长期秸秆还田配施有机肥对土壤有机碳组分和孔隙结构的影响

温云杰[1,3]，张建诚[2,3※]，杨 娜[2,3]，王秀红[1,3]，史向远[3]，王娟玲[3]

（1. 山西农业大学山西有机旱作农业研究院，太原 030031；2. 山西农业大学棉花研究所，运城 044000；
3. 山西农业大学有机旱作农业国家重点实验室（筹），太原 030031）

摘 要：为探明长期施用有机肥和秸秆还田对土壤孔隙结构的影响，以及土壤有机碳与土壤孔隙结构之间的关系。该研究基于山西省运城市水头试验基地开展的 16 a 田间定位试验，设置单施化肥（F）、有机肥+化肥（MF）、秸秆还田+化肥（SF）以及有机肥+秸秆还田+化肥（MSF）4 个处理，分别对土壤孔隙结构、有机碳和其物理组分、土壤有机碳分子结构进行定量分析。结果表明：与 F 处理相比，其余有机物料处理均提高了土壤总孔隙度和>0.50 mm 孔径的孔隙度（P<0.05），以 MSF 处理最高。其中，MSF 处理的总孔隙度分别较 F、MF 和 SF 处理提高了 61.6%、23.0% 和 16.8%；对于>0.50 mm 孔径的孔隙度，MSF 处理分别较 F、MF 和 SF 处理提高了 66.2%、31.1% 和 13.5%；MF 和 MSF 处理的 0.20～0.50 mm 孔径的孔隙度显著高于 F 处理（P<0.05）；对于 0.06～0.20 mm 孔径的孔隙度，各处理间无显著差异（P>0.05）；并且与 F 处理相比，MSF 处理显著提高了土壤孔隙的连通性和复杂程度（P<0.05）。与 F 处理相比，有机肥和秸秆还田处理提高了土壤总有机碳、游离态颗粒态有机碳、闭蓄态颗粒有机碳以及矿物质结合态有机碳的含量，并有利于多糖和脂类有机碳的累积，其中均以 MSF 处理最高。相关分析表明，土壤总孔隙度、>0.50 mm 孔径的孔隙度、孔隙的连通性和复杂程度与土壤总有机碳和各有机碳组分含量以及多糖和脂肪类有机碳呈显著的正相关关系（P<0.05）。可见，秸秆还田配施有机肥提高了土壤有机碳含量，有利于脂肪和多糖类有机碳的累积，能够促进土壤孔隙形成，改善孔隙结构。

关键词：土壤；孔隙；有机碳；分子结构；CT 扫描
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.202403008
中图分类号：S152.4;S153.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-6819(2024)-21-0074-08

温云杰，张建诚，杨娜，等. 长期秸秆还田配施有机肥对土壤有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. **农业工程学报**，2024，40(21)：74-81. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403008 http://www.tcsae.org
WEN Yunjie, ZHANG Jiancheng, YANG Na, et al. Effects of the long-term application of organic fertilization and straw returning on the components of soil organic carbon and pores[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 74-81. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403008 http://www.tcsae.org

0 引 言

土壤孔隙是土体内部可以容纳水分和空气的空隙，是土壤物理结构的重要组成部分，是评价土壤质量和健康的重要指标之一[1-2]。土壤孔隙的数量、大小以及空间分布特征对土壤水分和养分的贮存与输运、气体的扩散与传输以及根系和菌丝在土壤空间的生长有着重要的影响[3]。因此，开展土壤孔隙结构的研究对于调节土壤水分状况、增加土壤肥力以及提高作物产量等方面具有重要意义。

土壤孔隙结构的形成主要受到土壤动物的活动、植物根系和菌丝的生长、农业机械作业、干湿交替等生物和非生物过程的影响[1]。其中农艺措施是影响土壤孔隙结构最直接的因素，它通过施肥、有机物料还田以及耕作等方式调控土壤孔隙结构。邱琛等[4]研究发现，长期的秸秆还田可以通过调控土壤孔隙结构和分布进而改善土壤的物理性质。同样，合理的有机肥施用可以显著改善耕作层土壤孔隙结构，增加其孔隙度，进而提升土壤的持水性能[5]。有机物还田主要通过提高土壤有机碳含量，改善土壤结构，进而增加土壤孔隙数量以及孔隙度[6-7]。相关研究表明，土壤有机碳含量与土壤总孔隙度和>50 μm 孔径的孔隙度存在显著的正相关关系[8-9]。这是因为一方面更大孔径的孔隙有利于空气流通、水分和养分供应，为微生物提供适宜的生长环境，进而促进有机物腐解形成更多的土壤有机碳[10]；另一方面有机碳作为有机胶结物质可以促进土壤颗粒团聚，提高土壤孔隙数量并维持其结构的稳定[5]。可见，有机碳在塑造土壤孔隙结构方面具有重要作用。

土壤有机碳按照物理分组法通常分为颗粒态有机碳和矿物质结合态有机碳[11-12]，颗粒态有机碳是未分解或半分解状态的有机残体，性质较为活跃，易被微生物分解利用；矿物质结合态有机碳是与土壤黏粒和粉粒矿物结合的有机碳，性质相对稳定[13]。并且，上述 2 种组分

收稿日期：2024-03-01 修订日期：2024-03-22
基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFD1901101）；山西省基础研究计划项目（202203021212413）；山西农业大学博士科研启动项目（2021BQ132）；山西省博士来晋工作奖励资金科研项目（SXBYKY2022088）
作者简介：温云杰，助理研究员，研究方向为土壤培肥与改良。
Email：wenyunjie@sxau.edu.cn
※通信作者：张建诚，研究员，研究方向为作物栽培与有机旱作技术。
Email：zhangjc@126.com

