

DOI: 10.11766/trxb202506300317

CSTR: 32215.14.trxb202506300317

夏昊, 王广帅, 谢坤, 钱泳其, 蒋发辉, 彭新华, 尧水红, 张中彬, 张月玲, 毕利东. 不同耕作方式配合秸秆还田对潮土孔隙结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2026,

XIA Hao, WANG Guangshuai, XIE Kun, QIAN Yongqi, JIANG Fahui, PENG Xinhua, YAO Shuihong, ZHANG Zhongbin, ZHANG Yueming, BI Lidong. Effect of Tillage Practices and Straw Management on Soil Pore Structure Characteristics in Fluvo-aquic Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

不同耕作方式配合秸秆还田对潮土孔隙结构特征的影响*

夏昊^{1,2}, 王广帅³, 谢坤³, 钱泳其^{2†}, 蒋发辉⁴, 彭新华², 尧水红², 张中彬², 张月玲², 毕利东¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210008; 2. 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站/中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南新乡 453004; 4. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所(农业农村部土壤质量阜阳野外科学观测研究站)/安徽省养分循环与耕地保育安徽省重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 潮土耕层浅薄、犁底层坚实板结, 结构障碍突出, 耕作及秸秆还田是改良其结构的重要措施。本研究基于河南农田生态系统国家野外观测研究站潮土耕作试验基地, 采集秸秆还田(Straw returning, SR)和秸秆不还田(Control check, CK)下旋耕(Rotary tillage, RT)、深翻(Deep ploughing, DP)和隔年深翻(Biennial deep ploughing, BDP)处理的原状土柱(高 20 cm, 直径 10 cm), 利用 X 射线 CT 扫描(XCT)技术和 ImageJ 软件以及机器学习定量分析不同耕作方式和秸秆处理对土壤三维孔隙结构特征、土壤饱和导水率及导气速率的影响。结果表明, 在秸秆不还田下, 相较于旋耕, 深翻及隔年深翻的大孔隙度分别提升了 31.5% 和 5.7%; 在秸秆还田下, 深翻处理的大孔隙度相较旋耕和隔年深翻分别显著增加了 92.9% 和 68.4% ($P<0.05$), 且大孔隙的水力半径分别显著增加了 53.8% 以及 42.9%, 紧密度显著提升了 1.5 倍和 2.9 倍, 全局连通性分别显著提高了 12 倍, 土壤饱和导水率和导气速率均得到显著提升 ($P<0.05$)。综上所述, 秸秆深翻还田扩大了土壤大孔隙的水力半径, 改善了连通性, 提升了大孔隙的复杂程度, 从而构建了相对良好的土壤孔隙形态和网络结构, 进而提高了导水以及透气性, 消减潮土结构性障碍效果显著。

关键词: 潮土; 深翻; 秸秆还田; XCT 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 and Straw Management on Soil Pore Structure Characteristics in Fluvo-aquic Soil

XIA Hao^{1,2}, WANG Guangshuai³, XIE Kun³, QIAN Yongqi^{2†}, JIANG Fahui⁴, PENG Xinhua², YAO Shuihong², ZHANG Zhongbin², ZHANG Yueming², BI Lidong¹

* 国家重点研发计划项目(2023YFD1900203)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2023YFD1900203)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail:qianyongqi@caas.cn

作者简介: 夏昊(1998—), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事土壤结构改良研究。E-mail: 15655377657@163.com

收稿日期: 2025-06-30; 收到修改稿日期: 2025-11-20; 网络首发日期 (www.cnki.net):

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hehai University, Nanjing 210008, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China/ Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Shangqiu Station of National Field Agro-ecosystem Experimental Network/ Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Xinxiang, Henan 453004, China; 4. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences / Anhui Province Key Laboratory of Nutrient Cycling and Arable Land Conservation/ Fuyang Field Observation and Research Station of Soil Quality, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hefei 230031, China)

Abstract: 【Objective】The plough layer of fluvo-aquic soil is shallow, while the subsoil is hard and compacted, exhibiting significant structural obstacles. Tillage and straw return are key measures for improving soil structure; however, the mechanism through which the combination of these agricultural practices affects soil structure remains elusive. 【Method】Undisturbed soil columns (20 cm height × 10 cm diameter) were collected from a fluvo-aquic soil experimental site at the Shangqiu Station of the national field Agro-ecosystem experimental network. The samples represented plots under rotary tillage (RT), deep ploughing (DP), and biennial deep ploughing (BDP), with and without straw returning. X-ray computed tomography (XCT) scanning, ImageJ software, and machine learning techniques were employed to perform three-dimensional reconstruction and visualization of the soil pore structure. The effects of different tillage methods and straw treatments on macroporosity, pore size distribution, pore morphology, network characteristics, saturated hydraulic conductivity, and air permeability were quantitatively analyzed. 【Result】Without straw return, deep ploughing and biennial deep ploughing increased macroporosity by 31.5% and 5.7%, respectively, compared to rotary tillage. With straw return, deep ploughing significantly increased macroporosity by 92.9% and 68.4% compared to rotary tillage and biennial deep ploughing, respectively ($P<0.05$). Furthermore, the hydraulic radius increased significantly by 53.8% and 42.9%, respectively. Compactness increased significantly by 1.5 and 2.9 times, and global connectivity increased significantly by 12 times. Both saturated hydraulic conductivity and air conductivity were significantly enhanced ($P<0.05$). 【Conclusion】Deep ploughing increased the hydraulic radius of soil pores, improved connectivity, and enhanced pore network complexity, thereby constructing a relatively favorable soil pore morphology and network structure. This enhanced hydraulic and air conductivity, significantly reducing the structural obstacles in fluvo-aquic soil.

Key words: Fluvo-aquic soil; Deep ploughing; Straw returning; Computed tomography; Pore structure; Saturated hydraulic conductivity

黄淮海平原是我国第二大平原，该区域地势平坦、光热水资源丰富，是保障国家粮食安全的重要粮食产区^[1-2]。该区域的农田土壤以河流冲积物形成的潮土为主，有机质含量低、团聚性差，土壤颗粒分散，易在降雨或灌溉后形成致密表层，阻碍根系伸展和水气交换，限制作物的生长^[2-3]。华北平原潮土区农田耕作方式主要采用的是小麦季播前旋耕，玉米季免耕直播。多年的旋耕作业，造成了农田土壤犁底层的上升，使土壤通透性下降，结构性变差。这不仅阻碍了作物根系的发育和下扎，且不利于土壤水、肥、气、热在深层土与表层土间的交换^[4-7]。因此，针对潮土不良耕层结构性状，如何采取有效的耕作措施及秸秆还田方式来改良潮土的物理特性，充分挖掘结构不良潮土的生产潜力，对保障我国的粮食安全具有重要意义。

耕作能有效改变土壤的孔隙结构，进而影响土壤中水、肥、气、热的分布与运移，创造有利于作物生长的耕层环境^[8]。不同耕作方式对土壤结构的扰动程度不同，因而对土壤结构、养分特性及微生态环境的影响存在较大差别^[4]。相较于旋耕，深耕的作业深度可达25cm以上，能够有效打破犁地层，促进作物根系的更深层次发育，从而提高底土资源的植物有效性、多样性^[6, 8]。近年来成为我国大力推广的土壤结构改良技术。然而，在没有有机

物料投入的情况下,深耕可能加速有机碳矿化,导致有机碳含量下降,而深耕配合秸秆还田可以显著降低因深耕扰动土体产生的负效应,并保持了土壤团粒结构的稳定^[9-10]。

在潮土区,小麦、玉米轮作模式产生了大量的作物秸秆,随意丢弃和露天直接焚烧的现象时有发生,造成资源浪费、地力损伤和环境污染,严重制约了农业生产的可持续发展^[11]。当前,秸秆还田是解决上述问题的关键途径。此外,秸秆还田也是改良土壤结构、提升土壤肥力的有效手段。秸秆还田可以通过有机物的直接输入,有效地替代部分化肥投入,同时维持土壤肥力,改善土壤结构、稳定作物产量^[12-13]。研究表明,相较于秸秆移除,秸秆还田能够有效降低土壤容重,改善土壤孔隙状况,为土壤提供适宜的气液比。地表秸秆覆盖,能够阻挡雨水侵蚀地表,增加入渗,从而减少土壤破坏^[14]。因此,选择合理的耕作方式及秸秆管理方式对潮土区土壤结构改良及地力提升具有重要的现实意义。

