

DOI: 10.11766/trxb202401310052

CSTR: 32215.14.trxb202401310052

丁天宇, 郭自春, 王玥凯, 蒋发辉, 张平, 彭新华. 不同秸秆还田方式下砂姜黑土团聚体内颗粒有机质的空间分布特征[J]. 土壤学报, 2025, 62 (2): 375–387.

DING Tianyu, GUO Zichun, WANG Yuekai, JIANG Fahui, ZHANG Ping, PENG Xinhua. The Spatial Distribution of Particulate Organic Matter Within Aggregates of Shajiang Black Soil Under Various Straw Return Practices Based on X-ray CT Technology and Machine Learning[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (2): 375–387.

不同秸秆还田方式下砂姜黑土团聚体内颗粒有机质的空间分布特征^{*}

——基于 X 射线 CT 技术和机器学习

丁天宇^{1, 5}, 郭自春^{1†}, 王玥凯², 蒋发辉^{1, 3}, 张平⁴, 彭新华^{1, 6}

(1. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2. 南京农业大学农学院, 南京 210095; 3. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 4. 安徽省农垦集团龙亢农场有限公司, 安徽怀远 233426; 5. 中国科学院大学, 北京 100049; 6. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 为优选培肥改良砂姜黑土的秸秆还田方式, 该研究基于砂姜黑土连续 6 年耕作与秸秆还田定位试验, 结合高分辨率 X 射线 CT 技术(XCT)和机器学习方法, 探究不同秸秆还田方式(免耕还田、旋耕还田、深翻还田)对不同土层(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm) 6~8 mm 团聚体内颗粒有机质(particulate organic matter, POM)(包括新鲜残体和旧 POM)空间分布及其孔隙特征的影响。研究结果表明: 整体而言, 三种秸秆还田处理下各土层中团聚体内 POM 以新鲜残体为主, 占 76.4%~87.0%; 免耕还田处理下 0~10 cm 土层团聚体存在大量 POM, 其中新鲜残体和旧 POM 分布在连通性孔隙中的比例分别为 0.788 和 0.569; 深翻还田处理下 20~40 cm 土层团聚体 POM 体积密度较高, 新鲜残体和旧 POM 分布在连通性孔隙中的比例分别为 0.729 和 0.536。与旋耕还田相比, 免耕还田使 0~10 cm 土层中团聚体内总 POM 和新鲜残体体积密度分别提高了 54.4%和 56.7% ($P < 0.05$); 然而, 在 10~20 cm 土层中, 三种还田方式下新鲜残体和旧 POM 体积密度及其在连通性孔隙中的分布无显著性差异 ($P > 0.05$); 在 20~40 cm 土层中, 与旋耕还田相比, 深翻还田使总 POM 体积密度分别显著提高了 2.78 倍, 其中新鲜残体和旧 POM 体积密度分别提高了 3.10 倍和 1.72 倍, 同时显著提高了团聚体孔隙度($>16 \mu\text{m}$)、连通孔隙度 ($P < 0.05$)。综上所述, 新鲜残体构成了 POM 主要成分, 在免耕还田表层(0~10 cm)和深翻还田深层(20~40 cm)土壤中, 团聚体内 POM 体积密度提升主要以通过新鲜残体体积密度显著增加实现的, 连通性孔隙是新鲜残体累积和分解转化的重要场所。本研究认为深翻还田有利于深层(20~40 cm)土壤团聚体连通性孔隙形成和 POM 累积, 对农田土壤质量提升和土壤固碳具有重要意义。

关键词: 团聚体; 颗粒有机质; 孔隙; 砂姜黑土; 深翻还田; XCT 扫描

中图分类号: S152.4; S153.6 **文献标志码:** A

^{*} 国家重点研发计划项目(2023YFD1900204)、国家自然科学基金项目(41930753, 42007007)资助 Supported by the National Key Research and Development Programs of China(No.2023YFD1900204), the National Natural Science Foundation of China (Nos.41930753, 42007007)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zcguo@issas.ac.cn

作者简介: 丁天宇(1999—), 男, 安徽淮南人, 博士研究生, 主要从事土壤结构与固碳研究。Email: dingtianyu@issas.ac.cn

收稿日期: 2024-01-31; 收到修改稿日期: 2024-07-22; 网络首发日期(www.cnki.net): 2024-08-29

The Spatial Distribution of Particulate Organic Matter Within Aggregates of Shajiang Black Soil Under Various Straw Return Practices Based on X-ray CT Technology and Machine Learning

DING Tianyu^{1,5}, GUO Zichun^{1†}, WANG Yuekai², JIANG Fahui^{1,3}, ZHANG Ping⁴, PENG Xinhua^{1,6}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 4. Longkang Farm Co. Ltd, Anhui State Farms Group, Huaiyuan, Anhui 233426, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objective】 Protection of particulate organic matter (POM) within soil aggregates has been recognized to be one of the principal mechanisms of C sequestration in soil. The low soil organic carbon (SOC) content of Shajiang black soil is a major factor for limiting crop yields in the Huaibei plain. Increasing SOC sequestration by returning crop residues to the field has been recommended. No-tillage (NT), rotary tillage (RT), and deep tillage (DT) with straw return (S) are commonly implemented. The objective of this study was to evaluate the spatial distribution of POM within aggregates in Shajiang black soil under various straw return practices. 【Method】 The six-year field experiment was conducted using X-ray CT technology and machine learning. The soil aggregates (6–8 mm in diameter) were collected from depths of 0–10, 10–20, and 20–40 cm. POM is divided into two parts: fresh residue and old POM, based on its morphological characteristics. 【Results】 Overall, the POM within aggregates was primarily composed of fresh residues, comprising 76.4% to 87.0% across various soil layers under three different straw return practices. The distribution ratio of fresh residues in connected pores ranged from 0.266 to 0.788, while the distribution ratio of old POM varied between 0.177 and 0.569. There was a substantial quantity of POM was distributed within aggregates under NTS treatment in the 0–10 cm soil layer. Fresh residues and old POM were primarily distributed in the connected pores, with the proportions of 0.788 and 0.569, respectively. In the 20–40 cm soil layer, POM volume density within aggregates was highest under DPS treatment among all the treatments. Specifically, the proportions of fresh residue and aged POM distributed in the connected pores were 0.729 and 0.536, respectively. In comparison to the RTS treatment, the NTS led to a significant change in both the total POM volume density and fresh residue volume density by 54.4% and 56.7% within the 0–10 cm soil layer ($P<0.05$), respectively. Additionally, the NTS treatment resulted in a 25.5% increase in the proportion of fresh residues in connected pores and a remarkable 96.4% increase in its volume density ($P<0.05$). Furthermore, the DPS treatment resulted in a reduction of 37.4% in total POM and 40.4% in fresh residue volume density within the 0–10 cm soil layer ($P<0.05$). However, there were no significant differences observed in the total POM volume density, porosity ($>16\ \mu\text{m}$), or connected porosity of the aggregates among the NTS, RTS and DPS treatments within the 10–20 cm soil layer ($P>0.05$). Compared with the RTS, the DPS treatment led to a significant increase in the total POM volume density by 2.78 times within the 20–40 cm soil layer, with the fresh residue and old POM volume density increasing by 3.10 and 1.72 times ($P<0.05$), respectively. Additionally, the DPS treatment significantly increased the porosity of aggregates ($>16\ \mu\text{m}$) and connected porosity by 74.2% and 142.8% within the 20–40 cm soil layer ($P<0.05$), while it increased the fresh residue volume density and old POM volume density in the connected pores by 9.41 times and 7.96 times ($P<0.05$), respectively. 【Conclusion】 The substantial increase in POM volume density within aggregates primarily stems from a significant rise in fresh residue volume density observed in the topsoil (0–10 cm) under no-tillage, as well as in the deeper soil (20–40 cm) following deep ploughing with straw incorporation. Connected pores serve as pivotal reservoirs for the storage and transformation of fresh residue through decomposition processes. Our findings suggest that deep tillage promotes the formation of connected pores and POM accumulation in the deeper soil layers, which is significant for improving agricultural soil quality and soil carbon sequestration in Shajiang black soil.