的有机碳在维持土壤结构稳定方面具有重要的作用。有机物腐解过程中形成的颗粒态有机碳会构建新的土壤孔隙，其分解转化也受到孔隙结构的调控[10]。相关研究认为颗粒态有机碳可显著提高团聚体内 7~15 μm 孔径的孔隙度[14]。有机碳与土壤矿物相互胶结形成矿物质结合态有机碳的过程可以促进土壤颗粒团聚[15]，提高土壤孔隙数量。显然，颗粒态和矿物质结合态有机碳对土壤孔隙有显著的影响。但是，在长期秸秆还田和施用有机肥的环境下，外源有机物的连续投入势必会影响颗粒态和矿物质结合态有机碳的周转，同时耕作措施同样会扰动土壤孔隙，在此环境下关于土壤孔隙结构特征与颗粒态和矿物质结合态有机碳关系方面的研究仍存在局限。并且，土壤有机碳的结构复杂，不同分子结构的有机碳的化学性质和环境行为存在差异，并易受到培肥措施的影响。例如有机物降解形成的腐殖质中芳香碳（Aromatic-C）、烷基碳（Alkyl-C）、含氧烷基碳（Alkyl-O-C）和含氮烷基碳（Alkyl-N-C）等均可以促进土壤颗粒的团聚，提高土壤团聚体的稳定性[16]，稳固土壤的物理结构。可见，有机碳的结构特征与土壤孔隙存在一定的关系，但是缺乏有机碳结构特征对土壤孔隙影响的深入研究，限制了系统了解土壤孔隙对有机培肥响应的过程与机理。

X 射线计算机断层扫描（X-ray computed tomography，CT）可以快速无损地获取土壤孔隙三维结构，定量分析土壤孔隙分布、数量和形态特征，目前已被广泛地应用于土壤孔隙的可视化和定量化研究[14]。本文基于 16 a 的有机肥和秸秆还田的定位培肥试验，利用 CT 扫描技术定量分析不同培肥模式下土壤孔隙数量和结构的变化，明确不同组分和结构的有机碳对土壤孔隙度、孔隙分布以及孔隙结构的影响，以期为深入理解不同培肥模式措施对土壤物理结构的影响机制以及合理的培肥方案提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况与试验设计

试验在山西省运城市山西农业大学（山西省农业科学院）棉花研究所水头试验基地进行（35°11′22″N，111°05′ 17″E）。试验地年平均气温 13.5 ℃，年平均降雨量 525 mm，无霜期 205 d 左右，年日照时长 2 290 h 左右，光照充足。试验区土壤类型为褐土，土壤质地为壤土，有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 10.9 g/kg、89.2 mg/kg、13.1 mg/kg 和 160 mg/kg，pH 值为 8.4。

试验为 2007 年开始的长期定位试验，试验共设 4 个处理（表 1）：单施化肥（F）、有机肥+化肥（MF）、秸秆还田+化肥（SF）以及秸秆还田+有机肥+化肥（MSF）。施用化肥为尿素（N 46%）和重过磷酸钙（P_2O_5 46%）,有机肥为堆肥腐熟的鸡粪（有机质 20 %），每年 10 月小麦播种前施入 MF 和 MSF 处理。每年 6 月小麦收获后，SF 和 MSF 处理的秸秆进行粉碎全量还田，F 和 MF 处理的秸秆移除试验田。每个处理 3 次重复，小区面积 60 m^2。各处理小麦生长季田间管理措施相同。

表 1　各处理的施肥量

Table 1　Fertilizers application rates of different treatments

($kg \cdot hm^{-2}$)

处理 Treatment	有机肥 Organic fertilizer	N	P_2O_5
F	–	165	150
MF	15 000	165	150
SF	–	165	150
MSF	15 000	165	150

注：F，化肥处理；MF，有机肥+化肥处理；SF，秸秆还田+化肥处理；MSF，有机肥+秸秆还田+化肥处理。下同。

Note: F, chemical fertilizer treatment; MF, organic fertilizer + chemical fertilizer treatment; SF, straw returning + chemical fertilizer treatment; MSF, organic fertilizer + straw returning + chemical fertilizer treatment. Same as below.

1.2　样品采集与分析

1.2.1　样品采集

土壤样品于 2023 年 6 月底小麦收获以后采集，采集之前清理地表残留的秸秆，使用 PVC 环刀（长 100 mm，直径 45 mm）采集原状土，并用锡箔纸包裹进行密封处理，防止由于水分蒸发导致的土壤孔隙结构破坏。同时采集 0～20 cm 土层原状土，去除可见的秸秆残体、石块等杂物，一部分土样于阴凉通风处自然风干，用于土壤有机碳物理分组和理化性质的分析；另一部分土样被沿着自然结构裂隙轻轻掰成约 1 cm^3 的小块，自然风干，用湿筛法分离土壤团聚体。

1.2.2　团聚体分离

按照 WEN 等[15] 分离团聚体的方法，称取待测土壤 50 g 于 0.25 和 0.053 mm 的标准套筛中，浸没至水中持续 5 min，按照 20 次/min 的频率，3 cm 的振幅，上下振动 10 min。残留在 0.250 和 0.053 mm 套筛的土壤残体分别为大团聚体（>0.250 mm）和微团聚体（0.250～0.053 mm），沉淀在水底的土壤颗粒为黏粒和砂粒，干燥后称质量，计算不同粒径团聚体的比例。

1.2.3　有机碳物理分组

按照 GOLCHIN 等[16] 的方法，本研究将土壤有机碳分为 3 种：1）未被团聚体包裹在内的有机碳，即非闭蓄态颗粒有机碳（free particulate organic carbon, FPOC），2）被团聚体包裹在其内部的有机碳，闭蓄态颗粒有机碳（occluded particulate organic carbon, OPOC），3）与土壤矿物相结合的矿物质结合态有机碳（mineral-associated organic carbon, MOC）。称取 15 g 土壤样品，加入 50 mL 密度为 1.8 g/cm^3 的碘化钠重液，振荡并离心，上清液过 0.45 μm 滤膜，膜上的有机残体即为非闭蓄态颗粒有机碳，重复上述操作 3～4 次。继续向土壤残渣中加入 50 mL 浓度为 0.5% 的六偏磷酸钠溶液，振荡后过 53 μm 标准筛，残留在标准筛中的为闭蓄态颗粒有机碳，通过标准筛的为矿物质结合态有机碳，烘干后称质量，由元素分析仪（vario PYRO cube Elementar Analyser，德国）测其含碳量。

