文章编号:1000-7601(2023)02-0160-08

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2023.02.18

微咸水与生物炭协同作用对盐碱土 入渗特征及水盐运移的影响

吴 畏',高佩玲^{1,2},郭祥林',吕庆鑫',张 雪',李孟钊',王世斌'

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

摘 要:为研究添加生物炭条件下微咸水矿化度对盐碱土水盐运移的影响,采用一维垂直土柱入渗试验,研究 了微咸水灌溉并施用生物炭对盐碱土水盐运移特征及其对 Philip 和一维代数入渗模型参数的影响,并对入渗模型的 适用性进行了评价。本研究设置淡水对照 CK(0g·L⁻¹)及4种微咸水矿化度水平(2、3、4、5g·L⁻¹)与施用玉米秸 秆生物炭(5t·hm⁻²)组合试验方案。结果表明:使用微咸水灌溉或施用生物炭均会增加土壤水分入渗速率及土壤 含水率,提高土壤保水能力,且微咸水和生物炭协同作用下效果更好。灌溉微咸水并施用生物炭降低了土壤含盐 量,在 0~30 cm 深度内的平均含盐量比初始含盐量降低了 34.75%~74.00%,具有良好的盐分淋洗效果。Philip 入渗 模型能够较好模拟微咸水和生物炭协同作用下的土壤水分入渗情况,灌溉微咸水或施用生物炭会使吸渗率 S 增加, 且两者结合使用时 S 增幅更大;由代数模型计算而得的土壤各层理论含水率值与实测值之间的平均绝对误差与均 方根误差均小于 2.2%,表现出一维代数模型较好的适用性。综上所述,使用微咸水灌溉并配施生物炭是改善黄河三 角洲地区中度盐碱土入渗性能和水盐分布状况的较好方案。

关键词:盐碱土;微咸水;生物炭;土壤水盐运移;水分入渗模型

中图分类号:S156.4 文献标志码:A

Effects of synergism of brackish water and biochar on infiltration characteristics and water-salt migration in saline-alkali soil

WU Wei¹, GAO Peiling^{1,2}, GUO Xianglin¹, LV Qingxin¹, ZHANG Xue¹, LI Mengzhao¹, WANG Shibin¹
(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China;
2. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: This study used the one-dimensional vertical soil column infiltration experiment to investigate the water-salt transport characteristics of saline soils with brackish water irrigation and biochar application and their effects on the parameters of Philip and one-dimensional algebraic models, and the applicability of infiltration model was evaluated. The treatments of freshwater control $(0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1})$ and four brackish water mineralization levels (2, 3, 4, 5 g \cdot L⁻¹) combining with the application of corn stover biochar (5 t \cdot hm⁻²) were set up. The results showed that the use of brackish water irrigation or biochar application increased soil water infiltration rate and soil water content, and improved soil water retention capacity. The effect was better under the synergistic effect of brackish water and biochar. Irrigation with brackish water and application of biochar reduced the soil salinity, and the average salinity within 0 ~ 30 cm depth was reduced by 34.75% ~ 74.00% compared with the initial salinity, with good salt leaching effect. The Philip infiltration model simulated better the soil water infiltration under the synergistic effect of brackish water and biochar, with irrigation of brackish water or biochar application increasing the infiltration rate *S*, and the increase in *S* was greater when the two are combined. The mean absolute error and root mean square error between the theoretical and measured moisture content values of the soil layers calculated by the algebraic model were less than 2.2%, demonstrating the good applicability of the one-dimensional algebraic model.

作者简介:吴畏(1998-),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为农业水土工程。E-mail;wuwei1917@163.com

通信作者:高佩玲(1973-),女,新疆石河子人,教授,主要从事水文及农业水土工程研究。E-mail:gaoplxj@163.com

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2020ME251)

In conclusion, the use of brackish water irrigation with biochar application was a better solution for improving moderately saline soils in the Yellow River Delta region.

