

# 不同改良方法对盐碱土壤 水盐运移效果的影响

刘月<sup>1</sup>, 李孟钊<sup>1</sup>, 徐志杰<sup>1</sup>, 马晓蔚<sup>1</sup>, 宋依依<sup>1</sup>,  
张金鹏<sup>1</sup>, 王世斌<sup>2</sup>, 高佩玲<sup>1,2</sup>

(1. 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000)

**摘要:**以取自山东省东营市的中度盐碱土为研究对象,为探究表层(0~20 cm)掺沙和掺生物炭处理对黄河三角洲地区盐碱土的改良效果,在室内进行了垂直一维积水入渗试验,分别研究两种方法对土壤水分入渗、土壤剖面含水率和含盐量的影响。试验土壤为中度盐碱土(含盐量 $2.381\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),试验共设置7个处理,分别是:CK(掺沙或生物炭0%)、S1(掺沙5%)、S2(掺沙10%)、S3(掺沙20%)、C1(掺生物炭0.5%)、C2(掺生物炭1%)、C3(掺生物炭2%)。结果表明:在相同入渗情况下,表层(0~20 cm)掺沙、生物炭均能提高盐渍化土壤中水分入渗效果,掺生物炭显著提高添加层的蓄水能力,掺沙显著提高掺沙层以下土壤含水率,在土层20~40 cm中,掺沙处理平均土壤含水率比掺生物炭处理提高1.37%;不同改良剂处理下,掺沙更有利于盐碱化土壤脱盐,20%掺沙处理平均脱盐率比掺生物炭处理提高5.26%~13.80%,脱盐区深度增加2.35%~3.92%,达标脱盐区深度增加1.70%~3.00%。根据河沙和生物炭在室内一维垂直积水入渗试验结果来看,土壤表层掺沙能有效解决黄河三角洲地区盐碱化土壤问题,改善土壤水盐分布,为作物生长提供良好的生长环境。

**关键词:**中度盐碱土;掺沙;掺生物炭;土壤水盐运移;一维代数模型

**中图分类号:**S156.4 **文献标志码:**A

## Effects of different improvers on water and salt migration in saline-alkali soil

LIU Yue<sup>1</sup>, LI Mengzhao<sup>1</sup>, XU Zhijie<sup>1</sup>, MA Xiaowei<sup>1</sup>, SONG Yiyi<sup>1</sup>,  
ZHANG Jinpeng<sup>1</sup>, WANG Shibin<sup>2</sup>, GAO Peiling<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Zibo, Shandong 255000, China;

2. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Science and Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of surface (0~20 cm) sand-mixing and biochar treatment on saline-alkali soil improvement in the Yellow River Delta region, vertical one-dimensional water infiltration experiment was carried out indoors to study the effects of physical improvement method and biological improvement method on soil water infiltration, soil profile moisture content and salt content. Test for moderate saline-alkali soil (salt content  $2.381\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), the test set to CK (mixed sand or biochar 0%), S1 (mixed sand 5%), S2 (mixed sand 10%), S3 (mixed sand 20%), C1 (mixed biochar 0.5%), C2 (mixed biochar 1%), C3 (mixed biochar 2%). The results showed that under the condition of same infiltration, surface (0~20 cm) mixed sand, biochar could improve the effect of salinization of soil moisture infiltration, mixed with biochar increased significantly the added a layer of water storage capacity, mixing sand significantly increased under sand mixing layer. Soil moisture content in the soil of the 20~40 cm, mixed sand treatment increased by 1.37% than of mixed biochar treatment; Under the treatment of

different modifiers, the addition of sand was more beneficial to the desalination of salinized soil. The average desalination rate of the 20% sediment treatment was 5.26%~13.80% higher than that of the biochar treatment, the depth of the desalination area was increased by 2.35%~3.92%, and the depth of the standard desalination area was increased by 1.70%~3.00%. According to the indoor one-dimensional vertical water infiltration test results of river sediment and biochar, the soil surface sediment mixing sand can effectively solved the problem of salinized soil in the Yellow River Delta Region, improved the distribution of soil water and salt, and provided a good environment for crop growth.

**Keywords:** moderately saline-alkali soil; mixed sand; mixed biochar; soil water and salt migration; one-dimensional algebraic model

黄河三角洲地区区域条件优越,在我国战略发展中占据着重要地位<sup>[1]</sup>,但由于该地区地下水埋藏较浅,矿化度较高,土壤质地以粉砂和细砂为主,地下水盐分易集聚地表,导致土壤盐渍化<sup>[2]</sup>。近年来该地区盐渍化土地面积已达 63.22 万 hm<sup>2</sup>,占土壤总面积的 50.88%<sup>[3]</sup>,土壤盐分含量过高、钠离子毒害作用加强,会导致植物吸水困难,土壤板结、肥力差<sup>[4]</sup>,严重制约植物的正常生长,对粮食生产和生态安全造成威胁,影响经济可持续发展<sup>[1]</sup>。因此,改良及合理开发利用盐碱地对于改善土壤环境、提高农作物产量具有重要的现实意义。

国内外学者针对盐碱地改良做了许多研究,盐碱地改良一般有水利、物理、化学、生物等措施,其中水利改良措施有灌排配套、蓄淡压盐和地下排盐,物理措施有平整土地、深耕晒垡、抬高地形等,化学措施有向耕地中施加石膏、生物炭、腐殖酸、有机肥等物质,生物措施为种植耐盐作物、使用生物菌肥等<sup>[5-7]</sup>。黄河三角洲地区盐碱土改良进行了大规模的研究和治理工作,积累了有效措施和方法<sup>[8]</sup>。但水利措施投资大、维护费用高;生物措施仅适用于土壤盐渍化水平低的地域;而化学方法易导致土壤的次生盐碱化。近年来随着黄河流域自然环境的恶化、工业的发展和城市化进程的加快,农业用水所占比例下降<sup>[9]</sup>,而盐碱地改良又需要消耗大量淡水资源,在水资源十分匮乏的黄河三角洲地区需要研发新型改良措施。作为目前比较常用的物理改良措施,土壤掺沙、生物炭具有操作简单、材料来源广泛等特点而被应用。

