

亚表层有机培肥调控盐渍土孔隙结构与水盐运移机制

张宏媛 逢焕成 宋佳坤 王国丽 常芳弟 李玉义

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 为探明亚表层有机培肥结合地膜覆盖对土壤孔隙结构及其水盐运移的调控机制,以内蒙古河套灌区典型盐渍土为研究对象,设置了地表不覆膜(CK)、地膜每年覆盖(PM)和亚表层单次有机培肥+地膜每年覆盖(OMP)3个处理,3年后采用X射线CT扫描和图像处理技术获取了部分亚表层(15~21 cm)与深层(35~41 cm)土壤孔隙结构信息,同时测定了土壤剖面水盐含量,分析了土壤孔隙结构与水盐分布特征的关系。结果表明,PM处理与CK相比,亚表层大孔隙度($>30\text{ }\mu\text{m}$)无明显差异($P>0.05$),但深土层降低了0.48个百分点($P<0.05$)。OMP处理与CK相比,亚表层及深土层大孔隙度分别提高了11.95、0.75个百分点($P<0.05$),其中不同当量直径孔隙度和孔隙连通度均差异显著($P<0.05$)。与CK和PM处理相比,OMP处理春灌后0~40 cm土层含水率分别提高12.02%和6.33%($P<0.05$),全盐含量分别降低了16.22%和13.21%($P<0.05$);收获后0~40 cm土壤含水率分别降低40.69%和35.77%($P<0.05$),返盐率分别降低了12.22、11.56个百分点($P<0.05$)。大孔隙度、土壤孔隙连通度与水盐含量显著相关($P<0.05$),增加当量直径小于 $1\,500\text{ }\mu\text{m}$ 孔隙度可以显著提高春灌后土壤保水效果,而增加当量直径小于 $500\text{ }\mu\text{m}$ 孔隙度可以促进春灌后盐分淋洗。通过在亚表层施用有机肥结合地膜覆盖可以优化土壤物理结构,增强盐渍土水盐调控能力。

关键词: 盐渍土; 有机肥; 土壤孔隙结构; 水盐分布; 显微CT

中图分类号: S156.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0355-10 OSID: 

Effects of Pore Structure and Water – Salt Movement for Saline Soil under Subsurface Organic Amendment

ZHANG Hongyuan PANG Huancheng SONG Jiashen WANG Guoli CHANG Fangdi LI Yuyi

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Plastic film mulching is one of the widely adopted agronomic measures in the northwest of China, and subsurface (10 ~ 30 cm) organic amendment is an important soil improvement and fertilization technique to quickly realize the efficient use of salinized farmland. However, it is still not clear of the effects of combinations of plastic film mulching and subsurface organic amendment on the soil pore structure and water – salt movement. The field experiment with three treatments was conducted: with (PM) and without (CK) plastic film mulching yearly, as well as the combination of subsurface organic amendment once with plastic film mulching yearly (OMP), in a typical saline soil in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia. Pore structures of subsurface (15 ~ 21 cm) and deep (35 ~ 41 cm) soil layers were measured by X-ray computed tomography and image processing, water and salt contents within soil profiles were measured in three years after the applications simultaneously, and then the effects of soil pore structure on water – salt movement were analyzed. The results showed that there was no significant difference ($P>0.05$) in macroporosity (greater than $30\text{ }\mu\text{m}$) between PM and CK in subsurface soil layer. However, the macroporosity in deep soil layer of PM was decreased by 0.48 percentage points than that of CK ($P<0.05$). Compared with CK, the macroporosity of OMP was boosted by 11.95 percentage points and 0.75 percentage points in subsurface and deep soil layers ($P<0.05$), respectively. The porosity of

收稿日期: 2021-02-23 修回日期: 2021-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871584)、国家重点研发计划项目(2016YFC0501302)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132020011)

作者简介: 张宏媛(1994—),女,博士生,主要从事盐碱地改良利用研究,E-mail: zhanghongyuan0429@163.com

通信作者: 李玉义(1978—),男,研究员,主要从事土壤耕作与盐碱地改良利用研究,E-mail: liyuyi@caas.cn

each equivalent pore size and the pore connectivity were also improved significantly with OMP than that with CK. Compared with CK and PM, the water contents in 0 ~ 40 cm soil layers with OMP were significantly increased by 12.02% and 6.33%, and its total salt contents were significantly reduced by 16.22% and 13.21% ($P < 0.05$) after spring irrigation, respectively. In addition, the water contents in 0 ~ 40 cm soil layers with OMP were decreased by 40.69% and 35.77% after harvest, and its salt accumulation rate was reduced by 12.22 percentage points and 11.56 percentage points respectively ($P < 0.05$), compared with CK and PM. It was worth noting that the macroporosity, soil pore connectivity, and water-salt content were significantly related ($P < 0.05$). Increasing the porosity of equivalent diameter (less than 1 500 μm) significantly improved the soil water retention ability, and fortifying the porosity of equivalent diameter (less than 500 μm) promoted the salt leaching after spring irrigation. Therefore, subsurface organic amendment combined with plastic film mulching could optimize the soil physical structure and enhance the regulation ability to regulate water and salt contents in saline soil.

Key words: saline soil; organic fertilizer; soil pore structure; water and salt distribution; micro CT

0 引言

内蒙古河套灌区位于干旱半干旱地区,是中国大型自流灌区之一,全区盐渍化耕地面积 39.4 万 hm^2 ,占全区耕地面积的 68.65%^[1]。调控土壤水盐分布、抑制盐分土壤表聚是改良该地区盐碱土壤、促进作物生长的基础^[2-4]。盐渍土水盐调控过程主要为土壤水文过程,即以土壤水分运动驱动盐分运动的形式达到盐分均衡^[5]。土壤孔隙是土壤结构的重要组成部分,孔隙结构和水力性质能够直接或者间接地影响土壤中水盐运移、养分保持以及微生物活动等其他性质^[6-7]。近年来,CT 扫描与图像分析技术在量化土壤孔隙特征方面广泛应用,可以快速且无损地分析土壤内部形态和三维孔隙结构^[8]。大量研究发现秸秆还田^[9]、有机肥施用^[10]、植被根系^[11]以及土壤动物活动^[12]均是导致土壤大孔隙的主要因素,而大孔隙三维几何特征及拓扑结构,包括大孔隙数量、大孔隙体积、大孔隙分布、大孔隙连通度等三维特征参数,均会影响土壤水分运动及溶质运移^[13]。虽然以往研究发现土壤类型及土地利用方式均会导致土壤大孔隙数量及分布的差异^[14],但尚无试验表明土壤类型、土地利用、耕作措施等因素对土壤大孔隙特征产生的影响可以反过来影响土壤性质。

