

农田利用排水灌溉对土壤入渗特性及棉花生长的影响

王兴鹏^{1,2} 段爱旺¹ 李 双¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453000; 2. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 为了评价新疆地区农田利用排水灌溉的适用性,通过马氏瓶供水、定盘式负压入渗仪以及室内棉花萌芽和幼苗生长的培养试验,研究了排水灌溉对土壤水分点源、面源入渗特性及对棉种萌发、幼苗生长的影响。结果表明,在水分点源入渗试验中,不同矿化度的排水灌溉后土壤水分入渗在水平方向上运移较纵向明显,当排水矿化度大于2 g/L时,在水平方向上土壤含水率随矿化度的增大呈显著下降趋势。在水分面源入渗试验过程中,当水头条件相同时,土壤水分入渗量随排水矿化度的增大而减小,当水头条件不同时,土壤水分入渗量随压力水头的减小显著降低。根据稳态条件下的面源入渗近似解,不同矿化度的排水灌溉后,土壤饱和导水率 K_s 先增后减,而模型参数 λ_c 的变化却呈相反的变化趋势,在排水矿化度达到2 g/L时 K_s 和 λ_c 出现了极值,矿化度越高对 K_s 和 λ_c 的影响越明显。利用排水灌溉后,当矿化度低于3 g/L时,能够保证棉种正常萌发而不产生危害,当矿化度超过3 g/L时,开始显现对棉种萌发的抑制作用,高于5 g/L时抑制作用强烈。排水矿化度低于4 g/L对棉花幼苗的生长影响较小,超过4 g/L时,棉花生育过程减缓显著。

关键词: 农田排水; 点源入渗; 面源入渗; 棉花

中图分类号: TV213.9; S152.7*2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0100-07

Effect of Farmland Drainage Irrigation on Soil Infiltration Characteristics and Cotton Seedling Growth in Southern of Xinjiang Province, China

Wang Xingpeng^{1,2} Duan Aiwang¹ Li Shuang¹

(1. Farmland Irrigation Research Institute of CAAS, Xinxiang 453000, China

2. College of Water Resource and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China)

Abstract: To evaluate the applicability of farmland irrigation and drainage in southern Xinjiang, adopting the experiment of water supplied by Markov bottle, of fixed disc infiltrometer, of cotton indoor seeding and growth, the effect of farmland irrigation and drainage on infiltration characteristics of the soil water at point source and non-point source, cotton emergence rate and growth was studied. The experiment results showed that during the test of soil water point source infiltration, the horizontal migration at different salinity irrigation water infiltration was more obvious than the longitudinal direction. When drainage salinity was over 2 g/L, the soil water content values in the horizontal direction showed a significant downward trend with the increasing of salinity. During the test of soil water non-point source infiltration, the amount of soil water infiltration decreased with the increasing salinity at the same water head. And the amount significantly decreased with the decrease of water head. According to steady-state non-point source infiltration, soil saturated hydraulic conductivity K_s increased first and then decreased after different salinity irrigation, but the model parameters λ_c changed oppositely, when drainage salinity was at 2 g/L, K_s and λ_c reached inflection point, and the effect was more obvious with the higher salinity. The cotton had a normal growth when water salinity was below 3 g/L, while there was a obvious damage to the

收稿日期: 2016-03-23 修回日期: 2016-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31060084、51469029)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAC14B01)和塔里木大学重大专项(TDZKPY201501)

作者简介: 王兴鹏(1978—),男,博士生,塔里木大学副教授,主要从事极端干旱荒漠区农业水土环境研究,E-mail: 13999068354@163.com
通信作者: 段爱旺(1963—),男,研究员,博士,主要从事农业水资源高效利用与水环境保护研究,E-mail: duanaiwang@aliyun.com

cotton emergence rate when it was at 5 g/L. There was a low effect on cotton seeding growth when the salinity was below 4 g/L, however, cotton growing was slowed significantly when the salinity was over 4 g/L.

