

利用土壤切片的数字图像定量评价土壤 孔隙变异度和复杂度*

李德成^{1, 2} Velde B² 张桃林¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 *Laboratoire de Géologie, CNRS 4385, ENS, 75231 Paris, France*)

摘 要 研究表明: 利用土壤切片的数字图像, 以孔隙周长和面积为基础数据, 可以定量评价小尺度上的孔隙变异度, 也可以对孔隙复杂度进行研究; 土壤孔隙在 mm 尺度上也具有较高的变异度和复杂度; 粒径 1~3 mm 和粒径 < 2 cm 的重组土壤的孔隙在 2D 空间多呈现网络状, 而原状土壤的孔隙则多呈不规则的枝状或椭圆状; 不同处理及不同土壤类型之间在孔隙周长、孔隙度以及孔隙变异度和复杂度方面存在不同程度的差异。

关键词 土壤切片, 变异度, 复杂度, 孔隙, 数字图像
中图分类号 S152.6

土壤一般具有高度的时空变异特性。但以往有关土壤性质空间变异的研究一般在 10 m 以上间距的大尺度下进行^[1-3], 现代土壤切片技术已能获取 μm ~ mm 间距尺度的孔隙数字图像^[4, 5], 这为在小尺度上研究土壤性质的空间变异提供了一个有效途径^[6]。土壤作为一类多孔介质, 其复杂的孔隙形状已难以用欧几里德平面几何学进行定量描述, 而分数维几何学中则成为一个有效手段^[7], 因为 2D 数字图像中土壤孔隙结构可被看作为复杂的多边形。本研究利用土壤切片的数字图像, 以孔隙周长和面积为基础数据, 定量比较研究了不同处理及不同土壤类型的孔隙在 2mm 小尺度上的变异度和复杂度。

1 研究方法

1.1 土壤及处理类型

研究中涉及三种处理的土样, 均来自耕作土壤。第一类为粒径 1~3 mm 的重组土壤, 包括取自美国 Illinois 州中部 C Thomas 试验农场的粉壤软土(简称 CT 土壤)和取自法国中西部 LaT 地区的一类黑色石灰土(简称 LaT 土壤)^[8, 9]; 第二类为粒径 < 2 cm 的重组土壤, 包括 CT 土壤、LaT 土壤和取自意大利南部 Corleto 地区的一类变性土(简称 Co 土壤); 第三类为原状土壤, 包括 CT 土壤、取自美国 Illinois 州中部 K 农场的粉砂壤土(简称 K 土壤)、取自法国中西部 LaP 地区的一类砂壤土(简称 LaP 土壤)和取自法国中西部 Poitiers 地区 MB 葡萄园中的砂壤土(简称 MB 土壤)。

1.2 土壤切片及其二元数字图像的制备

上述所有土壤均置于内径 7 cm、壁厚 2 mm 的 PVC 塑料圆筒中(圆筒高度重组土壤为 15 cm, 原状土壤为 25 cm, 相应的土柱高度重组土壤为 10 cm, 原状土壤为 20 cm), 待充分风干后, 沿圆筒边缘注入浸渍剂(10V Araldite GV 783 树脂: 4V Hardner HY 296 固化剂: 适量 EpoDye 荧光有机染料)至高出土表 0.5 cm。静置一夜待浸渍剂充分固化后, 用电锯每隔 2~3 cm 切割圆筒。所得切面经研磨后, 用不加染料的浸渍剂均匀涂抹以抛光切面和强化孔隙部分。在紫外灯照射下拍照所得的照片扫描输入微机, 利用 Photoshop 软件将真彩色图像经颜色替换处理转为灰介图像, 再经分割处理转为二元黑白图像, 具体过程详见参考文献 10~14]。所获图像的尺度为 1800 像元 \times 1800 像元, 对应实际尺度为 4.5 cm \times 4.5 cm, 每个像元对应的实际尺度为 25 μm 。有关图像分析利用 MicroMorph1.3 软件进行。

