

# 孔隙结构图像分析中不同试验因素 对分析结果的影响\*

李德成<sup>1,2</sup> B. Velde<sup>2</sup> J. F. Delerue<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 of Géologie, URA 1316 CNRS, ENS, 75231 Paris)

**摘 要** 研究了不同试验因素(包括图像分辨率、土壤切片定向性、分析区域大小等)对孔隙结构图像分析结果的影响以及试验误差,并简要介绍了用于分析土壤孔隙结构的土壤切片及数字图像的制备技术。结果表明:不同试验因素对分析结果均会产生一定的影响,试验误差约在 10%。这表明同一研究中应保持试验条件的相对一致以保证分析结果的可靠性和可比性。

**关键词** 土壤切片及数字图像,孔隙结构,试验因素,试验误差  
**中图分类号** S152.4

与常规方法相比<sup>[1,2]</sup>,在研究土壤孔隙结构上,土壤切片及数字图像技术具有直观性强、可对孔隙结构进行小尺度( $\mu\text{m}$ )研究或进行多指标分析的优点,这一技术已在国际上得到了较为广泛和深入的应用<sup>[3-6]</sup>。

我们利用土壤切片及数字图像技术,研究了不同环境条件下土壤孔隙结构的演化,这对定量和定形地研究孔隙结构,进一步了解水、肥、气、热等在土壤的迁移途径以及作物根系在土壤中的生长发育,改善土壤结构和服务于农业生产均具有重要的意义。本文作为研究结果的第一部分,简要介绍所采用的土壤切片和数字图像的制备技术,重点论述不同试验因素(包括图像分辨率、土壤切片取样扫描分析区域大小和土壤切片定向性等因素)对分析结果的影响以及该方法的试验误差。一般研究均对土壤切片及数字图像的制备有所描述<sup>[7-13]</sup>,但涉及试验因素对分析结果影响的研究则较少<sup>[14,15]</sup>,因此,有必要进行较为系统的介绍。

## 1 土壤切片及数字图像的制备方法

### 1.1 土壤切片的制备

土壤切片的制备一般包括土样采集、脱水、树脂浸渍、固化、切片、磨光和抛光等基本过程<sup>[3-13]</sup>。本研究中,土样采集用壁厚 0.2~0.4mm、直径 7.0cm 的聚酯塑料圆筒,垂直取样,采样深度 0~20cm。脱水后用瑞士 Ciba Geigy 公司生产的 Gy783 BD(H025)不饱和树脂进行浸渍。为加大孔隙部分与非孔隙部分

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

收稿日期:2000-05-22;收到修改稿日期:2001-07-25

间的颜色反差,在树脂中加入法国 Truers SAS 公司生产的 Epodye 有机染料。固结后由塑料圆筒上部土表开始,按每 2cm 或 3cm 的间距切割,制成厚度 2cm 或 3cm 圆柱形土壤切片。

## 1.2 数字图像的制备

土壤切片数字图像制备包括图像输入和图像转换两个过程。图像输入主要有两种方法:一是采用(照相机+扫描仪)方法,即先拍照再扫描;二是利用摄影扫描仪方法<sup>[16]</sup>,扫描输入一次性完成。本研究主要采用便捷的后者。图像转换是指扫描获得的真彩色图像(RGB 图像),需转换成灰度图像(Grey-level 图像),再转换成二元图像(Binary 图像)以供孔隙结构分析的过程<sup>[3-6,17]</sup>。

在同一图像分辨率条件下,灰度阈值(Threshold of grey-level)的选择是决定二元图像能否真实反映孔隙结构的关键<sup>[12,13,16]</sup>。选择阈值的方法主要有目视法和程序法<sup>[12,13,16]</sup>。本研究采用目视法<sup>[16]</sup>。

## 2 不同试验条件对图像分析结果的影响

### 2.1 孔隙结构指标的图像分析原理

描述孔隙结构的指标主要有孔隙度(Porosity)、孔隙大小分布(Pore size distribution, 即 PSD)、连接性(Connectivity)、定向性(Orientation)、分数维(Fractal dimension)等<sup>[12,13,16,18-23]</sup>。选择孔隙度和孔隙大小分布两个最常用指标。图像分析软件为 MICROMORPH(V1.3),并用 C 语言编制了相应分析程序。

