

DOI: 10.11766/trxb201304250206

# 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构\*

周 虎<sup>1</sup> 李文昭<sup>2</sup> 张中彬<sup>1</sup> 彭新华<sup>1†</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095)

## CHARACTERIZATION OF MULTI-SCALE SOIL STRUCTURE WITH X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY

Zhou Hu<sup>1</sup> Li Wenzhao<sup>2</sup> Zhang Zhongbin<sup>1</sup> Peng Xinhua<sup>1†</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210008, China)

关键词 土壤结构; 孔隙结构; CT; 图像处理

中图分类号 S152.4 文献标识码 A

土壤结构是土壤水、气等贮存和运输的场所<sup>[1]</sup>。定量获取土壤内部结构信息,是认识土壤水、气运动规律,进而准确模拟和预测土壤中各种物理过程的前提<sup>[2]</sup>。然而由于土壤组成物质的复杂性以及土壤结构的易破碎性,直接研究土壤结构非常困难。利用传统的土壤微形态方法虽然可以得到二维土壤结构信息,但试验周期长且对样品有破坏性<sup>[3]</sup>。近年来, X 射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography, 以下简称 CT)技术发展迅速,由于其能够快速、无损的获取土壤三维结构,因而被广泛应用到土壤结构的研究中<sup>[3-6]</sup>。综合利用各种 CT 技术,可以研究土壤团聚体<sup>[7-8]</sup>、土块乃至土体<sup>[9-11]</sup>等多个尺度的土壤结构特征,进而分析不同尺度土壤结构同土壤物理、生物乃至化学过程的关系。由于试验条件的限制,国内过去主要利用医用 CT 对大尺度土壤结构(大孔隙)开展了一些研究<sup>[11-14]</sup>。近年来,随着我国同步辐射光源的建成和开放,逐步开展了一些基于同步辐射显微 CT 对团聚体尺度土壤结构的研究<sup>[15]</sup>。总体而言,我国利用 CT 技术开展土壤结构的定量化研究刚刚起步。本

文首先介绍 X 射线 CT 的基本原理,然后总结了主要的 CT 类型及其在土壤结构研究中的应用,在此基础上,结合自己开展的工作,举例介绍了几种 CT 在不同尺度研究对象上的应用,以为国内相关研究提供参考。

### 1 CT 的基本原理

当强度为  $I_0$  的 X 射线穿过厚度为  $D$  的某一均质物体后,射线强度由于物体的吸收和散射而衰减为  $I$ ,并服从 Beer-Lambert 定律:

$$I = I_0 \exp(-\mu D)$$

式中,  $\mu$  为该物体的线性衰减系数,它取决于该物质的密度。而当 X 射线穿过厚度为  $D$  的一组混合物质时,其衰减程度决定于光路内每一离散点上物质的衰减系数:

$$I = I_0 \exp\left(-\int_D \mu(x) dx\right)$$

CT 机首先产生一定能量的 X 射线束,将 X 射线从穿透样品,并通过探测器检测衰减后的投影信号并将其传输到电子计算机上(图 1)。通过改变 X

\* 国家自然科学基金项目(41101200,41171180)、中国科学院知识创新项目(ISSASIP1111)和国家科技支撑项目(2011BAD31B04)资助

† 通讯作者, E-mail: xhpeng@issas.ac.cn

作者简介:周 虎,男,博士,副研究员,主要研究土壤结构。E-mail: zhouhu@issas.ac.cn

收稿日期:2013-04-25;收到修改稿日期:2013-07-19

射线穿透的角度,可以获取一组投影数据,进而可以应用重建算法计算出样品内每一离散点(体元)的线性衰减系数,并用灰度图像的灰度值进行表示。根据线性吸收系数的差异,可以区分样品内部不同物质的组成。当然,由于X射线的类型、强度、探测器和工作方式等的差异,不同类型CT的空间分辨率、密度分辨率和适用范围等也存在着很大的差异。

现阶段土壤结构研究中应用的CT主要包括医用CT、工业显微CT和同步辐射显微CT,三种CT的

主要原理如图1所示。其中,同步辐射显微CT采用单色光源;而医用CT和工业CT采用多色光源,会产生射线硬化伪影,需要通过加滤波器等方法消除。医用CT可扫描样品尺寸大,分辨率低,主要用于大土柱的研究;同步辐射显微CT分辨率高,图像对比度强,但可扫描样品尺寸小,主要用于团聚体尺度的研究;而普通工业CT的分辨率和扫描样品尺度则介于二者之间。结合利用不同类型CT,可以研究多尺度土壤结构特征。