Key words: Aggregate; Particulate organic matter; Pore; Shajiang black soil; Deep ploughing with straw incorporation; XCT scanning

土壤有机质 (Soil organic matter, SOM) 是土壤肥力形成的物质基础, 其含量高低、质量好坏直接或间接决定土壤质量, 进而显著影响作物高产稳产^[1]。土壤有机质 (SOM) 可以分为颗粒态有机质 (Particulate organic matter, POM) 和矿物结合态有机质 (Mineral-associated organic matter, MAOM)^[2]。虽然 POM 具有比重小 ($<1.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、颗粒大 ($53 \sim 2\,000 \mu\text{m}$)、C/N 比高 ($10 \sim 40$)、周转快 (几年至几十年)、易被微生物分解的特征, 对土壤管理变化的响应更为敏感, 是 SOM 最活跃的组分, 但大部分 POM 仍能稳定地被闭蓄在团聚体内^[2-4]。因此, 深入解析团聚体对 POM 的物理保护作用, 对提高耕地质量具有重要意义。

团聚体内 POM 对不同秸秆还田方式的响应存在差异。许多研究表明免耕还田能够显著提高表层土壤团聚体 POM 含量^[5-6]。与旋耕还田相比, 严昌荣等^[7]报道免耕还田使褐土 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层 POM 含量提高了 15%, 但 $10 \sim 40 \text{ cm}$ 土层并没有明显增加; 丁天宇等^[8]发现深翻还田使砂姜黑土 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层 POM 含量降低了 35.0%, 使 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层 POM 含量增加了 116%。王楠楠等^[9]与免耕还田相比, 深翻还田使草甸土 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 和 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 土层团聚体内 POM 含量降低了 51.3% 和 37.6%。上述研究多聚焦在 POM 含量的变化, 有关秸秆还田方式对团聚体内 POM 空间分布信息的影响鲜有报道。

传统定量 POM 多采用密度与颗粒联合分组的方法来间接实现^[4], 破坏了样品完整性, 无法分析空间结构特征。近年来, 高分辨率 X 射线 CT 技术 (XCT) 结合先进的图像分析为解决这一问题提供了理想的手段。POM 的来源多种多样, 其尺寸、形状特征存在较大的差异。Elyeznasni 等^[10]利用 X 射线 CT 技术能够分离出秸秆残体等体积较大的有机物质, 但是无法对分解程度较高的旧 POM 进行准确识别。为了增加 POM 与土壤固相之间的灰度值差异, Peth 等^[11]提出了铁染色 POM, 通过识别图像中铁的位置进而分析 POM 在团聚体内的空间分布; 但是, 染色的浓度和信号强度以及样品尺寸对检测结果均产生较大影响; 其次, 铁蒸气有剧毒, 限制了进一步拓展 POM 的研究。为此, Kravchenko 等^[12]综合考虑 POM 的形状、尺寸和灰度值范围, 结合地统计法对 POM 进一步判别分析和分割, 但是易产生错误分类。最近,

Schlüter 等^[13]首次利用机器学习从 CT 扫描图像中分离出新鲜残体和旧 POM, 为量化团聚体内 POM 空间分布信息提供了新的手段。

团聚体孔隙结构直接决定了水分运移和气体交换, 在 POM 累积或转化过程中起到了重要作用^[2-3]。Kravchenko 等^[14]报道 $4 \sim 6 \text{ mm}$ 团聚体内 POM 分解量与 $>13 \mu\text{m}$ 孔隙呈显著正相关性。而 Liang 等^[15]发现 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 孔隙度与 POM 呈负相关性, 表明这些孔隙不利于 POM 的积累。Wang 和 Hu^[16]发现 POM 含量与团聚体孔隙数量呈显著负相关性, 大量小孔隙 ($<30 \mu\text{m}$) 限制了 POM 积累。新鲜植物残体进入团聚体后, 迅速成为微生物分解的热点, 孔隙通过影响微生物活性间接决定其矿化过程; 而旧 POM 与土壤基质结合、矿化程度高, 受孔隙影响小^[9, 17-18]。连通性孔隙水气运移状况良好, 位于连通性孔隙中的新鲜残体分解转化速率更快, 其分解后能够促进土壤基质中旧 POM 的累积^[13]。上述研究虽然探究了团聚体内孔隙大小与 POM 之间的关系, 但是团聚体内新鲜残体、旧 POM 在连通性孔隙中的空间分布特征尚不清楚。

秸秆作为重要的外源有机物料, 对提升土壤有机质、促进团聚结构形成和提高作物产量具有重要作用^[19]。砂姜黑土是中国典型的中低产田土壤类型之一, 有机质含量低且团聚结构形成难, 严重影响作物生长^[20-21]。淮北平原砂姜黑土区普遍实行冬小麦-夏玉米轮作制度, 秸秆资源量巨大, 秸秆直接原位还田是秸秆综合利用的主要途径。目前, 直接还田的方式主要有: 免耕覆盖还田、浅旋耕还田、深耕翻埋还田。当地农民普遍采用旋耕还田方式, 但是长期旋耕导致耕层变浅、犁底层容重增加, 探究适宜的秸秆还田方式对于土壤结构改良具有重要意义。不同还田方式对土壤团聚作用的影响不同, 促进形成不同结构的土壤团聚体, 团聚体内新、旧 POM 在连通性孔隙中的空间分布特征可能存在显著差异。目前, 由于 CT 图像中 POM 分割技术的限制, 原位分析团聚体内 POM 与孔隙结构的关系仍不清楚。因此, 本研究基于砂姜黑土连续 6 年耕作还田定位试验, 利用机器学习结合 XCT 扫描技术, 探究不同秸秆还田方式对不同土层 ($0 \sim 10 \text{ cm}$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$) 团聚体内 POM 空间分布以及孔隙特征的影响, 以期优选培肥改良砂姜黑土的秸秆还田方式提供一些理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

砂姜黑土秸秆还田与耕作定位试验于 2015 年 10 月在安徽龙亢农场建立 (33°32' N, 115°59' E)。采样区域属于暖温带半湿润季风气候, 年均气温 14.8 °C, 年均降水量 900 mm。土壤类型为河湖相石灰性沉积物发育的砂姜黑土, 含砂粒 8.0%、粉粒 54.1%、黏粒 37.9%。试验开始前, 耕层土壤容重为 1.35 g·cm⁻³, 有机碳 11.5 g·kg⁻¹, 全氮 1.29 g·kg⁻¹, 全磷 0.39 g·kg⁻¹, 全钾 7.91 g·kg⁻¹, 碱解氮 146 mg·kg⁻¹, 有效磷 18.9 mg·kg⁻¹, 速效钾 162 mg·kg⁻¹, pH 为 7.24。