2.1.1 孔隙度 孔隙度为二元图像中的孔隙面积与整幅图像面积的比值。其计算公式为:  $P = S_p / S \times 100$ 。其中,  $P$  为孔隙度(%),  $S_p$  为孔隙面积,  $S$  为整幅图像面积。

2.1.2 孔隙大小分布 在二维的二元图像中,孔隙可以近似地被看作是由连续不同大小孔径的圆所组成(三维则是圆球)<sup>[21,22,24]</sup>。孔隙大小分布是指各孔径级别孔隙所对应的孔隙度。其计算公式为:  $P_i = S_{pi} / S \times 100$ 。其中,  $P_i$  为孔径为  $i$  的孔隙所对应的孔隙度(%),  $S_{pi}$  为孔径为  $i$  的孔隙面积,  $S$  为整幅图像面积。PSD 的计算原理和方法为“Erosion-dilation 过程”(即“Opening 过程”)<sup>[20,24]</sup>。

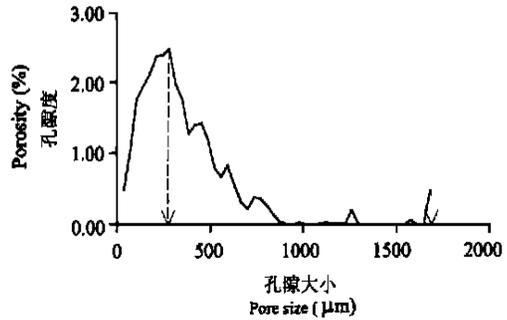
### 2.2 不同试验条件对图像分析结果的影响

2.2.1 图像分辨率对分析结果的影响 像元是扫描影像中的最小可分辨面积,图像分辨率是指单个像元对应的实际面积大小<sup>[17]</sup>。假设扫描所得矩形图像的像元图幅为  $P_x \times P_y$  (pixel<sup>2</sup>),而其对应的土壤切片的实际大小为  $L_x \times L_y$  (cm<sup>2</sup>),则其图像分辨率为:

$$L_x \times 10^4 / P_x \text{ (}\mu\text{m pixel}^{-1}\text{)} \text{ 或 } L_y \times 10^4 / P_y \text{ (}\mu\text{m pixel}^{-1}\text{)}$$

图 1 为所用土壤切片二元图像(黑色为孔隙)及其孔隙大小分布的分析结果示意图(土样取自美国 Illinois 州中部的玉米地)。它表明分辨率为 20 $\mu\text{m pixel}^{-1}$ 、25 $\mu\text{m pixel}^{-1}$ 、30 $\mu\text{m pixel}^{-1}$  的孔隙度和孔隙大小分布的分析结果相对较为一致,而分辨率为 18 $\mu\text{m pixel}^{-1}$  和 35 $\mu\text{m pixel}^{-1}$  则产生了相对较为明显的变化。

图像分辨率应根据土壤切片大小和扫描条件决定,高分辨率(如 18 $\mu\text{m pixel}^{-1}$ )可能会减小成像区域,低分辨率(如 35 $\mu\text{m pixel}^{-1}$ )可能会损失部分小的孔隙,均匀会引起分析结果产生偏差。土壤自身的某些物理性状对图像分辨率选择也有影响,如颗粒粗、孔隙大的土壤可采用低分辨率,而颗粒细、孔隙小的土壤需采用高分辨率。但在同一研究中,重要的是保证系列图像具有一致的适中分辨率,以使图像分析结果具有可比性。



A 土壤切片的二元图像(局部)  
A Binary image of a soil section (local)