盐渍化土壤的板结严重,土壤透气、透水性变差,严重影响作物根系对水分的吸收利用。而施加沙、生物炭能有效改变土壤孔隙结构,实现土壤水分的再分布,是改良盐渍土的理想改良剂。在掺沙改良方面,有研究表明盐碱土壤表层掺沙或覆沙可以改善土壤结构,使土壤的有效孔隙度增大、通透性增强,从而改变盐碱土的水盐运移规律,掺沙使土壤的团粒结构增强,保水、蓄水能力增大<sup>[10-11]</sup>。

刘俸<sup>[12]</sup>研究认为覆砂能够有效抑制土壤水分蒸发,影响土壤含水率分布,并且随着砂石覆盖量的增加,土壤平均含水率越高,水分蒸发作用越弱。近年来,生物炭作为一种新型改良剂,被广泛应用于土壤改良中。生物炭稳定的芳香化结构、高的比表面积、较多的官能团和孔性,使其具有很强的稳定性和吸附性,这些特性使得生物炭广泛应用于土壤固碳、提高作物产量、修复污染土壤等方面<sup>[13]</sup>。Glaser 等<sup>[14]</sup>研究发现生物炭可以吸水,改善土壤持水性。Lin 等<sup>[15]</sup>研究表明,生物炭可以提高盐碱土的生产力和碳固存,使生长在滨海盐碱土的小麦单株籽粒质量增加了 27.7%。为了更直观地确定两种物理改良剂的改良效果,本文以黄河三角洲地区的滨州中度盐碱耕地为研究对象,以农田废弃物棉花秸秆制备的生物炭和引黄灌溉中形成的黄河沉沙作为土壤改良剂,利用室内一维垂直积水入渗试验,在土壤表层加入不同比例生物炭和河沙,探究两种改良物质对中度盐碱土土壤水分入渗特性的影响,以及入渗完成后土壤的脱盐深度与脱盐率,分析河沙和生物炭在改善土壤入渗性能和调节水盐运移中的作用,为黄河三角洲地区盐碱地改良问题提供理论依据,以此达到降低盐碱土改良成本,缓解废弃物对环境造成的压力,加强研发新型友好型改良剂的目的。

## 1 材料与方法

### 1.1 室内试验

1.1.1 试验材料与装置 试验用中度盐碱土取自山东省滨州市滨城区中裕生态产业园,取土剖面层次为 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 的扰动土,经晾晒风干、过 2 mm 筛后均匀混合制成室内试验用土。并采用环刀法<sup>[16]</sup>测定 0~80 cm 土壤平均容重和田间持水率,具体结果见表 1。试验中的河沙取自黄河三角洲地区黄河河沙(不含盐),河沙经过淘洗、晾干、过筛(2 mm)处理后,利用 Mastersizer 3000 型激光粒度仪测定土壤颗粒组成,并对试验土壤质

地进行划分,具体结果见表2。

生物炭购自山东省铭宸环卫设备有限公司,原材料为棉花秸秆,裂解温度在800℃以下,反应时间约为72 h,是不完全燃烧生成的黑色粉末。生物质炭pH值为8.6,密度是 $0.297 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,含碳量为73%。

灌溉水量根据旱作物播前灌水定额的公式计算得到<sup>[17]</sup>,具体计算公式为:

$$M = H(\theta_{\max} - \theta_0) \gamma_{\pm} \quad (1)$$

式中, $H$ 为土壤计划湿润层的深度,采用 $H = 60 \text{ cm}$ ;  $\theta_{\max}$ 为土壤计划湿润层所允许的最大含水率,一般取田间持水率, $\theta_{\max} = 28.62\%$ ;  $\theta_0$ 为土壤计划湿润层的初始含水率, $\theta_0 = 2.00\%$ ;  $\gamma_{\pm}$ 为土壤容重, $\gamma_{\pm} = 1.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。由上述公式计算得到土柱模拟试验

表1 供试土壤的基本物理化学性质

Table 1 The basic physicochemical properties of the tested soil

| 土壤类型<br>Soil type         | 土壤容重<br>Soil bulk density<br>/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 田间持水率<br>Field water<br>holding rate/% | 风干土含水率<br>Moisture content of<br>air-dried soil/% | pH   | 全盐量<br>Total salt content<br>/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | $EC_{5:1}$ | 土壤质地<br>Soil texture |
|---------------------------|---|--|---|------|---|------------|----------------------|
| 盐碱土<br>Saline-alkali soil | 1.39  | 28.62                                  | 2.00  | 7.94 | 2.381   | 0.961      | 粉砂质壤土<br>Silty loam  |

表2 供试土壤和河沙颗粒组成

Table 2 Granulometric composition of the tested soil and sand

| 材料类型<br>Material type     | 颗粒组成 Particle composition/% |                              |                        |
|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|
|                           | 砂粒 Sand<br>(2~0.02 mm)      | 粉粒 Powder<br>(0.02~0.002 mm) | 黏粒 Clay<br>(<0.002 mm) |
| 盐碱土<br>Saline-alkali soil | 20.26                       | 76.78                        | 2.96                   |
| 河沙<br>River sand          | 87.74                       | 12.20                        | 0.06                   |

