

# 利用土壤的序列数字图像技术研究 孔隙小尺度特征\*

李德成<sup>1,2</sup> Velde B<sup>2</sup> 张桃林<sup>1</sup>

(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** 将土壤样品用混有荧光有机染料的树脂浸渍后, 以 1 mm 间距连续研磨, 经过一定的图像转换处理, 最后以连续数字图像方式对图像孔隙的小尺度特征进行分析。对一种美国耕作黑土和一种法国耕作黄壤的比较研究表明, 两类土壤在图像孔隙面积、图像孔隙面积变异性、图像孔隙孔径、孔隙连接度、孔隙重叠度以及孔隙流通性等方面均有所差异, 这与两类土壤不同的有机质含量有关。

**关键词** 序列数字图像, 小尺度, 孔隙, 土壤

中图分类号 S152.6

土壤的孔隙状况决定着水、肥、气、热等介质在土壤中的传输途径与植物根系在土壤中的伸展<sup>[1,2]</sup>。数字图像分析技术已使在小尺度上研究孔隙特征成为可能<sup>[3,4]</sup>。而获取孔隙的连续数字图像是该类研究的基础。虽然可以利用 CT (Computed tomography) 技术做到这一点, 但昂贵的费用以及较低的分辨率等因素限制了其在土壤科学研究中的广泛应用<sup>[5-7]</sup>。而序列数字图像技术(也称系列薄片技术)虽较为原始, 但成本低廉且方法简单, 故不失为另一种有效的方法<sup>[8-10]</sup>。本研究介绍了序列数字图像技术的基本方法, 并利用该方法比较研究了一种美国耕作黑土和一种法国耕作黄壤的孔隙的小尺度特征。需要指出的是, 由于图像方法所得出的孔隙信息仅反映部分土壤孔隙(一般为大孔隙), 不能完全代表土壤孔隙的实际状况, 故本文中的“孔隙小尺度特征”是指“图像孔隙的小尺度特征”。

## 1 研究方法

### 1.1 土样的处理与数字图像的制备

在野外用内径 7 cm、壁厚 0.2 cm 的聚氯乙烯塑料圆筒采集原状耕作层土壤, 风干后进行浸渍处理, 浸渍剂配置参见文献[11]。固化后锯出尺度为 4.5 cm(长)×4.5 cm(宽)×15 cm(高)的土体, 再沿高度方向以 1 mm 间距连续研磨土体。每次研磨后的土表用不加染料的浸渍剂涂抹以强化孔隙与非孔隙部分的颜色反差。在 600 dpi 分辨率下将土表以真彩色图像格式扫描输入微机。利用 PhotoShop 软件通过颜色替换处理和灰化处理后将真彩色图像转换为灰阶图像, 再通过阈值选择进行图像分割处理将灰阶图像转换成数字图像(二元黑白图像)。有关利用 PhotoShop 软件进行不同格式图像转换的方法详见文献[12]。在本研究中, 土样实际扫描区域一般为 4.5 cm×4.5 cm 的矩形, 所获数字图像尺度为 1800 像元×1800 像元, 分辨率控制在每像元 25 μm。

### 1.2 孔隙小尺度特征的分析指标

所选择的孔隙小尺度分析指标包括图像孔隙面积  $P$ 、图像孔隙面积 1 mm 间距变异性  $V_p$ 、图像孔隙平均孔径  $D_p$ 、孔隙连接度  $C_p$ 、孔隙重叠度  $O_p$  以及孔隙流通性  $C_q$ , 其定义如下。

(1) 图像孔隙面积  $P$ : 设整幅数字图像的像元总数为  $S$ , 其中孔隙占的像元数为  $S_p$ , 则  $P = S_p \times$

\* 国家自然科学基金(No. 49901008)和第一作者的法国政府博士奖学金(19991288)资助项目; 教育部留学回国人员科研启动基金(2002-247)资助项目

