

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*

李文昭^{1,2} 周 虎² 陈效民^{1†} 彭新华^{2†} 余喜初³

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 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)

(3 江西省红壤研究所, 江西进贤 331717)

摘 要 基于江西进贤长期定位试验田, 采用上海光源的生物成像线站显微 CT 技术扫描 3~5 mm 土壤团聚体, 获得分辨率为 3.7 μm 的切片图像, 并运用 3DMA_Rock 软件进行数字图像处理, 构建孔喉网络模型, 定量研究了不同施肥条件下(不施肥 CK、施氮磷钾肥 NPK、施氮磷钾肥和猪粪 NPKOM)红壤性水稻土团聚体的三维微结构特征。结果表明: 与 CK 处理相比, NPK 处理的土壤孔隙度、比表面积、孔喉数量和平均路径长度等指标值分别下降了 31.6%、28.8%、15.1% 和 12.6%, 说明长期单施无机肥可导致土壤团聚体结构退化; 而 NPKOM 处理则显著增加了以上的指标值(分别增加了 77.6%、68.4%、182.8% 和 14.4%), 说明长期无机有机肥配施能改善土壤团聚体的微结构, 促进土壤团聚体的形成和稳定, 使土壤保持良好的通透功能, 提高土壤的肥力质量。

关键词 显微 CT; 长期施肥; 团聚体; 微结构; 孔隙

中图分类号 S152.4 **文献标识码** A

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 在土壤中发挥着调节“水、肥、气、热”、改善生物活性和保持疏松土层的重要作用, 是评价土壤肥力的重要指标之一^[1-2]。土壤矿物颗粒在有机质和三、氧化物等胶结物质作用下形成微团聚体, 同时在单个土壤矿物颗粒之间产生微小的孔隙; 在生物和物理因素的作用下, 微团聚体进一步形成大团聚体, 同时在微团聚体之间产生更多的孔隙^[3-5]。因此, 团聚体结构反映了土壤的团聚过程, 也决定了团聚体内部各种物理、化学和生物学过程。

过去对土壤团聚体结构的研究主要集中于其稳定性(水稳定性, 力稳定性)方面, 由于研究方法的限制, 对团聚体结构的直接研究较少。近年来, 断层射线扫描(computed tomography, CT)技术开始广泛应用于土壤科学研究中, 结合数字图像处理技术可以定量研究土壤结构^[6-8]。国内外很多学者利用 CT 技术对土壤的孔隙结构、孔隙大小分布及其与优先流关系等方面进行了大量的研究^[9-13]。相比于普通的医用 CT, 显微 CT 技术拥有获取快速、成像

对比度强、分辨率高的优点, 能够捕获到更多的细节特征, 因而更适用于团聚体尺度微结构的研究。Wildenschild 等^[14]、Peth 等^[15] 和 Zhou 等^[16] 学者利用显微 CT 来研究团聚体的微结构, 进一步揭示了土壤微结构与土壤团聚体形成等物理过程之间的关系。

相关研究表明, 不同施肥条件会改变土壤结构以及影响土壤团聚体的稳定性^[17-19]。赖庆旺等^[18] 发现长期偏施化肥导致水稻土板结, 而有机肥能显著提高土壤团聚体的稳定性^[17-18]。但是对长期不同施肥措施下水稻田团聚体微结构的特征尚缺乏了解。本研究基于长期定位施肥试验, 利用同步辐射显微 CT(SR μ -CT)和图像分析技术研究了红壤性水稻土团聚体的三维微结构特征, 试图阐明不同施肥措施对团聚体结构的影响。

1 材料与方法

1.1 试验点与试验设计

采样地点位于江西省进贤红壤研究所(116°20'E,

* “十二五”国家科技支撑项目(2011BAD31B04)、国家自然科学基金项目(41101200, 41171180)、中国科学院知识创新项目(SSASIP1111)和中国科学院“百人计划”资助

† 通讯作者, E-mail: xmchen@njau.edu.cn; xhpeng@issas.ac.cn

作者简介: 李文昭(1988—), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从水土资源利用与管理研究。E-mail: wzli@issas.ac.cn

收稿日期: 2013-07-16; 收到修改稿日期: 2013-10-28

28°15'N),属于中亚热带季风气候,年均降雨量为 1 537 mm,年蒸发量为 1 100 mm,年均气温为 17.7 °C。供试土壤为水耕人为土,质地为黏壤土,母质为第四纪红黏土。该长期定位试验始于 1981 年,轮作制度为“稻—稻—冬闲”制。试验包括 3 个处理:(1) CK(不施肥);(2) NPK(施氮磷钾肥);(3) NPKOM(施氮磷钾肥和猪粪处理)。肥料种类是尿素、钙镁磷肥、氯化钾和新鲜猪粪,其中磷肥、钾肥和猪粪作为基肥,氮肥用量的 2/3 为基肥,1/3 为追肥。肥料分两季施用,每季施肥量为 N:90 kg hm⁻², P:20 kg hm⁻², K:62 kg hm⁻²,猪粪:22.5 Mg hm⁻²。小区面积为 46.67 m²,随机区组排列,3 次重复。