1次灌溉用水量为743.6 mL。

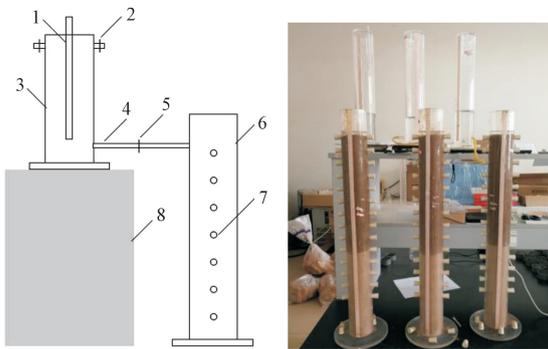
本研究基于室内一维积水土柱入渗试验,故涉及到的主要试验装置包括马氏瓶和土柱;土柱是由有机玻璃管制成,尺寸为直径8 cm,高90 cm;马氏瓶为供水装置,尺寸为截面积 $50.24 \text{ cm}^2$ ,高50 cm,供水水头控制在2 cm左右;在土柱10 cm以下,两侧每隔5 cm钻一个直径15 mm的对称圆形取样孔,以便试验结束后分层取出土样,并为后期测定土壤中水、盐提供原始土壤样品;土柱口用保鲜膜封盖,减少试验水分蒸发和外来污染;土柱和马氏瓶侧壁上均标有刻度,用于观测并记录试验过程中的相关数据。具体试验装置示意图见图1。

1.1.2 室内土柱试验 2019年9月至11月在室内进行一维垂直积水入渗试验,研究不同掺沙和掺生物炭比例对土壤理化性质和入渗机制的影响,试验分别设置掺沙比例(重量比)为:CK(掺沙或生物炭0%)、S1(掺沙5%)、S2(掺沙10%)、S3(掺沙20%),掺生物炭比例(重量比)为:C1(掺生物炭0.5%)、C2(掺生物炭1%)、C3(掺生物炭2%),共7个处理,每个处理重复3次。

土柱内装土高度为80 cm,将土样按土壤容重 $1.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、河沙容重 $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,分16层,每层5 cm均匀填装,且层间打毛,使各装填土层接触良好。前20 cm作掺沙、掺生物炭处理,掺沙和掺生物炭时按设计比例称取相应质量的土、河沙或生物炭,将生物炭或河沙与土壤混合均匀后正常装填;20~80 cm为纯土层。装填完毕后,在土壤表层放一张滤纸,避免马氏瓶供水时对土表造成冲刷。同时调整马氏瓶的高度,使入渗水头在2 cm左右。试验过程中记录马氏瓶水位和湿润锋的运移变化,灌溉定额结束后停止试验。试验结束后立即从土表至湿润锋处(5 cm)分层取样,每层取3次重复,用以测定土壤含水率、土壤含盐量。

## 1.2 样品测定方法

土壤含水率:采用烘干法<sup>[18]</sup>测定,具体操作为:在已称重的铝盒中放入20~30 g鲜土,放入烘箱中在105℃下烘干12 h,冷却后当即称重,计算质量含水率。



1-导气管; 2-进水口; 3-马氏瓶; 4-输水管; 5-止水夹;  
6-土柱; 7-取样口; 8-定水头控制台  
1-Air duct; 2-Intake; 3-Markov bottle; 4-Delivery pipe;  
5-Flatjaw pinchcock; 6-Soil column; 7-Sample connection;  
8-Fixed head control console

图1 试验装置图

Fig.1 The experimental equipment

土壤含盐量:将风干土样研磨后过 1 mm 筛,制取土壤浸提液(水土比 5 : 1),使用 DDS-11A 型电导率仪测定浸提液电导率,并校正为 25℃ 下的电导率。然后,根据土壤浸提液电导率和土壤含盐量之间的关系<sup>[19-20]</sup>,将电导率转化为含盐量。具体转化公式为:

$$y = 2.160EC_{5:1} + 0.303 \quad (2)$$

式中, $y$  为土壤含盐量( $g \cdot kg^{-1}$ ); $EC_{5:1}$  为 25℃ 下水土比为 5 : 1 的土壤浸提液电导( $mS \cdot cm^{-1}$ )。

### 1.3 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2010 进行数据整理, Origin 9.0 软件绘图, SPSS 22.0 进行数据分析,采用单因素方差分析 LSD 法比较不同处理间的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 表层掺沙、掺生物炭对土壤水分入渗的影响

土壤表层掺沙、生物炭对累积入渗量和湿润锋深度的影响见图 2、图 3。

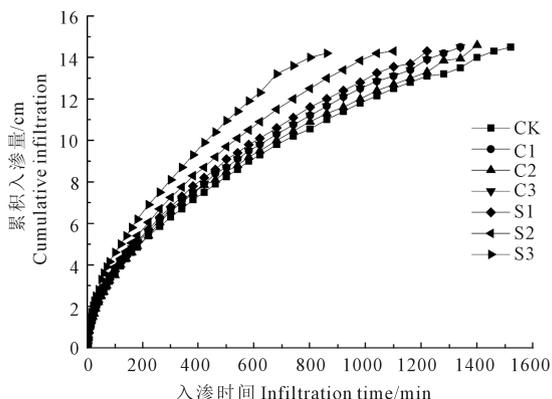


图 2 土壤表层掺沙、掺生物炭处理的土壤累积入渗量随时间变化曲线

Fig.2 Cumulative infiltration of soil treated with sand and biochar on the surface of soil varies with time

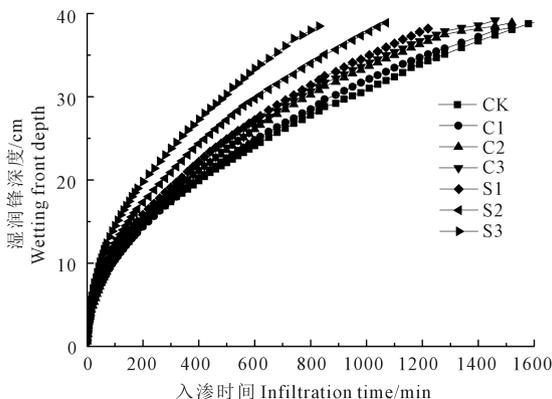


图 3 土壤表层掺沙、掺生物炭处理的土壤湿润锋深度随时间的变化曲线

Fig.3 Wetting front depth of soil treated with sand and biochar on the surface of soil varies with time

