

DOI: 10.11766/trxb202201190027

钱泳其, 熊鹏, 张中彬, 郭自春, 邵芳荣, 彭新华. 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, ZHANG Zhongbin, GUO Zichun, SHAO Fangrong, PENG Xinhua. Effect of Tillage Practices on Soil Pore Structure Characteristics in Shajiang Black Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1): 52–63.

不同耕作方式对砂姜黑土孔隙结构特征的影响^{*}

钱泳其^{1, 2}, 熊鹏^{1, 2}, 王玥凯^{1, 2}, 张中彬¹, 郭自春¹, 邵芳荣³,
彭新华^{1, 2†}

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 安徽省农垦集团龙亢农场有限公司, 安徽怀远 233426)

摘要: 砂姜黑土黏闭僵硬问题突出, 耕作是改良其结构的重要措施之一。基于安徽龙亢农场砂姜黑土耕作试验基地, 采集免耕(No-tillage, NT)、旋耕(Rotary tillage, RT)和深翻(Deep ploughing, DP)处理的原状土柱(高 20 cm, 直径 10 cm), 利用 X 射线 CT 扫描技术和 ImageJ 软件等对土壤孔隙结构进行三维重建和可视化处理, 定量分析不同耕作方式对土壤孔隙度、孔径大小分布、孔隙形态特征、网络特征以及土壤饱和导水率的影响。结果表明: (1) 与免耕相比, 旋耕和深翻下土壤的大孔隙度分别增加了 192.7% 和 261.1% ($P < 0.05$); 与旋耕相比, 深翻下土壤大孔隙度增加了 23.4%; (2) 相较于免耕, 旋耕和深翻显著增加了土壤孔隙的水力半径、紧密度、分形维数和全局连通性($P < 0.05$), 显著降低了各向异性程度和欧拉数($P < 0.05$), 土壤饱和导水率得到显著提升, 且深翻的改良效果总体优于旋耕; (3) 相关分析表明土壤饱和导水率与除水力半径外的孔隙结构特征参数均存在显著相关($P < 0.05$), 其中与连通性最大孔隙度的相关性最高($r=0.833^{**}$, $P < 0.01$)。综上所述, 深翻扩大了土壤孔隙的水力半径, 改善了连通性, 提升了复杂程度, 从而构建了相对良好的土壤孔隙形态和网络结构, 提高了导水能力, 消减砂姜黑土结构性障碍效果显著。

关键词: 砂姜黑土; 深翻; CT 扫描技术; 孔隙结构; 饱和导水率

中图分类号: S152 **文献标志码:** A

Effect of Tillage Practices on Soil Pore Structure Characteristics in Shajiang Black Soil

QIAN Yongqi^{1, 2}, XIONG Peng^{1, 2}, WANG Yuekai^{1, 2}, ZHANG Zhongbin¹, GUO Zichun¹, SHAO Fangrong³,
PENG Xinhua^{1, 2†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Longkang Farm Co. Ltd, Anhui State Farms Group, Huaiyuan, Anhui 233426, China)

* 国家自然科学基金项目(41725004, 41930753)和江苏省自然科学基金资助项目(No. BK20201104)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41725004, 41930753), and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (No. BK20201104)

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

作者简介: 钱泳其(1997—), 男, 云南嵩明人, 硕士研究生, 主要从事土壤结构及水分运动模拟研究。E-mail: yqqian@issas.ac.cn

收稿日期: 2022-01-19; 收到修改稿日期: 2022-05-31; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-07-14

Abstract: 【Objective】Shajiang black soil is one of the major soil types with low or medium productivity in China and is mainly distributed in the Huai River North Plain. As the soil is high in clay content and its parent material is dominated by montmorillonite, it suffers from swelling/shrinkage, low infiltration and strong strength. Suitable tillage is widely considered an effective measure to improve soil structure. However, how tillage practice impacts the pore structure of Shajiang black soil is not clear. Therefore, the objective of this study was to assess the effect of different tillage practices on soil pore structure characteristics in Shajiang black soil. 【Method】Intact soil columns (20 cm height, 10 cm diameter) were sampled from three tillage treatments including no-tillage (NT), rotary tillage (RT) and deep ploughing (DP) at Longkang Farm in Anhui Province, and then were scanned using X-ray computed tomography at a voxel resolution of 60 μm , and followed by saturated hydraulic conductivity (K_s) measurement. After reconstruction of CT images, characteristics of soil macropore ($>60 \mu\text{m}$) morphology and networks were quantified with Image analysis. 【Result】Compared to no-tillage, rotary tillage and deep ploughing increased soil macroporosity by 192.7% and 261.1% ($P < 0.05$), respectively. Rotary tillage and deep ploughing significantly increased the hydraulic radius, compactness, fractal dimension and global connectivity of soil macropores ($P < 0.05$), but decreased the degree of anisotropy and Euler number ($P < 0.05$). The K_s was significantly improved under rotary tillage and deep ploughing. Deep ploughing improved soil structure and K_s better than rotary tillage did. A significant correlation was observed between K_s and macropore structure characteristic parameters ($P < 0.05$), in which the connected largest macroporosity was the highest ($r=0.833^{**}, P < 0.01$). 【Conclusion】Deep ploughing enhanced pore hydraulic radius, connectivity and complexity, built a good soil pore morphology and network structure and consequently improved hydraulic conductivity and reduced structural obstacles of Shajiang black soil.

Key words: Shajiang black soil; Deep ploughing; Computed tomography; Pore structure; Saturated hydraulic conductivity

砂姜黑土是一种典型的中低产土壤, 主要分布在我国的黄淮海平原, 面积约 400 万 hm^2 。该区地理位置优越、水热资源丰富、地势平坦, 是我国重要的粮食产区。然而, 砂姜黑土黏粒含量高, 黏土矿物以 2:1 型膨胀性蒙脱石为主, 遇水膨胀而黏闭, 失水龟裂而僵硬, 导致难耕难耙, 极大制约了作物生长^[1-3]。因此, 利用有效的耕作方式, 构建良好的砂姜黑土耕层结构, 对提升砂姜黑土耕地质量, 实现粮食增产增收具有重要的意义。

耕作能够有效改变土壤的孔隙结构, 改善土壤中水气的分布和运移, 进而对土壤的理化性质造成影响。由于不同的耕作方式对土壤的扰动程度不同, 因此对土壤的理化性质造成的影响也不同^[1]。当前我国农业生产中耕作方式主要包括免耕、旋耕、深松、深翻等。其中, 免耕对土壤的扰动最小, 加之有外源有机物的输入, 因此能够提高土壤孔隙的连通性和土壤的有机质含量, 从而提高土壤的保水能力^[4-6], 但是对黏性土壤而言, 长期免耕会造成土壤僵硬、排水不畅等问题^[7]。旋耕是目前农业生产中比较普遍的耕作方式, 能够有效疏松 0~15 cm 耕层土壤^[1], 但是连年旋耕会造成犁底层变硬上移、耕层变浅、通水透气性下降、作物减产等不良后果^[2]。

相较于旋耕, 深松则能够打破犁底层, 但是仅限于局部降低土壤容重和紧实度, 改善土壤结构效果有限^[8-10]。深翻较旋耕, 耕作深度一般能够达到 25 cm 以上^[11], 对土壤容重和紧实度的降低效果较深松更为明显, 能够有效提高土壤大孔隙的含量^[1]。

在砂姜黑土区, 关于不同耕作方式对土壤及作物生长影响的研究多集中在作物产量、土壤理化性质、水分和养分利用效率以及微生物活性及多样性等方面^[1-3, 12-13], 而对不同耕作方式下砂姜黑土孔隙结构特征的研究尚不清楚。事实上, 土壤的孔隙结构特征, 如孔隙的大小、数目、形状、方向以及网络空间分布等, 对土壤导水导气、物质运移的形式和能力、生物活动以及土壤机械阻力等起到至关重要的作用, 进而深刻影响着作物生长^[14-17]。因此, 深入研究土壤孔隙结构特征有助于全面认识耕作措施改良砂姜黑土的效果。

目前, 研究土壤孔隙结构特征的方法主要有水分特征曲线法、压汞法、切片法、氮气吸附法和 X 射线计算机断层扫描 (X-ray computed tomography, CT) 技术等^[18-19]。其中, CT 扫描技术是一种无损的三维成像技术, 可以在不破坏土壤结构的情况下获得其内部的三维孔隙结构, 并对结构特征进行定

量分析,现在CT扫描技术已经在土壤孔隙结构的定量化研究方面取得了广泛的应用和诸多进展^[20]。综上,本文利用CT扫描技术,分析不同耕作方式(免耕、旋耕、深翻)下砂姜黑土孔隙特征,以期从孔隙尺度为该区域土壤耕层结构改良提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于安徽龙亢农场2015年10月建立的耕作试验基地($33^{\circ}32'N$, $115^{\circ}59'E$),该区域地处暖温带半湿润季风气候区,年均温 $14.8^{\circ}C$,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。基地自建立起实行冬小麦(10月至次年6月)/夏玉米(6月至10月)一年两熟轮作制度。基地建立前,耕层土壤容重为 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,有机质 $19.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.45\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 $12.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $156\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $18.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $162\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

从试验基地选取了三种耕作处理的原状土柱进行研究,三种耕作处理分别为:(1)免耕(No-tillage, NT),全年不耕作,采用中国农业大学研制的免耕播种机一次性完成播种及镇压作业;(2)旋耕(Rotary tillage, RT),每年玉米收获后(10月)旋耕机旋耕2遍,作业深度15 cm,小麦收获后(6月)直接播种镇压;(3)深翻(Deep ploughing, DP),每年玉米收获后(10月)进行25~30 cm层深翻作业,然后浅旋10 cm以打破大土块,小麦收获后(6月)直接播种镇压。

1.2 土壤样品采集

2020年6月小麦收获完成后,首先浇水充分湿润采样区域,使土壤达到田间持水量 $0.37\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右,然后利用PVC管从不同耕作处理的地块中采集原状土柱(高20 cm,直径10 cm),每种耕作处理重复3次,一共采集9个原状土柱。土柱取出之后在两端套上PVC盖,并用保鲜膜密封防止水分损失。

1.3 CT扫描与图像处理

利用工业纳米CT(Phenix Nanotom M, GE, USA)对采集的原状土柱进行CT扫描。扫描电压

240KV,电流为 $360\text{ }\mu\text{A}$,每个土柱在样品台匀速旋转 360° ,在此过程中共采集1500幅投影图,空间分辨率为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 。利用Datas|x2 Rec软件进行图像重建,然后利用VG Studio Max 3.5软件生成了4000多张16位灰度图像,大小约30GB,并存储为tiff格式。

利用image J软件(<https://imagej.nih.gov/ij/>)进行图像的处理和分析。首先将16位的灰度图像转换为8位,并利用Attenuation Correction插件统一图像的灰度,之后应用半径为2个像素的中值滤波器进行滤波,降低图像的噪声。为降低边缘效应,选择图像的中心区域作为感兴趣区域(Region of interest, ROI),ROI的大小为 $1500\times 1500\times 3167$ 体素,实际大小为 $9\text{ cm}\times 9\text{ cm}\times 19\text{ cm}$ 。采用全局阈值分割法分割土壤孔隙,并根据目视法仔细观察灰度图像确定阈值。鉴于图像的分辨率,从图像中获取的孔隙均为 $>60\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙,本研究中将其视为大孔隙。

1.4 饱和导水率测定和大孔隙特征参数计算

CT扫描结束后,除去保鲜膜,将土柱置于去离子水中,使土壤毛细管自下而上吸水饱和一周。在饱和过程中,未见明显土壤膨胀。之后采用定水头法测定土壤饱和导水率。

利用image J 1.53c软件计算土壤大孔隙度、孔径大小分布、水力半径、紧密度、分形维数、各向异性程度、全局连通性、连通性最大孔隙度和欧拉数^[21-22]。

1.4.1 大孔隙度和孔径大小分级 土壤大孔隙度指由CT图像得到的大孔隙($>60\text{ }\mu\text{m}$)体积占ROI总体积的百分比。孔隙的孔径大小通过Bone J插件里的“Thickness”计算得到,该算法通过测量适合对象内部最大的球体直径来确定^[23]。本文将孔径大小划分为3个等级,分别为 $60\sim200\text{ }\mu\text{m}$ 、 $200\sim500\text{ }\mu\text{m}$ 和 $>500\text{ }\mu\text{m}$ 。

1.4.2 大孔隙特征参数 本文计算了土壤大孔隙的水力半径、紧密度、分形维数、各向异性程度、全局连通性、连通性最大孔隙度和欧拉数,前四个参数用以描述土壤孔隙结构的形态特征,后三个参数用以描述土壤孔隙结构的网络特征^[21-22]。水力半径的定义为土壤大孔隙的体积与表面积之比^[24],水力半径越大,孔隙导水和导气的能力越大。紧密度是土壤孔隙形态的表征,其值越小表明孔隙形态越接近球形^[22],孔隙的紧密度通过下式计算:

$$CP = \frac{A^{1.5}}{V} \quad (1)$$

式中, A 和 V 分别代表孔隙的表面积和体积, 平均紧密度的计算为各孔隙紧密度的体积加权平均值。大孔隙的分形维数是基于盒子计数算法得到的, 描述土壤孔隙的自相似特性, 可用于大孔隙形态结构复杂程度的定量度量, 分形维数随着大孔隙形态结构复杂程度的增加而增大^[21, 25]。各向异性描述孔隙方向异性的程度, 其值在 0 (完全各向同性结构) 和 1 (各向异性结构) 之间变化。孔隙的全局连通性 Γ 指两个孔隙为同一个孔隙的概率, 当所有的孔隙均连接在一个渗流孔中时, Γ 等于 1; 当大小相似的孔隙分散时, Γ 接近于 0^[26]。 Γ 通过下式计算:

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=0}^n V_i^2}{\left(\sum_{i=0}^n V_i\right)^2} \quad (2)$$

式中, Γ 代表全局连通性, n 代表孔隙的个数, V_i 代表每个孔隙的体积, 孔隙的数量和体积利用“particle analyzer”插件计算。连通性最大孔隙度是指土壤中最大的相互连通大孔隙网络的体积占 ROI 体积的百分比, 在计算该值前利用 Bone J 插件中的“Purify”对二值图像进行处理, 以获得最大的相互

连通大孔隙网络^[21]。欧拉数可作为孔隙局部连通性的指标^[16], 欧拉数越负, 表示土壤孔隙网络的连通性越好, 本文中将其用于评价最大的相互连通大孔隙网络的连通性。

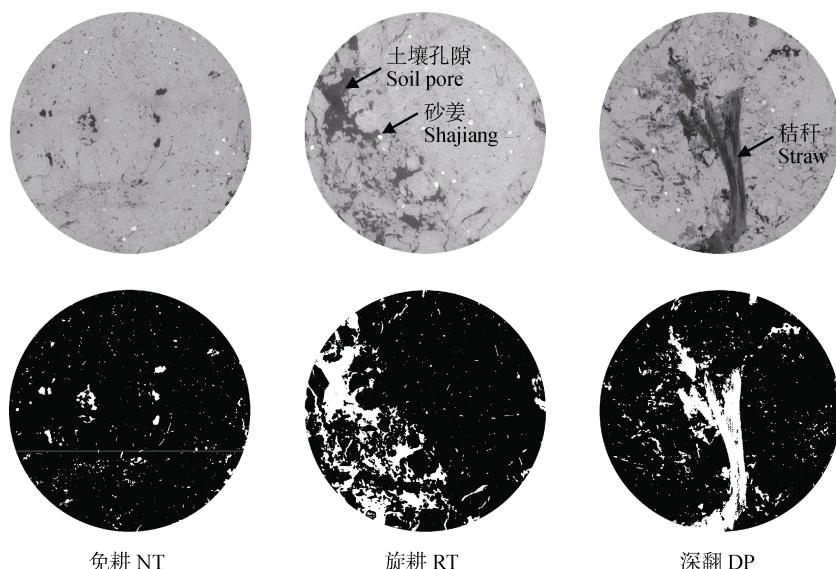
1.5 数据处理与分析

实验数据采用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 考察不同耕作方式对土壤大孔隙特征参数的影响, 利用最小显著差异法 (Least Significance Difference, LSD) 进行多重比较; 采用斯皮尔曼 (Spearman) 秩相关分析, 测试大孔隙特征参数及其与饱和导水率 (K_s) 的关系, 显著性水平为 0.05。考虑到饱和导水率 (K_s) 存在较大变异, 方差分析和相关分析中使用 K_s 的自然对数。

2 结 果

2.1 不同耕作处理下土壤大孔隙的二维和三维图像特征

不同耕作处理下土壤大孔隙的二维图像见图 1。免耕土壤中, 孔隙的尺寸较小, 多呈斑点状, 分布独立。与之相比, 旋耕和深翻土壤中出现了较大的孔隙, 形状不规则, 相互连接程度高, 并且在深翻土壤中观察到了秸秆腐解过程中形成的大孔隙。



NT—No-tillage; RT—Rotary tillage; DP—Deep ploughing.

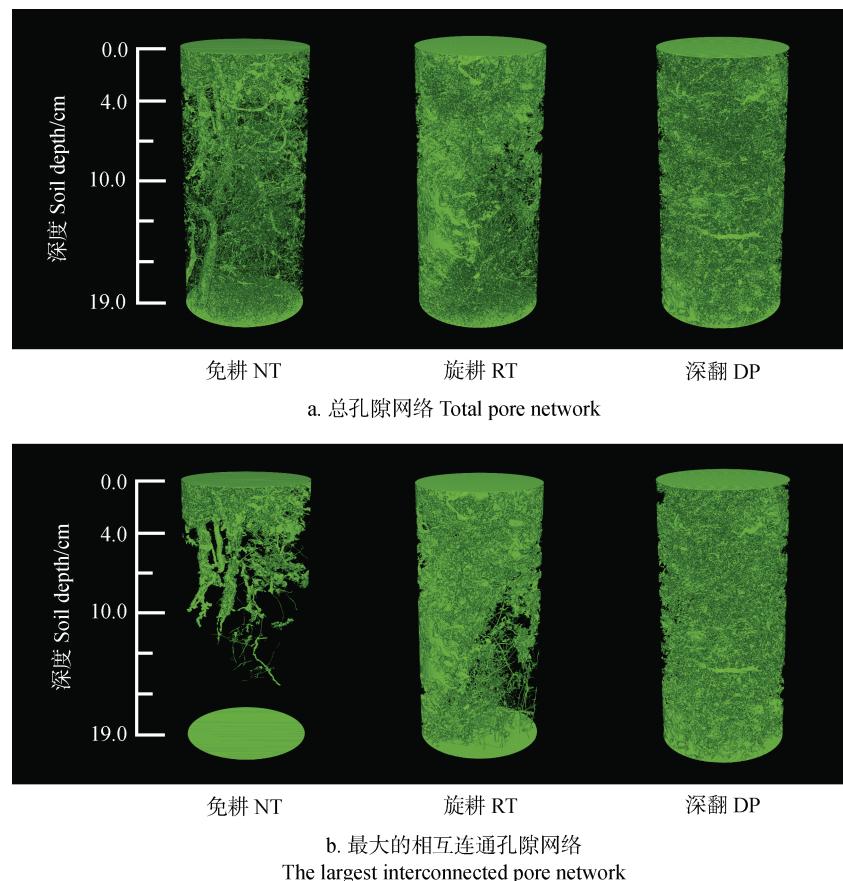
注: 图中所标秸秆处表示在秸秆腐解过程中形成的大孔隙。Note: The marked straw in the figure indicates the macropores formed during the decomposition of straw.

图 1 不同耕作处理下土壤大孔隙的二维图像 (9 cm × 9 cm)

Fig. 1 Two-dimensional images (9 cm × 9 cm) of soil macropores under different tillage treatments

不同耕作处理下土壤大孔隙的三维图像见图 2a。免耕土壤中观察到大量连续的管状生物孔隙，其中以植物的根孔为主，并含少量的蚯蚓洞等，在 0~4 cm 土层中存在少量不规则的大孔隙。与免耕土壤相比，旋耕土壤中各土层不规则的大孔隙均有所增加，但主要集中在 0~7 cm 土层，整体呈现出不规则孔隙和管状生物孔隙的混合分布。深翻土壤中，各土层均明显呈现出不规则大孔隙的分布，并且与免耕和旋耕相比，其管状生物孔隙的分布最少。图 2b 显示了不同耕作处理下土壤最大的相互连通孔隙网络，由于去除了较小的和独立的孔隙，各耕作处理间孔隙结构的差异更为明显。免耕土壤中，最大的相互连通孔隙网络未

贯穿整个土层，仅分布在 0~16 cm 土层，且与图 2a 中免耕土壤的总孔隙网络相比，在 16~19 cm 的土层孔隙明显空缺，表明免耕在该土层的连通性较差。与免耕相比，旋耕土壤中最大的相互连通孔隙网络贯穿了整个土层，7 cm 以上的土层主要分布不规则的孔隙，7 cm 以下的土层主要分布管状生物孔隙；并且与图 2a 中旋耕土壤的总孔隙网络相比，在 7~19 cm 的土层，管状生物孔隙的分布有所减少，出现了空缺。与免耕相比，深翻土壤中最大的相互连通孔隙网络贯穿了整个土层；并且与图 2a 中深翻土壤的总孔隙网络相比没有较大差别，表明深翻增加了砂姜黑土整个 0~20 cm 土层孔隙的连通性。



NT— No-tillage; RT— Rotary tillage; DP— Deep ploughing.

注：图 b 中所示最大的相互连通孔隙网络由图 a 中的总孔隙网络去除较小的和不连通的孔隙之后得到。Note: The largest interconnected pore network shown in figure b was obtained by removing the smaller and disconnected pores from the total pore network in figure a.

图 2 不同耕作处理下土壤大孔隙网络的三维图像 (高 19 cm, 直径 9 cm)

Fig. 2 Three-dimensional images (19 cm in height and 9 cm in diameter) of soil macropores under different tillage treatments

2.2 不同耕作处理下土壤大孔隙度和数量随深度的变化

总体而言，土壤大孔隙度随深度增加而下降，

但是不同耕作处理下降幅度不一致 (图 3)。免耕土壤大孔隙度在 1%~17% 之间波动，在 0~3 cm 土层随深度显著下降，在 3~20 cm 土层则无明显变化，

仅在 0~5%之间波动(图 3a)。旋耕土壤的大孔隙度在 3%~28%之间波动, 总体上随深度不断降低(图 3b)。深翻土壤的大孔隙度在 5%~35%之间波动, 总体上随深度有所下降, 但是与免耕和旋耕土壤相比, 下降趋势不明显; 此外, 深翻土壤还出现明显的大孔隙度峰值, 深度分别在 5 cm、10 cm 和 16 cm 左右(图 3c)。

与大孔隙度相比, 土壤大孔隙数量总体上并非

随深度而下降(图 4)。免耕下土壤大孔隙数量在 0~3 cm 土层随深度快速下降, 之后随深度反而呈缓慢增加趋势(图 4a)。旋耕下土壤大孔隙数量总体上随深度缓慢升高(图 4b), 变化趋势与大孔隙度随深度的变化趋势相反。深翻下土壤中三个土样的大孔隙数量随深度的变化趋势差异较大(图 4c), 与大孔隙度随深度的变化趋势相反, 即在出现大孔隙度峰值的深度, 大孔隙数量明显降低。

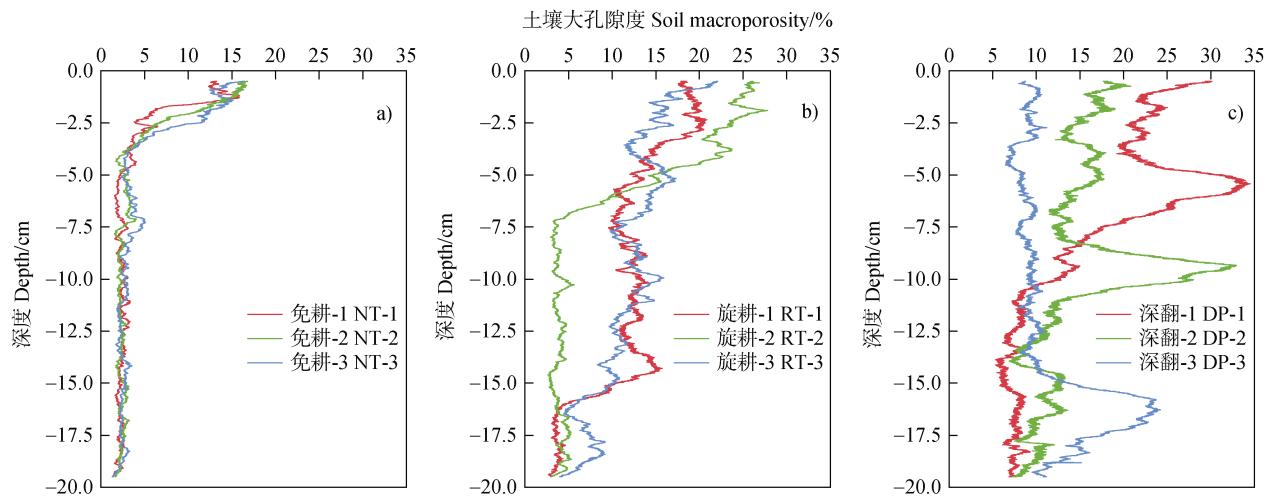


图 3 不同耕作处理下土壤大孔隙度随深度的分布

Fig. 3 Distribution of soil macroporosity with depth under different tillage treatments

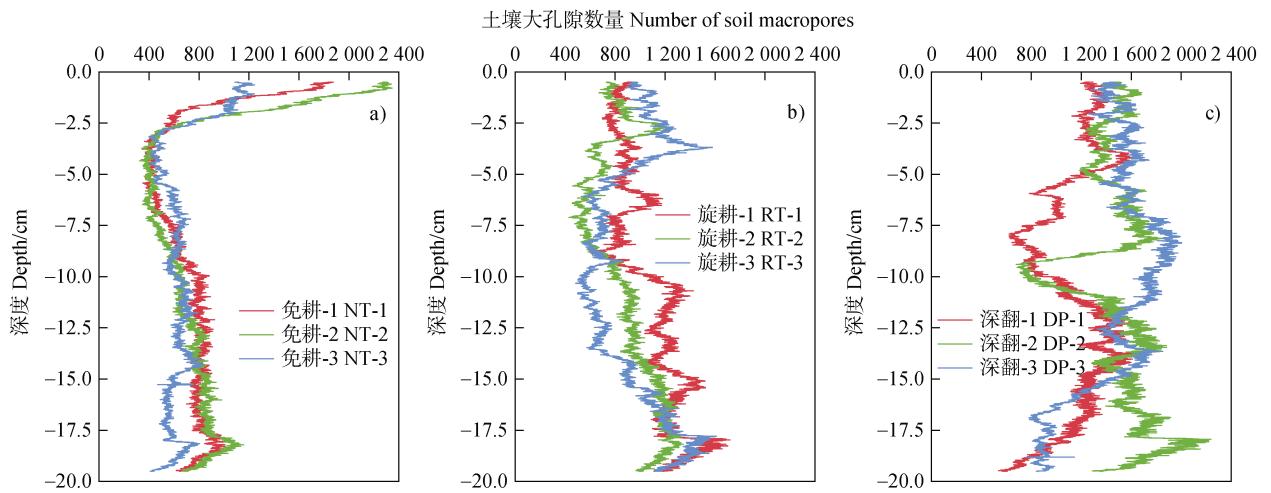


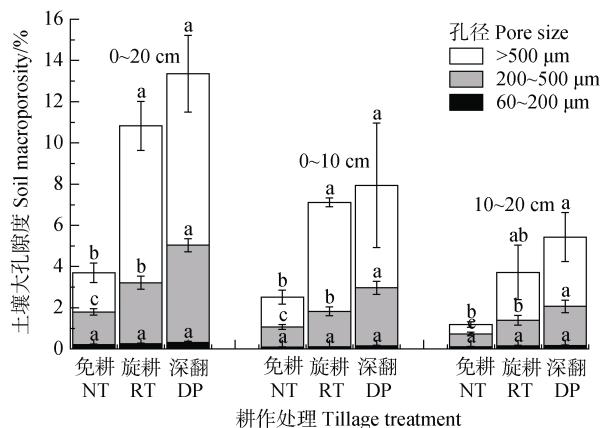
图 4 不同耕作处理下土壤大孔隙数量随深度的分布

Fig. 4 Distribution of the number of soil macropores with depth under different tillage treatments

2.3 不同耕作处理下土壤的孔径大小分布

土壤的孔径大小在不同土层深度和不同耕作处理下的分布如图 5 所示。总的来看, 各个土层土壤的大孔隙度均表现为深翻>旋耕>免耕, 与免耕相比(3.7%), 旋耕和深翻 0~20 cm 土层的大孔隙度分别

提高至 10.8% 和 13.4% (表 1), 其中 0~10 cm 土层分别提高了 183.3% 和 215.9%, 10~20 cm 土层分别提高了 212.6% 和 356.7%。就 0~20 cm 土层而言, 在 3 个大孔隙的孔径分级中, 60~200 μm 孔径, 旋耕和深翻的孔隙度较免耕分别增加了 23.7% 和 47.9%;



注: 不同小写字母表示同一深度同一孔径不同耕作处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters indicate a significant difference between different tillage treatments in the same soil depth and same pore size ($P < 0.05$)。

图 5 不同耕作处理下不同土层土壤孔径的大小分布

Fig. 5 Pore size distribution of soil macropores in different soil layers under different tillage treatments

200~500 μm 孔径, 分别显著增加了 86.6% 和 198.1% ($P < 0.05$); >500 μm 孔径, 分别显著增加了 299.4% 和 336.7% ($P < 0.05$)。可见, 深翻提高大孔隙度幅度高于旋耕, 并且孔径越大提高的越明显。从分层来看, 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 各级孔径的分布情况与整体类似。三种耕作处理下土壤的

孔隙度主要集中在 0~10 cm 土层, 分别占各自总孔隙度的 68% (免耕)、66% (旋耕) 和 59% (深翻), 可以看出深翻土壤的孔隙度在上下层的分布较为均匀。

2.4 不同耕作处理下土壤的大孔隙特征和饱和导水率

如表 1 所示, 大部分的孔隙特征参数, 包括水力半径、紧密度、分形维数、全局连通性和连通性最大孔隙度等, 一般随着大孔隙度的增加表现出增大的趋势, 而各向异性程度和欧拉数的变化趋势则相反。具体分析来看, 与免耕相比, 旋耕和深翻下大孔隙的水力半径分别显著增加了 46.7% 和 26.7% ($P < 0.05$), 表明旋耕和深翻提高了孔隙输运水气的能力, 从表中也可看出旋耕和深翻显著提高了土壤的饱和导水率 ($P < 0.05$); 分形维数分别显著增加了 4.7% 和 6.3% ($P < 0.05$), 表明不同耕作处理下, 孔隙结构的复杂程度表现为深翻>旋耕>免耕, 这也进一步验证了图 2 中各耕作处理下的孔隙网络; 全局连通性分别显著增加了 160.4% 和 156.8%, 欧拉数分别显著降低了 264.2% 和 636.3% ($P < 0.05$), 可以看出旋耕和深翻不仅提高了孔隙的局部连通性, 还提高了整体连通性, 而且深翻的连通性优于旋耕。

表 1 土壤大孔隙特征参数和饱和导水率

Table 1 Soil macropore characteristic parameters and saturated hydraulic conductivity

处理	大孔隙度 ^①	水力半径 ^②	紧密度 ^③	分形维数 ^④	各向异性程度 ^⑤	全局连通性 ^⑥	连通性最大孔隙度 ^⑦	欧拉数 ^⑧	ln(K_s)/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)
	MP/%	HR/mm	CP	FD	DA	Γ	CLMP/%	EN	
免耕 NT	3.70b	0.15b	1193.97c	2.54c	0.34a	0.32b	2.20b	-28807.00a	1.01b
旋耕 RT	10.83a	0.22a	2568.75b	2.66b	0.25b	0.83a	9.85a	-104906.00b	5.18a
深翻 DP	13.36a	0.19a	3565.20a	2.70a	0.26b	0.81a	12.09a	-212115.67c	5.84a

注: 不同小写字母表示不同耕作处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters indicate a significant difference between different tillage treatments ($P < 0.05$)。①Macroporosity; ②Hydraulic radius; ③Compactness; ④Fractal dimension; ⑤Degree of anisotropy; ⑥Global connectivity; ⑦Connected largest macroporosity; ⑧Euler number。

表 2 为大孔隙特征参数及饱和导水率的相关分析。在所有大孔隙特征参数中, 除了水力半径与部分特征参数之间无显著相关外, 其余特征参数之间均存在显著相关 ($P < 0.05$)。其中, 欧拉数与紧密度、分形维数、连通性最大孔隙度之间, 以及紧密度与分形维数之间相关程度更高 ($P < 0.001$)。进一

步观察发现, $\ln(K_s)$ 和除水力半径之外的特征参数均存在显著相关, 并且除了和各向异性程度、欧拉数存在显著负相关外, 和其他特征参数之间均存在显著正相关 ($P < 0.05$), 其中与连通性最大孔隙度的相关程度最高 ($r=0.833^{**}$, $P < 0.01$), 表明孔隙的连通性对土壤的饱和导水率具有重要作用。

表 2 土壤大孔隙特征参数及饱和导水率的相关性

Table 2 Correlation analysis of soil macropore characteristic parameters and saturated hydraulic conductivity

	MP ¹⁾	HR ²⁾	CP ³⁾	FD ⁴⁾	DA ⁵⁾	Γ ⁶⁾	CLMP ⁷⁾	EN ⁸⁾	$\ln(K_s)$ ⁹⁾
MP ¹⁾	1								
HR ²⁾	0.744*	1							
CP ³⁾	0.817**	0.427	1						
FD ⁴⁾	0.800**	0.393	0.983***	1					
DA ⁵⁾	-0.753*	-0.640	-0.736*	-0.778*	1				
Γ ⁶⁾	0.879**	0.841**	0.736*	0.695*	-0.765*	1			
CLMP ⁷⁾	0.983***	0.710*	0.850**	0.833**	-0.720*	0.895**	1		
EN ⁸⁾	-0.917**	-0.522	-0.967***	-0.950***	0.728*	-0.795*	-0.933***	1	
$\ln(K_s)$ ⁹⁾	0.800**	0.624	0.750*	0.783*	-0.711*	0.678*	0.833**	-0.767*	1

注: *, **, ***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上 (双侧) 显著相关。Note: *, **, *** indicate significant levels at the $P < 0.05$, 0.01 and 0.001, respectively. 1) 大孔隙度 Macroporosity; 2) 水力半径 Hydraulic radius; 3) 紧密度 Compactness; 4) 分形维数 Fractal dimension; 5) 各向异性程度 Degree of anisotropy; 6) 全局连通性 Global connectivity; 7) 连通性最大孔隙度 Connected largest macroporosity; 8) 欧拉数 Euler number; 9) 饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity.

3 讨 论

3.1 不同耕作方式对土壤大孔隙特征的影响

本研究表明, 与免耕相比, 旋耕和深翻显著提高了砂姜黑土的大孔隙度 (表 1), 对土壤起到了明显的疏松作用, 增加了土壤的大孔隙网络 (图 2)。这与 Dal Ferro 等^[27]和 Garbou^[28]报道的研究结果类似。砂姜黑土的黏粒含量较高, 土粒排列紧密, 长期免耕条件下易造成土壤的容重增加、孔隙度下降^[1]; 相较之下, 旋耕和深翻则能够破碎体积较大的土块, 改变砂姜黑土的界面形态和三相比例^[1], 显著提高 200~500 μm 和 $>500 \mu\text{m}$ 孔径的孔隙度以及总大孔隙度 (表 1)。其中, 深翻土壤的大孔隙度在整体上、0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层均要高于旋耕土壤 (表 1), 原因在于旋耕作业深度较浅, 仅为 15 cm, 亚表层的土壤受到上层土壤和农机具压实作用, 孔隙空间不断减少^[29-31]; 而深翻作业深度能够达到 25~30 cm, 可以有效打破砂姜黑土的犁底层, 将亚表层紧实土壤与表层土壤充分混合, 降低土壤的容重和紧实度, 提高土壤的孔隙度^[4, 9, 28, 32]。另外一个原因在于深翻还能够将还田的秸秆翻入下层土壤, 秸秆腐解过程中可能形成较大的孔隙, 增加了土壤的孔隙度^[33]。在以往的研究中, 邱琛等^[34]报道了耕作过程中秸秆的深耕还田能够改变土壤的孔隙

分布, 形成疏松多孔的土壤结构, 从而提升土壤的孔隙度。杨永辉等^[35]报道了有机物料的加入增加了土壤中有机碳和腐殖质的含量, 从而改善了土壤的团粒结构, 进而增加土壤的孔隙度。可见, 有机物料的翻耕还田对提升土壤的大孔隙度具有重要作用。本研究中, 从图 3c 可以看出, 深翻土壤的大孔隙度随深度的变化过程中出现了较大的峰值, 结合 CT 图像 (图 1) 推断出, 该峰值对应的大孔隙可能为秸秆腐解过程中形成的。

本研究发现, 免耕土壤的孔隙度和孔隙数量随深度的波动趋于相对稳定的状态, 相较之下旋耕和深翻随深度的波动较大 (图 3、图 4)。对于表层土壤而言, 由于受到降水、太阳辐射等外界因素影响和干湿循环过程会导致土壤收缩产生孔隙^[36], 但随着土层深度增加这种影响会不断减弱。因此, 对于未受到剧烈外界扰动的免耕土壤而言, 其孔隙度和孔隙数量随深度的波动逐渐减小并趋于相对稳定的状态, 这与甘磊等^[37]和 Luo 等^[38]研究发现大孔隙度随土层深度的增加而不断降低并趋于稳定的结果一致。相反, 旋耕和深翻在耕作过程中使土壤结构变得疏松^[27-28], 有利于植物根系的下扎, 因此其孔隙度随土层深度的波动相对较大。

由图 1、图 2 和表 1 可知, 本研究中不同耕作方式下土壤的孔隙结构特征差异显著。免耕土壤由于没有剧烈的外界扰动, 主要依靠植物根系的下扎

和土壤动物的活动形成大孔隙,如根孔和蚯蚓洞等,因此以圆形的管状生物性孔隙为主^[27-28, 39],孔隙形态相对规则,其较低的紧密度证实了这一点(表1)。然而,免耕土壤中由于犁底层具有较高的容重,使得植物根系下扎受阻^[1, 29],难以穿透犁底层,从而导致免耕土壤在16~19 cm土层中未出现最大的相互连通大孔隙网络,且其松散、弯曲和复杂程度明显低于旋耕和深翻土壤(图2),这与Garbout等^[28]和Wang等^[21]的研究结果类似。对于旋耕和深翻土壤而言,由于强烈的外力扰动,破碎了大的土块,因此形成了大量形态复杂、不规则的裂隙和破碎的孔隙^[27, 40],使之前相互孤立的孔隙结构发生改变,产生相连的通道,从而增加了孔隙的连通性^[41],促进水分和迁移物质的快速流动。与免耕相比,它们较高的分形维数、紧密度和欧拉数的绝对值进一步证实了这一点(表1)。相较于旋耕,深翻土壤孔隙结构的复杂程度和不规则程度更高,连通性更好,这是由于深翻对土壤扰动的强度更大,深度也更深,能够有效打破砂姜黑土的犁底层,使上下土层得到充分混合^[1-2, 4, 32]。

为了进一步探究不同耕作方式对土壤孔隙特征的影响,厘清这些特征参数的内在联系,本研究将各特征参数之间进行了相关性分析。从表2可以看出,土壤的大孔隙度和连通性最大孔隙度与分形维数之间存在极显著正相关^[24]($P < 0.01$),并且分形维数还与紧密度、全局连通性和欧拉数高度相关^[42],说明分形维数可用于估计砂姜黑土大孔隙基本性质^[43]。此外,大孔隙度还与孔隙的紧密度、全局连通性呈极显著正相关,与欧拉数呈极显著负相关($P < 0.01$,表2),说明较大的孔隙连通性更好^[22, 42]。

3.2 不同耕作方式对土壤导水能力的影响

土壤结构的改善有利于提高土壤的导水能力^[15, 22]。本研究表明,与免耕相比,旋耕和深翻显著提高了土壤饱和导水率(表1),且深翻效果优于旋耕。为了进一步探究不同耕作方式下土壤孔隙结构对导水能力的影响,本研究将孔隙结构特征参数和 $\ln(K_s)$ 进行了相关性分析。从表2可以看出砂姜黑土的 $\ln(K_s)$ 与全局连通性和分形维数呈显著正相关($P < 0.05$),与欧拉数(表征局部连通性)呈显著负相关($P < 0.05$),表明土壤的孔隙结构越复杂、连通性越好,越能增大水流沿孔隙通道的实际流经路径^[42],

从而能够有效提高土壤的导水和持水能力^[34, 44]。 $\ln(K_s)$ 与连通性最大孔隙度之间极显著的正相关性($r=0.833^{**}$, $P < 0.01$)进一步证实了孔隙连通性对饱和导水率的重要性。 $\ln(K_s)$ 同样与水力半径呈正相关,这与以往的研究结果一致,即土壤孔隙的水力半径越大,孔隙对水的传导能力越大^[14]。结合表1可知,与免耕相比,深翻下土壤孔隙网络的复杂程度、局部连通性、全局连通性和水力半径均显著增加($P < 0.05$),因此深翻下土壤饱和导水率的提升效果更为显著。在以往的研究中,赵亚丽等^[3]报道了深耕处理显著增加了砂姜黑土区冬小麦-夏玉米的水分利用效率;甘磊等^[37]的研究结果表明耕作土壤0~30 cm土层中孔隙的直径大、连通性好,有利于土壤的导水透气;但是,也有研究结果显示免耕由于减少了对土壤的干扰,增加了土壤中动物的数量,易在土壤垂直方向上形成连通至地表的生物性大孔隙,从而提高土壤的导水能力^[40]。如李文凤等^[45]报道了免耕和深翻处理下黑土的渗透性能和优先流特征,结果表明免耕土壤的稳定入渗率和累计入渗量均大于深翻土壤;蔡立群等^[46]报道了黄土高原区传统耕作和免耕处理下土壤的饱和导水率,发现免耕处理的饱和导水率明显高于传统耕作处理。出现上述不同研究结果的原因可能是土壤质地、地表植被、耕作深度等因素造成的。正如之前所述,砂姜黑土是一种黏粒含量较高、涨缩性极强、毛细管供水能力极弱的土壤,长期的免耕条件下易造成土壤结构紧实,影响水分和养分的迁移^[1-2],加之小麦、玉米为须根系作物,与直根系作物相比,所形成的上下连通性大孔隙可能较少。因此,在砂姜黑土区,从对导水能力的影响来看,深翻对土壤结构的改良效果要优于旋耕和免耕。

4 结 论

本文基于X射线CT扫描技术研究了不同耕作方式下砂姜黑土孔隙结构特征及其对土壤导水能力的影响,得出如下结论:(1)与免耕相比,深翻能够有效改善砂姜黑土0~20 cm土层结构,显著增加>200 μm 孔径的孔隙度;(2)深翻能够将表层秸秆翻入下层土壤,在二维截面上增加孔隙度和孔隙数量随土层深度波动的程度,并且出现了明显的孔隙

度波峰; (3) 深翻显著提升了土壤孔隙的复杂性和连通性, 增加了孔隙的水力半径, 从而构建了相对良好的土壤孔隙结构, 进而提高了土壤饱和导水率; (4) 总体上, 深翻改良砂姜黑土结构的效果优于旋耕。因此, 从土壤孔隙尺度, 深翻对消减砂姜黑土结构障碍效果明显。

参考文献 (References)

- [1] Wang Y K, Guo Z C, Zhang Z B, et al. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil(vertisol)[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (6): 1370—1380. [王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56 (6): 1370—1380.]
- [2] Xie Y X, Jin H Y, Meng Q Y, et al. Deep tillage improving physical and chemical properties of soil and increasing grain yield of winter wheat in lime concretion black soil farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (10): 167—173. [谢迎新, 靳海洋, 孟庆阳, 等. 深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (10): 167—173.]
- [3] Zhao Y L, Liu W L, Cheng S X, et al. Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (13): 2489—2503. [赵亚丽, 刘卫玲, 程思贤, 等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51 (13): 2489—2503.]
- [4] Çelik İ, Günal H, Acar M, et al. Strategic tillage may sustain the benefits of long-term no-till in a vertisol under mediterranean climate[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 17—28.
- [5] Pareja-Sánchez E, Plaza-Bonilla D, Ramos M C, et al. Long-term no-till as a means to maintain soil surface structure in an agroecosystem transformed into irrigation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 221—230.
- [6] Zhang S X, Chen X W, Jia S X, et al. The potential mechanism of long-term conservation tillage effects on maize yield in the black soil of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 154: 84—90.
- [7] Pittelkow C M, Liang X Q, Linquist B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. *Nature*, 2015, 517 (7534): 365—368.
- [8] Kong X M, Han C W, Zeng S M, et al. Effects of different tillage managements on soil physical properties and maize yield[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22 (1): 108—113. [孔晓民, 韩成卫, 曾苏明, 等. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22 (1): 108—113.]
- [9] Xu D, Schmid R, Mermoud A. Effects of tillage practices on temporal variations of soil surface properties[J]. *Journal of Soil Water and Conservation*, 2000, 14 (1): 64—70, 87. [许迪, Schmid R, Mermoud A. 夏玉米耕作方式对耕层土壤特性时间变异性的影响[J]. 水土保持学报, 2000, 14 (1): 64—70, 87.]
- [10] Yang Y H, Wu J C, Zhang J M, et al. Effect of tillage method on soil water infiltration, organic carbon content and structure[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25 (2): 258—266. [杨永辉, 武继承, 张洁梅, 等. 耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (2): 258—266.]
- [11] Wang Y L, Li J. Study of tillage patterns suitable for soil physicochemical properties and crop yields in wheat/maize fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (5): 1139—1150. [王玉玲, 李军. 利于小麦—玉米轮作田土壤理化性状和作物产量的耕作方式研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (5): 1139—1150.]
- [12] Du C Y, Yang X W, Wang Y, et al. Effect of different tillage methods and nitrogen application amount on lime concretion black soil physical, microbial characteristics and wheat yield[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46 (8): 13—21. [杜聰阳, 杨习文, 王勇, 等. 不同耕作方式及施氮水平对砂姜黑土物理性状、微生物学特性及小麦产量的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46 (8): 13—21.]
- [13] Wang J, Wang X C, Xiong S P, et al. Effects of different tillage methods on nitrogen metabolism and nitrogen utilization efficiency of wheat grown in lime concretion black soil region[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34 (8): 1111—1117. [王静, 王小纯, 熊淑萍, 等. 耕作方式对砂姜黑土小麦氮代谢及氮素利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34 (8): 1111—1117.]
- [14] Perret J, Prasher S O, Kantzas A, et al. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63 (6): 1530—1543.
- [15] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review[J]. *Geoderma*, 2018, 314: 122—137.
- [16] Vogel H J, Roth K. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure[J]. *Advances in Water Resources*, 2001, 24 (3/4): 233—242.
- [17] Zhou H X. High-performance pore-scale simulation method for fluid flow and solute transport with applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. [周鸿翔. 高性能孔隙尺度水流运动与溶质运移模拟方法及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.]
- [18] Peng X H, Horn R, Hallett P. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter[J].

- Soil and Tillage Research, 2015, 146: 1—3.
- [19] Cheng Y N, Liu J L, Zhang J B. Advance in the study on quantification of soil pore structure[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43 (4): 988—994. [程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构定量研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43 (4): 988—994.]
- [20] Wildenschild D, Sheppard A P. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems[J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 217—246.
- [21] Wang M Y, Xu S X, Kong C, et al. Assessing the effects of land use change from rice to vegetable on soil structural quality using X-ray CT[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104343.
- [22] 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.
- [23] Dougherty R, Kunzelmann K H. Computing local thickness of 3D structures with ImageJ[J]. Microscopy and Microanalysis, 2007, 13 (S02): 1678—1679.
- [24] Larsbo M, Koestel J, Jarvis N. Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18 (12): 5255—5269.
- [25] Zhao Y, Han Q L, Zhao Y D. Optimization of soil pore quantitative expression based on computed tomography scanning technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (10): 252—259. [赵玥, 韩巧玲, 赵燕东. 基于 CT 扫描技术的土壤孔隙定量表达优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48 (10): 252—259.]
- [26] Hovadik J M, Larue D K. Static characterizations of reservoirs: Refining the concepts of connectivity and continuity[J]. Petroleum Geoscience, 2007, 13 (3): 195—211.
- [27] Dal Ferro N, Sartori L, Simonetti G, et al. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 140: 55—65.
- [28] Garbout A, Munkholm L J, Hansen S B. Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 128: 104—109.
- [29] Liu X W, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2015, 154: 59—67.
- [30] Reichert J M, Brandt A A, Rodrigues M F, et al. Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage? [J]. Geoderma, 2017, 301: 72—79.
- [31] Reichert J M, da Rosa V T, Vogelmann E S, et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 123—136.
- [32] Zheng H B, Liu W R, Luo Y, et al. Effect of different tillage methods on soil water content and water use efficiency in cropland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32 (3): 264—270. [郑洪兵, 刘武仁, 罗洋, 等. 耕作方式对农田土壤水分变化特征及水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (3): 264—270.]
- [33] Zhao L L, Li L S, Cai H J, et al. Comprehensive effects of organic materials incorporation on soil hydraulic conductivity and air permeability[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52 (6): 1045—1057. [赵丽丽, 李陆生, 蔡焕杰, 等. 有机物料还田对土壤导水导气性的综合影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52 (6): 1045—1057.]
- [34] Qiu C, Han X Z, Chen X, 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, 2021, 37 (14): 98—107. [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.]
- [35] Yang Y H, Wu J C, Mao Y P, et al. Using computed tomography scanning to study soil pores under different soil structure improvement measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (23): 99—108. [杨永辉, 武继承, 毛永萍, 等. 利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (23): 99—108.]
- [36] Li W J, Zhang Z Y, Wang C, et al. Propagation and closure law of desiccation cracks of loamy clay during cyclic drying-wetting process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (8): 126—132. [李文杰, 张展羽, 王策, 等. 干湿循环过程中壤质黏土干缩裂缝的开闭规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (8): 126—132.]
- [37] Gan L, Li J, Li S, et al. Soil pore characteristics of sugarcane field under different tillage treatments in Guangxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27 (6): 122—130. [甘磊, 李健, 李帅, 等. 广西甘蔗地不同耕作方式下土壤孔隙特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27 (6): 122—130.]
- [38] Luo L F, Lin H, Li S C. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393 (1/2): 53—64.
- [39] Gan L, Zhang J J, Huang T Q, et al. Pore structure in sugarcane soil under different tillage managements based on CT scanning[J]. Southwest China Journal of

- Agricultural Sciences, 2017, 30 (8): 1843—1848. [甘磊, 张静举, 黄太庆, 等. 基于 CT 技术的甘蔗地不同耕作措施下土壤孔隙结构研究[J]. 西南农业学报, 2017, 30 (8): 1843—1848.]
- [40] Gao Z X, Xu X X, Zhao J N, et al. Review on macropore flow in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (11): 2801—2811. [高朝侠, 徐学选, 赵娇娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 34 (11): 2801—2811.]
- [41] Borges J A R, Pires L F, Cássaro F A M, et al. X-ray computed tomography for assessing the effect of tillage systems on topsoil morphological attributes[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 189: 25—35.
- [42] Smet S, Beckers E, Plougonven E, et al. Can the pore scale geometry explain soil sample scale hydrodynamic properties? [J]. Frontiers in Environmental Science, 2018, 6: 20.
- [43] Cai T Y, Zhang J B, Zhang C Z, et al. Effects of fertilization mode on macropore characteristics of the Shajiang black soil (vertisol) based on computed tomography (CT) images[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31 (12): 143—149.
- [蔡太义, 张佳宝, 张丛志, 等. 基于显微 CT 研究施肥方式对砂姜黑土大孔隙结构的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31 (12): 143—149.]
- [44] Wang W H, Zhang Z P. Study on the dry red soil pore structure and pore tortuosity-connectivity based on soil air permeability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (2): 360—368. [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.]
- [45] Li W F, Zhang X P, Liang A Z, et al. Characters of infiltration and preferential flow of black soil in Northeast China under different tillage patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (7): 1506—1510. [李文凤, 张晓平, 梁爱珍, 等. 不同耕作方式下黑土的渗透特性和优先流特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19 (7): 1506—1510.]
- [46] Cai L Q, Luo Z Z, Zhang R Z, et al. Effect of different tillage methods on soil water retention and infiltration capability of rainfed field[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32 (5): 1362—1368. [蔡立群, 罗珠珠, 张仁陟, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32 (5): 1362—1368.]

(责任编辑: 檀满枝)