

DOI: 10.11766/trxb202506090267

CSTR: 32215.14.trxb202506090267

胡鑫慧, 王璐, 刘芳芳, 郭洪海, 贾曦. 有机-无机物料覆盖调控盐碱地表土孔隙的显微 CT 解析与农艺效应[J]. 土壤学报, 2026, 63(5): 1557–1567.

HU Xinhui, WANG Lu, LIU Fangfang, GUO Honghai, JIA Xi. Micro-CT Analysis and Agronomic Effects of Organic-inorganic Amendment Mulching on the Regulation of the Pore Architecture in Saline-Alkali Topsoil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63(5): 1557–1567.

## 有机-无机物料覆盖调控盐碱地表土孔隙的显微 CT 解析与农艺效应\*

胡鑫慧<sup>1, 2</sup>, 王璐<sup>1, 2, 3</sup>, 刘芳芳<sup>1, 2</sup>, 郭洪海<sup>1</sup>, 贾曦<sup>1, 2, 3†</sup>

(1. 山东省农业科学院/农业农村部盐碱地生物资源与评价利用重点实验室, 济南 250100; 2. 山东省农业科学院黄河三角洲现代农业研究院, 山东东营 257347; 3. 国家盐碱地综合利用技术创新中心, 山东东营 257347)

**摘 要:** 为明确有机-无机调控物料覆盖对盐碱土表层孔隙结构的影响, 并筛选适宜作物种子萌发的覆盖物料。设置 CK (原土)、JX1 (牛粪+HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>)、JX2 (菌渣+HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>)、JX3 (秸秆+HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>) 4 种试验处理, 采用“V 型沟→播种→覆盖调控物料→镇压”一体化田间作业方式, 利用 CT 扫描技术解析土壤结构及其孔隙特征, 结合田间试验与数理统计进行研究。结果表明, 各处理均能降低土壤容重、提升土壤持水与导水性能, 其中 JX2、JX3 饱和导水率达 CK 的 2.4 倍, 田间持水量提高 17.8%~19.5%。在孔隙结构方面, 不同物料覆盖显著影响土壤孔隙数量与分布特征: JX2、JX3 整体孔隙率及连通孔隙率显著提升, JX1 整体孔隙率较低; JX3 以大孔隙为主, 小孔隙较少, JX2 孔径孔隙分布更均衡。对比孔隙结构参数, JX2、JX3 分形维数、各向异性和成圆率数值接近, 但 JX2 的欧拉数显著低于 JX3, 说明两处理均增强孔隙结构的复杂性与稳定性, 且 JX2 具有更优的孔隙连通性。这些结构优化显著改善种子萌发的微环境, 提高谷子的出苗率与苗期生长性状, 其中 JX2 尤为显著。综上所述, 有机-无机调控物料覆盖可通过优化盐碱土孔隙特征增强土壤结构性能, 为作物种子萌发创造适宜条件, 其中菌渣 (JX2) 与秸秆 (JX3) 基物料效果突出, 是高效调控滨海盐碱地微域环境、破除表土板结的有效技术途径。

**关键词:** 滨海盐碱地; 有机-无机调控物料; 土壤孔隙结构; 菌渣; 显微 CT

**中图分类号:** S156.4      **文献标志码:** A

## Micro-CT Analysis and Agronomic Effects of Organic-inorganic Amendment Mulching on the Regulation of the Pore Architecture in Saline-Alkali Topsoil

HU Xinhui<sup>1, 2</sup>, WANG Lu<sup>1, 2, 3</sup>, LIU Fangfang<sup>1, 2</sup>, GUO Honghai<sup>1</sup>, JIA Xi<sup>1, 2, 3†</sup>

(1. Shandong Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Biological Resources, Evaluation and Utilization of Saline-Alkali Land, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China; 2. Institute of Modern Agriculture on Yellow River Delta, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Dongying, Shandong 257347, China; 3. National Center of Technology Innovation for Comprehensive

\* 国家重点研发计划项目 (2023YFD2001405, 2021YFD1900902) 和山东省重点研发计划项目 (2024SFGC0403) 共同资助 Supported by the National Key R&D Program of China (Nos. 2023YFD2001405, 2021YFD1900902), and the Key R&D Program of Shandong Province, China (No. 2024SFGC0403)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jiaxi@shandong.cn

作者简介: 胡鑫慧 (1996—), 女, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事盐碱地综合利用研究。E-mail: huxinhui173@163.com

收稿日期: 2025-06-09; 收到修改稿日期: 2026-01-27; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-05-08

Utilization of Saline-Alkali Land, Dongying, Shandong 257347, China)

**Abstract:** This study aimed to clarify the effects of organic-inorganic regulating material mulching on the pore structure of saline-alkali topsoil and select suitable mulching materials for crop seed germination. **【 Method 】** Four experimental treatments were set up, namely CK(native soil), JX1(composted cow dung +(a mixture of HA, CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, and Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>)), JX2 (spent substrate +(a mixture of HA, CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, and Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>)), and JX3(composted straw +(a mixture of HA, CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, and Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>)). A field operation involving digging V-shaped ditches→sowing→applying amendments→rolling was adopted. Soil structure and its pore characteristics were analyzed using micro-computed tomography (micro-CT) scanning, combined with field experiments and mathematical statistical analysis. **【 Result 】** The results showed that all treatments reduced soil bulk density and improved soil water capability and saturated hydraulic conductivity. Specifically, the saturated hydraulic conductivity of JX2 and JX3 was 2.4 times that of CK, and their soil water capability increased by 17.8%–19.5%. In terms of pore structure, different mulching material significantly affected the quantity and distribution characteristics of soil pores: The JX2 and JX3 showed significantly increased total porosity and connected porosity, while JX1 had lower total porosity; JX3 was dominated by macropores with fewer micropores, whereas JX2 had a more balanced pore size distribution. Comparison of pore structure parameters revealed that JX2 and JX3 had similar values of fractal dimension, anisotropy, and circularity ratio, but the Euler number of JX2 was significantly lower than that of JX3. This indicated that both treatments enhanced the complexity and stability of the pore structure, and JX2 had better pore connectivity. These pore structure optimizations significantly improved the microenvironment for seed germination, thereby increasing the emergence rate and improving the seedling growth traits of foxtail millet, with JX2 showing particularly notable effects. **【 Conclusion 】** In conclusion, Organic-inorganic amendment mulching can enhance soil structural performance by optimizing the pore characteristics of saline-alkali soil and create a suitable soil microenvironment for crop seed germination. Among the tested materials, the spent mushroom substrate residue-based (JX2) and straw-based (JX3) regulating materials showed the most significant effects. These combinations are effective technical approaches for efficiently regulating the microenvironment of coastal saline-alkali soil and breaking surface soil compaction.