由图 2 可知,在相同入渗条件下,7 个处理的累积入渗量和湿润锋深度均随着时间的延续而呈现增加趋势。在入渗初期,入渗速率较高,各处理之间的差异较小,随入渗时间增加,各处理之间差异逐渐显著,表现为: $S3 > S2 > S1 > CK$ ,  $C3 > C2 > C1 > CK$ 。在入渗 500 min 时,各处理累积入渗量为  $S3$  (2 201.6 ml)  $> S2$  (1 905.3 ml)  $> S1$  (1 929.6 ml)  $> C3$  (1 749.2 ml)  $> C2$  (1 709.0 ml)  $> C1$  (1 658.7 ml)  $> CK$  (1 608.5 ml),相同灌溉定额入渗结束的时间依次是  $S3, S2, S1, C3, C2, C1, CK$ 。从图 3 可得,入渗 500 min 时  $CK$  湿润锋在 22.60 cm 处,  $S1, S2, S3, C1, C2, C3$  湿润锋分别比  $CK$  提高了 12%、23%、37%、2%、7%、8%。综上所述,表层掺沙和掺生物炭会加快土壤水分的入渗速度。同一入渗历时内掺加改良剂比例越大,累积入渗量和湿润锋深度越大,并且掺沙处理增强土壤水分入渗能力优于掺生物炭处理。

为了定量分析两者的关系,利用线性方程进行拟合:

$$I = nZ_f \quad (3)$$

式中, $I$  为累积入渗量(cm);  $Z_f$  为湿润锋运移深度(cm);  $n$  为拟合参数。

由表 3 可知,表层掺沙和掺生物炭后,累积入渗量和湿润锋深度与入渗时间关系的变化规律基本相同,与入渗时间形成的回归方程的决定系数  $R^2$  均大于 0.98,说明两者存在良好的线性关系。总体来看,掺生物炭处理  $n$  值大于掺沙处理,具体表现为:  $C3 > C2 > C1 > CK > S1 > S2 > S3$ 。综上,灌溉定额结束时,改良剂比例越大湿润锋深度越大。

### 2.2 表层掺沙、掺生物炭对土壤水分垂直分布的影响

表层掺沙、掺生物炭条件下各土层土壤含水率变化及 0~20 cm、20~40 cm 土层平均值见表 4。

由表 4 可知,不同掺沙、掺生物炭比例处理下,各土层含水率变化规律相同,均随土层深度的增加而降低,掺生物炭土层含水率远远大于掺沙土层,掺生物炭比例越大土壤含水率越高,而掺沙比例越大土壤含水率降低越明显。在 0~20 cm 土层中,掺生物炭处理土壤含水率与掺沙土层土壤含水率相近,土壤含水率分布为  $C3 > C2 > C1 > CK > S1 > S3 > S2$ ,说明在添加层(0~20 cm)中,生物炭处理优于掺沙处理,表层掺生物炭更有利于提高土壤含水率。在 20~40 cm 土层中,掺沙处理土壤含水率大于掺生物炭处理含水率,且土壤含水率均大于  $CK, S1, S2, S3, C1, C2, C3$  平均含水率比  $CK$  分别提高了 3.8%、5.1%、6.7%、2.2%、4.2%、5.1%,说明在添加层以下的 20~40 cm 土层中,表层掺沙更有利于为作物生

长提供良好的生长环境。

### 2.3 表层掺沙、生物炭对土壤盐分再分布的影响

土壤盐分对于作物生长起到重要作用,土壤中含盐量较少时会促进作物生长,当产生盐分胁迫时将抑制作物生长。盐渍化土壤会导致土壤结构板结、通透性差、有机质含量低等多种问题<sup>[21]</sup>,抑制作物生长,影响农作物产量。因此,判断改良剂对盐渍化土壤的改良程度,需要将脱盐效果作为重要的参考指标。

表3 土壤表层掺沙、掺生物炭累积入渗量与湿润锋深度关系的拟合系数

Table 3 The fitting coefficient of the relationship between the accumulated infiltration amount of soil surface mixed with sand and biochar and the depth of wetting front

| 项目<br>Item                      | CK     | C1     | C2     | C3     | S1     | S2     | S3     |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 拟合系数 $n$<br>Fitting coefficient | 0.3622 | 0.3640 | 0.3655 | 0.3670 | 0.3617 | 0.3564 | 0.3515 |
| $R^2$                           | 0.9981 | 0.998  | 0.9974 | 0.9974 | 0.9951 | 0.9913 | 0.9886 |

表4 表层掺沙、生物炭处理下各土层土壤的含水率/%

Table 4 Soil moisture content in different soil layers treated with sand and biochar on the surface of soil

| 土层 Soil layer/cm | CK      | C1      | C2      | C3      | S1      | S2      | S3      |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0~10             | 31.56d  | 32.24c  | 33.56b  | 34.74a  | 30.57e  | 30.13e  | 30.01e  |
| 10~20            | 28.82g  | 30.02cd | 30.36b  | 30.75a  | 29.46ef | 29.63ef | 29.94cd |
| 20~30            | 27.17f  | 27.26f  | 27.94e  | 28.30cd | 28.38cd | 28.89ab | 29.12ab |
| 30~40            | 25.37g  | 26.45de | 26.87bc | 27.01ab | 26.28ef | 26.42de | 26.77bc |
| 0~20             | 30.19de | 31.13c  | 31.96b  | 32.75a  | 30.02de | 29.88e  | 29.98de |
| 20~40            | 26.27g  | 26.86f  | 27.41bc | 27.66bc | 27.33cd | 27.66bc | 27.95a  |

注:同一行中不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different letters in the same line indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