1.3　CT 扫描及图像分析

利用 CT 扫描仪（Phoenix v|tome x M，GE）对 PVC 环刀采集的原状土样进行扫描，扫描电压 240 kV，

扫描电流为 160 mA，分辨率为 0.06 mm，共采集 2 000 辐 32 位 tiff 格式的扫描图，再利用 Image J 软件对图像进行处理，由于在原状土采集、运输和扫描的过程中可能会扰动土柱两端的土壤，不分析土柱两端各 20 mm 土层，只分析土柱中间 60 mm 的土层。首先将 32 位灰度扫描图转化为 8 位，调节图像亮度和对比度，然后用中值滤波器进行图像降噪，利用方形工具选择土柱中心目标区域进行分析，对图像进行二值分割，利用 Bone J 插件计算孔隙大小分布、分形维数及欧拉数。由于图像的分辨率为 0.06 mm，因此获取的孔隙均为> 0.06 mm 的孔隙，本研究中将孔隙孔径大小分为>0.50 mm、0.20～0.50 mm 和 0.06～0.20 mm 3 个等级[17]。

1.4 有机官能团表征

通过红外光谱分析土壤有机碳的结构特征，准确称取 1.0 mg 过 0.147 mm 标准筛的土壤样品，以 1:200 的比例与 KBr 混合，充分研磨成粉末，压成半透明的薄片，采用傅立叶变换红外光谱仪（Vertex 70 FTIR spectrometer, 德国）进行扫描，波长范围为 400～4 000 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}，扫描时间为 32 s。选择光谱的 3 个区域 2 800～3 010 cm^{-1}、1 580～1 680 cm^{-1} 和 1 148～1 175 cm^{-1}，分别代表脂肪族碳（aliphatic C）、芳香族碳（aromatic C）和多糖（polysaccharide），采用 OPUS 6.5 软件计算上述有机官能团的峰面积，再计算有机官能团的相对含量（%），即有机官能团的峰面积与所选有机基团峰面积之和的比值[18]。

1.5 数据处理

采用 SPSS 24.0 软件单因素方差分析（One-way ANOVA）对不同施肥处理之间的养分含量、团聚体比例、有机碳以及孔隙度等指标进行显著性比较（Duncan, $P < 0.05$），采用 Origin 2018 软件进行绘图以及 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 施肥处理对土壤理化性状和团聚体分布的影响

不同施肥措施显著影响土壤的理化性状（表 2）。MF、SF 和 MSF 处理显著提高土壤全氮含量，较对照 F 处理分别提高了 69.5%、45.3% 和 89.5%（P<0.05）。相较于 F 处理，MF 和 MSF 处理显著提高了有效磷（203.3% 和 300.2%）和有效钾（83.7% 和 112.2%）的含量（P<0.05）。MF 处理的 pH 值为 8.05，较 F 处理显著降低了 2.4%（P<0.05）。MSF 处理的容重为 1.10 g/cm^3，较 F 处理显著降低了 7.7%（P<0.05），而 MF 和 SF 处理的容重分别为 1.13 和 1.14 g/cm^3，与 F 处理差异并不显著（P>0.05）。对于大团聚体的比例，MF、SF 和 MSF 处理分别为 36.6%、28.8% 和 47.4%，均显著高于 F 处理（P<0.05）；而微团聚体的比例，只有 MF 处理显著高于 F 处理（P<0.05）；黏粒和粉粒的比例，则是 F 处理最高，达 49.1%，显著高于 MF、SF 和 MSF 处理（P<0.05）。

表 2 不同施肥处理对土壤理化性状和团聚体的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on soil physicochemical properties and aggregates

处理 Treatments	全氮 Total nitrogen/ (g·kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg^{-1})	有效钾 Available potassium/ (mg·kg^{-1})	pH 值 pH value	容重 Bulk density (g·cm^{-3})	占比 Percentage/%		
						大团聚体 Macroaggregate	微团聚体 Microaggregate	黏粒和粉粒 Silt and clay
F	0.95±0.06c	63.1±19.1b	104±16c	8.25±0.06a	1.19±0.03a	18.2±3.4c	32.7±4.6b	49.1±1.7a
MF	1.61±0.06ab	191.4±27.2a	191±52ab	8.05±0.07b	1.13±0.03ab	36.6±6.7ab	46.2±8.4a	17.2±1.8c
SF	1.38±0.26b	68.3±4.1b	153±15bc	8.22±0.06ab	1.14±0.04ab	28.8±4.8b	40.8±3.6ab	30.4±7.6b
MSF	1.80±0.32a	252.5±117.2a	221±27a	8.17±0.15ab	1.10±0.04b	47.4±9.5a	37.5±8.7ab	15.1±1.7c

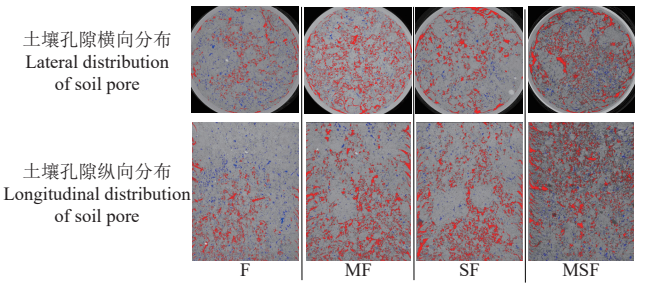
注：不同小写字母代表不同施肥处理间差异达到显著水平（P<0.05）。下同。

Note: Different lowercase letters indicate a difference between different fertilization treatments at 0.05 significant level. Same as below.

2.2 施肥处理对土壤孔隙的影响

不同施肥处理下土壤孔隙的二维图像见图 1。F 处理的土壤中，孔隙数量较少，尺寸较小，分布较为分散。与之相比，MF、SF 和 MSF 处理的孔隙数量较多，尺寸较大，相互连通程度较高，尤其在 MSF 处理下的土壤孔隙最多、连通性最强。

将土壤孔隙进行定量化分析，结果如图 2。MSF 处理的总孔隙度为 13.9%，显著高于 MF、SF 和 F 处理（P<0.05）；MF 和 SF 的总孔隙度分别为 11.3% 和 11.9%，无显著差异（P>0.05），但显著高于 F 处理的 8.6%（P<0.05）。MSF 处理的>0.50 mm 孔径的孔隙度为 11.8%，显著高于 MF 处理的 9.0% 和 F 处理的 7.1%（P<0.05），但与 SF 处理的 10.4% 无显著差异（P>0.05）；MF 与 SF 处理的>0.50 mm 孔径的孔隙度无显著差异（P>0.05），但显著高于 F 处理（P<0.05）。各处理的 0.50～0.20 mm 孔径的孔隙度在 1.1%～1.8% 之间，MSF 和 MF 处理间无显著性差异（P>0.05），但是显著高于 F 处理（P<0.05）。各处理的 0.20～0.06 mm 孔径的孔隙度在 0.4%～0.6% 之间，且各处理间无显著差异（P>0.05）。



注：图中红色和蓝色区域为土壤孔隙，其余部分为土壤基质。

Note: Red and blue parts in the pictures are the soil pores, and the rest part is the soil matrix.