Key words: farmland drainage; point source infiltration; non-point source infiltration; cotton

引言

农田排水资源化利用对提高灌溉水资源重复利用率,减少化肥和农药的流失,防治农业排水污染,促进节水与水资源可持续利用具有重要作用^[1]。农田排水再利用对土壤盐渍化具有潜在的风险性^[2],其无序排放也会对周边河流的水质产生较大影响。南疆地区土壤盐碱化严重,大水洗盐和种稻改良致使排水过多,水资源浪费严重,而且排水的水质较差,对地下水 and 塔里木河造成污染,仅阿拉尔灌区每年排入塔里木河的水量达 $7.07 \times 10^8 \text{ m}^3$,总排盐量 340 万 t^[3]。灌区农田排出的劣质水对河流湖泊水质的影响已得到众多研究者的关注,农田排水资源化利用逐渐成为研究的热点。刘大刚等^[4]认为应将农田排水水质、作物特性、土壤特性、水文气象、灌排措施等作为排水资源化利用适宜性评价指标。彭世彰等^[5]则强调应更加注重农田污染物迁移与劣质水处理、劣质水灌溉技术与标准以及劣质水灌溉的环境影响与生态风险等方面的研究^[5]。农田排水灌溉对土壤水分运移特性的影响直接反映其利用的优劣性。王全九等^[6]认为在低含水量条件下,微咸水累积入渗率随初始含水量的增加而增大。随着滴头流量的增大,水平湿润锋距离、交汇区宽度及地表湿润比也会增加^[7]。用一维代数模型可精确模拟微咸水入渗过程^[8]。SOUZA 等^[9]研究了不同滴头流量下不同浓度硝酸钾溶液的溶质运移过程。在劣质水灌溉对作物影响研究方面,已有研究表明,适宜的咸水矿化度、适度的灌水量以及调控措施能够促进作物生长且对作物产量和品质影响较小^[10-16],相关研究成果已在田间实验应用中获得了较好的效果。但是,相对咸水灌溉,农田排水的水质成分较为复杂,水体中不仅含有盐离子,还留存淋洗出的氮、磷、钾元素以及残留的农药成分,有关咸水灌溉的研究结果并不一定与排水灌溉的结论相一致。本文分析了农田利用排水灌溉对土壤入渗特性以及棉种发芽、幼苗生长的影响,为进一步明确排水在极端干旱区农田灌溉中的安全利用提供参考。

1 试验区概况

本试验于新疆阿拉尔市塔里木大学水利与建筑工程学院节水灌溉试验基地进行 (81°17'56.52"E, 40°32'36.90"N),属于典型大陆性极端干旱沙漠气

候,干旱少雨,昼夜温差大,年降水量 46.7 ~ 61.2 mm,年蒸发量高达 1 877.5 ~ 2 337.4 mm,日照长,年均日照时数 2 729.0 h,最高月平均气温为 25 ~ 27℃,最低月平均气温为 -22 ~ -30℃,无霜期长,达 200 d 以上,干旱指数为 7 ~ 20。土壤质地为沙壤土,土壤透气性良好,0 ~ 80 cm 土壤平均容重为 1.34 g/cm^3 ,田间持水量为 25% (重量含水率),0 ~ 80 cm 土壤盐分量在 0.28% ~ 0.39% 左右,地下水埋深在 3 m 以下 (可忽略地下水补给)。

2 材料与方法

2.1 土壤水分入渗试验

2.1.1 土壤水分点源入渗试验

点源入渗试验采用马氏瓶供水,滴头流量为 1.83 L/h,流量大小由阀门控制。点源入渗试验的初始条件相同,保持相同入渗水量,选取 4 个相邻地块在同一天内完成入渗试验,以减少试验初始条件差异。入渗试验在湿润锋几乎停止前进时结束,即在入渗开始后 3 h 结束,并取土测定入渗剖面的土壤含水率。水平测定距离分别为 0、5、10、15、20、25 cm,每个测点垂直取土深度分别为 0、5、10、15、20、25、30 cm。入渗试验用水取自阿拉尔垦区胜利总干排,实测排水矿化度为 10.54 g/L,根据试验需要将排水矿化度分别配置成 1、2、3、4、5 g/L。

2.1.2 土壤水分面源入渗试验

面源入渗试验采用定盘式负压入渗仪,压力水头分别设定为 $H = 0 \text{ cm}$ 与 $H = -2.7 \text{ cm}$ 。在试验开始时记录负压入渗仪的初始水位,之后每隔 1 min 记录 1 次水位,在水位呈匀速下降时整个试验过程结束。面源入渗试验选取 8 个试验点,所用排水矿化度设置同 2.2.1 节。