**Key words:** Coastal saline-alkali soil; Organic-inorganic amendment; Soil pore structure; Spent mushroom substrate; Micro-CT scanning

盐碱地作为典型障碍性土壤,其治理与利用受盐碱化、有机质匮乏、板结等多重关联障碍制约,“盐胁迫-土壤板结-孔隙退化”的连锁反应是影响作物生长的核心症结之一。在我国滨海盐碱地中,以氯化钠为主的水溶性盐类,一方面通过提高土壤渗透压、随水分蒸发浓缩结晶破坏团聚体结构,另一方面与黏重土质协同诱发板结并形成物理障碍层<sup>[1-2]</sup>;而板结会进一步导致土壤容重升高、孔隙度降低及形态异化,致使主导通气与水分传导的大孔隙、提供根系伸展空间的整体孔隙功能退化<sup>[3]</sup>。这种退化对作物形成双重胁迫:种子萌发阶段,孔隙堵塞引发的缺氧与高盐渗透胁迫叠加,造成发芽率下降、烂种烂芽;生长阶段,透气性差限制根系功能,导致植株矮小、根系发育不良和抗逆性衰减,最终降低产量与品质<sup>[2]</sup>。因此,调控并优化滨海盐

碱地大、小孔隙比例及连通性,是破解上述连锁障碍、缓解多重胁迫、保障作物正常生长发育的关键途径<sup>[3-5]</sup>。

滨海盐碱地传统治理以水利、物理、生物、化学协同调控为核心,水利措施依托明沟排水、暗管排盐技术调控水盐脱盐<sup>[6]</sup>,物理措施采用客土置换、秸秆覆盖构建阻盐层<sup>[7]</sup>,生物措施通过种植耐盐植物抑制返盐并提升微生物活性<sup>[8]</sup>,化学措施则利用脱硫石膏、腐殖酸等改良剂置换土壤中吸附的 Na<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup><sup>[9]</sup>。但这些传统方法存在高耗水、返盐快、成本高、周期长等局限,且对农田采取“一刀切”式改良,难以快速破解土壤板结症结。为此,本研究团队发明了微生境精准调控技术,通过钙、镁、硅、硒与腐殖酸等有机-无机材料优化复配施用,调控根域微环境、促进作物萌芽及其根系发育区土壤结构

修复,已在谷子种植中实现出苗率显著提升、土壤容重降低的效果<sup>[1]</sup>,该技术以“局部精准改良、降低作业强度、同步优化土壤孔隙系统”为核心优势,配套研制出开沟、播种、覆料、镇压一体化机械装备,有效弥补传统方法的短板,目前,该技术已在黄河三角洲盐碱地示范应用,为滨海盐碱地利用提供了新途径。

自 Petrovic 等<sup>[10]</sup>于 1982 年首次将医用 CT 技术应用于土壤容重测定以来,该技术已成为土壤结构三维可视化表征的关键手段<sup>[11-12]</sup>。图像处理技术的突破,使研究者可精准提取孔隙体积、表面积、孔隙数、成圆率、分形维数、拓扑结构等拓扑参数<sup>[13-14]</sup>,这些参数直接影响土壤溶液的流动速度与流通量分布均匀性,且控制着土壤中水分、溶质、气体的运移和扩散过程;尤其土壤大孔隙的存在,可显著改善土壤通气性、降水入渗率,对减少地表径流和提升作物水分利用效率具有关键作用<sup>[15]</sup>。研究证实,有机物料施用可显著影响 0~20 cm 土层大孔隙数量<sup>[12]</sup>、成圆率<sup>[16]</sup>、欧拉数、各向异性和分形维数<sup>[17-18]</sup>。然而,盐碱地表层 0~3 cm 微域作为作物发育的水-盐-肥-气交换界面,其孔隙结构在作物种子萌发与苗期对不同覆盖材料的响应特征,目前仍存在研究空白。基于此,本研究依托盐碱地有机-无机物料覆盖试验,采用高分辨率 CT 扫描技术,定量分析覆盖层土壤孔隙结构三维重构特征及参数,阐明不同物料覆盖对盐碱土壤表层孔隙结构的影响,筛选出适宜作物种子萌发的覆盖物料,为高效调控滨海盐碱地作物根域环境、重构土壤孔隙结构、快速破除表土板结提供理论依据与技术方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于山东省农业科学院东营基地(37°17'42"N, 118°37'11"E),土壤为滨海盐碱地,土壤质地为重壤,耕层土壤全盐含量 1.5~1.6 g·kg<sup>-1</sup>,土壤有机质 10.2 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 23.4 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷 11.7 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 281.2 mg·kg<sup>-1</sup>、表层土壤容重 1.34 g·cm<sup>-3</sup>、pH 8.24。

### 1.2 供试材料及有机-无机调控物料配方

有机调控物料:牛粪(CD)、菌渣(MR)、玉

米秸秆(CS)和腐殖酸(HA),其中 CD、MR、CS 均充分发酵腐熟,粒径 2~3 mm,质量含水量 15%,容重 1 g·cm<sup>-3</sup>。无机调控物料:CaO、MgO、SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 等中量和微量元素肥料。调控物料与原状土比例(料土比)3:7。

有机-无机调控物料配方质量比(%):

CK—原土覆盖

JX1—CD : HA : CaO : MgO : SiO<sub>2</sub> : Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>=76.99: 6: 10: 3: 4: 0.01

JX2—MR : HA : CaO : MgO : SiO<sub>2</sub> : Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>=76.99: 6: 10: 3: 4: 0.01

JX3—CS : HA : CaO : MgO : SiO<sub>2</sub> : Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>=76.99: 6: 10: 3: 4: 0.01

试验指示作物:谷子(济谷 22)。

### 1.3 试验设计

本试验于 2023 年 6 月 23 日播种谷子,设置 4 个试验处理,分别为 CK(对照)、JX1(牛粪+HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>)、JX2(菌渣+HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>)、JX3(秸秆+HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>)。采用随机区组设计,每个处理设 3 次重复,小区规格为 1 m×0.5 m(面积 0.5 m<sup>2</sup>),每小区均匀播种 150 粒。播前先将试验地块平整细,开“V”型播种沟,沟深 5.5~6.0 cm,上口宽 5 cm,种子播于沟内后,先浅覆原土约 0.5 cm,再均匀覆盖对应处理的调理物料至 1.5 cm 厚,最后进行镇压,以保证种子与土壤充分接触(图 1)。

### 1.4 谷子苗期生物学性状调查与方法

出苗率:出苗后,于每个处理样方内每日统计发芽与未发芽种子数,持续测量至出苗进程结束(2023 年 6 月 30 日—2023 年 7 月 5 日)。计算公式为:出苗率(%)=(发芽种子数/播种种子数)×100%。

