

土壤样本分形几何特征的图像分析方法*

郭 飞^{1,2} 徐绍辉¹ 刘建立¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 南京师范大学地理信息科学江苏省重点实验室, 南京 210097)

摘 要 土壤水分的持留与水分和溶质的运移, 在很大程度上取决于土壤孔隙的几何性质, 而用数字图像处理方法能够较准确地加以识别。本文采用面积法和周长法分别计算了土壤样本图像的孔隙分形维数和多重孔隙轮廓线分形维数, 并分析了它们同土壤质地之间的关系。结果表明, 土壤孔隙空间在一定尺度范围内才存在明显的分形特征, 土壤质地越细(粘粒含量越高)分形维数越大。与周长法相比较, 用面积法计算的孔隙分形维数对土壤质地更为敏感。

关键词 土壤; 数字图像处理; 孔隙分形维数; 多重孔隙轮廓线分形维数

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

土壤结构从微观尺度到宏观尺度都具有自组织分层性质^[1,2], 土壤物理性质的标定 (scaling) 特性^[3,4]同土壤结构的分形模型具有一致性, 因此分形理论已经被用来解释土壤科学中许多复杂的现象和过程。

目前, 在分形方法的应用中, 分形维数 (fractal dimension) 大多根据土壤颗粒大小分布 (particle size distribution) 来确定的。由于土壤水分的持留、水分和溶质 (盐分、养分) 的运移, 在很大程度上是由土壤孔隙的几何性质决定的, 而土壤孔隙的几何性质与土壤颗粒大小分布、形状以及其排列方式密切相关。因而仅仅用土壤颗粒大小分布来确定分形维数显然是不完备的。虽然土壤孔隙的大小、形状及其排列方式非常复杂而且难于识别, 但是图像处理和分析方法为解决这一问题提供了一个强有力的工具。自 20 世纪 90 年代以来, 国外已经对这个问题做了一些探讨, 如 Peyton 等即应用 CT (computer tomograph) 图像对大孔隙 (裂隙、根系、孔穴等) 的结构特征进行了分析, 并计算了孔隙分形维数^[5]。Pachepsky 等对孔隙的分维特征做了进一步研究^[6]。有关该方面的研究在我国还未见报道。本文拟通过对三种不同质地土壤的图像分析, 来研究它们的分形几何特征, 从而为用分形模型预测土壤水力性质提供新的思路。

1 材料与方法

在中国科学院封丘生态农业实验站采集砂壤土 (sandy loam)、粉砂粘壤土 (silt clay loam) 和粉砂壤土 (silt loam) 原状土样, 在室内切割后用数码相机对切面进行高精度拍照, 得到不同切面的 24 位彩色图像。拍照时图像分辨率为 $2\,400 \times 1\,800$ 个像素, 每个像素对应的实际尺寸为 $42.2\ \mu\text{m}$ 。首先用图像分析软件 Photoshop 6.0 将彩色图像转换为 8 位灰度图像 (256 级灰度)。为了识别固体颗粒和孔隙, 采用全局阈值法对灰度图像进行图像分割 (segmentation), 将其转变为二值图像 (binary image), 分割后得到的二值图像中孔隙为黑色, 固体部分为白色 (图 1)。

2 孔隙分形维数

对应于二值图像中的孔隙面积, 当应用边长为不同特征长度 (尺度) ε 的正方形网格去测量, 则可得到:

$$A(\varepsilon) = \varepsilon^{D_v} N_{\text{box}}(\varepsilon) \quad (1)$$

式中 D_v 即孔隙分形维数; $A(\varepsilon)$ 是用尺度 ε 测量得到的孔隙面积; $N_{\text{box}}(\varepsilon)$ 为以尺度为 ε 所识别出孔隙的正方形网格数。