改变土壤结构可以从根本上缓解土壤盐碱危害,合理施用有机肥是优化土壤结构的有效方法之一,可以迅速改变土壤的透水性、通气性,并且见效快、效益明显^[15]。相比于有机肥表施,在农田亚表层合理施用生物有机肥从而构建一个肥沃的土层,可显著提高土壤有机碳含量、培肥地力,同时有利于改善土壤孔隙状况、促进水稳性团聚体的形成与稳定^[16-17],进而使大孔隙分布出现差异,这也导致了土壤水盐运动空间上的差异。以往的研究主要通过测定团聚体分布及其稳定性等指标来衡量有机肥施

用对盐碱土壤水盐分布的影响,但是土壤孔隙结构与水盐调控的关系并不明确。本研究基于内蒙古河套灌区连续 3 年的田间定位试验,利用 X 射线 CT 扫描和图像处理等技术,研究亚表层有机培肥与地表覆膜组合措施对土壤孔隙结构特征及保水抑盐效果的影响,并进一步阐明不同孔径范围的孔隙与盐渍土水盐调控效应的相互作用关系,以期揭示肥沃亚表层构建措施下孔隙结构变化对水盐调控效应的影响机制,为制定合理的盐渍土管理措施提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验点位于内蒙古自治区五原县隆兴昌镇永联村河套灌区义长灌域管理局试验站(41°7'N,108°0'E,海拔 1 022 m)。该地属于中温带季风气候带,年蒸发量较大,蒸降比高,冬春季土壤盐分表聚现象严重,全年日照时数 3 263 h,年均温 6.1℃,大于等于 10℃积温 3 362.5℃,无霜期 117 ~ 136 d。土壤类型为粉砂壤土,按盐土分类为氯化物-硫酸盐土,土壤砂粒、粉粒、黏粒质量分数分别为 35.86%、53.63% 和 10.51%。0 ~ 20 cm 土壤含盐量 4.49 g/kg, pH 值 9.27, 20 ~ 40 cm 土壤含盐量为 2.31 g/kg, pH 值 8.83, 0 ~ 100 cm 平均容重为 1.45 ~ 1.50 g/cm^3 ,生育期内地下水水位高度为 1.10 ~ 1.70 m。

试验始于 2015 年春季,在田间微区进行,每个微区面积 4 m^2 (2 m × 2 m),微区之间用塑料布阻隔(埋至 1 m)以防止微区间侧渗。设地表不覆膜(CK)、地膜每年覆盖(PM)和亚表层单次有机培肥+地膜每年覆盖(OMP)3 个处理,每个处理 3 次重复。试验开始前,将各处理小区 0 ~ 10 cm 土壤取出拌匀,以保证微区表层土壤盐分和养分基本一致。有机肥为牛粪、羊粪、鸡粪、草炭混合物,按一定比例拌匀(混匀后有机肥经测定含盐量 16.09 g/kg, pH 值

7.06,碳氮比为 20,有机质、全氮、全磷与全钾质量分数分别为 42.57%、1.29%、0.54%、1.39%)。亚表层处理的有机肥用量均为 34.6 kg,将有机肥与 10~30 cm 土层混合压实后,再将 0~10 cm 土壤按原层次填回,2016—2017 年不再施用有机肥。为消除田间操作造成的处理间差异的影响,CK、PM 处理试验开始前与 OMP 进行同样的耕作处理。

试验布置完毕后,每个微区春季灌溉定额均为 0.60 m³,灌溉水源为黄河水(矿化度为 0.58 g/L、pH 值 8.23)。所有处理化肥用量相同,在播种前作底肥一次性条施,施肥量为尿素(含 N 46%)260 kg/hm²、磷酸二铵(含 N 18%,P₂O₅ 46%)290 kg/hm²、硫酸钾(含 K₂O 50%)150 kg/hm²,施肥深度 10 cm,随后覆土。地膜覆盖处理采用宽 70 cm 的农用塑料薄膜,每个小区设两条膜带,膜间距 20 cm,膜间地表裸露。供试作物为食葵(*Helianthus annuus* L.),行距 60 cm,株距 20 cm,种植密度为 49 000 株/hm²。食葵生育期内不再进行灌水和施肥。

1.2 取样方法与数据测定

于 2017 年食葵播种前(春季灌溉后)和食葵收获后,使用取土钻在两行作物中间(地膜下),按 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 层次取样,分两份保存冷冻,一份采用干燥法测定土壤质量含水率,另一份土样晾干后磨碎过 2 mm 筛,以土水质量比 1:5 提取土壤溶液上清液,用 DDS-307 型电导率仪测定土壤电导率(mS/cm)。食葵收获后用 PVC 环刀(直径为 50 mm,高度为 60 mm)随机采集亚表层部分土壤(15~21 cm 土层)与深层土壤(35~41 cm 土层)原状土样,用保鲜膜包裹防止水分蒸发,用于 CT 扫描。

1.3 计算方法

土壤含盐量转换公式为^[18]

$$S = aEC_{1:5} \tag{1}$$

式中 S——土层含盐量,g/kg
EC_{1:5}——土水质量比为 1:5 的土壤浸提液电导率,mS/cm
a——土壤浸提液电导率转换为土壤含盐量的系数,取 3.011 1

0~40 cm 土层返盐率计算公式为

$$R_s = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中 R_s——返盐率,%
S₁——春灌后 0~40 cm 土壤全盐含量,g/kg
S₂——收获后 0~40 cm 土壤全盐含量,g/kg

0~40 cm 土层土壤水分变化率计算公式为

$$R_w = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \tag{3}$$

式中 R_w——土壤水分变化率,%
W₁——春灌后 0~40 cm 土壤含水率,%
W₂——收获后 0~40 cm 土壤含水率,%

收获后测产,同时计算灌溉水生产率,计算公式为

$$W_{pi} = \frac{Y}{W_i} \tag{4}$$

式中 W_{pi}——灌溉水生产率,kg/m³
Y——作物产量,kg/hm²
W_i——单位面积灌水量,m³/hm²,不考虑洗盐灌溉水量与深层渗漏量

1.4 CT 扫描和图像处理

采用 GE 公司 phoenix v|tome x m 多功能 X 射线微聚焦 CT 系统进行扫描。扫描参数设置为:扫描电压(Voltage)为 100 kV,扫描电流(Current)为 100 μA,各处理分辨率(Resolution)为 30 μm。投影数据采用背投算法重建,共获得约 1 600 幅 32 位 tiff 格式灰度图像,为了避免采样过程对样品边缘产生的影响,仅选择中间部分的 900×900×800 体元作为感兴趣区域(Region of interest,ROI)。利用 Image J 软件进行图像处理,包括图像增强、去噪以及二值分割,并进行颗粒分析(Analyze particle)获取每个土层的孔隙面积和孔隙度,利用 Bone J 插件的 Thickness 工具计算孔隙分布,孔隙可视化通过 3D viewer 插件实现。将二值化图像导入 Matlab 中,计算孔隙连通度^[7],计算式为

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^n P_{vi}^2}{\left(\sum_{i=1}^n P_{vi} \right)^2} \tag{5}$$

式中 P_c——孔隙连通度
P_{vi}——孔隙体积 n——孔隙数量

1.5 数据分析

数据统计分析采用 SPSS 22.0 软件进行;方差分析采用 One-Way ANOVA,并用 LSD 法进行多重比较,显著性水平为 0.05;相关分析采用皮尔森(Pearson)双侧检验法。