株高、根长、茎粗:植株取样后,于各处理样方内随机选取 30 株(2023 年 7 月 21 日),采用直尺测定单株高与根长,使用游标卡尺测量茎粗。

根冠比:选取根系完整的植株样品(2023 年 7 月 21 日),抖落或清水冲洗根部土壤,用剪刀分离根部和冠部,分别烘干至恒重后称量并记录。计算公式为:根冠比=根部干重/冠部干重。

### 1.5 土壤样品采集与测定

谷子播种后 5~7d,初生根系初步建成(主根长约 1 cm),胚芽鞘亦突破地表完成出苗<sup>[19]</sup>。基于

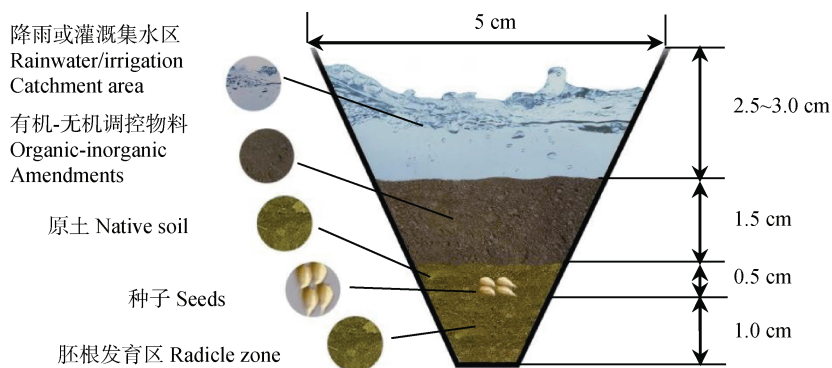


图 1 调控物料覆盖与“V”形沟融合田间作业示意图

Fig. 1 Schematic diagram of field operation integrating the coverage of organic-inorganic amendment and the “V”-shaped ditch

这一萌发特性, 本试验将种子萌发期关键土壤空间自上而下划分为三个层次: 1.5 cm 厚的种床上层(覆盖物料层)、0.5 cm 厚的播种区(种子所在层), 以及其下方 1 cm 厚的胚根发育区。该土层是支撑种子萌发与幼苗初期生长的种床, 也是有机-无机调理物料活性成分作用于根域微环境的靶区, 因此本研究将上述深度范围设定为土壤样品的采集深度。

2023 年 7 月 21 日, 取样前先对试验采样区充分浇水, 静置 2~3d 后开展取样(以降低挖掘与取样难度)。每个重复随机选取 1 个采样点, 采用一端打磨成刀刃状的 PVC 环刀(高 30 mm, 内径 48 mm)进行样品采集, 每个处理重复采集 3 次。采集后立即用保鲜膜密封 PVC 环刀, 防止水分散失破坏土壤结构, 随后装入保温盒带回实验室, 置于 4 °C 冰箱中保存待测。在 PVC 环刀样品的采集与运输过程中, 需尽量避免土体扰动, 以防影响后续 CT 扫描结果。同时, 在每个小区内随机设置 3 个采样点, 采用环刀采集 0~3 cm 土层土壤样品, 用于测定土壤容重、饱和导水率及田间持水量, 测定方法参照文献<sup>[20]</sup>。原状土柱的结构扫描采用天津三英精密仪器股份有限公司生产的 nano Voxel-4000 型显微 CT 完成。

### 1.6 CT 扫描与图像处理及参数获取方法

采用 Nano Voxel-4000 显微 CT 进行扫描, 将其峰值电压设定为 200 kV, 电流设为 400  $\mu$ A, 扫描时长为 1h, 分辨率达 20  $\mu$ m。扫描流程依次为: 样品制备, 使样品旋转以获得投影图, 运用多种算法依据投影数据获得重建切片图像, 把 2D 平面照片重构为三维立体信息, 开展图像处理与阈值分割, 最后进入分析模块。

土壤孔隙可视化: 借助 AVIZO.2019.1 版本软件实现。

孔隙相关参数计算: 孔隙体积、周长、面积和数量通过 Imagej 中 3D object counter 插件完成计算。分形维数和各向异性利用 Bonej 插件完成, 分形维数越大, 表明物体孔隙结构越复杂, 孔隙状况越好<sup>[14]</sup>; 各向异性数值越接近 0, 表明孔隙形态越趋于规则<sup>[13]</sup>。欧拉数采用 particle analyzer 完成计算, 欧拉数越低, 表明孔隙连通性越高<sup>[20]</sup>。成圆率、孔隙度和当量孔径分别参照文献<sup>[21-22]</sup>进行计算。计算公式如下:

$$C = \frac{4\pi A}{L}$$

式中,  $C$  为成圆率, 取值范围在 0 和 1 之间;  $A$  为孔隙面积 ( $\text{mm}^2$ );  $L$  为孔隙周长 ( $\text{mm}$ )。成圆率越接近 1, 表明孔隙形态越接近圆形<sup>[13]</sup>。

$$P = \frac{V_1}{V_2} \times 100$$

式中,  $P$  为孔隙度 (%),  $V_1$  为孔隙体积 ( $\text{mm}^3$ ),  $V_2$  为图形体积 ( $\text{mm}^3$ )。

$$E_D = \frac{4A}{\pi}$$

式中,  $E_D$  为当量直径 ( $\text{mm}$ )。

鉴于本研究使用的 nanoVoxel-4000 显微 CT 的分辨率为 20  $\mu$ m, 参考 Wang 等<sup>[23]</sup>提出的划分方法对土壤孔径进行分类, 即大于 1 000  $\mu$ m 划分为大孔隙, 500~1 000  $\mu$ m 划分为中孔隙, 小于 500  $\mu$ m

划分为小孔隙。

1.7 数据分析

运用 Excel 对试验数据进行整理计算，借助 SPSS 21.0 对数据开展单因素方差分析，以解析不同处理对谷子苗期生物学性状、土壤物理性状以及土壤孔隙结构的影响。

2 结 果

2.1 不同有机-无机调控物料覆盖对谷子苗期生物学性状的影响

通过对谷子苗期生物学性状的调查与统计分析（表 1），结果表明，不同处理对谷子苗期生物学性状的影响呈显著差异。与 CK 相比，JX1、JX2、JX3 处理的出苗率分别提升 7.1%、70.5%、42.9%，其中 JX2 的出苗率显著高于其他处理，在促进谷子萌发上优势显著。在谷子苗期生长方面，JX1 与 JX2 均

对株高产生显著的促进作用，且分别与 CK 及 JX3 之间存在显著差异；各处理间根长、茎粗的差异未达到显著水平；JX1、JX2 处理的根冠比较 CK 和 JX3 均呈显著差异。