* 国家自然科学基金项目 (No. 49971041, No. 40271059) 资助

作者简介: 郭 飞 (1976~), 男, 博士, 主要从事地下介质中水流与溶质运移数值模拟及 GIS 应用研究

收稿日期: 2004-02-09; 收到修改稿日期: 2004-06-03

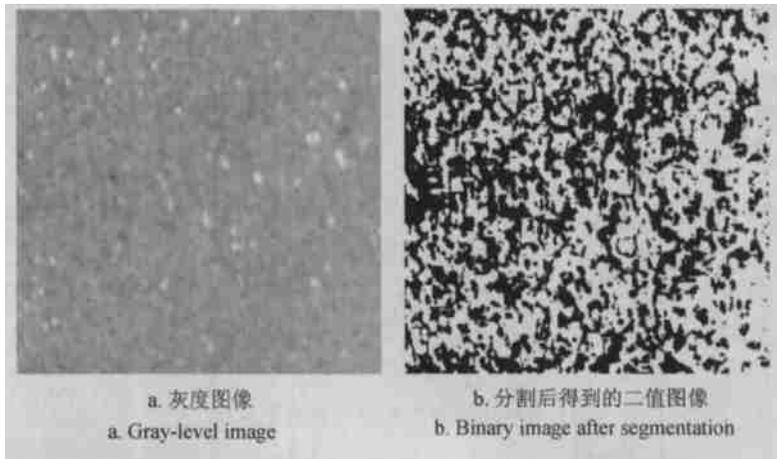


图 1 灰度图像分割为二值图像(250×250 像素)(粉砂壤土)

Fig 1 Binary image after segmentation of gray level image (250×250 pixel) (silt loam)

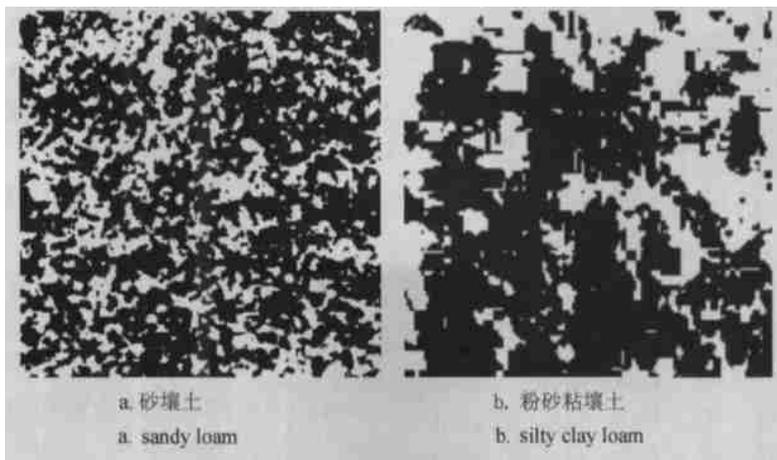


图 2 砂壤土和粉砂粘壤土的二值图像

Fig 2 Binary images of sandy loam and silty clay loam

由(1)式可以得到如下幂定律关系:

$$N_{\text{box}}(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D_v} \quad (2)$$

孔隙分形维数即可通过对测量尺度 ε 与该尺度下网格数目曲线 $N_{\text{box}}(\varepsilon)$ 来确定。

$$D_v = - \left(\frac{n \sum xy - \left(\sum x \right) \left(\sum y \right)}{n \sum x^2 - \left(\sum x \right)^2} \right) \quad (3)$$

式中 x 为 $\lg \varepsilon$; y 为 $\lg N_{\text{box}}$; n 为尺度 ε 分级总数。

3 孔隙轮廓线分形维数

孔隙轮廓线分形维数(pore outline fractal dimension)是用来描述孔隙自身所具有的分形特征(图2),它表示土壤孔隙间接触界限的不规则性。Holden 发现用孔隙轮廓线分维可以区分土壤团聚体的粗糙度(roughness)^[7]。Kampichler 和 Hauser^[8]成功地

