

DOI: 10.11766/trxb201906290122

吴呈锋, 於修龄, 卢升高. 运用同步辐射显微 CT 揭示红壤团聚体内孔隙形态与空间分布[J]. 土壤学报, 2020, 57 (6): 1422–1429.

WU Chengfeng, YU Xiuling, LU Shenggao. Synchrotron-based X-ray Tomographic Microscopy Reveals Morphology and Spatial Structure of Intra-aggregate Pores in Red Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (6): 1422–1429.

运用同步辐射显微 CT 揭示红壤团聚体内孔隙形态与空间分布*

吴呈锋, 於修龄, 卢升高[†]

(浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要: 团聚体内部复杂的孔隙系统及其空间分布决定土壤团聚体的主要功能, 以及发生在团聚体内的各种物理、化学和生物学过程。应用同步辐射 X 射线显微成像技术 (SR-mCT), 对第四纪红土发育的红壤团聚体内部孔隙形态、连通性、各向异性、大小分布和空间分布进行了研究。结果表明, 红壤团聚体内部的孔隙形态、孔隙生长方向、大小分布存在明显差异。稳定性较好的团聚体表现为团聚体孔隙含有较大孔隙、孔隙形态各异、各向异性、多联通孔隙等特征, 团聚体内 >30 μm 大孔隙分布比较均匀, 中心部位较高, 呈中间向圆周减小趋势; 反之, 稳定性较差的团聚体中, 孔隙以小孔隙为主, 分布密集, 孔隙生长方向均匀, 团聚体孔隙空间分布为大孔隙, 主要分布在团聚体外围, 中心部分分布较少。团聚体内部孔隙的空间分布模式能够很好地解释土壤团聚体结构和稳定性差异的原因。同步辐射显微 CT 结合图像处理技术能够系统地表征团聚体内孔隙的多样性和空间变异规律, 为预测土壤团聚体中各种物理过程提供新途径。

关键词: 同步辐射显微 CT; 团聚体; 土壤孔隙; 图像可视化; 土壤结构

中图分类号: S159.2 **文献标志码:** A

Synchrotron-based X-ray Tomographic Microscopy Reveals Morphology and Spatial Structure of Intra-aggregate Pores in Red Soils

WU Chengfeng, YU Xiuling, LU Shenggao[†]

(College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: [Objective] The pore structure and spatial distribution of intra-aggregates in soils determine many functions of soil aggregates and physical, chemical, and biological processes occurring in aggregate. The objectives of this study were (i) to examine the three dimension (3D) pore characteristics of intra-aggregate pores; (ii) describe the spatial distribution of macropores (>30 μm) within aggregates, and (iii) to analyze the relation between pore structure and functions of the aggregates. [Method] The 3-5 μm aggregate of two red soils (named as Q4 and Q12) with different stability were used in this study. Synchrotron radiation X-ray microcomputed tomography (SR-mCT) was used to scan the 3-5 mm aggregate of two red soils. A combination of SR-mCT and image analysis was applied to describe the intra-aggregate pore characteristics and pore

* 浙江省重点研发计划项目 (2019C02008) 资助 Supported by the Key R & D Program of Zhejiang Province of China (No.2019C02008)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: luscg@zju.edu.cn

作者简介: 吴呈锋 (1990—), 男, 浙江永嘉人, 硕士研究生, 主要从事土壤结构研究。E-mail: chengfengwu@zju.edu.cn

收稿日期: 2019-06-29; 收到修改稿日期: 2020-05-18; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-07-29

spatial distribution within the aggregates. 【Result】 The SR-mCT images of aggregates indicated a considerable difference in the morphology, pore size, and pore growth direction of intra-aggregate in two soil samples. The soil Q4 was characterized by abundance macropores, multifarious pore growth direction and pore size distribution, whereas soil Q12 by dense micropores, and consistent pore grow direction. They have similar single pore shape, while different interconnected pore shape. The porosities of 5-30, 50-80, and >80 μm in soil Q4 were significantly higher than those of soil Q12. The abundance of macropores (>30 μm) within soil Q4 aggregates was relatively larger in the center part of aggregate, while soil Q12 had a uniform spatial pattern with larger in the outer part of aggregate. 【Conclusion】 The SR-mCT system could clearly describe pore diversity and spatial variation of intra-aggregates without disrupting the aggregate microstructure, which could be effectively to predict the function and physical processes of the aggregates.