2.2 不同有机-无机调控物料覆盖对土壤物理性状的影响

通过对 0~3 cm 土层土壤物理性状的测定（表 2），结果表明，不同有机-无机调控物料覆盖显著改善盐碱土壤的物理性质。JX1、JX2、JX3 处理较 CK 土壤容重分别下降 12.8%、22.6%和 19.5%，其中，JX2 土壤容重最低，显著低于 CK，JX3 次之。与 CK 相比，JX1、JX2、JX3 处理的土壤饱和导水率分别提升 28.6%、143.0%和 143.0%，JX2 和 JX3 的土壤饱和导水率显著提升，而 JX1 增加不显著。在土壤田间持水量方面，JX1、JX2、JX3 处理较 CK 均有不同程度的提升，分别提高 2.8%、19.5%和 17.8%，其中，JX2 的田间持水量显著高于其他处理。

表 1 不同有机-无机调控物料对谷子苗期生物学性状的影响

| Table 1 Effect of different Organic-inorganic amendment on the biological characteristics of the millet seedling stage |                    |                 |                |               |                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|----------------|---------------|------------------|
| 处理                                                                                                                     | 出苗率                | 株高              | 根长             | 茎粗            | 根冠比              |
| Treatment                                                                                                              | Germination rate/% | Plant height/cm | root length/cm | Thick stem/mm | Root crown ratio |
| CK                                                                                                                     | 54.60±5.20c        | 25.35±0.78b     | 8.45±3.40a     | 2.36±0.31a    | 0.054±0.002b     |
| JX1                                                                                                                    | 58.50±1.30c        | 32.05±2.56a     | 9.45±1.72a     | 2.41±0.45a    | 0.072±0.001a     |
| JX2                                                                                                                    | 90.08±5.70a        | 32.35±2.50a     | 10.45±1.91a    | 2.56±0.47a    | 0.075±0.005a     |
| JX3                                                                                                                    | 78.00±5.20b        | 27.85±0.79b     | 9.65±2.00a     | 2.40±0.41a    | 0.054±0.004b     |

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。JX1（牛粪+HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>）、JX2（菌渣+HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>）、JX3（秸秆+HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>）。下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). JX1: cow dung + (HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>); JX2: microbial residue + (HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>); JX3: corn straw + (HA/CaO/MgO/SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>). The same abbreviations apply to the following figures/tables.

表 2 不同有机-无机调控物料覆盖对土壤物理性质的影响

| Table 2 Effect of different organic-inorganic amendment coverage on soil physical properties |                                         |                                                          |                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|
| 处理                                                                                           | 土壤容重                                    | 土壤饱和导水率                                                  | 土壤田间持水量                  |
| Treatment                                                                                    | Soil bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> ) | Saturated hydraulic conductivity/(cm·min <sup>-1</sup> ) | Field capacity of soil/% |
| CK                                                                                           | 1.33±0.03a                              | 0.07±0.01b                                               | 30.42±1.12c              |
| JX1                                                                                          | 1.16±0.02b                              | 0.09±0.01b                                               | 31.28±0.75c              |
| JX2                                                                                          | 1.03±0.02d                              | 0.17±0.01a                                               | 36.35±1.04a              |
| JX3                                                                                          | 1.09±0.03c                              | 0.17±0.01a                                               | 35.83±0.89ab             |

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。Note: Different lowercase letters in the same column denote statistically significant differences between treatments ( $P<0.05$ ).

## 2.3 不同有机-无机调控物料覆盖对土壤孔隙结构的影响

**2.3.1 土壤二维和三维孔隙结构可视化** 通过对 0~3 cm 土层土壤孔隙结构的二维 (图 2a) 和三维 (图 2b、图 2c) 可视化分析, 结果表明, 与 CK 相比, JX1、JX2 和 JX3 处理显著增加土壤孔隙数量, 并重构孔隙空间分布格局。JX2 和 JX3 显著促进大孔隙形成, 而 CK 和 JX1 则以小孔隙为主导。这表明有机调控物料覆盖能够有效增加大孔隙的比例, 优化孔隙分布。同时, 在 JX2 和 JX3 处理中, 大孔隙的连通性较好, 而 CK 中孔隙分布较为分散且小孔隙占主导。此外, JX2 不连通孔隙显著减少, 而 JX1 不连通孔隙较多。

**2.3.2 土壤孔隙定量分析结果对比** 通过对不同处理的孔隙度进行定量分析 (图 3), 结果表明, 与 CK 相比, JX1、JX2 和 JX3 处理的整体孔隙率均有提高, 其中 JX2 和 JX3 效果尤为突出, 其整体孔隙率分别显著增加 55.6% 和 76.5%, JX1 则无显著差异。连通孔隙率方面, JX2 和 JX3 较 CK 分别显著增加 55.5% 和 77.6%, 而 JX1 差异不显著; 不连通孔隙率变化呈现异质性, JX1 显著增加 93%, 而 JX2 则显

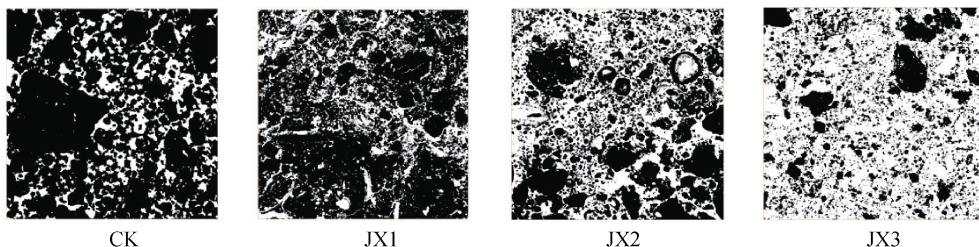
著降低 84%, JX3 无显著差异。

**2.3.3 土壤孔隙分组结果对比** 通过对不同处理孔隙直径分布的定量分析 (图 4), 结果表明, JX2 和 JX3 大孔隙 ( $\text{EqDiameter} \geq 1\ 000\ \mu\text{m}$ ) 占比差异显著, 较 CK 分别显著增加 55.5% 和 78.7%, 而 JX1 较 CK 无显著性差异。在中孔隙 ( $500 \leq \text{EqDiameter} \leq 1\ 000\ \mu\text{m}$ ) 发育方面, 各处理均表现出显著的环境调控效果, JX1、JX2 和 JX3 处理的中孔隙占比分别较 CK 显著增加 183.3%、166.7% 和 116.7%。在小孔隙 ( $\text{EqDiameter} \leq 500\ \mu\text{m}$ ) 分布特征上, 不同处理呈现显著分异, JX1 和 JX2 的小孔隙占比分别较 CK 显著增加 100% 和 50%, 而 JX3 却出现 81% 的显著下降。

