

陕西4种土壤粒径分布的分形特征研究^{*}

刘云鹏¹, 王国栋², 张社奇², 党亚爱²

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 2 生命科学学院, 陕西 杨陵 712100)

[摘 要] 采用分形模型, 研究了陕西4种不同质地的土壤粒径的重量分布。结果表明, 土壤结构具有明显的分形特征, 其粒径分布分形维数为0~3。分形维数与土壤中粘粒含量呈明显的线性相关, 表现为粘粒含量越高的土壤, 其分形维数也越高。分形维数不仅受粘粒含量的支配, 还与土壤质地的均一程度有关, 土壤质地均匀指数 I_u 与分形维数也表现出一定的相关性, 但相关性较弱。

[关键词] 土壤结构; 分形维数; 粒径分布; 均匀指数

[中图分类号] S152.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2003)02-0092-03

分形一词是美籍法裔数学家Mandelbort B B创造出的一个新的科学术语, 用以描述自然界中广泛存在的不规则的复杂几何形体^[1]。这类几何形体由于没有确定的特征尺度, 难以用传统几何和经典数学的理论加以描述, 但在形态和结构上却表现出极大的自相似性。目前的研究表明, 分形理论已受到自然科学家和社会科学家的普遍关注, 成为研究和处理复杂现象的强有力的理论工具^[2~4]。

土壤的结构和质地状况一直是土壤学家关注和研究的重点内容。在结构上, 形态和大小各异的土壤颗粒构成的多孔介质体系, 是一个极不规则的几何形体。Tyler等^[5], Horgan^[6]和杨培岭等^[7]的研究表明, 土壤粒径分布表现出明显的分形特征。与传统的采用土壤粒径的数量分布来描述土壤的分形特征相比, 用土壤粒径的重量分布来描述土壤的分形特征模型更为简便, 并能说明分形维数的物理意义。本研究对陕西地区4种不同质地土壤的粒径分布的分形特征进行了研究, 探讨了分形维数的物理意义、分形维数与粘粒含量以及分形维数与土壤质地的均匀性的关系, 以期描述土壤结构和质地状况提供新的尺度和方法。

1 模 型

Turcotte^[8]提出的多孔介质材料的粒径分布公式为:

$$N(\delta > d_i) \propto d_i^{-D} \quad (1)$$

式中, N 为粒径大于 d_i 的颗粒的累计数量, D 为粒

径分布分形维数。由于 N 值的准确计算难以从试验中得到, 其值受到假设与实际符合程度的影响, 也影响了 D 值的准确计算。理论上, D 可以取大于0的任何正实数, 但没有很明显的物理含义。

土壤是一种具有自相似结构的多孔介质, 大于某一粒径 d_i ($d_i > d_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots$) 的土粒构成的体积可由类似Katz等^[9]的公式表示:

$$V(\delta > d_i) = A [1 - (d_i/k)^{3-D}] \quad (2)$$

式中, δ 是码尺, A 和 k 是描述形状、尺度的常数, D 是分形维数。

在一般的土壤分析中, 土壤粒径的分析结果用一定粒级间隔的颗粒重量表示。若以 $\bar{d}_i$ 表示两筛分粒级 d_i 和 d_{i+1} 间粒径的平均值, 忽略各粒级间土粒密度 ρ 的差异, 即 $\rho_i = \rho$ ($i = 1, 2, \dots$), 则有

$$W(\delta > \bar{d}_i) = V(\delta > \bar{d}_i) \rho = pA [1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D}] \quad (3)$$

式中, $W(\delta > \bar{d}_i)$ 表示粒径大于 d_i 的累计土粒重量。以 W_0 表示土壤各粒级质量的总和, 由定义有 $\lim_{i \rightarrow \infty} \bar{d}_i = 0$, 则由(3)式得

$$W_0 = \lim_{i \rightarrow \infty} W(\delta > \bar{d}_i) = pA \quad (4)$$

由(3)、(4)式导出

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{k}\right)^{3-D} \quad (5)$$

设 $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均直径, $W(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$, 代入(5)式有 $k = \bar{d}_{\max}$, 由此得出土壤颗粒的重量分布与平均粒径的分形关系式为:

* [收稿日期] 2002-04-08

[作者简介] 刘云鹏(1971-), 男, 陕西三原人, 讲师, 在读硕士, 主要从事土壤物理与节水技术研究。

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} \quad (6)$$

或
$$\frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0} = \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} \quad (7)$$

其中, 粒径分布分形维数 D 可由回归分析方法得到。从(7)式可知, D 应小于 3, 因为当 D 大于 3 时, (7) 式将失去物理意义。综合(1)、(7)两式, 粒径分布分形维数值应为 0~3。

表 1 4 种不同土样颗粒累积质量分数

Table 1 Particle cumulative mass of four soil samples

土样 Soil samples	粒径分布/mm Particle-size distribution						D	r
	1~ 0.25	0.25~ 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.005	0.005~ 0.001	< 0.001		
黄绵土 Yellow cinamon soil	0.98	17.6	58.5	6.5	7.06	9.36	2.63	0.955
塋土覆盖层 Old manured loessal	0.65	7.2	46.1	13.1	17.7	15.3	2.73	0.918
塋土粘化层 Argic horizon soil	5.1	3.2	34.5	10.4	18.8	28.0	2.82	0.949
黄褐土 Yellow loessal soil	0.91	7.7	31.1	5.0	15.0	40.3	2.87	0.968

3 结果与讨论

分别以 $\log(W_i/W_0)$, $\log(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 为纵横坐标, 根据表 1 中 4 种土样的粒径分布数据作图 1, 应用线性回归计算出粒径分布的分形维数在 2.63~2.87, 平均值为 2.75。

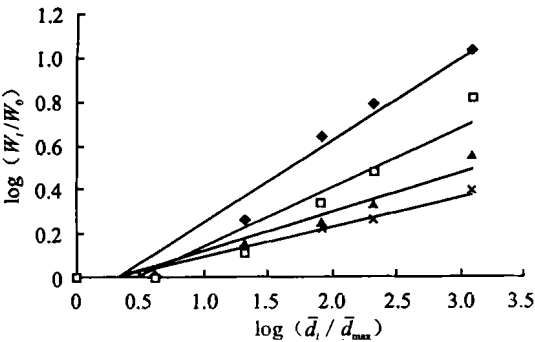


图 1 4 种土样 $\log(W_i/W_0)$ 和 $\log(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 的关系
—◆—, 黄绵土; —□—, 塋土;
—▲—, 塋土下粘化层; —×—, 黄褐土

Fig. 1 The relationship between $\log(W_i/W_0)$ and $\log(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ of four soil samples

—◆—, Yellow cinamon soil; —□—, Old manured loessal soil;
—▲—, Argic horizon soil; —×—, Yellow loessal soil

从回归分析结果可以看出, 土壤作为一种多孔介质, 其结构性质具有统计意义上的自相似性, 表现出明显的分形特征。其粒径分形维数表现为: 黄绵土 < 塋土 < 塋土下粘化层 < 黄褐土。表明土壤质地越粗, 越不易形成良好的结构, 分形维数也较小, 如黄绵土的粒径分布分形维数只有 2.63; 土壤质地越细, 因包含的小土粒越多, 形成的微小孔隙也越多,

2 材料与方法

4 种试验土样分别为黄绵土(陕西延安)、塋土覆盖层(陕西杨陵)、塋土下粘化层(陕西杨陵)、黄褐土^[10](陕西城固), 其质地分别为砂壤土、壤土、重壤土、轻粘土。每种土样分别取 4 个样品, 过 1 mm 筛后, 采用吸管法进行机械分析^[11], 分析结果见表 1。

结构也更复杂, 分形维数就越高, 如供试土样中的塋土下粘化层和黄褐土的粒径分布分形维数都大于 2.80。理论上^[5], 没有任何固相填充的孔隙空间的分形维数为 2, 没有任何孔隙岩石的分形维数等于 3。塋土通常所具有的良好土壤结构, 既能保证良好的通气透水性, 也具有一定的保水保肥性能, 其粒径分布分形维数为 2.73, 接近 2.60 和 2.80 的平均值。可见, 结构良好的土壤的粒径分布分形维数应在 2.75 左右。粒径分布分形维数为土壤结构评价提供了一个新的指标。