2.1.3 土壤入渗参数计算

根据测定的试验数据求解稳态条件下面源入渗近似解,分析农田利用排水灌溉对土壤入渗参数 λ_c 、 K_s 的影响。

$$q = K_s \left(1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_0} \right) \tag{1}$$

式中 q ——单位面积水流速率,cm/min

K_s ——饱和导水率,cm/min

r_0 ——积水半径,cm

λ_c ——模型参数,cm

当负压不为零时,盘式负压入渗仪下的稳态水

流可描述为

$$q = K_s \exp \frac{h}{\lambda_c} \left(1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_0} \right) \quad (2)$$

式中 h ——负压水头, cm

试验用同一盘式负压入渗仪 ($r_0 = 7.5$ cm) 完成, 根据不同负压水头 (h_1, h_2) 的稳态流量 (q_1, q_2), 求出参数 λ_c 和饱和导水率 K_s 为

$$\lambda_c = \frac{h_1 - h_2}{\ln \frac{q_1}{q_2}} \quad (3)$$

$$K_s = \frac{\exp \frac{h}{\lambda_c} \left(1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_0} \right)}{q} \quad (4)$$

2.2 室内棉种发芽及幼苗生长试验

2.2.1 棉种选择及排水溶液配制

试验品种为新海 14 长绒棉, 充分后熟, 经硫酸脱绒后挑选子粒饱满、无机械损伤的种子作为供试材料, 以现场取样实测的排水矿化度作为基准值, 实测的排水矿化度为 10.54 g/L, 根据试验需要采用蒸馏水稀释配制成不同矿化度的排水溶液, 用于棉种发芽及幼苗生长试验。矿化度分别设置为 0 (CK)、1 (T1)、2 (T2)、3 (T3)、4 (T4)、5 (T5)、6 (T6)、7 (T7)、8 (T8)、9 (T9)、10 g/L (T10), 共计 11 个处理, 3 次重复。

2.2.2 室内棉种发芽试验

在发芽盒内放置两层滤纸, 均匀摆放 100 粒试验棉种, 其上覆盖一层滤纸。每个处理分别用移液管加入不同矿化度的排水溶液, 用量以上层滤纸湿润为准。将处理后的发芽盒放入温度为 30℃ 的光照恒温培养箱, 分别在第 3 天和第 7 天观测棉种发芽势和发芽率, 并参考文献 [17] 计算相对盐害率 (相对盐害率 (%) = (对照发芽率 - 处理发芽率) / 对照发芽率 × 100%)。

2.2.3 室内棉花幼苗生长试验

将 5 cm 厚石英砂 (经高温消毒) 置于发芽盒内, 每盒种植 30 粒棉种。用营养液在光照培养箱内先培养至出苗, 然后加入不同矿化度的排水溶液, 每种浓度 3 次重复。培养箱内温度控制在 25℃ 左右, 每天光照 12 h。加入排水溶液培养 2 周后测定棉花幼苗株高、主根长、子叶面积、一级侧根数量、幼苗地上及地下部分干重等生长指标。

3 结果与分析

3.1 农田排水灌溉水分入渗特性

3.1.1 水分点源入渗特性

图 1、2 分别为排水点源入渗土壤水分在水平和

垂直方向的分布特性, 土壤水分在水平方向的值为垂向 0 ~ 30 cm 的土壤含水率均值。由图 1 可知, 农田排水矿化度越小, 土壤含水率越高, 土壤含水率在水平距离上的运移过程较为平稳, 下降趋势缓慢, 离滴头越远土壤含水率越小。随着矿化度升高, 土壤含水率在水平距离上随水质变化的波动性较大, 下降趋势明显, 距离滴头越远土壤含水率相差越大。1、2 g/L 处理的土壤水分在水平 0 ~ 10 cm 范围内的下降趋势线近乎重合, 其值相差不大, 但自 10 cm 后, 分化趋势明显。3、4、5 g/L 处理的土壤含水率在水平距离上的变化规律较为一致, 在 0 ~ 10 cm 范围内土壤含水率有较明显的下降。在 10 cm 处土壤含水率突然增大, 在 10 ~ 35 cm 土壤含水率迅速下降。由图 2 可知, 在垂直剖面上, 各处理的土壤含水率差异较小, 变化趋势较为一致, 表层土壤含水率较大, 随着土壤深度的增加, 土壤含水率整体呈减小趋势。

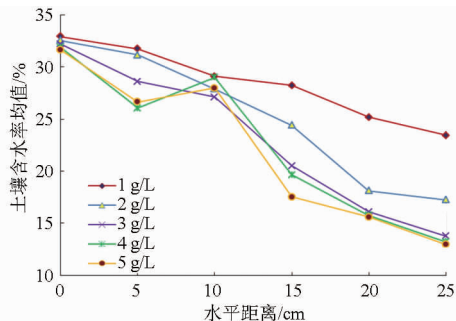


图 1 土壤水分水平运移

Fig. 1 Moisture horizontal movement

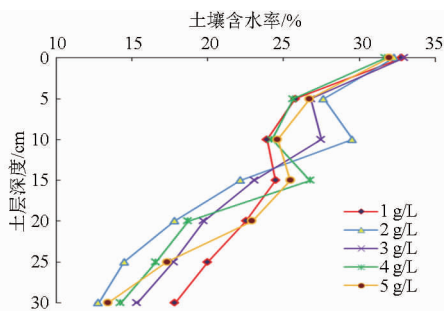


图 2 土壤水分垂直运移

Fig. 2 Moisture vertical movement

3.1.2 水分面源入渗累积特性

图 3、4 分别为在压力水头为 0 cm 和 -2.7 cm 条件下, 农田利用排水灌溉的入渗累积入渗量变化曲线。由图 3 可知, 在压力水头 0 cm 作用下, 矿化度越小的处理土壤水分累积入渗量越高, 入渗曲线与水平大致呈 45° 方向。当矿化度不断增大时, 土壤水分累积入渗量出现了较为明显的变化。1、2 g/L 处理的土壤水分累积入渗曲线在入渗开始的前 8 min 相互重合, 累积入渗量近乎相等, 当入渗时间延长至 8 min 后, 变化曲线分离, 2 g/L 处理的土壤

入渗量出现了明显的减小趋势,其值小于 1 g/L 处理的土壤水分入渗量。4、5 g/L 处理的土壤水分累积入渗量变化曲线相互重合,在整个试验过程中其值相差不大,但两者的累积入渗量要小于矿化度较小处理的入渗量。由图 4 可得知,在压力水头 -2.7 cm 作用下,不同处理的土壤水分累积入渗曲线在整个试验过程中的变化趋势较为一致,其中 1 g/L 和 2 g/L、4 g/L 和 5 g/L 曲线的重合度较高,说明入渗量值相等,矿化度较小处理的土壤入渗量值要高于矿化度较高的处理。由上述分析可知,在相同的压力水头条件下,土壤水分入渗量随着排水矿化度的增大而减小;而在不同的压力水头条件下,土壤水分入渗量随压力水头的增大显著降低。

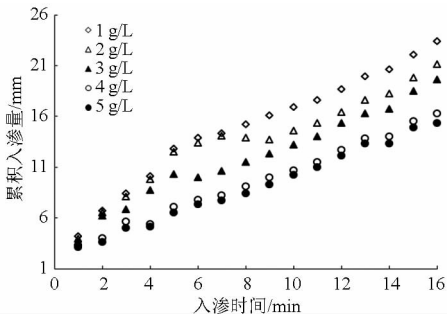


图3 压力水头 0 cm 累积入渗量变化曲线
Fig.3 Water head at 0 cm

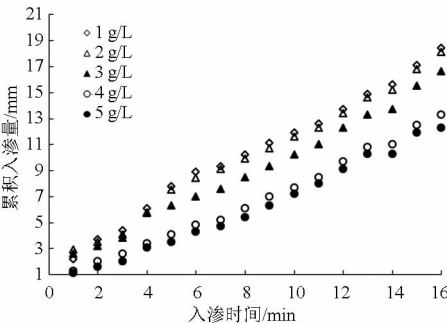


图4 压力水头 -2.7 cm 累积入渗量变化曲线
Fig.4 Water head at -2.7 cm

3.1.3 排水灌溉对土壤入渗参数的影响

由式(3)、(4)计算出不同矿化度排水灌溉的土壤入渗参数见表 1。由表 1 可知,随着矿化度的增加,饱和导水率 K_s 先增后减,而 λ_e 值的变化却呈相反的变化趋势。矿化度在 2 g/L 时, K_s 、 λ_e 值均出现了极值,2 g/L 的 λ_e 分别较 1、3、4、5 g/L 降低 1.958、2.376、4.741、16.859 cm,当矿化度超过 2 g/L 时,3、4、5 g/L 的 λ_e 增幅要高于 1 g/L。2 g/L 的 K_s 分别较 1、3、4、5 g/L 提高 1.638×10^{-2} 、 1.119×10^{-2} 、 2.239×10^{-2} 、 4.591×10^{-2} cm/min,当矿化度超过 2 g/L 时,4、5 g/L 的 K_s 降幅要高于 1 g/L,而 3 g/L 的 K_s 降幅低于 1 g/L。说明高矿化度排水灌溉会对土壤入渗产生影响,进而影响土壤理化性质。

表 1 土壤入渗参数
Tab.1 Soil permeation parameter

参数	矿化度/(g·L ⁻¹)				
	1	2	3	4	5
$q_1(0\text{ cm})/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	0.101	0.129	0.115	0.101	0.047
$q_2(-2.7\text{ cm})/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	0.058	0.051	0.061	0.071	0.041
λ_e/cm	4.868	2.910	5.286	7.661	19.769
$K_s/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	3.873×10^{-2}	5.511×10^{-2}	4.392×10^{-2}	3.272×10^{-2}	9.20×10^{-3}

3.2 排水灌溉对棉花生长的影响

3.2.1 不同矿化度排水灌溉对棉种发芽指标的影响

由图 5 可知,当排水矿化度不超过 4 g/L 时,土壤没有出现明显的盐害,盐害率几乎为 0。当排水矿化度大于 4 g/L 时,土壤开始发生盐害,且随着排水矿化度升高,土壤盐害率显著增加。由图 6 可知,排水矿化度的增加会导致土壤盐分积聚并发生盐害,直接影响棉种发芽。当排水矿化度不超过 3 g/L 时,土壤盐害率为 0,T1、T2、T3 处理的棉种发芽势、发芽率与 CK 处理的差异性不显著 ($P > 0.05$),且 T1、T2、T3 处理的发芽势、发芽率均高于 CK,表明低于 3 g/L 的排水灌溉不会影响棉种发芽。当排水矿化度大于 3 g/L 时,随着矿化度增加,T4 ~ T10 处理的棉种发芽势、发芽率与 CK 处理的差异性达到了

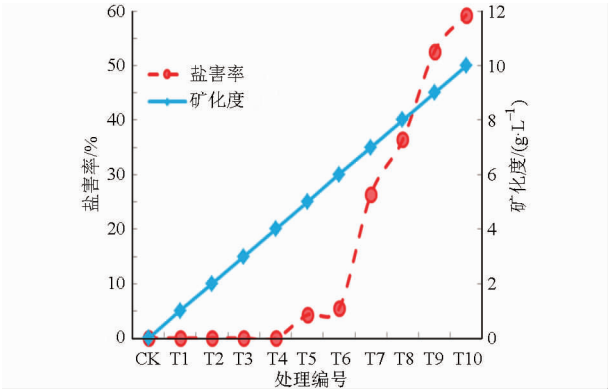


图5 矿化度与土壤盐害率

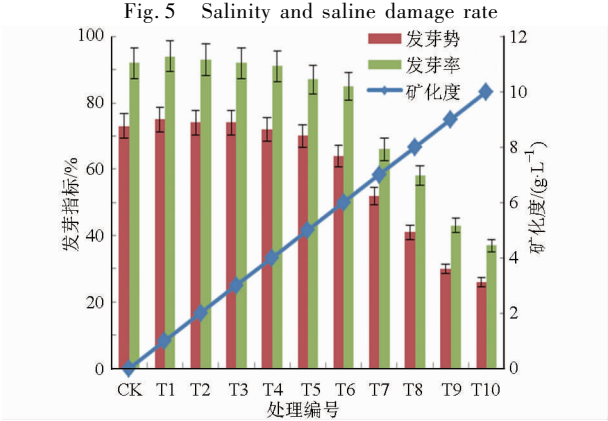


图6 矿化度与棉种发芽指标

Fig.6 Salinity and germination index

显著水平 ($P < 0.05$)。当排水矿化度大于 7 g/L 时,土壤盐害率超过 25%,棉种发芽势和发芽率不足 50%,表明棉种萌发到受到严重抑制。

3.2.2 不同矿化度排水灌溉对棉花幼苗生长发育的影响

表 2 中详细列出了不同矿化度排水灌溉条件下棉花幼苗的生长发育指标。从表 2 可知,棉花幼苗生长对盐分响应比较敏感,排水矿化度的高低均会对棉花幼苗生长产生不同程度的影响。当排水矿化度低于 4 g/L 时,T1、T2、T3、T4 处理的棉花幼苗株

高、主根长、子叶面积与 CK 处理没有显著性差异 ($P > 0.05$)。当排水矿化度大于 4 g/L 时,T5 ~ T10 处理的该 3 项指标与 CK 处理的差异性显著 ($P < 0.05$)。排水矿化度越高,棉花幼苗生长受抑制程度越强烈,整体表现为棉花幼苗生长缓慢、子叶面积小、根系发育迟缓及幼苗干物质积累不足。不同处理棉花幼苗的一级侧根数量、地上部分干质量及地下部分干质量均受到排水灌溉影响,各指标随排水矿化度的升高而显著降低。

表 2 不同矿化度排水对棉花幼苗生长的影响

Tab.2 Effects of different salinity FD on seedling growth

处理	矿化度/ (g·L ⁻¹)	幼苗株高/ cm	主根长/cm	子叶面积/ cm ²	一级侧根数量	幼苗地上 部分干质量/mg	幼苗地下 部分干质量/mg
CK	0	13.3 ^a	16.4 ^a	4.63 ^a	31 ^a	87.8 ^a	72.0 ^a
T1	1	12.5 ^a	15.6 ^{ab}	4.30 ^{ab}	28 ^b	83.7 ^b	71.8 ^a
T2	2	12.8 ^a	15.5 ^{ab}	3.98 ^{ab}	26 ^{bc}	80.5 ^c	67.6 ^b
T3	3	12.2 ^a	15.0 ^{ab}	3.90 ^{abc}	25 ^c	77.7 ^d	62.2 ^c
T4	4	11.7 ^{ab}	13.7 ^b	3.26 ^{abcd}	21 ^d	74.4 ^e	56.4 ^c
T5	5	10.3 ^b	10.5 ^b	3.13 ^{abcd}	19 ^e	61.2 ^f	50.1 ^d
T6	6	8.3 ^c	7.6 ^d	2.83 ^{bcde}	13 ^f	53.3 ^g	42.2 ^e
T7	7	6.2 ^d	6.4 ^{de}	2.33 ^{cde}	11 ^g	45.4 ^h	36.7 ^f
T8	8	5.8 ^d	5.5 ^{ef}	1.80 ^{de}	7 ^f	40.3 ⁱ	32.6 ^g
T9	9	4.2 ^e	4.1 ^{fg}	1.53 ^e	5 ⁱ	35.2 ^j	25.9 ^h
T10	10	3.4 ^e	3.7 ^g	1.35 ^e	5 ⁱ	29.1 ^k	21.2 ⁱ

注:表中数据为 3 个重复的平均值,同一列数据后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著,相同字母表示差异性不显著。

4 讨论

4.1 排水灌溉对土壤入渗特性的影响

排水灌溉会对土壤入渗产生影响,进而影响土壤水盐运移过程。由毛管理论可知, λ_e 可间接反映土壤孔隙结构的变化,土壤颗粒越松散,膨胀程度越大,孔径就会变小, λ_e 变大,土壤导水能力随之降低。由此说明,农田排水灌溉后,导致盐分在土壤中的絮凝作用强于盐分扩散,土壤团聚性增强,大孔隙颗粒在土壤中的比重上升,渗透性加强,引起 λ_e 减小而 K_s 增大。当矿化度继续增加或连续灌溉使得土壤中交换性钠达到足够的量,颗粒分散和膨胀占主导作用时,土壤大孔隙减少,小孔隙增加,渗透性减弱, λ_e 随之增大而 K_s 出现明显降低。冯棣等^[18] 的研究也表明随土壤盐度增加,0 ~ 20 cm 土层的土壤容重表现出增加的趋势,是盐分离子改变了土壤结构所致。在水分点源入渗过程中,排水矿化度对土壤水分在水平方向上的入渗影响较垂向更为明显,当矿化度大于 2 g/L 时,水平距离土壤含水率随着矿化度的增大呈显著下降趋势。有研究表明,当入渗水矿化度大于 3 g/L 时土壤的入渗率逐渐减小^[19]。刘春城等^[20] 认为土壤入渗能力在矿化度为

1 g/L 时达到最大,超过 1 g/L 后则随矿化度的增大而减小。在水分面源入渗过程中,当压力相同时,土壤水分入渗量随着排水矿化度的增大而减小;而当压力水头不同时,土壤水分入渗量随压力水头的减小显著降低。当排水矿化度达到 2 g/L 时, K_s 、 λ_e 出现了极值,该值是否可作为影响 K_s 、 λ_e 的阈值点则还需继续开展矿化度为 2 g/L 附近的排水灌溉试验进行进一步研究。随着矿化度的不断增大,会显著降低土壤水分入渗性能,增加入渗湿润深度^[21],使得水中携带的盐分向土壤深层扩散的风险性增强,必将导致土壤质量整体下降,为了避免因排水灌溉致使土壤质量恶化情况的出现,采用相应的调控灌溉技术措施是关键,相关的研究还需进一步开展。

4.2 排水灌溉对棉种发芽及幼苗生长的影响

有关棉种萌发和棉花幼苗生长的矿化度阈值,前人研究的结论也不尽相同。张俊鹏等^[22-23] 提出 3 g/L,而杨传杰等提出 2 g/L 可作为咸水利用调控参考阈值^[24],张俊鹏等认为当矿化度小于 4 g/L 微咸水造墒对于棉花出苗、株高及干物质累积的影响较小^[25],但冯棣等提当造墒水矿化度也可以低于 5 g/L^[26]。王春霞等^[27] 则得出了在轻度盐碱土中灌水矿化度的临界值为 4.28 g/L 的结论。汪啸等^[28]

的研究认为 NaCl 浓度在 15 ~ 25 mmol/L 时,棉花生长情况最好。相关研究均得出了不同的适宜棉花灌溉的咸水矿化度阈值,之所以导致研究结果不同的主要原因是试验条件、供试品种和灌溉方式的不同。就本试验所选择的“新海 14”而言,低矿化度农田排水灌溉对棉种萌发产生抑制作用的影响较小,在某种程度上还具有一定的积极促进,保证棉种正常萌发而不产生危害的农田排水矿化度值应低于 3 g/L,这与咸水灌溉试验的结论较为一致,说明影响棉种萌发的主要诱因是盐离子。当矿化度低于 4 g/L 时,农田排水灌溉对棉花幼苗生长较对照的差异性不显著,这与张俊鹏、冯棣等的研究结果较为吻合^[18,22-23,25-26]。当排水矿化度大于 4 g/L 时,棉花幼苗植株较矮、主根变短、子叶面积变小、侧根数量减少、幼苗干物质积累降低,棉花幼苗生长受限,对于棉花后期生长造成影响,棉花产量也会随灌溉水盐度的增加而显著降低^[29],孙泽强等^[11]研究表明滴灌补灌矿化度 6 g/L 以下的咸水对鲁北平原棉花产量没有明显的影响,该研究所得出的矿化度值要高于农田排水矿化度低于 4 g/L 的结果,说明在排水灌溉过程中还应考虑水体中其他成分对棉花幼苗生长和产量的影响。

5 结论

(1)在水分点源入渗试验过程中,不同矿化度的排水灌溉后土壤水分入渗在水平方向上运移较纵向明显。当排水矿化度大于 2 g/L 时,在水平方向上土壤含水率随矿化度的增大呈显著下降趋势。在水分面源入渗试验过程中,当水头条件相同时,土壤水分入渗量随着排水矿化度的增大而减小;当水头条件不同时,土壤水分入渗量随压力水头的减小显著降低。