100% / S

(2) 图像孔隙面积 1 mm 间距变异性  $V_p$ : 设  $i$  和  $j$  为上、下紧邻的两幅数字图像(即相距 1 mm), 其孔隙面积  $P$  分别为  $S_{pi}$  和  $S_{pj}$ , 则  $V_p = \left[ \frac{S_{pj} - S_{pi}}{S_{pj}} \right] \times 100\% / S_{pj}$

(3) 图像孔隙平均孔径  $D_p$ : 该指标用于反映土体中孔隙总体上的“粗细”。可利用 Opening 原理析出图像的孔隙孔径分布<sup>[9]</sup>, 设孔径为  $d_i$  的孔隙对应面积为  $S_i$ , 则  $D_p = \sum(d_i \times S_i) / S_p$

(4) 孔隙连接度  $C_p$ : 该指标用于反映土体中孔隙总体上的“延续情况”。不同研究表达孔隙连接度的方式不同<sup>[4, 5]</sup>。本研究将  $i$  和  $j$  两幅数字图像进行叠加, 所得到的重叠孔隙面积(即  $S_{pi} \cap S_{pj} = S_{pi} \cap S_{pj}$ )作为孔隙连接度的指标。这一指标较为直观简便, 可形象地判断出“单位土体中连续孔隙的比例”。

(5) 孔隙重叠度  $O_p$ : 该指标用于反映上、下紧邻的两幅数字图像孔隙之间的重叠程度, 定义  $O_p = 2 \times S_{pi} \cap S_{pj} \times 100\% / (S_{pj} + S_{pi})$

(6) 孔隙流通性  $C_{cp}$ : 该指标在一定程度上可以反映介质在孔隙中的迁移的“难易”。可用上、下紧邻的两幅数字图像重叠孔隙的平均孔径的  $D_p$  反映,  $C_{cp}$  计算原理同  $D_p$ 。

### 1.3 供试土壤类型

研究中选择了两类土壤, 一是取自美国 Illinois 州中部的粉壤质耕作黑土, 主要种植玉米, 有机碳含量为  $35.99 \text{ g kg}^{-1}$ , 有机氮含量为  $3.66 \text{ g kg}^{-1}$ ; 第二类是取自法国 Poitiers 地区西部的壤质耕作黄壤, 主要种植马铃薯, 有机碳含量为  $29.51 \text{ g kg}^{-1}$ , 有机氮含量为  $2.48 \text{ g kg}^{-1}$ 。每类土样均取 100 幅连续数字图像(即 1~100 mm 深度), 图 1 给出两类土壤连续数字图像的第 1 幅和第 100 幅以作为示意图。

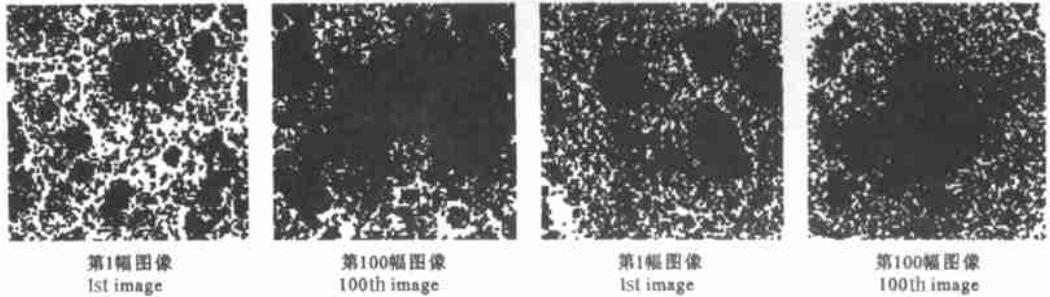


图 1 两类土样的序列数字图像的示意图

Fig. 1 Sketches of the serial digital images of the two soil types used in the study

## 2 研究结果

图 2a、2b、2c、2d、2e 和 2f 分别为图像孔隙面积  $P$ 、图像孔隙面积 1 mm 间距变异性  $V_p$ 、图像孔隙平均孔径  $D_p$ 、孔隙连接度  $C_p$ 、孔隙重叠度  $O_p$  以及孔隙流通性  $C_{cp}$  的序列图像分析结果。