目前,在潮土区,关于不同耕作方式以及不同秸秆还田方式对土壤以及作物生长的影响的研究多集中在土壤肥力、理化性质、作物根系发育及产量和微生物及其稳定性等方面^[15-17]。而对不同耕作方式及秸秆管理方式下潮土孔隙结构特征尚未进行深入研究。然而,土壤的孔隙特征,例如土壤的孔隙度、不同大小的孔径分布和孔隙的连通性等,对土壤内的水分运动、有效传输空气、植物根系运动,提供土壤动物的栖息地、保持渗漏后的其余水分等发挥着重要的作用^[18-20]。因此,深入研究潮土的土壤孔隙结构特征有助于全面认识耕作措施以及秸秆管理方式改良潮土的效果。

由于土壤组成物质的复杂性以及土壤结构的易破碎性,传统的研究方法如切片法、压汞法、氮气吸附法、水分特征曲线法很难对土壤的孔隙结构进行定量化研究^[21-22]。近年来,X射线计算机断层扫描(XCT)技术发展迅速,由于其能够快速、无损的获取土壤三维结构,因而被广泛应用到土壤结构的研究中。综合利用XCT技术,可以研究土壤团聚体、土块乃至土体等多个尺度的土壤孔隙结构特征^[23-25]。本文拟利用XCT技术定量分析不同耕作和秸秆管理方式下原状土壤的大孔隙度、孔径大小分布、孔隙形态特征以及孔隙网络特征,以期从孔隙尺度角度为潮土区土壤的结构改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河南农田生态系统国家野外观测研究站(34°35'04" N, 115°34'09" E, 海拔50.2 m),地处黄淮海平原农田生态系统内,该区域属于暖温带半湿润季风气候区,年均降水量为712.9 mm,年蒸发量为1735 mm,年平均气温14.3 °C(冬小麦季8.3 °C、夏玉米季25.6 °C),采用常规施肥(农民习惯施肥),肥料施用均以复合肥(含氮、磷、钾的三元复混肥)为主。区域土壤类型主要为黄河沉积物发育的潮土(耕层土壤含黏粒13.31%、粉粒74.65%、砂粒12.04%),试验开始前耕层土壤基本肥力参数为有机质9.8 g·kg⁻¹,全氮0.78 g·kg⁻¹,碱解氮56.4 mg·kg⁻¹,速效磷10.5 mg·kg⁻¹,速效钾52.6 mg·kg⁻¹。种植模式为冬小麦-夏玉米一年两熟连作,冬小麦生长季为每年的10月中旬至翌年6月上旬,夏玉米生长季为每年的6月上旬至9月下旬。

本研究从试验基地(始于2017年的长期定位试验)选取了秸秆粉碎全量还田(Straw returning, SR)和秸秆不还田(Control check, CK)下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)旋耕(Rotary tillage, RT),每年玉米收获后(10月)用旋耕机旋耕2遍,作业深度为15 cm,小麦收获后(6月)直接播种镇压;(2)深翻(Deep ploughing, DP),每年玉米收获后(10月)进行25~30 cm深翻作业,然后浅旋10 cm以破碎大土块,小麦收获后(6月)直接播种镇压;(3)隔年深翻(Biennial deep ploughing, BDP),每两年(两年之间为旋耕)玉米收获后(10月)进行25~30 cm深翻作业,然后浅

旋 10 cm 以破碎大土块，小麦收获后（6 月）直接播种。

1.2 土壤样品采集

2024 年 6 月小麦收获完成后（该年隔年深翻为旋耕年），首先浇水充分湿润采样区域，使土壤达到田间持水量状态，然后利用 PVC 环刀从不同耕作处理的地块中采集原状土柱（高 20 cm，直径 10 cm）。本研究聚焦不同处理下潮土犁底层的情况，因此采集原状土柱深度为 10 ~ 30 cm。每种耕作处理重复 3 次，一共采集 18 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蒸发。之后，在 PVC 环刀周围裹上泡沫塑料并小心运回实验室进行 XCT 成像。

1.3 XCT 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 XCT 扫描。扫描电压 230 KV，电流为 170 μ A，每个土柱在样品台匀速旋转 360°，在此过程中共采集 1 500 幅投影图，空间分辨率为 65 μ m。利用 Datos|x2 Rec 软件进行图像重建，然后利用 VG Studio Max 3.5 软件生成了 3 000 多张 16 位灰度图像，大小约 20GB，并存储为 tiff 格式。鉴于图像的分辨率，从图像中获取的孔隙均为 $> 65 \mu$ m 的孔隙，本研究中将其视为大孔隙。

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 $1\,400 \times 1\,400 \times 2\,644$ 体素，实际大小为 $9 \text{ cm} \times 9 \text{ cm} \times 17 \text{ cm}$ 。

利用 ilastik 软件对处理好的灰度图像进行分割，主要包括土壤大孔隙、土壤基质（图 1）。ilastik 软件是一款基于机器学习的图像分析开源软件^[26]，该软件使用随机森林分类器通过部署多维空间特征来分割，该空间包括图像的灰度值及其强度为 $\sigma = [0.3, 0.7, 1.0]$ 的高斯平滑后的第一和第二倒数（纹理信息）。每个标签对应一个像素类别，使用画笔工具将注释添加到每个像素类别，然后使用 live update 进行分类训练，根据其特征和灰度值，如裂缝的孔径和有机物固有异质性，为每个材料类别使用几条测试线对分类器进行训练^[27]。图像分类的结果以 integer8 位格式导出，然后在 imagej 软件中使用颜色分割图像工具将图像分割成三个部分（土壤基质、POM 和孔隙），将分割后的土壤孔隙图像导入到 imagej 软件中，使用全局阈值分割法分割。

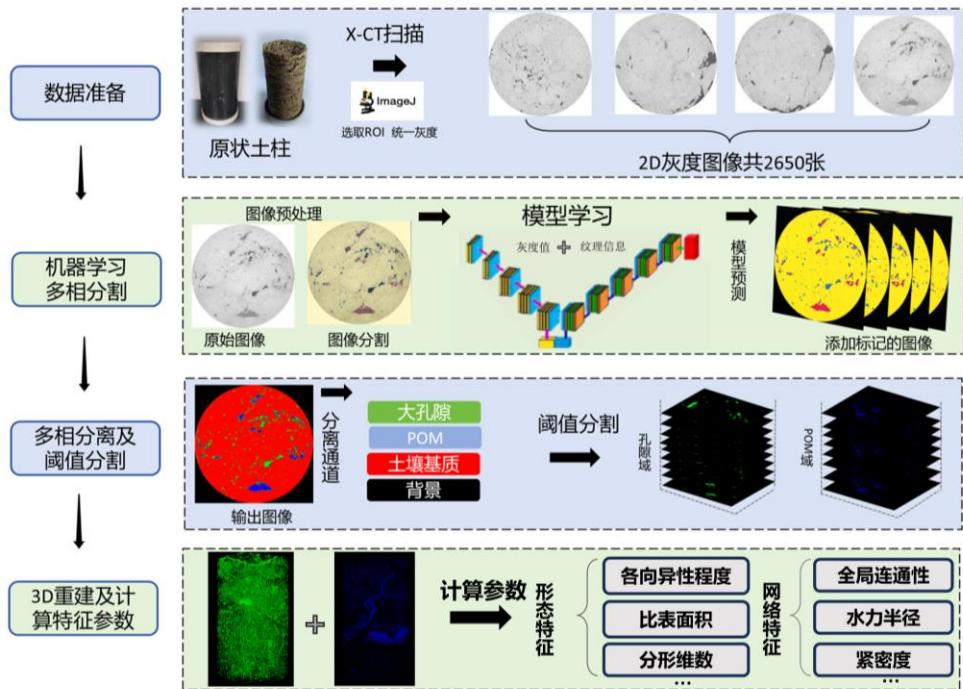


图 1 灰度图像处理流程

Fig. 1 The processing flow of gray scale images

1.4 导气速率和饱和导水率测定

XCT 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, 之后将饱和后的土柱置于砂箱中, 设置水头-46 cm, 对应排干孔径大于 65 μm 孔隙的水分, 然后使用稳态法^[27]测量空气渗透率(K_a); 根据 Darcy 方程计算

$$K_a = \frac{QL\eta}{A\Delta P} \quad (1)$$

式中, Q 为空气体积流量 ($\text{L}^3\cdot\text{T}^{-1}$), L 为土芯高度 (L), η 为空气动力黏度 ($\text{M}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$), A 为土芯横截面积 (L^2), ΔP 为土芯两端压差 ($\text{M}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{T}^{-2}$)。