2 结果与分析

2.1 土壤孔隙结构

亚表层有机培肥结合地膜覆盖措施对亚表层土壤内部孔隙结构有明显影响(图 1),CK 处理与 PM 处理土壤内部结构比较致密,而 OMP 处理土壤内部呈现疏松多孔的结构,随着土层深度的加深,各处理孔隙数量均呈现减少的趋势,而 OMP 处理在不同土层中均存在较规则的圆柱状孔隙。从二维图像

(图 1a,图中黑色代表孔隙,白色代表土壤基质)观察,CK 和 PM 处理土壤孔隙主要为独立小孔隙,OMP 处理土体内部孔隙分布密度大,存在较多的细长大孔隙,土壤结构较为疏松。从三维孔隙结构图(图 1b,图中有色部分代表孔隙,且亮度越大,代表孔隙孔径越大)来看,与 CK 处理相比,PM 处理孔隙直径增大,而 OMP 处理孔隙度明显提高,且孔隙直径增大,可明显看到土壤结构相对复杂。

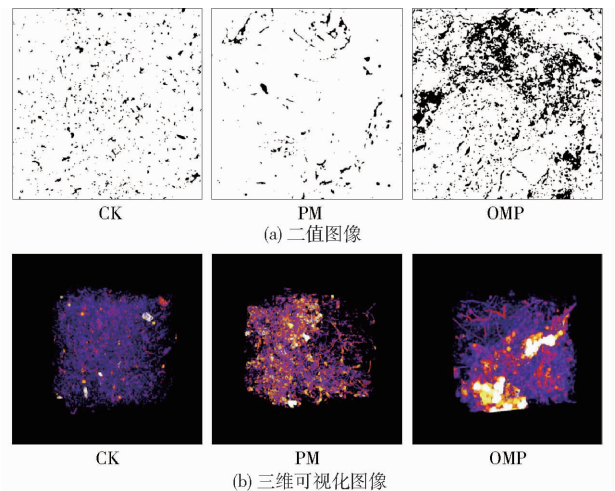


图 1 亚表层有机培肥 3 年后亚表层(20 ~ 25 cm)土壤孔隙二维和三维特征

Fig. 1 2-D and 3-D characteristics of soil pores in subsurface soils under subsurface organic amendment after three years

从不同处理深层土壤二维图像(图 2a,图中黑色代表孔隙,白色代表土壤基质)来看,与亚表层土壤相比较,各处理孔隙数量均呈现减少的趋势,但从三维孔隙结构图(图 2b,图中有色部分代表孔隙,且亮度越大,代表孔隙孔径越大)来看,OMP 处理仍存在较规则的圆柱状孔隙,孔隙连通程度较 CK 处

理和 PM 处理高。

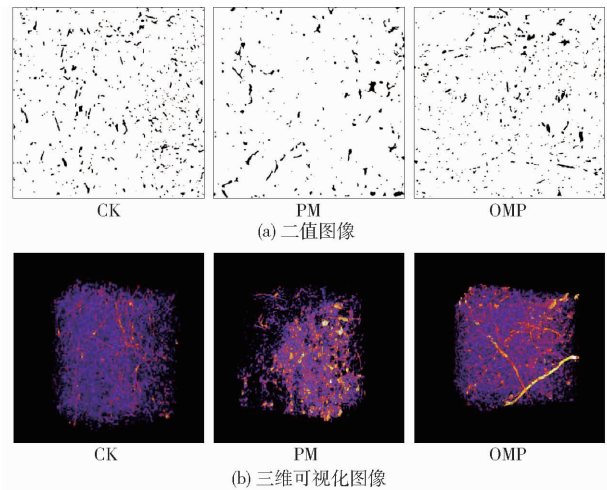


图 2 亚表层有机培肥 3 年后深层(30 ~ 35 cm)土壤孔隙二维和三维特征

Fig. 2 2-D and 3-D characteristics of soil pores in deeper soils under subsurface organic amendment after three years

通过对 CT 图像的定量分析,可以得到图像分辨率范围内的大孔隙(大于 30 μm)信息(表 1)。定量分析结果同定性观察趋势一致,与 CK 处理和 PM 处理相比,OMP 处理显著提高了不同土层的土壤大孔隙度。在亚表层土壤中,OMP 处理大孔隙度较 CK 处理和 PM 处理分别显著提高了 11.94、11.76 个百分点($P < 0.05$);在深层土壤中,OMP 处理大孔隙度较 CK 处理和 PM 处理分别显著提高了 0.75、1.23 个百分点($P < 0.05$),而 PM 处理大孔隙度较 CK 处理显著降低了 0.48 个百分点($P < 0.05$)。同时,在两个土层深度中 OMP 处理的孔隙连通度均显著高于 CK 处理和 PM 处理($P < 0.05$),说明亚表层有机肥施入在增加土壤大孔隙度的同时提高了其连通性。

表 1 不同处理土壤大孔隙度、孔隙连通度及当量直径孔隙度分布

Tab.1 Macroporosity, pore connectivity and size distribution for different treatments

土层	处理	大孔隙度/%	连通度	不同当量直径孔隙度/%			
				0 ~ 500 μm	500 ~ 1 000 μm	1 000 ~ 1 500 μm	1 500 ~ 2 000 μm
亚表层	CK	(4.08 ± 0.042) ^b	(0.179 ± 0.001) ^b	(3.94 ± 0.050) ^b	(0.08 ± 0.002) ^c	(0.02 ± 0.002) ^b	(0.04 ± 0.005) ^b
	PM	(4.26 ± 0.077) ^b	(0.176 ± 0.001) ^b	(3.84 ± 0.019) ^b	(0.38 ± 0.040) ^b	(0.03 ± 0.014) ^b	(0.01 ± 0.005) ^b
	OMP	(16.02 ± 0.530) ^a	(0.471 ± 0.005) ^a	(12.47 ± 0.150) ^a	(2.51 ± 0.005) ^a	(0.84 ± 0.057) ^a	(0.21 ± 0.033) ^a
深土层	CK	(3.93 ± 0.911) ^b	(0.059 ± 0.004) ^c	(3.92 ± 0.035) ^b	(0.01 ± 0.005) ^a		
	PM	(3.45 ± 0.583) ^c	(0.075 ± 0.007) ^b	(3.42 ± 0.031) ^b	(0.03 ± 0.026) ^a		
	OMP	(4.68 ± 0.114) ^a	(0.134 ± 0.005) ^a	(4.59 ± 0.076) ^a	(0.09 ± 0.029) ^a		

注:数据为平均值 ± 标准差;同列数字后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

从亚表层当量直径孔隙度分布规律来看(表 1),PM 处理仅当量直径 500 ~ 1 000 μm 孔隙的孔隙度较 CK 处理显著提高 0.30 个百分点;OMP 处理不同当量直径孔隙度均显著高于 CK 处理和 PM