应用土壤切片图像,用孔隙轮廓线分维估算了孔隙表面分维。孔隙轮廓线分维对土壤质地,土壤管理方式^[7]和土壤固结程度非常敏感^[9]。

上述文献中所提到的轮廓线分维(D_c)的计算主要基于Mandelbrot等提出的“silt-island”方法。这种方法不同于经典的分形理论,此方法不是计算不同尺寸下的孔隙轮廓线的长度,而是计算一定范围内单个孔隙不同放大倍数下的周长 P 和面积 A 。孔隙轮廓线分形 D_c 可通过下式确定^[10]:

$$\alpha = \frac{P^{1/D_c}}{A^{1/2}} \quad (4)$$

式中 α 理论上为常数, D_c 即可通过对 $\lg(P)$ 和 $\lg(A)$ 的回归分析得到。

本文计算孔隙轮廓线分形维数直接采用类似用面积法计算孔隙分形维数的方法,即周长法。对应于二值图像中的孔隙轮廓线周长,当应用不同尺度

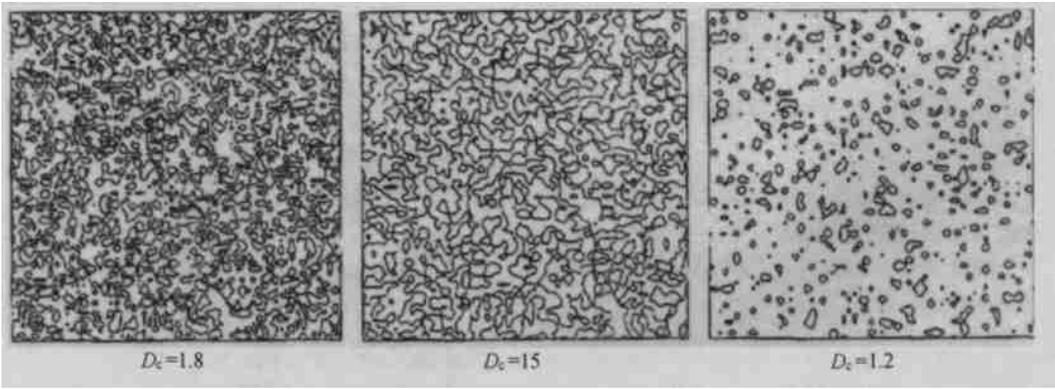


图3 具有不同分维的多重孔隙轮廓线^[6]

Fig 3 Examples of multiple pore out lines with various fractal dimensions^[6]

ϵ 的正方形网格去测量, 则可得到:

$$P(\epsilon) = \epsilon^D N_{\text{box}}(\epsilon) \quad (5)$$

式中 $P(\epsilon)$ 是用尺度 ϵ 测量得到的孔隙轮廓线总长度; $N_{\text{box}}(\epsilon)$ 为用尺度 ϵ 识别的孔隙的正方形网格数。

4 分形维数的确定

在图像分割过程中, 应用实测孔隙度进行了修正。即将孔隙空间看作在二值图像上的二维分布, 选取的全局阈值为分割后孔隙所占面积同实测孔隙度最为接近的灰度值。这样可有效消除由于光线、拍照距离造成的不确定性。对于砂壤土 (sandy loam)、粉砂粘壤土 (silty clay loam) 和粉砂壤土 (silt loam), 为消除图像生成过程中其他因素的干扰, 分别计算了 10 张土壤切面图像的孔隙分形维数和多重孔隙轮廓线分形维数, 取其平均值作为最终的计算结果。其实测孔隙度由 RETC 软件拟合得到, 分别为 0.433、0.417、0.514。