测定完成后, 再次将土柱置于去离子水中饱和 1 周, 之后采用定水头法测定 K_s ^[27]:

$$K_s = \frac{QL}{A\Delta t H} \quad (2)$$

式中, K_s 为饱和导水率 ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); Q 为环刀下方出水量 (cm^3); L 为原状土高度, 近似等于环刀高度 (cm); A 为原状土横截面面积, 近似等于环刀横截面积 (cm^2); t 为时间 (d); H 为水头高度 (cm)。

1.5 大孔隙特征参数计算

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、欧拉数^[28-29]。

土壤大孔隙度指由 XCT 图像得到的大孔隙 ($>65 \mu\text{m}$) 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^[30]。基于本研究的最小分辨率及各处理间孔径分布的变化趋势^[31], 本文将孔径大小划分为 3 个等级, 分别为 65 ~ 200 μm 、200 ~ 500 μm 和 $> 500 \mu\text{m}$ 。

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

和欧拉数, 前 4 个参数用以描述土壤孔隙结构的形态特征, 后两个参数用以描述土壤孔隙结构的网络特征^[20-21]。水力半径的定义为土壤大孔隙的体积与表面积之比^[31], 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^[20], 孔隙的紧密度通过下式计算:

$$CP = \frac{A^{1.5}}{V} \quad (3)$$

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^[28,30]。各向异性程度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^[29]。 Γ 通过下式计算:

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=0}^n V_i^2}{(\sum_{i=0}^n V_i)^2} \quad (4)$$

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。欧拉数可作为孔隙局部连通性的指标^[30], 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。大孔隙比表面积定义为单位体积土壤中孔隙表面的总面积^[22], 通常以平方米每立方米 ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$) 表示。其反映了介质中孔隙的复杂性和分布特征, 比表面积越大, 孔隙吸附和保持水分的能力越强。

$$SA = \frac{A}{V} \quad (5)$$

式中, SA 代表大孔隙比表面积, A 代表孔隙表面积, V 代表每个孔隙的体积, 孔隙的表面积和体积通过“particle analyzer”插件计算。

1.6 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), 考察不同耕作和秸秆管理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与饱和导水率 (K_s)、导气速率 (K_a) 的关系, 显著性水平为 0.05。考虑到饱和导水率 (K_s) 以及导气速率 (K_a) 存在较大变异, 方差分析和相关分析中使用 K_s 和 K_a 的自然对数。

2 结 果

2.1 不同耕作处理及秸秆管理方式下土壤大孔隙 3D 结构

不同耕作处理下土壤大孔隙的三维图像见图 2。在秸秆不还田处理下, 旋耕土壤的整体孔隙分布相对稀疏 (大孔隙度为 2.79%, 低于隔年深翻及深翻处理), 且在 25 cm 左右处出现了大孔隙网络的断层, 这说明旋耕土壤在此处的孔隙连通性较差。与旋耕土壤相比, 深翻及隔年深翻处理在不同土层的不规则大孔隙均有所增加。其中, 隔年深翻土壤整体呈现出管状生物孔隙与不规则大孔隙混合分布。深翻下土壤相较于旋耕及隔年深翻土壤, 其管状生物孔隙分布得最少, 但在不同深度上不规则大孔隙分布得更加均匀。

相较于秸秆不还田, 秸秆还田下各耕作处理的不规则大孔隙整体均有所增加。在秸秆还田处理下, 旋耕处理在 12 ~ 15 cm 土层之间主要分布着尺寸较大的团块状孔隙, 在 15 ~

29 cm 土层呈现不规则大孔隙与少量的管状生物孔隙混合分布。值得注意的是，隔年深翻下土壤的管状生物孔隙在不同土层均有所减少，且管状生物孔隙的整体尺寸与长度均有所下降。相较于旋耕及隔年深翻，深翻处理在不同深度的大孔隙分布显著增加，聚集程度更高，且在 25~29 cm 土层观测到了密集的管状生物孔隙分布。

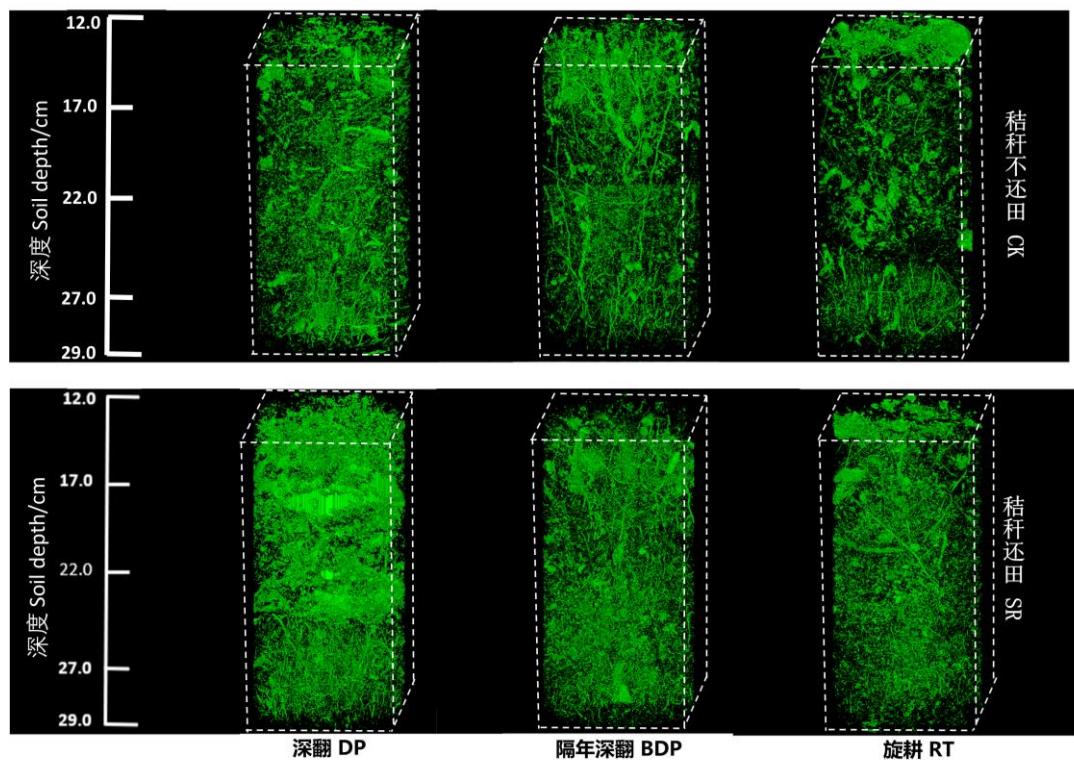


图 2 不同耕作处理及秸秆管理方式下土壤大孔隙网络的三维图像（高 17 cm，直径 9 cm）

Fig. 2 Three-dimensional images (17 cm in height and 9 cm in diameter) of soil macropores under different tillage treatments and straw management methods

2.2 不同耕作处理及秸秆管理方式下土壤大孔隙度及数量的剖面分布

土壤的大孔隙度随土壤深度的变化如图 3 所示。旋耕处理的大孔隙度在 1%~8% 之间波动，秸秆还田下旋耕处理的大孔隙度在不同深度的变异程度较大，在 15 cm 左右出现了明显的峰值，总体呈现出先上升后下降的趋势。隔年深翻土壤大孔隙的变动幅度相对稳定，除秸秆还田下隔年深翻-1、深翻-3 外，其余样品的大孔隙度波动幅度均在 1%~5% 之间。相较于旋耕及隔年深翻，深翻处理的大孔隙度随深度变化的波动幅度更大，在 1%~12% 之间波动。此外，深翻下秸秆还田的大孔隙度在不同土层均明显高于秸秆移除处理，波动幅度也更大，在 17 cm 处以及 22 cm 处出现了显著的双峰值。