图 1 不同施肥处理下土壤孔隙的二维图像（4.5 cm×6 cm）

Fig.1 Two-dimensional images (4.5 cm×6 cm) of soil pores under different fertilization treatments

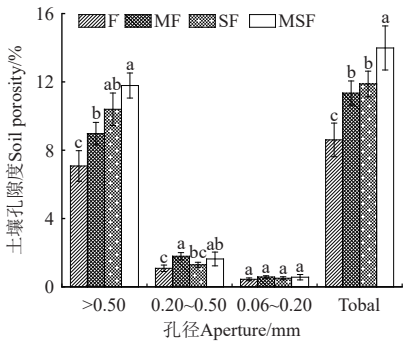


图 2　不同施肥处理对土壤孔径分布与孔隙度的影响

Fig.2　Effects of different fertilization treatments on soil aperture distribution and porosity

利用分形维数和欧拉数表征土壤孔隙形态特征（表 3）。分形维数反映土壤孔隙结构的复杂程度，数值越大，孔隙结构越好；欧拉数反映土壤孔隙的连通性，数值越大连通性越低，数值越小连通性越大。MSF 处理的分形维数分别较 F、MF 和 SF 处理显著增加了 17.9%、7.1% 和 11.3%（P<0.05），MF 与 SF 处理间的分形维数无显著差异（P>0.05），但 MF 处理显著高于 F 处理（P<0.05）。对于土壤孔隙的欧拉数，MSF 处理分别较 F 处理显著降低了 24.9%（P<0.05）。

表 3　不同施肥处理对土壤孔隙分形维数和欧拉数的影响

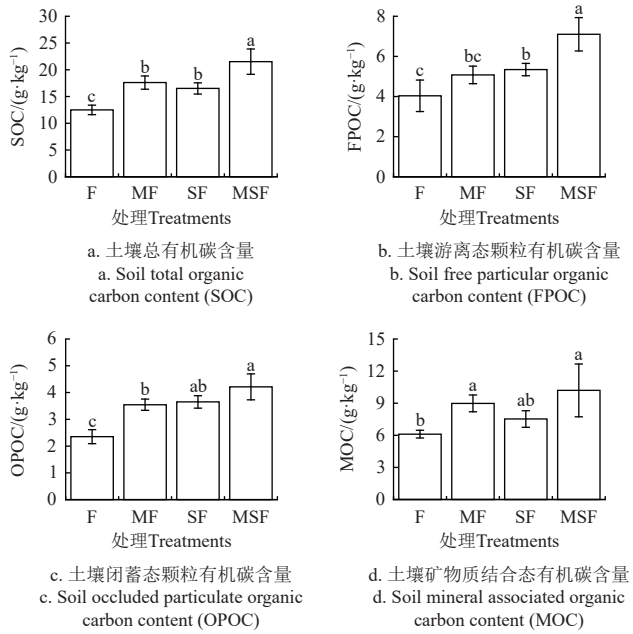
Table 3　Effects of different fertilization treatments on fractal dimension and Euler number of soil pores

处理 Treatments	分形维数 Fractal dimension	欧拉数 Euler number
F	2.18±0.13c	5 381±884a
MF	2.40±0.07b	4 495±387ab
SF	2.31±0.06bc	4 759±195ab
MSF	2.57±0.08a	4 039±320b

2.3　施肥处理对土壤有机碳组分及有机碳结构的影响

不同施肥处理下土壤有机碳组分的分布如图 3，MSF 处理的总有机碳含量达 21.5 g/kg，相较于 F、MF 和 SF 处理分别显著增加了 72.0%、22.2% 和 30.0%（P<0.05）；MF 和 SF 处理的总有机碳含量分别为 17.6 和 16.5 g/kg，两者间无显著差异（P>0.05），但显著高于 F 处理（P<0.05）。对于游离态颗粒有机碳，MSF 处理的含量为 7.1 g/kg，相较于 F、MF 和 SF 处理分别显著增加了 77.5%、39.8% 和 33.0%（P<0.05），SF 和 MF 处理的含量分别为 5.3 和 5.1 g/kg，但两者之间无显著差异（P>0.05），其中 SF 处理显著高于 F 处理（P<0.05）。MSF 处理的闭蓄态颗粒有机碳含量为 4.2 g/kg，较 MF 和 F 处理分别增加了 20.0% 和 75.0%（P<0.05），但与 SF 处理差异并不显著（P>0.05）；MF 和 SF 处理的闭蓄态颗粒有机碳含量无显著差异（P>0.05），分别为 3.5 和 3.7 g/kg，均显著高于 F 处理（P<0.05）。对于矿物质结合态有机碳，MSF、SF 和 MF 处理的含量分别为 10.2、7.5 和 9.0 g/kg，三者之间无显著差异（P>0.05），但 MSF 和 MF 处理显著高于 F 处理（P<0.05）。

利用傅里叶红外光谱对土壤有机碳结构进行分析，结果如图 4。对于多糖类有机碳，MSF 处理的含量最高，相对峰面积为 3.35%，显著高于其余处理（P<0.05），SF 与 MF 处理分别为 2.58% 和 2.08%，两者之间无显著差异（P>0.05），但 SF 处理显著高于 F 处理（P<0.05）。MSF 处理的芳香类有机碳含量最低，相对峰面积为 30.45%，显著低于 F 和 SF 处理（P<0.05），但与 MF 处理无显著差异（P>0.05），MF 和 SF 处理的芳香类有机碳相对峰面积分别为 37.87% 和 41.38%，两者之间无显著差异（P>0.05），但显著低于 F 处理（P<0.05）。MSF、SF 和 MF 处理的脂肪类有机碳相对峰面积分别为 66.20%、56.04% 和 60.05%，显著高于 F 处理（P<0.05），其中 MSF 处理显著高于 SF 处理（P<0.05），但与 MF 处理并无显著差异（P>0.05）。MSF、SF 和 MF 处理的芳香类有机碳：脂肪类有机碳比值分别为 0.46、0.75 和 0.63，三者之间无显著差异（P>0.05），但显著低于 F 处理（P<0.05）。



a. 土壤总有机碳含量
a. Soil total organic carbon content (SOC)