1.2 样品采集与测定

采集表层(0~10 cm)的混合土样,带回实验室自然风干。将部分风干土样依次通过 5 mm 筛和 3 mm 筛后获取 3~5 mm 团聚体,每个小区随机选择 3 个直径 3~5 mm 大小的团聚体,放置 40 °C 烘箱中 24 h 后,在 CT 扫描前置于 4 °C 冰箱中保存。其余风干土样用于土壤基本理化性质的测定,有关项目测定均按常规方法^[20]进行:有机碳:H₂SO₄-K₂Cr₂O₇外加热法;全氮:半微量凯氏定氮法;全磷:氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法;全钾:氢氧化钠碱熔—火焰光度法;pH:电位法(H₂O,1:2.5);土壤阳离子交换量(CEC):乙酸铵法;黏粒含量:吸管法;团聚体稳定性:Le Bissonais(1996)法^[21],快速湿润处理,筛分后计算平均重量直径(MWD)。

1.3 CT 扫描与图像重建

团聚体样品 CT 扫描在上海光源生物成像线站(BL13W1)完成,每小区随机选择三个样品进行扫描。扫描参数设置为:光子能量 24 keV,分辨率 3.7

μm,曝光时间为 1.5 s,样品台与探测器距离为 3 cm。样品台水平方向从 0 到 180° 匀速旋转,共采集 720 幅投影图像。然后利用上海光源 CT Program 软件进行图像重建,采用背投影算法重建获得约 800 张大小为 1 049 × 1 049 像素的 32 位 tiff 格式的灰度图像,再将其转存为 8 位 tiff 格式的灰度图像,灰度值范围为 0~255。

1.4 图像处理

将重建后的切片图像进行初步的处理:(1)亮度归一化:利用 ImageJ 软件中的 Normalize 命令进行图像间亮度归一化处理。(2)去除伪影:利用 MATLAB 编写的程序去除环形伪影^[22]。主要包括笛卡尔坐标转换为极坐标、傅里叶变换、滤波、傅里叶逆变换和极坐标转换到笛卡尔坐标等步骤。(3)选定感兴趣区域(Region of Interest, ROI):利用 ImageJ 软件选取样品中部的 500 × 500 × 500 体元进行分析,该部分大小为 1.85 mm × 1.85 mm × 1.85 mm。

利用 3DMA-Rock 软件完成图像分割和土壤孔隙形态学参数分析。首先,采用克里格法进行图像的二值化。克里格法是基于图像灰度空间相关分析的局部阈值化方法,首先根据目视选取 T0 和 T1 两个阈值,灰度值低于 T0 和高于 T1 的像素分别转化为 0 和 1,灰度值在 T0 和 T1 之间的像素则计算它们与相邻像素间的半方差函数,进而确定其分割值^[22]。然后,利用数学形态学方法提取三维孔隙结构的骨架,构建孔隙网络模型,进而统计表征孔隙结构的特征参数,包括孔隙的数目、体积、比表面积、路径长度、孔喉表面积、有效孔喉半径比和喉部数量等。构建孔喉网络模型的具体操作如图 1 所示:

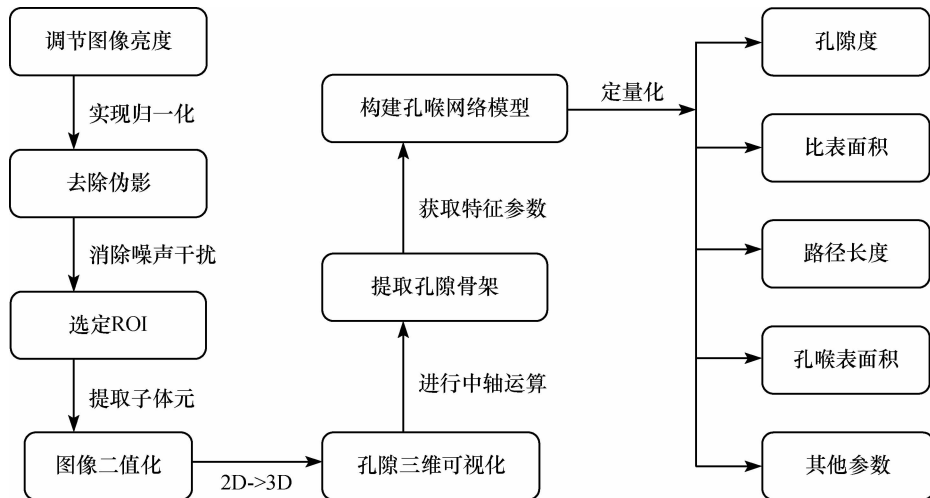


图 1 孔喉网络模型构建流程图

Fig. 1 Flowchart of construction of the pore-throat network model

1.5 统计分析

采用 SPSS13.0 统计分析软件对图像处理后得到的参数进行统计分析。方差分析采用 One-Way ANOVA,并用 LSD 法进行多重比较,显著性水平为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质

不同施肥处理土壤的部分基本理化性质见表 1。经过 32 年的长期施肥,与 CK 处理相比,单施无机肥(NPK)的土壤 pH 有所下降,但没有显著性差

异($p > 0.05$);有机碳和氮磷钾等土壤养分含量也同样差异不显著。长期有机无机肥配施(NPKOM)显著地提高了土壤有机碳、全氮和全磷含量,并有效地抑制了土壤酸化,与他人研究结果基本一致^[17,23]。在三个施肥处理中,MWD 值大小为 NPKOM > CK > NPK。平均重量直径(MWD)值越大,说明团聚体稳定性较好。可见,单施无机肥(NPK)土壤团聚体的稳定性与 CK 处理没有显著差异,而 NPKOM 提高了团聚体稳定性,原因是 NPKOM 处理提高了有机质含量,土壤有机质的增加促进了团聚体的形成与稳定^[24]。

表 1 不同施肥处理水稻土基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of the paddy soil as affected by different patterns of long-term fertilization

处理 Treatment	pH	有机碳 SOC (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC (cmol kg ⁻¹)	黏粒 Clay (g kg ⁻¹)	平均重量直径 MWD (mm)
CK	5.20ab	20.1b	2.05b	0.54b	11.09a	8.42b	250.5a	0.86a
NPK	5.14b	20.0b	2.05b	0.58b	10.95ab	10.17a	258.5a	0.81a
NPKOM	5.38a	25.7a	2.52a	1.27a	10.75b	11.75a	240.0a	0.96a

注:同一列中不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$,LSD) Note: The different lowercase letters within the same column mean significant differences at 0.05 level

2.2 土壤孔隙形态特征目视分析

图 2 是 CK、NPK 和 NPKOM 处理的水稻土团聚体的二维和三维结构图。其中,灰度图像大小为 500 × 500 体元。进行阈值分割后,得到二值图像,图中白色部分代表孔隙,黑色部分代表土壤基质(图 2)。从灰度图像和二值图像中可以观察到,与 CK 处理相比,NPK 处理孔隙的数量明显减少,土壤结构比较致密,而 NPKOM 处理的团聚体孔隙数量较多,且存在更多的细长的大孔隙。如三维孔隙结构图所示,NPK 处理的团聚体内部的孔隙较少,而 NPKOM 处理的团聚体孔隙数量最多,分布均匀,呈现明显的复杂多孔结构。因此,长期单施无机肥(NPK)导致土壤孔隙减少,土壤板结,与赖庆旺等^[19]得出的结果相似。而有机无机肥配施则有利于得到疏松多孔的土壤结构。Haynes 和 Naidu^[25]也报道了施用 NH₄⁺和 K⁺肥料不利于土壤团聚体形成,认为一价的 NH₄⁺和 K⁺促进了土壤胶体分散,从而导致土壤结构恶化,降低入渗和水分运动。

2.3 孔隙结构特征定量分析

2.3.1 孔隙的基本特征 本试验使用显微 CT 扫描图像的分辨率设置为 3.7 μm,因此,本文仅对

大于 3.7 μm 的孔隙进行分析。水稻土团聚体孔隙的基本特征如表 2 所示。其中,土壤团聚体的比表面积是表征土壤结构优劣的重要标志之一,比表面积的增大表明土壤团聚体结构的改善^[26],与 CK 相比,NPK 处理的比表面积有所减少,NPKOM 处理的比表面积显著高于其他处理。从土壤孔隙状况的连通性来看,路径数量,即孔隙空间中连接两点的独立路径的个数,在三个处理中存在显著差异,NPKOM 处理的路径数量最多,达到 51 907 个,表明该处理的连通性较好,有利于水分和溶质的交换,而 NPK 处理的值最低,其连通性最差。同时,弯曲度能反映单一孔隙路径的复杂程度,本研究不同施肥处理水稻土团聚体的平均孔隙弯曲度值均在 2.0 左右,Zhou 等^[16]研究表明在旱地红壤中 NPKOM 处理的弯曲度值较大,与本研究中的结果相似,说明由于有机无机配施处理下土壤团聚体中存在较多的不规则的孔隙。