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计, 共设置免耕还田 (NTS), 旋耕还田 (RTS) 和深翻还田 (DPS) 3 个处理, 3 次重复, 共 9 个小区, 小区面积为 80 m² (10 m × 8 m)。作物体系为冬小麦-夏玉米轮作, 小麦 (6 月) 和玉米 (10 月) 收获后全量粉碎还田。三种秸秆还田方式具体如下: (1) 免耕还田 (NTS)。全年不耕作, 玉米和小麦收获后秸秆粉碎覆盖在土壤表层, 采用中国农业大学研制的免耕播种机一次性完成播种和镇压作业。(2) 旋耕还田 (RTS)。玉米收获后秸秆粉碎还田, 采用 1GKN-200H 型旋耕机旋耕 2 遍, 作业深度 15 cm; 小麦收获后秸秆粉碎覆盖还田并进行免耕播种。(3) 深翻还田 (DPS)。玉米收获后秸秆粉碎还田, 采用 1LFT-435 型翻转犁进行 25~30 cm 深翻作业, 并浅旋 10 cm 以打碎大土块; 小麦收获后秸秆粉碎覆盖还田并进行免耕播种。试验地施用的化肥为尿素、过磷酸钙和氯化钾, 每季基肥施用量 N、P₂O₅、K₂O 分别为 100 kg·hm⁻²、60 kg·hm⁻²、90 kg·hm⁻², 小麦、玉米拔节期各追施 N 110 kg·hm⁻²。

1.3 样品采集

在 2021 年 9 月下旬玉米收获时采集土壤样品。在玉米行间随机采集 3 层 (0~10、10~20 和 20~40 cm) 混合土样带回实验室, 风干, 过 8 mm 筛, 在每个处理原状小块土中选取 1 个形状近似球体、直径为 6~8 mm 的团聚体用于 XCT 扫描。

1.4 XCT 扫描与图像处理

利用 XCT (Phoenix Nanotom, Germany) 扫描

土壤团聚体, 扫描电压为 100 kV, 电流为 100 μA, 每个团聚体在样品台匀速旋转 360°以采集图像, 图像分辨率为 8 μm, 利用 Datos | x2 Rec 软件进行图像重建, 得到 8 位灰度图像, 存储为 tiff 格式。

将图像导入到 Image J 软件中, 首先调节图像亮度和对比度以增强图像, 并利用非局部均值滤波器进行降噪。在 VG Studio MAX 2022 软件中利用自适应矩形工具 (等值为 128, 深度为 2) 裁剪团聚体以去除团聚体外部图像对分割过程的干扰。在 Image J 软件利用全局阈值分割法将灰度图像分割为孔隙和土壤固相两部分^[22]。在 Image J 软件计算团聚体孔隙度 (>16 μm)、连通孔隙度。孔隙度是基于 XCT 图像得到的孔隙 (>16 μm) 体积占团聚体总体积的百分比, 本研究中识别的最小孔径为 16 μm。利用 “Purify” 插件得到最大孔隙网络, 即连通性孔隙^[23]。连通孔隙度 (ϕ_c , %) 定义为:

$$\phi_c = V_c / V_a \times 100 \quad (1)$$

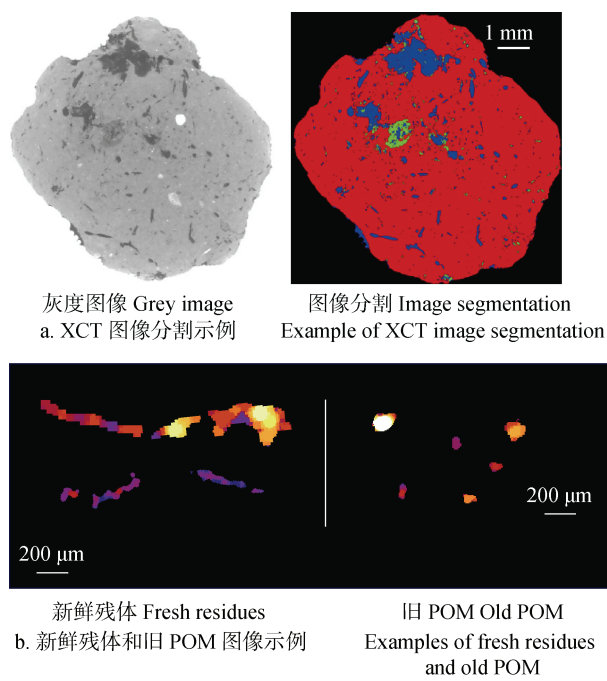
式中, ϕ_c 表示连通孔隙度 (%), V_c 表示连通性孔隙体积 (cm³), V_a 表示团聚体总体积 (cm³)。

Ilastik 是一款基于机器学习的图像分析开源软件^[24], 可完成 POM 分割, 其像素分类流程借助随机森林分类器, 识别特征为图像的灰度值及梯度、纹理信息。通过人为标注完成对 POM、孔隙度和土壤基质三种材料的分类, 分类器根据标注完成对所有图像的训练与分割 (图 1a)。将 POM 类别导入 Fiji 软件中, 利用 “MorphoLibj” 插件^[25]中 “Connected Components Labeling” 对每个 POM 添加标签, 利用 “Analyze Regions 3D” 计算出每个 POM 的特征参数, 筛选出体积大于 $1.28 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ (250 个体素) 的 POM。根据以下特征参数将 POM 分为新鲜残体和旧 POM 两部分^[13]: 体积、团块性、紧密性、球形度和板状性 (表 1)。这些特征反映了 POM 分解状态和破碎程度, 进入到土壤中的新鲜残体不断分解, 形成较为稳定的旧 POM。新鲜残体以未分解或半分解的根系、叶片、秸秆为主, 呈纤维状或板状; 旧 POM 分解程度较高, 呈紧密球状 (图 1b)^[10, 13]。在 0~10 cm 土层免耕还田处理中随机选取一个团聚体, 从 8 803 个 POM 对象中挑选出 914 个, 在目视检查后被手动分配为新鲜残体和旧 POM, 使用随机森林分类器进行分类和预测: 将预先分配的 914

个 POM 样本分为数据训练集（640 个样本）和验证集（274 个样本），采用决策树数量为 100 随机森林分类器对数据训练集进行分类训练，在数据验证集上对所构建的分类器进行评估，错误率为 2.68%，然后将该算法应用于整个数据集。分类结果通过“MorphoLibj”插件中“Assign Measure to Label”与图像标签绑定，以实现不同 POM 种类的图像分割。连通性孔隙和新、旧 POM 分布三维可视化通过 VG Studio Max 2022 软件获得。POM 体积密度（POM volume density, $\text{mm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ）定义为^[26]：

$$C_{\text{POM}} = V_{\text{POM}}/V_{\text{a}} \tag{2}$$

式中， C_{POM} 表示 POM 体积密度， V_{POM} 表示基于图像分割得到的 POM 体积（ mm^3 ）。



注：图 a 中红色、蓝色和绿色区域分别表示土壤基质、孔隙和 POM。Note: The red, blue and green areas indicate the soil matrix, pore space and POM in Figure a, respectively.

