhang T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(4): 263 ~ 265
- [4] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 112 ~ 115. Gong A D, He Y R. Study on fractal features of soil structure of degraded soil in dry and hot valley region of Jinsha River (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(3): 112 ~ 115
- [5] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系. *土壤学报*, 2002, 39(2): 221 ~ 226. Zhang S R, Deng L J, Zhou Q, *et al.* Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 221 ~ 226
- [6] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征. *土壤学报*, 2002, 39(5): 877 ~ 881. Zhao W Z, Liu Z M, Cheng G D. Fractal dimension of soil particle for sand desertification (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 877 ~ 881
- [7] 程先富, 史学正, 王洪杰. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒分形研究. *地理科学*, 2003, 23(5): 617 ~ 621. Cheng X F, Shi X Z, Wang H J. Fractal characteristics of particle of arable layers in hilly region of red earth (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(5): 617 ~ 621
- [8] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. *生态学报*, 2004, 24(1): 71 ~ 74. Su Y Z, Zhao H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farm land in Horqin Sandy Land (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 71 ~ 74
- [9] 刘永辉, 崔德杰. 长期定位施肥对潮土分形维数的影响. *土壤通报*, 2005, 36(3): 324 ~ 327. Liu Y H, Cui D J. Effects of long-term fertilization on fractal dimension (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 324 ~ 327
- [10] 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
- [11] 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
- [12] Wu Q, Borkovec M, Sticher H. On particle-size distributions in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 883 ~ 890
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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. *Geoderma*, 2006, 135: 118 ~ 132
- [17] 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
- [18] 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
- [19] Hillel D. *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press, 1998
- [20] 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
- [21] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1983. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. Soil Physical and Chemical Analysis (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1983
- [22] 中国土壤系统分类研究协作组. 中国土壤系统分类(第三版). 合肥: 中国科技大学出版社, 2001. Cooperative Research Group of Chinese Soil Taxonomy. Chinese Soil Taxonomy (In Chinese). 3rd Ed. Hefei: Science and Technology University of China Press, 2001
- [23] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy. 9th Ed. Washington, D C: United States Department of Agriculture / Natural Resources Conservation Service, 2003
- [24] 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. 沉积学报, 2001, 19(3): 449 ~ 455. Cheng P, Gao S, Li X S. Evaluation of a wide range laser particle size analyses and comparison with pipette and sieving methods (In Chinese). Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 449 ~ 455
- [25] 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. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2003, 31(4): 87 ~ 92. Pang J L, Huang C C, Jia Y F. Comparison grain size analytical results in loess, soil between laser and hydrometer method (In Chinese). Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2003, 31(4): 87 ~ 92

COMPARISON OF MASS AND VOLUME FRACTAL DIMENSIONS OF SOIL PARTICLE SIZE DISTRIBUTIONS

Yang Jingling Li Decheng Zhang Ganlin[†] Zhao Yuguo Zhao Wenjun Tang Xiangan

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

Abstract Laser diffraction (LD) technique and pipette method were used to measure particle size distributions (PSD) of 60 ferrosol samples. Based on the measurements, mass fractal dimension, D_m , and volume fractal dimension, D_v , were calculated and compared. Results show that D_v is lower than D_m because the laser diffraction technique “underestimated” the clay fraction compared to the pipette method. As significant linear correlations were observed between D_v and D_m as well as between D_v and its measured clay fraction, D_v could also be used to characterize some basic soil properties. The LD method could divide soil particle size into more classes with distinctive D_v value. Further division of particle size classes might lead to slight decrease in D_v .

Key words Fractal dimension; Laser diffraction; Pipette; Particle size distribution; Ferrosol