图 4~ 图 6 为直接用面积法和周长法分别计算孔隙分形维数和多重孔隙轮廓线分形维数的示例图。图中测量尺度 ϵ 为 1~ 50 个像素点, 对应实际的孔隙大小为 42.2~ 2 110 μm 。从图上可以看出, 对于孔隙分维和多重孔隙轮廓线分维都有一个共同的特征, 即当测量尺度大于 16 个像素点 (675.2 μm) 时, $\lg(N(\epsilon)) \sim \lg(\epsilon)$ 均出现相同的拖尾现象。这是因为测量尺度 ϵ 过大时 (接近或大于所识别最大孔隙), 其分维值主要由测量尺度决定, 不再具有实际意义。表明测量尺度 ϵ 存在一个上限 ϵ_{max} , 当 $\epsilon > \epsilon_{\text{max}}$ 时, 土壤分形特征并不明显。同时, 应用周长法计算多重孔隙轮廓线分维时, 对于小尺度的 ϵ 也存在一个下限 ϵ_{min} , 当 $\epsilon < \epsilon_{\text{min}}$ 时, 也将出现不符合分形特征的情况, 这是由于计算孔隙轮廓线分维时, 所识别的孔隙必须具有一定的大小, 否则只能得到相当于分散点的数据。

最终对于孔隙分形维数 D_v 和多重孔隙轮廓线分形维数 D_c 的计算, 所选取的测量尺度范围分别

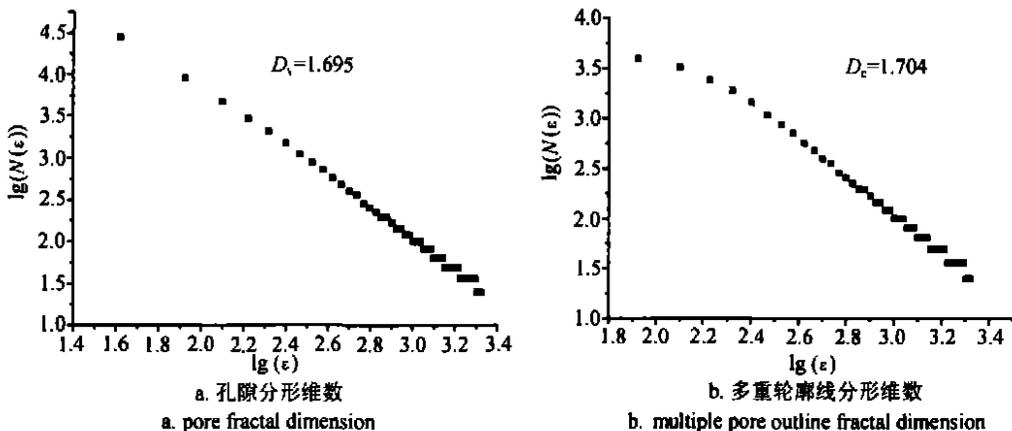


图4 砂壤土的孔隙分形维数和多重孔隙轮廓线分形维数的计算示例

Fig 4 Example of pore fractal dimension and multiple pore outline dimension of sandy loam

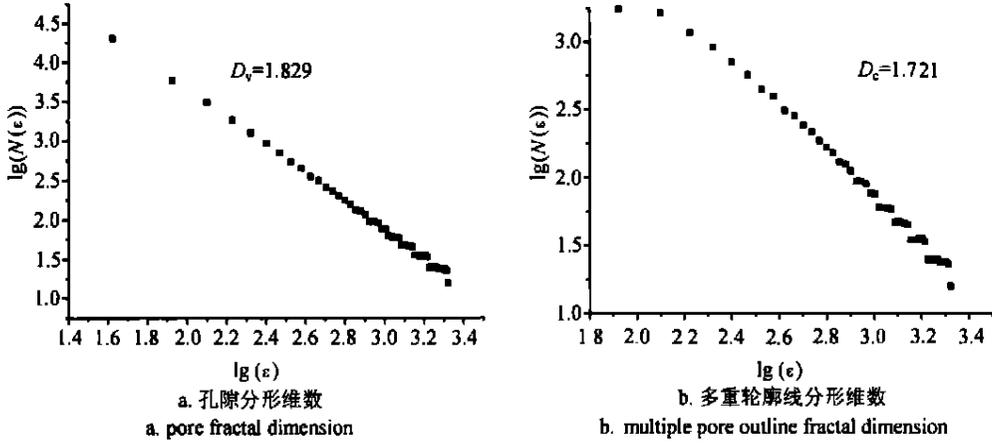


图 5 粉砂粘壤土的孔隙分形维数和多重孔隙轮廓线分形维数的计算示例
Fig 5 Example of pore fractal dimension and multiple pore outline dimension of silty clay loam