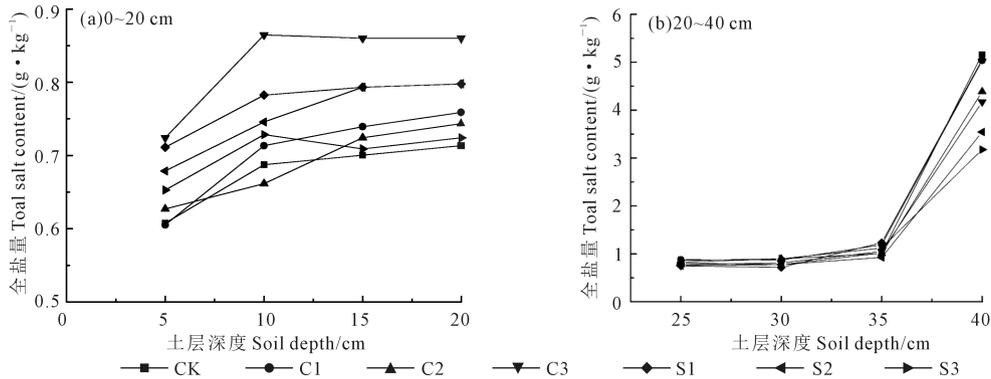


图4 土壤表层掺沙、生物炭处理各土层土壤盐分再分布特征

Fig.4 Redistribution characteristics of soil salinity in different soil layer treated with sand and biochar on the surface of soil

不同掺沙、生物炭比例下土壤含盐量随深度变化规律如图4所示,在0~40 cm深度范围内,土壤含盐量均随深度增加而增大,土壤含盐量整体表现为 $S1>C1>CK>S2>S3>C3>C2$ 。

由图4a可知,在土层0~20 cm处,掺沙、生物炭处理含盐量平均大于CK;由图4b可知,土壤盐分在土层35 cm处开始大量累积,呈现突变状态,各处理土壤含盐量大小为 $C3>C2>C1>CK>S1>S2>S3$ ,说明在相同入渗条件下,表层掺生物炭处理在压盐方面弱于掺沙处理,掺沙压盐效果随比例的增加而逐渐显著。原因可能是:表层掺沙改变了掺沙层的土壤结构,影响土壤的水分运移和盐分运移,进而影响土壤盐分的分布。

为了进一步研究各土层土壤盐分垂直再分布特征,引入表5所示指标对脱盐结果作进一步评价。脱盐率平均值为各脱盐区域土壤的脱盐量与原始

含盐量比值的平均值;土壤脱盐区深度为土壤中含盐量低于土壤初始含盐量的深度;土壤脱盐区深度与入渗完成时的湿润锋深度的比值称为脱盐区深度系数;根据黄河三角洲地区作物冬小麦和夏玉米的最低耐盐度,认为当土壤中含盐量低于 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时作物可以正常生长<sup>[22]</sup>;达标脱盐区深度为土壤含盐量低于 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的深度;达标脱盐区深度系数为达标脱盐区深度与入渗结束时湿润锋深度的比值。

由表5可知,表层掺沙处理脱盐率平均值大于掺生物炭处理;脱盐区深度和达标脱盐区深度大小均表现为: $S3>S2>C3>C2>CK>C1>S1$ ;表层掺沙处理脱盐区深度和达标脱盐区深度系数相等,并且大于表层掺生物炭处理。表明表层掺沙处理脱盐效果优于掺生物炭处理,能满足作物正常生长的需求,保证作物免受高盐胁迫的风险。

表 5 土壤表层掺沙、掺生物炭处理下土壤盐分分布指标对比分析

Table 5 Comparative analysis on evaluation index of salinity distribution treated with sand and biochar on the soil surface

| 处理<br>Treatment | 脱盐率平均值/%<br>Average desalination rate | 脱盐区深度/cm<br>Depth of desalination zone | 脱盐区深度系数<br>Depth coefficient of desalting zone | 达标脱盐区深度/cm<br>Reach the depth of desalination zone |
|-----------------|---------------------------------------|--|--|--|
| CK              | 66.14c                                | 36.56e                                 | 1.206  | 36.19ef  |
| C1              | 63.70e                                | 36.46e                                 | 1.300  | 36.06ef  |
| C2              | 60.25f                                | 36.93cd                                | 1.480  | 36.47cd  |
| C3              | 58.92g                                | 37.02cd                                | 1.602  | 36.52cd  |
| S1              | 65.82d                                | 36.41e                                 | 1.308  | 36.00f   |
| S2              | 66.83b                                | 37.65ab                                | 1.910  | 37.05ab  |
| S3              | 67.05a                                | 37.89ab                                | 2.434  | 37.14ab  |

注：同一列中不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference ( $P < 0.05$ ).

### 3 一维代数模型对土壤剖面含水率的模拟适用性

在农业研究中,准确模拟土壤含水率对于农田水分管理、灌溉制度确定以及提高作物的产量具有非常重要的现实意义<sup>[23]</sup>。但目前常用的 Green-Ampt, Philip, Kostiaikov 等土壤入渗模型都只重点关注土壤入渗率的计算,而没有提出相应的土壤含水率计算公式<sup>[24]</sup>。为了进一步描述垂直一维积水入渗过程与土壤剖面含水率之间的关系,研究土壤中水分的运动规律,王全九等<sup>[25]</sup>基于一维垂直水分运动基本方程和 Brooks-Corey 模型建立了垂直一维代数模型。本文在室内土柱入渗试验的基础上,研究盐碱土类型、掺沙比例对土壤水分再分布规律的影响,利用一维代数模型模拟表层掺沙、生物炭后的土壤剖面含水率,并对模型适用性做出评价<sup>[26-27]</sup>。

一维垂直水分运动基本方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \\ \theta(z, 0) = \theta_i \\ \theta(0, t) = \theta_s \\ \theta(\infty, t) = \theta_i \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\theta$  为土壤体积含水率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $t$  为入渗时间 (min);  $D(\theta)$  为扩散率;  $z$  为垂直坐标 (cm), 取向向下为正;  $k(\theta)$  为土壤非饱和导水率 ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $\theta_i$  为土壤初始含水率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $\theta_s$  为土壤饱和含水率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )。