B 孔隙结构的分析结果  
B Analytical result of pore structure

图 1 图像分辨率对孔隙结构分析结果的影响

Fig. 1 Influence of image resolutions on analysis of pore structure

表 1 不同分辨率对孔隙结构分析结果的影响<sup>1)</sup>

Table 1 Analytical results of pore structure under various image resolutions

分辨率 Resolution ( $\mu\text{m pixel}^{-1}$ )	孔隙度 Porosity (%)	最大孔隙度( $P_{\text{max}}$ )对应的孔隙大小 Pore size corresponding to $P_{\text{max}}$ ( $\mu\text{m}$ )	分辨率 Resolution ( $\mu\text{m pixel}^{-1}$ )	孔隙度 Porosity (%)	最大孔隙度( $P_{\text{max}}$ )对应的孔隙大小 Pore size corresponding to $P_{\text{max}}$ ( $\mu\text{m}$ )
35	29.0	280	20	27.4	120
30	27.4	120	18	26.0	140
25	27.4	125			

1) 最大孔隙度( $P_{\text{max}}$ )对应的孔隙大小: 即具有最大孔隙度的孔隙的大小, 见图 1B 中左边虚线尖头所指横坐标处

2.2.2 分析区域对分析结果的影响 土壤是高度异质的空间变异性<sup>[25, 25]</sup>。分析区域对分析结果会产生一定的影响。研究中土壤切片直径为 7.0cm, 其二元图像图幅一般为矩形。本研究以图 1A 对应的图象(分辨率为  $25\mu\text{m pixel}^{-1}$ ) 为基础, 保持矩形中心一致, 分别选取  $5.5\text{cm} \times 5.5\text{cm}$ 、 $5.0\text{cm} \times 5.0\text{cm}$ 、 $4.0\text{cm} \times 4.0\text{cm}$  和  $3.5\text{cm} \times 3.5\text{cm}$  的区域进行分析。

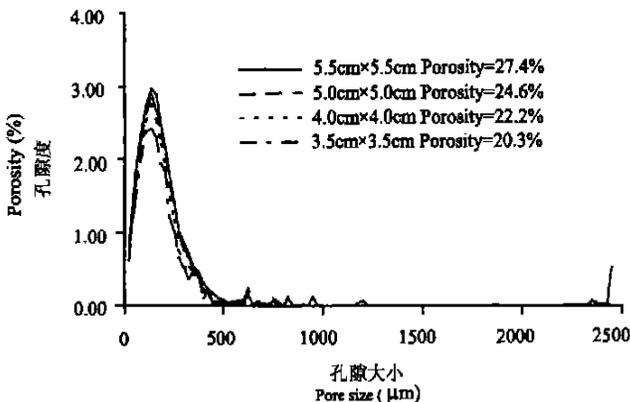


图 2 分析区域大小对孔隙结构分析结果的影响

Fig. 2 Influence of analytical areas on analysis of pore structure

图2表明,孔隙度和最大孔隙半径(图1B中右边虚线尖头所指的横坐标处)均随分析区域的减小而减小,孔隙度依次为27.4%、24.6%、22.2%和20.3%;最大孔隙半径依次为2450 $\mu\text{m}$ 、825 $\mu\text{m}$ 、775 $\mu\text{m}$ 和625 $\mu\text{m}$ 。具有最大孔隙度的孔隙半径基本不变,均集中在175~200 $\mu\text{m}$ 。虽然小的分析区域可减少工作量,但实际研究中应取较大分析区域以利于保证结果可靠性<sup>[27]</sup>。

2.2.3 土壤切片定向性对分析结果的影响 本文中土壤切片定向性是指摄影扫描时土壤切片相对位置。分析方法为:选择一个土壤切片,放在某个位置进行摄影扫描,然后将其顺时针分别转动30°、60°、90°、120°和150°分别进行摄影扫描等过程。