### 2.1 图像孔隙面积 $P$

总体上看, 美国耕作黑土的图像孔隙面积高于法国耕作黄壤(见图 2a), 前者为  $10.78\% \sim 32.34\%$ , 平均  $20.03\%$ ; 后者为  $6.85\% \sim 23.45\%$ , 平均  $13.59\%$ , 这与前者的有机质含量高于后者有关。另外, 两类土壤的图像孔隙面积均表现出随深度增加而降低的趋势, 美国耕作黑土降低速率为  $0.002 \text{ mm}^{-1}$ , 而法国耕作黄壤降低速率为  $0.001 \text{ mm}^{-1}$ 。

### 2.2 图像孔隙面积 1 mm 间距变异性 $V_p$

就图像孔隙面积 1 mm 间距变异性来看(见图 2b), 美国耕作黑土低于法国耕作黄壤, 前者为  $0.12\% \sim 26.22\%$ , 平均  $8.44\%$ ; 后者为  $0.36\% \sim 38.62\%$ , 平均  $12.49\%$ , 说明前者土壤孔隙在剖面中分布的均质性高于后者, 这当然也与前者孔隙面积高于后者有关。值得注意的是该变异性并未表现出随图像孔隙面积增大而降低的趋势, 这说明其在很大程度上是来自土体内在的变异。