处理,当量直径 0 ~ 500 μm、500 ~ 1 000 μm、1 000 ~ 1 500 μm、1 500 ~ 2 000 μm 孔隙的孔隙度较 CK 处理与 PM 处理分别显著提高了 8.53、8.63 个百分点,2.43、2.13 个百分点,0.82、0.81 个百分点,

0.17、0.20 个百分点 ($P < 0.05$)。从深土层孔隙当量直径孔隙度分布规律来看,与亚表层趋势相同,但不同范围孔隙度均小于亚表层土壤,且不存在当量直径大于 $1\,000\ \mu\text{m}$ 的孔隙。OMP 处理仅当量直径 $0\sim 500\ \mu\text{m}$ 孔隙的孔隙度较 CK 处理和 PM 处理显著提高了 0.67、1.17 个百分点 ($P < 0.05$)。

2.2 春灌后土壤剖面水盐分布

在土壤亚表层中施入大量有机肥后,随着年限的增加,土壤孔隙结构发生了显著变化,土体构型产生的变化导致土壤质地不均一,改变了水分的运动方式,影响灌溉水的入渗过程,进而影响入渗后土壤的蓄水状况。亚表层培肥结合地膜覆盖措施实施 3 年灌溉水入渗结束后土壤剖面含水率的变化见图 3a,不同处理 1 m 土壤剖面含水率均有所差异。CK 处理土壤含水率随着土层深度的增加先增加而

后趋于稳定,而不同土层中 $0\sim 10\ \text{cm}$ 土层的含水率明显小于其他土层,是由于其土壤容重低,蒸发强烈,保水能力差。与 CK 处理相比,PM 处理仅表现出 $0\sim 20\ \text{cm}$ 土层含水率显著升高 $4.31\%\sim 27.00\%$ ($P < 0.05$)。而各处理间 $20\sim 100\ \text{cm}$ 各土层含水率(图 3a)与 $0\sim 40\ \text{cm}$ 土壤平均含水率(图 3b,图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同)均无显著性差异。而 OMP 处理在 $0\sim 40\ \text{cm}$ 土层土壤含水率随土层深度增加而增加,且均高于 CK 处理。OMP 处理 $0\sim 40\ \text{cm}$ 土层平均含水率较 CK 处理和 PM 处理分别提高了 12.02% 和 6.33% (图 3b),能够提高耕层土壤水分保蓄能力,这种保水效应为作物生长提供了充足的水分,促进了食葵出苗。然而,OMP 在 $60\ \text{cm}$ 土层深度含水率呈现降低趋势,且土层深度 $60\sim 100\ \text{cm}$ 土壤含水率均低于 CK 处理,但无显著性差异 ($P > 0.05$)。

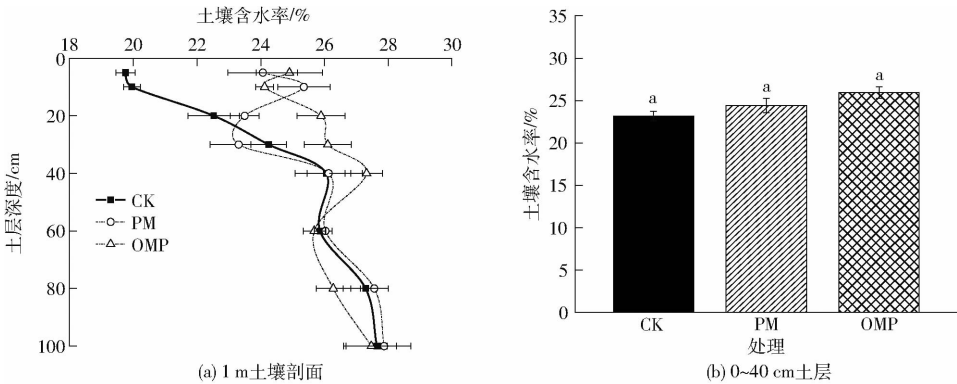


图 3 春灌后各处理 1 m 土壤剖面与 0~40 cm 土壤含水率

Fig. 3 Water content in 1 m soil profile and 0~40 cm soil of each treatment after spring irrigation

各处理春灌后 1 m 土壤剖面盐分分布存在显著差异(图 4a),不同处理土壤全盐含量均随着土层深度的增加呈现先增加后降低的趋势。从盐分分布规律来看,CK 处理与 PM 处理全盐含量峰值出现在 $40\ \text{cm}$ 土层,说明其脱盐过程主要发生在 $0\sim 40\ \text{cm}$ 土层,CK 处理 $0\sim 40\ \text{cm}$ 土层和 $60\sim 100\ \text{cm}$ 土层全盐含量分别占剖面全盐总量的 38.81% 和 40.54%,PM 处

理 $0\sim 40\ \text{cm}$ 土层和 $60\sim 100\ \text{cm}$ 土层全盐含量分别占剖面全盐总量的 36.21% 和 42.60%,根系分布层盐分主要被淋洗至 $60\sim 100\ \text{cm}$ 土层。OMP 处理全盐含量峰值出现在 $80\ \text{cm}$ 土层深度,其 $0\sim 40\ \text{cm}$ 土层和 $60\sim 100\ \text{cm}$ 土层全盐含量分别占剖面全盐总量的 33.17% 和 43.46%,说明 OMP 处理盐分淋洗更加充分且淋盐深度较 CK 处理与 PM 处理深。

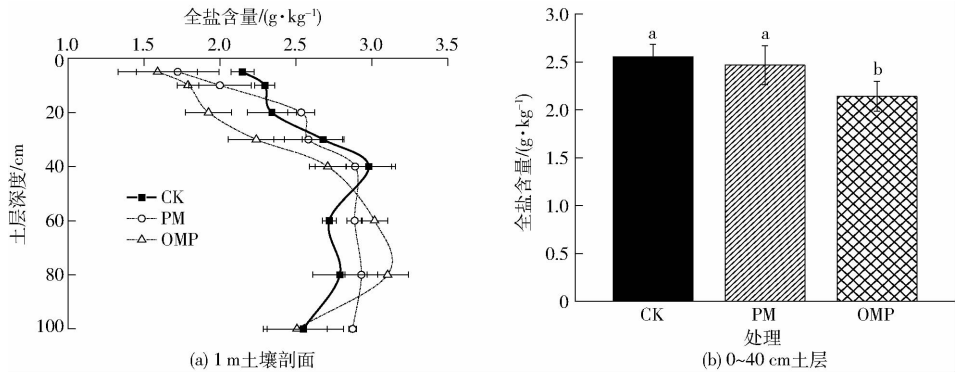


图 4 春灌后各处理 1 m 土壤剖面与 0~40 cm 土壤全盐含量

Fig. 4 Total salt content in 1 m soil profile and 0~40 cm soil of each treatment after spring irrigation