与大孔隙度相比，土壤大孔隙数量随深度变化的起伏较小。在不同秸秆还田方式下，不同耕作处理在不同深度未出现显著峰值，且大孔隙数量随深度变化的增减趋势未与大孔隙度的变化趋势保持一致（图 4）。总体而言，秸秆还田配合深翻下不同深度的大孔隙数量均高于其他处理（大孔隙数量整体在 1000~2000 范围内），其变化趋势呈现先下降再上升的过程。值得注意的是，在 18 cm 处秸秆还田配合深翻处理的土壤大孔隙度处于峰值状态，而此处的大孔隙数量却相对处于低值。秸秆不还田处理下深翻土壤的大孔隙数量随深度的变化较为平缓，且在不同深度显著低于还田下的大孔隙数量。

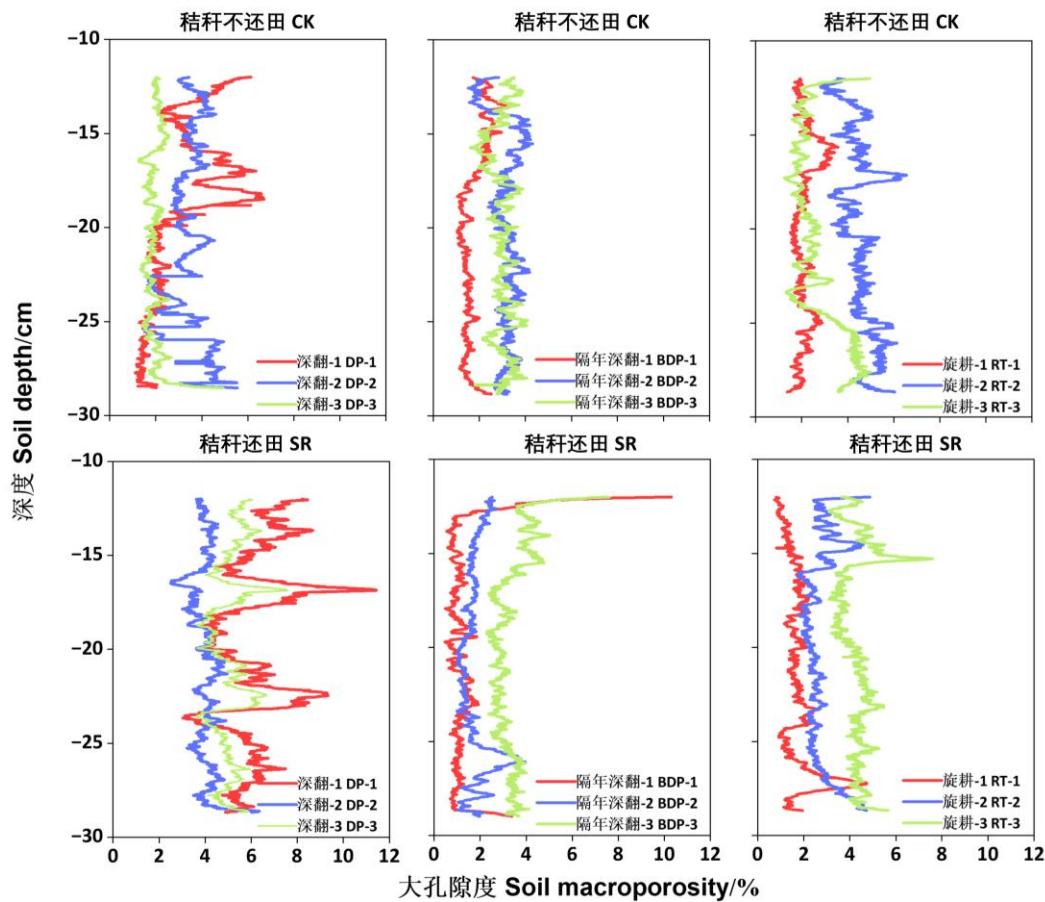


图 3 不同耕作处理及秸秆管理方式下土壤大孔隙度随深度的分布特征

Fig. 3 Distribution of soil macroporosity with depth under different tillage treatments and straw management methods

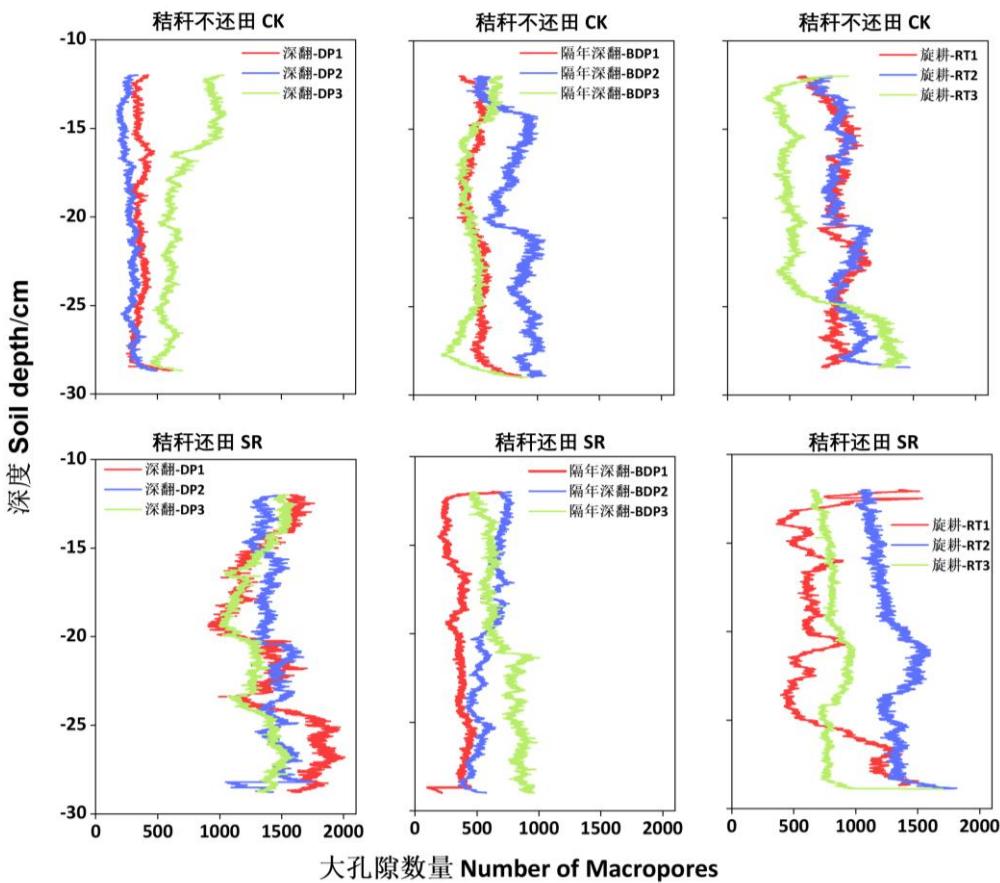


图 4 不同耕作处理及秸秆管理方式下土壤大孔隙数量随深度的分布

Fig. 4 Distribution of the number of soil macropores with depth under different tillage treatments and straw management methods.

2.3 不同耕作处理及秸秆管理方式下土壤孔径大小分布

土壤的孔径大小在不同秸秆还田处理和不同耕作方式下的三维图像如图 5 所示，在秸秆不还田处理下，旋耕处理仅在 12~15 cm 土层出现了明显的孔径较大的孔隙，在 15 cm 以下土壤孔隙的孔径均明显小于深翻及隔年深翻。隔年深翻下土壤存在较多的细长管状生物孔隙，整体孔隙尺寸大于深翻下土壤。在秸秆还田处理下，旋耕及深翻处理下整体的孔隙尺寸均有所增加，其中深翻处理孔径增大的效果更加显著，在 12~25 cm 土层观测到密集的孔径较大的孔隙。

具体分析而言，在秸秆不还田处理下，深翻在 12~20 cm 土层的大孔隙度与旋耕及隔年深翻无明显差异，在 20~29 cm 土层则明显高于隔年深翻及旋耕处理（图 6）。在 3 个大孔隙的孔径分级中，深翻处理孔径 $>500 \mu\text{m}$ 的孔隙度在 12~20 cm 与 20~29 cm 土层中表现出明显差异，由 0.48% (12~20 cm) 上升至 1.35% (20~29 cm)，提升了 2.81 倍。在秸秆还田处理下，不同耕作处理之间的孔径大小分布差异显著。深翻处理在 12~29 cm 土层的大孔隙度相较于隔年深翻及旋耕分别显著提升了 97.1% 和 68.5%。其中 12~20 cm 土层分别提高了 89.4% 和 60.1%，20~29 cm 土层分别提高了 1 倍以上和 69.1% ($P<0.05$)。