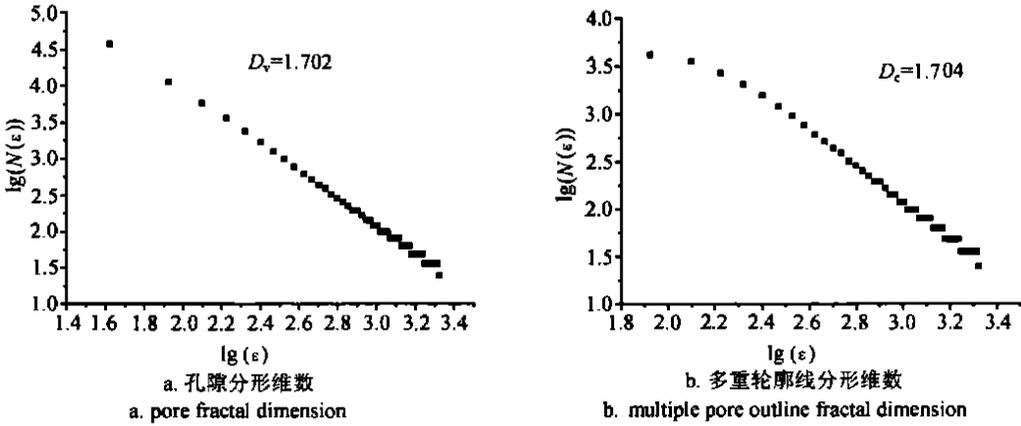


图 6 粉砂壤土的孔隙分形维数和多重孔隙轮廓线分形维数的计算示例
Fig 6 Example of pore fractal dimension and multiple pore outline dimension of silt loam

为 1~ 15 像素点 (42.2~ 633 μm), 4~ 15 像素点 (168.8~ 633 μm), 步长为 1 像素点 (42.2 μm)。最后用面积法计算得到的砂壤土、粉砂粘壤土、粉砂壤土的孔隙分形维数 D_v 分别为 1.696、1.829、1.702; 用周长法直接计算的多重孔隙轮廓线分形维数 D_c 分别为 1.709、1.72、1.705。

由面积法计算所得到的砂壤土和粉砂壤土的孔隙分形维数和多重孔隙轮廓线分形维数都十分接近。这是因为砂壤土和粉砂壤土中的粘粒物质含量比较接近, 且粉砂壤土中细粒物质含量较高, 从而使此精度下图像识别过程中很难加以区分。粉砂粘壤土由于粘粒含量较高, 孔隙分形维数较大。而应用周长法计算的粉砂粘壤土多重孔隙轮廓线分形维数对粘粒物质的增加并未有显著变化。这可能是由于数字图像对孔隙边界的识别精度不高造成的, 也可能是由于在样品制备过程中, 小孔隙更容易受到

样品切割等因素的影响使孔隙边界线更加难以识别, 这些可通过获取更高精度的数字图像以及用更专业的切割设备来加以解决。

5 结 论

本次研究结果表明三种土壤样本孔隙空间在一定尺度范围内才存在明显的分形特征, 其上限为 16 个像素点 (675.2 μm), 其下限同数字图像的分辨率有关, 有待于应用更高精度数字图像进行进一步研究。而用颗粒大小分布来确定土壤分形特征往往忽略了这一点。而且用颗粒大小分布确定土壤分形维数, 需要样本粒径分布的详细数据, 这往往是难以实现的, 通常需要对粒径分布资料进行插值, 这增加了模型的不确定性。