* 国家自然科学基金项目(No. 49901008)和第一作者法国政府博士奖学金(19991288)资助

收稿日期: 2001-10-15; 收到修改稿日期: 2003-04-10

1.3 定量分析指标的选择

1.3.1 孔隙变异度 在利用电锯切割过程中, 每个切口均会形成上、下两个相对切面, 由于电锯自身厚度(1~2 mm)以及切面的研磨处理, 每对上、下切面之间的间距约为2 mm。本研究选择上、下相对切面的孔隙度 P_A (孔隙所占像素数÷图像总像素数×100%)之间的相对差异作为2 mm尺度上孔隙变异度 E 的评价指标。 E 可由式(1)进行计算:

$$E = \frac{2 \times (P_b - P_u)}{(P_b + P_u)} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, P_u 和 P_b 分别为各切口所形成的上、下切面的孔隙度。 E 值越高,说明孔隙变异度越大。

1.3.2 孔隙复杂度 孔隙复杂度可以利用孔隙的周长与面积之间的关系来定量评价^{7, 15, 16}, 计算公式为式(2):

$$D = 2 \log P / \log A \quad (2)$$

式(2)中, D 、 P 、 A 分别为孔隙分数维数、孔隙周长和孔隙面积(孔隙所占像素数)。 D 值越高,说明孔隙的扭曲程度越高,孔隙就越复杂。如形状越来越复杂但面积同为100的圆、正方形和三角形, D 值分别为1.550、1.602和1.658。需要指出的是,本研究中采用的孔隙周长和面积数据是指整幅数字图像中所有的孔隙,因此 D 值反映的是整幅图像中孔隙的复杂度,不具体涉及图像中单个的孔隙。

2 结果与讨论

2.1 二元数字图像

图1为几个不同处理类型的土壤上、下相对切面的二元数字图像,这些图像清晰地反映出:

(1) 由粒径1~3 mm的重组土壤至粒径<2 cm的重组土壤再至原状土壤,其土粒的粒径级别组成和孔隙孔径级别组成逐步趋于复杂,孔隙在2D空间的分布也逐步趋向不均匀。

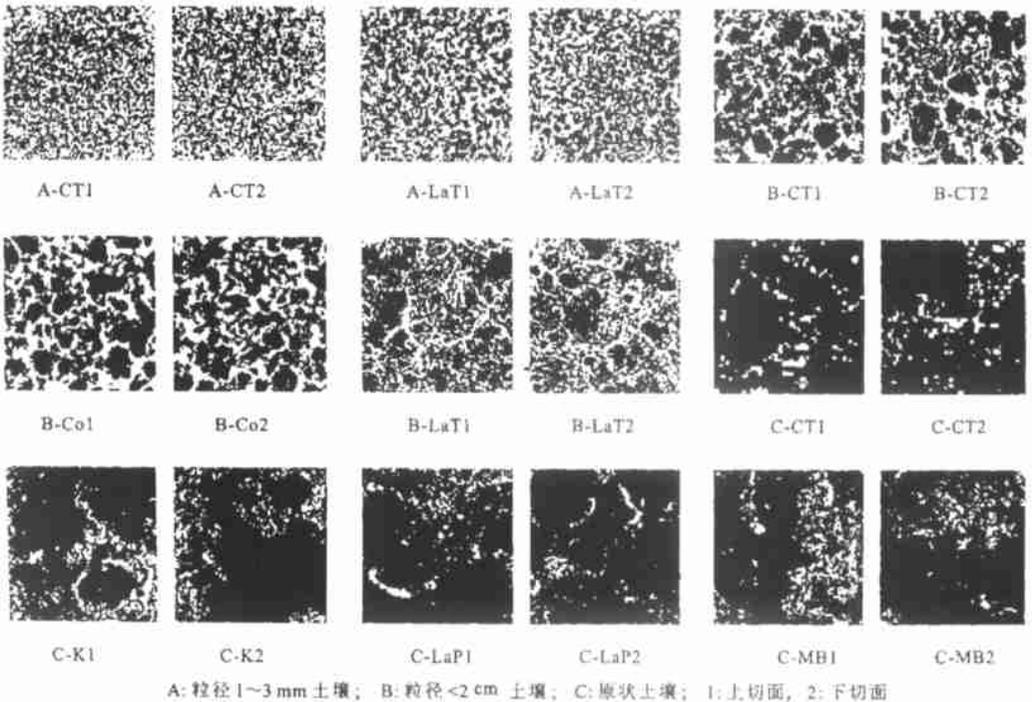


图1 供试土壤的上、下相对切面的孔隙二元数字图像(白色为孔隙)

Fig. 1 Binary digital images of the up and down cut surfaces of studied soil samples (white: pores)