图 1 图像分割和 POM 分类
Fig. 1 Image segmentation and POM classification

为研究 POM 在连通性孔隙中的比例，利用 Image J 软件的 min 算法获得新鲜残体、旧 POM 与连通性孔隙相交的图像，计算相交部分的体积。

新鲜残体（或旧 POM）在连通性孔隙中的体积密度（ C , $\text{mm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ）计算如下：

$$C = V_{\text{CPOM}}/V_{\text{a}} \tag{7}$$

表 1 用于随机森林分类的 POM 特征参数

Table 1 Morphological traits of POM objects used for random forest classification			
特征 Trait	定义 Definition	特征 Trait	定义 Definition
团块性 Blobbiness	$R_3/\sqrt{R_2R_1}$ (3)	球形度 Sphericity	$36\pi V^2/A^3$ (5)
紧密性 Compactness	$V/\frac{4}{3}\pi R_1R_2R_3$ (4)	板状性 Plateness	$ R_2 / R_1 $ (6)

注：图像中每个 POM 被等效惯性的椭球体替代， R_1 、 R_2 、 R_3 分别表示椭球体的三个半径，其中 $R_1>R_2>R_3$ 。 S 和 A 分别为每个 POM 实际表面积和实际体积。Note: Each POM in the images is replaced by an ellipsoid of equivalent inertia. R_1 , R_2 , and R_3 denote the three radii of the ellipsoid, where $R_1>R_2>R_3$. S and A are the real surface area and real volume of each POM, respectively.

式中， V_{CPOM} 表示鲜残体（或旧 POM）在连通性孔隙中的体积（ mm^3 ）。

新鲜 POM（或旧 POM）在连通性孔隙中的比例（ P ）计算如下：

$$P = C/C_{\text{POM}} \tag{8}$$

式中， C_{POM} 表示团聚体中新鲜 POM（或旧 POM）体积密度（ $\text{mm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ）。

1.5 数据处理与分析

利用 SPSS 21.0 软件进行统计分析，采用最小显著差异法进行多重比较，检验各处理间数据差异，显著性水平为 0.05。

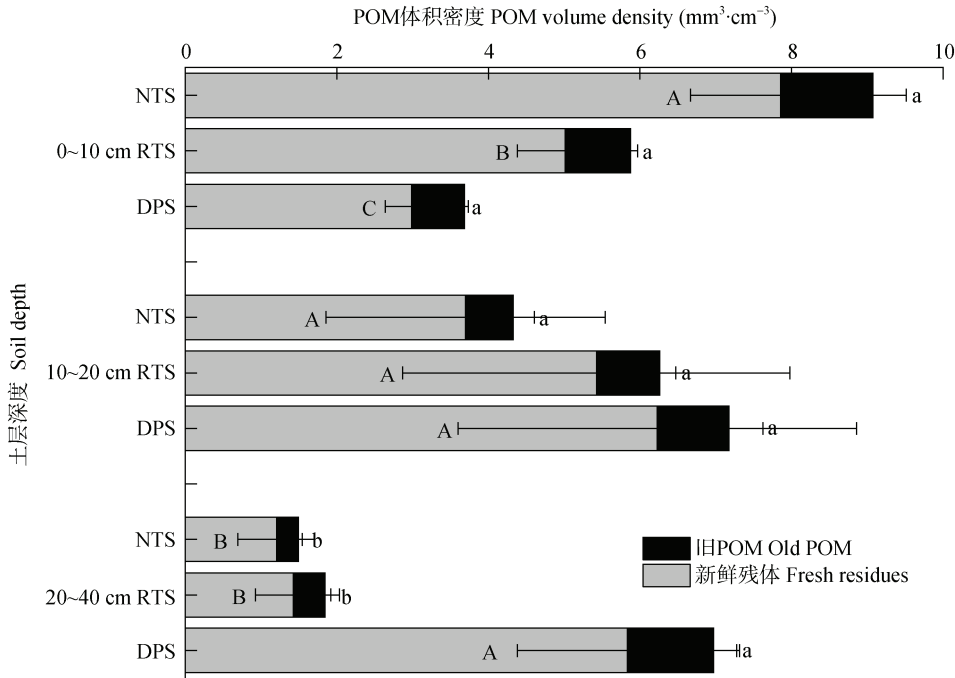
2 结 果

2.1 不同秸秆还田方式下砂姜黑土团聚体 POM 体积密度

由图 2 可知,不同秸秆还田方式处理下 POM 体积密度在土层中的垂直分布存在差异。整体而言，三种秸秆还田处理下各土层中团聚体内 POM 以新鲜残体为主，占 76.4%~87.0%。针对 POM 体积密度而言，0~10 cm 土层中免耕还田处理下总 POM 体积密度均高于旋耕还田和深翻还田,然而,在 10~

20 cm 和 20~40 cm 土层中,深翻还田处理下总 POM 体积密度高于免耕还田和旋耕还田。具体而言,与旋耕还田相比,免耕还田使 0~10 cm 土层总 POM 体积密度显著提高了 54.4%,其中新鲜残体体积密度显著提高了 56.7% ($P<0.05$),而深翻还田使 0~10 cm 土层中总 POM 体积密度降低了 37.4%,其中

新鲜残体体积密度显著降低了 40.4% ($P<0.05$); 0~10 cm 土层中各处理下旧 POM 体积密度无显著性差异 ($P>0.05$)。在 20~40 cm 土层中,与旋耕还田相比,深翻还田使团聚体内总 POM、新鲜残体、旧 POM 体积密度分别显著提高了 2.78 倍、3.10 倍和 1.72 倍 ($P<0.05$)。



注: NTS、RTS 和 DPS 分别代表免耕还田、旋耕还田和深翻还田;不同大、小写字母表示同一土层不同秸秆还田方式处理下新鲜残体、旧 POM 体积密度存在显著性差异 ($P<0.05$)。Note: NTS, RTS, and DPS refer to no-tillage, rotary-tillage, and deep ploughing with straw return, respectively. Different uppercase and lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) in fresh residues and old POM volume density under different straw return practices in the same soil layer.

