

DOI: 10.11766/trxb202004090037

田宇, 陈环宇, 郭凯, 李劲松, 李伟柳, 封晓辉, 李静, 刘小京. 不同咸水梯次滨海盐土入渗过程及水盐分布特征[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 911–920.

TIAN Yu, CHEN Huanyu, GUO Kai, LI Jingsong, LI Weiliu, FENG Xiaohui, LI Jing, LIU Xiaojing. Saline Water Infiltration Process and Water-salt Distributions in Coastal Saline Soil Relative to Concentration of the Saline Water[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 911–920.

不同咸水梯次滨海盐土入渗过程及水盐分布特征*

田宇^{1,2}, 陈环宇^{1,2}, 郭凯^{1,2†}, 李劲松^{1,2}, 李伟柳^{1,2}, 封晓辉^{1,2}, 李静^{1,2}, 刘小京^{1,2}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省土壤生态学重点实验室, 石家庄 050021; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 咸水冰融化入渗对重盐碱地具有明显的改良作用, 而咸水冰融化是融水水质和水量的动态变化过程。为模拟咸水冰融化入渗滨海盐土过程, 探讨咸水灌溉改良盐碱地的可行性, 本研究设置了不同咸水梯次入渗滨海盐土的土柱试验, 试验处理为: 咸水梯次入渗 (GSI)、咸水单一入渗 (DSI) 和咸水冰融化入渗 (MSI), 以淡水入渗 (CK) 为对照; 其中咸水矿化度和水量分别为 15 g·L⁻¹ 和 314.3 mm。根据咸水冰融化过程中融水水质和水量的变化过程, GSI 设置了 4 个矿化度和水量 (S1: 81 g·L⁻¹ 和 25 mm; S2: 19 g·L⁻¹ 和 125.8 mm; S3: 3 g·L⁻¹ 和 94.3 mm; S4: 0 g·L⁻¹ 和 69.2 mm) 的咸水连续入渗。结果表明: 相同时间内, 咸水处理的入渗深度和速度均大于 CK; 入渗初期, GSI 的入渗深度和速率均高于 DSI, 且上一梯次咸水的入渗能显著提高下一梯次咸水的入渗率, 后期 GSI 处理随着入渗咸水矿化度的降低, 入渗率显著低于 DSI。入渗后, 0~40 cm 土层土壤水盐含量由大到小依次为 DSI>GSI>MSI, GSI 和 MSI 土壤水盐分布一致, 脱盐率分别为 92.87% 和 91.38%, 显著大于 DSI 的 74.74%。以上结果明确了不同咸水梯次入渗滨海盐土的入渗特征, 咸水梯次入渗可获得与咸水冰融化入渗一致的脱盐效果, 这为后续模拟咸水冰融水入渗盐碱土过程提供了手段, 同时也为咸淡水轮灌技术提供了理论依据。

关键词: 滨海盐土; 咸水梯次入渗; 入渗过程; 土壤水盐分布

中图分类号: S153.5; S156.49 **文献标志码:** A

Saline Water Infiltration Process and Water-salt Distributions in Coastal Saline Soil Relative to Concentration of the Saline Water

TIAN Yu^{1,2}, CHEN Huanyu^{1,2}, GUO Kai^{1,2†}, LI Jingsong^{1,2}, LI Weiliu^{1,2}, FENG Xiaohui^{1,2}, LI Jing^{1,2}, LIU Xiaojing^{1,2}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources of Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Soil Ecology, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* 国家自然科学基金项目 (51809260) 和国家重点研发课题 (2016YFC0501308) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51809260) and National Key Research and Development Program of China (No.2016YFC0501308)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: guokai@sjziam.ac.cn

作者简介: 田宇, 男, 硕士研究生, 主要从事盐碱区咸水利用研究。E-mail: 312164451@qq.com

收稿日期: 2020-04-09; 收到修改稿日期: 2020-08-27; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-09-10

Abstract: To irrigate fields of heavily salinized-alkalinized soil with water from melting saline ice is found to have an apparent soil ameliorating effect. Melting of saline ice is a dynamic process of meltwater in quality and quantity. To explore feasibilities of using saline water to irrigate fields of saline soil for soil amelioration, in this paper an experiment was designed to simulate infiltration process of water from melting saline ice into coastal saline soil. A soil column experiment was conducted in this study. The experiment was designed to have three treatments and a CK, i.e. gradient saline water infiltration (GSI), mere saline water infiltration (DSI), melting saline ice infiltration (MSI) and fresh water infiltration as control (CK). The saline water used in the experiment was set to be $15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ in salinity and 314.3 mm in volume. Besides, according to the variation of meltwater in salinity and volume during the melting process of saline ice, four batches of infiltration were designed for Treatment GSI, with melted water different in salinity and volume ($81 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $19 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 25 mm, 125.8 mm, 94.3 mm and 69.2 mm, respectively, for S1, S2, S3 and S4). The four batches of water were charged one after another when the previous batch totally infiltrated. Results show that infiltrating water went down deeper and faster in all the three treatments than in CK within the same time period, and in Treatment GSI than in Treatment DSI during the initial infiltration stage. In Treatment DSI, each batch infiltration significantly increased the next batch in infiltration rate for the first two batches, but for the last two, Treatment GSI fell significantly behind Treatment DSI in infiltration rate, owing to the lowering salinity of the infiltration water. At the end of the infiltration, the treatments were found following an order of $\text{DSI} > \text{GSI} > \text{MSI}$ in water and salt content in the 0~40 cm soil layer; Treatment GSI and Treatment MSI were quite similar in soil water and salt distribution and reached up to 92.87% and 91.38% respectively in desalinization rate, which were apparently higher than 74.74% in Treatment DSI. The above findings have made clear the characteristics of the infiltration of saline water varying in salinity in coastal saline soil, and batch infiltration of saline water had an effect similar to that of infiltration of melting saline ice on desalinization, which provides an useful means to simulate infiltration process of meltwater, changing in salinity and volume with the saline ice melting, and a theoretical basis for the technology of irrigating saline soil with saline and fresh water alternative.

Key words: Coastal saline soil; Gradient saline water infiltration; Infiltration process; Soil water and salt distribution

环渤海地区是我国滨海盐土主要分布区域^[1], 土壤盐碱化、地下水位浅且矿化度高、土地利用率低和生态环境差是该地区面临的主要问题^[2]。由于淡水资源不足, 严重限制了该地区土地利用、农业生产和生态环境建设^[3], 而丰富的地下咸水资源的利用日益重要^[4]。咸水利用和土壤水盐调控一直是国内外研究的热点, 针对咸水利用方式和技术等方面开展了大量的研究, 通过咸水直灌^[5], 咸淡水轮灌^[6], 咸淡水交替灌^[7-8]等灌溉方式, 结合喷灌、滴灌、漫灌、畦灌^[9-11]等灌溉技术, 在节约淡水的前提下, 尽量减少对土壤的不利影响, 创建适宜的根层土壤水盐条件, 以实现作物和植物的正常生长。

咸水利用下, 咸水和土壤胶体中离子间的交换吸附作用影响水分入渗特性, 因此咸水水质显著影响了水分入渗过程^[12]。大量研究表明: 相对于淡水, 咸水可显著促进水分入渗, 同时, 咸水入渗过程中土壤盐分的淋洗和累积交替进行, 咸水矿化度越高, 盐分在土壤中的累积也越多, 进而导致土壤次生盐渍化^[13-14]。有研究指出利用低于 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水进行灌溉比较适宜, 且不会造成土壤积盐^[15]。而如果咸

水矿化度过大, 则会造成土壤盐分累积, 仍然需要部分淡水进行淋洗。目前, 咸淡水交替灌溉是咸水利用的有效方式, 其中咸水入渗可显著改善土壤结构, 促进后续淡水的入渗淋盐^[16]。朱瑾瑾等^[17]研究表明: 利用 $9 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水和淡水轮流入渗可实现土壤盐分有效淋洗, 能够达到与相同水量淡水入渗相同的淋盐效果; Lin 等^[18]通过春季咸水直接灌溉, 结合夏季降雨, 可实现土壤盐分淋洗。

近年来, 笔者所在团队根据环渤海地区气候条件、土壤水盐运移规律和植物阶段性耐盐特征, 依据咸水结冰融化咸淡水分离原理, 发明了咸水结冰灌溉改良滨海重盐碱地技术^[19-20], 即利用当地高矿化度咸水, 在冬季进行灌溉, 灌溉咸水在冬季低温作用下在地表冻结成咸水冰; 春季咸水冰融化入渗过程中, 先融化的高浓度咸水先入渗, 后融化的低浓度咸水和淡水的入渗可实现土壤盐分有效淋洗。前期室内土柱模拟试验和田间试验结果均表明, 咸水冰融化入渗可达到较淡水冰融化入渗更好的淋盐效果^[21-22]。由于咸水冰的融化是水质水量连续变化的过程^[23-24], 利用以上融水入渗必然会导致其在土

壤中的入渗特性的变化。目前, 尚没有关于不同矿化度和不同水量咸水连续入渗滨海盐土的过程和入渗后水盐分布的研究。

因此, 本研究拟通过室内土柱模拟试验, 依据咸水冰融化过程中融水水质和水量的变化规律, 开展不同梯次咸水入渗滨海盐土过程及土壤水盐运移规律方面的研究, 以期为咸水冰融水入渗过程中不同阶段的入渗特性和水盐分布规律提供依据, 同时探讨咸水梯次灌溉改良滨海盐碱地的效果。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土样为取自河北省海兴县小山乡的滨海盐土, 按中国土壤分类为盐碱土, 经测定其中粉粒, 砂粒和黏粒分别占 82.44%, 1.88%和 15.68%。根据国际制土壤质地分级标准为粉砂质黏壤土。土壤经风干, 碾压, 过筛(孔径 1 mm)均匀混合制成室内土柱试验土样。经测定风干土壤的含水量为 2.42%,

含盐量为 36.40 g·kg⁻¹。试验用咸水以当地海盐和蒸馏水配制而成, 咸水矿化度和离子组成按所取的咸水水质, 由 MgCl₂ 和 CaSO₄ 调配。供试土样和咸水的离子成分见表 1。

1.2 试验装置

室内设置土柱模拟试验, 分析咸水梯次入渗滨海盐土过程和水盐分布情况。土柱采用有机玻璃材料制成, 内径为 9 cm, 高为 105 cm, 底部封底, 并在底部侧方开有直径为 5 mm 的排水口, 在距顶端 10 cm 以下, 每隔 5 cm 在土柱两侧开直径为 2 cm 的取样孔, 土柱填装和水分入渗过程中, 用橡胶塞堵住以防漏水; 按照容重为 1.42 g·cm⁻³ (取土当地表层土壤容重) 每 10 cm 一层填装土柱; 土柱填装完成后, 采用内径 7 cm, 高 50 cm 的马氏瓶供水, 定水头入渗滨海盐土; 土柱和马氏瓶侧面均贴有带刻度的塑料透明胶带, 入渗过程中, 定时记录湿润锋距离、马氏瓶水位的变化, 以分析入渗特性; 入渗完成后, 在取样口进行土壤取样, 分析不同咸水入渗后土壤水盐分布状况。

表 1 供试土样和咸水的离子组成

Table 1 Ions contents of the tested water and soil

	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺	全盐 Total salt
供试土样 Soil samples/ (g·kg ⁻¹)	-	0.21	19.22	3.32	0.55	1.31	11.79	36.40
咸水 Saline water/ (g·L ⁻¹)	-	1.54	6.73	1.34	0.20	0.55	4.64	15

1.3 试验过程与处理

本研究设置了三个不同咸水入渗处理, 包括咸水梯次入渗 (GSI)、咸水单一入渗 (DSI) 和咸水冰融化入渗 (MSI), 对照为淡水入渗 (CK)。其中咸水矿化度为 15 g·L⁻¹, 入渗水量为 314.3 mm。GSI 处理根据咸水冰融化过程中融水水质和水量的变化设置了不同咸水梯次, 具体方法为室内采用矿化度为 15g·L⁻¹、体积为 1 L 的咸水置于冷冻箱内, 在-18℃~-24℃下结冰, 后将其置于室温 (15℃), 使其自然融化, 每隔 1h 收集一次融水, 并测定其融水体积和矿化度, 依据融水矿化度和融水体积的变化, 设置 GSI 处理中不同咸水梯次。如图 1 所示, 融水的累积体积随矿化度的升高而后呈指数下降, 直至融化出淡水。依据融水累积体积和根据以上变化设置了 4 个矿化度和水量的咸水梯次包括梯次 1 (S1): 矿化度为 81 g·L⁻¹, 水量为 25 mm; 梯次 2 (S2): 矿

化度为 19 g·L⁻¹, 水量为 125.8 mm; 梯次 3 (S3): 矿化度为 3 g·L⁻¹, 水量为 94.3 mm; 梯次 4 (S4): 淡水, 水量为 69.2 mm。利用上述梯次水质和水量的咸水, 以马氏瓶供水 (定水头 2cm) 依次入渗滨海盐土, 待上一梯次咸水完全入渗后, 立即改换下一梯次咸水, 直至所有梯次咸水入渗完成; MSI 处理, 把配置好的咸水置于冷冻箱内 (-18℃~-24℃), 使其冷冻成咸水冰, 后将制备好的咸水冰置于土柱上方在室温条件下 (15℃) 使其自然融化入渗, 直至融水全部入渗结束。DSI 处理, 把配置好的矿化度为 15 g·L⁻¹, 入渗水量为 314.3 mm 的咸水, 以马氏瓶供水 (定水头 2 cm) 入渗滨海盐土, 直到入渗完成。CK 对照, 利用水量为 314.3 mm 的淡水, 利用马氏瓶供水 (定水头 2 cm) 入渗滨海盐土, 直至入渗停止, 以其他处理入渗完成为准。以上处理重复 3 次。

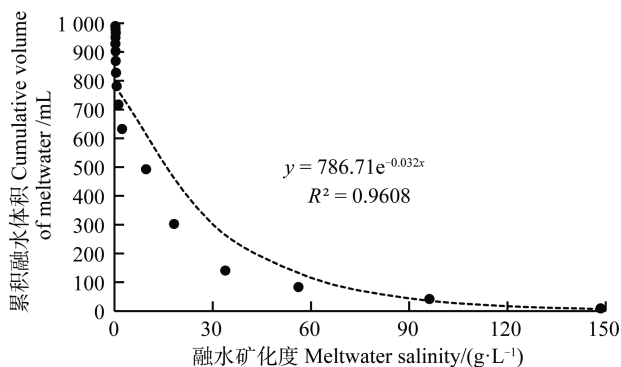


图1 咸水冰融化过程中融水矿化度和累积体积的关系

Fig. 1 Relationship between cumulative volume and salinity of meltwater during melting of saline ice

1.4 数据获取与分析

水分入渗过程中,通过土柱侧面带有刻度的胶带,定时记录各处理湿润锋迁移距离。此外,由于MSI处理中咸水冰融化入渗滨海盐土,是一个连续的过程,入渗过程中的累积入渗量、入渗率等参数不能定量监测,本文中针对GSI处理、CK处理和DSI处理的累积入渗量和入渗率等指标进行了测定,是通过分析GSI处理下的入渗指标及与其他处理的区别,初步明确MSI处理下入渗特性的变化规律。水分入渗过程中,按照先短后长的时间间隔定时观测马氏瓶水位,分析累积入渗量和入渗率。其中,入渗0~30 min时间段,每2 min观测一次;30~90 min时间段,每5 min观测一次;90~390 min时间段,每30 min观测一次;此后每1 h观测一次直至入渗结束。入渗完成后,从土表至湿润锋处依次在柱壁取样孔处取土,测定土壤水盐含量。采用烘干法测定土壤含水量。土样利用1:5的土/水比浸提后,测定土壤离子含量和含盐量,用双指示剂滴定法测定 HCO_3^- 含量,用 AgNO_3 滴定法测定 Cl^- 含量,用EDTA间接络合滴定法测定 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量,用阴阳离子平衡法求得 K^+ 和 Na^+ 含量,土壤含盐量为各阴阳离子之和。

入渗结束后,对各处理不同土层0~10、10~20和20~40 cm的脱盐率进行计算,以分析不同咸水入渗对土壤盐分淋洗效率的影响,其中脱盐率由以下公式计算所得:

$$R_d = (S_A - S_B) / S_A \times 100\%$$

式中, R_d 为脱盐率,%; S_A 为某一土层初始盐分总

量; S_B 为某土层入渗后盐分总量。

采用Excel 2016和SPSS 19.0软件对数据进行统计和分析,采用One-way AVOVA对处理间入渗过程中的累积入渗量、入渗率和湿润锋深度,以及入渗后处理间同一土壤深度的水盐含量和脱盐率进行方差分析,采用Duncan法进行多重比较和显著性分析。

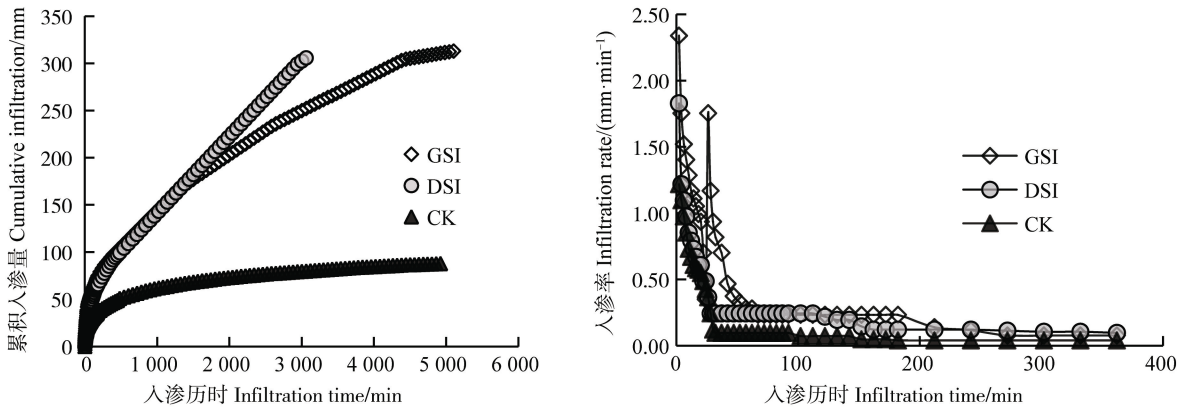
2 结果与讨论

2.1 入渗过程

水分入渗是水分进入土壤的重要环节,显著影响了土壤的物质迁移和水分分布^[12],本研究对不同梯次咸水入渗滨海盐土的累积入渗量、入渗率和入渗深度进行了分析,并与其他处理进行了对比。据研究,咸水入渗盐碱土过程中,咸水中的二价阳离子如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等与土壤胶体吸附的单价阳离子如 Na^+ 发生交换吸附作用,有利于土壤颗粒的絮凝、改善土壤结构,提高土壤的渗透性能^[25-26]。本研究也取得了相同的研究结果,图2为GSI、DSI和CK处理的累积入渗量和入渗率随入渗历时的变化过程,由于MSI处理中咸水冰融化入渗滨海盐土是一个连续的过程,其阶段性入渗指标如入渗率和累积入渗量均不能定量监测,因此该处理没有在图2中显示。如图2所示,入渗初期,由于土壤含水量极低(2.42%),土壤基质势极高^[24],入渗率也较高,后随着水分的入渗,土壤含水量逐渐升高,入渗率呈逐渐降低趋势。相同入渗时间点,CK处理累积入渗量和入渗率小于咸水处理。各处理不同入渗时间段的入渗率和累积入渗量进行方差分析结果表明:相同入渗时间段,咸水处理的累积入渗量和入渗率均显著高于对照处理(表2)。咸水入渗中,GSI处理和DSI处理的总入渗量相同,但入渗过程中以上处理在累积入渗量上存在差异。入渗初期,GSI处理由于S1梯次咸水的矿化度显著高于DSI处理,为 $81 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,其累积入渗量和平均入渗率显著高于DSI处理的 $15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。如表2所示,0~24 min时间段(对应S1咸水梯次阶段),GSI处理的累积入渗量和平均入渗率分别为 28.7 mm 和 $1.2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,显著高于DSI处理的 19.7 mm 和 $0.8 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($P < 0.05$);S2梯次咸水的矿化度为 $19 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,与DSI处理矿化

度相当,在此阶段(24~1 142 min 时间段),GSI 处理的累积入渗量和平均入渗率与 DSI 处理相比没有显著差异。入渗后期,GSI 处理中 S3 梯次咸水的矿化度为 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 低于 DSI 处理,其累积入渗量和平均入渗率显著低于 DSI 处理。在此阶段(1 142~2 702 min 时间段)GSI 处理的累积入渗量和平均入渗率分别为 87.9 mm 和 $0.06 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 显著低于 DSI 处理的 131.6 mm 和 $0.08 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($P<0.05$); 2 702 min~入渗结束时间段(对应 S4 咸水梯次阶段),GSI 处理的平均入渗率为 $0.03 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 显著低于 DSI 处理的 $0.05 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($P<0.01$), 但 GSI 处理的入渗水量在前 3 个梯次小于 DSI 处理,水分完全入渗条件下,在 S4 阶段的累积入渗量为 76.0 mm 显著大于 DSI 处理的 34.5 mm。已有研究

表明:随着咸水矿化度的增大,土壤胶体的絮凝和土壤团粒结构进一步增强,土壤导水能力显著提高,水分入渗过程加快^[27]。本研究中咸水梯次入渗充分利用了上述规律,在入渗初期促进了水分的入渗。相对于咸水单一直接入渗,咸水梯次入渗在入渗初期显著促进了水分进入土壤的过程,提高了累积入渗量和入渗率,进而为后续低矿化度咸水和淡水创造了良好的入渗条件。并且咸水梯次入渗条件下对入渗率的影响在入渗最初阶段更为明显,如图 2 所示,S1 梯次阶段咸水结束时的入渗率为 $0.35 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,换水后进入 S2 梯次阶段初期的入渗率迅速升高至 $1.67 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在 S2、S3 和 S4 阶段换水后,水分入渗率均有不同程度的升高,但没有 S1 和 S2 咸水梯次明显。



注: GSI 为咸水梯次入渗, DSI 为咸水单一入渗, CK 为淡水入渗。下同。Note: GSI is graduation saline water infiltration, DSI is direct saline water infiltration, CK is fresh water infiltration. The same below.

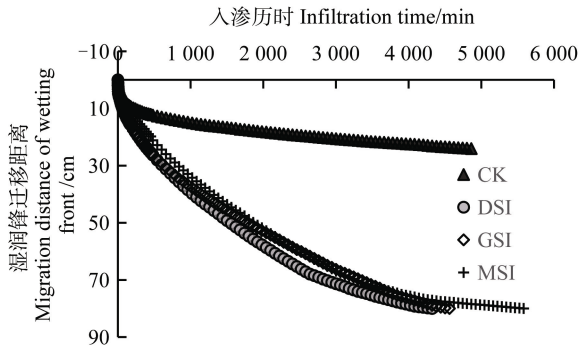
图 2 不同处理累积入渗量和入渗率随入渗时间的变化

Fig. 2 Variations of cumulative infiltration and infiltration rate with infiltration going on relative to treatment

湿润锋迁移距离是累积入渗量和入渗率的综合表现^[27], 已有研究表明,水分入渗初期,土壤含水量较低,土壤基质吸力高,湿润锋迁移速度和深度均较快,随着进一步入渗,水土界面土壤含水量逐渐升高,土壤基质吸力逐渐降低,水分以活塞流的形式向下推移,湿润锋迁移过程减慢^[12, 14]。本研究各处理累积入渗量和入渗率的差异也导致了湿润锋迁移过程的不同。如图 3 所示,在入渗初期,相同入渗历时,各处理之间湿润锋迁移距离没有明显差异;随着水分的进一步入渗,各处理的湿润锋迁移距离呈现不同的变化趋势,表现为相同入渗历时,咸水处理的湿润锋迁移距离显著大于淡水处理(表

2)。咸水处理中,0~24 min 时间段(对应 S1 咸水梯次阶段),由于 GSI 处理的累积入渗量和入渗率显著大于 DSI 处理(图 2),其湿润锋迁移距离显著大于 DSI 处理($P<0.05$),此外,由于 MSI 处理在此阶段咸水冰的融化速度较慢,导致湿润锋迁移距离最小;24~1 142 min 时间段(对应 S2 咸水梯次阶段),各咸水处理的湿润锋迁移距离没有显著差异;1 142~2 702 min 时间段(对应 S3 咸水梯次阶段),由于 GSI 处理的累积入渗量和入渗率显著小于 DSI 处理(图 2),其湿润锋迁移距离显著低于 DSI 处理($P<0.05$),MSI 处理和 GSI 处理间没有显著差异;2 702 min~结束时间段(对应 S4 咸水梯次阶段),

GSI 处理的累积入渗量显著大于 DSI 处理 ($P<0.05$), 其湿润锋迁移距离显著大于 DSI 处理, 同时。MSI 处理和 GSI 处理间没有显著差异。



注: MSI 为咸水冰融化入渗。下同。Note: MSI is melting saline ice infiltration. The same below.

图 3 不同处理湿润锋迁移距离随入渗时间的变化
Fig. 3 Variations of migration distance of wetting front with infiltration going on relative to treatment

相对于淡水入渗, 咸水入渗显著提高了水分的入渗特性。与淡水入渗相比, 相同入渗时间, 咸水的累积入渗量、入渗率和湿润锋迁移距离均显著大于淡水入渗, 这与前人研究结果一致^[28-29], 相对于咸水直接入渗, 咸水梯次入渗对土壤的入渗特性具有重要影响, 上一梯次高矿化度咸水入渗促进了土

壤结构和入渗条件的改善, 可为后续梯次低矿化度微咸水和淡水创造良好入渗条件, 并且以上过程主要发生在入渗初期。此外, 湿润锋迁移距离是累积入渗量和入渗率的综合表现, 本研究中, 咸水梯次入渗滨海盐土过程在湿润锋迁移距离上能够较好的反映咸水冰融水入渗滨海盐土的过程, 这表明咸水结冰融水入渗与咸水梯次入渗过程具有类似的累积入渗量和入渗率的变化特征, 这为咸水冰融水在滨海盐土中的连续入渗特征提供了理论依据, 也可作为模拟分析咸水结冰融水入渗特征的有效手段。

2.2 入渗后土壤水分分布

入渗过程的不同导致了土壤水分和盐分在土壤剖面分布的差异, 图 4 为入渗完成后不同处理水分在土壤剖面的分布。对于 CK 处理由于入渗率、累积入渗量和湿润锋迁移距离均显著小于咸水处理, 咸水处理入渗完成时, CK 处理停止入渗, 其总入渗量和入渗深度远小于其他处理, 在 10 cm 以下未能完全入渗, 含水率远小于其他处理。0~10 cm 土层, 咸水处理土壤含水量均显著低于淡水处理, 咸水处理中, DSI 处理土壤含水率最高 (33.82%), 其次为 GSI 处理 (32.60%), 最小为 MSI 处理 (32.45%); 10~20 cm 和 20~40 cm 土层, 各咸水处理的土壤含水量变化趋势与 0~10 cm 一致; 40 cm 以下土层则与之相反。以上结果表明: 咸水梯次入渗相对于

表 2 处理间不同入渗时间段累积入渗量、入渗率和湿润锋迁移距离

Table 2 Cumulative infiltration, infiltration rate and migration distance of wetting front relative to time period of infiltration and treatment

入渗指标 Infiltration parameter	处理 Treatments	入渗时间 Infiltration time /min			
		0~24	24~1 142	1 142~2 702	2 702~结束
累积入渗量 Cumulative infiltration /mm	CK	15.60±1.48c	47.40±9.53b	17.40±4.16c	8.70±2.70c
	DSI	19.70±1.06b	128.40±15.04a	131.60±0.01a	34.50±15.49a
	GSI	28.70±0.88a	121.60±7.54a	87.90±11.19b	76.00±17.13b
平均入渗率 Mean infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)	CK	0.70±0.06c	0.04±0.01b	0.01±0.01c	0.01±0.00c
	DSI	0.80±0.05b	0.13±0.01a	0.08±0.01a	0.05±0.02a
	GSI	1.20±0.04a	0.12±0.01a	0.06±0.01b	0.03±0.01b
湿润锋迁移距离 Migration distance of wetting front/cm	CK	4.70±0.71c	10.60±1.01b	4.50±1.18c	3.80±0.35c
	DSI	5.70±1.40b	34.90±6.39a	30.70±3.36a	8.70±3.32b
	GSI	6.50±0.25a	32.60±2.94a	25.40±1.25b	15.50±4.30a
	MSI	4.50±1.16c	31.00±3.64a	23.60±1.80b	17.50±2.91a

注: 字母表示不同处理间的差异极显著 ($P<0.05$)。Note: The letters mean significant difference at $P<0.05$ level between treatments.

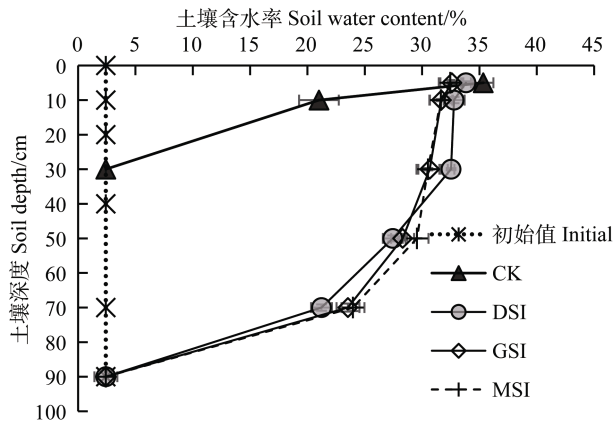


图 4 入渗后不同处理下土壤水分在剖面分布

Fig. 4 Post-infiltration distribution of water content in the soil profile relative to treatment

咸水单一入渗, 更能促进水分向深层土壤迁移和分配。此外, GSI 处理和 MSI 处理在入渗过程中的相似性, 也使得以上处理的土壤水分分布基本一致, 这表明: 咸水梯次入渗能够较好的反映咸水冰融水入渗后土壤水分分布。

2.3 入渗后土壤盐分分布

咸水入渗盐碱土过程中, 盐分淋洗和累积交替进行, 咸水水质和入渗方式对土壤盐分的分布和淋洗具有重要影响^[30]。图 5 为入渗完成后不同处理下土壤盐分的剖面分布, 表现为土壤表层盐分淋洗, 深层累积的变化趋势。CK 处理由于入渗深度浅, 土壤盐分淋洗深度较浅, 其中 0~10 cm 土层土壤含盐量为 $1.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤盐分主要积累于 10~30 cm 土层。咸水处理中 0~40 cm 土层, 土壤含盐量由大到小依次为 DSI 处理>GSI 处理>MSI 处理, 其中 DSI 处理的土壤含盐量为 $9.34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于 GSI 处理的 $3.09 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 MSI 处理的 $2.83 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而在深层土壤 (40~80 cm) 中, 土壤含盐量在处理间的变化趋势相反。本研究中, 即使利用 $15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水对滨海盐土进行单一入渗, 也可达到较好的淋盐效果, 这与较高的土壤含盐量背景值有关, 由于咸水矿化度始终处于一个水平, 致使土壤盐分淋洗不够充分。此外, GSI 处理和 MSI 处理土壤盐分在剖面的分布基本一致, 但土壤盐分淋洗效果略小于 MSI 处理。据研究咸淡水轮灌是咸水利用中重要的研究方向, 通过咸水对土壤结构改善作用, 进一步加强后续淡水的淋盐效果^[31], 并且咸水冰融水入渗中, 不同矿化度融水的连续入渗也能够实现盐分更好的淋洗^[3]。本研究结果显示咸水梯次入渗对土壤盐分

的淋洗效果较为显著, 并且好于淡水和咸水单一入渗, 其盐分淋洗效果与咸水冰融水入渗效果一致。因此, 咸水梯次入渗能够较好地反映咸水冰融水入渗对土壤盐分的淋洗效果, 这为探讨咸水结冰融水入渗过程中盐分的淋洗规律提供了依据。

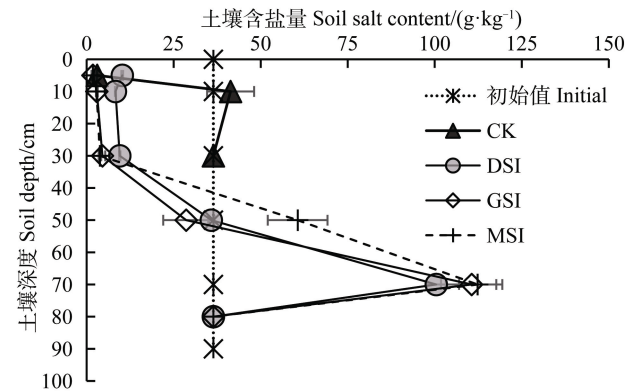


图 5 入渗后不同处理下土壤盐分在剖面分布

Fig. 5 Post-infiltration distribution of salt content in the soil profile relative to treatment

此外, 对入渗完成后各处理不同土层的脱盐率进行了分析 (图 6), 结果表明 0~40 cm 土层 MSI 处理和 GSI 处理的平均脱盐率分别为 92.87% 和 91.38%, 显著大于 DSI 处理的 74.74%。对于 CK 处理由于入渗率、累积入渗量和湿润锋迁移距离均显著小于咸水处理, 咸水处理入渗完成时, CK 处理的总入渗量和入渗深度远小于其他处理, 表现为 0~10 cm 土层的脱盐率为 91.73%, 而 10 cm 以下土层表现为积盐。咸水处理中, 分别对入渗后不同土层的脱盐率进行了分析结果表明: GSI 处理在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm 土层的脱盐率分别为 95.17%、92.28% 和 86.69%, MSI 处理在以上土层的脱盐率分别为 95.74%、93.14% 和 89.72%, 以上两个处理在相同土层的脱盐率没有显著差异, DSI 处理在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm 土层的脱盐率分别为 72.39%、77.27% 和 74.54%, 均显著低于上述两个处理 ($P<0.05$)。因此, 咸水梯次入渗在不同土层的脱盐率与咸水冰融水入渗基本一致。通过对咸水梯次入渗和咸水结冰融水入渗下的累积入渗量、入渗率和湿润锋迁移距离分析表明, 以上两种入渗方式在入渗初期上一梯次高矿化度咸水促进了下一梯次低矿化度咸水的入渗, 并且此阶段, 梯次咸水和咸水冰中的大部分盐分已经进入土体,

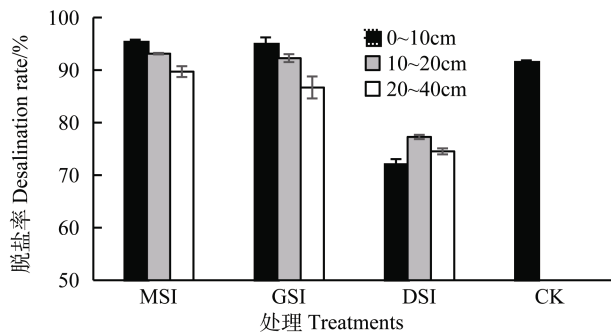


图6 入渗后不同处理下不同土层脱盐率

Fig. 6 Post-infiltration desalination rate of the soil relative to depth of the soil and treatment

并淋洗至表层以下，且能够保证后期低矿化度咸水和淡水足够的入渗水量，进而促进了表层土壤盐分的彻底淋洗，并且在土壤盐分分布和各土层的盐分淋洗效率也能保持一致。

此外，前期研究结果表明：利用高矿化度咸水冰 ($>5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 入渗滨海盐土过程中，在一定范围内，咸水冰的矿化度越高，对盐分淋洗效果越深和越好^[32]。这可能由于矿化度越高的咸水冰融化初期融水的矿化度也就越高，对土壤水分入渗过程的促进效应也就越大，通过后续微咸水和淡水的入渗，进而实现了较低矿化度咸水冰更好的盐分淋洗效果。针对不同矿化度的咸水梯次入渗滨海盐土过程、盐分淋洗动态过程和盐分淋洗效率仍需进一步研究。

通过以上研究，初步明确了不同梯次咸水在滨海盐土中的入渗过程，探明了入渗后土壤水盐分布规律。相对于咸水单一入渗和淡水入渗，咸水梯次入渗能够达到与咸水冰融水入渗一致的盐分淋洗效果，这为探讨咸水冰融水连续入渗滨海盐土过程中盐分淋洗动态提供了依据和有利的方式，同时也为田间咸水轮灌淋盐提供了理论依据。

3 结论

本研究依据咸水冰融化过程中水质水量的变化规律，确定试验所需不同咸水梯次，通过室内土柱模拟试验对咸水梯次入渗滨海盐土过程中的入渗特性、土壤水盐分布特征和盐分淋洗规律等进行研究，结果表明：咸水入渗滨海盐土的入渗率、累积入渗量和湿润锋迁移距离均显著高于淡水；GSI 处理中，上一梯次咸水显著提高了下一梯次咸水的入渗率，

在入渗前期更为明显；GSI 入渗处理在入渗后期的低矿化度咸水和淡水的累积入渗量显著大于 DSI 处理，并且 MSI 处理和 GSI 处理的湿润锋迁移距离变化趋势较为一致，在入渗后期的湿润锋迁移距离显著大于 DSI 处理；MSI 处理和 GSI 处理在入渗后土壤剖面分布趋势基本一致，相对于 CK 和 DSI 处理，GSI 处理与 MSI 处理更能促进水分向深层土壤迁移和分配；MSI 处理和 GSI 处理在入渗后土壤盐分的剖面分布、各土层的盐分淋洗效率基本一致，0~40 cm 土层土壤脱盐率均显著高于 DSI 处理。因此，咸水梯次入渗过程能够反映出与咸水结冰融水入渗一致的水分入渗过程、土壤水盐分布和盐分淋洗效果，这为探索咸水冰融水入渗过程中盐分淋洗动态提供了较好研究方法，同时也为田间咸水轮灌盐分淋洗提供了理论依据。

参考文献 (References)

- [1] Zhu J H. Effects of controlled-release fertilizer with soil conditioners on maize-wheat growth and soil nutrients in coastal saline area[D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2017. [朱家辉. 滨海盐碱地控释掺混肥配施调理剂对玉米—小麦生长及土壤养分的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学资源与环境学院, 2017.]
- [2] Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5): 837-845. [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): 837-845.]
- [3] Guo K, Ju Z Q, Feng X H, et al. Advances and expectations of researches on saline soil reclamation by freezing saline water irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24 (8): 1016-1024. [郭凯, 巨兆强, 封晓辉, 等. 咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24 (8): 1016-1024.]
- [4] Wang Q M, Huo Z L, Zhang L D, et al. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 125-138.
- [5] Ye S L, Niu Y, Liu H Y. Effects of brackish water irrigation with different salt concentrations on cotton emergence rate and seedling growth[J]. Land Development and Engineering Research, 2019, 4 (9): 61-65. [叶胜兰, 牛岩, 刘红瑛. 不同盐浓度微咸水灌溉对棉花出苗率及幼苗生长情况的影响[J]. 土地开发工程研究, 2019, 4 (9): 61-65.]
- [6] Wang R P, Bai Q Y, Wang P, et al. Effect of different rotational irrigation modes and fertilization levels on the

- growth of maize and salt accumulation in soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36 (1): 69–73. [王瑞萍, 白巧燕, 王鹏, 等. 咸水淡水轮灌模式及施肥量对玉米生长和土壤盐分的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36 (1): 69–73.]
- [7] Zhai Y M, Cheng X H, Huang M Y, et al. Effects of alternate irrigation with fresh and brackish water on winter wheat growth and yield[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38 (11): 1–7. [翟亚明, 程秀华, 黄明逸, 等. 咸淡水交替灌溉对冬小麦生长及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38 (11): 1–7.]
- [8] Zhu C L, Shu M C, Zhang Z Y, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and brackish water on saline distribution characteristics of soil and growth of summer maize[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48 (10): 220–228, 201. [朱成立, 舒慕晨, 张展羽, 等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48 (10): 220–228, 201.]
- [9] Wang T Y, Wang J T, Xu Z H, et al. Effects of saline water irrigation on water-salt dynamic in root district and winter jujube yield[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(6): 46–49, 54. [王天宇, 王金童, 徐征和, 等. 微咸水灌溉对冬枣根区土壤水盐动态及效益的影响[J]. *节水灌溉*, 2017 (6): 46–49, 54.]
- [10] Wang Z L, Yang G, Wang C X, et al. Effects of saline water irrigation on cotton yield and soil physicochemical properties[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2019, 37 (6): 700–707. [王泽林, 杨广, 王春霞, 等. 咸水灌溉对土壤理化性质和棉花产量的影响[J]. *石河子大学学报 (自然科学版)*, 2019, 37 (6): 700–707.]
- [11] Liu Y, Yang S Q, Liu M, et al. Effects of water nitrogen interaction on growth of *Lycium barbarum* and farmland soil environment under brackish water drip irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019 (1): 12–17. [刘月, 杨树青, 刘敏, 等. 微咸水滴灌条件下水氮互作模式对枸杞生长及农田土壤环境的影响研究[J]. *节水灌溉*, 2019 (1): 12–17.]
- [12] Bi Y J, Wang Q J, Xue J. Infiltration characteristic contrast analysis of fresh water and saline water[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41 (7): 70–75. [毕远杰, 王全九, 雪静. 淡水与微咸水入渗特性对比分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41 (7): 70–75.]
- [13] Shan J D, Hu H Y, Xie H L. Impact of brackish water salinity on the transport and distribution of soil water and salt under the condition of straw-return[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016 (10): 25–27, 33. [闪佳黛, 胡浩云, 谢宏磊. 微咸水矿化度对秸秆还田下土壤水盐运移分布影响[J]. *节水灌溉*, 2016 (10): 25–27, 33.]
- [14] Li H, Lin Q, Xu S H. Effect of infiltration of saline water/brackish water on soil permeability and transport of salt cations in the soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (3): 656–666. [李慧, 林青, 徐绍辉. 咸水/微咸水入渗对土壤渗透性和盐分阳离子运移的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (3): 656–666.]
- [15] Xiao Z H, Wan H F. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic and physical properties[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35 (3): 359–366. [肖振华, 万洪富. 灌溉水质对土壤水力性质和物理性质的影响[J]. *土壤学报*, 1998, 35 (3): 359–366.]
- [16] Choudhary O P, Ghuman B S, Josan A S, et al. Effect of alternating irrigation with sodic and non-sodic waters on soil properties and sunflower yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85 (1/2): 151–156.
- [17] Zhu J J, Sun J N, Zhang Z H, et al. Effects of alternate 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. [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.]
- [18] Lin Q, Ishikawa T, Akoh R, et al. Soil salinity reduction by river water irrigation in a reed field: A case study in Shuangtai Estuary Wetland, Northeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 89: 32–39.
- [19] Gu W, Lin Y B, Xu Y J, et al. Sea ice desalination under the force of gravity in low temperature environments[J]. *Desalination*, 2012, 295: 11–15.
- [20] Gu W, Lin Y B, Xu Y J, et al. Gravity-induced sea ice desalination under low temperature[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 86: 133–141.
- [21] Li Z G, Liu X J, Zhang X M, et al. A primary study on the reclamation of coastal saline soil with freezing irrigation of saline water in winter[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23 (S1): 187–192. [李志刚, 刘小京, 张秀梅, 等. 冬季咸水结冰灌溉后土壤水盐运移规律的初步研究[J]. *华北农学报*, 2008, 23 (S1): 187–192.]
- [22] Li Z G, Liu X J, Zhang X M, et al. Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95 (4): 498–502.
- [23] Guo K, Liu X J. Dynamics of meltwater quality and quantity during saline ice melting and its effects on the infiltration and desalinization of coastal saline soils[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 139: 1–6.
- [24] Guo K, Liu X J. Infiltration of meltwater from frozen saline water located on the soil can result in reclamation of a coastal saline soil[J]. *Irrigation Science*, 2015, 33 (6): 441–452.
- [25] Bauder J W, Brock T A. Irrigation water quality, soil amendment, and crop effects on sodium leaching[J]. *Arid Land Research and Management*, 2001, 15(2): 101–113.

- [26] Li C J, Lei J Q, Zhao Y, et al. Effect of saline water irrigation on soil development and plant growth in the Taklimakan Desert Highway shelterbelt[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 99–107.
- [27] Su Y. Effect of the salinity of slightly saline water on soil salt-water transfer[J]. Journal of Yangling Vocational & Technical College, 2008, 7 (2): 1–4, 17. [苏莹. 微咸水矿化度对土壤水盐运移的影响研究[J]. 杨凌职业技术学院学报, 2008, 7 (2): 1–4, 17.]
- [28] Guo L Q. Study on soil water and salt transport characteristics in brackish water drip irrigation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016: 23–28. [郭力琼. 微咸水滴灌土壤水盐运移规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016: 23–28.]
- [29] Lai Y H, Zhao X F, Fu W L, et al. Effect of infiltration water quality on the desalting process of dredger fill in the coastal area of Tianjin[J]. Water Saving Irrigation, 2014 (5): 55–58. [赖羽寒, 赵秀芳, 傅瓦利, 等. 不同入渗水质对天津滨海吹填土淋洗脱盐的影响[J]. 节水灌溉, 2014 (5): 55–58.]
- [30] Guo T L, Chi D C, Wang Q J, et al. Experimental study on salt and water movement affected by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 (S1): 84–87. [郭太龙, 迟道才, 王全九, 等. 入渗水矿化度对土壤水盐运移影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21 (S1): 84–87.]
- [31] Zhu C L, Liu Z X, Zhai Y M, et al. Effect of alternative irrigation with brackish and fresh water on soil electrical conductivity and infiltration in coastal farming areas[J]. Research of Agricultural Modernization, 2017, 38 (1): 154–160. [朱成立, 刘宗潇, 翟亚明, 等. 滨海农区微咸水-淡水交替灌溉对土壤 EC 和入渗的影响[J]. 农业现代化研究, 2017, 38 (1): 154–160.]
- [32] Zhang Y, Yang J S, Yao R J. Effects of saline ice water irrigation on distribution of moisture and salt content in coastal saline soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (2): 388–400. [张越, 杨劲松, 姚荣江. 咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53 (2): 388–400.]

(责任编辑: 檀满枝)