**2.3.4 土壤孔隙结构特征参数结果对比** 通过对不同处理的孔隙结构特征参数的比较分析 (表 3), 结果表明, 不同处理措施可显著改变孔隙几何形态与功能特性。从分形维数看, JX2、JX3 较 CK 显著升高, 分别提高 10.61%、9.09%, 表明其土壤孔隙网络结构稳定性与复杂性增强, 且两处理成圆率的同步提升, 反映孔隙形状更趋于规则化。不同处理的欧拉数均较 CK (0.83) 显著降低, 尤其是 JX2 达

a) 土壤二维孔隙结构

a) Two-dimensional pore structure of soil



CK

JX1

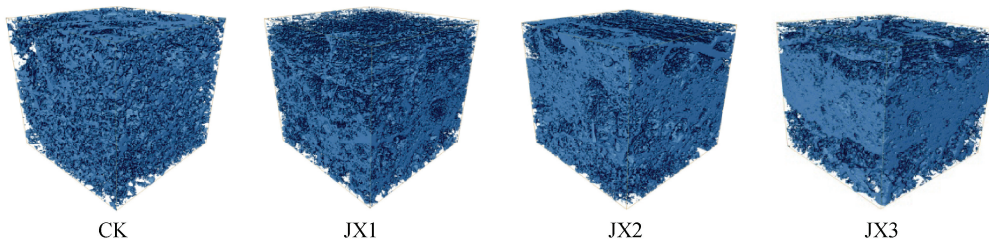
JX2

JX3

注: 土层厚度 0~3 cm; 白色表示孔隙, 黑色表示其它固体颗粒。实际平面尺寸 2 cm×2 cm。Note: soil layer thickness 0~3 cm; white represents pores, black represents other solid particles. Actual planar dimensions: 2 cm×2 cm.

b) 土壤三维整体孔隙结构

b) Three-dimensional overall pore structure of soil



CK

JX1

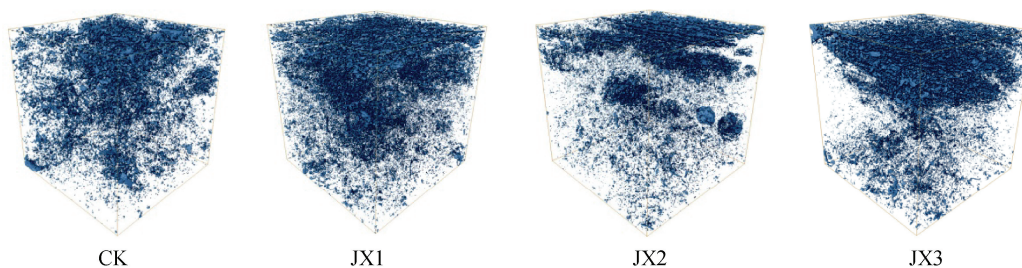
JX2

JX3

注: 土层厚度 0~3 cm; 蓝色表示孔隙, 白色点状表示其它固体颗粒。实际体积尺寸 2 cm×2 cm×2 cm。Note: soil layer thickness 0~3 cm; blue represents pores, white dot-like represents other solid particles. Actual volume dimensions: 2 cm×2 cm×2 cm.

c) 土壤三维不连通孔隙结构

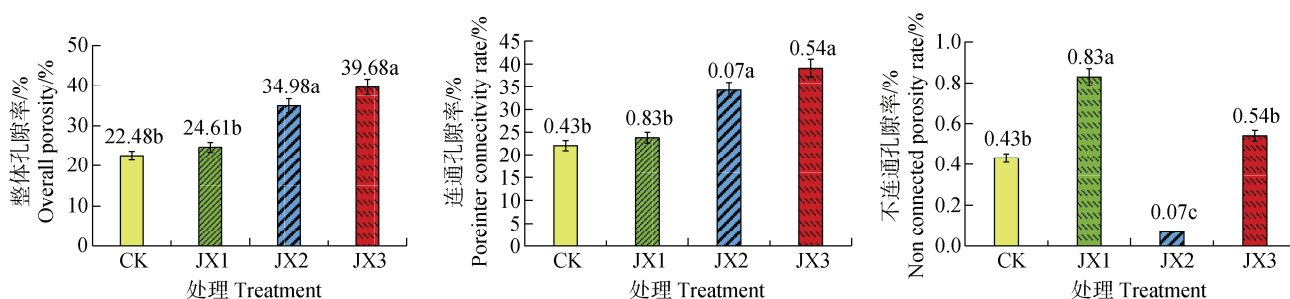
c) Three-dimensional disconnected pore structure of soil



注：土层厚度 $\geq 0\sim 3$  cm；蓝色表示孔隙，白色点状表示其它固体颗粒。实际体积尺寸 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 。Note: Soil layer thickness  $\geq 0\sim 3$  cm; blue represents pores, white dots represents other solid particles. Actual volume dimensions:  $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ .

图 2 不同有机-无机调控物料覆盖对土壤二维、三维土壤孔隙结构的影响

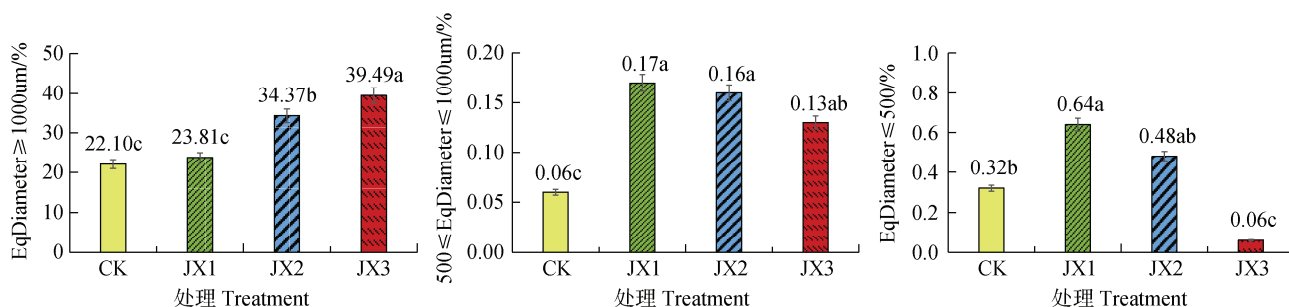
Fig. 2 Effect of different organic-inorganic amendment coverage on the two-dimensional and three-dimensional soil pore structure



注：不同字母表示同一孔径不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。Note: Different letters indicate significant differences among treatments within the same pore size ( $P<0.05$ ) .