从不同土层全盐含量来看,与 CK 处理相比,PM 处理灌溉后仅 0~10 cm 表层土壤平均全盐含量显著降低了 16.24%,其他土层均无显著性差异。OMP 处理 0~40 cm 土层春灌后全盐含量显著小于 CK 处理与 PM 处理,OMP 处理 0~10 cm 表层土壤平均全盐含量较 CK 处理与 PM 处理显著降低了 23.94% 和 9.19%;0~40 cm 土层平均全盐含量较 CK 处理与 PM 处理显著降低了 16.22% 和 13.21% (图 4b)。

2.3 收获后土壤剖面水盐分布

收获后的土壤水盐含量与分布可反映整个生育

期内的水盐运移情况。从食葵收获后 1 m 土壤剖面含水率看,食葵收获后 CK 处理与 PM 处理均无显著性差异,但二者 0~60 cm 含水率均显著高于 OMP 处理,尤其是 0~40 cm 根系分布层平均含水率较 OMP 处理分别显著提高了 40.69% 和 35.77%,在 60 cm 以下出现低于 OMP 处理的情况,但无显著性差异(图 5a)。从灌溉水生产率来看,OMP 处理较 CK 处理与 PM 处理分别显著提高了 92.63% 和 49.46% ($P<0.05$,图 6)。

PM 处理仅对收获后 0~10 cm 土层盐分表聚有

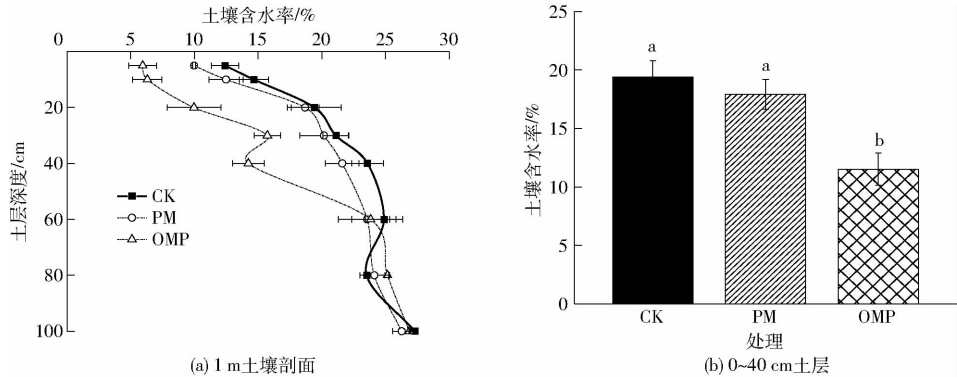


图 5 收获后各处理 1 m 土壤剖面与 0~40 cm 土壤含水率

Fig. 5 Moisture content in 1 m soil profile and 0~40 cm soil of each treatment after harvest

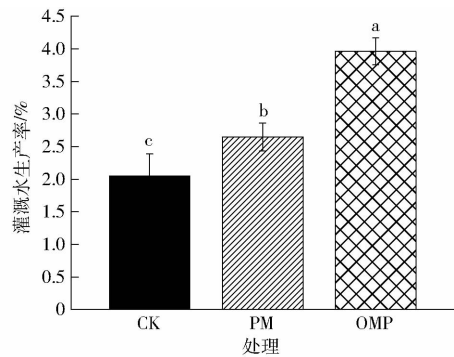


图 6 不同处理灌溉水生产率

Fig. 6 Irrigation water productivity of different treatments after three years

明显抑制效果,其平均全盐含量较 CK 处理显著降低了 31.45% ($P<0.05$),在 10~100 cm 土层全盐

含量均与 CK 处理无显著性差异。OMP 处理对收获后 0~30 cm 土层均有明显的控抑盐效果,其平均全盐含量较 CK 处理与 PM 处理分别显著降低了 27.85%~35.40% ($P<0.05$),在 40 cm 土层处无显著差异,而在 40~100 cm 土层呈现相反趋势,OMP 处理平均全盐含量较 CK 处理与 PM 处理分别显著提高了 42.20%、66.87%。同时与 CK 处理和 PM 处理相比,OMP 处理 0~40 cm 根系分布层土壤平均全盐含量显著降低了 24.62%~21.12% (图 7b),返盐率也显著降低了 12.22、11.56 个百分点 ($P<0.05$) (图 8),说明该处理在作物生长后期起到了控制盐分表聚的作用,为作物生长提供了淡化耕层。

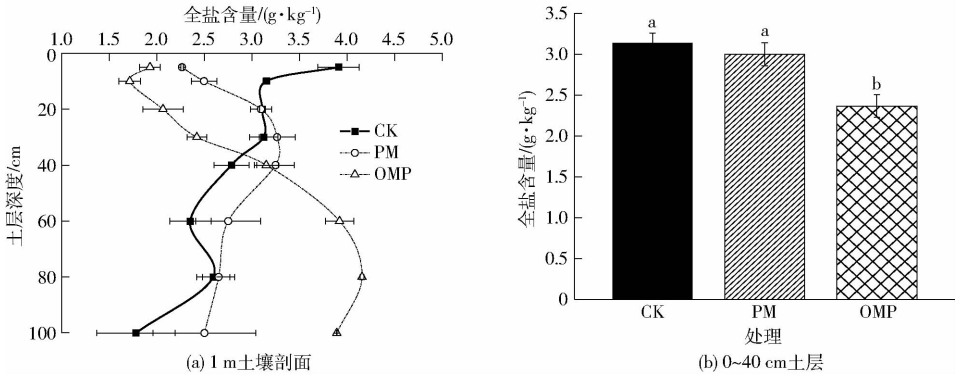


图 7 收获后各处理 1 m 土壤剖面与 0~40 cm 土壤全盐含量

Fig. 7 Total salt content in 1 m soil profile and 0~40 cm soil of different treatments after harvest

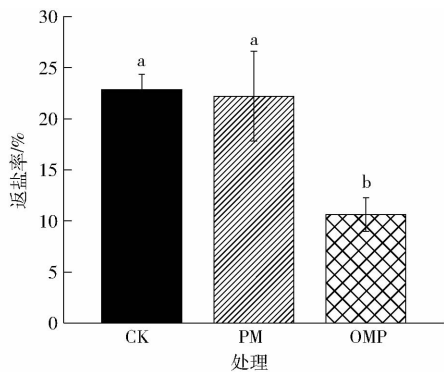


图 8 不同处理收获后 0~40 cm 土层返盐率

Fig.8 Salt accumulation rate in 0~40 cm soil layer of different treatments

表 3 不同层次原状土壤孔隙结构特征参数与 0~40 cm 土壤水盐含量的相关系数

	亚表层						深土层			
	大孔隙度	当量直径	当量直径	当量直径	连通度		大孔隙度	当量直径	当量直径	连通度
		0~500 μm 孔隙度	500~1 000 μm 孔隙度	1 000~1 500 μm 孔隙度				0~500 μm 孔隙度	500~1 000 μm 孔隙度	
春灌后含水率	0.884 **	0.880 **	0.889 **	0.893 **	0.675 *	0.885 **	0.890 **	0.774 *	0.192	0.897 **
收获后含水率	-0.673 *	-0.669	-0.697 *	-0.650	-0.589	-0.662	-0.584	-0.438	-0.056	-0.669 *
土壤水分变化率	-0.946 **	-0.941 **	-0.959 **	-0.950 **	-0.916 **	-0.944 **	-0.928 **	-0.784 *	0.139	-0.960 **
春灌后全盐含量	-0.866 **	-0.860 **	-0.778 *	-0.676 *	-0.349	-0.865 **	-0.868 **	-0.832 **	0.127	-0.892 **
收获后全盐含量	-0.602	-0.595	-0.617	-0.622	-0.603	-0.603	-0.633	-0.515	0.044	-0.654
土壤返盐率	-0.806 **	-0.808 **	-0.800 **	-0.791 *	-0.774 *	-0.804 **	-0.754 *	-0.694 *	0.263	-0.750 *