(2) 粒径 1~3 mm 的重组土壤中, 孔隙呈规则的网络状, 将土粒个体分割包围成大小基本一致、分布均匀的孤立“岛屿”; 粒径 < 2 cm 的重组土壤中, 孔隙呈不规则的网络状, 将土粒个体分割成大小不一、分布较为均匀的孤立“岛屿”。而原状土壤中, 土粒排列无序, 粒径大小极度不均, 加上尺度的限制, 土粒分离不明显, 孔隙多呈不规则的枝状或椭圆状, 复杂的网络状孔隙则很少。

2.2 孔隙变异度与复杂度

表 1 是各类土壤的孔隙周长 P 、孔隙度 P_A 、孔隙变异度 E 和复杂度 D 的图像分析与统计结果。不同处理及不同土壤类型在上述四个指标间的差异显著性检验均用 SPSS10.0 统计分析软件进行。

2.2.1 粒径 1~3 mm 重组土壤 CT 土壤的孔隙周长与 LaT 土壤虽然基本一致, 相差仅 0.54%, 未达显著水平, 但 CT 土壤的孔隙度却明显低于 LaT 土壤, 低幅为 31.58%, 已达显著水平。LaT 土壤的孔隙变异度和复杂度均低于 CT 土壤, 低幅分别为 72.84% 和 2.94%, 孔隙复杂度的差异已达显著水平, 但孔隙变异度的差异未达显著水平。

表 1 供试土壤的孔隙周长、孔隙度、孔隙变异度与复杂度的图像分析与统计结果¹⁾

Table 1 The results of image analysis of studied soil samples

土样组分 Soil fraction	土壤类型 Kind of soil	切片对数 Number of sections	图像数 Number of images	孔隙周长 Pore perimeter P (cm)	孔隙度 Porosity P_A (%)	孔隙变异度 Pore variety E (%)	孔隙复杂度 Pore complexity D
粒径 1~3mm 土壤	CT 土壤	11	22	340.53±55.51	25.74±6.88	17.12±22.18	1.785±0.02
	LaT 土壤	9	18	338.71±45.23	37.62±7.92	4.65±5.88	1.734±0.02
	合计	20	40	—	—	—	—
	平均	—	—	339.71±50.52	31.09±9.42	11.51±17.72	1.762±0.03
粒径 < 2cm 土壤	CT 土壤	4	8	417.08±189.61	24.52±8.40	18.03±16.64	1.808±0.05
	Co 土壤	15	30	187.11±55.56	27.00±10.08	22.91±18.12	1.696±0.03
	LaT 土壤	14	28	307.79±106.41	28.99±13.01	20.79±19.82	1.786±0.05
	合计	33	66	—	—	—	—
	平均	—	—	307.79±140.11	27.54±11.19	21.42±18.22	1.745±0.07
原状土壤	CT 土壤	28	56	290.60±130.11	21.96±8.59	23.82±17.30	1.774±0.06
	K 土壤	10	20	229.99±141.47	15.24±4.22	19.25±13.60	1.768±0.07
	LaP 土壤	9	18	85.31±20.73	8.46±2.18	20.98±17.02	1.717±0.04
	MB 土壤	10	20	227.68±118.87	17.58±9.96	26.38±18.14	1.767±0.07
	合计	57	114	—	—	—	—
	平均	—	—	236.52±138.41	17.88±8.99	23.02±16.55	1.763±0.06

1) 表中 P 、 P_A 、 E 、 D 数据为平均值±标准差

2.2.2 粒径 < 2 cm 重组土壤 孔隙周长以 CT 土壤最大, 其次为 LaT 土壤, Co 土壤最小; 而孔隙度则以 LaT 土壤最大, 其次为 Co 土壤, CT 土壤最小, 孔隙周长与孔隙度之间没有表现出正向关系。Co 土壤与其它两类土壤在孔隙周长上的差异已达显著水平, 但三类土壤在孔隙度之间的差异未达显著水平。孔隙变异度以 Co 土壤最大, 其次为 LaT 土壤, CT 土壤最小, 并未表现出随孔隙度增大而减小的趋势。孔隙复杂度以 CT 土壤最大, 其次为 LaT 土壤, Co 土壤最小, 表现出随孔隙周长增大而增大的趋势, Co 土壤与其它两类土壤的孔隙复杂度之间的差异已达显著水平。

2.2.3 原状土壤 孔隙周长和孔隙度基本上均以 CT 土壤最大, 其次依次为 K 土壤、MB 土壤和 LaP 土壤, 孔隙周长和孔隙度之间表现出一定的正向关系。LaP 土壤与其它三类土壤在孔隙周长上的差异

已达显著水平, CT 土壤与其它三类土壤在孔隙度上的差异已达显著水平。孔隙变异度以 MB 土壤最大, 其次依次为 CT 土壤、LaP 土壤和 K 土壤, 没有表现出随孔隙度增大而减小的趋势。孔隙复杂度以 CT 土壤最大, 其次依次为 K 土壤、MB 土壤和 LaP 土壤, 基本表现出随孔隙周长增大而增大的趋势。四类土壤在孔隙变异度上的差异均未达到显著水平, 但 LaP 土壤与其它三类土壤在孔隙复杂度上的差异已达显著水平。

2.2.4 不同处理类型的土壤 由粒径 1~3 mm 重组土壤至粒径 < 2 cm 重组土壤再至原状土壤, 表现出随粒径增大, 孔隙周长和孔隙度逐步减小的趋势。但粒径 1~3 mm 重组土壤和粒径 < 2 cm 重组土壤在孔隙周长和孔隙度上的差异未达到显著水平, 而原状土壤与上述两类土壤在孔隙周长和孔隙度之间的差异则已达显著水平, 孔隙变异度表现出依次增大的趋势, 符合孔隙变异度与孔隙度之间的反向关系。但三类土壤的孔隙复杂度随孔隙周长或孔隙度的变化趋势并不规则; 虽然三类处理的土壤在孔隙变异度和复杂度上存在一定差异, 但均未达到显著水平。

2.3 讨论

一般而言, 土壤颗粒的粒径越小, 颗粒间形成的孔隙比表面(3D 空间)或孔隙周长(2D 空间)越大, 孔隙度也可能越大。因此, 本研究中三种不同处理的土壤(粒径 1~3 mm 重组土壤、粒径 < 2 cm 重组土壤和原状土壤)在孔隙周长和孔隙度上所表现出的变化趋势总体上是合理的。

由粒径 1~3 mm 重组土壤至粒径 < 2 cm 重组土壤再至原状土壤, 孔隙度逐步降低, 孔隙变异度也就表现出逐步增高的趋势, 符合式(1)中两者之间的反向关系。研究中孔隙变异度 E 值均高于 10%, 说明即使在 2 mm 尺度上, 土壤孔隙也存在较为明显的变异。这也从一个方面进一步表明了土壤是空间变异性很高的介质^[4]。

式(2)则说明孔隙复杂度是孔隙周长和孔隙面积(或孔隙度)两者综合作用的结果, 因此很难仅根据两者中的某一项来评价孔隙复杂度。如粒径 1~3 mm CT 重组土壤和 LaT 重组土壤之间以及 K 原状土壤和 MB 原状土壤之间, 孔隙周长的差异很小, 分别仅为 0.54% 和 1.01%, 而孔隙度的差异却很大, 分别为 37.50% 和 31.25%。前两者的孔隙复杂度间的差异相对高于后两者的孔隙复杂度间的差异。值得指出的是, 研究中孔隙复杂度 D 值均高于 1.700, 这可以表明土壤孔隙在形状上具有较高的复杂性^[7]。

理论上, 如果形成的上、下切面间的距离越小, 则上、下相对切面的孔隙形状和孔隙面积(或孔隙度)应越接近, 其孔隙变异度应越低。因此, 如果想在更小尺度上研究孔隙变异性, 就需采用以 μm 间距连续研磨的方法^[4, 5], 这也可更有效地研究孔隙在 3D 空间的几何学特性。

这里必须强调的是, 由于树脂无法浸入一些“小孔隙”、土粒内部的“密闭孤立孔隙”以及受扫描仪或摄像仪的分辨率限制, 利用数字图像得出土壤孔隙一般以“大孔隙”为主(包括通气孔隙和部分大毛管孔隙), 尚难真实反映非活性孔隙以及部分毛管孔隙, 因此孔隙度值远低于应用常规或传统物理分析方法测出的孔隙度。但图像分析技术的优点在于能够以图像方式反映土壤孔隙的形态, 因此偏重于定量和定形描述孔隙结构。当然, 如何将土壤学及土壤物理学实际过程与图像分析技术的结合, 赋予图像分析结果明确的土壤学及土壤物理学含义, 是图像分析技术有待努力的一个重要内容。

3 结论

综上所述, 可以得出如下基本结论:

1. 利用土壤切片的数字图像, 可以定量研究土壤孔隙在小尺度上的变异性, 也可研究土壤孔隙的总体复杂性。
2. 粒径 1~3 mm 重组土壤中孔隙呈规则的网络状, 粒径 < 2 cm 重组土壤中孔隙呈不规则的网络状, 而原状土壤中孔隙呈极不规则的枝状或椭圆状。
3. 三类处理的土壤之间, 随土粒粒径的增大, 孔隙周长和孔隙度逐步减小, 孔隙变异度增大, 但孔隙复杂度变化较不规则。不同土壤类型的孔隙周长、孔隙度、孔隙变异度和复杂度四个方面也存在程度不同的差异。土壤孔隙在 2 mm 的小尺度上也具有较高的变异性, 孔隙形状在 2D 空间上也具有较高的复杂度。

参考文献

1. 沈思渊. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用及其展望. 土壤学进展, 1989, 17(3): 11~ 25
2. 吕军, 俞劲炎. 水稻土物理性质空间变异研究. 土壤学报, 1990, 27(1): 8~ 16
3. 周慧珍, 龚子同, Lamp J. 土壤空间变异研究. 土壤学报, 1996, 33(3): 242~ 247
4. Moreau M, Velde B, Terribile F. Comparison of 2D and 3D images of fractures in a Vertisol. Geoderma, 1999, 92(1/2): 55~ 72
5. Vogel H J, Kretschmar A. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections. Euro. J. Soil Sci., 1997, 48(3): 365~ 377
6. 李德成, Velde B, Delerue J F, 等. 利用土壤切片和数字图像方法研究土壤孔隙的垂直空间变异性. 土壤与环境, 2000, 9(2): 135~ 138
7. 曾志远, 曹锦锋. 分数维几何学在地质学和土壤制图学上的应用. 土壤, 1991, 23(3): 117~ 122
8. Velde B. Structure of surface cracks in soil and muds. Geoderma, 1999, 93(1/2): 101~ 124
9. Velde B. Surface cracking and aggregate formation observed in a Rendzina soil, La Touche (Vienne) France. Geoderma, 2001, 99(3/4): 261~ 276
10. 李德成, Velde B, Delerue J F, 等. 用于研究土壤孔隙三维结构的连续数字图像的制备. 土壤与环境, 2001, 10(2): 108~ 110
11. 李德成, Velde B, Delerue J F, 等. 孔隙结构图像分析中不同试验因素对分析结果的影响. 土壤学报, 2002, 39(1): 52~ 57
12. 李德成, Velde B, Delerue J F, 等. 免耕制度下耕作土壤结构演化的数字图像分析. 土壤学报, 2002, 39(2): 214~ 220
13. 李德成, 李忠佩, Velde B, 等. 不同利用年限的红壤水稻土孔隙结构差异的图像分析. 土壤, 2002, 34(4): 134~ 137
14. 李德成, Velde B, Delerue J F, 等. 常规耕作与短期免耕下葡萄园土壤孔隙结构差异的图像比较. 土壤, 2002, 34(5): 275~ 278
15. Perfect E, Kay B D. Application of fractals in soil and tillage research: A review. Soil Tillage Res., 1995, 36(1): 1~ 20
16. Anderson A N, McBratney A B, FitzPatrick E A. Soil mass, surface, and spectral fractal dimensions estimated from thin section photographs. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60(4): 962~ 969

QUANTITATIVE ESTIMATION OF PORE VARIABILITY AND COMPLEXITY IN SOILS BY DIGITAL IMAGE METHOD

Li De-cheng^{1,2} Velde B² Zhang Tao-lin¹

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

(2 Laboratoire de Géologie, CNRS 4385, ENS, 75231 Paris, France)

Summary

Study results showed it possible to analyze quantitatively pore variability in small scale and pore complexity in various soils under different treatments by using the method of digital image. Pore has high variability on 2mm scale as well as high complexity. Pores showed the shapes of various networks in the reconstructed soils while showed the shapes of irregular branches or ellipses. There are discrepancies of various extents in pore perimeter, porosity, variability and complexity in different soils under different treatments.

Key words Soil section, Variability, Complexity, Pore, Digital image