图 3 不同有机-无机调控物料覆盖对 0~3 cm 土层土壤孔隙率的影响

Fig. 3 Effect of different Organic-inorganic amendment coverage on the soil porosity of the 0-3 cm soil layer



注：不同字母表示同一孔径不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。Note: Different letters denote significant differences between treatments for the same pore size ( $P<0.05$ ) .

图 4 不同有机-无机调控物料覆盖对 0~3 cm 土层土壤孔隙度的影响

Fig. 4 Effect of different organic-inorganic amendment coverage on the soil porosity of the 0-3 cm soil layer

到最低值 0.58，说明孔隙连通性增强<sup>[20]</sup>，这与高分形维数和高成圆率的协同作用有关。各向异性在不同处理中均增强，JX1、JX2 和 JX3 处理的各向异性参数分别较 CK 显著提高 4.55%、10.61%和 9.09%，

孔隙空间分布呈现方向性特征愈加明显。特征参数间关联性分析显示，成圆率与各向异性呈正相关 ( $r=0.9629^{**}$ )，可能与土壤颗粒定向排列促进对称性形成有关；分形维数与欧拉数呈极显著负相关

( $r=-0.9856^{**}$ ), 表明土壤孔隙结构的复杂性与稳定性提升过程伴随孔隙连通性的同步增强; 对比不同处理, JX2、JX3 处理的各项土壤孔隙结构参数与 CK、JX1 处理均存在显著差异, 二者分形维数、各向异性

及成圆率数值接近, 但 JX2 欧拉数显著低于 JX3, 说明两处理均能使土壤孔隙保持较高复杂性且孔隙网络连通性有效改善, 降低孤立孔隙产生的风险, 其中 JX2 对土壤孔隙连通性的优化效果优于 JX3 处理。

表 3 不同有机-无机调控物料覆盖对土壤孔隙结构参数的影响

Table 3 Effect of different organic-inorganic amendment coverage on soil pore structure parameters

| 处理<br>Treatment | 分形维数<br>Fractal dimension | 成圆率<br>Formation rate | 各向异性<br>Anisotropy | 欧拉数<br>Euler number |
|-----------------|---------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| CK              | 2.62±0.05b                | 0.74±0.02b            | 0.66±0.05b         | 0.83±0.03a          |
| JX1             | 2.65±0.03b                | 0.83±0.05a            | 0.69±0.05b         | 0.72±0.01b          |
| JX2             | 2.73±0.02a                | 0.87±0.02a            | 0.73±0.00a         | 0.58±0.05c          |
| JX3             | 2.71±0.04a                | 0.87±0.01a            | 0.72±0.01a         | 0.61±0.06b          |

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。Note: Different lowercase letters in the same column denote statistically significant differences between treatments ( $P<0.05$ ) .

3 讨 论

3.1 有机-无机调控物料覆盖对土壤物理性质及谷子苗期生长的调控效应

本试验结果表明, 有机-无机物料覆盖能显著改善滨海盐碱地土壤物理性质, 与 CK 相比, JX2 和 JX3 处理均显著降低了土壤容重、提高了土壤饱和导水率与田间持水量, 尽管二者对土壤水力特性的提升效果无显著差异, 但 JX2 处理的土壤容重最低, 降幅达 5.8%; 土壤物理性质的改善直接促进了谷子苗期生长, 其中 JX2 处理效果尤为显著, 出苗率较 CK 提高 70.5%, 株高与根冠比也显著优于其他处理, 体现出 JX2 (菌渣基物料) 在优化萌发微环境和促进形态建成上的优势。JX2 处理的优异效果主要因其能降低 0~3 cm 表层土壤容重, 这源于其物料本身的低密度特性, 施入后可有效降低土壤单位体积质量、优化土壤结构, 该结果与既有研究一致——菌渣因低容重、高孔隙度特性, 农田施入后能改良土壤结构、增强通气透水性<sup>[4, 23-24]</sup>, 也与冯惠翎等<sup>[25]</sup>关于金针菇菌渣还田修复川西高原沙地土壤的研究结论相符, 进一步证实菌渣在障碍性土壤改良中的应用潜力。JX3 (秸秆基物料) 处理对土壤水力特性的调控效果与 JX2 处理相当, 但其在促进谷子萌发与生长方面的表现显著逊色于 JX2, 具体原因尚待深入研究。

3.2 有机-无机调控物料覆盖对土壤孔隙结构的影响

3.2.1 孔隙结构分异的物料特性驱动 孔隙结构指标分析表明, JX2 (菌渣) 与 JX3 (玉米秸秆) 处理在孔隙率、大孔隙占比及连通性等方面, 相较于 JX1 (牛粪) 和对照 (CK) 优势显著。这与不同有机物料的物理特性及降解动态紧密相关。菌渣和玉米秸秆富含纤维素、木质素, 在分解初期依靠构建的刚性纤维骨架, 能在土壤中构筑稳定的空间支撑结构, 利于短期内大孔隙的形成<sup>[26-27]</sup>, 可显著提高 10.2%~25.4% 的土壤总孔隙度, 15.3%~30.1% 的大孔隙比例, 增强土壤孔隙连通性<sup>[28]</sup>, 孔隙成圆率平均达到 15.8%~23.5%。而牛粪有机质分解速率较快, 分解产生的胶体物质易填充孔隙, 致使 JX1 处理的小孔隙占比显著增加, 连通性也随之下降<sup>[29]</sup>。JX3 处理小孔隙占比显著降低了 81%, 中、大孔隙同步增加, 可能是玉米秸秆分解初期未腐解的纤维抑制微团聚体的形成所致<sup>[30]</sup>。

3.2.2 孔隙优化的农学效应 大孔隙比例与连通性的提升 (如 JX2、JX3) 显著改善土壤通气性和入渗能力, 促进谷子根系发育并加快盐分淋洗。但 JX3 因小孔隙锐减导致土壤持水能力下降, 据试验观测, 在种子出苗期间, JX3 处理 0~3 cm 土壤体积含水量相较于 JX2 和 CK 处理分别降低 11.9% 和 47.4%, 致使种子萌发微域土壤墒情不足, 延缓种子萌发进程。本研究创新性地采用“V”型沟与物料覆盖耦合技

术, 通过 JX2 处理的菌渣基复配物料实现孔隙网络优化与调控, 使聚水保墒与盐分淋洗能力同步提升, 田间试验数据表明, JX2 处理谷子出苗时间较其他处理提前 2~3 d, 出苗率高于其他处理 16.2%~41.3%。为解决盐碱地作物传统播种技术中渗透与持水矛盾提供新思路。