图 2 基于 XCT 图像获得的不同秸秆还田方式下各土层团聚体内新鲜残体和旧 POM 体积密度

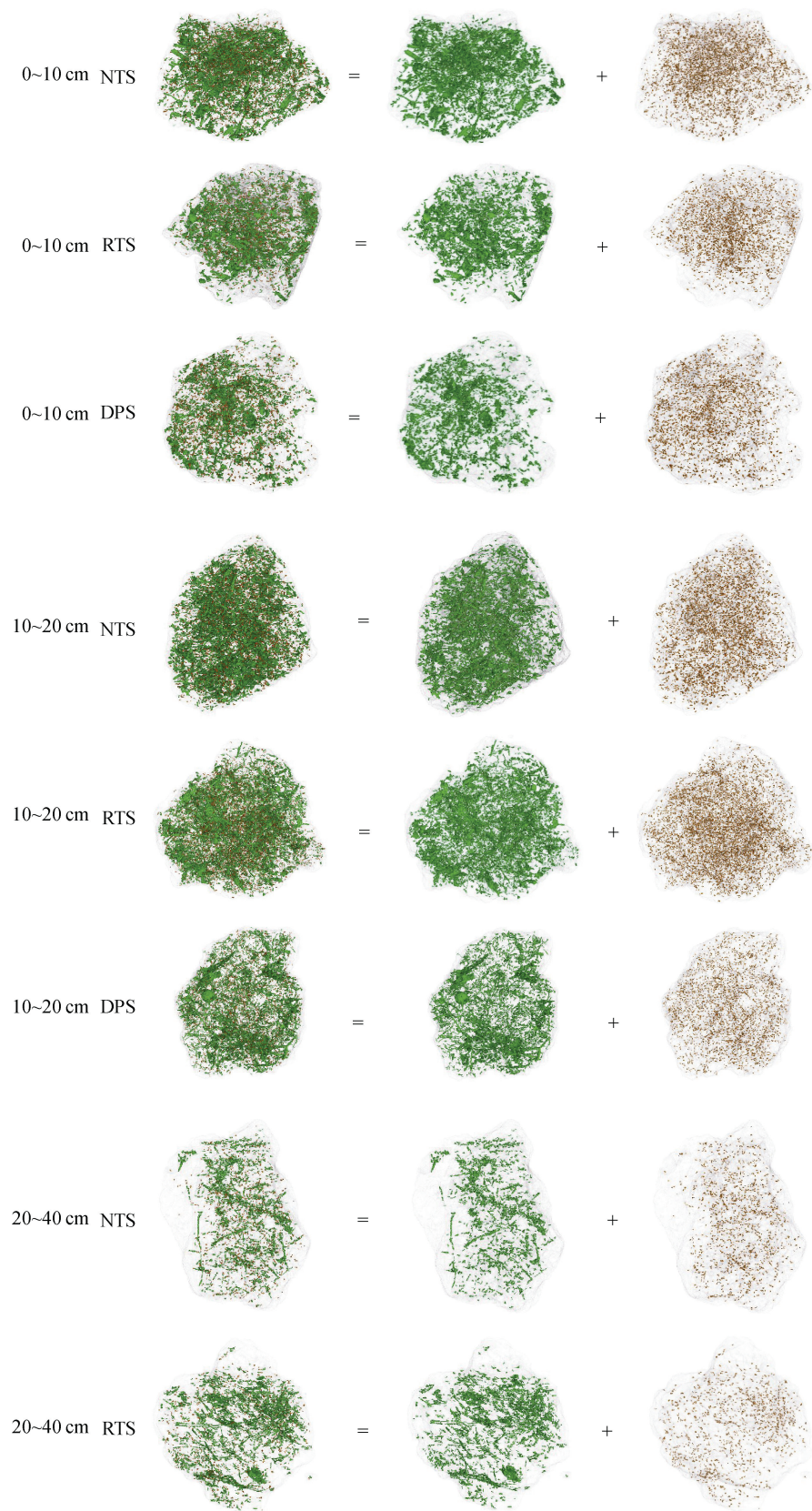
Fig. 2 Fresh residue and old POM volume density of aggregates in various soil layers under different straw return practices based on XCT images.

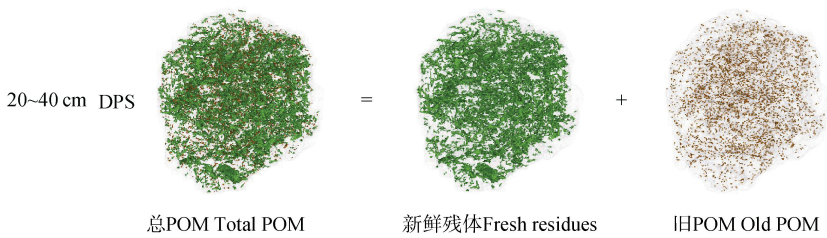
从三维图像来看(图 3),免耕还田和旋耕还田处理下团聚体内 POM 体积密度主要集中在 0~20 cm 土层。在 20~40 cm 土层中,免耕还田和旋耕还田处理下 POM 体积密度显著降低,且存在部分半分解或未分解的根系;深翻还田处理下团聚体内 POM 主要集中在 20~40 cm 土层,以半分解的作物秸秆和植物根系为主。

2.2 不同秸秆还田方式下砂姜黑土团聚体孔隙特征

整体而言(图 4),在 0~20 cm 土层中,不同秸秆还田方式下团聚体孔隙度($>16\text{ }\mu\text{m}$)未表现显著性差异 ($P>0.05$)。在 20~40 cm 土层中,相较于旋耕还田,深翻还田团聚体孔隙度显著提高了

74.2% ($P<0.05$)。与 0~10 cm 土层相比,免耕还田处理下 0~10 cm 土层团聚体连通孔隙度显著高于 20~40 cm 土层 ($P<0.05$),而深翻还田处理下 0~10 cm、10~20 cm 和 40~40 cm 土层中连通孔隙度无显著性差异 ($P>0.05$)。在 20~40 cm 土层中,与旋耕还田相比,深翻还田使连通孔隙度提高了 143% ($P<0.05$)。从三维孔隙来看(图 5),在 0~10 cm 土层中 3 种还田处理下连通性孔隙均遍布在整个团聚体中,孔隙较为复杂;免耕还田处理下 10~20 cm 和 20~40 cm 土层以根系穿插导致的生物孔隙为主;在 20~40 cm 土层中,深翻还田处理下连通性孔隙分布在整个团聚体中,管状生物孔隙较少。

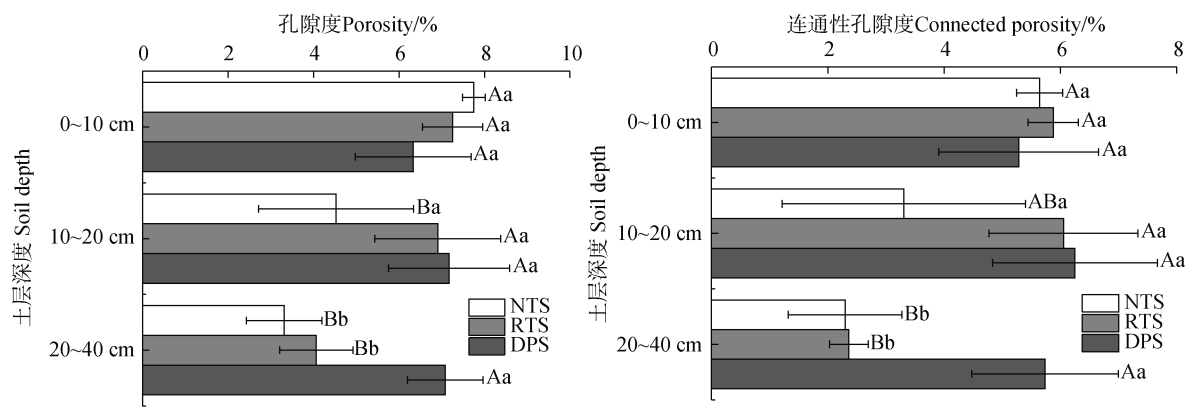




NTS—免耕还田 No-tillage with straw return; RTS—旋耕还田 Rotary-tillage with straw return; DPS—深翻还田 Deep ploughing with straw return. 注：绿色部分表示新鲜 POM，橙色部分表示旧 POM。团聚体直径为 6~8 mm。Note: The green part indicates fresh POM; and the orange part indicates old POM. The aggregate diameter is 6–8 mm.

图 3 不同秸秆还田方式下各土层团聚体总 POM、新鲜残体和旧 POM 的三维图像

Fig. 3 Three-dimensional images of total POM, fresh residues and old POM of soil aggregates under different straw return practices in various soil layers



注：不同大写字母表示同一秸秆还田方式不同土层存在显著性差异；不同小写字母表示同一土层不同秸秆还田方式处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。Note: Different uppercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) under different soil layers in the same straw return practice. Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) under different straw return practices in the same soil layer.