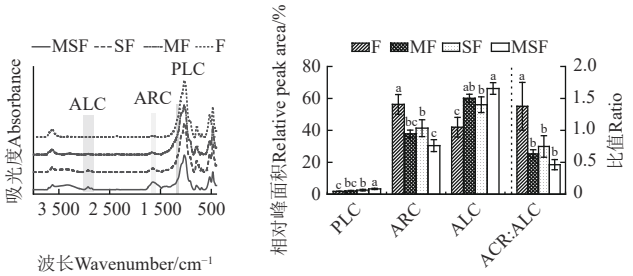
b. 土壤游离态颗粒有机碳含量
b. Soil free particular organic carbon content (FPOC)

c. 土壤闭蓄态颗粒有机碳含量
c. Soil occluded particulate organic carbon content (OPOC)

d. 土壤矿物质结合态有机碳含量
d. Soil mineral associated organic carbon content (MOC)

图 3　不同施肥处理对土壤各组分有机碳的影响

Fig.3　Effects of different fertilization treatments on soil organic carbon fractions



a. 土壤有机碳红外光谱图
a. Infrared spectrogram of soil organic carbon

b. 不同有机官能团的相对峰面积
b. The relative peak area of different organo−functional groups

注：PLC 为多糖类有机碳；ARC 为芳香类有机碳；ALC 为脂类有机碳；ARC：ALC 为芳香类有机碳:脂类有机碳的比值。下同。

Note: PLC is polysaccharide-C; ARC is aromatic-C; ALC is aliphatic-C; ARC: ALC is aromatic-C:aliphatic-C ratio. Same as below.

图 4　不同施肥处理对土壤有机碳结构特征的影响

Fig.4　Effects of different fertilization treatments on chemical structure characters of soil organic carbon

2.4 土壤孔隙特征与有机碳之间的关系

土壤孔隙度和形态特征与土壤有机碳含量和结构密切相关（表 4），土壤总孔隙度、>0.50 mm 孔径的孔隙度以及分形维数与土壤总有机碳和各有机碳组分（FPOC、OPOC 和 MOC）含量呈显著和极显著的正相关关系（P<0.05 和 P<0.01）；0.50～0.20 mm 孔径的孔隙度则与闭蓄态颗粒态有机碳呈显著的正相关关系（P<0.05）；0.20～0.06 mm 孔径的孔隙度仅与矿物质结合态有机碳含量呈显著的正相关关系（P<0.05）；欧拉数则与土壤总有机碳、游离态颗粒有机碳和矿物质结合态有机碳呈显著和极显著的负相关关系（P<0.05 和 P<0.01）。多糖类和脂肪类有机碳与>0.50 mm 孔径的孔隙度、总孔隙度和分形维数呈显著和极显著的正相关关系（P<0.05 和 P<0.01），脂肪类有机碳与 0.50～0.20 mm 孔径的孔隙度呈显著的正相关关系（P<0.05），芳香类有机碳和芳香类有机碳:脂肪类有机碳比值分别与>0.50 mm 孔径的孔隙度、0.50～0.20 mm 孔径的孔隙度、总孔隙度和分形维数呈显著和极显著的负相关关系（P<0.05 和 P<0.01），欧拉数则与芳香类有机碳和芳香类有机碳:脂肪类有机碳比值呈极显著和显著的正相关关系（P<0.05 和 P<0.01），与脂肪类有机碳呈极显著的负相关关系（P<0.01）。

表 4 土壤孔隙特征与土壤有机碳组分和有机碳结构特征之间的相关性

Table 4 Correlation between soil pore characteristics and soil organic carbon fractions and chemical structure character

指标 Index	>0.50 mm	0.50~0.20 mm	0.20~0.06 mm	总孔隙度 Porosity	欧拉数 Euler number	分形维数 Fractal dimension
SOC	0.79**	0.42	0.57	0.88**	-0.76**	0.77**
FPOC	0.77**	0.48	0.41	0.81**	-0.80**	0.60*
OPOC	0.82**	0.66*	0.30	0.82**	-0.56	0.79**
MOC	0.64*	0.34	0.65*	0.76**	-0.65*	0.71**
PLC	0.85**	0.44	0.18	0.77**	-0.62*	0.74**
ARC	-0.76**	-0.68*	-0.47	-0.80**	0.75**	-0.67*
ALC	0.74**	0.69*	0.48	0.79**	-0.75**	0.66*
ARC:ALC	-0.71**	-0.64*	-0.43	-0.75**	0.70*	-0.59*

注：*和**分别表示相关性达 0.05 显著和 0.01 极显著水平.

Note: * and ** are the significant correlation at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨 论

3.1 长期有机物还田对土壤孔隙的影响

应用 CT 扫描技术可以精确量化土壤中孔隙大小分布、孔隙度以及形态结构特征[2]。良好的孔隙结构对土壤水分和养分的运移、气热的传导以及生物多样性至关重要[19-20]。长期的有机物还田对土壤孔隙有显著影响，与单施化肥处理相比，秸秆还田和有机肥处理（MF 和 MSF）可有效提高>0.50 mm 和 0.50～0.20 mm 孔径的孔隙度以及土壤总孔隙度（图 2）。王宪玲等[5] 研究同样表明，长期有机肥和化肥配施较单施化肥可显著提高耕作层土壤大孔隙数量和孔隙度。这主要是因为 1）有机肥和秸秆本身具有多孔性质，还田后其较多的孔隙数量提高了土壤孔隙度；2）长期施用有机肥可提高土壤养分含量（表 2），有利于作物根系生长，进而塑造土壤孔隙，增加土壤孔隙度[21]；3）有机肥和秸秆腐解过程产生的有机质等有机胶结物质能够促进土壤颗粒团聚，增加土壤大团聚体的数量（表 2），进而提高了土壤孔隙度[22]。

有机物料还田不仅有助于土壤中大孔隙的形成，而且会使孔隙的结构特征更加复杂[4]。在本研究中，秸秆还田和有机肥处理（MF 和 MSF）的土壤孔隙有更高的分形维数，而 MSF 处理有较低的欧拉数（表 3）。此研究结果与杨建君等[23] 一致，表明长期的有机物料还田加化肥显著增加了土壤孔隙的复杂程度和连通性，促进土壤结构趋向于合理化。这是因为有机物料还田后，其分解释放的营养物质促进真菌菌丝和根系的生长，这些菌丝、根系连同有机物腐解形成的腐殖质与土壤矿物质颗粒相互团聚形成大小不一、形态多样的土壤结构体，进而构建成具有层次结构的复杂孔隙网络。并且，在肥沃的土壤中，土壤颗粒排列多为“垒”状结构，土体疏松，孔隙丰富，连通性较强[24]。

3.2 有机碳对土壤孔隙的影响

有机碳在塑造土壤孔隙结构和维持其形态稳定等方面具有重要的作用。本研究中，土壤总孔隙度、>0.50 mm 孔径的孔隙度以及分形维数与土壤总有机碳含量呈显著的正相关关系（表 4）。这与 KOOP 等[25] 一致，其研究结果表明土壤大孔径的孔隙度与有机碳含量密切相关，而且在长期秸秆还田过程中土壤有机碳含量与 1.0～0.5 mm 孔隙数量呈极显著正相关关系[26]。并且，本研究还发现土壤总孔隙度、>0.50 mm 孔径的孔隙度、分形维数与脂类、多糖类有机碳同样呈显著正相关关系，而与芳香类有机碳和芳香类:脂肪类有机碳的比值呈显著的负相关关系（表 4）。这主要是因为有机物腐解过程中，释放的脂类、多糖类有机碳相比于芳香族有机碳更容易降解[27]，更有利于微生物的分解利用，促进微生物繁殖以及菌丝的生长和胶结类物质的分泌。菌丝和胶结类物质可以加强土壤颗粒的团聚，提高土壤团聚体的稳定性，能够促进土壤孔隙向更大孔径孔隙发育[28]。研究表明，土壤孔隙度和孔隙数量与团聚体稳定性存在正相关关系[29]。芳香类:脂肪类有机碳比值可以作为判断有机碳腐殖化的指标，其比值越高表明有机碳腐殖化程度越高、性质越稳定；相反，其比值越低表明有机碳稳定性较弱，活性较强，易被微生物分解利用[27]。WEN 等[15] 研究认为长期施用有机肥可以显著提高土壤脂肪和多糖类有机碳含量，降低芳香类:脂肪类有机碳的比值，促进真菌的生长，

并显著提高团聚体的稳定性。可见，长期有机肥配合秸秆还田不仅显著增加土壤有机碳含量，而且有利于脂肪类和多糖类等活性较高的有机碳的累积，进而促进大团聚体（>0.25 mm）的形成，最终提高土壤孔隙度、孔隙的连通性和复杂程度。此外，脂肪类有机碳具有疏水作用[30]，可以减缓水分对土壤团聚体的消散作用，维持土壤孔隙形状结构的稳定。

颗粒有机碳主要由有机物分解过程形成的碎片残体构成，是土壤有机碳的重要组成部分，受施肥、耕作方式等因素的影响[11,31]。长期施用有机肥与秸秆还田显著提高土壤游离态和闭蓄态颗粒有机碳的含量（图 3），并且游离态和闭蓄态颗粒有机碳与总孔隙度、>0.50 和 0.50～0.20 mm 孔径的孔隙度呈显著的正相关关系（表 4）。这可能是因为颗粒有机碳主要是颗粒较大的没有分解或半分解的秸秆、有机肥残体，存在于团聚体之间的大孔径孔隙中或者被包裹在团聚体内[32]，并且其结构具有多孔隙性质，进一步提高了土壤大孔径的孔隙数量[5]。同时，矿物质结合态有机碳与总孔隙度、>0.50 和 0.20～0.06 mm 孔径的孔隙度呈显著的正相关关系（表 4）。这主要是由于有机残体与土壤矿物结合形成矿物质结合态有机碳的过程促进了土壤颗粒的团聚[33-34]，进而增加了土壤孔隙数量。WEN 等[15]研究认为，长期施用有机肥可显著提高土壤黏粒颗粒中糖类有机碳含量，并促进和提高团聚体的形成和稳定。而结构稳定的团聚体具有较多的大孔隙、较强的孔隙连通性和复杂性等特征[35]。当然，有机碳与孔隙结构同样存在互馈作用[10]，良好的孔隙结构又可以满足微生物生长对水分、养分、空气以及温度的需求，进而促进有机物分解形成更多的颗粒态有机碳和矿物质结合态有机碳。

4　结　论

与不施肥相比，长期秸秆还田配施有机肥显著增加土壤>0.20 mm 孔径的孔隙度和总孔隙度，提升了土壤孔隙的连通性和复杂性，有效改善耕作层土壤结构；同时，提高了土壤总有机碳、颗粒态有机碳（游离态和闭蓄态颗粒有机碳）以及矿物质结合态有机碳的含量，并有利于土壤多糖类和脂肪类有机碳的累积。上述不同组分和类型的有机碳与土壤孔隙度、孔隙连通性和复杂性呈显著的正相关关系，说明长期施用有机肥和秸秆还田通过增加颗粒态和矿物质结合态有机碳以及多糖类和脂肪类有机碳，促进了土壤孔隙的形成，增加了土壤孔隙的连通性和复杂性，进而改善土壤结构。综上，秸秆还田配施有机肥是改善耕作层土壤孔隙结构的较优施肥模式，是提升耕地质量的有效手段。

[参　考　文　献]

[1] 张靖，陈琳，周虎，等. 基于数字图像技术的土壤孔隙结构定量研究进展[J]. 土壤，2023，55(1)：21-29.
ZHANG Jing, CHEN Lin, ZHOU Hu, et al. Quantification of soil pore structure based on digital image technology: A Review[J]. Soils, 2023, 55(1): 21-29. (in Chinese with English abstract)

[2] 李保国，周虎，王钢，等. 探索“透明”土壤体：土壤孔隙学的时代已经启航[J]. 土壤学报，2023，60(5)：1221-1230.
LI Baoguo, ZHOU Hu, WANG Gang, et al. Explore the “transparent” soils: Soil porelogy has sailed[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1221-1230. (in Chinese with English abstract)

[3] 尼尔·布鲁迪，雷·韦尔，李保国，等. 译. 土壤学与生活[M]. 第十四版. 北京：科学出版社，2019：153-154.

[4] 邱琛，韩晓增，陈旭，等. CT 扫描技术研究有机物料还田深度对黑土孔隙结构影响[J]. 农业工程学报，2021，37(14)：98-107.
QIU Chen, HAN Xiaozeng, CHEN Xu, et al. Effects of organic amendment depths on black soil pore structure using CT scanning technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(14): 98-107. (in Chinese with English abstract)

[5] 王宪玲，赵志远，马艳婷，等. 基于 CT 扫描技术研究有机无机肥长期配施对土壤物理特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2020，26(9)：1647-1655.
WANG Xianling, ZHAO Zhiyuan, MA Yanting, et al. Study on the effects of long-term application of chemical fertilizer combined with manure on soil physical properties of apple orchard based on CT scanning technology[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(9): 1647-1655. (in Chinese with English abstract)

[6] 房焕，李奕，周虎，等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J]. 农业机械学报，2018，49(4)：297-302.
FANG Huan, LI Yi, ZHOU Hu, et al. Effects of Straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 297-302. (in Chinese with English abstract)

[7] NEMES A, RAWLS W J, PACHEPSKY Y A. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 1330-1337.

[8] FENG Y, WANG J, BAI Z, 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.

[9] XU L Y, WANG M Y, SHI X Z, et al. Effect of long-term organic fertilization on the soil pore characteristics of greenhouse vegetable fields converted from rice-wheat rotation fields[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631/632: 1243-1250.

[10] 丁天宇，郭自春，钱泳其，等. 秸秆还田方式对砂姜黑土有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. 农业工程学报，2023，39(16)：71-78.
DING Tianyu, GUO Zichun, QIAN Yongqi, et al. Effects of straw return methods on the soil organic carbon fractions and pore structure characteristics of Shajiang black soil (Vertisol)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 71-78. (in Chinese with English abstract)

[11] LAVALLEE J M, SOONG J L, COTRUFO M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. Global Change Biology, 2020, 26(1): 261-273.

[12] 张维理，KOLBE H，张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学，2020，53(2)：317-331.
ZHANG Weili, KOLBE H, ZHANG Lianren. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(2): 317-331. (in Chinese with English abstract)

[13] 朱勇，李建业，张程远，等. 长期保护性耕作对坡耕地黑土有机碳组分的影响[J]. 农业工程学报，2023，39(10)：103-111.
ZHU Yong, LI Jianye, ZHANG Chengyuan, et al. Effects of long-term conservation tillage on black soil organic carbon components in sloping farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(10): 103-111. (in Chinese with English abstract)

[14] 许智隼，胡五龙. 基于三维 X-CT 图像的结皮土壤孔隙结构特征与渗透率[J]. 农业工程学报，2021，37(14)：89-97.
XU Zhisun, HU Wulong. Characteristics of pore structure and permeability in soil crust using 3D X-CT images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(14): 89-97. (in Chinese with English abstract)

[15] WEN Y, TANG Y, WEN J, et al. Variation of intra-aggregate organic carbon affects aggregate formation and stability during organic manure fertilization in a fluvo-aquic soil[J]. Soil Use and Management, 2021, 37: 151-163.

[16] GOLCHIN A, OADES J M, SKJEMSTAD J O, et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C Cp/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy[J]. Soil Research, 1994, 32(2): 285-309

[17] 钱泳其，熊鹏，王玥凯，等. 不同耕作方式对砂姜黑土孔隙结构特征的影响[J]. 土壤学报，2024，61(1)：52-63.
QIAN Yongqi, XIONG Peng, WANG Yuekai, et al. Effect of tillage practices on soil pore structure characteristics in shajiang black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1): 52-63. (in Chinese with English abstract)

[18] 宋佳，黄晶，高菊生，等. 冬种绿肥和秸秆还田对双季稻区土壤团聚体和有机质官能团的影响[J]. 应用生态学报，2021，32(2)：564-570.
SONG Jia, HUANG Jing, GAO Jusheng, et al. Effects of green manure planted in winter and straw returning on soil aggregates and organic matter functional groups in double cropping rice area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 564-570. (in Chinese with English abstract)

[19] ZHANG Z B, LIU K L, ZHOU H, et al. Linking saturated hydraulic conductivity and air permeability to the characteristics of biopores derived from X-ray computed tomography[J]. Journal of Hydrology, 2019, 571: 1-10.

[20] RABOT E, WIESMEIER M, SCHLÜTER S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review[J]. Geoderma, 2018, 314: 122-137.

[21] ZHANG Z B, PENG X H. Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 206: 104844.

[22] INGE C R, CATHELIJNE R S, SVETLA R, et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties[J]. Geoderma, 2015, 247/248: 24-37.

[23] 杨建君，盖浩，张梦璇，等. 深松结合秸秆还田对黑土孔隙结构的影响[J]. 中国农业科学，2023，56(5)：892-906.
YANG Jianjun, GAI Hao, ZHANG Mengxuan, et al. Effect of subsoiling combined with straw returning measure on pore structure of black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(5): 892-906. (in Chinese with English abstract)

[24] 熊毅，姚贤良，樊润威. 土壤结构的性态研究[J]. 土壤学报，1965，13(4)：411-417.
XIONG Yi, YAO Xianliang, FAN Runwei. Morphological study of soil structure topography[J]. Acta Pedologica Sinica, 1965, 13(4): 411-417. (in Chinese with English abstract)

[25] KOOP A N, HIRMAS D R, BILLINGS S A, et al. Is macroporosity controlled by complexed clay and soil organic carbon?[J]. Geoderma, 2023, 437: 116565.

[26] 王越，况福虹，马胜兰，等. 秸秆粉碎和焚烧还田对石灰性紫色土耕层土壤孔隙和有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报，2022，41(3)：526-536.
WANG Yue, KUANG Fuhong, MA Shenglan, et al. Effects of shredded straw and burned straw returning to the field on soil porosity and organic carbon in cultivated layer of calcareous purple soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(3): 526-536. (in Chinese with English abstract)

[27] DEMYAN M S, RASCHE F, SCHULZ E, et al. Use of specific peaks obtained by diffuse reflectance Fourier transform mid - infrared spectroscopy to study the composition of organic matter in a Haplic Chernozem[J]. European Journal Soil Science, 2012, 63(2): 189-199.