Keywords: saline-alkali soil; brackish water; biochar; soil water and salt transport; water infiltration model

盐碱土一般又称盐渍土,是土壤中可溶性盐分 离子含量较高、影响土壤的理化性质、并对植物生 长状况造成不利影响的多种土壤的统称[1]。土壤 盐碱化易使土壤板结、透水透气性变差,使作物减 产,不利于农业可持续发展[2]。黄河三角洲地区由 于水土资源的不合理利用及海水倒灌等原因,已成 为我国主要的盐碱地分布区之一,该地区盐碱地面 积达 3537.9 km²,占区域总面积的近一半,其中重度 盐碱土面积约 520.9 km²,约占总面积的6.7%^[3],土 壤盐碱化已成为限制该区域农业发展的重要因素。 此外,山东省淡水资源缺乏,黄河来水量逐年减少,深 层地下淡水已达到超采程度,供需矛盾不断加剧^[4]。 山东省是农业大省,灌溉需水量大,而鲁北平原地区 地下微咸水储量丰富,但开采量却不足10%^[5],同时 山东省农业存在严重的秸秆资源浪费现象。因此,合 理利用微咸水并结合秸秆制成的生物炭实现盐碱地 的综合改良具有重大现实意义。

目前,在使用微咸水和生物炭改良盐碱土方面 已有一些报道。Wang 等^[6]研究表明合理使用微咸 水进行灌溉既能保持土壤水分,又能节约淡水资 源,且在灌溉间隔较长的条件下,一定量的咸水灌 溉能促进作物的光合作用。刘娟等^[7]研究表明使 用较低矿化度的微咸水进行滴灌对盐分的淋洗效 果好。合理利用微咸水或咸水进行灌溉可以提高 土壤含水率,且具有一定的洗盐效果,还能够节约 淡水资源[8]。另一方面,使用微咸水灌溉盐碱地易 导致土壤积盐,对土壤造成不利影响^[9],且盐碱地 较为贫瘠,不利于作物生长,因此可结合其他方法 对盐碱地进行改良。生物炭是秸秆等有机物料在 高温厌氧的情况下炭化所得的一种材料,表面多 孔,具有较大的比表面积,施入土壤可以降低土壤 容重,增加孔隙率,提高土壤保水性能,提高土壤肥 力,达到改善盐碱土理化性质的目的^[10-13]。黄明逸 等[14]研究表明咸淡轮灌下添加生物炭有利于土壤 盐分淋洗,能够改善滨海盐渍土的入渗特性、持水 能力和盐分分布。Zhao 等^[15]研究表明松嫩平原苏 打盐碱地添加玉米秸秆生物炭可以降低土壤盐分、 pH值和 Na⁺含量,增加阳离子交换量、有机质和养 分含量。土壤水分入渗是土壤水分运动的重要部 分,与土壤水肥盐运移密切相关。目前常用的描述 土壤水分入渗的模型有 Philip 模型^[16]、Kostiakov 模 型^[17]、Green-Ampt 模型^[18]等。王全九等^[19]建立的 一维垂直积水入渗代数模型提出了入渗结束后剖 面含水率的计算模型,此模型的适用性已有学者进 行了研究。如赵连东等^[20]研究了一维代数模型在 重度盐碱土微咸水灌溉中的适用性,结果表明一维 代数模型能够有效地描述微咸水在重度盐碱土中 的入渗过程,对入渗结束后土壤剖面上水分分布情 况具有较高的模拟精度。

目前,国内外学者对于使用微咸水或生物炭改 良盐碱地进行了一些研究,并取得了一定的研究成 果,但对于黄河三角洲地区使用微咸水灌溉并结合 生物炭对盐碱地影响的研究还较少。因此,本试验 在室内采用一维垂直土柱入渗试验,研究添加生物 炭条件下微咸水灌溉对盐碱土水盐运移的影响,分 析微咸水矿化度与施用生物炭对土壤入渗模型参 数的影响,以期为黄河三角洲地区盐碱地的合理利 用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样取自山东省东营市东营区六户镇 0~40 cm 耕层土壤,每 20 cm 分层取原状土和扰动土。 原状土用于测定土壤饱和含水率、田间持水率和容 重;扰动土取回后风干、去除石块和枯枝等残留物, 过 2 mm 筛后备用。采用 Mastersizer 3000 型激光粒 度分析仪测定土壤机械组成,砂粒、粉粒、黏粒的占 比分别为 44.17%、52.31%、3.52%,根据国际土壤质 地分类标准,土壤质地为粉砂质壤土。土壤基本理 化性质见表 1。

		Table I Basic ph	ysical and chemical	properties of the s	sons		
土壤类型 Soil type	容重 Bulk density ∕(g・cm ⁻³)	田间持水率 Field capacity/%	饱和含水率 Saturated moisture content/%	风干含水率 Air-dried moisture content/%	рН	$\frac{EC_{1:5}}{(\mathrm{mS}\cdot\mathrm{cm}^{-1})}$	全盐量 Total salinity /(g・kg ⁻¹)
中度盐碱土 Moderate saline-alkali soil	1.45	26.62	32.27	1.00	8.18	1.162	2.65

表1 供试土壤的基本理化性质

供试生物炭为玉米秸秆在 700℃下热解 72 h 而 成,含碳量 82%,密度 0.58 g·cm⁻³,粒径 200 目,亚 甲基蓝吸附值 5 mg·L⁻¹。

试验用水为淡水和4种矿化度的微咸水,微咸水是根据当地地下水盐分组成特点,用化学试剂在实验室配制而成。各化学试剂种类、用量及微咸水 实测矿化度见表2。每次试验的灌水定额为14.86 cm,计算公式如下:

$$M = H(\theta_{\max} - \theta_0) \gamma \tag{1}$$

式中,*H*表示土壤计划湿润层的深度,*H*=40 cm; θ_{max} 为土壤计划湿润层允许最大含水量一般取田间持 水率, θ_{max} = 26.62%; θ_0 为土壤计划湿润层初始含水 率, θ_0 = 1.00%; γ 为土壤容重, γ = 1.45 g·cm⁻³。 1.2 试验装置

土壤入渗装置如图 1 所示,由试验土柱、马氏瓶 等组成。其中,试验土柱高度 90 cm,内径 8 cm,侧 面每隔 5 cm 高度设有取样孔;马氏瓶高度 50 cm, 内径 8 cm。

表 2 试验用水的化学组成/(g·L⁻¹)

1	able 2	Chemical	compo	osition of	test wa	ter
设置矿化度						实测矿化度
Set	NaHCO ₃	Na_2SO_4	NaCl	MgCl ₂	$CaCl_2$	Measured
mineralization						mineralization
2	0.359	0.331	0.682	0.369	0.259	2.01
3	0.539	0.497	0.383	0.554	1.023	2.99
4	0.718	0.662	1.364	0.738	0.518	4.02
5	0.898	0.828	0.647	0.923	1.705	5.01



1.导气管;2.马氏瓶;3.输水管;4.止水夹;5.土柱;
 6.取样口;7.定水头控制台

1. Air duct; 2. Markov bottle; 3. Water pipeline;

4. Water stopper clamp; 5. Soil column;

6. Sampling port; 7. Height console

图1 土柱入渗装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of soil column infiltration device

1.3 试验设计与方法

试验采用一维垂直入渗装置探究微咸水与生物炭协同作用对盐碱地水盐运移的影响。试验所 用生物炭的添加量为5t・hm⁻²,灌溉水矿化度设置 为0、2、3、4、5g・L⁻¹,共计10个处理,分别为CK (淡水,不施用生物炭)、C(淡水,5t・hm⁻²生物 炭)、K2(2g・L⁻¹微咸水,不施用生物炭)、K2C(2g ·L⁻¹微咸水,5t・hm⁻²生物炭)、K3(3g・L⁻¹微咸 水,不施用生物炭)、K3C(3g・L⁻¹微咸水,5t・ hm⁻²生物炭)、K4(4g・L⁻¹微咸水,不施用生物炭)、 K4C(4g・L⁻¹微咸水,5t・hm⁻²生物炭)、K5(5g・ L⁻¹微咸水,不施用生物炭)、K5C(5g・L⁻¹微咸水,5 t・hm⁻²生物炭),各处理重复3次。入渗过程中入 渗水头恒定为2 cm。