图 4 不同秸秆还田方式下各土层团聚体孔隙度和连通孔隙度

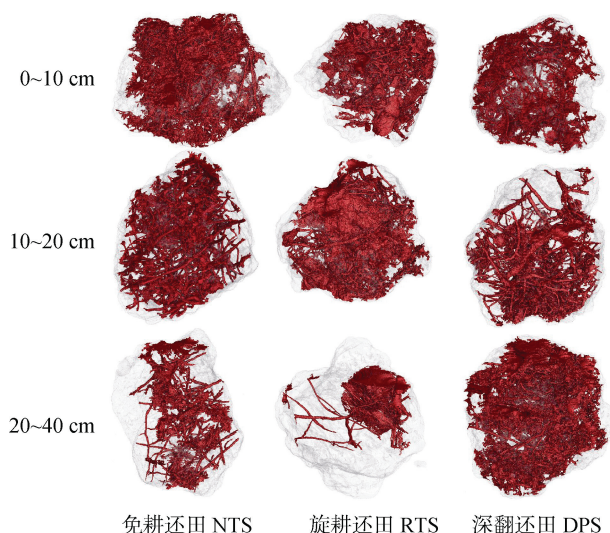
Fig. 4 Soil aggregate porosity and connected porosity under different straw return practices in various soil layers

2.3 砂姜黑土团聚体新、旧 POM 在连通性孔隙中的分布

由图 6 可知，连通性孔隙是 POM 分布的重要场所，其中新鲜残体分布比例为 0.266~0.788，旧 POM 分布比例为 0.177~0.569；在 0~10 cm 土层中，与旋耕还田相比，免耕还田和深翻还田分别使新鲜残体在连通性孔隙中的比例提高了 25.5% 和 24.1%，免耕还田使连通性孔隙中新鲜残体体积密度显著提高了 96.4% ($P < 0.05$)。在 20~40 cm 土层中，与旋耕还田相比，深翻还田使连通性孔隙中新鲜残体的比例和体积密度分别提高了 1.74 倍和 9.41 倍，使旧 POM 比例和体积密度分别提高了 2.02 倍和 7.96 倍 ($P < 0.05$)。

3 讨 论

本研究基于特征参数将 POM 分为新鲜残体和旧 POM 两部分，反映出 POM 不同分解状态^[10, 13]。其中，新鲜残体作为 POM 的主要成分，包含未分解或半分解的植物根系、秸秆、叶片等，易成为微生物分解的对象，对团聚体发育和孔隙形成具有重要作用^[2, 23]。本研究中，0~10 cm 土层中免耕还田处理下团聚体新鲜残体体积密度均高于旋耕还田和深翻还田处理 ($P < 0.05$, 图 2)，这是由于在免耕还田处理中，大量秸秆覆盖在土壤表层，未分解或半分解的作物秸秆为 POM 累积提供了重要来源^[27]；



注：图中红色部分表示连通性孔隙。Note: The red part indicates connected pores.

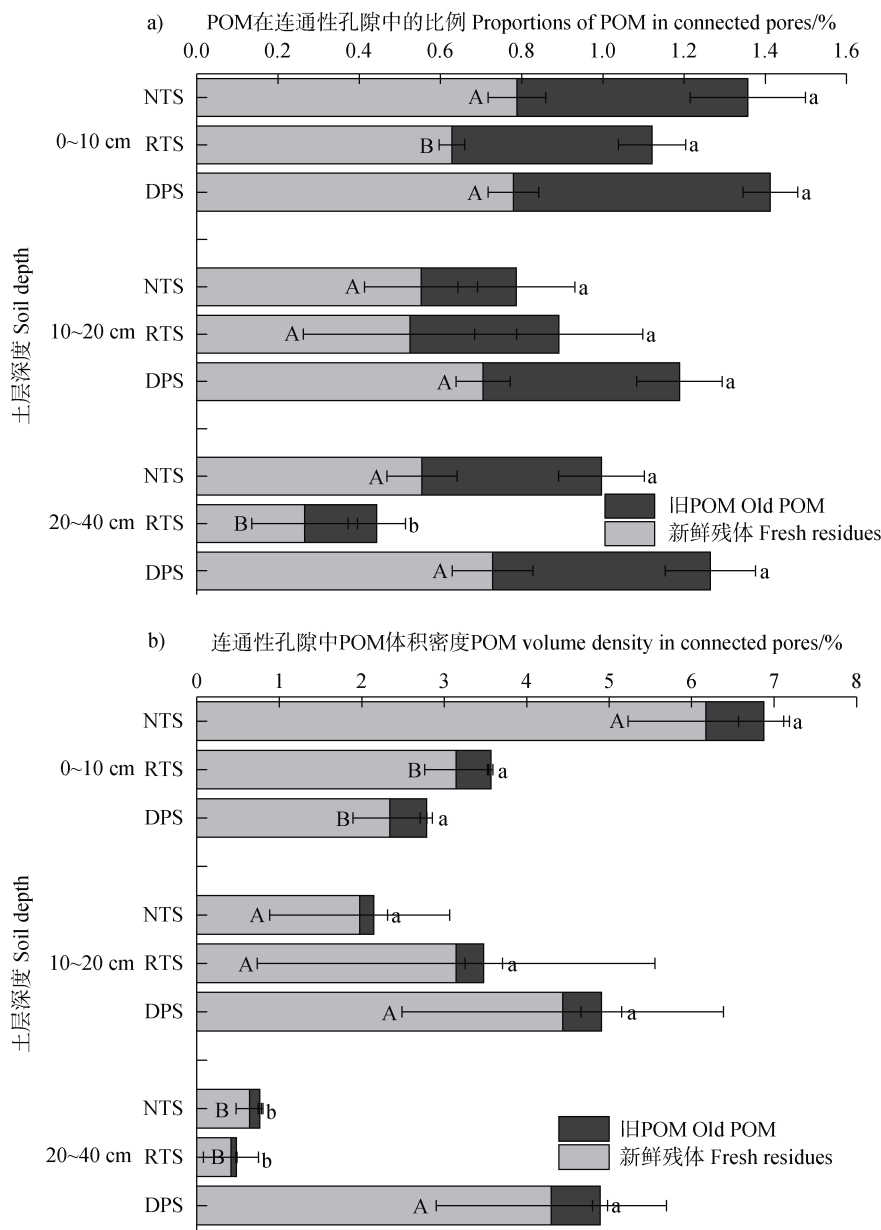
图 5 不同秸秆还田方式下各土层团聚体连通性孔隙网络的三维图像

Fig. 5 Three-dimensional images of soil-connected pore network of aggregates under different straw return practices in various soil layers

旋耕还田将部分秸秆旋至 10~20 cm 土层中，减少了表层土壤碳来源和新鲜残体数量；深翻将大量秸秆翻至 20~40 cm 土层中的同时，将犁底层土壤翻至表层，导致表层土壤团聚体内新鲜残体数量显著低于免耕还田。然而，三种还田方式处理下 0~10 cm 土层团聚体孔隙度无显著性差异 ($P>0.05$, 图 4)，主要是由于免耕还田处理下，积聚在表层的秸秆分解和作物根系穿插促进了团聚体发育和孔隙网络的形成^[28]；而旋耕还田和深翻还田处理下部分秸秆被转移至深层土壤中，导致表层秸秆量少于免耕还田，秸秆分解形成的孔隙数量有限，然而机械扰动促进了团聚体的破碎和形成，进而促进了大量孔隙结构的形成^[29]。在 20~40 cm 土层中，深翻还田处理下团聚体连通孔隙度和 POM 体积密度均显著高于免耕还田和旋耕还田 ($P<0.05$) (图 2、图 4)，这主要是因为长期免耕和旋耕致使犁底层土壤紧实度增加，孔隙空间不断减少，作物根系下扎受阻，深层土壤 (20~40 cm) 缺乏稳定的 POM 来源，团聚体的发育过程受阻^[30]。而深翻还田促进了 20~40 cm 土层团聚体结构发育和 POM 累积，新鲜残体和旧 POM 体积密度得到显著提升 (图 2、图 6、图 7) ($P<0.05$)，一方面是因为深翻打破犁底层促进了根系下