土壤中粘粒含量对分形维数具有重要的影响, 4 种土样中的粘粒(< 0.001 mm)含量与分形维数的关系表现为粘粒含量越高, 其分形维数也越高。粘粒含量与分形维数的相互关系为:

$$y = 0.0074x + 2.5905, r = 0.9276$$

表现出明显的相关性。分形维数实际上反映了土壤颗粒对空间的填充能力: 砂土质地较粗, 粘粒含量小, 分形维数低; 从砂壤土到壤土, 直至轻粘土, 质地越细, 粘粒含量越高, 分形维数也越高。

土壤粒径分布的分级特征可用土壤均匀指数 I_u 来表示, 其值为累计分数 60% 的颗粒所对应的直径和 10% 的颗粒所对应的直径之比, 常用来描述土壤质地均一程度, 均匀指数 I_u 越小, 质地越均一。4 种不同质地的土样的均匀指数为: 黄绵土 < 塋土 < 塋土下粘化层 < 黄褐土。均匀指数 I_u 与粒径分布分形维数的关系为:

$$y = 0.0013x + 2.6561, r = 0.787$$

也表现出一定的线性相关性, 但相对于粘粒含量与

分形维数的相关性弱。可见,土壤结构形态不仅受颗粒大小,特别是小粒径土粒的支配,而且还受各粒级土粒数量分布,即质地均一程度的影响,其关系可能更为复杂,还有待进一步研究。

4 结 论

土壤作为一种多孔介质,表现出明显的分形特征。其粒径分布分形维数反映土粒对空间的填充能力。本研究中,4种土样的粒径分布分形维数在 $2.63 \sim 2.87$,理想结构土壤的粒径分布分形维数应在 2.75 左右。粒径分布分形维数为土壤结构的评价提供了一个新指标。

4种土样的粘粒含量与粒径分布分形维数之间呈明显的线性相关,表明粘粒含量对分形维数的大小起决定性影响,粘粒含量越高,土壤质地越细,粒径分布分形维数也越高。

反映土壤质地均一程度的均匀指数(I_u)与粒径分布分形维数也呈一定的相关性,但关系较弱。这表明分形维数除受粘粒含量支配外,还受到各粒级土粒分布的影响,其关系有待进一步研究。

粒径分布分形维数作为反映土壤多孔介质结构和质地性状的又一重要参数,为描述土壤结构性质提供了一个全新的方法和工具。

[参考文献]

- [1] Mandelbrot B B. The fractal Geometry of Nature[M]. New York: W H Freeman, 1982
- [2] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤学进展, 1994, 22: 1- 10
- [3] Maro Bittelli, Gaylon S C. Characterization of particle-size distribution in soil with a fragmentation model[J]. Soil Sci Soc Am J, 1999, 63: 782- 788
- [4] 冯 杰. 分形理论在土壤大孔隙研究中的应用及其展望[J]. 土壤, 2001, 33: 119- 123
- [5] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56: 326- 369
- [6] Horgan G W. Mathematical morphology for analyzing soil structure from images[J]. European Journal of Soil Science, 1998, 49: 161- 173
- [7] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896- 1899
- [8] Turcotte D L. Fractal fragmentation model of soil aggregation[J]. J Geography Res, 1993, 91(12): 1896- 1899
- [9] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation [J]. Phys Rev Lett, 1985, 54: 1325- 1328
- [10] 张富仓. 温度对土壤水分运动和保持的影响[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 1993
- [11] 华 孟, 王 坚. 土壤物理学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1992

Fractal characteristics of particle-size distribution for four kinds of soil samples in Shaanxi

L IU Yun-peng¹, WANG Guo-dong², ZHANG She-qí², DANG Ya-a¹

(1 College of Resources and Environmental Science; 2 College of Life Sciences, Northwest Sci-Tech University of
Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Fractal model has been used to study soil structure by using mass-based soil particle-size distribution (PSD) data. The conclusion is: soil structure has clear fractal scaling, the range of soil PSD of the fractal dimension behavior is strictly limited to $0 < D < 3$. There is a clear linear correlation between the fractal dimension and the clay content, when the clay content is higher, the fractal dimension is higher too. The fractal dimension is not only deeply affected by the clay content, but also by the uniformity of texture approximately. There is a linear correlation between the fractal dimension and the index of uniformity (I_u), but the correlation is lower against the relationship between fractal dimension and the clay content.

Key words: soil structure; fractal dimension; particle-size distribution (PSD); index of uniformity (I_u)