试验时,按土壤容重将土壤分层装入土柱(每5 cm一层,层间打毛保证土体连续),装土深度为80 cm,其中施用生物炭的处理0~20 cm 土层为混合生 物炭的土壤(按设计施量将生物炭与土壤均匀混合 后装入土柱),20~80 cm 土层为纯土壤层。

试验过程记录湿润锋运移深度和马氏瓶水位。 人渗完成后测定各层土壤含水率和含盐量。质量 含水率采用烘干法(105℃)测定;体积含水率由质 量含水率乘以容重得到;将干燥后的土样研磨后按 土水质量比1:5进行浸提,浸提液静置8h后使用 电导率仪(雷磁 DDS-11A)测定其电导率,根据该 地区土壤浸提液电导率与含盐量的线性关系,将电 导率转换为土壤含盐量,转换公式如下;

 $y = 2.2811 EC_{1:5} - 0.0015 \tag{2}$

式中, *y* 为土壤含盐量(g·kg⁻¹); *EC*_{1:5} 为 25℃ 下土 水比为 1:5 的浸提液电导率(mS·cm⁻¹)。

1.4 入渗模型及评价

本研究采用 Philip 入渗模型^[16]和一维垂直积 水入渗的代数模型^[19]对土壤入渗特性进行分析研 究。其中,Philip 入渗模型表达式为:

$$I = St^{0.5} \tag{3}$$

式中,*I*为土壤累积入渗量(cm);*S*为吸渗率(cm・min^{0.5});*t*为入渗时间(min)。

一维垂直积水入渗代数模型的表达式为:

$$I = Z_{\rm f}(\theta_{\rm s} - \theta_{\rm r}) \frac{1}{1 + \alpha}$$
(4)

$$\theta = \left(1 - \frac{Z}{Z_{\rm f}}\right)^{\alpha} (\theta_{\rm s} - \theta_{\rm r}) + \theta_{\rm r}$$
 (5)

式中, Z_f 为湿润锋深度(cm); θ_s 为土壤饱和含水率 (cm³·cm⁻³); θ_r 为滞留含水率(cm³·cm⁻³); α 为为 非饱和导水率和土壤水分特征曲线综合形状系数; θ 为土壤体积含水率(cm³・cm⁻³);Z 为任意土壤深 度(cm)。

采用平均绝对误差(*MAE*)和均方根误差 (*RMSE*)对模型的适用性进行评价,分别如式(6)、 (7)所示:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |\theta_{ui} - \theta_i|$$
(6)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\theta_{ii} - \theta_i\right)^2}$$
(7)

式中, θ_{ii} 为土壤理论含水率(cm³・cm⁻³); θ_{ii} 为土壤 实测含水率(cm³・cm⁻³)。

2 结果与分析

2.1 生物炭及微咸水矿化度对土壤水分入渗特征 的影响

累积入渗量和湿润锋深度是反映土壤水分入 渗特征的重要指标,图 2 和图 3 分别为各处理累积 入渗量和湿润锋深度随时间变化的过程。由图 2、 图 3 可以看出,累积入渗量和土壤湿润锋深度均随 时间增加而增加,且增加速率越来越小。入渗初期 各处理间差异较小,随着时间增加,各处理间差异 逐渐变大。

在图 2 中,各处理土壤水分入渗速率表现为 K5C>K4C>K3C>K2C>K5>K3>K4>K2>C>CK。使 用微咸水进行灌溉的处理较 CK 处理入渗时间减少 51.77%~65.26%,说明微咸水可以提升土壤入渗能 力;微咸水灌溉施加生物炭处理均比不施加生物炭 处理的入渗速度快,说明生物炭可以促进土壤水分 入渗。微咸水灌溉条件下,施用生物炭处理入渗速 度均高于未施用生物炭处理,且随微咸水矿化度的 升高而变快,入渗时间比 CK 处理减少 67.67%~ 73.43%。

在图 3 中,各处理入渗完成后的湿润锋深度表现为 CK>K4>C>K3>K5>K2C>K3C>K2>K4C>K5C。 使用微咸水进行灌溉的处理湿润锋深度均比 CK 小;除 2 g・L⁻¹的微咸水外,各矿化度微咸水施用生 物炭处理均比不施用处理湿润锋深度小。使用微 咸水灌溉并施用生物炭的处理大都比其他处理湿 润锋深度小。