### 2.3 图像孔隙平均孔径 $D_p$

美国耕作黑土的孔隙相对“粗”于法国黄壤(图 2c), 前者图像孔隙平均孔径为  $0.50 \sim 2.21 \text{ mm}$ , 平均

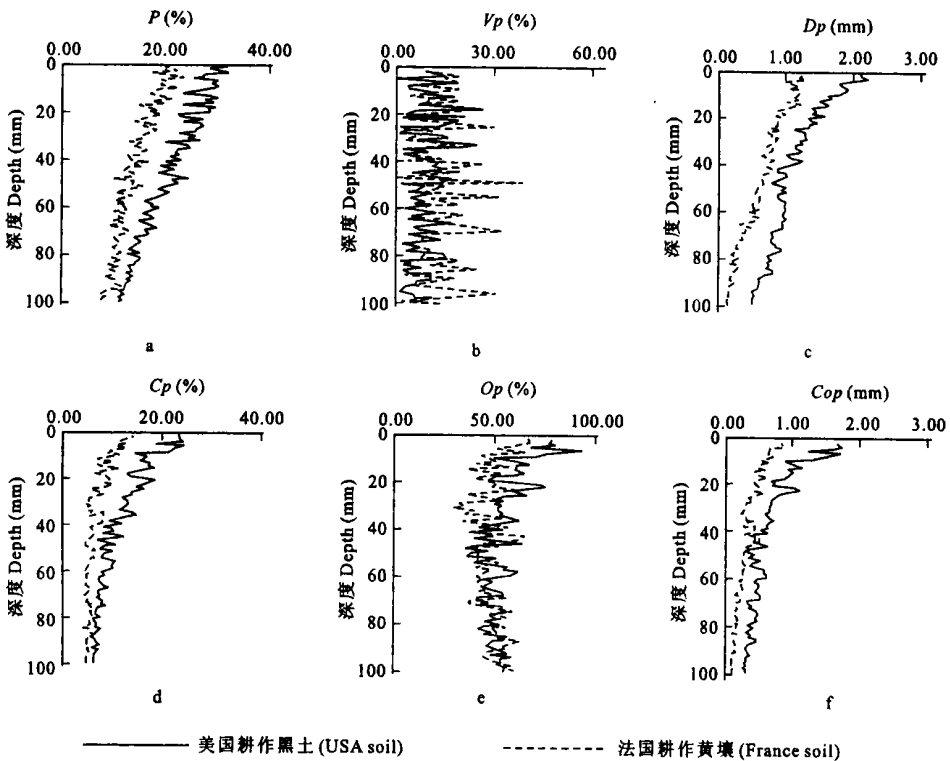


图2 利用序列数字图像分析出的土壤孔隙特征的1 mm尺度变化

Fig. 2 Pore changes on 1 mm scale obtained by using serial digital images

1.08 mm; 后者为0.13~1.28 mm, 平均0.62 mm。这当然也与前者的图像孔隙面积高于后者有关。另外, 同图像孔隙面积随深度的变化一样, 图像孔隙平均孔径  $D_p$  也表现出随深度的增加而降低的趋势。

#### 2.4 孔隙连接度 $C_p$

图2d反映出三个趋势: 一是美国耕作黑土孔隙连接度  $C_p$  高于法国耕作黄壤, 前者为5.89%~24.56%, 平均11.04%, 后者为4.20%~14.23%, 平均6.63%; 二是两类土壤的  $C_p$  显示出随土壤深度的增加而降低的趋势, 这实际与图像孔隙面积的变化有关; 三是  $C_p$  随深度增加存在一种趋于稳定的趋势, 这是因为在土体下部, 图像孔隙的面积与位置逐渐趋于固定, 造成重叠的图像孔隙面积变化幅度相对较小。

#### 2.5 孔隙重叠度 $O_p$

图2e表明, 美国耕作黑土孔隙重叠度  $O_p$  高于法国耕作黄壤, 前者为35.32%~93.35%, 平均53.75%; 后者为29.77%~67.12%, 平均48.77%。这与前者图像孔隙面积高于后者有关。另外, 两类土壤的孔隙重叠度与深度的关系均表现出先降后缓升的趋势, 美国耕作黑土的这一临界深度约在50 mm, 法国黄壤约在30 mm。

#### 2.6 孔隙流通性 $C_{op}$

理论上分析, 美国耕作黑土的孔隙流通性  $C_{op}$  高于法国耕作黄壤(图2f), 前者重叠孔隙的平均孔径为0.26~1.70 mm, 平均0.63 mm; 后者为0.06~0.86 mm, 平均0.29 mm。这与前者图像孔隙面积和图像孔隙孔径均相对高于后者有关。另外, 孔隙流通性  $C_{op}$  也表现出随深度的增加而降低的趋势, 这与图像孔隙面积随深度变化的趋势有关。

### 3 讨 论

研究中利用图像分析出的两类土壤的图像孔隙面积仅为 6.85% ~ 32.34%, 图像孔隙平均孔径为 0.13~ 2.21 mm。而有机碳高于 2.5% 的土壤, 其应用常规或传统物理分析方法测出的孔隙面积一般在 50% 以上, 孔隙也以通气孔隙和毛管孔隙为主<sup>[12]</sup>。因此很明显图像分析方法得出的孔隙面积偏低而孔径偏大。造成这一差异的主要原因是由于树脂无法浸入一些“小孔隙”和土粒内部的“密闭孤立孔隙”以及受扫描仪或摄像仪的分辨率限制, 会导致“小孔隙”(包括非活性孔隙以及部分毛管孔隙)的损失, 这也表明目前的图像分析技术尚不能用于对土壤孔隙的实际状况的精确测定。有关“小孔隙”与“大孔隙”的孔径划分标准一直没有明确的界限<sup>[13]</sup>。有的以 30 $\mu$ m 为界, 有的以 60 $\mu$ m 为界, 有的则以 1000 $\mu$ m 为界。但图像分析方法所获得的孔隙信息以“大孔隙”(包括通气孔隙和部分大毛管孔隙)为主, 并不能完全反映土壤孔隙的实际状况。