土壤水分特征曲线和非饱和导水率由 Brooks - Corey 模型表示为:

$$\begin{cases} \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{h_d}{h} \right)^n \\ k(h) = k_s \left( \frac{h_d}{h} \right)^m \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\theta_r$  为土壤滞留含水率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $h_d$  为进气吸力 (cm);  $h$  为土壤吸力 (cm);  $n$  为土壤水分特征曲线形状系数;  $k(h)$  为土壤非饱和导水率 ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $k_s$  为土壤饱和导水率 ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $m$  为形状系数。

基于公式(4)和(5),并借助相应假设推求出了描述土壤水分垂直分布特征的数学模型:

$$\theta = \left( 1 - \frac{z}{z_f} \right)^\alpha (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (6)$$

式中,  $z$  为观测点与土柱土表的垂直距离 (cm);  $z_f$  为实测的湿润锋深度 (cm);  $\alpha = n/m$ , 为土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数,其可根据累积入渗量  $I$  与湿润锋  $z_f$  的线性关系求得:

$$I = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \alpha} z_f + (\theta_r - \theta_i) z_f \quad (7)$$

如果土壤初始含水率很低,可以假定  $\theta_r = \theta_i$ ,则公式(6)和(7)可以转化为:

$$I = \frac{\theta_s - \theta_i}{1 + \alpha} z_f \quad (8)$$

$$\theta = \left( 1 - \frac{z}{z_f} \right)^\alpha (\theta_s - \theta_i) + \theta_i \quad (9)$$

若使用一维代数模型模拟土壤剖面含水率,仅需知道  $\alpha, \theta_s, \theta_r, \theta_i$  等参数,其中  $\theta_s, \theta_r, \theta_i$  为土壤水分特征值,一般可以根据土壤特性和初始条件获得;  $\alpha$  可以从公式(8)通过试验数据进行拟合得到,初始含水率较低,即  $\theta_i = 1\%$ ,土壤滞留含水率  $\theta_r$  与其相等,累积入渗量与湿润锋之间的线性关系可以利用公式(8)进行拟合,拟合结果见表 3,然后根据拟合参数  $n$  值 ( $n = (\theta_s - \theta_r) / (1 + \alpha)$ ) 求取综合形状系数  $\alpha$ ,结果见表 6。

由表 6 可知,累积入渗量和湿润锋深度呈现良好的线性关系,线性回归方程决定系数  $R^2$  均大于 0.98。

引入 2 个指标评价一维代数模型的模拟效果,分别为均方根误差 (RMSE) 和符合度指数 ( $D$ )<sup>[28]</sup>,

具体计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (10)$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (11)$$

式中,  $S_i$  为模拟值(%);  $O_i$  为实测值(%);  $\bar{O}$  为实测

值的平均值(%);  $n$  为样本容量。 $RMSE$  主要反映模拟结果的绝对无偏性和极值效应,其值越靠近 0,说明模拟值与实测值的偏差越小,模型的模拟结果越准确; $D$  是一个归一化的度量指标,其值在 0 ~ 1 之间, $D$  值越大,表示模拟值与实测值的分布趋势吻合度越高,模型的总体预测性越好。