注：*、** 分别表示在 0.05 水平（双侧）、0.01 水平（双侧）上显著相关。

春灌后 0~40 cm 土壤含水率与亚表层大孔隙度、当量直径 0~500 μm 孔隙度、500~1 000 μm 孔隙度、1 000~1 500 μm 孔隙度及孔隙连通度均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与当量直径 1 500~2 000 μm 孔隙度呈显著正相关 ($P < 0.05$)；与深土层大孔隙度、孔隙连通度呈极显著正相关 ($P < 0.01$) (表 3)。春灌后 0~40 cm 土壤全盐含量与亚表层总孔隙度、当量直径 0~500 μm 孔隙度、孔隙连通度呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，与当量直径 500~1 000 μm 孔隙度、1 000~1 500 μm 孔隙度呈显著负相关 ($P < 0.05$)；与深土层大孔隙度、当量直径 0~500 μm 孔隙度呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

食葵收获后 0~40 cm 土壤含水率与亚表层大孔隙度、当量直径 500~1 000 μm 孔隙度、深土层孔隙连通度呈显著负相关 ($P < 0.05$)，而收获后 0~40 cm 土壤全盐含量与孔隙性质均无显著相关性。

3 讨论

3.1 亚表层有机培肥结合地膜覆盖措施对土壤孔隙特征的影响

土壤孔隙结构是土壤中水分和气体运动的通道

2.4 土壤孔隙结构与水盐调控的相关性

孔隙度组成决定着土壤水分与盐分的分布状况 (表 3)。食葵生育时期 0~40 cm 土壤水分变化率与亚表层大孔隙度、不同当量直径孔隙度及孔隙连通度均呈极显著负相关 ($P < 0.01$)；与深土层大孔隙度及孔隙连通度呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。0~40 cm 土壤返盐率与亚表层大孔隙度、当量直径 0~500 μm 孔隙度、500~1 000 μm 孔隙度及孔隙连通度均呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，与当量直径 1 000~1 500 μm 孔隙度、1 500~2 000 μm 孔隙度呈显著负相关 ($P < 0.05$)；与深土层大孔隙度、当量直径 0~500 μm 孔隙度及孔隙连通度呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

和土壤微生物的生境,土壤大孔隙对土壤水分运移具有重要意义^[6]。本研究表明,单一地膜覆盖处理降低了土壤中大孔隙度,其中减少了当量直径 1 500~2 000 μm 孔隙度,增加了 500~1 000 μm 孔隙度,这是由于覆膜条件下提高了土体贮水能力,加快了水分湿润速率,从而增加了团聚体在湿润过程中因孔隙中空气受压缩膨胀而破碎的现象^[19]；与此同时,地膜覆盖改善了土壤水热气生态环境,增加土壤微生物和酶的活性,加速土壤有机质的矿化,这些因素都可能导致大团聚体向微团聚体的转变,填充较大孔隙,进而增加了较小孔隙度^[20]。而亚表层培肥结合地膜覆盖措施实施 3 年后,能有效改善土壤结构,提高大孔隙度,使土壤具有较好的孔隙结构。这主要是由于施用有机物料增加了大团聚体团聚过程形成,大团聚体间主要以棱角、棱边接触,增加了大颗粒间的孔隙,进而增加了孔隙数量与孔隙度,最终改善土壤结构。这与 ZHOU 等^[21]研究结果一致。

土壤孔隙是土壤内部气相以及液相转移的重要场所,孔隙连通程度与孔隙结构复杂程度是土壤内部物质运移效率以及动植物呼吸作用强弱的重要决定因素^[22]。亚表层有机培肥显著提高了不同土层

土壤孔隙的连通性,这主要是生物有机肥的施用在改变了土体结构的同时提高了土壤通透性,使独立大孔隙结构发生改变,产生相互连通的路径^[7]。另一方面,亚表层有机培肥会提高土壤有机碳含量,促进了微生物和真菌活动^[17],同时促进了作物根系生长^[23],使土壤中留下了细长且连通的孔隙通道,并使独立大孔隙结构发生改变,产生相互连通的路径^[24]。FERRO 等^[25]通过双尺度评价长期肥料试验下的土壤结构,也发现施厩肥和农家肥可以增加大孔隙连通性,改善土壤结构。

3.2 亚表层有机培肥结合地膜覆盖措施对土体剖面水盐分布的影响

盐碱土壤物理结构较差、土壤盐碱化程度高、肥力低下,因此,改良土壤理化性质、创建盐分淡化耕层是盐碱土改良的重要内容^[3]。本研究表明,与对照处理相比,单一地膜覆盖措施对春灌后水盐分布的调控效果仅体现在 0 ~ 10 cm 表层土壤,而在 10 ~ 30 cm 土层施入适量有机肥构建肥沃亚表层,再结合地膜覆盖可以显著提高播种前 0 ~ 40 cm 根系分布层土壤含水率,降低耕层土壤含盐量,为作物出苗创建“水高盐低”的适宜土壤环境。土壤贮水能力主要受土壤孔隙数量、大小分布和土壤比表面积等土壤孔隙结构条件的制约^[26],有机肥施用提高耕层含水率主要是由于提升了土壤有机质胶体含量,促进了土壤大团聚化进程,增加了土壤孔隙比例^[27],进而提升了土壤贮水性能。在 10 ~ 30 cm 土层施入有机肥构建肥沃土层相当于增加了“隔层”,有机肥通过增加土壤有机质和大团聚体含量改善土壤物理孔隙结构,造成“隔层”上下导水能力的差异,导致土壤水盐运动规律发生改变^[28]。同时,有机肥能够降低水溶性盐离子含量,提高阳离子交换量,从而降低土壤盐碱化程度^[28]。多位学者盐碱地改良试验结果都表明,有机肥能够显著降低土壤 pH 值、全盐含量、碱化度^[29-30],降低土壤容重、提高土壤通透性^[31]。