### 3.3 有机-无机调控物料覆盖下土壤孔隙结构演变

#### 3.3.1 孔隙网络结构复杂性与稳定性的增强效应

试验结果表明, 有机-无机调控物料覆盖显著改变土壤孔隙系统的分形特征。其中, JX2 (菌渣基) 与 JX3 (玉米秸秆基) 的分形维数分别达到 2.73 和 2.71 的峰值, 该分形维数的提升, 源于菌渣与秸秆有机质降解产生的腐殖质-矿物复合胶体, 这类胶体可通过氢键与静电作用填充微孔隙间隙<sup>[31]</sup>, 本试验 CT 扫描数据进一步验证, 土壤孔隙分形维数与  $>1\ 000\ \mu\text{m}$  孔隙度呈显著正相关 ( $r=0.584^*$ ), 与不连通孔隙率亦呈显著负相关 ( $r=-0.632^*$ ), 这一结果表明, 大孔隙占比提升与不连通孔隙 (无效孔隙) 占比降低, 印证了胶体填充对孔隙连通性的优化作用。由此可见, 分形维数越高, 土壤孔隙网络的结构复杂性和稳定性越强。

试验结果表明, 成圆率由对照处理 (CK) 的 0.74 提升至 JX2、JX3 处理的 0.87, 这表明土壤孔隙形态更趋向圆形, 孔隙稳定性显著增强, 这一变化与有机-无机调控复配物料中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  及腐殖酸 (HA) 的协同作用密切相关。Gu 等<sup>[32]</sup>通过原子力显微镜 (AFM) 对黏土矿物蒙脱石孔隙表面粗糙度的量化研究证实, 纯  $\text{Na}^+$  处理组的孔隙表面均方根粗糙度 ( $R_q$ ) 为 3.2~3.5 nm, 而 HA 与  $\text{Ca}^{2+}$  复合处理组的  $R_q$  显著降至 1.2~1.5 nm ( $P<0.05$ ), 其核心机制是  $\text{Ca}^{2+}$  与 HA 的羧基形成配位键, 在孔隙壁面构建致密平滑涂层, 从而大幅降低表面粗糙度。此外, 胡行路等<sup>[33]</sup>的微咸水灌溉试验也发现,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  处理可显著提升土壤孔隙成圆率, 平均增幅分别为 25.52%~30.94%、17.46%~23.19%, 进一步印证了二价阳离子对孔隙形态优化的积极作用。本试验结果同样显示, 成圆率与整体孔隙率、连通孔隙率及分形维数均呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.693、0.758、0.685, 表明孔隙形态趋向圆形的同时, 其整体孔隙数量与连通性也同步提升, 形成更规则且连续的孔隙网络。

**3.3.2 孔隙连通性与方向性演变的驱动因素**

随着孔隙网络结构稳定性与复杂性增强, 各处理的欧拉数较对照显著降低, 其中 JX2 处理的降幅达 30%。主要是因为试验材料施入土壤后, 其所含的腐殖酸 (HA) 富含羧基 ( $-\text{COOH}$ ) 和酚羟基 ( $-\text{OH}$ ), 易通过  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的离子桥接作用, 促进细小的土壤颗粒胶结形成稳定团聚体, 而团聚体内部及颗粒间会形成新的、更多连通的孔隙<sup>[34-36]</sup>。本试验通过沙维诺夫干筛法分析表明, 在 0~1.5 cm 土层 (调控物料与原状土混合覆盖层) 中,  $\geq 0.25\ \text{mm}$  的机械稳定性团聚体占比相较于 CK 均有提升, 提升幅度为 2.2%~2.8%, 与之相反,  $<0.25\ \text{mm}$  的团聚体占比则较 CK 下降 35.0%~52.2%。同时, JX2 和 JX3 处理的土壤饱和导水率显著提升, 较 CK 均提升 143.0%, 这一结果表明, 欧拉数越低, 土壤孔隙的连通性越佳, 孔隙网络也更畅通。各向异性参数同步提升 (JX2 达 0.73), 表明土壤孔隙空间方向性增强。X 射线显微 CT 分析进一步证实, 粉碎秸秆施入土壤后, 其长纤维组分转化过程中会诱导“层状结构”的孔隙系统。这种定向排列的孔隙特征可提高土壤垂直方向的导水率, 使垂直渗透率达到水平渗透率的 2 倍~3 倍, 呈现明显的渗透率各向异性<sup>[37]</sup>, 这与本研究测定的 JX2/JX3 的高各向异性特征吻合。

## 4 结 论

本研究表明, 使用不同的有机-无机复配调控物料进行覆盖, 是高效调控滨海盐碱地孔隙结构、快速破除表土板结、促进种子萌发的有效技术途径。3 种复配物料对谷子苗期生物学性状的影响差异显著, 均能通过  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等离子桥接作用形成腐殖质-矿物复合胶体, 进而重塑土壤孔隙结构并显著改善孔隙数量。与此同时, 有机-无机调控物料覆盖显著改变了土壤孔隙系统的分形特征, 使孔隙网络结构复杂性和稳定性显著增强。此外, 土壤孔隙连通性与垂直方向的导水率能力同步增强, 各处理的欧拉数较对照显著降低。

综上所述, 菌渣基与秸秆基处理优势突出, 不仅能降低土壤容重、强化孔隙网络结构复杂性与稳定性, 还可提高田间持水量与饱和导水率, 并凭借

自身特性与其他有机-无机成分的协同作用优化种子萌发微环境,提高作物出苗率,其中菌渣基处理尤为显著。基于上述研究结果,未来研究将聚焦于有机-无机物料配比优化,深入探究其对土壤微生物群落的影响,解析土壤孔隙与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  拮抗作用的内在关联,并阐明其对土壤的调控作用,从而深化对该领域的认识与理解。