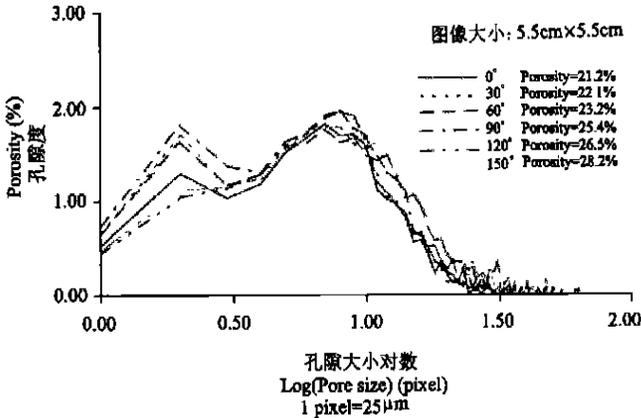


图3 土壤切片的定向性对孔隙结构分析结果的影响

Fig. 3 Influence of orientation of soil sections on analysis of pore structure

由图3可以看出,土壤切片的定向性对孔隙大小分布的影响并不明显,但对孔隙度却有一定影响,差异由4.2%逐渐增至33.0%。造成这一差异的主要原因是每次转动均会引起扫描区域的变化,导致孔隙部分会发生一定变化。在实际研究中应保持同一系列土壤切片定向性一致,这在研究孔隙连接性等方面尤为重要<sup>[12,13]</sup>。

### 2.3 试验误差的分析

试验误差的产生来自图像分辨率、土壤切片定向性、扫描时聚焦程度、切面平整性、灰度阈值选择等因素的综合影响。本研究选择一个土壤切片,由不同的分析人员对之累计分析了10次,然后以孔隙度为指标,对试验误差进行评估。

表2 土壤孔隙结构图像分析的试验误差评估

Table 2 Estimation of experimental error in image analysis of soil pore structure

分析序列	孔隙度	试验误差	分析序列	孔隙度	试验误差
Serial	Porosity (%)	Error (%)	Serial	Porosity (%)	Error (%)
1	12.2	17.9	7	17.1	15.6
2	13.9	5.9	8	14.9	1.0
3	14.9	0.9	9	15.9	7.3
4	13.3	10.1	10	11.9	19.5
5	16.2	9.6	平均值	14.8	10.6
6	17.6	18.7			

表2 分析结果表明,本方法的试验误差约在 10%,这一误差属可接受范围<sup>(1)</sup>。虽然进行多次重复分析可保证分析结果的精度,但在一般情况下,保持试验和分析条件的一致是常用的减小试验误差的方法<sup>[1,28,29]</sup>。

### 3 结 论

利用土壤切片及数字图像分析孔隙结构,应根据具体研究选择土壤切片及数字图像的制备方法。本研究揭示了试验因素对分析结果的影响:高分辨率会减小成像区域,低分辨率则损失小的孔隙,均会引起结果产生偏差;小分析区域虽可减少工作量,但代表性不如大分析区域;土壤切片定向性对孔隙大小分布影响不明显,对孔隙度却有一定影响。10%的试验误差在可接受的范围。结合其他研究,采取树脂中加入有机染料以增强孔隙部分与非孔隙部分的反差、对比选择灰度图像向二元图像转换过程中灰度阈值以及在同一研究中保持试验条件的相对一致等措施,是保证分析结果可靠性、可比性和减小试验误差的有效方法<sup>[12,13,16]</sup>。

### 参 考 文 献

1. 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1984. 15~ 22
2. Fies J C. Analysis of soil textural porosity relative to skeleton particle size using mercury porosimetry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 1062~ 1067
3. FitzPatrick E A. *Micromorphology of Soils*. London: Chapman and Hall, 1984
4. Ringrose-Voase A J. *Micromorphology of soil structure: Description, Quantification, Application*, *Aust. J. Soil Res.*, 1991, 29: 777~ 813
5. Terribile F, FitzPatrick F A. The application of some image-analysis techniques to recognition of soil micromorphological features. *Euro. J. Soil Sci.*, 1995, 46: 29~ 45
6. Douglas L A. *Soil Micromorphology: A Basic and Applied Science*. Amsterdam: Elsevier, 1990
7. 中国科学院南京土壤研究所土壤微形态实验室. 用不饱和聚酯树脂制备土壤薄片的方法. *土壤*, 1976, (5/6): 329 ~ 333, 336
8. 中国科学院南京土壤研究所土壤微形态实验室. 制备粘质粘密土壤薄片的方法. *土壤*, 1977, (4): 213~ 215
9. [苏] E. I. 帕尔芬塔娃和 E. A. 亚里洛娃著. 曹升庚译. *土壤微形态研究指南*. 北京: 农业出版社, 1987
10. Murphy C P. *Thin Section Preparation of Soils and Sediments*. London: Academic Publishers, 1986
11. Moran C J, MvBratney A B, Koppi A J. A rapid method for analysis of soil macropore structure. I. Specimen preparation and digital binary image production. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53: 921~ 928
12. Vogel H J, Kretschmar A. Topological characterization of pore space in soil-sample preparation and digital image processing. *Geoderma*, 1996, 73: 23~ 38
13. 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: 365~ 377
14. Murphy C P, Kemp R A. The over-estimation of clay and the under-estimation of pores in soil thin sections. *J. Soil Sci.*, 1984, 35: 481~ 495
15. VandenBygaart A J, Protz R. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology.

(1) 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 土壤实验室分析项目及方法规范(中国土壤系统分类用). 1991. 144~ 145

- Geodema, 1999, 89: 333~ 346
16. Velde B, Moreau E, Terribile F. Pore networks in an Italian vertisol: quantitative characterisation by two dimensional image analysis. *Geodema*, 1996, 72:271~ 285
  17. 陈述彭主编. 遥感大辞典. 北京: 科学出版社, 1990
  18. Serra J. *Image Analysis and Mathematical Morphology 1*. London: Academic Press, 1982
  19. Meyer F. Mathematical morphology: from two dimensions to three dimensions. *J. Microsc.*, 1992, 165: 5~ 28
  20. Hogan G W. Mathematical morphology for analyzing soil structure from images. *Euro. J. Soil Sci.*, 1998, 49: 161~ 173
  21. Moreau M, Velde B, Terribile F. Comparison of 2D and 3D images of fractures in a vertisol. *Geodema*, 1999, 92:55~ 72
  22. Scotte G J T, Webster R, Nortcliff S. The topology of pore structure in cracking clay soil. II. Connectivity density and its estimation. *J. Soil Sci.*, 1998, 39: 315~ 326
  23. Hallaire V. Description of microcrack orientation in a clayey soil using image analysis. *In: Ringrose-Voase A J, Huphreys G S. ed. Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis. Proc. IX Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Townsville, Australia, July 1992. Developments in Soil Science 22, Amsterdam: Elsevier, 1994. 549~ 557*
  24. Delerue J F, Perrier E, Yu Z Y, *et al.* New algorithms in 3D image analysis and their application to the measurement of a spatialized pore size distribution in soils. *Phys. Chem. Earth (A)*, 1999, 24(7): 639~ 644
  25. 周慧珍, 龚子同, Lamp J. 土壤空间变异性研究. *土壤学报*, 1996, 33(3): 232~ 241
  26. Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advances in Soil Science*, 1985, 3: 1~ 70
  27. 王政权编著. 地统计学在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999
  28. 南京农业大学主编. 田间试验和统计方法. 北京: 农业出版社, 1985. 44~ 48
  29. 华中师范学院, 东北师范大学, 陕西师范大学编. 分析化学. 北京: 高等教育出版社, 1981. 118~ 128

## INFLUENCES OF EXPERIMENTAL FACTORS ON ANALYSIS OF PORE STRUCTURE USING IMAGES OF SOIL SECTIONS

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

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

(2 *Laboratoire of Géologie, URA 1316 CNRS, ENS, 75231 Paris, France*)

### Summary

This paper introduces briefly techniques for preparing soil sections and digital images, with emphasis on influences of various experimental factors, such as image resolution, orientation of soil section, analyzed area and so on on the analysis of pore structure. Experimental results obtained by this method are subject to a deviation rate of 10%. The results showed that, for making analytical results reliable and comparable, it was very important to keep the experimental factors replicable and stable because any variation in the experimental factors could influence the analysis of pore structure.

**Key words** Soil section and digital image, Pore structure, Experimental factors, Experimental error