在作物生长后期,土壤水盐以上行为主,抑制水盐向上移动,减少盐分的表聚,降低盐分可以减少作物生长过程中的不利影响^[20]。本研究结果表明,与 CK 处理相比,PM 处理显著降低了收获后 0 ~ 10 cm 土层全盐含量,但对 0 ~ 40 cm 土壤返盐率无显著影响,而 OMP 处理显著降低了 0 ~ 40 cm 表层返盐率,表明亚表层有机培肥结合地膜覆盖更有利于抑制土壤返盐,原因是地膜覆盖减少水分蒸发,降低了盐分表聚,同时 0 ~ 10 cm 表土层起到一个保护层作用。但在 40 cm 土层以下,亚表层处理全盐含量均显著高于 CK 处理,表明当年盐分主要在这一层聚集,这

是由于有机肥的施用本身带来盐分的输入,同时由于改善了土壤结构,促进了盐分淋洗,所以盐分主要聚集在耕层以下,这也说明在亚表层有机培肥 3 年后,对抑制土壤表层返盐仍有显著效果;但是作物收获期 OMP 处理 0 ~ 40 cm 含水率显著低于 CK,这可能是由于 OMP 处理水分利用率高,食葵长势较好,蒸腾作用强,造成土壤含水率下降。

3.3 土壤孔隙结构特征与水盐调控效应的相关关系

健康的土壤结构通常具备较完善的团聚体结构和复杂的孔隙网络系统,从而保证土壤更好地实现各种功能^[32]。本研究结果表明,总孔隙度、不同当量直径孔隙度与土壤孔隙连通度均与水盐调控效果有显著相关性,其中春灌后土壤耕层含水率与亚表层和深土层土壤总孔隙度均呈现显著正相关,尤其是亚表层当量直径小于 1 500 μm 孔隙度与土壤含水率的相关系数较大,说明该部分孔隙密度对耕层土壤保水效果的影响较大,这主要是由于较大孔径的孔隙可有效排走土壤中的空气,减小了气压对入渗的抑制,同时增加了侧向渗透和垂直下渗,从而加大了水流速度^[33],较小孔径的孔隙增多,导致孔隙中气体被水包围,形成封闭气泡,又阻碍水在孔隙中的流动,进而降低了土壤的水分入渗速率,延长了入渗水在耕层的蓄积时间,进而提高了土壤含水率^[9]。研究表明,孔径大于 1 500 μm 的大孔隙密度与饱和导水率呈幂函数关系,且拟合度较高,并可以提高土壤的导水性能^[34]。耕层含水率与深土层各当量直径孔隙度无显著差异,其原因是该土层无孔径大于 1 500 μm 的大孔隙,说明当量直径小于 1 500 μm 的孔隙范围对含水率的影响一致。

本研究结果表明河套灌区春灌后土壤耕层全盐含量与亚表层和深土层土壤总孔隙度均呈现显著负相关,其原因为施用有机肥改善了土壤结构,促进土壤排盐并抑制返盐^[35]。土壤盐分会影响孔隙的形成和分布,高盐条件下土壤孔隙数量少于非盐渍土壤^[36]。不同土层中当量直径 0 ~ 500 μm 孔隙度与全盐含量的相关系数较高,说明当量直径 0 ~ 500 μm 孔隙度与全盐含量的关系更为密切,该原因可能是孔径 0 ~ 500 μm 的孔隙可以供给水分的空间很小,导致这部分土壤中有害盐分的积累较少。此外,耕层土壤含水率与全盐含量均与不同土层土壤孔隙连通度呈显著相关性,其原因主要是亚表层有机培肥增加土壤有机质含量,有机质可以增加孔隙连通性^[37],使土体结构较疏松,有利于水分的空间性运移,为水分流动提供了通道,同时加大了水分与土体携带盐分的接触面积,促进了水分对土体盐分的充分淋洗作用,带走大部分盐分^[9]。

4 结论

(1)亚表层有机培肥 3 年后亚表层处土壤孔隙数量较多,且存在更多细长的较大孔隙,分布不均匀,呈现复杂多孔的土壤结构,深层土壤中的孔隙数量与连通程度较对照处理也明显改善。定量分析土壤孔隙结构特征发现,亚表层有机培肥显著增加了各土层的大孔隙度与孔隙连通度,改善了孔隙分布特征。

(2)亚表层培肥结合地膜覆盖显著提高了春灌后土壤的保水脱盐效果,提高了灌溉水生产效率,并抑制了作物生长后期盐分表聚。总孔隙度与土壤孔隙连通度的增加与水盐调控效果有显著相关性,且当量直径小于 1 500 μm 孔隙度对提高春灌后耕层土壤保水效果有显著影响,当量直径小于 1 500 μm 孔隙度对促进春灌后盐分淋洗效果的影响最为显著。

参 考 文 献

[1] 李亮, 史海滨, 李和平. 内蒙古河套灌区秋浇荒地水盐运移规律的研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(4): 41–44.
LI Liang, SHI Haibin, LI Heping. Research on the transport of solid moisture and salt in the saline land of the Inner Mongolia Hetao Irrigation District[J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2012(4): 41–44. (in Chinese)

[2] 黄明逸, 张展羽, 徐辉, 等. 咸淡轮灌和生物炭对滨海盐渍土水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 238–247.
HUANG Mingyi, ZHANG Zhanyu, XU Hui, et al. Effects of cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar on water and salt transports of coastal saline soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 238–247. (in Chinese)

[3] 张建兵, 杨劲松, 李芙蓉, 等. 有机肥与覆盖对苏北滩涂重度盐渍土壤水盐调控效应分析[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 184–188.
ZHANG Jianbing, YANG Jinsong, LI Furong, et al. Effects of farmyard manure and mulching on soil water and salinity in severe salinized tide flat soil of North Jiangsu Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 184–188. (in Chinese)

[4] 薄丽媛, 赵引, 毛晓敏, 等. 农田水盐运移与作物生长对亏水滴灌的响应和模拟研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 248–255, 237.
BO Liyuan, ZHAO Yin, MAO Xiaomin, et al. Response and simulation of farmland water-salt transport and growth of crops to deficit drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 248–255, 237. (in Chinese)

[5] 黄领梅, 沈冰. 水盐运动研究述评[J]. 水资源与水工程学报, 2000, 11(1): 7–13.
HUANG Lingmei, SHEN Bing. Review on advance in water and salt dynamics studies[J]. Water Resource and Water Engineering, 2000, 11(1): 7–13. (in Chinese)

[6] LÓPEZ-GARRIDO R, DEURER M, MADEJÓN E, et al. Tillage influence on biophysical soil properties: the example of a long-term tillage experiment under Mediterranean rainfed conditions in South Spain[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 118: 52–60.

[7] 孙钰翔, 张广斌, 房焕, 等. 孔隙结构对水稻土温室气体排放的影响[J]. 土壤, 2021, 53(1): 154–160.
SUN Yuxiang, ZHANG Guangbin, FANG Huan, et al. Effects of pore structure on greenhouse gas emission of paddy soils[J]. Soils, 2021, 53(1): 154–160. (in Chinese)

[8] 李文昭, 周虎, 陈效民, 等. 基于同步辐射显微 CT 研究不同施肥措施下水稻土团聚体微结构特征[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 67–74.
LI Wenzhao, ZHOU Hu, CHEN Xiaomin, et al. Characterization of aggregate microstructures of paddy soils under different patterns of fertilization with synchrotron radiation micro-CT[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 67–74. (in Chinese)

[9] 张宏媛, 逢焕成, 卢闯, 等. CT 扫描分析秸秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 114–122.
ZHANG Hongyuan, PANG Huancheng, LU Chuang, et al. Pore characteristics of straw interlayer based on computed tomography images and its influence on soil water infiltration[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 114–122. (in Chinese)

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

[11] ZHANG J M, XU Z M. Dye tracer infiltration technique to investigate macropore flow paths in Maka Mountain, Yunnan Province, China[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(8): 2101–2109.