就 12~20 cm 土层而言，在 3 个大孔隙的孔径分级中， $65~200 \mu\text{m}$ 孔径，深翻较隔年深翻和旋耕分别显著增加了 3.2 倍和 1.3 倍 ($P<0.05$)； $200~500 \mu\text{m}$ 孔径，分别显著增加了 1.3 倍和 1.1 倍 ($P<0.05$)；在 $>500 \mu\text{m}$ 孔径未出现明显的变化。可见，深翻相较于隔年深翻以及旋耕，主要提升了 $65~200 \mu\text{m}$ 孔径以及 $200~500 \mu\text{m}$ 孔径的大孔隙度。在 20~29

cm 土层, 各级孔径的分布情况与 12~20 cm 土层类似, 秸秆深翻还田显著增加了 65~200 μm 孔径及 200~500 μm 孔径孔隙度。

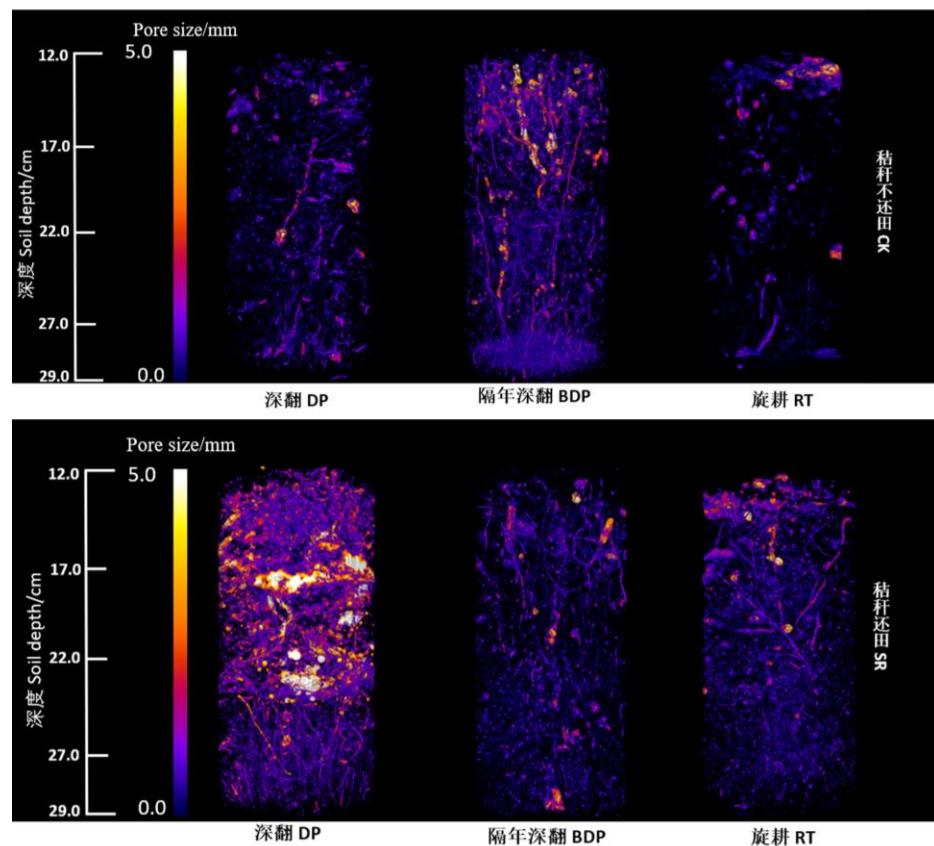
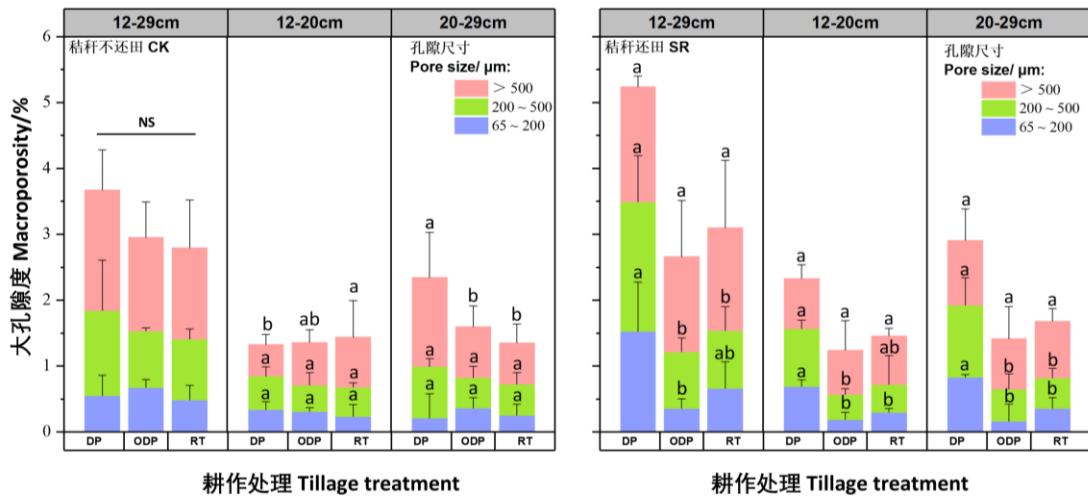


图 5 不同耕作处理及秸秆管理方式下土壤不同大小孔径的大孔隙网络的三维图像 (高 17 cm, 直径 9 cm)

Fig. 5 Three-dimensional images (19 cm in height and 9 cm in diameter) of soil macropores of different pore sizes under different tillage treatments and straw management methods



注: CK: 对照; SR: 秸秆还田; DP: 深翻; BDP: 隔年深翻; RT: 旋耕。下同。不同小写字母表示相同秸秆管理方式下不同耕作处理间差异显著 ($P<0.05$) , NS 代表所有处理之间没有显著性。Note: CK: Control check; SR: Straw returning; DP: deep ploughing; BDP: biennial deep ploughing; RT: rotary tillage. The same below. Different letters indicate a significant difference between different tillage treatments in the same straw management method ($P<0.05$), NS indicates no significant difference between treatments.

图 6 不同耕作处理和秸秆管理方式下土壤不同大小孔径分布

Fig. 6 Distribution of soil macropores of different pore sizes under different tillage treatments and straw management methods

2.4 不同耕作处理及秸秆管理方式下土壤大孔隙特征

如表 1 所示, 在秸秆不还田和还田处理下, 深翻处理的大孔隙度均高于旋耕及隔年深翻, 在秸秆还田处理下达到显著水平 ($P<0.05$)。在其余孔隙特征中, 水力半径、比表面积、分形维数一般随着大孔隙度的增加表现出增大的趋势, 各向异性程度随着大孔隙度的上升呈下降趋势。具体分析来看, 在秸秆不还田处理下, 深翻处理的水力半径和全局连通性高于旋耕及隔年深翻, 比表面积和欧拉数则显著低于旋耕及隔年深翻 ($P<0.05$)。相较于秸秆不还田处理, 秸秆还田明显改变了土壤的大孔隙特征参数, 且使得各耕作处理下的大孔隙特征参数之间的差异更显著。具体而言, 在秸秆还田处理下, 深翻的分形维数相较于隔年深翻及旋耕, 分别提升了 6.1% 和 10.6%。水力半径分别提升了 53.8% 和 42.9%, 紧密度显著提升了 1.5 倍和 2.9 倍, 全局连通性显著提高了 12 倍 ($P<0.05$), 其他孔隙特征参数均一定程度高于旋耕及隔年深翻。