本次计算得到的不同质地土壤的孔隙分形维数

和孔隙轮廓线分形维数分别为 1.696~1.829 和 1.692~1.773。总体上讲,土壤质地越细(粘粒含量越高)分形维数越大。这与已有的研究结果是一致的^[9, 11, 12]。粘粒的含量越高,土壤孔隙的形状越复杂,分形维数越大。刘建立和徐绍辉^[12]曾对 UNSODA 数据库中的 554 个样本, 11 种质地的土壤的颗粒大小分布分形特征进行了研究, 得到从砂土~粘土的孔隙分形维数在 0.934~1.642 之间。对应的砂壤土、粉砂粘壤土和粉砂壤土的分形维数为 1.101、1.54 和 1.141。其中对应粗质地的砂土和壤砂土的孔隙分形维数平均值都小于 1, 这与 Tyler 和 Wheatcraft^[13]模型中的假设是矛盾的, 计算值偏小。由于数字图像分析能够识别土壤孔隙的复杂形态, 因此获得土壤孔隙分形维数要大于只利用颗粒大小分布资料获得的分维值。从不同方法研究土壤分形特征中可以看出, 用面积法计算的孔隙分形维数对土壤质地更为敏感。需要指出的是, 通过数字图像分析方法求得的土壤孔隙分形维数, 其准确性强烈地依赖于原始土壤切面图像的分辨率的高低。分辨率越高, 所得到的土壤孔隙分形维数越准确, 反之, 则可信性差。就目前所采用的测试手段而言(CT 和数码相机), 尚不足以获得能满足需求(把土壤孔隙和颗粒严格地区分开来)的原始土壤图像。扫描电镜方法可能是一种较好的选择。

参考文献

[1] Hadas A. Long term tillage practice effects on soil aggregation modes and strength. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, 51: 191~197

- [2] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.*, 1988, 11: 199~238
- [3] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 1974, 117: 249~267
- [4] Utomo W H, Dexter A R. Soil friability. *J. Soil Sci.*, 1981, 32: 203~213
- [5] Peyton L, Gantzer C J, Anderson S H, *et al.* Fractal dimension to describe soil macropore structure using X ray computer tomography. *Water Resource Research*, 1994, 30(3): 691~700
- [6] Pachepsky Y A, Timlin D, Varallyay G. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 727~733
- [7] Holden N M. A two dimensional quantification of soil ped shape. *J. Soil Sci.*, 1993, 44: 209~219
- [8] Kampichler C, Hauser M. Roughness of soil pore surface and its effect on available habitat space of microarthropods. *Geoderma*, 1993, 56: 223~232
- [9] Gimenez D, Perfeet E, Rawls W J, *et al.* Fractal models for predicting soil hydraulic properties: A review. *Engineering Geology*, 1997, 48: 161~183
- [10] Mandelbrot B B, Passoja D E, Paullay A J. Fractal character of fractured surfaces of metals. *Nature*, 1984, 308: 721~722
- [11] Comegna V, Damiani P, Sommella A. Use of a fractal model for determining soil water retention curves. *Geoderma*, 1998, 85: 307~323
- [12] 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. *土壤学报*, 2003, 40(1): 46~51. Liu J L, Xu S H. Figuring soil water characteristic curve based on practice size distribution data: Application of fractal models (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 46~51
- [13] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 987~996

ON FRACTAL GEOMETRY CHARACTERISTICS OF SOIL SAMPLE IMAGES

Guo Fei^{1,2} Xu Shaohui¹ Liu Jianli¹

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract Water retention, water flow and solute transport in soil, to some extent, depend on geometric characteristics of the soil pore, which can be accurately identified with the digital image analysis method. In this article, pore fractal dimensions and multiple pore outline fractal dimensions of some soil sample images are calculated with the area method and circumference method, separately. And the relationship between those fractal dimensions and soil texture is discussed. The results show that obvious fractal features can be found only of soil pore spaces of a certain scale. The finer the soil texture (or the higher the clay content), the higher the value of the fractal dimension. Comparatively, the pore fractal dimension calculated with the area method is more sensitive to soil texture than with the circumference method.

Key words Soil; Digital image analysis; Pore fractal dimension; Multiple pore outline fractal dimension