[12] MATHIEU L, RODRIGO L, MARTIN H, et al. Density of macropores as related to soil and earthworm community parameters in cultivated grasslands[J]. Geoderma, 2011, 162(3–4): 319–326.

[13] LUO L F, LIN H, SCHMIDT J P. Quantitative relationships between soil macropore characteristics and preferential flow and transport[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(6): 1929–1937.

[14] 孟晨, 牛健植, 骆紫藤, 等. 华北土石山区森林土壤大孔隙对土壤理化性质及根系的响应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 94–100.
MENG Chen, NIU Jianzhi, LUO Ziteng, et al. Response of solid macropore to solid phychemical properties and root in forest in rocky mountain area of North China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 94–100. (in Chinese)

[15] 潘旭良, 黄丹, 吴晓丽, 等. 盐碱土水盐调控方法研究综述[J]. 吉林农业科学, 2012, 37(2): 27–29.
PAN Xuliang, HUANG Dan, WU Xiaoli, et al. A summary of studies on salt-water regulation approach of saline soil[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2012, 37(2): 27–29. (in Chinese)

- [16] MOSADDEGHI M R, MAHBOUBI A A, SAFADOUST A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in Western Iran[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 173 – 179.
- [17] 张宏媛, 卢闯, 逢焕成, 等. 亚表层培肥结合覆膜提高干旱区盐碱地土壤肥力及优势菌群丰度的机理[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(9): 1461 – 1472.
ZHANG Hongyuan, LU Chuang, PANG Huancheng, et al. Mechanism of subsurface organic amendment combined with plastic mulching increasing soil fertility and microflora in an arid saline soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(9): 1461 – 1472. (in Chinese)
- [18] ZHANG H Y, LU C, PANG H C, et al. Straw layer burial to alleviate salt stress in silty loam soils: impacts of straw forms[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(1): 265 – 276.
- [19] BISSONNAIS Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I: theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(1): 11 – 21.
- [20] WANG Y P, LI X G, HAI L, et al. Film fully-mulched ridge-furrow cropping affects soil biochemical properties and maize nutrient uptake in a rainfed semi-arid environment[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60(4): 486 – 498.
- [21] 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(8): 66 – 74.
- [22] 刘涛. 黄土区露天煤矿大型机械压实对土壤孔隙特性的影响[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
LIU Tao. The effects of compaction resulted from large machineries on soil pore properties in an opencast coal mine dump in Loess Area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese)
- [23] 马祥, 贾志锋, 赵伟伟. 施用生物有机肥对干旱胁迫下燕麦生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(2): 18 – 25.
MA Xiang, JIA Zhifeng, ZHAO Yiwei. Bio-organic fertilizer; effects on the growth of oats under drought stress[J]. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2020, 36(2): 18 – 25. (in Chinese)
- [24] 丁奠元, 冯浩, 赵英, 等. 氮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.
DING Dianyuan, FENG Hao, ZHAO Ying, et al. Effect of ammoniated straw returning on soil pore structure[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(3): 650 – 658. (in Chinese)
- [25] FERRO N D, CHARRIER P, MORARI F. Dual-scale micro-CT assessment of soil structure in a long-term fertilization experiment[J]. *Geoderma*, 2013, 204 – 205: 84 – 93.
- [26] VINAY K J, MASAHIRO N, MOTOHIDE M. Zeolite formation from coal fly ash and heavy metal ion removal characteristics of thus-obtained Zeolite X in multi-metal systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2507 – 2514.
- [27] 李江涛, 钟晓兰, 张斌, 等. 长期施用畜禽粪便对土壤孔隙结构特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 137 – 140.
LI Jiangtao, ZHONG Xiaolan, ZHANG Bin, et al. Soil pore structure properties as affected by long-term application of poultry litter and livestock manure[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 137 – 140. (in Chinese)
- [28] ZHANG H Y, PANG H C, LU C, et al. Subsurface organic amendment plus plastic mulching promotes salt leaching and yield of sunflower[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(1): 457 – 466.
- [29] 刘艳, 李波, 孙文涛, 等. 生物有机肥对盐碱地春玉米生理特性及产量的影响[J]. *作物杂志*, 2017(2): 98 – 103.
LIU Yan, LI Bo, SUN Wentao, et al. Effects of bio-organic fertilizer on physiological characters and yield of maize in saline-alkali soil[J]. *Crops*, 2017(2): 98 – 103. (in Chinese)
- [30] ZHANG J B, YANG J S, YAO R J, et al. The effect of manure and mulch on soil properties in a reclaimed coastal tide flat salt-affected soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(8): 1782 – 1790.
- [31] 李旭霖, 刘庆花, 柳新伟, 等. 不同改良剂对滨海盐碱地的改良效果[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(2): 219 – 224.
LI Xulin, LIU Qinghua, LIU Xinwei, et al. Improving effect of different amendment treatments in coastal saline-alkali soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2): 219 – 224. (in Chinese)
- [32] EDEN M, MOLDRUP P, SCHJONNING P, et al. Linking soil physical parameters along a density gradient in a loess-soil long-term experiment[J]. *Soil Science*, 2012, 177(1): 1 – 11.
- [33] BENEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311 – 1325.
- [34] 陆斌, 张胜利, 李侃, 等. 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1512 – 1519.
LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al. Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the Qinling Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1512 – 1519. (in Chinese)
- [35] 李国辉, 宋付朋, 骆洪义, 等. 不同有机肥用量对滨海盐渍土盐分表聚性及物理性状的影响[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(5): 83 – 88.
LI Guohui, SONG Fupeng, LUO Hongyi, et al. Effect of different amounts of organic fertilizer on salt surface aggregation and physical properties of coastal salinized soil[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 51(5): 83 – 88. (in Chinese)
- [36] 洪明海, 黄介生, 曾文治, 等. 基于 CT 成像技术的盐渍土壤孔隙结构识别与分析[J]. *中国农村水利水电*, 2016(9): 1 – 4.
HONG Minghai, HUANG Jiesheng, ZENG Wenzhi, et al. Characterizing and analyzing solid structure by CT tomography technology[J]. *China Rural Water Conservancy and Hydropower*, 2016(9): 1 – 4. (in Chinese)
- [37] 孙经伟. 农业恢复措施对黑土母质发育的新成土土壤结构性质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
SUN Jingwei. The restorative effects of agricultural practices on soil structural properties of entisol newly developed from the parent material of mollisol of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese)