

土壤粒径分布单重分形与孔隙单重分形

王卫华*, 龙小军

(昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 土壤颗粒大小的分布是重要的土壤物理性质, 对土壤水、气、热传导特性有着显著的影响。鉴于土壤颗粒分形在分析和描述岩土介质多孔结构的优势, 本文通过对 5 种不同质地的土样进行颗粒分析与水分特征曲线的测试。结果表明: 土壤结构量化表征的方法就是确定土壤结构的分形维数, 针对不同地区的土壤, 可以通过土壤粒径分布分形维数体现土壤粒径分布的情况, 分形维数越大, 颗粒粒径越小, 细粒含量越高, 质地越发呈现不均匀性; 且可利用土壤粒径分形维数估算土壤孔隙分形维数。为建立土壤粒径分布模型提供数据支持, 同时也为推进土壤结构的研究进展提供了新的方向。

关键词: 土壤颗粒; 分形; 分形维数; 土壤结构

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2018) 04-0055-05

土壤是由形状不同、大小不均的固体颗粒及孔隙按照一定排列形式构成的多孔介质。土壤的质地与结构由土壤中固体颗粒的大小、数量、形状及其结合方式所决定, 从而影响土壤物理基本性质^[1]。土壤粒径分布 (Particle-size distribution, PSD) 是最基本的土壤物理性质之一, 指的是土壤固相不同粗细级别土粒所占的比例; 土壤孔隙分布是指土壤孔隙的数量搭配、形态大小及其空间分布状况, 土壤粒径分布与土壤孔隙分布显著影响着土壤水、气、热传导特性^[2]。土壤结构由于受到各种因素影响, 导致土壤在形态和结构各方面体系变得不规律^[3]。定量描述和模拟土壤颗粒分布与孔隙分布的特征能够为进一步研究和探索土壤水、气、热传导参数提供基础理论^[4]。

复杂形体的不规则性由分形维数来度量, 其反映出复杂形体占有空间的有效性。土壤结构量化表征的方法就是确定土壤结构的分形维数, 土壤粒径分布分形维数反映了粒径大小和分布的均匀程度以及土壤质地中黏粒、粉粒和砂粒含量的变化; 土

壤孔隙分形维数反映了土壤孔隙与固体颗粒接触界限的不规则性。Tyler 等^[4]首先通过颗粒大小分析资料确定孔隙分形维数, 并且推测了土壤水分特征曲线。经过几十年的发展, 分形理论的进展为土壤和相关复杂体系的量化研究给予了一种有效的参考方式^[5-7]。由于分形理论的发展, 其在土壤学中的应用也越来越广^[8-11]。王德等^[12]对分形和多重分形参数作为反映土壤物理性质和土壤质量的潜在性指标进行了分析, 任婷婷等^[13]揭示了土壤颗粒分形特征与黏粒含量的关系, 陈新闯等^[14]对土壤分形特征与防蚀固砂效果的关系进行了研究; 近年来关于土壤颗粒分形维数的研究主要是粒径分布和颗粒组成成分^[15-17]、不同植被类型的土壤分形特征^[18-20]、不同有机物料的施量对土壤结构的影响^[21]、不同耕作措施对土壤孔隙分形的影响^[22]等。

前人研究结果表明土壤粒径、颗粒表面积、颗粒体积、孔隙大小等具有自相似特征^[23-24], 因此分形理论及其研究方法被引入到土壤物理学中, 定量描述土壤结构的非均匀特征, 为研究土壤物理基本性质提供理论支撑^[25]。本文以不同采集地点的 5 种土样作为供试土样, 以土壤颗粒机械组成和水分特征曲线为基础, 分析土壤粒径分布及土壤孔隙分布的单重分形, 对分形维数与土壤质地的关系进行分析, 将土壤粒径分布分形维数与孔隙分形维数进行比较, 探讨土壤质地对 PSD 单重分形参数的影响, 为建立 PSD 模型提供数据支持。

收稿日期: 2017-10-18; 最后修订日期: 2018-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51409136); 昆明理工大学自然科学研究基金资助项目 (KKS201423023); 昆明理工大学分析测试基金 (2016T20130191, 2016M20152214008); 云南省高校工程研究中心建设计划。

作者简介: 王卫华 (1982-), 女, 陕西西安人, 副教授, 博士, 主要从事土壤物理、节水灌溉研究。E-mail: wangweihua1220@163.com。同时为通讯作者。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

选取陕西杨凌、云南昆明、辽宁沈阳、新疆库尔勒、山东临沂 5 个地方的农耕地，采集 0 ~ 25 cm 表层土样。带回实验室风干，过 2 mm 土壤筛，将供试土样送至昆明理工大学分析测试中心，采用 MS2000 型激光粒度分析仪测试土壤颗粒机械组成。每样 3 个重复，取平均值。同时制备扰动土土样，按照 1.3 g · cm⁻³ 容重装入标准环刀，测试水分特征曲线。

1.2 理论公式

1.2.1 土壤粒径分布单重分形

假定具有自相似结构的多孔介质土壤由不同大小的颗粒所组成，在二维平面中有^[4]：

$$\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} \tag{1}$$

式中：M 为土壤颗粒质量，r 为测定尺度，R_{max} 为最大土壤颗粒粒径， $\bar{R}_i$ 为平均粒径，M_T 为土壤颗粒总质量。对上式两边取对数，即得：

$$\lg\left[\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T}\right] = (3-D) \lg\left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}}\right) \tag{2}$$

其中，D 表示土壤粒径单分形的分形维数。

1.2.2 土壤孔隙分布单重分形

黄冠华等^[26]通过 Menger 海绵模型推导出水分特性曲线模型为：

$$\psi = \psi_a \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{\frac{1}{D'-3}} \tag{3}$$

其中， θ_s 为土壤饱和含水率， ψ 为土壤水基质吸力， ψ_a 为进气吸力，D' 表示海绵体的分形维数，表征孔隙大小的分布。这与 Campell 经验模型^[27]形式相似。Campell 模型如下：

$$\frac{\psi}{\psi_a} = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{-b_c} \tag{4}$$

其中，b_c 为经验系数，b_c = 1/(3 - D')。

2 结果与分析

2.1 土壤颗粒机械组成与水分特征曲线

将土壤颗粒机械组成各粒径结果导入土壤质地自动识别系统 (Soil Texture Automatic Recognition System, STARS)^[28]，采用国际制标准进行分类，结果如表 1 所示。

表 1 供试土样颗粒组成

样本 编号	采集地点	土壤颗粒含量 (%)			土壤质地
		黏粒 (< 2 μm)	粉粒 (2 ~ 50 μm)	砂粒 (50 ~ 200 μm)	
1	陕西杨凌	17.28	44.32	38.40	粉粘壤土
2	云南昆明	16.54	28.86	54.60	黏壤土
3	辽宁沈阳	8.38	20.11	71.51	砂壤土
4	新疆库尔勒	12.87	26.16	60.97	砂壤土
5	山东临沂	13.86	37.73	48.41	壤土

供试土样水分特征曲线如图 1 所示。为了更加清楚地反映各土样进气吸力段的曲线形态，特将吸力 0 ~ 100 cm H₂O 段放大；在基质势高的时候尤为显著，随着基质势的降低，吸附作用对土壤孔隙结构的这种改变主要集中在大孔隙，故结构影响比较显著。土壤质地（颗粒组成）对水分特征曲线有明显影响，黏粒含量越高的土壤，任何吸力下土壤含水率都较大，如图中云南昆明土壤中细孔隙较多，能吸持较多水分，其水分特征曲线下降的相对较慢；砂质土大孔隙发育，水分容易排走，如图中新疆库尔勒土壤含水率急剧下降，曲线坡度陡。在结构良好的土壤中，土壤团聚作用明显，孔隙分布均匀，含水率随吸力的增加而减少的过程缓慢，曲线坡度较缓和。

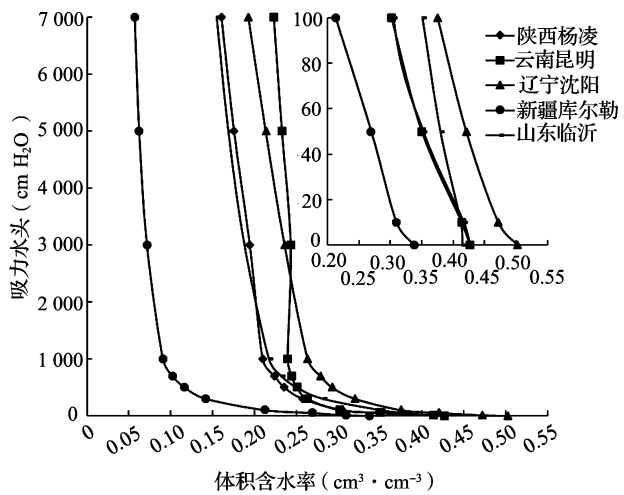


图 1 供试土样土壤水分特征曲线

2.2 土壤颗粒单重分形

将土壤颗粒粒径分级数据带入式 (2)，建立土壤粒径对数关系图，如图 2 所示。采用回归分析方法拟合趋势线，线条斜率为 3 - D，即可确定分形维数 D，结果如表 2。

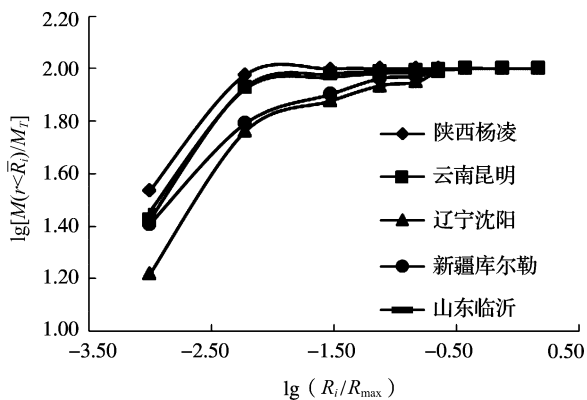


图2 土壤粒径对数关系图

表2 土壤粒径分布的分形维数

采集地点	斜率	粒径分形
陕西杨凌	0.110	2.890
云南昆明	0.142	2.858
辽宁沈阳	0.217	2.783
新疆库尔勒	0.168	2.832
山东临沂	0.136	2.864

为建立土壤粒径分形维数与土壤质地的关系，绘制粒径分形维数与供试土样黏粒、砂粒的关系图，如图3所示。从图3中可以看出，供试土样粒径分形维数在2.783~2.890之间，该结果与管孝艳等^[3]、黄冠华等^[29]的研究结果一致。土壤结构形状的数据可以通过土壤粒径分形维数进行表达，

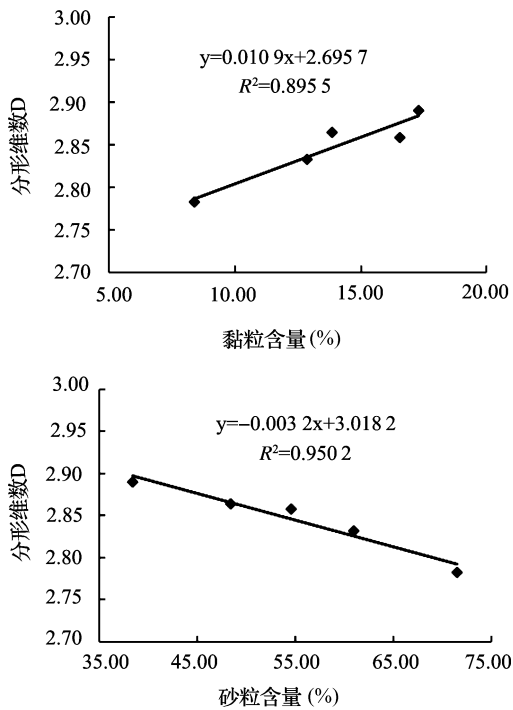


图3 土壤粒径分形维数与黏粒含量、砂粒含量的关系

其本质是颗粒对土壤空间进行填充能力的优劣，在维数上表现为分形维数随黏粒含量的增高而增大，随砂粒含量的增高而降低。土壤结构量化表征的方法就是确定土壤结构的分形维数，对于不同性质的土壤，其粒径分布分形维数反映粒径的大小分布的均匀程度，土壤颗粒直径越小、细粒物质含量越高，对空间的填充能力越强，土壤分形维数越大，质地越发呈现不均匀性，分形维数随土壤质地由粗到细，出现由小到大的变化趋势。

2.3 土壤孔隙单重分形

土壤孔隙分形维数可以用来表征土壤水力特性参数，根据供试土样水分特征曲线实测数据，拟合土壤含水率与土壤水吸力之间的对数关系（图4），用式（4）提到的 campell 模型进行处理分析，可得土壤孔隙大小分布的单分形维数（表3）。

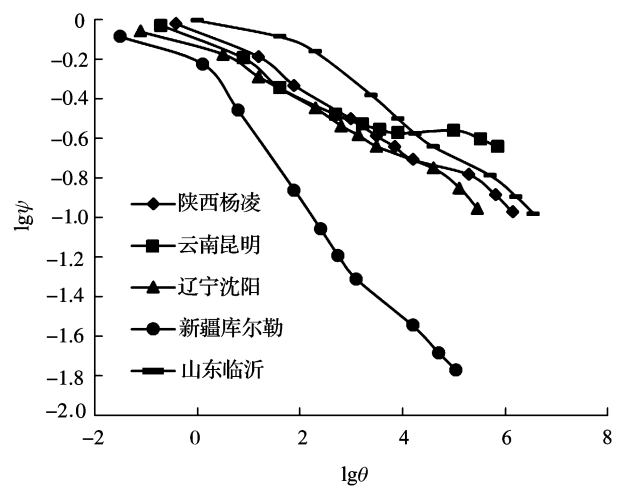


图4 供试土样对数关系的水分特征曲线

表3 供试土样孔隙分布分形维数与颗粒分布分形维数的比较

采样地点	粒径分形	孔隙分形	相对误差（%）
陕西杨凌	2.890	2.853	1.28
云南昆明	2.858	2.899	1.43
辽宁沈阳	2.783	2.860	2.77
新疆库尔勒	2.832	2.709	4.34
山东临沂	2.864	2.835	1.01

土壤粒径分形维数通过土壤颗粒机械组成数据经计算可以较容易的获得，但是土壤水分特征曲线试验操作麻烦、试验过程漫长，离心机测量其实是一个变容重的过程，会存在一定误差，使得孔隙分形维数的获取相对较难。对于一定质地的土壤样本而言，如果能建立两者之间的关系，通过粒径分形

确定孔隙分形, 进而将孔隙分形作为形参的模型用于分析土壤水分特性参数, 从而解决土壤水力特性空间变异性大、测试费时、耗力的问题。

由表3看出, 孔隙分形维数与粒径分形维数的相对误差在5%之内, 可以近似利用土壤粒径分布分形维数代替反映孔隙分布分形维数。

3 结论

通过对不同土壤质地的土样进行颗粒单分形、孔隙单分形分析研究, 为定量描述和模拟土壤粒径的分布特征提供了不同的思路。本文主要的结果如下:

(1) 土壤粒径分布单分形表明黏粒含量越高, 分形维数越高; 砂粒含量越低, 分形维数越高; 基于水分特征曲线拟合的孔隙大小分形维数反映了土壤结构的整体特征, 分形维数越高, 土壤通透性相对较差, 分形维数越低, 土壤结构越松散;

(2) 基于水分特征曲线拟合的孔隙分形维数与土壤颗粒分形维数具有较高的相似性, 利用土壤颗粒分形维数进行土壤水分特征曲线的推算具有较高的可行性与推广价值;

单重分形能够反映土壤粒径分布的整体特征和平均特征, 但无法定量表征粒径分布的局部异质性和非均匀特征; 在今后的研究中可采用多重分形进一步深入分析土壤粒径分布的非均匀特征, 为推进土壤结构的研究提供了新的方向。

参考文献:

- [1] 张国瑞, 赵士杰. 分形理论在农田土壤风蚀研究中的应用现状及其展望 [J]. 农村牧区机械化, 2007, (2): 23 - 25.
- [2] 刘建立, 徐绍辉. 根据颗粒大小分布估计土壤水分特征曲线: 分形模型的应用 [J]. 土壤学报, 2003, 40 (1): 46 - 52.
- [3] 管孝艳, 杨培岭, 任树梅, 等. 基于多重分形理论的壤土粒径分布非均匀性分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17 (2): 196 - 205.
- [4] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal sealing of soil particle size distributions: analysis and imitations [J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56: 362 - 369.
- [5] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究 [J]. 土壤学报, 1999, 36 (2): 162 - 167.
- [6] 王素娜, 吕军. 分形及其在土壤科学中的应用 [J]. 土壤通报, 2005, 36 (2): 249 - 252.
- [7] 刘霞, 姚孝友, 张光灿, 等. 沂蒙山林区不同植物群落下土壤颗粒分形与孔隙结构特征 [J]. 林业科学, 2011, 47 (8): 31 - 37.
- [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 [J]. 生态学报, 2004, 24 (1): 72 - 74.
- [9] 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 [J]. 土壤学报, 2005, 42 (4): 546 - 550.
- [10] 王贤, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 2011, 25 (3): 154 - 159.
- [11] Russell A R. How water retention in fractal soils depends on particle and pore sizes, shapes, volumes and surface areas [J]. Géotechnique, 2014, 64 (5): 379 - 390.
- [12] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例 [J]. 生态学报, 2007, 27 (7): 3081 - 3089.
- [13] 任婷婷, 王瑄, 陈雯静, 等. 不同土地利用类型土壤颗粒分形特征与粘粒含量的关系 [J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44 (2): 202 - 207.
- [14] 陈新闯, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠沿黄段不同土地利用类型对土壤分形特征的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29 (11): 169 - 173.
- [15] 曾宪勤, 刘和平, 路炳军, 等. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征 [J]. 山地学报, 2008, 26 (1): 65 - 70.
- [16] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (9): 74 - 78.
- [17] 丁敏, 庞奖励, 刘云霞, 等. 黄土高原不同土地利用方式下土壤颗粒体积分形特征 [J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24 (11): 161 - 165.
- [18] 刘静文, 张光灿. 江子河小流域不同植被类型土壤颗粒分形与水分入渗特征 [C] // 2015 海峡两岸水土保持学术研讨会论文集, 太原: 太原出版社, 2015.
- [19] 夏江宝, 顾祝军, 周峰, 等. 红壤丘陵区不同植被类型土壤颗粒分形与水分物理特征 [J]. 中国水土保持科学, 2012, 10 (5): 9 - 15.
- [20] 夏江宝, 张淑勇, 王荣荣, 等. 贝壳堤岛3种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征 [J]. 生态学报, 2013, 33 (21): 7013 - 7022.
- [21] 孙经伟, 尧水红, 李娜, 等. 农田恢复措施对黑土母质发育的新成土壤团聚体微形态及孔隙结构的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2016, (4): 17 - 23.
- [22] 周虎, 李保国, 吕贻忠, 等. 不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征 [J]. 土壤学报, 2010, 47 (6): 1094 - 1100.
- [23] Huang G H, Zhang R D, Huang Q Z. Modeling soil water retention curve with a fractal method [J]. Pedosphere, 2006, 16 (2): 137 - 146.
- [24] 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.
- [25] Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review [J]. Soil and Tillage Research, 1995, 36 (1 - 2): 1 - 20.

- [26] 黄冠华, 詹卫华. 土壤水分特性曲线的分形模拟 [J]. 水科学进展, 2002, 13 (1): 55 – 60.
- [27] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal processes in soil water retention [J]. Water Resources Research, 1990, 26 (5): 1047 – 1054.
- [28] 李建波, 房宗启, 纪全菊, 等. 基于 WPF 的三角图自动识别系统构建方法—以土壤质地分类系统为例 [J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34 (4): 339 – 345.
- [29] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用 [J]. 土壤学报, 2002, 39 (4): 490 – 497.

Soil particle single fractal and porosity single fractal

WANG Wei-hua*, LONG Xiao-jun (Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650500)

Abstract: The distribution of soil particle size is one of the basic properties of soil physical properties, which has a significant effect on soil water, air and heat transfer characteristics. In this paper, five typical soil particles were analyzed by texture analysis and description of the porous structure of geomaterials. The results showed that the fractal dimension of soil increased with the increase of clay content, and decreased with the increase of sand content. The quantitative method of soil structure is to determine the fractal dimension of soil structure. For different soils, the fractal dimension of particle size distribution reflects the uniformity of particle size distribution, the larger the fractal dimension, the smaller the particle size, the higher the content of fine particles, the texture is more and more uneven. Therefore, the application of fractal theory has become a method to quantitatively describe the characteristics of soil structure.

Key words: soil particle; fractal; fractal dimension; soil structure