Key words: Synchrotron radiation X-ray microcomputed tomography; Soil aggregate; Soil pore; Image visualization; Soil structure

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,对调节土壤的物理、化学和生物过程起着重要作用,是土壤肥力的基础。土壤团聚体内部存在十分复杂的孔隙系统,这种复杂的孔隙系统及其空间分布决定了土壤团聚体的主要功能,以及发生在团聚体内部的各种物理、化学和生物学过程,并对土壤的各种功能起着调控作用^[1-3]。通过对团聚体内部孔隙系统的研究,可以了解土壤团聚体的肥力作用和调控水、肥、气、热的原理,理解土壤团聚体的各种过程和功能。团聚体内部孔隙的空间变异是其物理固碳的主要机制,土壤团聚体内部微环境的高度变异性,阻止了有机碳分解微生物的进入和酶对土壤有机碳的分解作用^[1, 4-5]。研究表明^[6-7],团聚体内从中心向边缘的孔隙大小分布是控制土壤团聚体稳定性和力学性质的主要机制。因此,对土壤团聚体内部微结构和孔隙的研究对深入理解土壤各种物理、化学和生物学性质具有重要的理论意义,也是了解许多土壤过程和机制的钥匙。然而,目前大多数研究均是基于对土壤团聚体宏观特征的研究,采用的研究方法基本均破坏了团聚体的结构,无法反映团聚体内部的“真实”孔隙特性和复杂的空间变化规律,需要发展原位非扰动状态进行表征的方法。

显微 CT 技术广泛用于研究不同材料(土壤、骨骼、陶瓷、水泥等)的孔隙结构^[3, 8-10],它可以原位无损直观地描述孔隙度、孔隙大小分布、连通性和形态等孔隙特性。近年,较普通显微 CT 光源稳定、能量高、成像效果好的同步辐射显微 CT (SR-mCT) 得到应用^[4, 9-12]。同步辐射显微 CT 技术可无损地获取土壤团聚体连续切面图像以及完整的三维(3D)结构,定量计算不同类型及大小团聚体

内部的孔隙数量、孔隙度和 3D 分布模式等。目前,已应用 SR-mCT 研究耕作、土地利用方式和施肥等对团聚体内部孔隙特性的影响^[13-19]。如 Peth 等^[15]采用同步辐射显微 CT 技术研究传统农田和草地的土壤结构,系统分析了孔隙参数(如孔隙度、孔径分布、孔隙长度、孔隙形状等),发现二者的团聚体孔隙结构存在显著性差异。周虎等^[16, 20]利用同步辐射显微 CT 技术研究了红壤恢复过程和水稻土不同利用年限的团聚体微结构演变规律。尽管随着 CT 技术的发展,对团聚体内孔隙特性已有初步了解,但对于团聚体内部孔隙的形态以及空间分布与定量方面存在着一系列挑战。本研究以红壤为材料,采用同步辐射 X 射线显微 CT 技术对团聚体内部结构进行连续扫描,获取高分辨率土壤团聚体三维结构图像,应用数字图像处理方法定量分析团聚体微结构特征,包括孔隙数量、孔隙度、几何形状及连通性、三维结构以及空间分布,试图解释团聚体孔隙特征与团聚体结构稳定性的内在联系,建立原位无损地研究团聚体内部结构的新方法,利用团聚体内孔隙结构来理解土壤肥力实质和各种土壤过程机理。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤样品采自浙江衢州第四纪红土发育的低丘红壤(网纹黏化湿润富铁土),以两个代表性土壤(标记为 Q4 和 Q12)为材料。土地利用方式 Q4 为裸地, Q12 为园地(柑橘)。每个土壤由 5 个采样点混合而成。土壤样品风干后,一部分原状土用于团聚体分析,另一部分过 100 目筛供土壤基本性质测定。土

壤样品的基本理化性质见表 1。由表可知, 两个土壤样品的平均黏粒含量、有机质和游离铁含量无显著差异, 表明土壤团聚体的主要胶结物质含量基本相同。土壤全土的水稳性团聚体含量、平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 等团聚体稳定性指标存在明显差异, Q4 的平均重量直径 (MWD)

和几何平均直径 (GMD) 分别为 0.55 mm 和 0.69 mm; Q12 分别为 1.03 mm 和 0.78 mm。团聚体抗压强度 (TS) Q12 明显大于 Q4。土壤总孔隙度 Q4 明显大于 Q12。通过干筛法筛选出 3~5 mm 团聚体, 在光学显微镜下挑选形状规则、近球形的团聚体样品多颗以备用。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic properties of two studied soil samples

土地利用方式 Land use type	黏粒 Clay/ (g·kg ⁻¹)	土壤有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	游离氧化铁 Fed/ (g·kg ⁻¹)	平均重量直径 MWD/ mm	几何平均直径 GMD/ mm	抗压强度 TS/ (N·cm ⁻³)	总孔隙度 TP/ %
Q4 ¹⁾	380	2.54	27.9	0.55	0.69	17.8	44.9
Q12 ²⁾	348	3.91	28.5	1.03	0.78	27.8	37.0

1) 裸地 Bare land; 2) 园地 Garden plot

1.2 团聚体 CT 扫描

干筛法分离出直径 3~5 mm 团聚体, 土壤团聚体的显微 CT 扫描在上海光源 BL13W 光束线站进行。将团聚体置于塑料管内并固定在样品台上, 样品与探测器距离为 10 cm。样品台在水平方向从 0° 至 180° 匀速旋转, 以 0.25° 步长进行扫描。在 26 KeV 能量下, 使用分辨率为 3.7 μm 的 CCD 探测器采集土壤团聚体的显微 CT 信号, 每个样品共采集 720 张像素为 2 048×2 048 的图像。由于同步辐射机时的限制, 每个样品重复三次。图像重建利用上海光源 CT Program 软件完成, 重建之后每个样品生成 600 张大小为 2 048×2 048 像素的图像, 并将其存储为 8 位 tif 格式。团聚体结构的三维可视化利用 ImageJ 软件完成。

1.3 图像解译与处理

图像亮度归一化、滤波、分割、裁剪以及土壤孔隙系统的三维可视化由软件 ImageJ 1.50 完成 (the National Institute of Health, USA; <http://rsb.info.nih.gov/ij/>)。图像亮度归一化使用 ImageJ 软件 enhance contrast 模块中的亮度归一化命令完成, 像素饱和率设置为 0.3%, 使不同 CT 切片的亮度差别最小化。CT 扫描过程中常常存在环状伪影, 会对团聚体结构分析造成一定的干扰。为了准确提取土壤孔隙结构数据, 须采用图像处理方法去除环状伪影。环状伪影的去除主要步骤包括对图像进行傅里叶变换、滤波、傅里叶逆变换标等步骤。图像的降噪处理采用中值滤波法, 滤波半径设置为 1 像素。中值滤波由

ImageJ 软件完成。图像二值化分割采用 ImageJ 软件内置的固定模式分割法, 由 ImageJ 软件根据图像堆栈的直方图分布自动选择出分割阈值, 将土壤分为孔隙和固相两相。

1.4 孔隙三维重构

为了避免边缘效应, 提高分析精度, 本研究选取了团聚体内部 400×400×400 的感兴趣体元 (volume of interest, VOI) 进行定量分析。该体元的大小为 1.48 mm × 1.48 mm × 1.48 mm。体元的选取由 ImageJ 软件完成。由于土壤团聚体内部的网络孔隙是高度相连的, 因此在定量分析前先将孔隙提取出来。孔隙的提取由 Image J 软件 3D 插件包中的 watershed split 命令完成。孔隙的表面积、体积、等效直径、周长、空间坐标等参数分析由 ImageJ 软件的 counter 3D 插件包完成。孔隙的形态、各向异性和玫瑰图的生成由 BoneJ 插件包完成。并利用软件重构样品中孔隙的 3D 结构, 计算样品中的孔隙大小分布。由于探测器分辨率为 3.7 μm, 因此将团聚体孔隙分为 3.7~5、5~30、30~50、50~80、>80 μm 五个级别。

1.5 团聚体中孔隙的空间分布

获取孔隙的空间分布首先需要提取所有孔隙的三维空间坐标, 然后通过将所有孔隙的三维坐标投影至 X-Y 平面上, 并将直角坐标转化为极坐标。转化方程为:

$$R = (x^2 + y^2)^{1/2}, \theta = \tan^{-1}(y/x) \quad (1)$$

式中, R 为孔隙在极坐标中的半径参数, θ 为孔隙在极坐标中的方位参数。将转换后的坐标使用 MATLAB 软件绘制成孔隙空间分布等高图。

1.6 统计分析

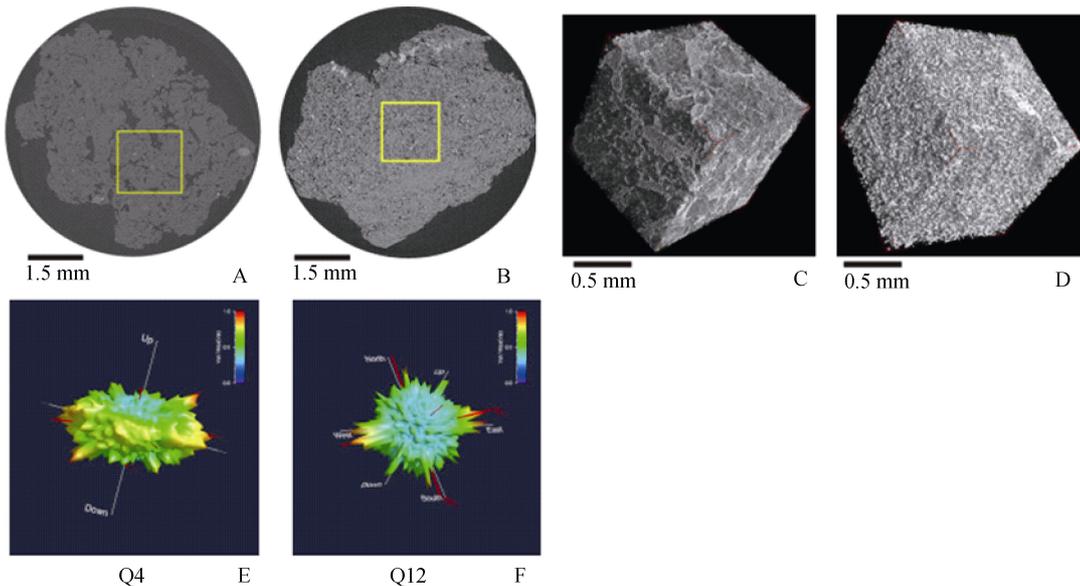
统计分析使用 IBM SPSS22.0 统计学软件包。本研究使用了单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 LSD 检验法用于对比一组或多组变量在 $P=0.05$ 显著水平上的差异。

2 结果

2.1 土壤团聚体内孔隙形态与各向异性

图 1 为土壤团聚体 CT 扫描图以及对应感兴趣体元 (VOI) 经重构所得的三维结构图。2D 图像表明两种土壤团聚体孔隙形貌存在较大差别, Q4 团聚体中存在不同大小孔隙, 且大孔隙数量较多, 孔隙形状呈长条形或不规则矩形, 同时能观察到圆

形、长条形小孔隙。Q12 团聚体内部的孔隙大部分为小孔隙, 很少有中、大孔隙, 且小孔隙分布较为均一。图 1C 和图 1D 为 Q4 与 Q12 的孔隙 3D 结构图, 展示了团聚体孔隙 3D 空间分布模式。土壤团聚体的 3D 孔隙图像表明, 两种土壤团聚体的孔隙结构、孔隙大小与分布存在明显差异。Q4 孔隙含有较多大、中孔隙, 且孔隙连通性较好, 呈现出发育完善的孔隙结构; Q12 孔隙 3D 图以小孔隙为主, 未发现大孔隙存在, 且小孔隙分布较为致密。2D 和 3D 孔隙形貌图表明, 两种土壤孔隙结构存在明显差异。Q4 与 Q12 团聚体不同的孔隙结构特征对于团聚体结构稳定性具有明显的差异。Q4 团聚体孔隙分布均匀, 不同孔径孔隙均有分布, 大孔隙形态各异, 形成疏松结构, 导致抗压强度较低; 而 Q12 团聚体小孔隙居多, 分布紧密, 小孔隙的分布模式造成紧实致密的团聚体结构, 与土壤抗压强度测定结果一致。



注: 三维孔隙形貌是图中由方框内区域进行重构而成。Note: The 3-D images were reconstructed from 2-D images located in the selected square.

图 1 土壤团聚体二维 (A 和 B)、三维 (C 和 D) 结构与孔隙各向异性 (E 和 F)

Fig. 1 Representative 2-D (A and B), 3-D images (C and D) and degree of anisotropy (E and F) of soil intra-aggregates pores by SR-mCT

孔隙的各向异性是指孔隙在团聚体内有不同的生长方向、大小分布、排列规律和疏密程度, 由此导致孔隙结构特征和功能不同。它是团聚体内不同大小、方向、形状孔隙分布排列的综合反映, 可指示团聚体孔隙结构状况。图 1E 和图 1F 所示为两种土壤孔隙各向异性玫瑰图, 图中每个棱角为孔隙生

长方向的投影, 不同颜色代表该方向上孔隙分布的密集程度, 颜色越红表示数量越多, 颜色偏蓝则相反。Q4 和 Q12 孔隙各向异性呈现出明显的差异性, 主要表现为 Q4 各向异性呈椭圆形, 而 Q12 呈圆形, 说明 Q4 团聚体孔隙生长方向、分布规律呈现出多样性, 更为复杂, 而 Q12 团聚体孔隙生长较为一致。

结合图 1 孔隙二维、三维结构图可以得出, Q4 大孔隙发育完整, 孔隙分布完善, 空间排列有规律, 形成了很好的孔隙性能, 是团聚体结构性能突出的表现, 而 Q12 团聚体以小孔隙为主, 孔隙分布均且排列密集, 不利于良好团聚体结构的形成, 因此团聚体稳定性 Q12 不如 Q4。Q4 和 Q12 团聚体孔隙整体呈现出较大的差异, 造成团聚体结构性能的差异。

图 2 所示为 Q4 和 Q12 团聚体样品中所提取的单孔隙以及多孔隙连通性示意图。Q4 样品单孔隙形态各异, 有圆柱体形、长条形、不规则形等形态。同样, Q12 样品的孔隙形态也呈多样性。对比 Q4

与 Q12 多连通孔隙形态可知, Q4 多联通孔隙连通性较好, 能将多个孔隙完整连接成一条孔径, 且两孔隙连通节点过渡平缓, Q12 样品多连通孔隙连接处则出现较多“瓶颈”, 即在连通处孔径内径骤减。同时, Q4 多连通孔隙呈现出孔隙形状的多样性, 各向异性较好, 而 Q12 孔隙各向异性较差。两样品不同的单孔隙、多连接孔隙形态造成了整体孔隙性能的差异, Q4 良好的孔隙连通性能有利于水分、空气、养分、热量在土壤中的传导, 形成了良好的团粒结构与疏松的土质, 同时有利于作物根系在土壤中的生长, 共同决定着团聚体结构的发育。

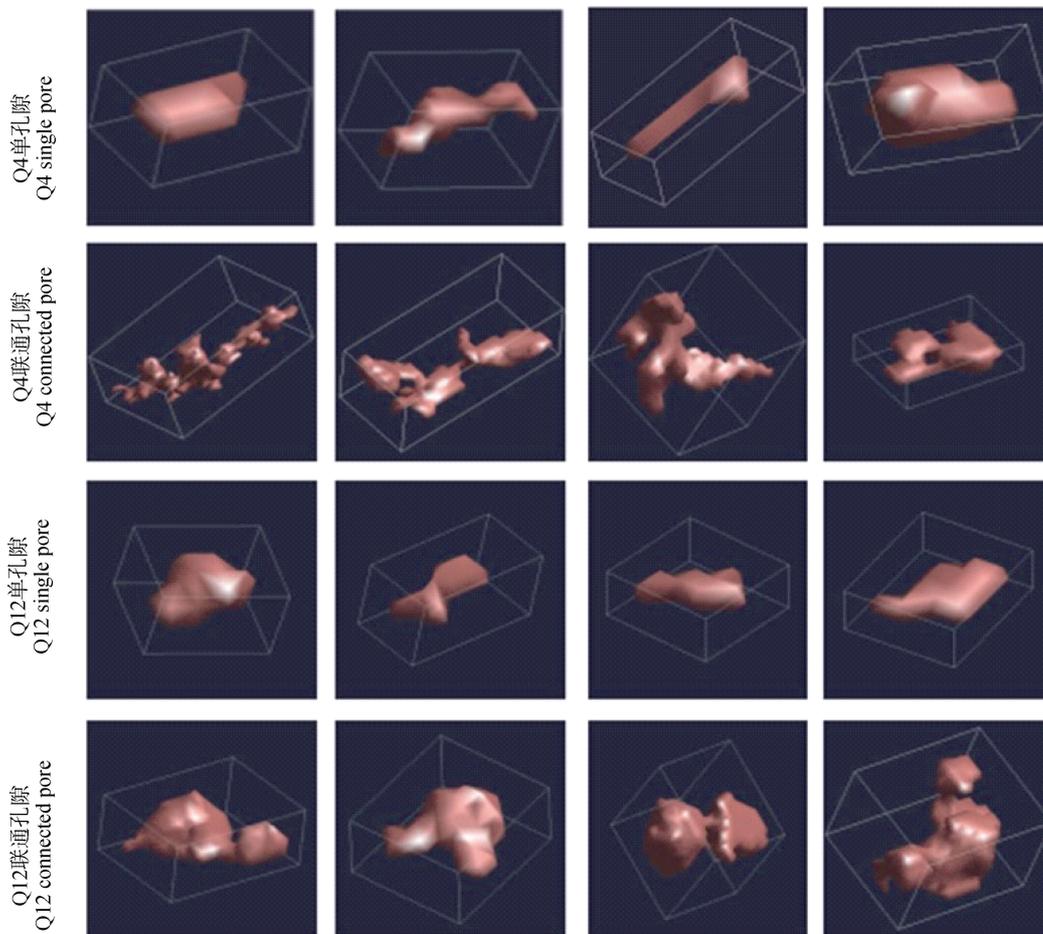


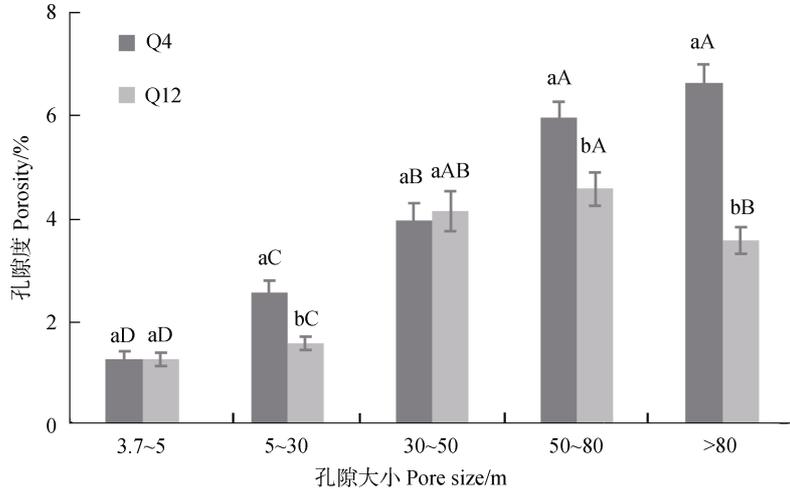
图 2 土壤团聚体单孔隙和多联通孔隙三维形貌图

Fig. 2 3-D image of single and connected pores structure intra-aggregate pores

2.2 土壤团聚体内孔隙大小分布

由于同步辐射显微 CT 图像分辨率为 $3.7 \mu\text{m}$, 因此本研究的孔隙仅针对 $>3.7 \mu\text{m}$ 的孔隙。根据孔隙大小, 将团聚体孔隙分为 $3.7\sim 5$ 、 $5\sim 30$ 、 $30\sim 50$ 、 $50\sim 80$ 、 $>80 \mu\text{m}$ 五个级别, 并比较两个土壤团聚体内孔隙大小分布 (PSD) 的差异 (图 3)。Q4 的孔隙

大小分布以 $>80 \mu\text{m}$ 孔隙最多, 约为 6.5%, 其次为 $50\sim 80 \mu\text{m}$, 接近 6%; $30\sim 50$ 、 $5\sim 30$ 、 $3.7\sim 5 \mu\text{m}$ 孔隙分别为 4%、2.5%、1.4%。Q12 的孔隙大小分布与 Q4 不同, 总体上以 $30\sim 50$ 、 $50\sim 80$ 、 $>80 \mu\text{m}$ 为主, 分别为 4.1%、4.5%、3.5%, 其次为 $5\sim 30$ 和 $3.7\sim 5 \mu\text{m}$ 两级孔隙分别为 1.5% 和 1.3%。比较分析



注：误差棒代表标准误。不同的小写字母代表两个土壤之间不同大小孔隙度的显著差异 ($P < 0.05$)，大写字母代表同个土壤中不同大小孔隙的显著差异 ($P < 0.05$)。Note: Error bars represent standard errors. Different lowercase letters in the same pore classes indicate that the porosities are significant difference ($P < 0.05$) between Q4 and Q12 aggregates. Different capital letters in the same soil indicate that the porosities are significant difference ($P < 0.05$) among different size pores.

图3 土壤团聚体内孔隙大小分布

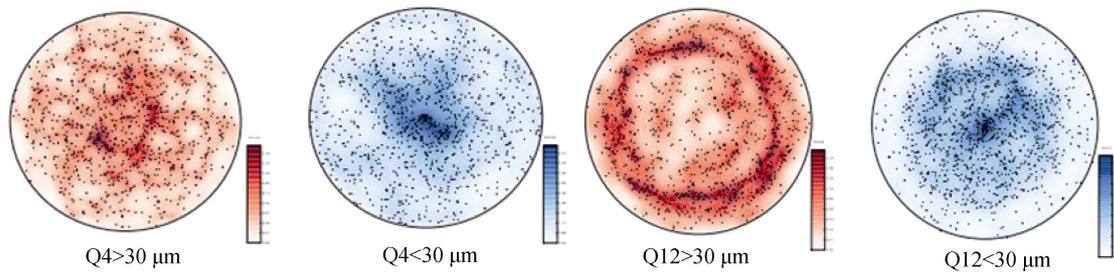
Fig. 3 Pore size distribution (PSD) of intra-aggregate pores in soils

表明，两个土壤团聚体中 $3.7 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 孔隙差异不显著；而 $5 \sim 30$ 、 $50 \sim 80$ 和 $>80 \mu\text{m}$ 孔隙 Q4 显著高于 Q12 ($P < 0.05$)。团聚体的孔隙度在一定程度上可反映团聚体结构性，土壤团聚体拥有较大的总孔隙度往往说明团聚体具有良好的团粒结构，稳定性也更强。在团聚体内部， $>30 \mu\text{m}$ 孔隙度与 $<30 \mu\text{m}$ 孔隙度间存在显著差异。土壤孔隙系统是由大小从纳米到毫米尺度的连续孔隙组成，孔隙的实际大小范围达几个量级。由于 CT 图像分辨率的限制，对团聚体内部的纳米尺度孔隙无法定量。土壤团聚体作为一个相对独立的封闭体系，其内部孔隙的复杂性和空间变异性，是土壤团聚体多样性功能的基础，如水分吸持、土壤固碳等。可以预计，团聚体内孔隙大小分布和空间分布的差异显著改变了团聚体内部微环境，土壤孔隙从孔隙数量（大小）和空间分布影响和控制土壤的功能，包括水、气、养分和微生物的空间分布。团聚体内孔隙的分析结果也表明土壤孔隙大小和分布对土壤管理措施和环境变化十分敏感，可用于评价土壤孔隙对长期施肥、耕作和土壤修复的响应等。

2.3 土壤团聚体内孔隙空间分布

土壤孔隙的空间变异影响土壤水分和空气的交换，团聚体内孔隙的空间变异是微生物群落和有机质保护的主要机理^[1, 5, 15]。根据不同大小孔隙的功

能，一般将 $>30 \mu\text{m}$ 孔隙作为大孔隙， $<30 \mu\text{m}$ 为小孔隙。利用 ImageJ 软件提取团聚体单位空间的孔隙坐标信息，通过投影和坐标转换，绘制孔隙空间分布等高线图。孔隙等高线图可直观清晰地反映团聚体内孔隙的分布模式。图 4 为 Q4 和 Q12 团聚体 $<30 \mu\text{m}$ 与 $>30 \mu\text{m}$ 两级孔隙空间分布等高线图，蓝色为 $<30 \mu\text{m}$ 孔隙空间分布图，红色为 $>30 \mu\text{m}$ 孔隙空间分布图。图中每个黑点代表团聚体中一个孔隙，等值线的形状代表孔隙分布模式，图中颜色越浅表示孔隙密度越低，颜色越深则孔隙分布越密集。分析 Q4 和 Q12 两级孔隙分布模式可知，Q4 团聚体中 $>30 \mu\text{m}$ 孔隙分布总体上比较均匀，在整个团聚体面上均有分布，其中以中心部位偏高，呈中间向圆周略有减小趋势； $<30 \mu\text{m}$ 孔隙主要分布在团聚体中心区域，向四周锐减，边上分布密度较低，说明上述大小的孔隙主要分布在团聚体中心。Q12 团聚体 $>30 \mu\text{m}$ 孔隙总体分布密集，主要分布在团聚体外围，且密度较高，而在中心分布较少，说明上述大小的孔隙主要分布在团聚体周围；Q12 $<30 \mu\text{m}$ 孔隙分布与 Q4 相似，中间分布密度高，四周密度非常低。土壤孔性是土壤结构性的反映，不同粒径孔隙的空间分布规律决定着水、肥、气、热等介质在土壤中的传输，直接影响土壤物理-力学性质及土壤团聚体结构稳定性。综合 Q4 和 Q12 两级孔隙分布可



注：图中每个黑点代表团聚体中一个孔隙，图中颜色深浅表示孔隙密度，颜色越深表示孔隙分布越密集，颜色越浅表示孔隙密度越低。Note: Each black point represents a pore. The light color represents the lower pore abundance and the deep the higher.

图 4 土壤团聚体内孔隙 (>30 μm 和 <30 μm) 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of intra-aggregate pores (>30 μm and <30 μm) in soils

知,整体上 Q4 孔隙分布较 Q12 更为均衡,以 >30 μm 尤为突出,孔隙空间分布的均匀性意味着孔隙性能更好,团聚体结构更为疏松,土壤耕性较好^[14, 15],这与两种土壤抗压强度测定值一致(表 1)。

3 结 论

应用同步辐射显微 CT 和数字图像处理技术,分析了两种不同稳定性的红壤团聚体内部孔隙结构,包括团聚体的 3D 形态和孔隙的各向异性、孔隙的连通性、大小分布和空间分布。两种土壤团聚体孔隙形貌存在明显差异, Q4 团聚体孔隙含有较大孔隙,孔隙形态各异,各向异性呈椭圆形,孔隙生长方向、分布规律呈现出多样性,多联通孔隙连通性较好; Q12 团聚体孔隙以小孔隙为主,分布密集,孔隙各向异性为圆形,团聚体孔隙生长较为一致,多联通孔隙连接处则出现较多“瓶颈”。SR-mCT 结合图像分析建立了土壤团聚体中 >30 μm 大孔隙和 <30 μm 的空间分布模式,不同结构性能的团聚体内孔隙空间分布呈现出不同的模式。Q4 团聚体 >30 μm 孔隙分布比较均匀,以中心部位偏高,呈中间向圆周略有减小趋势; Q12 团聚体 >30 μm 孔隙分布密集,主要分布在团聚体外围,中心分布较少。孔隙空间分布的均匀性意味着孔隙性能更好,从团聚体孔隙空间分布模式可以很好地解释土壤团聚体结构性能差异的原因。结果表明,SR-mCT 分析的团聚体孔隙结构较好地解释了土壤团聚体稳定性机理,帮助预测和模拟土壤团聚体中的各种物理过程和宏观功能。为利用团聚体内部孔隙结构来理解土壤肥力实质和各种土壤过程机理提供科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Ananyeva K, Wang W, Smucker A J M, et al. Can intra-aggregate pore structures affect the aggregate's effectiveness in protecting carbon?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 868—875.
- [2] Papadopoulos A, Bird N R A, Whitmore A P, et al. Investigating the effects of organic and conventional management on soil aggregate stability using X-ray computed tomography[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60 (3): 360—368.
- [3] Pituello C, dal Ferro N, Simonetti G, et al. Nano to macro pore structure changes induced by long-term residue management in three different soils[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 217: 49—58.
- [4] Kravchenko A, Chun H C, Mazer M, et al. Relationships between intra-aggregate pore structures and distributions of *Escherichia coli* within soil macro-aggregates[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 63: 134—142.
- [5] Nunan N, Ritz K, Rivers M, et al. Investigating microbial micro-habitat structure using X-ray computed tomography[J]. *Geoderma*, 2006, 133 (3/4): 398—407.
- [6] Yu X, Fu Y, Lu S. Characterization of the pore structure and cementing substances of soil aggregates by a combination of synchrotron radiation X-ray micro-computed tomography and scanning electron microscopy[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68 (1): 66—79.
- [7] Yu X L, Peng G Y, Lu S G. Characterizing aggregate pore structure by X-ray micro-computed tomography and a network model[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018, 82 (4): 744—756.
- [8] Helliwell J R, Sturrock C J, Grayling K M, et al. Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64 (3): 279—297.
- [9] He X B, Feng H, Feng Z D. 3d imaging of soil microstructure using synchrotron X-ray computed

- microtomography[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (2): 328—330. [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[J]. 土壤学报, 2005, 42 (2): 328—330.]
- [10] Zhou H, Li W Z, Zhang Z B, et al. Characterization of multi-scale soil structure with X-ray computed tomography[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (6): 1226—1230. [周虎, 李文昭, 张中彬, 等. 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构[J]. 土壤学报, 2013, 50 (6): 1226—1230.]
- [11] Li W Z, Zhou H, Chen X M, et al. Characterization of aggregate microstructures of paddy soils under different patterns of fertilization with synchrotron radiation micro-CT[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 67—74. [李文昭, 周虎, 陈效民, 等. 基于同步辐射显微 CT 研究不同施肥措施下水稻土团聚体微结构特征[J]. 土壤学报, 2014, 51 (1): 67—74.]
- [12] Zhou H, Peng X H, Perfect E, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography[J]. *Geoderma*, 2013, 195/196: 23—30.
- [13] dal Ferro N, Delmas P, Duwig C, et al. Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilisation treatments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 119: 13—21.
- [14] Kravchenko A N, Wang A N W, Smucker A J M, et al. Long-term differences in tillage and land use affect intra-aggregate pore heterogeneity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75 (5): 1658—1666.
- [15] Peth S, Horn R, Beckmann F, et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (4): 897—907.
- [16] Zhou H, Peng X, Peth S, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 17—23.
- [17] Wang W, Kravchenko A N, Smucker A J M, et al. Intra-aggregate pore characteristics: X-ray computed microtomography analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76 (4): 1159—1171.
- [18] Zhao D, Xu M X, Liu G B, et al. Characterization of soil aggregate microstructure under different revegetation types using micro-computed tomography[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32 (9): 123—129. [赵冬, 许明祥, 刘国彬, 等. 用显微 CT 研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (9): 123—129.]
- [19] Zong Y T, Yu X L, Zhu M X, et al. Characterizing soil pore structure using nitrogen adsorption, mercury intrusion porosimetry, and synchrotron-radiation-based X-ray computed microtomography techniques[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15 (2): 302—312.
- [20] Zhou H, Peng X H, Zhang Z B, et al. Characterization of aggregate microstructure of paddy soils cultivated for different years with synchrotron based micro-CT[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27 (12): 343—347. [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[J]. 农业工程学报, 2011, 27 (12): 343—347.]

(责任编辑: 檀满枝)