扎，同时将大量秸秆转移至深层土壤中，提高了团聚体中新鲜残体体积密度；此外，新鲜残体分解后，部分分解产物以旧 POM 的形式与土壤基质结合，促进了团聚体内旧 POM 的累积^[13]；另一方面机械翻转能够改善土壤结构，提高土壤通气导水能力，有利于促进秸秆和根系腐解产生新孔隙^[31]；且深层土壤中秸秆腐解和根系代谢分泌产生的胶结物促进了大团聚体的形成^[32-33] (图 7)。

团聚体物理保护是 POM 的主要保护机制，团聚体内部孔隙创造了物理微环境，在微生物、酶和 POM 之间形成物理屏障，导致微生物很难将 POM 分解^[3-4]。有研究发现，团聚体内 $<30\ \mu\text{m}$ 孔隙不利于 POM 的存储^[16]，Liang 等^[15]报道了 POM 与 10~100 μm 孔隙呈显著负相关，表明微小孔隙结构不利于 POM 累积。而在本研究中，连通性孔隙作为整体结构，遍布在整个团聚体中，在 POM 累积和分解转化过程中发挥了重要作用。新鲜残体分布在连通性孔隙中的比例高于旧 POM (图 6)，表明连通性孔隙是新鲜残体分解转化的重要场所，而大量旧 POM 与土壤基质或小孔隙紧密结合，受到团聚体的物理封锁而保持稳定^[10, 13]。长期秸秆还田是促进团聚体 POM 累积和连通性孔隙结构形成的重要措施。新鲜的秸秆残体 C/N 比高，容易成为真菌和其他微生物生长的热点^[18]，微生物分解产生的有机酸、多糖和其他凝胶状物质与秸秆中的木质素等充当为胶结剂^[5]，使真菌菌丝、残体碎屑、土壤颗粒等结合在一起形成团聚体^[34-35]。随着团聚化程度的提高，大量植物残体、颗粒有机质碎屑被包裹在团聚体内部，这一过程伴随着大量新孔隙的形成。一方面，团聚体内部孔隙为这些新鲜 POM 提供储存场所；另一方面，新鲜残体分解和二氧化碳释放均有助于团聚体内部连通性孔隙的形成^[14, 36-37] (图 7)。团聚体内 POM 含量取决于碳投入量与现有 POM 分解量之间的平衡，易受到微生物活性的影响，连通性孔隙结构通过调节水分运输和气体交换，间接影响新鲜残体分解转化为旧 POM 过程^[13]。而作物秸秆作为重要碳来源，能够及时补充团聚体内矿化的新鲜残体。因此，在长期秸秆还田条件下，POM 和孔隙之间的互馈作用决定了团聚体的发育状况，合理利用秸秆资源对于土壤结构改善具有重要意义。在未来的研究中需关注不同粒级团聚体孔隙与 POM 动态转化过程之间的关系，以进一步探究团聚体的物理保护机制。



注：比例表示在连通性孔隙中的新鲜残体（旧 POM）占新鲜残体（旧 POM）总量的比例。不同大、小写字母表示同一土层不同秸秆还田方式处理下新鲜残体、旧 POM 体积密度在连通性孔隙中的比例或体积密度存在显著性差异（ $P < 0.05$ ）。 Note: The proportions indicate the proportion of fresh residues (old POM) to total fresh residues (old POM) in the connected pores. Different uppercase and lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) in the proportion or volume density of fresh residue and old POM in the connected pores for different straw return practices in the same soil layer.

图 6 不同秸秆还田方式下各土层新鲜残体和旧 POM 在连通性孔隙中的比例和体积密度
Fig. 6 Proportions and volume density of fresh residues and old POM in connected pores of aggregates under different straw return practices in various soil layers

4 结 论

本研究通过连续 6 年秸秆还田定位试验，发现不同秸秆还田方式对砂姜黑土不同土层团聚体内新、旧 POM 空间分布影响显著：免耕还田处理下秸

秆主要覆盖在土壤表层，秸秆分解提高了表层团聚体总 POM 体积密度、新鲜残体体积密度，但深层（20~40 cm）土壤缺乏有机碳来源，不利于团聚体的发育；而深翻将表层的秸秆翻入至深层土壤中，显著提高了 20~40 cm 土层团聚体内新鲜残体和旧

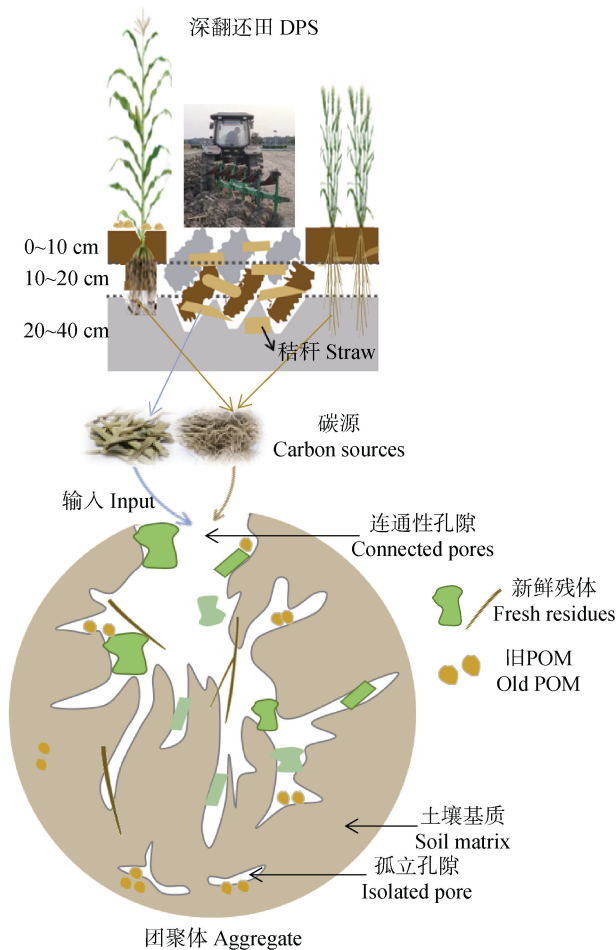


图 7 深翻还田处理下土壤团聚体物理保护机制概念图

Fig. 7 Conceptual diagram of the physical protection mechanism of soil aggregates under deep ploughing with straw return

POM 体积密度, 并改善了孔隙结构; 新鲜残体构成了 POM 的主要成分, 连通性孔隙是新鲜残体存储和分解转化的重要场所; 综上所述, 深翻还田能够有效促进深层 (20~40 cm) 土壤团聚体连通性孔隙网络的形成和 POM 累积, 对于土壤质量提升具有重要作用。

参考文献 (References)