[28] 余坤，冯浩，王增丽，等. 氨化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量[J]. 农业工程学报，2014，30(15)：165-173.
YU Kun, FENG Hao, WANG Zengli, et al. Ammoniated straw improving soil structure and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 165-173. (in Chinese with English abstract)

[29] 彭珏，陈家赢，王军光，等. 中国典型地带性土壤团聚体稳定性与孔隙特征的定量关系[J]. 农业工程学报，2022，38(18)：113-121.
PENG Jue, CHEN Jiaying, WANG Junguang, et al. Linking aggregate stability to the characteristics of pore structure in different soil types along a climatic gradient in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(18): 113-121. (in Chinese with English abstract)

[30] DE BLAS E, RODRÍGUEZ-ALLERES M, ALMENDROS G. Speciation of lipid and humic fractions in soils under pine and eucalyptus forest in northwest Spain and its effect on water repellency[J]. Geoderma, 2010, 155(3/4): 242-248.

[31] 吴怡慧，王鸿飞，张瑞，等. 稻秆碳氮在黑土种稻土壤颗粒有机质中的分配特征[J]. 土壤学报，2023，60(5)：1430-1441.
WU Yihui, WANG Hongfei, ZHANG Rui, et al. Incorporation of carbon and nitrogen from rice straw into particulate organic matter in black soil with rice planting[J]. Acta Pedologica Sinica,

2023, 60(5): 1430-1441. (in Chinese with English abstract)

[32] 武均，蔡立群，张仁陟，等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报（中英文），2018，26(5)：728-736.
WU Jun, CAI Liqun, ZHANG Renzhi, et al. Distribution of soil particulate organic carbon fractions as affected by tillage practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(5): 728-736. (in Chinese with English abstract)

[33] MUNEER M, OADES J M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models[J]. Soil Research, 1989, 27: 411-423

[34] KLEBER M, EUSTERHUES K, KEILUWEIT M. Mineral-Arganic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments[M]. Advances in Agronomy. Cambridge, USA: Academic Press, 2015, 130: 1-140.

[35] 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. (in Chinese with English abstract)

Effects of the long-term application of organic fertilization and straw returning on the components of soil organic carbon and pores

WEN Yunjie[1,3] , ZHANG Jiancheng[2,3※] , YANG Na[2,3] , WANG Xiuhong[1,3] , SHI Xiangyuan[3] , WANG Juanling[3]

(1. *Shanxi Academy of Organic Dryland Agriculture*, *Shanxi Agriculture University*, *Taiyuan* 030031, *China*;　2. *Cotton Research Institute*, *Shanxi Agricultural University*, *Yuncheng* 044000, *China*;　3. *State Key Laboratory of Sustainable Dryland Agriculture* (*in Preparation*), *Shanxi Agricultural University*, *Taiyuan* 030031, *China*)

Abstract: Soil pores are dominated in various soil functions, including water infiltration and retention, soil permeability, nutrient availability, as well as aeration and mechanical impedance to root elongation. The dynamic behavior of soil pores is primarily influenced by tillage practices, the presence of crop roots, and the return of soil organic matter. In this research, a systematic investigation was implemented to explore the impacts of the long-term application of organic fertilizers and straw on the soil pore structure. An analysis was also made to elucidate the relationship between soil organic carbon and soil pore structure. The data was collected from a 16-year long-term field experiment located in Shui Tou agricultural experimental base, Shanxi Agricultural University (Shanxi Academy of Agricultural Sciences), Yuncheng, Shanxi Province. Four treatments were set as sole chemical fertilizer (F), organic fertilizer + chemical fertilizer (MF), straw returning + chemical fertilizer (SF), and organic fertilizer + straw returning + chemical fertilizer (MSF). The soil pore structure was examined using X-ray computed tomography (CT) and advanced image processing. While the soil organic carbon was assessed to determine the physical fraction contents (free particulate organic matter (FPOM), occluded particulate organic matter (OPOM), and mineral-associated organic matter (MOM)). Additionally, the structural properties of the organic carbon were qualitatively and quantitatively analyzed by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. The results indicated that all organic amendment treatments significantly enhanced the total porosity and porosity of >0.5 mm aperture, compared with the F treatment (P<0.05). Notably, the MSF treatment exhibited the highest values. Specifically, the total porosity and porosity of >0.5 mm aperture increased by 61.6% 66.2%, 23.0% and 31.1%, and 16.8% and 13.5%, respectively, compared with the F, MF, and SF treatments. Additionally, the porosity ranging from 0.5 to 0.2 mm in the MF and MSF treatments was significantly higher than that in the F treatment (P<0.05). However, there was no significant difference in porosity ranging from 0.2 to 0.06 mm among all treatments. Furthermore, MSF treatment significantly enhanced the connectivity and complexity of soil pores, with increases of 33.2% and 17.9%, respectively, compared with the F treatment P<0.05). The organic fertilizer and straw returning treatments (SF, MF, and MSF) achieved a significant increase (P<0.05) in the contents of total soil organic carbon, FPOM, OPOM, and MOM. MSF also exhibited the highest values among these treatments, with concentrations of 21.5, 7.1, 4.2, and 10.2 g/kg, respectively. The long-term straw incorporation and the application of organic fertilizers (MSF) were performed better to accumulate the polysaccharide and lipid organic carbon in the soil, while concurrently reducing the content of aromatic organic carbon. The Pearson correlation analysis revealed that there was a positive and significant relationship between soil total porosity, porosity of >0.5 mm aperture, as well as the connectivity and complexity of soil pores with the contents of total soil organic carbon, FPOM, OPOM, MOM, and polysaccharide and lipid organic carbon (P<0.05). These findings suggested that the application of organic fertilizer and straw incorporation enhanced the content of soil organic carbon to accumulate the polysaccharide and lipid organic carbon, which facilitated the formation and modification of soil pores. Consequently, the enhanced physical properties of the soil were attributed to the regulation of soil structure by the organic amendment. An optimal distribution of soil pores was achieved to increase the soil complexity and pore connectivity. Accordingly, the organic amendment can be an effective strategy to optimize the soil pore structure. Future studies should also examine the response of soil pore structure and pore size distribution to the decomposition of incorporated organic manure

Keywords: soils; pores; organic carbon; molecular structure; CT scanning