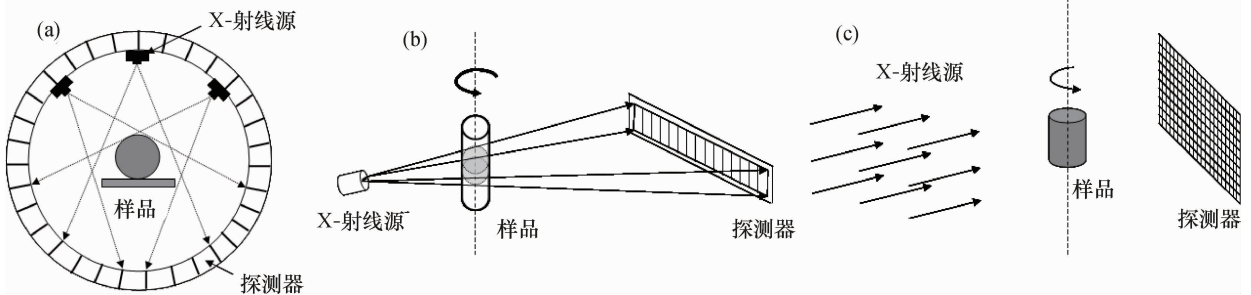


图1 医用CT(a)、工业CT(b)和同步辐射显微CT(c)原理示意图

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

土壤样品采集自中科院鹰潭红壤试验站附近孙家小流域的水稻田,土壤为发育于第四纪红黏土母质的水稻土。共采集三种规格的表层土壤样品:大土柱(直径100 mm,高200 mm),小土柱(直径30 mm,高30 mm)和团聚体(直径约5 mm)(图2)。其中,大土柱和小土柱利用PVC管采集,团聚体用铲子采集。采样和运输过程中尽可能避免震动等对土壤结构的扰动。

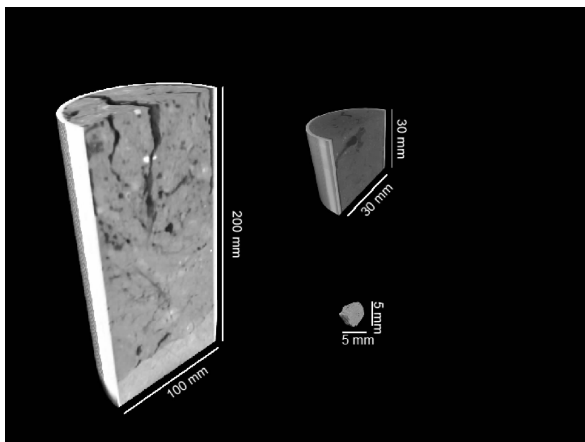


图2 土壤样品示意图  
(左:大土柱;右上:小土柱;右下:团聚体)

### 2.2 CT扫描

大土柱利用江苏省鼓楼医院的医用CT(Discovery CT HD 750, GE, USA)扫描,小土柱利用中国科学院南京土壤研究所的工业显微CT(Phenix Nanotom S, GE, USA)扫描,团聚体样品应用上海光源13W线站的同步辐射显微CT进行扫描。图像重建均采用背投影算法,利用不同CT自带软件完成,详细过程见文献[15]。详细试验参数见表1。此外,两种显微CT均输出tiff格式图像,而医用CT输出图像为DICOM格式,需要利用ImageJ软件转化为tiff格式。

表1 CT扫描的主要参数

土壤样品	直径 (mm)	高度 (mm)	平面分辨率 (mm)	垂直分辨 (mm)	选取图像大小 (pixel)	能量 (keV)
大土柱	100	200	0.330	0.625	281 × 281 × 300	140
小土柱	30	30	0.060	0.060	401 × 401 × 400	100
团聚体	5	5	0.009	0.009	300 × 300 × 300	28

### 2.3 CT图像处理和分析

在图像分析之前,需要选取感兴趣区域。对于土柱样品,选取未受扰动的中心部分土柱;而对于不规则的团聚体样品,则选取中心部分的立方体(图3),具体尺寸见表1。

通过对CT图像的处理和分析可以定量提取土壤结构信息。图像处理的主要步骤有图像增强、去

噪和分割等。图像的增强主要是通过频率域或空间域的变换,使孔隙结构更加突出。去噪主要是利用滤波减少图像中的噪声。有效的图像增强和去噪会降低图像分割的难度。图像分割是将图像中感兴趣目标物提取出来,是定量研究土壤孔隙结