Fig.2 Cumulative infiltration change of each treatment



图 3 各处理湿润锋深度变化

Fig.3 Variation of wetting front depth in each treatment

2.2 生物炭及微咸水矿化度对土壤水盐分布的 影响

水盐分布特征是评价改良效果、表征土壤性质 的重要指标。图 4 和图 5 分别为 10 种处理入渗结 束后的土壤剖面水盐分布情况。由图 4 可以看出, 入渗结束后土壤剖面含水率随土层深度的增加而 降低。各处理土壤含水率分布情况不同,在 0~40 cm 深度内,使用微咸水进行灌溉的处理土壤含水率较 CK 处理高 3.5%~5.5%,其中 K5 处理含水率最高,说 明灌溉微咸水会增加土壤含水率;施用生物炭后在 0 ~20 cm 深度内土壤含水率增加,在 20~40 cm 深度内 土壤含水率降低,说明生物炭会减缓土壤水分下渗, 增加表层土壤含水率。使用微咸水进行灌溉并施用 生物炭处理的土壤含水率在 0~20 cm 深度内均大于 其他处理,在 20~40 cm 深度内大于 CK 与 C 处理,但 小于 K2、K3、K4、K5 处理,与上述结果相同。

图 5 为各处理土壤剖面含盐量的变化,入渗结 束后剖面含盐量随土层深度的增加而增加,表现出 灌溉水的洗盐效果。0~40 cm 深度内,不同处理土 壤平均含盐量表现为 K5C>K5>K4C>K4>K3C>K3> K2C >K2>C>CK,施用生物炭处理的土壤含盐量均 大于不施用生物炭的处理,且土层深度越大,其含 盐量差值越大。使用微咸水进行灌溉的处理土壤 含盐量均大于 CK 处理,且随矿化度的升高而增大。 使用微咸水进行灌溉并施用生物炭处理的土壤含 盐量大于其他处理。表明土壤耕层含盐量与灌溉 水矿化度及是否施用生物炭有关,灌溉水矿化度越 高,土壤耕层含盐量越大,配施生物炭后也会使含 盐量增大,但各处理在 0~30 cm 内均小于土壤初始 含盐量,表明洗盐效果较好。

2.3 生物炭及微咸水矿化度对入渗模型参数的 影响

水力参数是反映土壤水分入渗的重要指标,对 Philip 入渗模型中的吸渗率 S 和一维代数模型中的 综合形状系数 α 进行研究,将累积入渗量与入渗时 间代入 Philip 入渗模型中即可得到吸渗率 S。将累 积入渗量与湿润锋深度,及土壤饱和体积含水率和 滞留体积含水率带入代数模型中,可求得综合形状 系数 α。各处理及对应的吸渗率 S 和综合形状系数 α 见表 3。









图 5 各处理土壤剖面含盐量变化

由表 3 可知, Philip 入渗模型适用于本试验中 的所有处理, 拟合精度均较高(*R*²>0.99)。而代数 模型更高, 说明由式(4) 求得的综合形状系数 α 精 度较高, 可用于代入式(5) 对不同深度处土壤含水 率进行理论估计。

表 3 各处理模型拟合参数

Table 3 Model fitting parameters for each treatment

处理 Treatment	Philip 模型 Philip mod	권 el	一维代数模型 One-dimensional algebraic model		
	$\frac{1}{S/(\mathrm{cm}\cdot\mathrm{min}^{-0.5})}$	R^2	α	R^2	
СК	0.3392	0.9984	0.2630	0.9997	
K2	0.4706	0.9997	0.1361	0.9998	
К3	0.4784	0.9941	0.1923	0.9983	
K4	0.4617	0.9985	0.1885	0.9994	
K5	0.5201	0.9965	0.1677	0.9995	
С	0.4461	0.9998	0.1866	0.9993	
K2C	0.5695	0.9992	0.1444	0.9994	
K3C	0.5628	0.9981	0.1435	0.9993	
K4C	0.6059	0.9985	0.1668	0.9985	
K5C	0.5909	0.9968	0.1771	0.9980	

使用微咸水进行灌溉的处理吸渗率 S 随入渗水 矿化度的增大而增大,施加生物炭后吸渗率 S 增加, 使用微咸水进行灌溉并配施生物炭处理的吸渗率 S 最大,表明使用微咸水及施加生物炭均可增加土壤 水分入渗速率。对于综合形状系数 α,使用微咸水 进行灌溉的处理 α 均小于 CK 处理,且随矿化度的 升高先增大后减小,在 3 g・L⁻¹矿化度时取得最大 值。C 处理 α 小于 CK,使用微咸水进行灌溉并配施 生物炭处理的 α 小于 C 处理,且随矿化度的升高先 减小后增大。表明施加生物炭会减缓土壤内水分 下渗,增强土壤保水能力。

2.4 代数模型的适用性评价

将拟合得到的综合形状系数 α 代入式(5),得 到剖面含水率分布的理论值,将其与实测所得土壤 含水率进行对比,对代数模型的适用性进行评价。

由图 6 可知,所有处理土壤剖面含水率分布理 论值与实测值吻合度较高,模型的模拟效果较好。只



Fig.6 Measured and theoretical values of soil profile moisture content in each treatment

有 CK 处理表层土壤含水率实测值大于理论值,且 其模拟效果最好,随着灌溉水矿化度的升高,呈现 出表层土壤含水率实测值小于理论值,深层实测值 大于理论值的趋势,且矿化度越高趋势越明显。施 加生物炭后,C 处理土壤含水率实测值均小于理论 值,且随着灌溉水矿化度的升高也有上述趋势。误 差分析(表4)进一步表明,各处理 MAE 和 RMSE 分 别介于 0.7904%~1.8987%和 0.8950%~2.1545%, 其中 CK 处理两参数均最小,灌溉 2 g・L⁻¹微咸水并 施生物炭的 K2C 处理两参数均最大。表明一维代数 模型拟合精度较高,对于本研究所有处理,该模型均 能比较准确的模拟土壤剖面含水率的分布情况。

表 4	各处理一维代数模型模拟精度分析

 Table 4
 Simulation accuracy analysis of one-dimensional algebraic model for each treatment

处理 Treatment	MAE/%	RMSE/%
СК	0.7904	0.8950
K2	0.9544	1.0458
K3	1.5222	1.6825
K4	1.1528	1.2422
K5	0.9771	1.3003
С	1.8465	1.9405
K2C	1.8987	2.1545
K3C	1.5351	1.8528
K4C	0.9969	1.2521
K5C	1.1984	1.3817

3 讨 论

土壤水是作物可以直接吸收利用的水分,对作 物生长具有较大影响。对于土壤水分入渗情况,本 研究表明水分入渗速率均随时间增加而减小,使用 微咸水灌溉及施用生物炭均能增加入渗速率,并使相 同灌水量条件下湿润锋运移深度减小,使土壤水分保 持在表层,提高表层含水率,且微咸水与生物炭结合 使用的效果更好,这与黄明逸等^[14]的研究结果一致。

土壤保水性能是评价土壤质量的重要指标,盐 碱地保水性能差是制约其利用的重要因素。本研 究结果表明使用微咸水进行灌溉并配施生物炭可 以增加表层土壤含水率,增强盐碱土的保水能力, 王世斌等^[21]得出了相似的结论。分析原因认为,微 咸水灌溉下土壤盐分浓度较大,扩散双电子层向黏 粒表面压缩,降低土壤颗粒之间的斥力,有助于团粒 结构形成,增强其导水能力^[22];生物炭本身具有多孔 结构,施入土壤中增加了土壤孔隙率;生物炭改善了 土壤团聚体结构,使土壤保水性能更好;生物炭所含 的官能团与水分子结合,使土壤中的水分更稳定^[13]。

土壤盐分含量是影响作物生长的重要因素,也是 评价土壤质量的重要指标。使用微咸水灌溉和施用 生物炭均会增加土壤含盐量,两者结合使用增加量更 大,对含盐量造成了一定的负面影响,但在 0~30 cm 深度内均低于初始含盐量,能够为作物根系提供适宜的盐度环境,这与朱成立等^[23]的结论基本一致。分析认为使用微咸水及生物炭的处理湿润锋入渗深度较小,盐分运移深度较小一些;微咸水和生物炭本身所含盐分进入土壤中,使土壤各层含盐量增加;生物炭较强的吸附作用可以吸附并固定盐分离子^[23]。

本研究使用 Philip 模型和代数模型分析使用微 咸水灌溉并施用生物炭的盐碱土壤水分入渗情况, 结果表明使用微咸水及施用生物炭均可增加吸渗 率 *S*、降低综合形状系数 α。使用代数模型对入渗完 成后土壤剖面含水率情况进行模拟,实测值与理论 值吻合度较高,且随矿化度升高呈现含水率在表层 实测值小于理论值,深层实测值大于理论值的趋势,赵连东等^[20]的研究表现出了相同的趋势。目前 已有学者对不同情况下代数模型的适用性进行了 分析^[24,25],本研究对代数模型计算所得理论含水率 与实测含水率的误差进一步表明模型拟合精度较 高,能够准确模拟入渗完成后土壤剖面含水率情 况,具有较好的适用性。

4 结 论

 1)各处理土壤累积入渗量及湿润锋深度均随时间增加而增加,增加速率逐渐变小。使用微咸水 灌溉并施用生物炭会增加土壤水分入渗速率,并减 小湿润锋入渗深度。

2)灌溉微咸水会增加土壤含水率,各矿化度微 咸水灌溉后0~30 cm 深度内土壤含盐量均小于土 壤初始含盐量;生物炭会增强土壤保水能力,减缓 土壤水分下渗,增加表层土壤含水率。微咸水灌溉 并配施生物炭条件下的保水降盐效果更好。

3) Philip 入渗模型和一维代数模型均能较好模 拟施用生物炭条件下微咸水灌溉的土壤水分入渗 情况。吸渗率 S 和综合形状系数 α 的变化表明使用 微咸水及施加生物炭均可增加土壤含水率。一维 代数模型可以较为精确的模拟各层土壤含水率的 分布情况,较 Philip 模型具有更高拟合精度。

综上所述,合理使用微咸水灌溉盐碱地可以增加土壤含水率,不会使盐碱地发生积盐,且配施生物炭可以进一步改善土壤理化性质。由此可知,使用微咸水灌溉并施用生物炭是黄河三角洲地区中度盐碱地合理利用的较好方案。

参考文献:

[1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等. 中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J].
 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.

[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
 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 139-144.
 FAN X M, LIU G H, TANG Z P, et al. Analysis on main contributors

influencingsoil salinization of Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 139-144.

- [3] 朱伟,杨劲松,姚荣江,等. 黄河三角洲中重度盐渍土棉田水盐运移规 律研究[J]. 土壤, 2021, 53(4): 817-825.
 ZHU W, YANG J S, YAO R J, et al. Soil water and salt transport in medium and heavy saline soils of Yellow River Delta[J]. Soils, 2021, 53 (4): 817-825.
- [4] 邢立亭,张凤娟,李常锁,等. 鲁北平原浅层地下水水化学特征[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 90-94.

XING L T, ZHANG F J, LI C S, et al. Hydro-chemicalcharacteristics of shallow groundwater in the North Shandong Plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 90-94.