2.3.2 孔隙度及孔隙大小分布 不同施肥处理的土壤团聚体孔隙分布如图 3 所示,NPKOM 处理的土壤团聚体累积孔隙度(孔隙度)为 4.05%,显著高于 CK 处理(2.28%)和 NPK 处理(1.56%)。与其

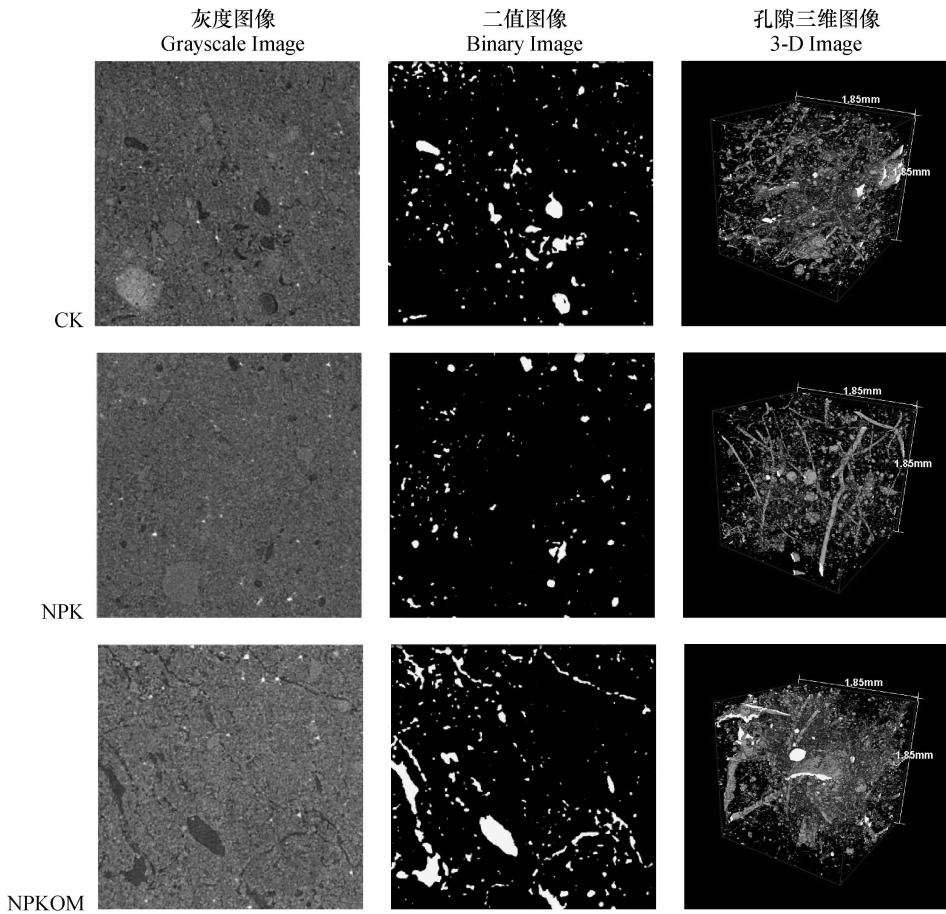


图2 不同施肥处理水稻土团聚体的二维和三维特征

Fig. 2 2-D and 3-D characteristics of paddy soil aggregates under different patterns of long-term fertilization

表2 不同施肥处理水稻土团聚体孔隙结构

Table 2 Characteristics of aggregate pore structure in paddy soil as affected by different patterns of long-term fertilization

处理 Treatment	孔隙度 ^①	比表面积 ^②	孔喉数量 ^③	孔隙数量 ^④	路径数量 ^⑤	平均路径长度 ^⑥	平均孔隙 弯曲度 ^⑦
CK	2.28b	8.91b	2 866b	24 317b	33 969b	5.54ab	1.81a
NPK	1.56b	6.34b	2 434b	20 414b	25 812c	4.84b	1.80a
NPKOM	4.05a	15.00a	8 105a	33 204a	51 907a	6.34a	2.13a

注:同一行中不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$, LSD) Note: The different lowercase letters within the same row mean significant differences at 0.05 level. ①Porosity (%) ($\geq 3.7 \mu\text{m}$), ②Specific surface area (μm^{-1}), ③Total number of throats, ④Total number of pores, ⑤Number of paths, ⑥Average path length (μm), ⑦Average tortuosity of pores