构的关键和难点。关于图像处理的内容可以参考专业书籍<sup>[16]</sup>。本研究中,首先通过直方图拉伸增强图像对比度,然后利用中值滤波平滑图像和去噪。图像分割采用双阈值法<sup>[17]</sup>,分割后图像三维结构如图 3 所示。

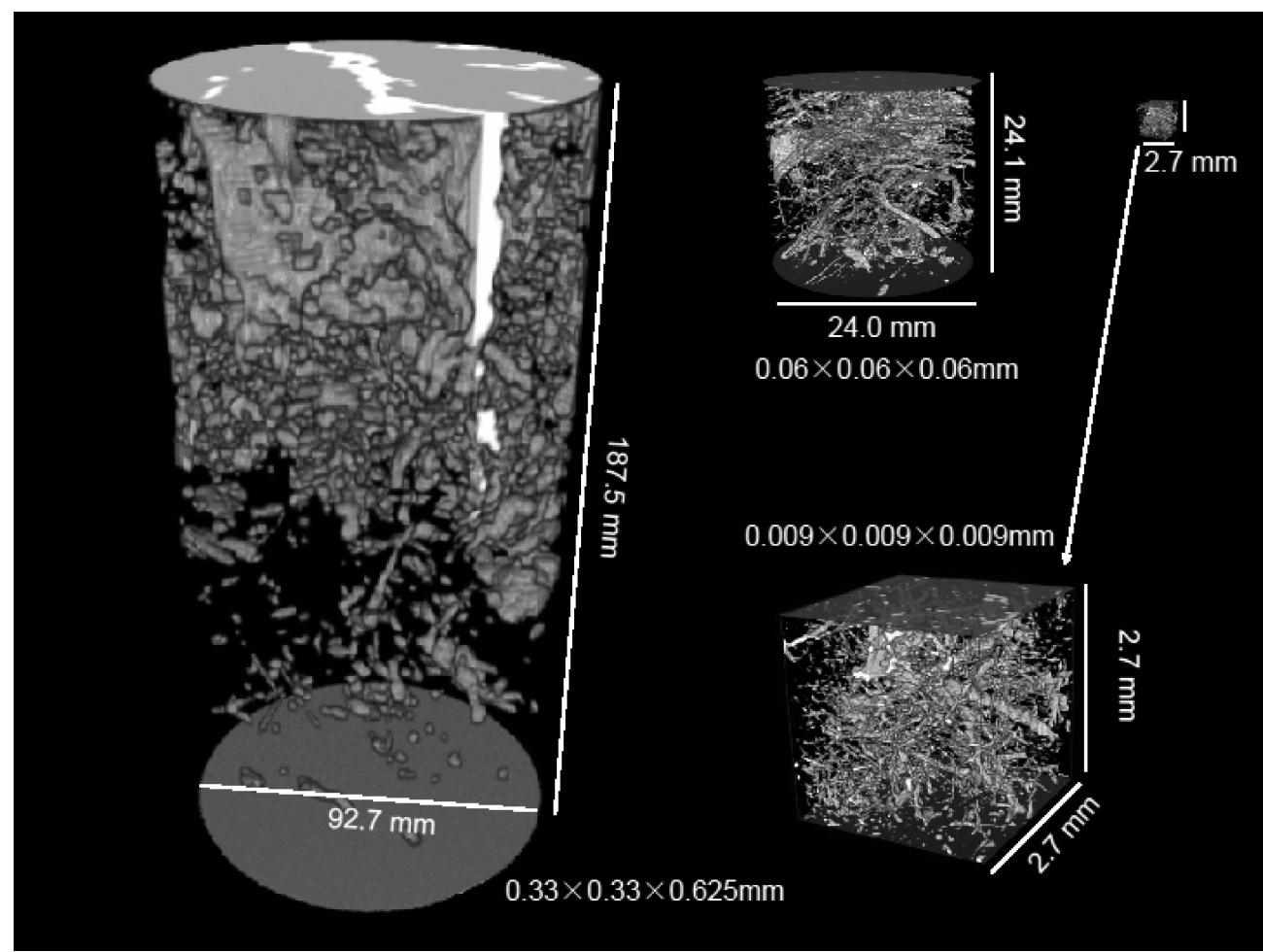


图 3 不同土壤样品孔隙结构  
(左:大土柱;中:小土柱;右:团聚体)