- [5] 孙泽强,董晓震,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. SUN Z Q, DONG X X, WANG X J, et al. Effect of saline drip irrigation to soil water and salt distribution and cotton yield in Northern Shandong Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 12-17, 24.
- [6] WANG T Y, XU Z H, PANG G B. Effects of irrigating with brackish water on soil moisture, soil salinity, and the agronomic response of winter wheat in the Yellow River Delta[J]. Sustainability, 2019, 11(20): 5801.
- [7] 刘娟,孙兆军,范秀华.不同矿化度咸水滴灌对盐碱地水盐特性及油 葵生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 175-180. LIU J, SUN Z J, FAN X H. Effects of drip irrigation with different saline water on salt and water characteristics in saline-alkali soil and oil sunflower growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(5): 175-180.
- [8] 李丹,万书勤,康跃虎,等. 滨海盐碱地微咸水滴灌水盐调控对番茄生 长及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 39-50.
 LI D, WAN S Q, KANG Y H, et al. Effects of water-salt regulation on tomato growth andquality under drip irrigation with brackish water in coastal saline-alkali soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39 (7): 39-50.
- [9] WANG X P, LIU G M, YANG J S, et al. Evaluating the effects of irrigation water salinity on water movement, crop yield and water use efficiency by means of a coupled hydrologic/crop growth model [J]. Agricultural Water Management, 2017, 185: 13-26.
- [10] 刘森,王志春,杨福,等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J]. 水 土保持学报, 2021, 35(3): 1-8.
 LIU M, WANG Z C, YANG F, et al. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 1-8.
- [11] 王世斌,高佩玲,赵亚东,等. 生物炭、有机肥连续施用对盐碱土壤改良效果研究[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 154-161.
 WANG S B, GAO P L, ZHAO Y D, et al. Effect of continuous application of biochar and organic fertilizers on saline-alkali soil improvement [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 154-161.
- [12] 董飞,闫秋艳,段增强,等. 生物炭对不同浇水条件下冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(1): 149-157.
 DONG F, YAN Q Y, DUAN Z Q, et al. Effects of biochar addition on yield and water use efficiency of winter wheat under different irrigation conditions[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(1): 149-157.

- [13] 纪立东,柳晓桐,司海丽,等. 生物炭对土壤理化性质和玉米生长的 影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 114-120.
 JI L D, LIU X T, SI H L, et al. Effects of biomass charcoal on soil physicochemical properties and corn growth [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 114-120.
- [14] 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 M Y, ZHANG Z Y, XU H, et al. Effects of cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar on water and salt transports of coastal salinesoil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 238-247.
- [15] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. Science of the Total Environment, 2020, 722: 137428.
- [16] PHILIP J R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution [J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345-358.
- [17] PARHI P K, MISHRA S K, SINGH R. A modification to Kostiakov and modified Kostiakov infiltration models [J]. Water Resources Management, 2007, 21(11): 1973-1989.
- [18] KALE R V, SAHOO B. Green-Ampt infiltration models for varied field conditions: a revisit[J]. Water Resources Management, 2011, 25(14): 3505-3536.
- [19] WANG Q J, HORTON R, SHAO M A. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution [J]. Soil Science, 2003, 168 (10): 671-676.
- [20] 赵连东,高佩玲,王乃江,等. 一维代数模型在重度盐碱土微咸水灌溉中的适用性[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(3): 248-255.
 ZHAO L D, GAO P L, WANG N J, et al. Applicability of one dimensional algebraic model in brackish water irrigation of severe saline-alkali soil[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(3): 248-255.
- [21] 王世斌,高佩玲,赵亚东,等. 微咸水对生物炭作用下盐碱土水盐运移特征的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(2): 181-187.
 WANG S B, GAO P L, ZHAO Y D, et al. Effects of mineralization of brackish water on water-salt transport characteristics of saline-alkali soil supplemented with biochar[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(2): 181-187.
- [22] GAWAD G A, ARSLAN A, GAIHBE A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999–2002) [J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1/2): 39-53.
- [23] 朱成立,吕雯,黄明逸,等. 生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和 玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 226-234.
 ZHU C L, LYU W, HUANG M Y, et al. Effects of biochar on coastal reclaimed soil salinity distribution and maize growth with cycle fresh and saline water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 226-234.
- [24] 王春霞,王全九,何新林. 一维代数模型在砂质盐碱土改良中的适应 性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 222-228.
 WANG C X, WANG Q J, HE X L. Applicability research of one dimensional algebraic model on amelioration of sandy saline alkali soil[J].
 Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6): 222-228.
- [25] 毕远杰. 微咸水入渗条件下的一维代数模型研究[J]. 节水灌溉, 2018,(6): 106-110.

BI Y J. One dimensional algebraic model for saline water infiltration[J]. Water Saving Irrigation, 2018,(6): 106-110.