他研究^[27]相比,本研究中显微CT设置的分辨率($3.7 \mu\text{m}$)较高,能够获取更多的图像细节,从而更真实地分辨出团聚体较小的孔隙。从孔隙大小分布规律来看,当量孔径 $< 230 \mu\text{m}$ 的孔隙度高低顺序为:NPKOM $>$ CK $>$ NPK,这与累积孔隙度的趋势是一致的,而在当量孔径 $> 230 \mu\text{m}$ 级别处,NPK处理已无大孔隙分布,CK处理还存在少量的大孔

隙,NPKOM处理在 $230 \sim 360 \mu\text{m}$ 内均有连续分布。说明仅施无机肥导致土壤大孔隙减少。三种施肥处理的土壤团聚体孔隙均集中分布在 $0 \sim 75 \mu\text{m}$ 孔径范围内,基本均呈现出较明显的单峰分布,且均在当量孔径 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 处达到峰值,这与Peth^[15]和Ferro^[28]等的研究结果接近,其孔隙大小也为单峰分布,孔隙数量集中分布在 $0 \sim 50 \mu\text{m}$ 。

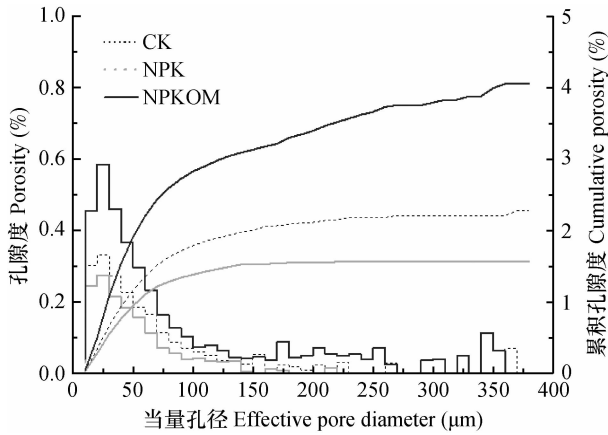


图3 不同施肥处理水稻土团聚体孔隙大小分布及累积孔隙度

Fig. 3 Pore size distribution and cumulative porosity of aggregates in paddy soils under different patterns of long-term fertilization

将孔隙按照当量直径进行分类,国内外尚缺乏共同的标准,但也有若干类同之处,一般将当量直径 $>100 \mu\text{m}$ 定义为大孔隙(通气孔隙或非毛管孔隙),而当量孔径为 $30 \sim 100 \mu\text{m}$ 的孔隙划分为毛管孔隙(传导孔隙),当量孔径 $<30 \mu\text{m}$ 的孔隙定义为贮存孔隙(包括极细的束缚水占孔隙)^[29]。且在本研究中孔隙的当量孔径范围为 $3.7 \sim 360 \mu\text{m}$,包含了这三类的孔隙,并对孔隙做进一步的分类定量分析。

表3为不同施肥处理土壤团聚体的孔隙度分类。对于孔径 $>100 \mu\text{m}$ 的大孔隙,NPKOM处理中的大孔隙占总孔隙百分比最高为30.26%,显著高于CK处理和NPK处理,增加了土壤的通气性,提高了导水率。NPKOM处理中的大孔隙较多,土壤相对比较疏松,从而土壤的结构性也就越好。而孔径在 $30 \sim 100 \mu\text{m}$ 范围内的土壤毛管孔隙,其水分移动快,可持续快速地供应植物吸收利用^[29],表3中的毛管孔隙占总孔隙百分比大小为: $\text{NPK} > \text{CK} > \text{NPKOM}$ 。对于孔径 $<30 \mu\text{m}$ 的土壤孔隙,其水分移动较慢,不能充分地满足作物生长需要。而本研究中的NPK处理的百分比值最大,达到了35.13%,这可能受黏粒含量影响,黏粒含量越多发育的细小孔隙越多,而表1所示的NPK处理的黏粒含量最高为 258.5 g kg^{-1} 。但从总体上来看,有效孔隙(毛管孔隙与通气孔隙之和)占总孔隙百分比大小为: $\text{NPKOM} > \text{CK} > \text{NPK}$,它能很好地提供水分养分储存空间以满足作物生长的需要。

表3 不同施肥处理水稻土团聚体孔径分布

Table 3 Effective pore size distribution of aggregates in paddy soil as affected by different patterns of long-term fertilization

处理 Treatment	占总孔隙百分比 Percentage (%)		
	贮存孔隙 Storage pore ($<30 \mu\text{m}$)	毛管孔隙 Capillary pore ($30 \sim 100 \mu\text{m}$)	通气孔隙 Aeration pore ($>100 \mu\text{m}$)
CK	29.22b	49.22ab	21.56b
NPK	35.13a	53.34a	11.53c
NPKOM	26.60c	43.14b	30.26a

注:同一行中不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$, LSD) Note: The different lowercase letters within the same row mean significant differences at 0.05 level

2.3.3 路径长度 孔隙节点为多个孔隙的连接点。而路径长度表征的是沿中轴测量两相邻节点中心之间的距离。如图4所示,随着孔隙路径长度的增加,不同施肥处理的路径长度相对频率分布均呈指数下降的趋势,Lindquist等^[30]在研究砂岩时也得到了相同的下降趋势。三种施肥处理的路径长度主要分布在 $0 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间,均占到了95%以上。CK处理与NPKOM处理的最大路径长度分别达到 $244 \mu\text{m}$ 和 $269 \mu\text{m}$,而NPK处理的路径长度在大于 $350 \mu\text{m}$ 仍有分布,说明其土壤团聚体孔隙数量较少,分布较分散,且以水稻根系形成的连通性大孔隙为主,这与图2中NPK处理的三维结构图像一致。

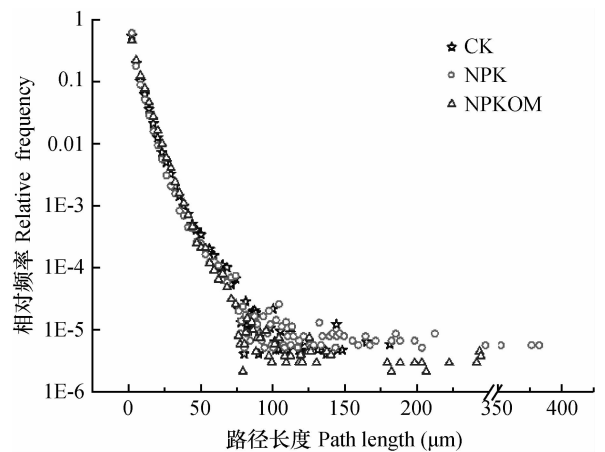
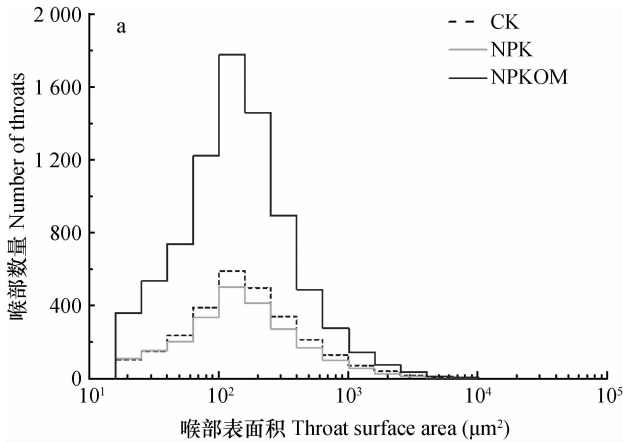


图4 不同施肥处理水稻土团聚体孔隙路径长度相对频率分布

Fig. 4 Relative frequency distribution of path length within aggregates in paddy soils under different patterns of long-term fertilization

2.3.4 孔喉 在孔喉网络模型中,孔喉是孔隙空间尺寸中最小(最窄)的部位,控制着水流速度,通常位于弯液面最小平均半径的部位,相应于最大毛管压力,因此孔喉是孔隙几何形状的重要特征之一,也是表征土壤孔隙结构内部连通性的重要指标。由图 5a 可知,三种施肥处理的孔喉表面积均呈对数正态分布,且在 $150 \mu\text{m}^2$ 左右出现最大值。有研究表明^[31],孔喉的表面积与喉部的渗透率成正相关关系,而孔喉表面积在整个区间内数量分布的大小顺序均为: NPKOM > CK > NPK,说明 NPKOM 处理较 CK 与 NPK 处理的孔隙颈部更宽,从而导水



率更高,其通透性能更好。从图 5b 可知,在整个区间内,不同处理间的有效喉孔半径比数量总体分布趋势与图 5a 一致,均为 NPKOM > CK > NPK。随着有效喉孔半径比值的增大,其数量在 <0.5 区间内均呈现一个急速增长的趋势,并在 0.3~0.5 区间内达到最大值,且 NPKOM 处理的数量达到了 CK 与 NPK 处理的 3 倍左右。说明当有效喉孔半径比值达到 0.3~0.5 区间时,团聚体内部孔隙的渗透率达到了最佳状态,即有利于孔隙之间空气和溶质的转移和交换,又有助于土壤保水保肥。

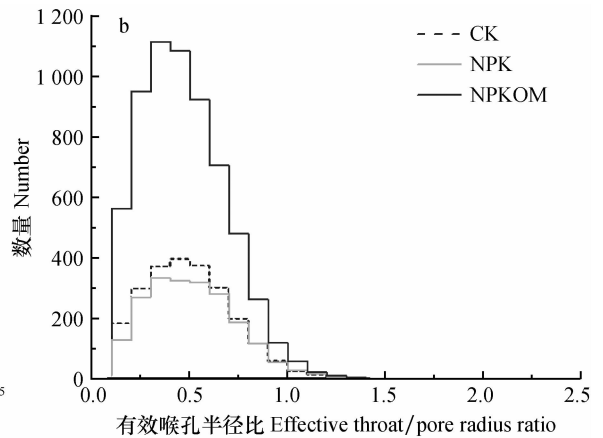


图 5 不同施肥处理水稻土团聚体孔喉表面积和有效喉孔半径比数量分布

Fig. 5 Distribution of throat surface area and effective throat/pore radius ratio of soil aggregates in paddy soils under different patterns of long-term fertilization

3 结论

有机无机肥配施(NPKOM)除了提高土壤有机碳、全氮、全磷含量外,还能有效抑制土壤酸化,显著增加土壤团聚体的孔隙度、比表面积、孔喉数量、孔隙数量、路径数量、平均路径长度和有效孔隙所占总孔隙百分比等指标值。与不施肥处理(CK)相比,单施无机肥(NPK)降低了相关指标值,但没有显著差异。说明长期单施无机肥会导致土壤团聚体结构退化,而有机无机肥配施则能有效地改善土壤团聚体的微结构,形成复杂多孔的结构,促进土壤团聚体的形成和稳定,使土壤既有良好的通透功能,又能更好地保水保肥,提高土壤肥力质量。

参考文献

[1] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. 土壤通报, 2005, 36(3): 415—421. Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing

factors (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 415—421

[2] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340—347. Qi Y C, Wang Y Q, Liu J, et al. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 340—347

[3] 彭新华,张斌,赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展. 土壤学报, 2004, 41(4): 618—623. Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618—623

[4] Edwards A P, Brenner J M. Dispersion of soil particles by sonic vibration. Journal of Soil Science, 1967, 18: 47—63

[5] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 1982, 33: 141—163

[6] 程亚南,刘建立,吕菲,等. 基于 CT 图像的土壤孔隙结构三维重建及水力学性质预测. 农业工程学报, 2012, 28(22): 115—122. Cheng Y N, Liu J L, Lü F, et al. Three-dimensional reconstruction of soil pore structure and prediction of

- soil hydraulic properties based on CT images (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 115—122
- [7] 吕菲, 刘建立, 张佳宝, 等. 利用随机网络模型和 CT 数字图像预测近饱和土壤水分特征曲线. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 18—21. Lü F, Liu J L, Zhang J B, et al. Prediction of near saturated soil water retention curve using CT images and random network model (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 18—21
- [8] 李德成, Velde B, 张桃林. 利用土壤的序列数字图像技术研究孔隙小尺度特征. 土壤学报, 2003, 40(4): 524—528. Li D C, Velde B, Zhang T L. Study on soil pore characteristics on small scale by using techniques of serial digital images (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4): 524—528
- [9] 冯杰, 于纪玉. 利用 CT 扫描技术确定土壤大孔隙分形维数. 灌溉排水学报, 2005, 24(4): 26—28. Feng J, Yu J Y. Determination fractal dimension of soil macropore using computed tomography (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(4): 26—28
- [10] 何娟, 刘建立, 吕菲. 基于 CT 数字图像的土壤孔隙分形特征研究. 土壤, 2008, 40(4): 662—666. He J, Liu J L, Lü F. Characterizing fractal characteristics of soil pores based on high-resolution digital CT images (In Chinese). Soils, 2008, 40(4): 662—666
- [11] 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(3): 134—137. Li D C, Li Z P, Velde B, et al. Image analysis of pore structures of paddy soils developed on red soils under cultivation for different years (In Chinese). Soils, 2002, 34(3): 134—137
- [12] Velde B. Surface cracking and aggregate formation observed in a Rendzina soil, La Touche (Vienne) France. Geoderma, 2001, 99(3/4): 261—276
- [13] 周虎, 李文昭, 张中彬, 等. 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构. 土壤学报, 2013, 50(6): 159—163. Zhou H, Li W Z, Zhang Z B, et al. Characterization of multi-scale soil structure with X-Ray computed tomography (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(6): 159—163
- [14] Wildenschild D, Vaz C M P, Rivers M L, et al. Using X-ray computed tomography in hydrology: Systems, resolutions, and limitations. Journal of Hydrology, 2002, 267(3): 285—297
- [15] Peth S, Horn R, Beckmann F, et al. Three dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72: 897—907
- [16] Zhou H, Peng X H, Edmund P, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography. Geoderma, 2013, 195: 23—30
- [17] 黄欠如, 胡锋, 袁颖红, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体特征的影响. 土壤, 2007, 39(4): 608—613. Huang Q R, Hu F, Yuan Y H, et al. Effects of long-term fertilization on aggregates characteristic of red paddy soil (In Chinese). Soils, 2007, 39(4): 608—613
- [18] 李江涛, 张斌, 彭新华, 等. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机物形成及团聚体稳定性的影响. 土壤学报, 2004, 41(6): 912—917. Li J T, Zhang B, Peng X H, et al. Effects of fertilization on particulate organic matter formation and aggregate stability in paddy soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(6): 912—917
- [19] 赖庆旺, 李茶苟, 黄庆海. 红壤性水稻土无机肥连施与土壤结构特性的研究. 土壤学报, 1992, 29(2): 168—174. Lai Q W, Li C G, Huang Q H. Effect of continuous application of inorganic fertilizer on soil structure properties of paddy soil derived from red soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(2): 168—174
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [21] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. European Journal of Soil Science, 1996, 47: 425—428
- [22] 周虎, 彭新华, 张中彬, 等. 基于同步辐射显微 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. 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 (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 343—347
- [23] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机碳动态变化的影响. 土壤, 2008, 40(2): 237—242. Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, et al. Effects of long-term fertilization on dynamics of soil organic carbon in red paddy soil (In Chinese). Soils, 2008, 40(2): 237—242
- [24] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research, 2004, 79: 7—31
- [25] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure application on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 51: 123—137
- [26] 李庆远. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992: 1—514. Li Q K. Paddy soils of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1992: 1—514
- [27] 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. Wu H S, Chen X M, Chen C. Study on macropore in main paddy soils in Tai-lake region with CT (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 175—178
- [28] 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. Soil and Tillage Research, 2012, 119: 13—21
- [29] 柳云龙, 施振香, 尹骏, 等. 旱地红壤与红壤性水稻土水分特性分析. 水土保持学报, 2009, 23(2): 232—235. Liu Y L, Shi Z X, Yi J, et al. Analysis of soil water characters between upland red soil and paddy soil (In Chinese). Journal of Soil and

Water Conservation, 2009, 23(2): 232—235

- [30] Lindquist W B, Venkatarangan A, Dunsmuir J, et al. Pore and throat size distribution measured from synchrotron X-ray tomographic images of Fontainebleau sandstones. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105B: 21508—21528

cal Research, 2000, 105B: 21508—21528

- [31] Prodanović M, Lindquist W B, Seright R S. 3D image-based characterization of fluid displacement in a Berea core. *Advances in Water Resources*, 2007, 30: 214—226

CHARACTERIZATION OF AGGREGATE MICROSTRUCTURES OF PADDY SOILS UNDER DIFFERENT PATTERNS OF FERTILIZATION WITH SYNCHROTRON RADIATION MICRO-CT

Li Wenzhao^{1,2} Zhou Hu² Chen Xiaomin^{1†} Peng Xinhua^{2†} Yu Xichu³

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

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

(3 Jiangxi Provincial Red Soil Research Institute, Jinxian, Jiangxi 331717, China)

Abstract In order to characterize 3-D microstructures of the soil aggregates in the paddy soil of a long-term fertilization experiment on red soil in Jinxian, Jiangxi Province, as affected by different patterns of fertilization (CK, NPK and NPKOM), soil aggregates, 3 ~ 5 mm in diameter, collected from the paddy soil, were scanned with a micro-CT scanner at the Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) for slice images, 3.7 μm in resolution, which were then processed with the 3DMA_Rock software into digital images for construction of a pore-throat network model. Results show that compared with CK, Treatment NPK decreased soil porosity, specific surface area, throat numbers, and average path length by 31.6%, 28.8%, 15.1% and 12.6%, respectively, while Treatment NPKOM increased them by 77.6%, 68.4%, 182.8% and 14.4%, respectively, demonstrating that long-term application of chemical fertilizer caused degradation of soil aggregate structure, whereas combined application of chemical fertilizer with organic manure significantly improved aggregate microstructure and promoted formation and stability of soil aggregates and the soil quality, thus keeping the soil in good aeration and permeability and building up soil fertility.

Key words Micro-CT; Long-term fertilization; Aggregate; Microstructure; Pore

(责任编辑:陈德明)