由图 5 可知,在 0~20 cm 土层模拟值与实测值基本一致,20~40 cm 土层模拟值与实测值差距较大,

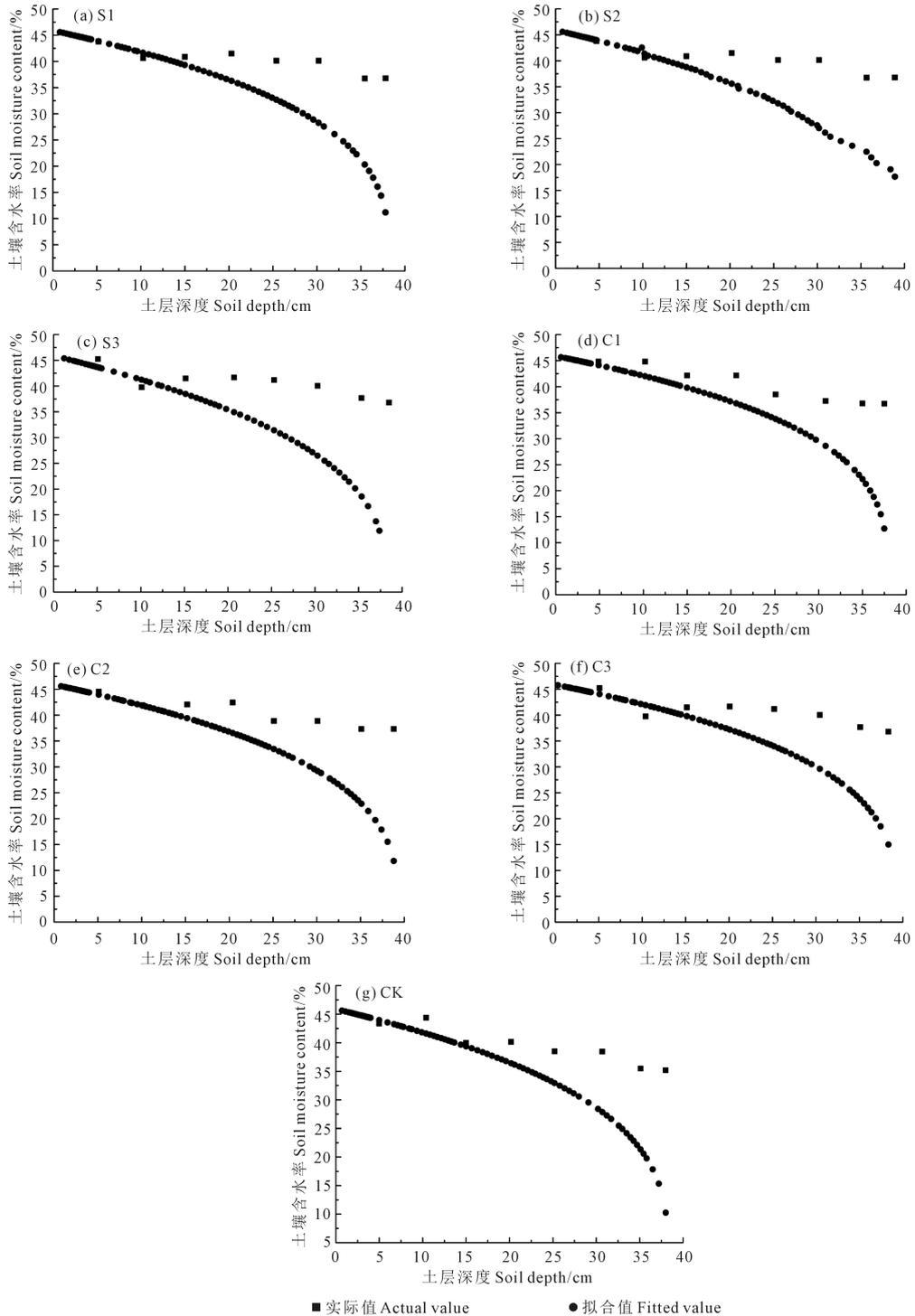


图 5 不同掺沙、掺生物炭比例下土壤剖面含水率拟合效果

Fig.5 Fitting effect of soil profile moisture content under different proportions of sand and biochar

模拟值均小于实测值,一维代数模型对掺加层以下土壤剖面含水率的拟合精确度较差。

由表 7 可知,不同掺沙处理 *RMSE* 基本随掺沙量比例增加而增加,而掺生物炭处理相反,说明一维代数模型的拟合精度受改良剂的影响;从整体模拟效果符合度指数 *D* 来看,除 CK 外其他处理均小于 0.4,表示模拟值与实测值的分布趋势吻合度较低,模拟效果不理想,掺沙处理符合度远小于掺生物炭处理,说明表层掺沙后模型精度会降低,盐碱土表层掺沙对一维代数模型拟合效果影响较大。

表 6 不同掺沙、掺生物炭比例下一维代数模型参数

Table 6 Parameters of one dimensional algebraic model under different proportions of sand and biochar

| 项目 Item               | 处理 Treatment |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                       | CK           | C1     | C2     | C3     | S1     | S2     | S3     |
| <i>n</i>              | 0.3622       | 0.3696 | 0.3615 | 0.3670 | 0.3617 | 0.3564 | 0.3515 |
| $\alpha$              | 0.3090       | 0.2820 | 0.3110 | 0.2920 | 0.3100 | 0.3300 | 0.3490 |
| <i>R</i> <sup>2</sup> | 0.9981       | 0.9980 | 0.9974 | 0.9974 | 0.9951 | 0.9913 | 0.9886 |

表 7 不同掺沙、掺生物炭比例下土壤剖面含水率模拟精度分析

Table 7 Simulation accuracy analysis of soil profile moisture content under different proportions of sand and biochar

| 项目 Item        | CK     | S1     | S2     | S3     | C1     | C2     | C3     |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <i>RMSE</i> /% | 0.0635 | 0.0969 | 0.0959 | 0.1086 | 0.0894 | 0.0950 | 0.0852 |
| <i>D</i>       | 0.5311 | 0.2985 | 0.2660 | 0.2521 | 0.3973 | 0.3935 | 0.3225 |

## 4 讨论

研究表明,生物炭可降低土壤容重,增大土壤通透性,改善土壤中水分的入渗能力<sup>[29]</sup>,沙可以改善土壤颗粒组成、进而改善土壤渗透性能<sup>[30]</sup>,这与本文研究结果相一致,土壤表层掺沙、生物炭均可以提高土壤的入渗性能,原因是表层掺沙和生物炭改变了土壤表层孔隙结构,减少土壤表面与空气的接触,具有较好的保水效果。在相同的灌溉条件下,由拟合系数 *n* 可知  $C1 > C3 > CK > S1 > C2 > S2 > S3$ ,具体因为生物炭具有较强的吸附能力,使水分在掺加层(0~20 cm)内大量汇聚,水分下渗量减少,而表层掺沙改变了盐渍化土壤颗粒组成,导致水分在掺加层减少,入渗性能得以提升。

本试验研究表明,土壤表层掺沙处理使表层土壤含水率降低,土壤深层含水率提高,这与张宇航等<sup>[31]</sup>研究证明表层掺沙可以提高土壤入渗能力,入渗速率随掺沙比例增大而增大的结论相一致。表层掺生物炭处理使土壤表层的含水率提高,深层土壤含水率降低,与王艳阳等<sup>[32]</sup>研究结果相一致。在

0~20 cm 土层中,表层掺沙处理土壤含水率小于表层掺生物炭处理,但两种处理各土层土壤含水率均大于 CK,在 20~40 cm 土层中,掺沙处理土壤含水率大于表层掺生物炭处理,且两种处理各土层土壤含水率均大于 CK,表明表层掺沙和掺生物炭均有助于使入渗水分在 0~40 cm 的作物根系密集层均匀分布,有利于作物根系的生长。

土壤盐分受降水、蒸发等因素制约。本研究发现在相同入渗条件下,土壤表层(0~20 cm)掺沙可以提高土壤脱盐率平均值,有效降低土壤含盐量,表层掺生物炭能降低土壤平均脱盐率,保证土壤中盐分不丧失,这与前人研究覆砂可以降低土壤盐分结论相一致。土壤表层掺沙处理土壤脱盐率均大于掺生物炭处理,掺沙比例越大,各土层土壤含盐量越小,20%掺沙处理平均脱盐率比掺生物炭处理提高 5.26%~13.80%,脱盐区深度增加 2.35%~3.92%,达标脱盐区深度增加 1.70%~3.00%,说明表层掺沙处理比掺生物炭处理脱盐效果更好,有利于降低盐渍化土壤中的含盐量,使作物正常生长。

引入一维代数模型对土壤剖面含水率的模拟效果不理想,原因可能是土体不够均匀,土层被破坏和未保持密封状态导致水分丢失等误差而造成的。

## 5 结论

本文通过室内土柱试验,探究黄河三角洲中度盐碱土表层掺沙、生物炭后水盐运移特征得出:

(1)在相同入渗情况下,表层(0~20 cm)掺沙、生物炭均能提高盐渍化土壤中水分入渗效果,两者改良效果相近;在添加层(0~20 cm)掺沙处理含水率小于表层掺生物炭处理,表层掺生物炭处理提高了添加层的蓄水能力,而掺沙处理加强了添加层以下土层(20~40 cm)的保水性能,抑制表层土水分蒸发,表层掺沙 20%效果最佳。

(2)两种改良物质处理下,土壤含盐量在 0~20 cm 土层变化趋势大致相同,表层掺沙处理各土层土壤含盐量均小于表层掺生物炭处理,表层掺沙 10%~20%显著提高土壤脱盐效率,有效降低中、下层土壤含盐量,最佳掺沙比例为 20%。

(3)不同掺沙处理 *RMSE* 在 0.06~0.11 之间,模拟精度随掺沙比例增大而降低,模拟效果符合度指数 *D* 除 CK 外其他掺沙处理均小于 0.4,说明一维代数模型对于中度盐碱土表层掺沙的拟合精度较低,

仍需进一步修正。

综上所述,黄河泥沙多而无用,作为一种方便易得、成本低、效果好的改良剂用于改良盐碱地,一方面可以改善土壤结构,延缓土地盐碱化,另一方面在降低改良成本的同时,缓解废弃物对环境造成的压力,有效改良黄河三角洲地区盐渍化土壤的水盐分布,为作物生长提供良好的环境,实现以农业废弃物为基础的新型友好型改良剂的研发。

#### 参考文献:

- [1] 宋静茹,杨江,王艳明,等.黄河三角洲盐碱地形成的原因及改良措施探讨[J].安徽农业科学,2017,45(27):95-97,234.
- [2] 范晓梅,刘高焕,唐志鹏,等.黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析.水土保持学报,2010,24(1):139-144.
- [3] 李倩,李晓霞,齐冬梅,等.黄河三角洲地区耐盐植物研究进展和展望[J].西南民族大学学报,2019,45(3):266-271.
- [4] 付修勇.德州盐渍土改良与开发利用研究[J].资源开发与市场,2012,28(9):810-812+864.
- [5] 孙泽强,董晓霞,王学君,等.鲁北平原咸水滴灌对土壤水盐分布和棉花产量的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):12-17,24.
- [6] 周和平,张立新,禹锋,等.我国盐碱地改良技术综述及展望[J].现代农业科技,2007,(11):159-161,164.
- [7] 张余良,王正祥,廉晓娟,等.灌溉不同水质条件下滨海盐土脱盐动态的研究[J].农业环境科学学报,2010,29(2):324-329.
- [8] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-844.
- [9] 陈淑清.滨州市盐碱地的治理与开发[J].河北农业科学,2009,13(6):94-95,97.
- [10] 刘建红.盐碱地开发治理研究进展[J].山西农业科学,2008,36(12):51-53.
- [11] 杨立国.盐碱地物理改良方法[J].黑龙江科技信息,2007,(1):119-119.
- [12] 刘俸.砂石覆盖量对冬小麦土壤水分运移及生长发育的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [13] 刘祥宏.生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用[D].北京:中国科学院研究生院,2013.
- [14] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219-230.
- [15] Lin X W, Xie Z B, Zheng J Y, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emissions, carbon sequestration and crop growth in coastal saline soil[J]. European Journal of Soil Science, 2015, 66(2): 329-338.
- [16] 江胜国.国内土壤容重测定方法综述[J].湖北农业科学,2019,58(S2):82-86,91.
- [17] 王志农.灌溉排水工程学(第2版)[M].北京:中国农业出版社,2010:40.
- [18] 刘国平.黄河三角洲滨海盐渍土改良措施[J].山东农业大学学报(社会科学版),2009,11(3):68-69.
- [19] 刘小媛,高佩玲,杨大明,等.咸淡水间歇组合灌溉对盐碱耕地土壤水盐运移特性的影响[J].土壤学报,2017,54(6):1404-1413.
- [20] 王乃江.微咸水灌溉模式对盐碱耕地土壤水盐运移规律的影响[D].淄博:山东理工大学,2016.
- [21] 胡敏,屈忠义,王丽萍,等.不同改良剂对河套灌区盐渍化土壤性态和葵花生长特性的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):316-322.
- [22] 张建国,金斌斌.土壤与农作[M].郑州:黄河水利出版社,2010:84.
- [23] Jackson T J, Hawley M E, O'Neil P E. Preplanting soil moisture using passive microwave sensors[J]. Water Resources Bulletin, 1987, 23(1):11-19.
- [24] 王全九,邵明安,郑纪勇.土壤中水分运动与溶质运移[M].北京:中国水利水电出版社,2007:12-32.
- [25] Wang Q J, Robert H, Shao M G. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution[J]. Soil Sciences, 2003, 168(10):671-676.
- [26] 赵连东.咸淡水组合灌溉模式下盐碱土水盐分布及改良效果的试验研究[D].淄博:山东理工大学,2017.
- [27] 王乃江.微咸水灌溉模式对盐碱耕地土壤水盐运移规律的影响[D].淄博:山东理工大学,2016.
- [28] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. Bull of the American Meteorological Society, 1982, 63:1309-1313.
- [29] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):135-144.
- [30] 靳聪.天津海泥吹填土理化属性及掺砂改土效果研究[D].天津:天津理工大学,2013.
- [31] 张宇航,高佩玲,张晴雯,等.中度盐碱土掺沙对土壤水盐运移和夏玉米生长的影响[J].中国土壤与肥料,2019,(2):83-90.
- [32] 王艳阳,魏永霞,张继鹏,等.不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特征[J].农业工程学报,2016,32(8):113-119.
- [33] 蒲红艳,陈亚宁,李卫红.干旱荒漠区新垦绿洲土壤改良措施对盐分变化的影响研究——以克拉玛依农业开发区为例[J].干旱区资源与环境,2007,(7):160-164.