表 1 土壤大孔隙特征参数

Table 1 Characteristic parameters of soil macropore

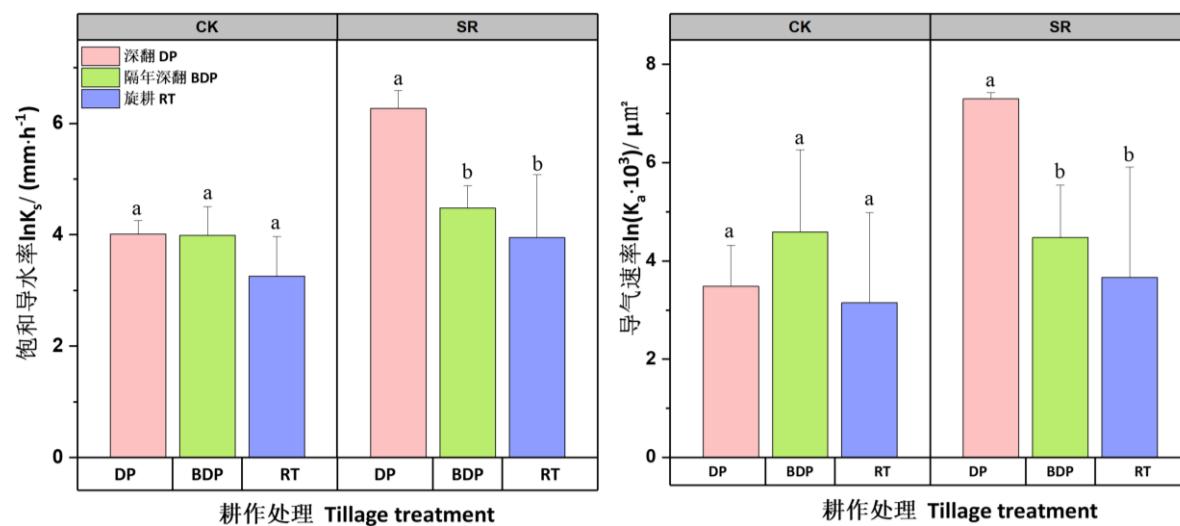
处理 Treatment	大孔隙度 ^① MP/%	各向异性程度 ^② DA	分形维数 ^③ FD	比表面积 ^④ SA	水力半径 ^⑤ HR/mm	紧密度 ^⑥ CP	全局联通性 ^⑦ Γ	欧拉数 ^⑧ EN
CK-DP	3.67±0.67a	0.44±0.17a	2.58±0.12ab	5.21±0.63b	0.20±0.05a	117±35b	0.11±0.12a	142200±100712b
CK-BDP	2.95±0.51a	0.47±0.19a	2.51±0.11b	6.93±0.49a	0.15±0.03a	104±22b	0.03±0.01a	180791±32933ab
CK-RT	2.8±0.57a	0.47±0.16a	2.60±0.04a	6.61±0.34a	0.15±0.03a	202±25a	0.08±0.02a	261889±45979a
SR-DP	5.48±0.61a	0.53±0.10a	2.57±0.15a	7.53±0.44a	0.19±0.02a	239±34a	0.12±0.06a	355618±150600a
SR-BDP	2.66±0.50b	0.49±0.17a	2.46±0.21a	7.45±0.21a	0.13±0.01a	95±50b	0.01±0.01b	245950±21748a
SR-RT	3.11±0.60b	0.47±0.09a	2.54±0.20a	7.28±0.38a	0.14±0.01a	61±22b	0.01±0.01b	349214±181878a

注: 不同小写字母表示相同秸秆管理方式下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 straw management method ($P<0.05$). ①Macroporosity; ②Degree of anisotropy; ③Fractal dimension; ④Specific surface area; ⑤Hydraulic radius; ⑥Compactness; ⑦Global connectivity; ⑧Euler number.

2.5 不同耕作处理及秸秆管理方式下土壤导气速率及饱和导水率

在相同秸秆管理方式下,不同耕作方式处理的土壤饱和导水率以及导气速率之间的差异呈现出相同的变化趋势(图7)。在秸秆不还田下,隔年深翻处理的饱和导水率及导气速率最高,旋耕处理最低,但各处理间未达到显著水平($P>0.05$)。而在秸秆还田方式下,深翻处理的饱和导水率及导气速率均显著高于旋耕及隔年深翻,相较于旋耕及隔年深翻,深翻处理的导气速率分别显著提升了99.5%和63.3%,饱和导水率分别显著提升了40.4%和21.1%($P<0.05$)。

分析同一耕作方式下不同秸秆处理的饱和导水率和导气速率,结果显示旋耕以及隔年深翻配合秸秆还田下的饱和导水率以及导气速率相较于秸秆不还田增长的幅度小,甚至出现下降的趋势,而深翻配合秸秆还田下的饱和导水率以及导气速率增幅明显。

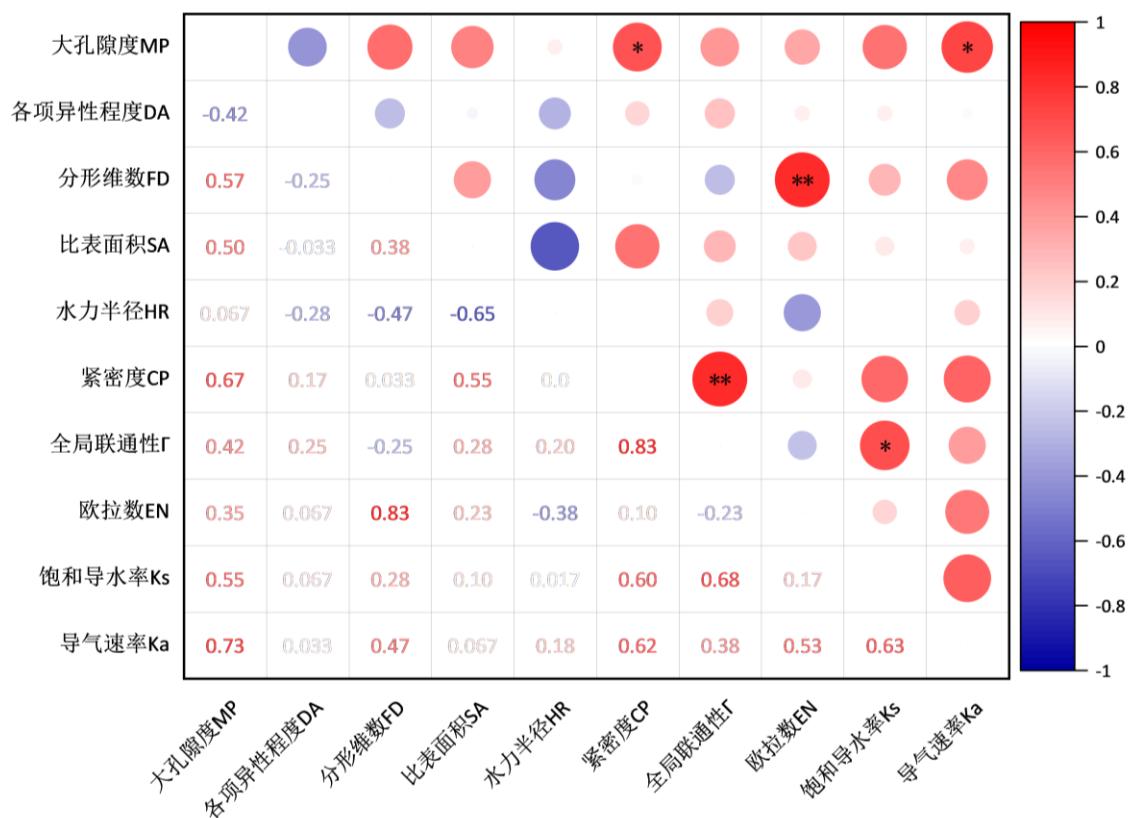


注: 不同小写字母表示相同秸秆管理方式下不同耕作处理间差异显著($P<0.05$)。Note: Different letters indicate a significant difference between different tillage treatments in the same straw management method ($P<0.05$).

图 7 不同耕作处理和秸秆管理方式下土壤的导气速率及饱和导水率

Fig. 7 Soil air conductivity and saturated hydraulic conductivity under different tillage treatments and straw management methods

图8所示为大孔隙特征参数与饱和导水率、导气速率之间的相关分析。结果显示,大孔隙度与除各向异性程度之外的所有孔隙特征均呈正相关,且与紧密度的相关性达到了显著水平($P<0.05$)。此外,紧密度与全局连通性之间呈极显著正相关。进一步观察发现,土壤的饱和导水率与除各向异性程度之外的孔隙特征参数均呈正相关性,且与全局连通性之间的相关性达到显著水平($P<0.05$),而导气速率与土壤的大孔隙度之间呈极显著正相关($P<0.01$)。



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) MP:大孔隙度 Macroporosity; (2) DA:各向异性程度 Degree of anisotropy; (3) FD:分形维数 Fractal dimension; (4) SA:比表面积 Specific surface area; (5) HR:水力半径 Hydraulic radius; (6) CP:紧密度 Compactness; (7) Γ :全局连通性 Global connectivity; (8) EN:欧拉数 Euler number; (9) K_s :饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity; (10) K_a :导气速率 Air conductivity.

图 8 土壤大孔隙特征参数及饱和导水率和导气速率的相关性

Fig. 8 Correlation analysis of soil macropore characteristic parameters and saturated hydraulic conductivity, air conductivity

3 讨论

3.1 不同耕作处理及秸秆管理方式对土壤大孔隙特征的影响

本研究表明,相较于秸秆不还田,秸秆深翻还田显著提高了土壤的大孔隙度,提升了大孔隙度随深度分布的变异性(表1、图3),有效地疏松了潮土亚表层的土壤,构建了更为复杂的大孔隙网络(图2、图5)。Wang等^[32]研究了不同处理下潮棕壤的孔隙结构,研究结果表明秸秆深翻还田增加了亚表层土壤的大孔隙度、大孔隙数量以及迂曲度,这与本文的研究结果类似。传统的连年旋耕易造成潮土耕层变浅、犁底层上移、紧实度上升、孔隙度下降^[6]。相较之下,深翻能够将表层土壤与底层土壤充分混合,破碎体积较大的土块,有效降低土壤容重,提高大孔隙度^[7],从而改变潮土的孔隙网络结构。在本研究中,对比旋耕以及隔年深翻,深翻配合秸秆还田显著增加了土壤的大孔隙度(表1)以及65~200 μm 和200~500 μm 孔径的大孔隙度(图5),这与钱泳其等^[20]和杨建君等^[33]的研究结果相一致。深翻能够有效疏松土壤耕层结构,增加土壤的大孔隙度,但由于深翻后土壤结构不够稳定,土壤强度较低,导致亚表层的土壤易受到上层土壤和农机具的压实作用,孔径较大的孔隙发生形变体积缩小^[6, 8, 27]。因此本研究中深翻配合秸秆还田处理的作用效果主要体现在65~200 μm 和200~500 μm 的大孔隙上。此外,深翻将秸秆翻入亚表层,秸秆在腐解过程中可能会

形成大孔隙，增加土壤的大孔隙度^[20]。赵丽丽等^[34]和丁奠元等^[35]研究指出秸秆具有高纤维素含量和低容重特性，将其施于农田可有效降低土壤紧实状况，可以促进土壤孔隙结构的发育，增加土壤总孔隙度和结构孔隙度，改善土壤耕性。高子勤和安桂茹^[36]报道了耕作过程中的秸秆深翻还田能够改变土壤微形态结构，导致土壤颗粒和孔隙重新排列，有机物和分解或半分解状态的有机残体通过凝聚和侵染作用增加土壤中微团聚体和孔隙，促进土壤微结构向良好方向发育。可见，有机物料的深翻还田有助于疏松土壤，增加土壤的大孔隙度。本研究中，秸秆还田下深翻土壤的大孔隙度随深度的变化出现了显著的峰值（图3），结合土壤大孔隙网络的三维图像（图1）和不同大小孔径的大孔隙网络的三维图像（图4）可以初步推断，此处的峰值可能是秸秆在腐解过程中形成了大孔隙，从而增加了土壤的大孔隙度。综上，秸秆深翻还田是疏松土壤，提升土壤大孔隙度的有效措施。

本研究中不同秸秆管理方式和不同耕作处理对土壤大孔隙特征的影响显著（图1、图4、表1）。在秸秆不还田下，深翻处理的大孔隙度、水力半径、全局连通性显著高于旋耕和隔年深翻，但紧密度、比表面积显著低于旋耕和隔年深翻，这与韩上等^[37]和Qin等^[38]报道的研究结果相类似。翻耕通常会破坏土壤中的团粒结构，加之秸秆不还田，此时土壤中的有机质含量较低，团粒结构可能会发生退化，易出现板结现象，影响孔隙特征^[37]。而隔年深翻相对而言对土壤结构的扰动程度低于年年深翻，一定程度上保留了土壤的原状团粒结构，有利于保持土壤的孔隙网络^[39-40]。结合图1以及图4，由于隔年深翻对亚表层土壤的扰动程度相对低，主要依靠根系下扎以及蚯蚓等土壤生物活动形成细长的管状生物孔隙，而深翻由于剧烈扰动破碎了土块，扰乱了土壤的原状孔隙结构，主要分布着形态复杂的不规则孔隙^[41]。相较于秸秆不还田，秸秆还田使不同耕作方式下的土壤大孔隙特征差异更加显著。从表1可以看出，秸秆还田下隔年深翻处理的大孔隙度、水力半径、紧密度、全局连通性均呈现出了一定幅度的降低，深翻处理的紧密度下降，其他孔隙特征参数均一定程度上升。综上，秸秆深翻还田改善土壤孔隙的形态特征与网络特征的效果优于旋耕及隔年深翻。

为了进一步探究不同秸秆管理方式下不同耕作处理对土壤孔隙结构的影响，厘清不同孔隙特征参数之间的内在联系，本研究对各孔隙特征参数之间进行了相关性分析。从图8可以看出土壤的大孔隙度与除各向异性程度外的其他孔隙特征参数均呈负相关关系，且与紧密度呈显著正相关（ $P<0.05$ ），孔隙紧密度与全局连通性呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），这说明孔隙的紧密度可以用以估计潮土大孔隙的基本特性，此外，土壤的大孔隙度与分形维数之间相关性高，但未达到显著水平（ $P>0.05$ ），这一定程度上说明孔隙的当量直径越大，分布得越密集，其形态可能就越复杂。综上，土壤孔隙结构特征参数之间存在着明显的相关关系。

3.2 不同耕作处理及秸秆管理方式对土壤饱和导水率及导气速率的影响

本研究表明，在秸秆不还田处理下，不同耕作方式下土壤的饱和导水率与导气速率之间未表现出显著性差异（ $P>0.05$ ）。相较于秸秆不还田，秸秆深翻还田显著提高了土壤的饱和导水率及导气速率，且效果显著高于旋耕及隔年深翻（图7）。研究表明，有机物料的施用能够显著影响土壤的孔隙结构，秸秆腐解量越高，孔隙度增加越显著，孔隙结构越复杂，从而促进水分入渗、气体扩散^[24,36-37]。本研究中，在秸秆还田下深翻土壤各土层观测到的秸秆及作物根系腐解形成较大的团块状孔隙密度高于旋耕及隔年深翻，且在20~29 cm土层观测到的团块状孔隙密度高于12~20 cm土层（图1及图4）。以上研究表明，深翻土壤中的秸秆在腐解过程中形成较大孔隙，改变土壤的孔隙分布，形成疏松多孔的土壤结构，进一步改善了土壤的导水透气性^[6, 14, 20, 28]。为了研究不同耕作方式下土壤孔隙结构对导水透气能力的影响，本研究对孔隙结构特征参数以及饱和导水率和导气速率进行了相关性分析。从图8中可以看出，土壤的饱和导水率和导气速率与分形维数、比表面积、紧密度等特征参数均呈正相关，与大孔隙度、全局连通性呈显著正相关性（ $P<0.05$ ）。这表明土壤的孔隙度越高、形态越复杂，连通性能越好，越能有效提升土壤的导水和透气能力^[21, 28, 39]。结合表1，秸秆深翻还田相较于旋耕及隔年深翻还田显著提升了土壤的大孔隙度（ $P<0.05$ ），增加了孔隙网络

结构的复杂程度，从而加速了秸秆及根系的腐解速率^[42-43]，显著提升了饱和导水率及透气速率。回顾以往研究，钱泳其等^[20]报道了秸秆深翻还田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。王玥凯等^[6]报道了深翻显著降低了砂姜黑土亚表层土壤容重和穿透阻力，提高了土壤有效水分库容和饱和导水率。潮土区在长期单一旋耕模式下耕层变浅、土壤紧实、孔隙度下降，进而影响水分和养分的运移^[2, 4]。因此，在潮土区，从对土壤导水及透气性的影响来看，秸秆深翻还田对潮土结构的改良效果显著。

4 结 论

本文基于 X 射线 CT 扫描技术对河南商丘野外实验观测站潮土进行成像分析，研究了不同秸秆管理方式和耕作处理对土壤大孔隙结构特征的影响，得到如下结论：秸秆深翻还田有效地改善了 12 ~ 29 cm 土层的土壤结构，显著增加了 65 ~ 200 μm 和 200 ~ 500 μm 孔径的孔隙度，提升了土壤孔隙的复杂性和连通性，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及透气速率。总体上，深翻有效地改善了潮土的犁底层，对潮土结构的改良效果优于旋耕及隔年深翻。因此，从土壤孔隙尺度来看，深翻对消减潮土结构障碍的效果明显。

参考文献 (References)

- [1] Kong X B, Lal R, Li B G, et al. Fertilizer intensification and its impacts in China's HHH Plains[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2014: 135-169.
- [2] Sun B, Zhu A N, Yao R J, et al. Research progress on obstacle reduction technology and productivity improvement model in fluvo-aquic soil, red soil and saline-alkali soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1231-1247. [孙波, 朱安宁, 姚荣江, 等. 潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1231-1247.]
- [3] Liu Z D, Zhang K, Mi Z R, et al. Characteristics of soil fertility and its relation with crop yield in fluvo-aquic soil irrigation area of north Henan[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 31-37. [刘战东, 张凯, 米兆荣, 等. 豫北潮土灌区土壤肥力特征与作物产量的关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 31-37.]
- [4] Li L Y, Wang S J, Jiang G Y, et al. Rotation tillage mode improves wheat root and yield in FluvoAquic soil in norther Henan Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(18): 3626-3641. [李连燚, 王世纪, 姜桂英, 等. 轮耕促进豫北潮土区小麦根系生长和产量增加[J]. 中国农业科学, 2024, 57(18): 3626-3641.]
- [5] Nie H L, Yang J F, Yang Y M, et al. Effects of long-term deep tillage, straw returning and nutrient management on organic carbon mineralization of fluvo-aquic soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(18): 70-80. [聂浩亮, 杨军芳, 杨云马, 等. 长期秸秆深翻还田及养分管理对潮土有机碳矿化影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 70-80.]
- [6] 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.]
- [7] 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.
- [8] Hu J M, Chen S N, Wei X H, et al. Effects of tillage model on healthy plough layer structure and its development trends[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(2): 95-103. [胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 等. 耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 95-103.]
- [9] 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.]
- [10] Schneider F, Don A, Hennings I, et al. The effect of deep tillage on crop yield—What do we really know[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 193-204.
- [11] Yang C W, Xing F, Zhu J C, et al. Temporal and spatial distribution, utilization status, and carbon emission reduction potential of straw resources in China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 1149-1162. [杨传文, 邢帆, 朱建春, 等. 中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1149-1162.]
- [12] Ji Y K, Yan L, Zhu J F, et al. Response of soil organic carbon to maize stovers returning to in farmland diverse main maize-producing areas based on meta-analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(12): 95-106. [纪妍可, 焉莉, 朱健菲, 等. 基于 Meta 分析的不同玉米主产区土壤有机碳含量对秸秆还田的响应[J]. 农业工程学报, 2025, 41(12): 95-106.]
- [13] 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.]
- [14] Zhai Z, Li Y Y, Guo J J, et al. Effect of tillage depth on soil physical properties and yield of winter wheat-summer maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(11): 115-123. [翟振, 李玉义, 郭建军, 等. 耕深对土壤物理性质及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 115-123.]
- [15] Zhang X Q, Yang W F, Xu Y J. Effects of main tillage methods on soil structure, nutrients and micro-ecological environment of upland in China: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(12): 2464-2472. [张向前, 杨文飞, 徐云姬. 中国主要耕作方式对旱地土壤结构及养分和微生态环境影响的研究综述[J]. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2464-2472.]
- [16] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112391.
- [17] Cheng G F, Huang D, Zhao D L, et al. Current situation of soil fertility in fluvo-aquic soil region of Henan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(27): 101-105. [程国峰, 黄达, 赵冬丽, 等. 河南省潮土区土壤肥力现状分析[J]. 中国农学通报, 2022, 38(27): 101-105.]
- [18] Guo S Y, Shang S, Zhang Y, et al. Effects of different rotation tillage practices and biochar dosage on maize yield and soil physical and chemical properties in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2023, 51(3): 271-277. [郭书亚, 尚赏, 张艳, 等. 不同轮耕方式与生物炭用量对潮土区玉米产量及土壤理化性质的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(3): 271-277.]
- [19] Guo L J, Zhang L, Liu L, et al. Effects of long-term no tillage and straw return on greenhouse gas emissions and crop yields from a rice-wheat system in Central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 322: 107650.
- [20] 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, 61(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.]
- [21] Li B G, Zhou H, Wang G, et al. Explore the “transparent” soils: Soilporelogy has sailed[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1221-1230. [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.]
- [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] Zhou H, Lü Y Z, Li B G. Advancement in the study on quantification of soil structure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3): 501-506. [周虎, 吕贻忠, 李保国. 土壤结构定量化研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 501-506.]
- [24] Li D C, Zhang T L, Velde B. Application of CT analysis technology in soil science research[J]. *Soils*, 2002, 34(6): 328-

332. [李德成, 张桃林, B.Velde. CT 分析技术在土壤科学中的应用[J]. 土壤, 2002, 34(6): 328-332.]
- [25] He X B, Feng H, Feng Z D. 3D imaging of soil microstructure using synchrotron X-ray computed microtomography[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(2): 328-330. [贺秀斌, 冯桓, 冯兆东. 土壤显微结构的 X 光一同步加速器计算机三维图像透视技术[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 328-330.]
- [26] Guo Z C, Ding T Y, Wang Y K, et al. Quantifying and visualizing soil macroaggregate pore structure and particulate organic matter in a Vertisol under various straw return practices using X-ray computed tomography[J]. Geoderma, 2024, 452: 117105.
- [27] Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Determination of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978: 25-26. [中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 25-26.]
- [28] 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.
- [29] Dougherty R, Kunzelmann K H. Computing local thickness of 3D structures with ImageJ[J]. Microscopy and Microanalysis, 2007, 13(S02): 1678-1679.
- [30] 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.
- [31] Qian Y Q, Yang X F, Zhang Z B, et al. Estimating the permeability of soils under different tillage practices and cropping systems: Roles of the three percolating pore radii derived from X-ray CT[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 235: 105903.
- [32] Wang J K, Sun C X, Zhang Y L, et al. Straw return rearranges soil pore structure improving soil moisture memory in a maize field experiment under rainfed conditions[J]. Agricultural Water Management, 2024, 306: 109164.
- [33] Yang J J, Gai H, Zhang M X, 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. [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.]
- [34] 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.]
- [35] Ding D Y, Feng H, Zhao Y, et al. Effect of ammoniated straw returning on soil pore structure[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(3): 650-658. [丁奠元, 冯浩, 赵英, 等. 氨化秸秆还田对土壤孔隙结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 650-658.]
- [36] Gao Z Q, An G R. Micromorphological characteristics of some cultivated soils in north-eastern China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1982, 19(1): 85-91, 99-102. [高子勤, 安桂茹. 东北几种耕作土壤的微形态特征[J]. 土壤学报, 1982, 19(1): 85-91, 99-102.]
- [37] Han S, Wu J, Li M, et al. Deep tillage with straw returning increase crop yield and improve soil physicochemical properties under topsoil thinning treatment[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(2): 276-284. [韩上, 武际, 李敏, 等. 深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 276-284.]
- [38] Qin W, Hu C S, Oenema O. Soil mulching significantly enhances yields and water and nitrogen use efficiencies of maize and wheat: A meta-analysis[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 16210.
- [39] Shi Y C, Lalande R, Hamel C, et al. Seasonal variation of microbial biomass, activity, and community structure in soil under different tillage and phosphorus management practices[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(7): 803-818.
- [40] Gupta Choudhury S, Srivastava S, Singh R, et al. Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice-wheat cropping system under reclaimed sodic soil[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 136: 76-83.
- [41] 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.]
- [42] 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.
- [43] Ding T Y, Guo Z C, Qian Y Q, et al. Interaction between POM and pore structure during straw decomposition in two soils with contrasting texture[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 245: 106288.

(责任编辑: 檀满枝)