对于分割后的二值图像,可以利用图像分析软件获取土壤孔隙结构特征,包括孔隙度、孔隙大小分布、孔隙弯曲度和连通性等<sup>[15]</sup>。而对于不同尺度的样品,孔隙弯曲度和连通性等数据并不能直接比较。因此,本文主要关注土壤孔隙的大小分布数据。土壤孔隙度可以直接根据孔隙所占体素(voxel)数量累加获得。而孔隙大小则利用数学形态学的开运算(opening)来获取:首先利用一定大小的结构体对图像进行腐蚀(erosion),然后膨胀(dilation)(此组合称为开运算),可以将直径小于该结构体的部分删除,进而可以计算出小于该结构体的孔隙度。变换结构体的大小,可以获取孔隙的大小分布

数据<sup>[18]</sup>。此部分利用 Quantim 软件(www.quantim.ufz.de)完成。

### 3 结果与讨论

不同大小土壤样品三维土壤孔隙结构如图 3 所示。可以看到大土柱上部孔隙较多,有裂隙存在,下部孔隙较少,且无连通性孔隙。通过孔隙度的垂直分布(图 4),可以发现大土柱在 90 mm 以上孔隙度较高(>6%),然后迅速降低至 2% 左右,这一现象说明该田块耕作深度过浅,亟待深耕,因为我国稻田现在普遍采用旋耕机,旋耕深度一般在 10 ~ 15

cm左右。小土柱在上部和下部孔隙度低,而在中部偏上部分孔隙度较高。团聚体内部孔隙分布则相对均匀。

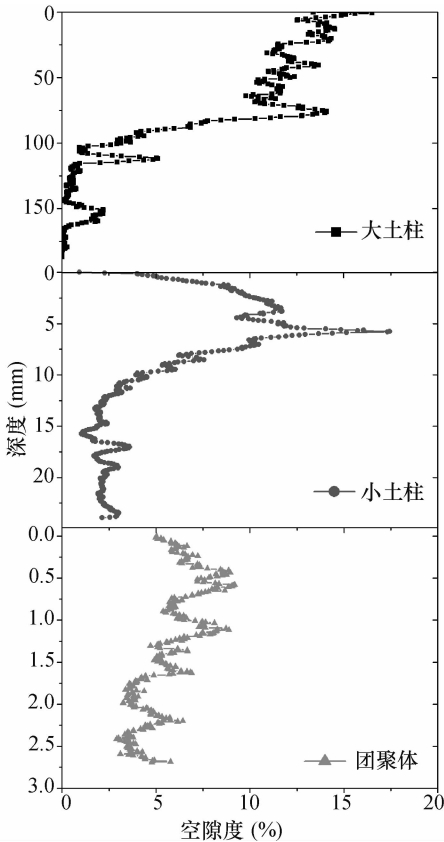


图4 不同土壤样品孔隙度的垂直分布

大土柱、小土柱和团聚体的孔隙度分别为6.4%、5.2%和5.6%,孔隙大小分布如图5所示。不同类型CT扫描的样品尺寸和获取的图像分辨率不同,通过CT扫描只能获取其分辨能力以内的孔隙信息,因而得到的孔隙大小范围不同。本研究中,团聚体、小土柱和大土柱的孔隙大小范围分别为0.02~0.22 mm、0.11~1.68 mm和0.56~5.86 mm。可以发现,不同尺寸样品的孔隙在部分范围存在重合(大土柱和小土柱:0.56~1.68 mm,小土柱和团聚体0.11~0.22 mm)。在重合部分,大土柱孔隙度高于小土柱,后者高于团聚体(图5)。这种现象表明,在一定尺度范围内,随着样品尺寸的增加,大孔隙度增加,这可能是采集的大样品更容易包含大的孔隙(如裂隙)。

低分辨率的CT可以用来分析大尺寸的样品,而高分辨率的CT可以获取低分辨率的CT观测不到的更小孔隙。如果我们综合利用不同分辨率下得到的孔隙信息,将孔隙数据融合,可以得到更大

范围的孔隙分布数据(图5)。具体步骤是:在孔隙大小重合部分,保留孔隙度高的数据,其余部分保留孔隙分布数据<sup>[19]</sup>。数据融合后,土壤孔隙大小分布范围为0.02~5.86 mm,孔隙度为14.3%。当然,在数据融合过程中,本文未考虑样品孔隙度垂直方向的变异。在实际应用中,对于垂直方向变异较大的样品,必须在不同层次采集相应样品进行分析和数据融合。

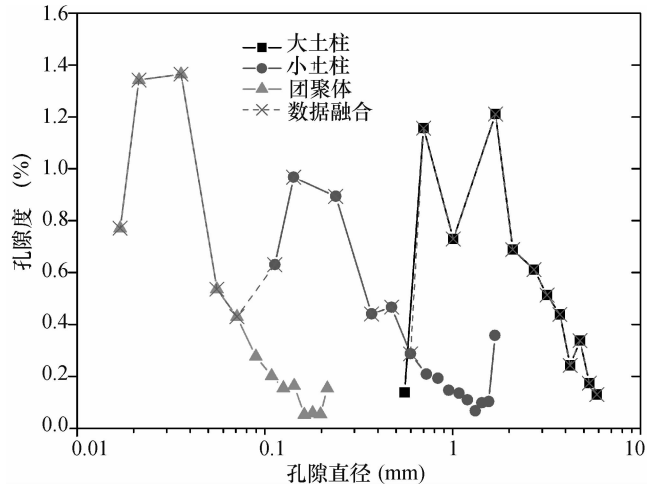


图5 不同土壤样品及其数据融合后孔隙大小分布

## 4 结论

土壤中孔隙大小分布范围很广,目前很难采用一种CT获得比较全面的土壤孔隙结构特征。本论文初步介绍了医用CT、工业显微CT和同步辐射显微CT各自的特点,并通过图像处理和分析,研究了大土柱、小土柱和团聚体等三种尺度土壤结构特征。指出为了获得较全面的土壤孔隙特征,可以分析不同尺度土壤结构特征,然后通过数据融合来实现。

## 参考文献

- [1] Dexter A. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till Res*, 1988, 11(3/4): 199—238
- [2] Wildenschild D, Vaz C, Rivers M, et al. Using X-ray computed tomography in hydrology: Systems, resolutions, and limitations. *J Hydrol*, 2002, 267: 285—297
- [3] Young I, Crawford J, Rappoldt C. New methods and models for characterising structural heterogeneity of soil. *Soil Till Res*, 2001, 61(1/2): 33—45
- [4] 李德成, 张桃林, Velde B. CT分析技术在土壤科学研究中的应用. *土壤*, 2002, 34(6): 328—332
- [5] Jassogne L, McNeill A, Chittleborough D. 3D-visualization and

- analysis of macro-and meso-porosity of the upper horizons of a sodic, texture-contrast soil. *Eur J Soil Sci*, 2007, 58 (3): 589—598
- [ 6 ] 贺秀斌, 冯桓, 冯兆东. 土壤显微结构的 X 光—同步加速器计算机三维图像透视技术. *土壤学报*, 2005, 42 (2): 328—330
- [ 7 ] Peth S, Horn R, Beckmann F. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. *Soil Sci Soc Am J*, 2008, 72 (4): 897—907
- [ 8 ] Udawatta R, Gantzer C, Anderson S, et al. Agroforestry and grass buffer effects on pore characteristics measured by high-resolution x-ray computed tomography. *Soil Sci Soc Am J*, 2008, 72 (2): 295—304
- [ 9 ] Luo L, Lin H, Li S. Quantification of 3-d soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography. *J Hydrol*, 2010, 393 (1/2): 53—64
- [ 10 ] Perret J, Prasher S O, Kantzas A. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63 (6): 1530—1543
- [ 11 ] 吴华山, 陈效民, 陈黎. 利用 CT 扫描技术对太湖地区主要水稻土中大孔隙的研究. *水土保持学报*, 2007, 21 (2): 175—178
- [ 12 ] 沃飞, 陈效民, 方堃, 等. 太湖地区水稻土大孔隙的 CT 扫描分析与灰色关联评价. *土壤*, 2008, 40 (2): 319—326
- [ 13 ] 冯杰, 郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙分布. *水科学进展*, 2002, 13 (5): 611—617
- [ 14 ] 赵世伟, 赵勇钢, 吴金水. 黄土高原植被演替下土壤孔隙的定量分析. *中国科学: D 辑*, 2010, 40 (2): 223—231
- [ 15 ] 周虎, 彭新华, 张中彬, 等. 基于同步辐射微 CT 研究不同利用年限水稻土团聚体微结构特征. *农业工程学报*, 2011, 27 (12): 343—347
- [ 16 ] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital image processing*. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2002
- [ 17 ] Vogel H. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections. *Eur J Soil Sci*, 1997, 48 (3): 365—377
- [ 18 ] Vogel H-J, Weller U, Schlüter S. Quantification of soil structure based on Minkowski functions. *Comput Geosci*, 2010, 36 (10): 1236—1245
- [ 19 ] Schlüter S, Weller U, Vogel H-J. Soil structure development including seasonal dynamics in a long-term fertilization experiment. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2011, 174 (3): 395—403

(责任编辑:陈德明)