- [1] Xu M G, Zhang X B, Sun N, et al. Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23 (6): 1441—1449. [徐明岗, 张旭博, 孙楠, 等. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (6): 1441—1449.]
- [2] Lavalley 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.
- [3] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32 (14): 2099—2103.
- [4] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66 (6): 1981—1987.
- [5] Li J, Wu H J, Wu X P, et al. Long-term conservation tillage enhanced organic carbon and nitrogen contents of particulate organic matter in soil aggregates[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54 (2): 334—344. [李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期免耕和深松提高了土壤团聚体颗粒态有机碳及全氮含量[J]. 中国农业科学, 2021, 54 (2): 334—344.]
- [6] Wu L J, Qi C, Yan Q Y, et al. Effects of tillage methods on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen fractions in dryland wheat fields[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41 (2): 193—200, 220. [吴林甲, 祁琛, 闫秋艳, 等. 耕作方式对旱地麦田土壤团聚体及其碳氮组分分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41 (2): 193—200, 220.]
- [7] Yan C R, Liu E K, He W Q, et al. Effect of different tillage on soil organic carbon and its fractions in the Loess Plateau of China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010 (6): 58—63. [严昌荣, 刘恩科, 何文清, 等. 耕作措施对土壤有机碳和活性有机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010 (6): 58—63.]
- [8] Ding T Y, Guo Z C, Qian Y Q, 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, 2023, 39 (16): 71—78. [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.]
- [9] Wang N N. Effects of different tillage methods and straw returning on soil aggregates and organic carbon[D]. Daqing, Heilongjiang: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023. [王楠楠. 不同耕作方式和秸秆还田对土壤团聚体及有机碳的影响[D]. 黑龙江大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023.]
- [10] Elyeznasni N, Sellami F, Pot V, et al. Exploration of soil micromorphology to identify coarse-sized OM assemblages in X-ray CT images of undisturbed cultivated soil cores[J]. Geoderma, 2012, 179: 38—45.
- [11] Peth S, Chenu C, Leblond N, et al. Localization of soil organic matter in soil aggregates using synchrotron-based X-ray microtomography[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 78: 189—194.

- [12] Kravchenko A N, Negassa W, Guber A K, et al. New approach to measure soil particulate organic matter in intact samples using X-ray computed microtomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78 (4): 1177—1185.
- [13] Schlüter S, Leuther F, Albrecht L, et al. Microscale carbon distribution around pores and particulate organic matter varies with soil moisture regime[J]. *Nature Communications*, 2022, 13 (1): 2098.
- [14] Kravchenko A N, Negassa W C, Guber A K, et al. Protection of soil carbon within macro-aggregates depends on intra-aggregate pore characteristics[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16261.
- [15] Liang A Z, Zhang Y, Zhang X P, et al. Investigations of relationships among aggregate pore structure, microbial biomass, and soil organic carbon in a Mollisol using combined non-destructive measurements and phospholipid fatty acid analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 94—101.
- [16] Wang R Z, Hu X. Pore structure characteristics and organic carbon distribution of soil aggregates in alpine ecosystems in the Qinghai Lake Basin on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Catena*, 2023, 231: 107359.
- [17] Kravchenko A N, Guber A K. Soil pores and their contributions to soil carbon processes[J]. *Geoderma*, 2017, 287: 31—39.
- [18] Schlüter S, Eickhorst T, Mueller C W. Correlative imaging reveals holistic view of soil microenvironments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53 (2): 829—837.
- [19] Islam M U, Guo Z C, Jiang F H, et al. Does straw return increase crop yield in the wheat-maize cropping system in China? A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2022, 279: 108447.
- [20] Rahman M T, Liu S, Guo Z C, et al. Impacts of residue quality and N input on aggregate turnover using the combined ^{13}C natural abundance and rare earth oxides as tracers[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 189: 110—122.
- [21] Xiong P, Guo Z C, Li W, et al. Regional analysis of maize yield and physiochemical properties of Shajiang black soil (vertisol) in Huaibei Plain[J]. *Soils*, 2021, 53 (2): 391—397. [熊鹏, 郭自春, 李玮, 等. 淮北平原砂姜黑土玉米产量与土壤性质的区域分析[J]. *土壤*, 2021, 53 (2): 391—397.]
- [22] 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.]
- [23] Bucka F B, Kölbl A, Uteau D, et al. Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils[J]. *Geoderma*, 2019, 354: 113881.
- [24] Berg S, Kutra D, Kroeger T, et al. Ilastik: Interactive machine learning for (bio) image analysis[J]. *Nature Methods*, 2019, 16: 1226—1232.
- [25] Legland D, Arganda-Carreras I, Andrey P. MorphoLibJ: Integrated library and plugins for mathematical morphology with ImageJ[J]. *Bioinformatics*, 2016, 32 (22): 3532—3534.
- [26] Schlüter S, Roussety T, Rohe L, et al. Land use impact on carbon mineralization in well aerated soils is mainly explained by variations of particulate organic matter rather than of soil structure[J]. *Soil*, 2022, 8 (1): 253—267.
- [27] Gao H J, Peng C, Zhang X Z, et al. Effects of different straw returning modes on characteristics of soil aggregates in chernozem soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (1): 75—79. [高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33 (1): 75—79.]
- [28] Tian K, Yang C H, Wu J D, et al. Effects of no-tillage on soil carbon composition and physical and chemical properties in different wheat-maize rotation fields[J]. *Soils*, 2024, 56 (2): 342—349. [田琨, 杨彩红, 吴建东, 等. 免耕对不同麦玉轮作农田土壤碳组分及理化性质的影响[J]. *土壤*, 2024, 56 (2): 342—349.]
- [29] Qian Y Q, Xiong P, Wang Y K, et al. Effect of tillage practices on soil pore structure characteristics in Shajiang Black Soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 6 (1): 52—63. [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.]
- [30] Zhou J H, Chu J J, Sun W C, et al. Research progress on the effect of organic carbon on the formation of soil aggregates[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52 (11): 10—20. [周家昊, 褚军杰, 孙万春, 等. 有机碳对土壤团聚体形成的影响研究进展[J]. *河南农业科学*, 2023, 52 (11): 10—20.]
- [31] Dong J X, Cong P, Liu N, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (4): 921—934. [董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体

- 分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58 (4): 921—934.]
- [32] Song Y Y, Cao Y, Duan X Y, et al. Effects of different straw-returning depths on soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. Soils, 2022, 54 (2): 344—350. [宋依依, 曹阳, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2022, 54 (2): 344—350.]
- [33] Xia Z T, Cheng W W, Zhao J X, et al. Effects of different planting patterns on maize root system and soil aggregate stability[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30 (12): 2331—2338. [夏梓泰, 程伟威, 赵吉霞, 等. 不同种植模式对玉米根系及土壤团聚体稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30 (12): 2331—2338.]
- [34] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103 (2): 412—418.
- [35] Tan W F, Xu Y, Shi Z H, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (5): 1297—1308. [谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J]. 土壤学报, 2023, 60 (5): 1297—1308.]
- [36] De Gryze S, Jassogne L, Six J, et al. Pore structure changes during decomposition of fresh residue: X-ray tomography analyses[J]. Geoderma, 2006, 134 (1/2): 82—96.
- [37] Helliwell J R, Miller A J, Whalley W R, et al. Quantifying the impact of microbes on soil structural development and behaviour in wet soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 74: 138—147.

(责任编辑：檀满枝)