从两类土壤的孔隙图像分析结果的差异来看, 序列数字图像技术在一定程度上是可以用来研究孔隙小尺度特征的。作为一项较新的技术, 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二维或三维形态, 这为定量和定形描述土壤孔隙结构奠定了基础, 而这是传统或常规物理分析方法难以做到的。正是由此, 现有的孔隙图像研究一般偏重对孔隙形态学特征进行定量的描述, 或是在此基础上比较不同的土壤、不同的土地利用方式以及栽培措施等条件下孔隙状况, 这也是本文的出发点。当然, 本研究尚处于前期初步阶段, 因为将土壤学及土壤物理学实际问题和过程与图像分析技术的有效结合, 赋予图像分析结果以明确的土壤学及土壤物理学含义, 是图像分析技术在土壤科学研究中亟待解决的一个重要内容。

### 4 结 论

上述研究过程与结果表明:

1. 虽然孔隙图像分析结果尚不能完全反映土壤孔隙的实际状况, 但从孔隙形态学描述以及结果比较应用而言, 序列数字图像技术是可以用于研究土壤孔隙的小尺度特征。

2. 从两类土壤的孔隙图像分析结果的比较来看, 有机质含量明显影响着土壤的孔隙状况。总体上看, 有机质含量高的美国耕作黑土的孔隙状况相对“好于”有机质含量低的法国耕作黄壤, 主要表现在前类土壤的图像孔隙面积、孔隙均质性、图像孔隙平均孔径、孔隙连接度和孔隙流通性相对“高于”后类土壤。

### 参考文献

1. 熊毅, 李庆远主编. 中国土壤(第二版). 北京: 科学出版社, 1990. 339
2. Webster R. The development of pedometrics. *Geoderma*, 1994, 62 (1): 1~ 15
3. Ringrose-Voase A J. Micromorphology of soil structure: Description, quantification, application. *Aust. J. Soil Res.*, 1991, 29 (4): 777~ 813
4. Terribile F, FitzPatrick F A. The application of some image-analysis techniques to recognition of soil micromorphological features. *Euro. J. Soil Sci.*, 1995, 46 (1): 29~ 45
5. Wamer G S, Nieber J L, Moore I D, *et al.* Characterizing macropores in soil by computed tomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53 (3): 653~ 660
6. Rasiah V, Aylmore L A G. Estimating microscale spatial distribution of conductivity and pore continuity using computed tomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62 (5): 1197~ 1202
7. Perret J, Prasher S O, Kantzas A, *et al.* Three-dimensional quantification of macropore network in undisturbed soil cores. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63 (6): 1530~ 1543
8. Scott G J T, Webster R, Nortcliff S. The topology of pore structure in cracking clay soil I. The estimation of numerical density. *J. Soil Sci.*, 1988, 39 (3): 303~ 314
9. Vogel H J, Kretschmar A. Topological characterization of pore space in soil: Sample preparation and digital image-processing. *Geoderma*, 1996, 73 (1/2): 23~ 28
10. Moreau M, Velde B, Terribile F. Comparison of 2D and 3D images of fractures in a vertisol. *Geoderma*, 1999, 92 (1/2): 55~ 72

11. 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
12. 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
13. Perret J, Prasher S O, Kantzas A, *et al.* Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63(6): 1530~1543
14. 朱祖祥主编. 土壤学. 北京: 农业出版社, 1983. 80~88

## STUDY ON SOIL PORE CHARACTERISTICS ON SMALL SCALE BY USING TECHNIQUES OF SERIAL DIGITAL IMAGES

Li De-cheng<sup>1,2</sup> Velde B<sup>2</sup> Zhang Tao-lin<sup>1</sup>

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

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

### Summary

This paper mainly introduced the technique of serial digital images for analyzing pore characteristics on a small scale. Soil samples are impregnated by resins containing fluorescent dye, and grinded consecutively at an interval of 1 mm in order to obtain the serial images of pore space. By using this technique, we analyzed pore characteristics on a small scale from a cultivated soil from USA and a cultivated soil from France, and the results showed that there were differences in image pore area, image pore size, image pore variability, pore connectivity, pore overlapped extent and pore circulating ability in those two soils, which were considered to be related with their different organic material contents.

**Key words** Serial digital image, Small scale, Pore, Soil