

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.027

咸淡轮灌和生物炭对滨海盐渍土水盐运移特征的影响

黄明逸¹ 张展羽² 徐辉¹ 翟亚明² 王策² 朱成立²

(1. 河海大学水利水电学院, 南京 210098; 2. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: 为利用滨海地区微咸水改良盐渍土,进行了不同咸淡水轮灌(淡淡、淡咸、咸淡、咸咸)和施用生物炭(0、15、30 t/hm²)的室内入渗试验,探讨了咸淡轮灌和生物炭施用下滨海盐渍土水盐运移过程。结果表明:滨海盐渍土水分运动主要受初始入渗水质的影响,先咸后淡的轮灌方式更有利于土壤水分入渗,入渗速率增加了8.2%~46.9%,并小幅提高了土壤含水率;生物炭可促进咸淡轮灌下的水分运移,增加了相同时间内的湿润锋距离、累计入渗量、入渗速率及入渗后的土壤含水率,添加量为15 t/hm²时入渗增益最佳,入渗速率提高了3.5%~22.0%;淡咸和咸淡处理的土壤含盐量均低于咸咸处理,脱盐率和脱盐区深度系数更高,咸淡处理可增加脱盐率,而淡咸处理可提高脱盐区深度系数;生物炭有利于咸淡轮灌下的土壤盐分淋洗,脱盐率和脱盐区深度系数分别提高了9.1%~15.0%和1.1%~7.5%,并增加了Ca²⁺和Mg²⁺含量,促进Na⁺淋洗,进而降低了微咸水利用风险,但在30 t/hm²时盐分淋洗效果有所减弱。研究表明,添加15 t/hm²生物炭配合微咸水-淡水轮灌能够改善滨海盐渍土的入渗特性、持水能力和盐分分布,可为该区盐渍土和微咸水开发利用提供参考。

关键词: 滨海盐渍土; 微咸水; 轮灌; 生物炭; 入渗; 水盐运移

中图分类号: S275; S287 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)01-0238-10

OSID:



Effects of Cycle Irrigation with Brackish and Fresh Water and Biochar on Water and Salt Transports of Coastal Saline Soil

HUANG Mingyi¹ ZHANG Zhanyu² XU Hui¹ ZHAI Yaming² WANG Ce² ZHU Chengli²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For saline soil reclamation using brackish water in coastal areas, indoor infiltration tests were carried out to investigate the water and salt transport processes of coastal saline soil under different cycle irrigations with brackish and fresh water and biochar application. There were four cycle irrigation treatments, that was, continuous freshwater irrigation (fresh - fresh), began with freshwater irrigation then brackish water irrigation (fresh - brackish), began with brackish irrigation and then freshwater irrigation (brackish - fresh), continuous brackish water irrigation (brackish - brackish). The biochar application rates were 0 t/hm², 15 t/hm² and 30 t/hm², respectively. According to the results, the water movement of coastal saline soil was mainly affected by the initial infiltration water quality. The cycle irrigation of brackish - fresh was more beneficial to soil water infiltration and increased the infiltration rate by 8.2%~46.9%. The cycle irrigation of brackish - fresh also slightly improved soil moisture content. Biochar promoted water infiltration under cycle irrigation with brackish and fresh water, and increased wetting front distance, accumulated infiltration amount, infiltration rate, and soil moisture content. Biochar application at 15 t/hm² was most conducive to soil water transport, increasing the infiltration rate by 3.5%~22.0%. The soil salt content of fresh - brackish and brackish - fresh was lower than that of brackish - brackish, while the desalinization rate and depth coefficient were higher. The cycle irrigation of brackish - fresh increased the desalinization rate, and the cycle irrigation of fresh - brackish could increase the desalinization depth. The addition of biochar was beneficial to soil salt leaching under cycle irrigation, which increased the desalinization rate and desalinization depth coefficient by 9.1%~15.0%

收稿日期: 2020-09-15 修回日期: 2020-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879071)和国家重点研发计划项目(2016YFC0400200)

作者简介: 黄明逸(1992—),男,博士后,主要从事盐碱地改良、高效灌排理论与技术研究, E-mail: hhuangmingyi@163.com

通信作者: 张展羽(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhanyu@hhu.edu.cn

and 1.1% ~ 7.5%, respectively. Biochar also increased the content of Ca^{2+} and Mg^{2+} , which promoted Na^+ leaching and mitigated the risk of brackish water irrigation. The effect of biochar on salt leaching was limited when the biochar application rate was increased to 30 t/hm^2 . The research result showed that 15 t/hm^2 biochar combined with cycle irrigation with brackish and fresh water improved infiltration characteristics, water holding capacity, and salt distribution of coastal saline soil, which could provide references for the development and utilization of saline soil and brackish water in coastal regions.

Key words: coastal saline soil; brackish water; cycle irrigation; biochar; infiltration; water and salt transport

0 引言

我国东部滨海地区滩涂广袤,是极为重要的后备土地资源。目前,东部沿海滩涂复垦面积已超过 $2.6 \times 10^3 \text{ km}^2$,然而多数围垦区土地存在着不同程度的盐渍化,严重制约了农业的高效发展^[1-2]。随着沿海地区城镇化和工商业的快速发展,可用于盐渍化土壤治理和农业生产的淡水资源日益短缺,导致滨海围垦区每年的农业生产损失达 30% 以上^[3]。为了充分开发滨海区盐渍化土地资源,探索科学、适宜的盐渍土改良和微咸水利用方法成为滨海围垦区农业发展的研究热点^[4]。

滨海地区丰富的微咸水资源是重要的淡水替代品,利用微咸水进行盐渍土淋洗改良已获得广泛关注^[5-8]。尽管如此,使用微咸水仍然存在土壤次生盐碱化的风险,微咸水安全利用成为关键^[9]。轮流使用微咸水和淡水是一种较易实行的微咸水利用方法,能够促进微咸水利用下的土壤盐分控制和作物生产^[10]。管孝艳等^[11]发现,在 2、4 g/L 微咸水与淡水交替灌溉下,表层土壤盐分向深层迁移,并未引起土壤盐渍化。米迎宾等^[12]指出,3 g/L 微咸水在咸淡交替方式下相比持续利用更能有效地抑制土壤积盐。闫冰等^[13]发现,咸淡轮灌有利于新疆绿洲土根系土壤积盐,可保障土壤的安全持续利用。朱瑾瑾等^[14]发现,3 g/L 微咸水在咸淡轮灌方式下可降低滨海盐碱土含盐量。

生物炭是在低氧或无氧环境和 700℃ 以内温度条件下通过有机生物质热解产生的一种高芳香化难熔性物质,具有较大的比表面积、发达的孔隙结构、高负电荷密度和官能团^[15]。生物炭作为土壤改良

剂可以降低土壤容重、促进孔隙结构和团聚体形成,进而改善土壤入渗性能及持水能力^[16]。近年来,生物炭在盐渍土壤治理中展现了较好的应用价值^[17-21]。

本文以滨海盐渍土为研究对象,采取咸淡轮灌和生物炭相结合的方法,进行室内入渗试验,分析讨论咸淡轮灌和生物炭施用对土壤入渗特性及水盐运移的影响,以期科学利用滨海区盐渍土和微咸水资源提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤来自东南沿海的盐城市滨海围垦区东川农场(北纬 $32^\circ 96'$ 、东经 $120^\circ 87'$),为我国东部滨海围垦区代表性盐渍土,土壤质地属于粉砂壤土。生物炭是小麦秸秆在低氧窑中通过 550 ~ 600℃ 热解 4 ~ 6 h 获得。盐渍土和生物炭试验材料主要性质如表 1 所示。入渗水质分别为淡水和 3 g/L 微咸水,淡水取自实验区自来水系统,微咸水根据取土农区地下浅层微咸水的盐分组成,通过 NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaCl_2 以及 MgCl_2 化学试剂与淡水充分溶解至矿化度 3 g/L 配置而成(表 2)。

1.2 试验设计

试验装置由供水设备、试验土柱和水盐测定装置 3 部分组成(图 1)。供水设备为马氏瓶,设计尺寸为内径 10 cm、高度 30 cm,入渗积水保持为定水头 2 cm,外壁贴有标尺,以控制和记录入渗水量;试验土柱为透明有机玻璃制品,内径 15 cm,高度 70 cm,土柱侧面每隔 5 cm 开直径为 2 cm 的圆形通孔,用于安装 TDR 土壤水分测定探针及原始土样采

表 1 供试土壤和生物炭主要性质

Tab. 1 Main properties of coastal soil and biochar

| 材料 | 容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 田间 持水率/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$) | 饱和 导水率/ ($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$) | 初始 | | | 钠吸 附比/ ($\text{mmol}^{0.5}\cdot\text{L}^{-0.5}$) | 阳离子 交换量/ ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 有机炭 质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) | Na^+ 质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | Ca^{2+} 质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | Mg^{2+} 质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) |
|-----|--|--|---|--|---|---------|--|---|--|---|--|--|
| | | | | 含盐量 (电导率)/ ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) | 比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$) | pH 值 | | | | | | |
| 盐渍土 | 1.40 | 31.9 | 27.4 | 1.96 | | 8.31 | 12.6 | 10.7 | 8.6 | 258.0 | 38.0 | 22.0 |
| 生物炭 | 0.20 | | | 4.50 | 9.4 | 10.1 | | 61.6 | 655.0 | 35.4 | 32.2 | 24.3 |

表2 入渗水质主要性质
Tab.2 Main properties of infiltration water

| 水质 | 含盐量/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) | 电导率/ ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) | 钠吸附比/ ($\text{mmol}^{0.5}\cdot\text{L}^{-0.5}$) | Na^+ 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | Ca^{2+} 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | Mg^{2+} 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | HCO_3^- 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | Cl^- 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | SO_4^{2-} 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) |
|-----|--|---|--|---|--|--|--|---|--|
| 淡水 | 0.12 | 0.30 | 1.0 | 20.7 | 48.0 | 11.5 | 42.7 | 21.3 | 13.8 |
| 微咸水 | 3.00 | 4.75 | 11.9 | 554.4 | 352.0 | 161.0 | 40.5 | 1 056.7 | 797.6 |

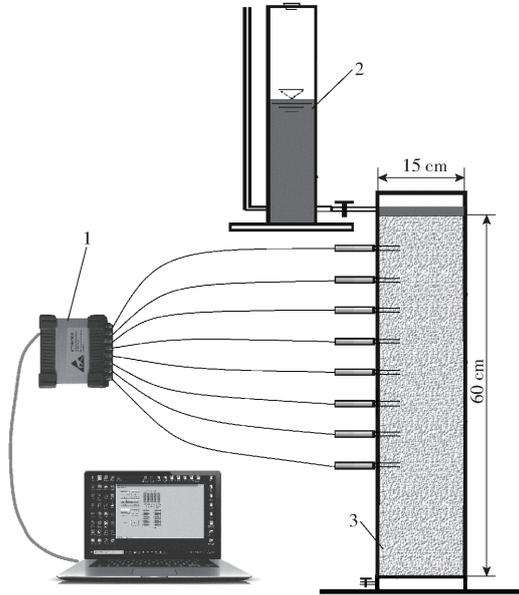


图1 试验装置示意图

Fig.1 Equipment sketch of experiment

1. TDR 土壤水分测定仪 2. 马氏瓶 3. 试验土柱

集,外壁贴有标尺,以记录湿润锋推移进程。土柱内壁涂抹凡士林用于消除边壁效应,底部设置滤纸层、2 cm 砾石层以及排水口以促进土壤排水透气。

入渗试验设置了 0、15、30 t/hm^2 的生物炭水平,根据田间实际情况,生物炭主要与 0~20 cm 表层土壤混合,相对应的生物炭、土壤质量比分别为 0、5.4、10.7 g/kg 。盐渍土样采集后,风干、研磨、过筛(2 mm)。生物炭研磨、过筛(2 mm)后,与盐渍土样充分混合均匀。随后按照初始田间容重($1.40 \text{ g}/\text{cm}^3$)分 12 层,每层 5 cm 均匀装入土柱,层面间土壤表面打毛,以保证入渗过程不出现分层。试验开始前,顶部土壤表层铺一层滤纸,其上另铺一层不透水保鲜膜,在设置好 2 cm 左右定水头后,移除不透水膜,以减少灌水对表层土壤的冲击。

试验设计 4 种不同轮灌方式,分别为全淡水灌溉(淡淡)、先淡水后微咸水(淡咸)、先微咸水后淡水(咸淡)、全微咸水灌溉(咸咸)。考虑滨海农区单次灌水定额通常约为 60 mm,每个处理入渗水量设定为 120 mm,在咸淡水比例为 1:1 的条件下,设置了无间歇咸淡轮灌入渗方式,即淡淡为连续灌溉 2 次 60 mm 淡水,淡咸为先灌 60 mm 淡水后灌 60 mm 微咸水,咸淡为先灌 60 mm 微咸水后灌 60 mm 淡水,

咸咸为连续灌溉 2 次 60 mm 微咸水。试验共设置 12 种处理(4 种轮灌方式 \times 3 种生物炭添加量),每个处理重复 3 次。

1.3 指标测定方法

土壤入渗湿润锋位置和马氏瓶液面高度以先紧后宽的时间间隔记录,计算后得相应的湿润锋推进距离和累计入渗量。完成入渗定额后,实时读取土壤含水率,并即刻从取样口采样,采样至湿润锋深度,以检测土壤含盐量和主要阳离子分布,具体测试指标及方法如下:入渗湿润锋和累计入渗量按照 60、120、300、600 s 的时间间隔通过液面读取换算得到,并记录其与入渗时间的关系,以计算出入渗速率。土壤剖面各层含水率由 TDR 土壤水分测定仪读取。土壤含盐量采用饱和萃取液法测定,将土样自然风干后,研磨过筛(1 mm),称取 20 g 土样与 20 mL 去离子水充分振荡 5 min 后,静止澄清,过滤获得土壤饱和萃取液。设置测定温度为 25°C ,使用 DDBJ-350 型电导率仪测定土壤含盐量,使用 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱测定土壤可溶性 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子含量。计算土壤初始含盐量和入渗结束时含盐量的差值与初始含盐量的比值为土壤脱盐率,脱盐区深度和最终湿润锋推进距离的比值为脱盐区深度系数。

1.4 数据分析

利用 Origin 软件绘制湿润锋、累计入渗量、入渗速率与时间的关系图,以及土壤剖面含水量、含盐量和离子分布图等。利用 Kostikov 模型对入渗速率进行拟合,计算式为

$$I(t) = Kt^{-n}$$

式中 I ——入渗速度, cm/min

K ——入渗系数, cm/min

n ——入渗指数

t ——入渗时间

拟合过程在 SPSS 中通过幂函数曲线拟合方法完成,并采用决定系数 R^2 和均方根误差 (RMSE) 对拟合结果进行评价。

2 结果与分析

2.1 咸淡轮灌和生物炭对入渗特征的影响

图 2 为咸淡轮灌和生物炭添加下湿润锋推进距

离与时间的关系。相同生物炭添加量下,咸咸处理在相同时间内湿润锋距离最大,但最终湿润锋距离均略低于其他处理。咸淡处理的湿润锋距离与咸咸处理相似,而淡咸处理的湿润锋距离类似于淡淡处理。生物炭进一步加快了咸淡轮灌下湿润锋运移,

相同轮灌方式到达一定湿润锋距离所需时间由大到小依次为生物炭添加量 0 t/hm^2 、生物炭添加量 30 t/hm^2 、生物炭添加量 15 t/hm^2 。生物炭也影响了相同入渗定额下湿润锋的最终距离,且随添加量增加,湿润锋的最终距离减小。

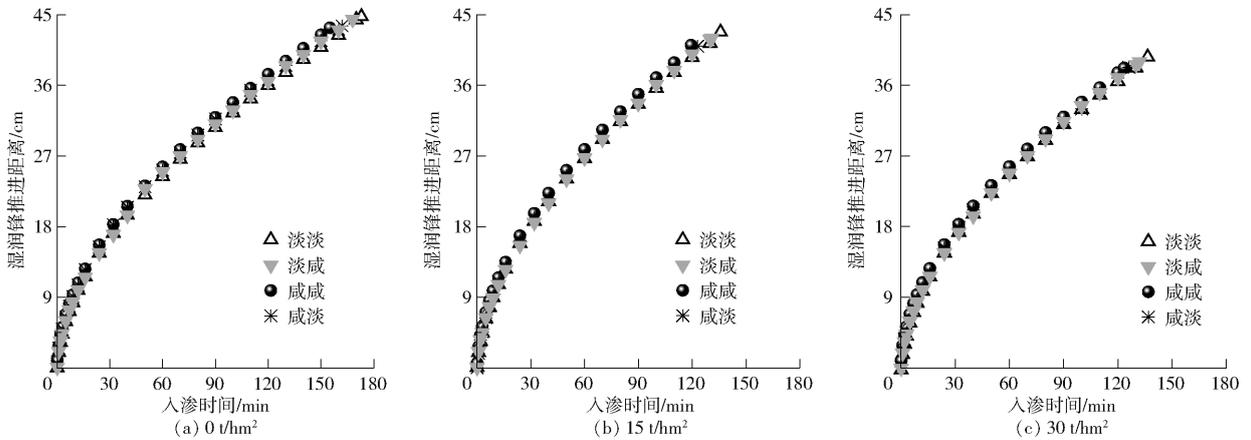


图2 咸淡轮灌和生物炭添加下湿润锋推进距离随时间的变化曲线

Fig. 2 Changing curves of wetting front distance with time under cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar application

累计入渗量随时间变化过程与湿润锋相似(图3)。微咸水灌溉后,同一时间的累计入渗量有所增加。咸淡轮灌的初始水质对累计入渗量具有较大影响,咸淡处理较淡咸处理完成入渗历时更短。相同生物炭添加量下,淡咸、咸淡和咸咸处理累计入渗量到达 12 cm 的时间比淡淡处理减少了 $3.0\% \sim 3.8\%$ 、 $6.8\% \sim 10.6\%$ 和 $11.6\% \sim 14.3\%$ 。生物炭施用影响了累计入渗量与时间的关系,完成入渗历时随着生物炭的添加而减少。相同轮灌方式下,与 0 t/hm^2 处理相比, 15 、 30 t/hm^2 入渗历时分别减少了 $27.2\% \sim 31.7\%$ 和 $25.0\% \sim 28.6\%$ 。

理的人渗速率较淡淡处理有所提高,在 10 min 时,增加了 $19.9\% \sim 40.6\%$,在 100 min 时,增加了 $16.4\% \sim 28.0\%$ 。咸淡处理有利于提高整个过程的人渗速率,入渗速率增幅在前期灌溉微咸水时较明显,转换为淡水后,增幅有所降低。在 10 min 时,咸淡处理的人渗速率比淡淡处理增加了 $16.4\% \sim 46.9\%$,在 100 min 时,增加了 $8.2\% \sim 18.0\%$ 。淡咸处理在转换为咸水灌溉后,入渗速率有所增加,在 100 min 时,入渗速率比淡淡处理增加了 $5.9\% \sim 10.0\%$ 。生物炭有助于增加咸淡轮灌时土壤入渗速率,相同轮灌方式下,在 10 min 时, 15 t/hm^2 处理的人渗速率较 0 t/hm^2 处理增加了 $3.5\% \sim 19.1\%$, 30 t/hm^2 处理增加了 $5.5\% \sim 10.3\%$;在 100 min 时, 15 、 30 t/hm^2 处理的人渗速率较 0 t/hm^2 分别增加了

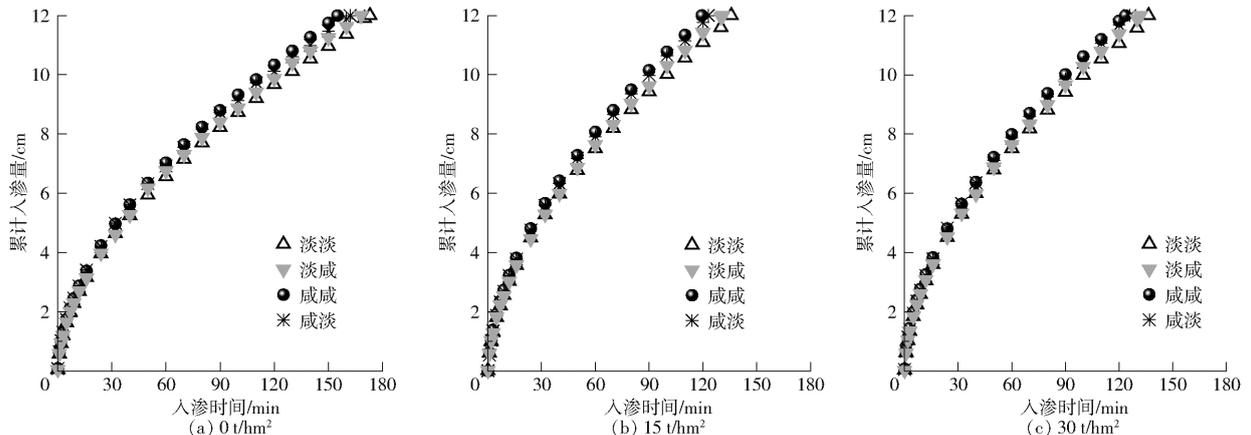


图3 咸淡轮灌和生物炭添加下累计入渗量随时间的变化曲线

Fig. 3 Changing curves of cumulative infiltration with time under cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar application

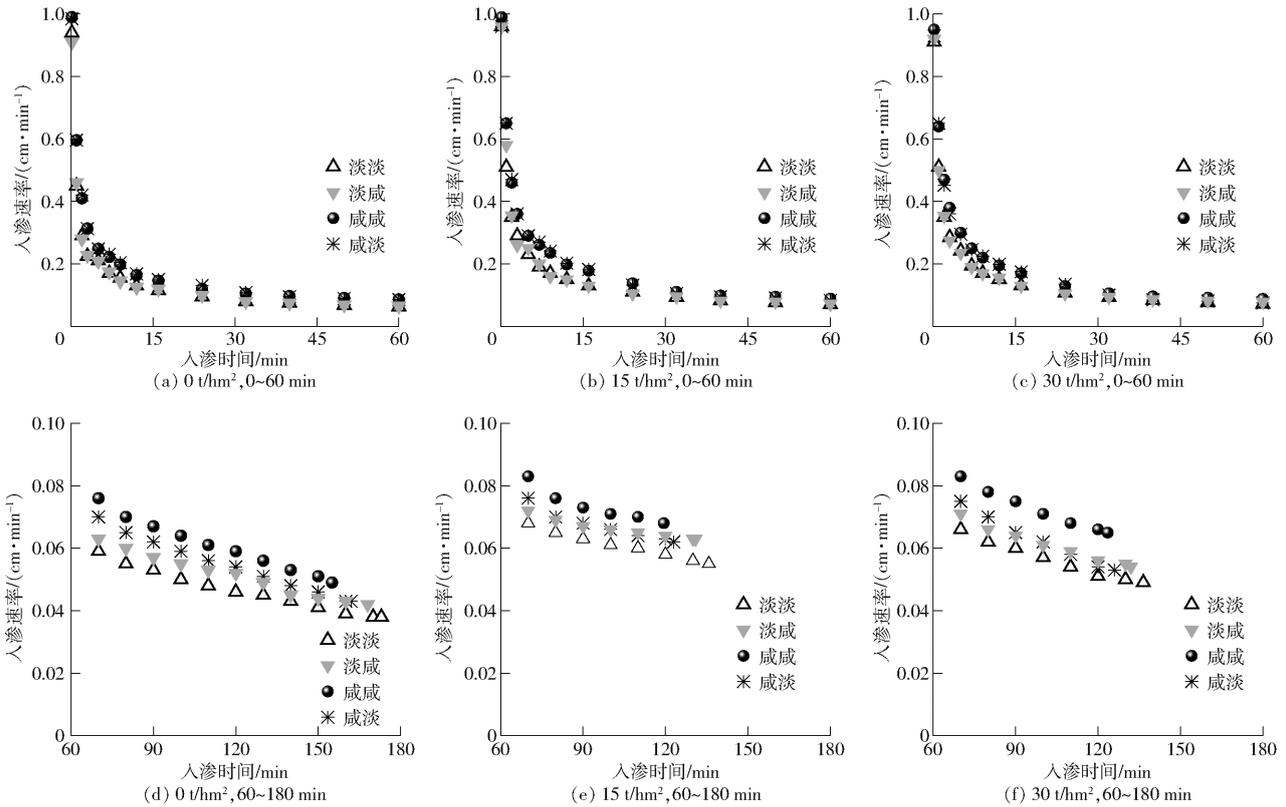


图4 咸淡轮灌和生物炭添加下入渗速率随时间的变化曲线

Fig. 4 Changes curves of infiltration rate with time under cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar application

10.9% ~ 22.0% 和 5.1% ~ 14.0%。

Kostiakov 模型对入渗速率的拟合结果如表3所示,拟合决定系数 R^2 均达到 0.9 以上, RMSE 在 0.031 ~ 0.097 cm/min 之间,说明在咸淡轮灌和生物炭添加下,入渗速率与时间存在良好的幂函数关系。相同生物炭添加量下,初始入渗水质对入渗系数

K 的影响较明显,淡淡与淡咸处理的 K 相似,而咸淡与咸咸处理的 K 相似,较淡淡和淡咸处理增加了 13.9% ~ 24.0%。相同轮灌方式下,15、30 t/hm² 处理的入渗系数 K 较 0 t/hm² 分别提升了 10.1% ~ 16.8% 和 8.3% ~ 16.0%,入渗指数 n 分别减少了 4.2% ~ 8.0% 和 3.4% ~ 6.3%。

图5为咸淡轮灌和生物炭添加下,入渗结束时土壤剖面含水率的分布。微咸水的使用略微增加了 0 ~ 25 cm 剖面的土壤含水率。相同生物炭添加量下,淡咸、咸淡、咸咸处理的 0 ~ 25 cm 平均含水率比淡淡处理高 0.2% ~ 0.5%、0.7% ~ 2.8%、1.2% ~ 3.7%。生物炭也提高了滨海盐渍土含水率,且随着添加量的增大而增加。相同轮灌方式下,15、30 t/hm² 处理的 0 ~ 25 cm 平均含水率较 0 t/hm² 处理分别提高了 7.6% ~ 9.6% 和 10.9% ~ 11.9%。

2.2 咸淡轮灌和生物炭对盐分淋洗的影响

图6为咸淡轮灌和生物炭添加下,入渗结束时土壤剖面含盐量的分布。淡淡处理的土壤含盐量最小,咸咸处理最大,咸淡轮灌则介于两者之间,淡咸处理的 25 cm 以下土壤含盐量较低,咸淡处理的 0 ~ 25 cm 土壤含盐量较低。相同生物炭添加量下,淡咸、咸淡、咸咸处理的平均土壤含盐量比淡淡处理高 37.9% ~ 43.9%、26.3% ~ 29.4%、66.2% ~ 72.3%,其中 0 ~ 25 cm 平均土壤含盐量分别增加了 83.0% ~ 118.7%、

表3 咸淡轮灌和生物炭添加下土壤入渗速率的

Kostiakov 模型拟合结果

Tab. 3 Kostiakov model result of soil infiltration rate under cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar application

| 生物炭添加量/ (t·hm ⁻²) | 拟合系数 | 淡淡 | 淡咸 | 咸淡 | 咸咸 |
|----------------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 处理 | 处理 | 处理 | 处理 |
| 0 | K | 0.416 | 0.412 | 0.507 | 0.511 |
| | n | 0.476 | 0.469 | 0.481 | 0.464 |
| | R^2 | 0.916 | 0.927 | 0.901 | 0.958 |
| | RMSE/(cm·min ⁻¹) | 0.031 | 0.052 | 0.033 | 0.058 |
| 15 | K | 0.479 | 0.481 | 0.558 | 0.565 |
| | n | 0.456 | 0.432 | 0.448 | 0.427 |
| | R^2 | 0.923 | 0.963 | 0.915 | 0.936 |
| | RMSE/(cm·min ⁻¹) | 0.031 | 0.074 | 0.043 | 0.083 |
| 30 | K | 0.482 | 0.478 | 0.549 | 0.561 |
| | n | 0.460 | 0.441 | 0.452 | 0.435 |
| | R^2 | 0.947 | 0.901 | 0.912 | 0.917 |
| | RMSE/(cm·min ⁻¹) | 0.036 | 0.075 | 0.032 | 0.097 |

14.9% ~ 19.1%、98.1% ~ 148.9%。生物炭施用可减少入渗后土壤含盐量,但随生物炭添加量增加土壤含盐量有所升高。相同轮灌方式下,15、30 t/hm²处理的平均土壤含盐量较 0 t/hm²处理分别降低了 0.6% ~

4.6% 和 1.1% ~ 2.6%。生物炭还有效促进了咸淡轮灌对 0 ~ 25 cm 土壤盐分的淋洗,15、30 t/hm²处理的 0 ~ 25 cm 平均土壤含盐量较 0 t/hm²分别降低了 25.0% ~ 25.3% 和 20.3% ~ 22.7%。

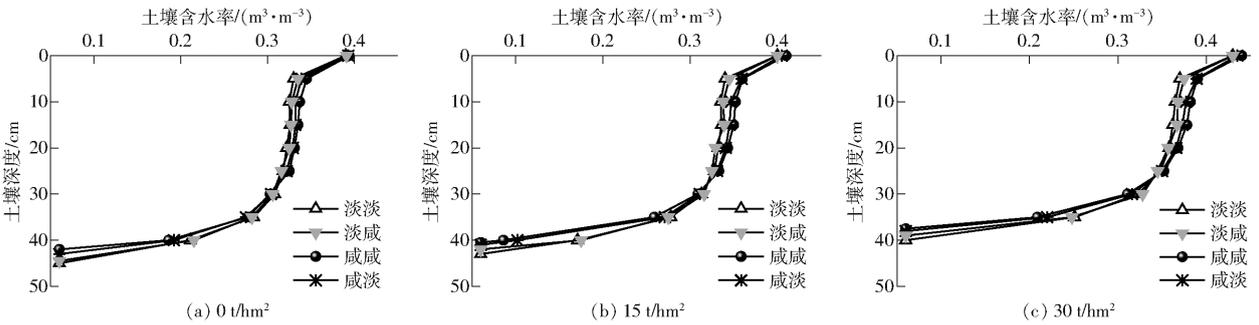


图 5 咸淡轮灌和生物炭添加下土壤剖面含水率分布

Fig. 5 Soil water content distributions in soil profile under cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar application

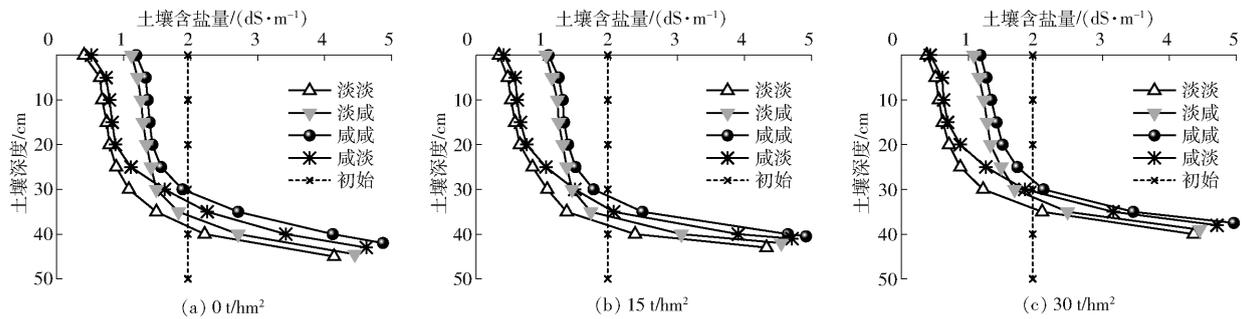


图 6 咸淡轮灌和生物炭添加下土壤剖面含盐量分布

Fig. 6 Soil salinity distributions in soil profile under cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar application

图 7 为咸淡轮灌和生物炭添加下,入渗结束时土壤剖面脱盐率分布。咸淡轮灌相比于持续微咸水灌溉提高了脱盐率,咸淡处理较淡咸处理的平均脱盐率更大,在 0 ~ 25 cm 土层脱盐率较高,而淡咸处理在 25 cm 以下的土层脱盐率较高。相同生物炭添

加量下,淡咸、咸淡、咸咸处理的平均土壤脱盐率比淡淡处理低 46.4% ~ 52.4%、6.5% ~ 18.9%、52.0% ~ 59.6%。生物炭提高了咸淡轮灌下滨海盐渍土脱盐效率,15、30 t/hm²处理的平均土壤脱盐率较 0 t/hm²增加了 9.4% ~ 15.0% 和 9.1% ~ 13.7%。

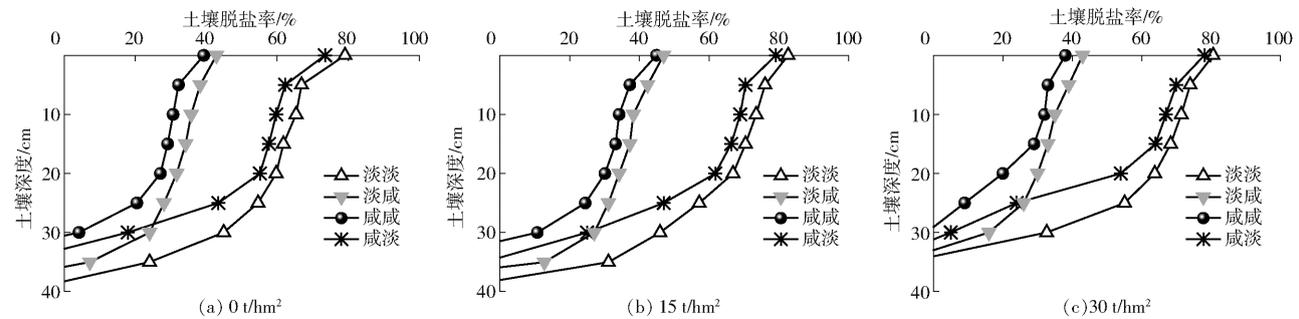


图 7 咸淡轮灌和生物炭添加下土壤剖面脱盐率分布

Fig. 7 Desalination rate of soil profile under cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar application

表 4 为咸淡轮灌和生物炭添加下的土壤剖面脱盐区深度系数。咸淡轮灌提高了脱盐区深度系数,淡咸处理较咸淡处理脱盐区深度系数更大。相同生物炭添加量下,淡咸、咸淡、咸咸处理的脱盐区深度系数较淡淡处理降低了 3.3% ~ 6.7%、6.8% ~ 11.5%、13.1% ~ 16.2%。生物炭可以提升土壤剖面脱盐区深度系数,相同轮灌方式下,15、30 t/hm²处理的脱盐区深度系数较 0 t/hm²分别增加了 4.4% ~

表 4 咸淡轮灌和生物炭添加下土壤剖面脱盐区深度系数

Tab. 4 Soil desalinization depth coefficient under cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar application

| 生物炭添加量/ (t·hm ⁻²) | 淡淡处理 | 淡咸处理 | 咸淡处理 | 咸咸处理 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 0 | 0.866 7 | 0.809 0 | 0.767 4 | 0.726 2 |
| 15 | 0.907 0 | 0.857 1 | 0.823 7 | 0.784 8 |
| 30 | 0.875 0 | 0.846 2 | 0.815 8 | 0.746 7 |

7.5% 和 1.1% ~ 5.9%。

图8为咸淡轮灌和生物炭添加下,入渗结束时土壤剖面 Na^+ 含量分布。不同灌溉方式均对滨海盐渍土 Na^+ 有一定的淋洗作用,尤其是在0~25 cm土层, Na^+ 含量明显小于初始水平。咸淡轮灌相比于持续微咸水灌溉更有利于淋洗 Na^+ ,相同生物炭添

加量下,淡咸、咸淡、咸咸处理的0~25 cm土层 Na^+ 含量较淡淡处理增加了89.8%~129.5%、35.1%~46.2%、136.5%~212.5%。生物炭添加进一步促进了 Na^+ 淋洗,相同轮灌方式下,15、30 t/hm²处理0~25 cm Na^+ 含量较0 t/hm²分别减少了44.2%~78.3%和24.3%~64.3%。

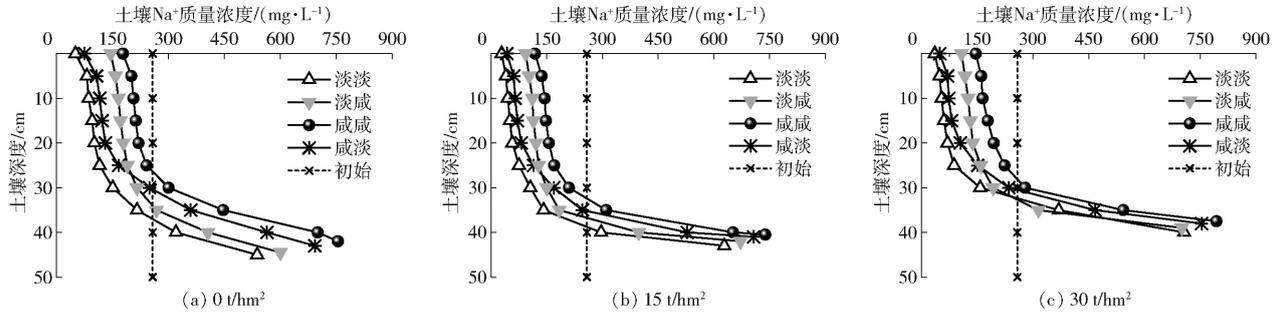


图8 咸淡轮灌和生物炭添加下土壤剖面 Na^+ 含量分布

Fig. 8 Soil Na^+ content of soil profile under cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar application

咸淡轮灌和生物炭添加下土壤 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量如图9所示。淡淡和咸淡处理对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 有所淋洗,0~25 cm土层 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量较低,而咸咸和淡咸处理增加了0~25 cm土层 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量。相同生物炭下,淡咸、咸淡、咸咸处理的0~25 cm土层 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量较淡淡处理增

加了43.0%~71.8%、8.0%~13.9%、50.1%~86.1%。此外,生物炭提高了土壤剖面 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量,且随着添加量的增加而增加。相同轮灌方式下,15、30 t/hm²处理的0~25 cm土层 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量较0 t/hm²增加了24.1%~28.9%和35.9%~40.0%。

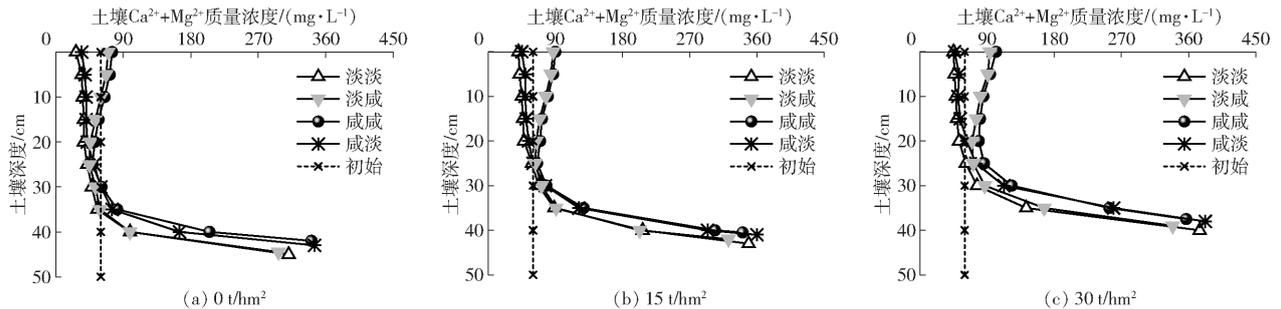


图9 咸淡轮灌和生物炭添加下土壤剖面 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量分布

Fig. 9 Soil Ca^{2+} and Mg^{2+} contents of soil profile under cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar application

3 讨论

3.1 咸淡轮灌对滨海盐渍土水盐运移的影响

随着淡水资源日渐短缺,利用微咸水进行盐渍土改良成为了重要途径^[22]。微咸水资源在不同类型的盐渍土淋洗治理中已有报道,微咸水用于盐渍土时,可促进离子交换淋洗,改善土壤结构和渗透性能,起到一定改良效果^[23]。本试验中,微咸水灌溉能够促进滨海盐渍土入渗性能,相较于淡淡处理,淡咸、咸淡、咸咸处理增加了入渗过程中的湿润锋距离、累计入渗量和入渗速率,这与王全九等^[24]的研究结果一致。随着微咸水灌溉,土壤溶液盐分浓度升高,扩散双电子层向粘粒表面压缩,土壤颗粒间排斥力减小,加强了土壤胶体的絮凝作用,促进了团粒结构,使土体导水性增加^[25]。同时,供试微咸水的

钠吸附比较低,有利于维持和改善滨海盐渍土团聚体及孔隙结构,促进水分入渗^[24]。咸淡轮灌下,初始水质对滨海盐渍土水分运动起决定性作用,咸淡处理的入渗特性接近于咸咸处理,淡咸处理与淡淡处理相似。先咸后淡相比先淡后咸完成入渗历时更短,这可能是因为初始阶段微咸水入渗已经改变了土壤结构,提高了整个过程中土壤入渗能力,而淡咸处理仅在转换为微咸水灌溉后,入渗性能有所增加。通过Kostiakov模型模拟发现,咸淡和咸咸处理入渗系数 K 明显大于淡咸和淡淡处理。入渗系数 K 表示入渗初始阶段中非饱和土壤达到相对稳定时的入渗速度,初始入渗水质使用微咸水,增加了初始入渗速度,有利于促进滨海盐渍土水分运移。此外,淡咸、咸淡、咸咸处理的最终湿润锋距离略低于淡淡处理,同时0~25 cm土壤剖面含水率有所增加,这可

能与微咸水入渗改变了土壤孔隙结构并影响了土壤持水性相关。吴忠东^[26]报道了相似的结论,采用微咸水有利于改善土壤持水性能,提高灌溉结束后的土壤含水率。咸淡处理较淡咸处理对于提高土壤含水率效果更佳,这与赵连东^[23]的研究结论一致。初始阶段采用微咸水入渗,能够尽早实现微咸水对于土壤水分运移的增益效果,更有利于滨海盐渍土的水分入渗和土壤含水率保持。就土壤盐分而言,不同处理0~25 cm土层的含盐量均低于初始值,说明3 g/L微咸水可用于滨海盐渍土的灌溉淋洗。相比持续微咸水灌溉,咸淡轮灌进一步提高了盐分淋洗效果,土壤含盐量减小而脱盐率和脱盐区深度系数增大。脱盐区内,咸淡处理较淡咸处理的平均脱盐率更大,但土壤剖面脱盐情况各不相同,初始水质主要影响了25 cm以下的土壤含盐量分布,轮换后的水质对0~25 cm土层含盐量存在明显作用,这与刘静妍等^[27]的研究结果一致。先咸后淡有利于淋洗上层土壤盐分,在0~25 cm土层脱盐率较高,接近于淡水处理,而先淡后咸有助于盐分向深层土壤运移,在25 cm以下的土层脱盐率较高,脱盐区深度系数更大。同时,由于供试微咸水中含有一定量 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,咸淡轮灌改善了滨海盐渍土阳离子分布状况,提高了0~25 cm土壤中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量并减少了 Na^{+} 含量,降低了碱化程度。因此,咸淡轮灌是适宜于滨海盐碱地的微咸水利用方法。

3.2 生物炭对滨海盐渍土水盐运移的影响

生物炭添加后,不同咸淡轮灌处理的湿润锋进程加快,完成入渗历时减少,入渗速率提高。可见,生物炭促进了滨海盐渍土水分运移,主要原因是生物炭拥有较大的比表面积和良好的吸附性能,有利于团聚体形成,改善土壤孔隙结构,进而增强水分入渗性能^[28]。同时,生物炭能够丰富盐渍土离子种类,增加 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量,促进 Na^{+} 的淋洗,有助于土壤结构的提升^[19]。Kostiakov模型模拟结果表明,生物炭提高了相同灌溉处理下入渗系数 K 并减小了入渗指数 n 。入渗指数 n 表征土壤水分入渗能力的衰减程度, n 越大说明入渗速度随时间减小越快。生物炭的添加促进了初始入渗阶段的入渗速度并减缓了入渗能力衰退。然而,随着添加量增加,入渗系数 K 略微减小,入渗指数 n 有所增加,30 t/hm²处理的土壤入渗性能并不优于15 t/hm²处理。方圆^[29]也报道了过量生物炭可抑制土壤入渗特性的相关结果,其原因可能是所用生物炭呈细颗粒粉末状,当施用量过大时,反而容易堵塞土壤水分运移通道,造成水分运动受阻。已有研究发现,生物炭对土

壤水分运移的影响还与其结构特性、粒径及土壤质地等因素密切相关^[15,28]。本试验中,施用生物炭改良滨海盐渍土时,添加量不宜过高,否则不会促进土壤水分入渗甚至造成不良影响。此外,生物炭减少了相同入渗定额下湿润锋的最终距离,这可能与其提高了滨海盐渍土持水能力有关。生物炭添加也有效增加了滨海盐渍土含水率,且随着添加量的增大而增加。生物炭在制作过程中可形成微孔结构,自身比表面积大,添加生物炭后,可增强土壤对入渗水分的吸附性,吸持更多的水分在土壤中^[30]。同时,生物炭添加有利于促进滨海盐渍土团聚结构的形成,增加土壤有效孔隙比例,从而达到提升土壤含水率的效果^[16]。根据土壤含盐量分布,生物炭促进了咸淡轮灌下滨海盐渍土的盐分淋洗效果,提高了脱盐率和脱盐区深度系数,但随着生物炭添加量增加淋洗效果有所下降。生物炭对土壤盐分的影响可能与其对滨海盐渍土水分运移特性的改变以及自身携带的可溶性盐分离子相关。一方面,生物炭的添加改变了土壤入渗能力,有利于盐渍土盐分淋洗^[31];另一方面,生物炭本身包含 K^{+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等可溶性盐分离子,在添加量过大时,反而增加了土壤含盐量。生物炭在缓解土壤碱化程度上效果明显,有效促进了 Na^{+} 淋洗。 Na^{+} 含量过高可引起土壤颗粒崩解、结构退化、生产力降低等危害^[32],是限制滨海地区盐渍土地资源利用的主要因素。生物炭的多孔结构和高比表面积加强了土壤的阳离子交换能力,配合自身携带的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,有利于交换出土壤胶体上的 Na^{+} ,促进 Na^{+} 随水分向下运移,进而降低其不良影响^[33]。综上所述,咸淡轮灌配合生物炭施用促进了滨海盐渍土水分运移特性并改善了盐碱化程度,有利于滨海地区微咸水和盐渍土这类边缘资源的合理开发。考虑生物炭施用效果和成本投入,推荐添加量为15 t/hm²,但仍需进一步研究以完善不同盐渍农业环境下适宜的生物炭改良剂产品和施用规范。

4 结论

(1)微咸水可促进滨海盐渍土的入渗性能,增加相同时间内的湿润锋距离、累计入渗量,并小幅提高含水率。初始水质对水分运动影响较大,先咸后淡的入渗特性和水分分布与微咸水灌溉相似,而先淡后咸则接近于淡水灌溉,先咸后淡更有利于水分入渗和提高土壤含水率。

(2)生物炭提高了咸淡轮灌下滨海盐渍土的入渗性能和持水能力,增加相同时间内的湿润锋推进距离、累计入渗量、入渗速率以及入渗结束后的土壤

含水率,生物炭添加量为 15 t/hm^2 对水分运动的提升效果最佳,当添加量达到 30 t/hm^2 ,入渗性能较 15 t/hm^2 有略微下降。

(3) 咸淡水轮灌有利于盐分淋洗,土壤含盐量和阳离子含量低于微咸水灌溉,脱盐率和脱盐区深度系数更高。初始入渗水质影响了土壤剖面盐分分布,先咸后淡能促进 $0 \sim 25 \text{ cm}$ 土层的盐分淋洗,增加脱盐率,而先淡后咸则有利于淋洗 25 cm 以下的土层盐分,提高脱盐区深度系数。

(4) 添加生物炭降低了咸淡水轮灌下的土壤含盐量,提高了脱盐率和脱盐区深度系数,并增加了 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量,促进了 Na^+ 淋洗效果,进而缓解了土壤盐碱化的风险。当添加至 30 t/hm^2 时,随着入渗性能增益的减弱,生物炭中可溶性离子增加,削弱了盐分淋洗效果。

(5) 咸淡水轮灌配合 15 t/hm^2 生物炭施用有利于滨海盐渍土水盐运移,可为滨海地区盐渍土和微咸水资源开发提供参考。

参 考 文 献

- [1] 朱成立,强超,黄明逸,等. 咸淡水交替灌溉对滨海垦区夏玉米生理生长的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 253 - 261.
ZHU Chengli, QIANG Chao, HUANG Mingyi, et al. Effect of cycle irrigation with fresh and slight saline water on physiological growth of summer maize in coastal reclamation area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 253 - 261. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181231&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.031. (in Chinese)
- [2] YAO R J, WANG X, ZHANG T J, et al. Studies on soil water and salt balances and scenarios simulation using SaltMod in a coastal reclaimed farming area of eastern China [J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 115 - 123.
- [3] YAO R J, YANG J S, ZHANG T J, et al. Short-term effect of cultivation and crop rotation systems on soil quality indicators in a coastal newly reclaimed farming area [J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(8): 1335 - 1350.
- [4] 朱成立,吕雯,黄明逸,等. 生物炭对咸淡水轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 226 - 234.
ZHU Chengli, LÜ Wen, HUANG Mingyi, et al. Effects of biochar on coastal reclaimed soil salinity distribution and maize growth with cycle fresh and saline water irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 226 - 234. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190125&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.025. (in Chinese)
- [5] 杨艳,王全九. 微咸水入渗条件下碱土和盐土水盐运移特征分析 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 13 - 19.
YANG Yan, WANG Quanjiu. Analysis water and salt transport characteristic of irrigation with saline water on alkaline and saline soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 13 - 19. (in Chinese)
- [6] 戴继航,张金龙,李婧男,等. 咸水淋洗改良滨海盐渍土的潜力研究 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 250 - 253.
DAI Jihang, ZHANG Jinlong, LI Jingnan, et al. Leaching potential of salt water in coastal saline soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 250 - 253. (in Chinese)
- [7] 王艳,吴勇,廉晓娟,等. 不同矿化度水淋洗重度盐碱土的水盐运移特征 [J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(4): 39 - 43.
WANG Yan, WU Yong, LIAN Xiaojuan, et al. Water and salt transporting feature of soil with different degree mineralization of water leaching severe saline-alkali soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(4): 39 - 43. (in Chinese)
- [8] 唐胜强,余冬立. 灌溉水质对土壤饱和和导水率和入渗特性的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 108 - 114.
TANG Shengqiang, SHE Dongli. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 108 - 114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161015&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.015. (in Chinese)
- [9] 王全九,许紫月,单鱼洋,等. 磁化微咸水矿化度对土壤水盐运移的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 198 - 206.
WANG Quanjiu, XU Ziyue, SHAN Yuyang, et al. Effect of salinity of magnetized brackish water on salt and water movement [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 198 - 206. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170725&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.025. (in Chinese)
- [10] HUANG M Y, ZHANG Z Y, SHENG Z P, et al. Effect on soil properties and maize growth by cycle irrigation with brackish water [J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(2): 485 - 493.
- [11] 管孝艳,杨培岭,吕焯. 咸淡水交替灌溉下土壤盐分再分布规律的室内实验研究 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 88 - 91.
GUAN Xiaoyan, YANG Peiling, LÜ Ye. Laboratory experiment on the redistribution of soil salinity under saline and fresh water cycle irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 88 - 91. (in Chinese)
- [12] 米迎宾,屈明,杨劲松,等. 咸淡水轮灌对土壤盐分和作物产量的影响研究 [J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 83 - 86.
MI Yingbin, QU Ming, YANG Jingsong, et al. Effects of rotational irrigation with saline water on soil salinity and crop yield [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6): 83 - 86. (in Chinese)
- [13] 闫冰,周智彬,刘凤山,等. 咸淡水轮灌条件下塔里木河上游绿洲土壤入渗特性 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 238 - 242.
YAN Bing, ZHOU Zhibin, LIU Fengshan, et al. Infiltration properties of soil in the oasis of upper tarim river under cycle irrigation of fresh and saline water [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 238 - 242. (in Chinese)
- [14] 朱瑾瑾,孙军娜,张振华,等. 咸淡水交替灌溉对滨海盐碱土水盐运移的影响 [J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 113 - 117, 122.
ZHU Jinjin, SUN Junna, ZHANG Zhenhua, et al. Effects of cycle irrigation with brackish and fresh water on water and salt movement in coastal saline soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 113 - 117, 122. (in Chinese)
- [15] 魏永霞,王鹤,刘慧,等. 生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 290 - 299.

- WEI Yongxia, WANG He, LIU Hui, et al. Effect of biochar on soil moisture and its infiltration performance in black soil area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 290 - 299. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190934&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.034. (in Chinese)
- [16] BLANCO-CANQUI H. Biochar and soil physical properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(4): 687 - 711.
- [17] 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 1 - 12. GOU Mangmang, QU Zhongyi, WANG Fan, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 1 - 12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180701&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.001. (in Chinese)
- [18] 孙泉沁, 房凯, 费远航, 等. 施加生物炭对盐渍土土壤结构和水力特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 242 - 249. SUN Xiaoqin, FANG Kai, FEI Yuanhang, et al. Structure and hydraulic characteristics of saline soil improved by applying biochar based on micro-CT scanning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 242 - 249. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190227&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.027. (in Chinese)
- [19] CHAGANTI V N, CROHN D M. Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water [J]. Geoderma, 2015, 259 - 260: 45 - 55.
- [20] LASHARI M S, LIU Y, LI L, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroigneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain [J]. Field Crops Research, 2013, 144: 113 - 118.
- [21] 李文雪. 生物炭添加对盐碱土水气传导的影响 [D]. 烟台: 鲁东大学, 2018. LI Wenxue. Effect of biochar addition into saline soil on hydraulic conductivity and air permeability [D]. Yantai: Ludong University, 2018. (in Chinese)
- [22] 孙宏勇, 刘小京, 张喜英. 盐碱地水盐调控研究 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1528 - 1536. SUN Hongyong, LIU Xiaojing, ZHANG Xiying. Regulations of salt and water of saline-alkali soil: a review [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1528 - 1536. (in Chinese)
- [23] 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. ZHAO Liandong. Experimental study on water and salt distribution and improvement effect of saline alkali soil under combined brackish and fresh water irrigation [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [24] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 122 - 131. WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 122 - 131. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151217&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.017. (in Chinese)
- [25] 刘春成, 李毅, 郭丽俊, 等. 微咸水灌溉对斥水土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 39 - 45. LIU Chuncheng, LI Yi, GUO Lijun, et al. Effect of brackish water irrigation on water and salt movement in repellent soils [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 39 - 45. (in Chinese)
- [26] 吴忠东. 微咸水畦灌对土壤水盐分布特征和冬小麦产量影响研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2008. WU Zhongdong. Study on the effect of soil water and salt distribution characteristics and winter wheat yield by saline water border irrigation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [27] 刘静妍, 毕远杰, 孙西欢, 等. 交替供水条件下土壤入渗特性与水盐分布特征研究 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(4): 55 - 60. LIU Jingyan, BI Yuanjie, SUN Xihuan, et al. Characteristics of soil infiltration and water-salt distribution under alternate irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(4): 55 - 60. (in Chinese)
- [28] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2281 - 2288. QI Ruipeng, ZHANG Lei, YAN Yonghao, et al. Effects of biochar addition into soils in semiarid land on water infiltration under the condition of the same bulk density [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8): 2281 - 2288. (in Chinese)
- [29] 方圆. 增施活性炭对土壤特性及春玉米生长的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. FANG Yuan. Effects of active carbon application on soil characteristics and growth of spring maize [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- [30] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 113 - 119. WANG Yanyang, WEI Yongxia, SUN Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 113 - 119. (in Chinese)
- [31] LASHARI M S, YE Y, JI H, et al. Biochar-manure compost in conjunction with pyroigneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: a 2-year field experiment [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1321 - 1327.
- [32] 吴忠东, 王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2008(1): 231 - 236. WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Study on impact of sodium adsorption ratio of saline water on soil physical and chemical properties and infiltration characteristics [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008(1): 231 - 236. (in Chinese)
- [33] 周文志, 孙向阳, 李素艳, 等. 生物炭和园林废弃物堆肥对滨海盐碱土淋溶的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 23 - 30. ZHOU Wenzhi, SUN Xiangyang, LI Suyan, et al. Effects of adding biochar and compost on the leaching of coastal saline-alkali soil [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(3): 23 - 30. (in Chinese)