

长期施肥对华北农田褐土团聚体微结构与稳定性的影响

王伟鹏¹, 张 华²

(1. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006; 2. 山西省林业和草原工程总站, 太原 030012)

摘 要: 为定量分析不同施肥措施对华北农田褐土微观结构及稳定性的影响, 该研究依托长期定位施肥试验, 集成同步辐射显微 CT (SR- μ CT) 与图像处理技术对不施肥 (CK)、氮磷钾肥 (NPK) 和有机、无机配施 (OF) 三种处理土壤团聚体微结构及其稳定性进行定量分析, 结果表明: 经过 26 a 不同施肥处理, 研究区土壤孔隙微结构与稳定性产生了实质性变化, 其中长期 OF 处理土壤孔隙度、大孔隙率、狭长孔隙率、平均孔隙直径、平均弯曲度、孔喉平均表面积及平均质量直径等指标较 CK 处理分别提升了 23.84%、145.71%、21.43%、37.16%、21.3%、51.12% 和 59.26%, 表明长期 OF 处理显著改善了研究区土壤微结构, 提升了团聚体稳定性。长期 NPK 处理与 CK 处理土壤团聚体在微结构特征与稳定性方面相似, 但大孔隙 (等效直径 $\geq 500 \mu\text{m}$) 率均显著低于 OF 处理 ($P < 0.05$)。研究结果可为农业土壤质量评价与保护提供支撑。

关键词: 土壤; 施肥; 孔隙度; 土壤团聚体; 结构

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.009

中图分类号: S152

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0068-07

王伟鹏, 张华. 长期施肥对华北农田褐土团聚体微结构与稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 68-74.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.009 <http://www.tcsae.org>

Wang Weipeng, Zhang Hua. Effects of long-term fertilization on the microstructure and stability of cinnamon soil aggregates in cropland of North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 68-74. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.009 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

土壤团聚体作为组成土壤结构的基本单元, 其结构强烈地影响着水、气等溶质的运移与分布^[1-3], 也决定着土壤在连续体尺度上的各项生态功能^[4-6]。近年来, 关于非生物措施对于土壤团聚体孔隙微结构的影响, 尤其是不同施肥措施对农业土壤微结构与性质演变的定量研究已逐渐被越来越多的土壤学家所关注^[7-9]。由于真实土壤具有强烈的空间变异性且孔隙组成异常复杂, 土壤学家普遍基于“黑箱原理”开展土壤结构研究, 即借助孔隙率、孔径分布、渗透率等表征土壤结构, 但据此建立的结构体系只是某种结构属性的数量表达而非土壤结构本身, 因此该结构对于表征土壤水分、溶质及流体分布与具体运移途径的作用有限^[10]。为定量获取土壤微结构信息, 从本质上理解孔隙结构决定土壤复杂生态学功能的微观机制, 有学者采用土壤切片或医用 CT 等手段来观察和分析土壤孔隙结构, 但由于切片法在测定孔隙时对土壤结构有扰动, 因此只能获取二维尺度上的近似土壤结构。医用 CT 无损获取土壤孔隙三维结构, 但分辨率一般在毫米级别, 因此只能观察和分析土壤中的大孔隙^[11]。

近年来, 随着同步辐射技术的发展, 具有高分辨率、高性噪比等优点的显微 CT (SR- μ CT) 逐渐被用于土壤、

砂岩等多孔介质微结构的定量研究^[11]。Peth 等^[12]应用 SR- μ CT 及数字图像处理技术对土壤团聚体孔隙进行了无损三维扫描, 定量评价了不同利用模式下土壤团聚体微孔隙的几何与拓扑特征。祁迎春等^[13]通过 SR- μ CT 对关中地区菜地与农田土壤团聚体微结构进行了定量评价, 指出随着利用年限的增加, 土壤团聚体逐渐呈现出一定“疲劳”趋势。Zhou 等^[14-15]在利用 SR- μ CT 对不同植被恢复模式与生物扰动条件下的土壤微结构进行三维可视化分析, 定量阐释了土壤团聚体形成机制及其与土壤性质、环境功能间的相互关系。

综上, 借助 SR- μ CT 及图像处理技术研究不同利用模式下土壤微结构与及性质变异, 进而定量阐释土壤结构及性质对不同利用模式的响应机制, 尤其是长期不同施肥策略对农田土壤结构及稳定性影响的定量研究已逐渐成为当代土壤学研究热点^[9,11]。由于不同研究间土壤、肥料类型、作物类型和耕作方式等因素差异较大, 多数基于不同施肥背景下土壤结构的短期响应研究难以在学界形成共识, 也缺乏代表性意义。因此, 开展基于长期施肥定位试验的土壤微结构与性质的研究, 既能定量分析土壤微结构及性质对不同施肥策略响应的长期效应, 也有助于直观和定量阐释不同利用背景下土壤微结构演变影响土壤性质、质量及各项环境功能的核心作用机制。

本研究基于长期定位施肥试验, 以华北地区广泛分布的农业褐土为研究对象, 利用上海光源 SR- μ CT 及图像分析技术开展不同施肥背景下褐土土壤团聚体结构及性质演变分析, 旨在定量揭示不同施肥措施对褐土土壤团

收稿日期: 2022-03-29 修订日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41701245)

作者简介: 王伟鹏, 博士, 副教授, 研究方向为数字化土壤。

Email: Wpwang@sxu.edu.cn

聚体微结构的影响,明确不同施肥条件下褐土孔隙结构分异的长期效应,以期为华北地区农业土壤质量评价与保护提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点及田间处理

研究区位于山西省临汾市(111°65'80"E,36°02'21"N),土壤类型为褐土,质地为砂质壤土。当地为半干旱半湿润暖温带季风气候,年平均气温 12.6℃,多年平均降水量约 550~600 mm,其中 7—9 月份占 70%,年蒸发量为 1 875 mm。平均无霜期为 220 d。长期施肥定位试验始于 1992 年,作物耕种采用小麦-玉米轮作模式,小麦一般为每年 9 月底或 10 月初播种,次年 6 月中旬收获,小麦收获后种植玉米,玉米一般在 9 月底收获。小麦采用等行距条播方式种植,行距为 15 cm。玉米行距约 50 cm,株距为 25 cm。小麦与玉米均采用手工播种的简易作业方式,其中小麦播种前需进行人工翻地,翻耕深度为 20~22 cm。玉米种植前不翻耕,作物秸秆收割后不还田。试验包括 3 个处理:不施肥(CK);施氮磷钾肥(NPK);有机肥+氮磷钾肥(OF)。OF 处理有机肥由粉碎的小麦秸秆、大豆饼、棉籽饼按质量 100:40:45 的比例混合堆制发酵而成,堆肥发酵期约为 60 d。有机肥中碳、总氮、总磷、总钾含量分别为 450、50.2、10.5、18.5 g/kg。由于有机肥中磷钾含量低于常规化肥处理中磷钾肥的施用量,因此试验用无机磷钾肥补足到常规化肥处理的含量。氮肥分基肥和追肥两次施用:小麦季基施 60%,其余 40%作为追肥于小麦返青期施用;玉米季基施 40%,其余 60%作为追肥于玉米大喇叭口期施用。磷钾肥每季全部随氮肥基施。有机肥全部基施,无追施。土壤基施后进行翻耕,追肥采用地表撒施,追肥后进行灌溉。具体施肥量见表 1。不同处理小区面积为 45.5 m² (7.0 m×6.5 m),小区间呈随机区组排列,各处理 3 次重复。

表 1 不同处理的年施肥率(玉米/小麦)

Table 1 Annual fertilization rate of different treatments (maize/ wheat) (kg·hm⁻²)

处理组 Treatments	无机肥 Chemical fertilizer			有机肥 Organic fertilizer
	N	P	K	
不施肥 No fertilization (CK)	0/0	0/0	0/0	0/0
施氮磷钾肥 Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer (NPK)	100/100	30/30	90/90	0/0
有机肥+氮磷钾肥 Organic fertilizer + nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer (OF)	0/0	9.1/9.1	53.1/53.1	2 000.0/2 000.0

1.2 样品采集及制备

2018 年 6 月,结合研究区耕层厚度,用平铲在各小区表层(0~10 cm)范围内进行多点混合采样,每小区采集混合土样 2 kg。将土样带回实验室于阴凉处自然风干一周(含水率约为 2%~5%)。取风干土样依次通过 5 mm 筛与 3 mm 筛,其中混合土样随机选择 8 个直径约 3~5 mm 的团聚体,3 个用于 CT 扫描,其余 5 个用于团

聚体稳定性测试。为防止团聚体反复吸、失水及转移过程破裂,扫描前用保鲜膜对样品进行密封并置于 4℃冰箱进行保存。剩余风干土样用于土壤基本理化性质测定。pH 值用 pH 计以土水比 1:2.5 测定;土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)在加热的油浴锅中用重铬酸钾氧化法测定;土壤质地用移液管法测定;阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, CEC)用乙酸铵法测定;团聚体稳定性用 Le Bissonnais 法测定^[16]。团聚体稳定性用平均重量直径(MWD, mm)表示,计算方法如式(1):

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{d_{i-1} - d_i}{2} \cdot m_i \quad (1)$$

式中 d_i 为第 i 个筛网的孔径, $d_0=d_1$, $d_n=d_{n+1}$, mm; m_i 为第 i 个筛子上团聚体的质量分数; n 为筛子的数量。

1.3 CT 扫描与图像重建

样品扫描在上海光源同步辐射成像线站(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)完成。扫描参数为:光子能量 32 kV,分辨率 4 μm,曝光时间为 1.75 s,样品台与探测器距离为 5 cm。样品台沿水平方向进行 0~180°匀速转动,生成 720 幅 X 射线衰减图像。将扫描图像用 CT Program 软件进行图像重建,采用滤波背投影算法得到每个样本约 800 张大小为 1 049×1 049(像素)的 32 位 tiff 格式的灰度图像,再将其转换为 8 位 tiff 格式的灰度图像,灰度值范围为 0~255。

重建后切片图像的处理以及团聚体三维结构的可视化、量化利用 ImageJ1.48V 软件完成。为消除不同 CT 切片图像间亮度差别,首先利用 ImageJ 软件的 Normalize 命令对图像进行归一化处理。为了避免边界部分的影响,选取团聚体中间部分 500×500×500(体元)进行图像分析。对灰度图像的二值分割是土壤结构定量分析的关键,本研究采用自适应中值滤波算法进行图像二值切割,对于切割后的二值图像,使用 3-DMA-Rock 软件对土壤孔隙系统进行形态学参数分析^[17-18],最后统计孔隙结构参数,包括孔隙数量、等效直径、体积、长度、弯曲度、孔隙路径和形状系数等^[13],其中孔隙形状系数(F)计算方法^[19]如式(2)所示:

$$F = \frac{A_e}{A} \quad (2)$$

式中 A_e 为孔隙等体积球体的表面积; A 为孔隙的实测表面积。按孔隙形状系数将孔隙分为规则型($F \geq 0.5$)、不规则型($0.2 < F < 0.5$)和瘦长型($F \leq 0.2$)三类。孔隙形状系数反映土壤孔隙的自相似性与占据空间有效性,形状系数越大表明孔隙结构越复杂^[20]。本研究用孔隙通道路径长度与路径两端之间的线性距离之比来定义土壤孔隙的弯曲度。团聚体孔隙是指土壤团聚体孔隙通道空间尺寸最狭窄(瓶颈)部位。土壤孔隙路径长度用孔隙网络中任意两个相邻的孔隙节点的中心之间的距离表示^[8]。

1.4 分析方法

所有统计数据均在 SPSS25.0 中以 $\alpha=0.05$ 进行分析。结果表示为平均值±标准偏差。单因素方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)用于获得不同处理之间在团聚体稳定性和孔隙特征方面的显著差异,作图用 Origin 2017 完成。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理土壤基本理化性质和团聚体稳定性

长期不同施肥处理后的褐土基本理化性质见表 2。如表 2 所示,施用有机肥 26 a 后,相较于 CK 处理,OF 处理土壤 pH 值显著降低 ($P<0.05$), SOC 与 CEC 显著升高,与他人研究结果一致^[21-24]。NPK 处理也显著提升了土壤 SOC,但 pH 值和 CEC 与 CK 处理相比差异不显著。三个施肥处理中,土壤黏粒、粉粒和砂粒含量无显著差异,表明长期施肥对土壤质地无明显影响;MWD 作为团聚体稳定性指标,其值越大,表明团聚体稳定性越好。本研究中,OF 与 NPK 处理土壤团聚体 MWD 值分别较 CK 处理土壤高 59.26%与 16.67% (表 2),表明长期 OF 处理促进了土壤质量的提升,而土壤质量提升的基础是土壤结构的改善,结构良好的土壤有利于土壤各项功能的实现^[21]。Zhou 等^[14]利用 CT 技术研究不同利用年限的水稻土壤结构微特征,也得到类似的结果,即有机无机配施 (OF) 与无机 (NPK) 处理土壤团聚体 SOC 及 MWD 指标均优于对照处理 (CK) 土壤,原因在于 26 a 的 OF 与 NPK 处理均显著提升了土壤 SOC 与土壤团聚体稳定性,而 SOC 是农业土壤团聚体形成最主要的胶结物质,土壤中 SOC 的提升可促使更多微团聚体形成或微团聚体胶结成大团聚体,进而提升土壤结构稳定性^[25-26]。

2.2 不同施肥条件下土壤孔隙特征 CT 表征

图 1 为三个不同处理组土样的三维可视化图像,三维图像中白色和黑色像素分别代表孔隙和土壤基质。受 CT 扫描分辨率的限制,本研究只讨论大于 $4\ \mu\text{m}$ 的孔隙。从图 1 可以直观看出,与 CK 处理相比,OF 处理土壤孔隙网络更为疏松且存在更多细长的大孔隙。NPK 处理的土壤孔隙量较 CK 也有所增加,但增加量不及 OF 处理明显。结合表 3,经过长期不同施肥耕作,OF 处理土壤团聚体大孔隙 (当量孔径 $\geq 500\ \mu\text{m}$) 比例与总孔隙度显著增加但孔隙总量却显著降低,其中大孔隙比例与总孔隙度较 CK 处理分别增加了 145.71%与 23.84%,但孔隙量降低 8.88%,这与 Peth 等^[12]的研究结果接近,其研究涉及的长期有机施肥处理土壤也有类

似特征。NPK 处理土壤团聚体在大孔隙率、孔隙度及孔隙总量方面也有类似趋势,但差异较 CK 处理不显著。在孔隙形状方面,OF 处理团聚体狭长孔隙占比高达 85%,较 CK 处理高 21.43%,表明 OF 处理土壤孔隙结构更加复杂。NPK 与 CK 处理间无显著差异。李文昭等^[8]研究表明红壤性水稻土有机无机配施土壤中狭长孔隙占比较高,与本研究结果相似,表明 OF 处理可以促进土壤复杂孔隙形成。

表 2 土壤基本理化性质

表 2 Basic physical and chemical properties of soil

土壤性质 Soil properties	初始值 Initial soil	测定值 testing value		
		CK	NPK	OF
pH 值 pH value	8.65	8.73a	8.44ab	8.40b
SOC/(g·kg ⁻¹)	4.42	3.96c	5.86b	10.66a
CEC/(cmol·kg ⁻¹)	-	5.13b	6.01ab	6.55a
黏粒含量 Clay content/%	-	14.63a	14.48a	14.77a
粉粒含量 Silt content/%	-	27.53a	26.86a	26.64a
砂粒含量 Sand content/%	-	57.84a	58.66a	58.59a
MWD/mm	-	0.54c	0.63b	0.86a

注:不同小写字母代表不同处理间均值在 0.05 水平时有显著差异。下同。SOC: 土壤有机碳; CEC: 阳离子交换量; MWD: 平均重量直径。黏粒、粉粒、砂粒含量均为体积分数。

Note: Different lowercase letters mean significant differences between different treatments at 0.05 level. Same as below. SOC: soil organic carbon; CEC: cation exchange capacity; MWD: mean weight diameter. The content of clay, silt and sand is volume fraction.

图 2 为不同处理团聚体孔隙率分布情况,在等效直径 $<500\ \mu\text{m}$ 范围内,各处理土壤团聚体累积孔隙率从小到大依次为 CK、NPK、OF; 在等效直径 $\geq 500\ \mu\text{m}$ 范围内,OF 处理土壤团聚体累积孔隙率大于 NPK 处理与 CK 处理。结合表 3,相对于 CK 处理,长期 OF 处理对土壤团聚体中孔隙平均直径与大孔隙累积率的提升分别为 37.16%与 145.71%,表明 OF 处理对土壤团聚体大孔隙有明显的促进作用。综合孔隙率、累积孔隙率以及孔隙成像 (图 1) 结果可以推断,长期 OF 处理可以减少无效孔隙并促进大孔隙的形成,可能的原因是土壤有机质促进了土壤中小孔间的相互融合^[27-29]。

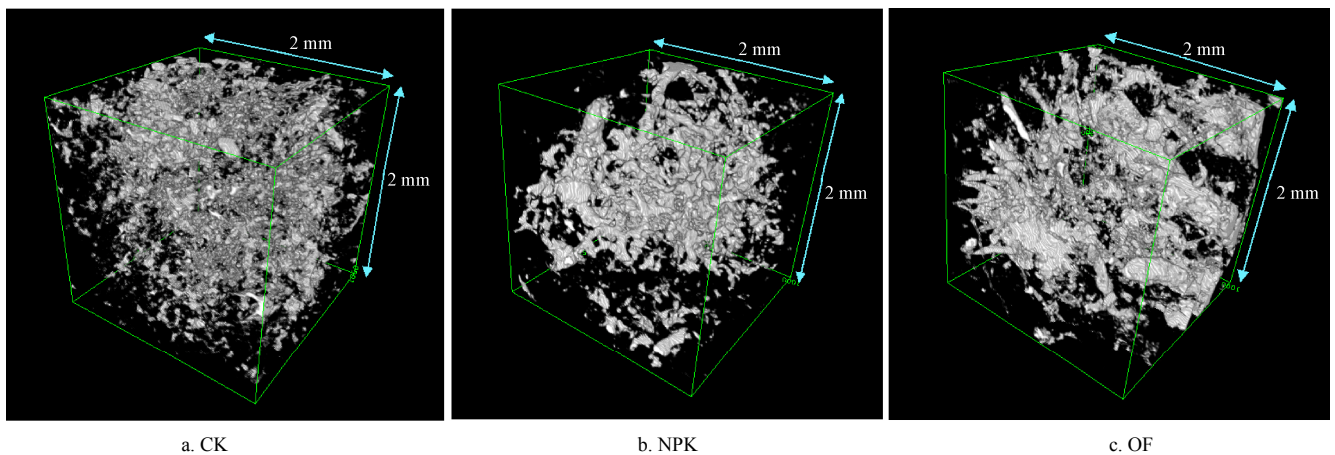


图 1 不同处理的土壤结构三维可视化图像

Fig.1 3D visualization images of soil structure with different treatments

表 3 不同处理土壤孔隙特性

Table 3 Soil pore characteristics with different fertilization treatments

孔隙特性 Pore characteristics	CK	NPK	OF
大孔隙率			
Macropores ($\geq 500\ \mu\text{m}$)/%	3.5c	5.3b	8.6 a
小孔隙率 Mesopores ($<500\ \mu\text{m}$)/%	11.6a	11.4ab	10.1b
总孔隙度 Total porosity/%	15.1b	16.7ab	18.7a
孔隙数量 Pore number	26 354a	24 850ab	24 015b
规则型孔隙比例			
Fraction of regular pores/%	19b	15ab	9a
不规则型孔隙比例			
Fraction of irregular pores/%	11b	9ab	6a
狭长型孔隙比例			
Fraction of elongated pores/%	70b	76ab	85a
路径数量 Path number	35 749b	28 698c	55 876a
平均孔隙直径			
Mean pore diameter/ μm	148c	172b	203a
平均孔隙弯曲度			
Mean pore tortuosity distribution	1.87c	1.93bc	2.27a
孔喉数量 Pore throat number	8 746a	4 425b	3 758c
平均孔喉表面积			
Mean pore throat surface/ μm^2	2 547c	3 158b	3 849a

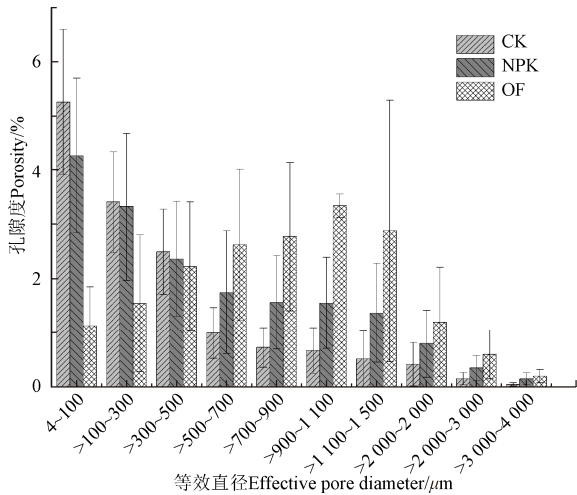


图 2 不同施肥处理土壤孔隙率分布
Fig. 2 Distribution of soil porosity with different fertilization treatments

2.3 不同施肥处理对土壤团聚体微结构特征的影响

2.3.1 对土壤团聚体孔隙弯曲度的影响

有研究表明，土壤导气率除了取决于大孔隙之外，还与土壤孔隙弯曲度密切相关^[30]。图 3 为不同施肥处理孔隙弯曲度分布情况，综合表 2 与图 3 可以得出，在弯曲度小于 2.0 的范围内，NPK 与 CK 处理团聚体各孔隙弯曲度的相对频率明显大于 OF 处理。在弯曲度大于等于 2.0 时，OF 处理团聚体各孔隙弯曲度的相对频率明显高于 NPK 与 CK 处理，且 OF、NPK 和 CK 处理的最大弯曲度分别为 4.4、3.0 和 2.9。Zhou 等^[14]研究也表明在旱地红壤中 OF 处理土壤具有最大的孔隙弯曲度。结合表 3，OF 处理土壤团聚体孔隙平均弯曲度较 CK 处理显著增加 21.3%，表明长期 OF 处理可以显著增加土壤孔隙弯曲度，进而提升土壤导气性，上述结果也有在一定程度上可以解释图 1 中 OF 处理土壤三维孔隙网

络较 CK 与 NPK 更为疏松与连续。此外，本研究中长期 NPK 处理土壤孔隙弯曲度指标与 CK 处理相比无明显差异。

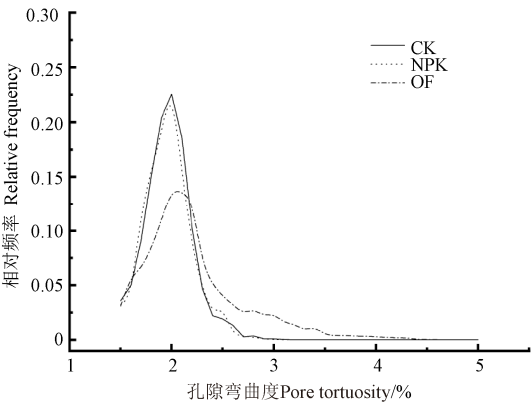


图 3 不同施肥处理弯曲度分布
Fig.3 Distribution of pore tortuosity with different fertilization treatments

2.3.2 对土壤团聚体孔喉的影响

过多的孔喉既影响土壤中水、气及溶质的运移与分布，又不利于植物根系的延伸与穿插。本研究不同处理土壤团聚体孔喉分布结果如图 4 所示，三种施肥处理的土壤孔喉的表面积分布总体呈偏正态分布，且三者都在 2 500~3 000 μm^2 左右出现最大值。结合图表 3 及图 4，OF、NPK 与 CK 处理土壤团聚体孔喉表面积平均值依次为：3 849、3 158、2 547 μm^2 。李文昭等^[8]研究也表明土壤渗透率与孔喉表面积呈正比，因此可推断 OF 与 NPK 处理显著提升了土壤渗透性。此外，长期 OF 与 NPK 处理在显著增加土壤团聚体孔喉平均表面积的同时（增幅分别为 51.12%与 23.99%），还显著降低了土壤中孔喉的数量（二者降幅分别为 57.03%与 49.41%），表明 OF 与 NPK 处理还明显降低了土壤孔隙中“瓶颈”的数量，表明 26 a 的 OF 与 NPK 处理提升了土壤渗透性，改善了土壤中水分与养分的运移条件。

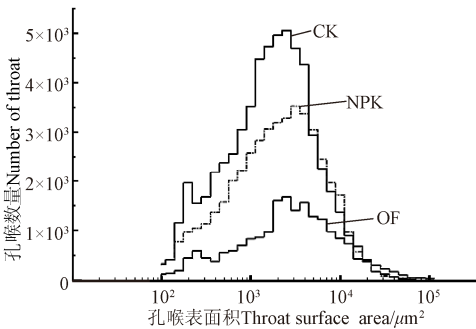


图 4 不同施肥处理孔喉分布
Fig.4 Distribution of pore throat with different fertilization treatments

2.3.3 对土壤团聚体孔隙路径长度的影响

孔隙的路径长度反映了孔隙的连续性，孔隙的连续性决定了土壤水分、溶质和气体的运移的难易程度。如图 5 所示，随着路径长度的增加，三种不同处理土壤孔

隙路径数量均呈现出先增加后减低的趋势, Dal 等^[20]在研究长期不同施肥影响土壤孔隙变化的研究中也得到了类似结果。三种处理的土壤团聚体路径长度主要分布在 40~200 μm 之间, 均占 80% 以上, 其中 NPK 与 CK 处理的最大路径长度分别为 369 与 287 μm , 而 OF 处理的团聚体在 >1 000 μm 范围仍有分布, 说明 OF 处理土壤孔隙分布相对分散, 长路径孔隙多, 且以作物根系生长形成的连通性长孔隙为主, 这与图 1 中 OF 处理土壤三维结构体系相一致。此外, NPK 处理土壤路径长度也有类似趋势, 但效果不及 OF 明显。结合表 3, CK、NPK 及 OF 处理团聚体孔隙路径平均长度依次为: 148、172、203 μm , 也表明长期 OF 处理土壤水、气及溶质连通性方面均优于 NPK 与 CK 处理。

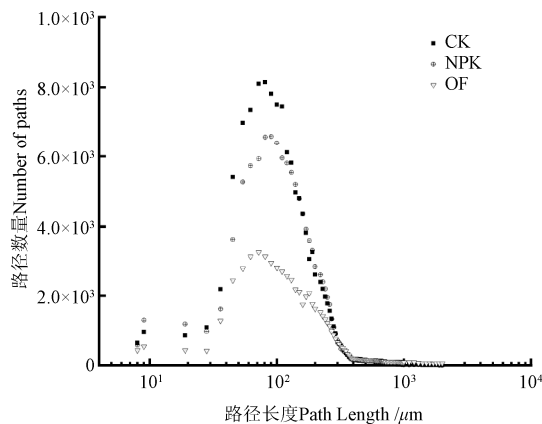


图 5 不同施肥处理孔隙路径长度

Fig.5 Distribution of path length with different fertilization treatments

3 结 论

本研究基于同步辐射显微 CT (SR- μ CT) 技术对不同施肥处理 26 a 后的土壤团聚体进行分析, 通过定性 (目测) 和定量 (形态定量) 分析, 得到结论如下:

1) 长期不同施肥处理背景下, 褐土孔隙结构产生了实质性的变化, 长期化肥配施有机肥 (OF) 处理在显著增加土壤 SOC 并改善土壤性质的同时, 也不同程度的促进了土壤团聚体微结构的改善。

2) OF 处理土壤团聚体孔隙度, 大孔隙率、狭长孔隙、平均孔隙直径、平均孔隙弯曲度、孔喉平均表面积等结构参数的显著增加, 各指标增幅依次为 23.84%、145.71%、21.43%、37.16%、21.3%和 51.12% ($P < 0.05$); OF 处理显著降低了土壤中孔隙与孔喉数量, 二者较 CK 处理降幅分别为 8.88%和 57.03%; OF 较 CK 处理土壤团聚体平均重量直径增加了 59.26%, 表明长期 OF 处理可显著提升土壤团聚体稳定性。

3) 长期施用氮磷钾肥 (NPK) 也在一定程度上促进了土壤结构的改善, 具体表现在大孔隙度、孔喉总数、孔喉表面积和平均孔径方面与 CK 处理差异明显。因此, 建议在研究区采用磷、钾化肥伴施有机肥的方式进行农业施肥管理。

需要强调的是, 尽管 SR- μ CT 技术在定量研究土壤微结构分异及演化方面潜力巨大, 但将其进行更广泛的土壤结构研究仍面临挑战。首先, 由于难以平衡 CT 图像分辨率与土壤样本尺寸间的综合需要, 大量基于小尺寸或低分辨率原状土壤样本的研究在预测大尺度土壤结构、功能及空间变异等问题时作用有限; 其次, CT 图像阈值选取方法在不同研究间存在争议, 目前普遍采用的全局阈值法、局部阈值法、区域生长法等方法还难以从本质上消除二元分割法的固有缺陷。为更准确、合理的获取土壤微结构信息, 需综合运用不同 CT 技术对多尺寸土壤样品进行跨分辨率扫描, 获取兼具精确性与代表性的土壤结构体系。

[参 考 文 献]

- [1] Lucas M, Vetterlein D, Vogel H-J, et al. Revealing pore connectivity across scales and resolutions with X-ray CT[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72: 546-560.
 - [2] Fukumasu J, Jarvis N, Koestel J, M, et al. Relations between soil organic carbon content and the pore size distribution for an arable topsoil with large variations in soil properties[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13212.
 - [3] Balseiro-Romero M, Mazurier, Monoshyn D, et al. Using X-ray microtomography to characterize the burrowing behaviour of earthworms in heterogeneously polluted soils[J]. *Pedobiologia*, 2020, 83: 150671.
 - [4] Néri A, Guignard J, Monnereau M, et al. Reevaluation of metal interconnectivity in a partially molten silicate matrix using 3D microtomography[J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 2020, 308: 106571.
 - [5] Budhathoki S, Lamba J, Srivastava P. et al. Temporal and spatial variability in 3D soil macropore characteristics determined using X-ray computed tomography[J]. *Soils Sediments*, 2022, 22: 1263-1277.
 - [6] Qiao J B, Liu X T, Zhu Y J, et al. Three-dimensional quantification of soil pore structure in wind-deposited loess under different vegetation types using industrial X-ray computed tomography[J]. *Catena*, 2021, 199: 12.
 - [7] Baveye P C, Wander M. The (bio)chemistry of soil humus and humic substances: Why is the "New View" still considered novel after more than 80 years? [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, 7: 27.
 - [8] 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.
- Li Wenzhao, Zhou Hu, Chen Xiaomin, 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. (in Chinese with English abstract)

- [9] Erktan A, Or D, Scheu S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107876.
- [10] Vogel H, Balseiro-Romero, M, Kravchenko A, et al. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13152.
- [11] Wang W P, Zhang Y F, Li H. Quantification of soil structure via synchrotron X-ray tomography after 22 years of fertilization[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(5): 2115-2127.
- [12] 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.
- [13] 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[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 340-347.
- Qi Yingchun, Wang Yiquan, Liu Jun, et al. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(1): 340-347. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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 & Tillage Research*, 2012, 124: 17-23.
- [15] Capowiez Y, Sammartino S, Michel E. Using X-ray tomography to quantify earthworm bioturbation non-destructively in repacked soil cores[J]. *Geoderma*, 2016, 162(1/2): 124-131.
- [16] Feng Y, Wang J M, Bai Z K, et al. Three-dimensional quantification of macropore networks of different compacted soils from opencast coal mine area using X-ray computed tomography[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104567.
- [17] Oh W, Lindquist B. Image thresholding by indicator kriging[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(7): 590-602.
- [18] 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.
- [19] Wadell H. Volume, shape, and roundness of rock particles[J]. *The Journal of Geology*, 1932: 443-451.
- [20] Dal Ferro N, Charrier P, Morari F. Dual scale micro-CT assessment of soil structure in a long-term fertilization experiment[J]. *Geoderma*, 2013, 204: 84-93.
- [21] Zhao B Z, Chen J, Zhang J B, et al. How different long-term fertilization strategies influence crop yield and soil properties in a maize field in the North China Plain[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176: 99-109.
- [22] Garbout A, Munkholm L J, Hansen S B. Tillage effects on top soil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 128: 104-109.
- [23] Luo Z, Wang E, Sun O J. Uncertain future soil carbon dynamics under global change predicted by models constrained by total carbon measurements[J]. *Ecological Applications*, 2017, 27(3): 1001-1009.
- [24] Hong C O, Kang J S, Shin H M, et al. Effect of Compost and Tillage on Soil Carbon Sequestration and Stability in Paddy Soil[J]. *Journal of Environmental Science International*, 2013, 22(11): 1509-1517.
- [25] Erktan A, Or D, Scheu S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107876.
- [26] Bilsborrow P, Cooper J, Tétard-Jones C, et al. The effect of organic and conventional management on the yield and quality of wheat grown in a long-term field trial[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 51: 71-80.
- [27] Balseiro-Romero M, Mazurier, Monoshyn D, et al. Using X-ray microtomography to characterize the burrowing behaviour of earthworms in heterogeneously polluted soils[J]. *Pedobiologia*, 2020, 83: 150671.
- [28] Néri A, Guignard J, Monnereau M, et al. Reevaluation of metal interconnectivity in a partially molten silicate matrix using 3D microtomography[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2020, 308: 106571.
- [29] 马祥华, 焦菊英, 白文娟. 黄土丘陵沟壑区退耕植被恢复地土壤水稳性团聚体的变化特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(3): 69-74.
- Ma Xianghua, Jiao Juying, Bai Wenjuan. The changes of soilwater-stable aggregates in abandoned lands during vegetation restoration in hilly and gully regions on the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(3): 69-74. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王卫华, 张志鹏. 基于土壤导气率的燥红土孔隙结构及弯曲连通性研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (2): 360-368.
- Wang Weihua, Zhang Zhipeng. Study on the dry red soil pore structure and pore tortuosity-connectivity based on soil air permeability[J]. *Acta Pedobiologia Sinica*, 2018, 55(2): 360-368. (in Chinese with English abstract)

Effects of long-term fertilization on the microstructure and stability of cinnamon soil aggregates in cropland of North China

Wang Weipeng¹, Zhang Hua²

(1. College of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Forestry and Grassland Engineering Station of Shanxi Province, Taiyuan 030012, China)

Abstract: Aggregates are the crucial building blocks to form the foundation of soil structure for better soil stability. Moreover, the pore structure of aggregates can pose a great impact on the transport and distribution of solutes and gases, particularly on bioactivity and hydraulic characteristics. Many biotic and abiotic factors can also influence the pore system of soil aggregates. It is difficult to detect the pore structure at the aggregate level so far. The abiotic measures can also be one of the most important steps to determine the soil pore structure in recent years. However, there is still a relatively large current controversy on the effects of different long-term fertilization on the soil microstructure characteristics (porosity, pore size distribution, and tortuosity) and stability, due mainly to the different types of soils, fertilizer, crops, and tillage. Fortunately, a variety of Computed Tomography (CT) techniques combined with image analysis can provide the three-dimensional (3D) distribution of porosity and pore size for better investigation of the 3D microstructure of soil aggregates. Synchrotron-based X-ray micro-CT (SR- μ CT) can be another excellent tool for the higher resolution, stronger contrast, and faster scanning speed during characterization. The objective of this study was to evaluate the impacts of long-term different patterns of fertilization (no fertilizer, inorganic fertilizer, and combination of organic and inorganic application) on the aggregate microstructure of the cinnamon soil aggregates in the cropland of North China using SR- μ CT measurements. The soil aggregates with diameters of approximately 3–5 mm were collected from the cinnamon soil with a long-term fertilization trial established in 1992. Three types of soil aggregate samples (3–5 mm) within 0.10 m soil profiles were selected from each site and then were scanned at 4 μ m voxel resolution with the Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). The 3D pore structure was constructed to quantify using the digital image analysis software ImageJ. The locally adaptive thresholding was employed to segment the sub volumes in ImageJ software, where the thresholds were chosen using visual observation. The sub volume of 500 \times 500 \times 500 (voxel) was extracted to reduce the edge artifacts for further morphological analysis. A systematic evaluation was made of the aggregate water stability and the soil properties. The results showed that there were substantial changes in the pore microstructure and stability of soil aggregates in the study area after 26 years of different soil fertilization treatments. Among them, the indexes of soil aggregate porosity, large porosity, narrow porosity, average pore diameter, average tortuosity, average surface area of pore throat, and Average Mass Diameter (MWD) increased by 23.84%, 145.71%, 21.43%, 37.16%, 21.3%, 51.12% and 59.26%, respectively, during the long-term chemical fertilizer combined with organic fertilizer (OF) treatment, compared with the no fertilizer (CK). It infers that the long-term OF treatment significantly improved the microstructure and stability of the OF soil aggregates. As such, the surface runoff was easily infiltrated into the ground to relieve the impact on the soil matrix, thus making the soil structure more stable. There were similar microstructural characteristics and stability OF soil aggregates under long-term chemical fertilizer (NPK) and CK treatment, but significantly different from that under OF treatment. The finding can greatly contribute to quantifying the structure of the unique soil in the North China Plain. The different effects of diverse long-term fertilization measures on soil structure can also provide strong support to the agricultural soil quality evaluation and protection.

Keywords: soils; fertilization; porosity; soil aggregates; structure