## 参考文献 (References)

- [1] Jia X, Wang L, Liu Z L, et al. A method for regulating the microenvironment of salt-alkali land crops to break the hardpan: CN114158304A[P]. 2022-03-11. [贾曦, 王璐, 刘振林, 等. 一种盐碱地作物播种微生境调控破板结方法: CN114158304A[P]. 2022-03-11.]
- [2] Tian S Z, Guo H H, Yao L, et al. Development analysis for fertilizer utilization of agricultural planting and animal wastes in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (B11): 123—131. [田慎重, 郭洪海, 姚利, 等. 中国种养业废弃物肥料化利用发展分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (B11): 123—131.]
- [3] Flowers M D, Lal R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqulf in northwest Ohio[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 48 (1/2): 21—35.
- [4] Li X H, Guo H H, Zhu Z L, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (9): 130—135. [李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (9): 130—135.]
- [5] Richard G, Cousin I, Sillon J F, et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Influence on unsaturated hydraulic properties[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52 (1): 49—58.
- [6] Long X H, Liu L P, Shao T Y, et al. Developing and sustainably utilize the coastal mudflat areas in China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569: 1077—1086.
- [7] Deng L, Wei W J, Hu J, et al. Effects of straw mulching on water and salt movement in coastal saline-alkali soil[J]. Journal of Agriculture, 2017, 7 (11): 23—26. [邓玲, 魏文杰, 胡建, 等. 秸秆覆盖对滨海盐碱地水盐运移的影响[J]. 农学学报, 2017, 7 (11): 23—26.]
- [8] Zhao Z Y, Tian C Y, Zhang K, et al. Biological improvement of saline-alkali land and comprehensive utilization of halophyte resources[J]. High-Technology & Commercialization, 2020, 26 (9): 64—66. [赵振勇, 田长彦, 张科, 等. 盐碱地生物改良与盐生植物资源综合利用[J]. 高科技与产业化, 2020, 26 (9): 64—66.]
- [9] Wang S J, Chen Q, Li Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 121: 82—92.
- [10] Petrovic A M, Siebert J E, Rieke P E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46 (3): 445—450.
- [11] Zhou H, Fang H, Mooney S J, et al. Effects of long-term inorganic and organic fertilizations on the soil micro and macro structures of rice paddies[J]. Geoderma, 2016, 266: 66—74.
- [12] Wang X L, Zhao Z Y, Ma Y T, et al. Study on the effects of long-term application of chemical fertilizer combined with manure on soil physical properties of apple orchard based on CT scanning technology[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26 (9): 1647—1655. [王宪玲, 赵志远, 马艳婷, 等. 基于 CT 扫描技术研究有机无机肥长期配施对土壤物理特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (9): 1647—1655.]
- [13] 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.]
- [14] Guo Y F, Fan R Q, Zhang X P, et al. Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134617.
- [15] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J]. Catena, 1992, 19 (5): 451—474.
- [16] 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.]
- [17] Deurer M, Grinev D, Young I, et al. The impact of soil carbon management on soil macropore structure: A comparison of two apple orchard systems in New Zealand[J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60 (6): 945—955.
- [18] 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.

- [ 19 ] Wang Z H, Liu X, Yu A L, et al. Changes of physiological response to drought stress and selection of drought resistance indexes in different germination stages of millet[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22 ( 12 ): 39—49. [王振华, 刘鑫, 余爱丽, 等. 不同谷子品种萌发期对干旱胁迫生理响应的变化及抗旱指标筛选[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22 ( 12 ): 39—49.]
- [ 20 ] Zou W X, Han X Z, Yan J, et al. Effects of incorporation depth of tillage and straw returning on soil physical properties of black soil in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36 ( 15 ): 9—18. [邹文秀, 韩晓增, 严君, 等. 耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36 ( 15 ): 9—18.]
- [ 21 ] Gong C, Wang X D, Ni X, et al. Effects of long-term application of edible fungus residue and chemical fertilizers on fractions of labile organic carbon and available nutrients in rice field soils[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, 35 ( 2 ): 252—260. [龚臣, 王旭东, 倪幸, 等. 长期菌渣化肥配施对稻田土壤活性有机碳组分和有效养分的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35 ( 2 ): 252—260.]
- [ 22 ] Mi W H, Wu L H, Ma Q X, et al. Combined application of organic materials and inorganic fertilizers improving rice yield and soil fertility of yellow clayey paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 ( 13 ): 103—108. [宓文海, 吴良欢, 马庆旭, 等. 有机物料与化肥配施提高黄泥田水稻产量和土壤肥力[J]. *农业工程学报*, 2016, 32 ( 13 ): 103—108.]
- [ 23 ] 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 & tillage Research*, 2019, 195: 104343.
- [ 24 ] Stewart D P C, Cameron K C, Cornforth I S, et al. Effects of spent mushroom substrate on soil physical conditions and plant growth in an intensive horticultural system[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36 ( 6 ): 899—912.
- [ 25 ] Feng H L, Hu Y F, Shu X Y, et al. Influences of adding needle mushroom edible fungi residues on vegetation and soil enzyme activity of sandy soil in northwest Sichuan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 ( 5 ): 161—165. [冯慧翎, 胡玉福, 舒向阳, 等. 金针菇菌渣对川西北高寒沙地植被及土壤酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30 ( 5 ): 161—165.]
- [ 26 ] Naveed, M., Moldrup, P., Arthur, E., et al. Prediction of biopore- and matrix-dominated flow from X-ray CT-derived macropore network characteristics[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20: 4017—4030.
- [ 27 ] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23 ( 6 ): 481—504.
- [ 28 ] Li Y, Zhang Q, Wang X, Liu X. Effects of long-term straw incorporation on soil pore structure and organic carbon in a clay loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199: 104584.
- [ 29 ] Chen C, Liu W. Manure colloids facilitate soil aggregate formation but reduce macropore connectivity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83 ( 4 ): 1123—1132.
- [ 30 ] Sun L, Sun Z X, Bao Y. Effects of Returning Organic Wastes on the Stability of Soil Aggregates and Organic Carbon at Different Soil Depths[J]. *Eurasian Soil Science*, 2025, 58 ( 8 ): 106.
- [ 31 ] Hu S W, Li R, Gao H X, et al. Science and comprehensive utilization of saline-alkali soil[M]. Beijing: Science Press, 2024. [胡树文, 李荣, 高海翔, 等. 盐碱土壤科学及综合利用[M]. 北京: 科学出版社, 2024.]
- [ 32 ] Gu B, Qing L, Pu H, et al. Humic acid coating alters aggregation and porosity of montmorillonite via cation bridging[J]. *Langmuir*, 2020, 36 ( 30 ): 8910—8919.
- [ 33 ] Hu X L, Zhang T B, Zhang T G, et al. Effects of brackish water cation compositions on soil pore structure under submembrane drip irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42 ( 3 ): 173—181, 253. [胡行路, 张体彬, 张通港, 等. 微咸水离子组成对膜下滴灌土壤孔隙结构的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42 ( 3 ): 173—181, 253.]
- [ 34 ] Kleber M, Eusterhues K, Keilweit M, et al. Mineral-organic associations: Formation, properties, and relevance in soil environments[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2015: 1—140.
- [ 35 ] Tombácz E, Libor Z, Illés E, et al. The role of reactive surface sites and complexation by humic acids in the interaction of clay mineral and iron oxide particles[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35 ( 3 ): 257—267.
- [ 36 ] Rowley M C, Grand S, Verrecchia É P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon[J]. *Biogeochemistry*, 2018, 137 ( 1 ): 27—49.
- [ 37 ] Kravchenko A N, et al. Anisotropy of soil pore structure assessed by X-ray computed tomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83 ( 3 ): 528—534.

( 责任编辑: 檀满枝 )