(2)排水灌溉会对土壤入渗产生影响,根据稳态条件下的面源入渗近似解,不同矿化度的排水灌溉后,土壤饱和导水率 K_s 先增后减,而模型参数 λ_e 的变化却呈相反的变化趋势,在排水矿化度达到 2 g/L 时 K_s 和 λ_e 出现了极值,矿化度越高对 K_s 和 λ_e 的影响越明显。

(3)当排水矿化度低于 3 g/L 时,能够保证棉种正常萌发而不产生危害,当矿化度超过 3 g/L 时,开始显现对棉种萌发的抑制作用,高于 5 g/L 时抑制作用强烈。矿化度低于 4 g/L 对棉花幼苗的生长影响较小,当超过 4 g/L 时,棉花幼苗生长减缓明显,矿化度越高抑制作用越显著。

参 考 文 献

- 1 贺新春,邵东国,刘武艺,等.农田排水资源化利用的研究进展与展望[J].农业工程学报,2006,22(3):176-179.
HE Xinchun,SHAO Dongguo,LIU Wuyi,et al. Review of the researches on utilization of farm land drainage as resources[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(3):176-179. (in Chinese)
- 2 王少丽,许迪,方树星,等.宁夏银北灌区农田排水再利用水质风险评价[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):43-47.
WANG Shaoli,XU Di,FANG Shuxing,et al. Valuation of water quality hazard of drainage reuse in Yinbei irrigation district,Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2010,28(3):43-47. (in Chinese)
- 3 艾尼瓦尔·买买提,普拉提·苏力坦,海米提·依米提.阿克苏河灌区农田排水特征研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(12):145-150.
MOHANMED Anwar, SULTAN Polat, YIMIT Hamid. Characteristics of agricultural drainage from Aksu river irrigation area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2009,23(12):145-150. (in Chinese)
- 4 刘大刚,王少丽,许迪,等.农田排水资源灌溉利用适宜性评价指标体系研究[J].灌溉排水学报,2013,32(2):93-96.
LIU Dagang,WANG Shaoli,XU Di,et al. Evaluation index system of the suitability of drainage water for irrigation in agriculture[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2013,32(2):93-96. (in Chinese)
- 5 彭世彰,程胜,徐俊增,等.劣质水安全利用研究综述[J].水资源保护,2014,30(4):1-6.
PENG Shizhang,CHENG Sheng,XU Junzeng,et al. Advances in safe utilization of poor-quality water[J]. Water Resources Protection,2014,30(4):1-6. (in Chinese)
- 6 王全九,叶海燕,史晓楠,等.土壤初始含水量对微咸水入渗特征影响[J].水土保持学报,2004,18(1):51-53.
WANG Quanjiu,YE Haiyan,SHI Xiaonan,et al. Influence of initial water content on slight saline water infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2004,18(1):51-53. (in Chinese)
- 7 王春霞,王全九,单鱼洋,等.微咸水滴灌下湿润锋运移特征研究[J].水土保持学报,2010,24(4):59-68.
WANG Chunxia,WANG Quanjiu,SHAN Yuyang,et al. Research on the transport characteristics of soil wetting front under drip irrigation with saline water[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2010,24(4):59-68. (in Chinese)
- 8 吴忠东,王全九.利用一维代数模型分析微咸水入渗特征[J].农业工程学报,2007,23(6):21-26.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Infiltration characteristics of brackish water by one dimensional algebraic model[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 21-26. (in Chinese)
- 9 SOUZA C F, FOLEGATTI M V. Distribution and storage characterization of soil solution for drip irrigation[J]. Irrigation Science, 2009,27(4):277-288.
- 10 刘胜尧,范凤翠,李志宏,等.咸水负压渗灌对番茄生长和土壤盐分的影响[J].农业工程学报,2013,29(22):108-117.
LIU Shengyao,FAN Fengcui,LI Zhihong, et al. Effects of negative pressure irrigation with saline water on tomato yield and soil

- salt[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(22):108-117. (in Chinese)
- 11 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):12-18.
SUN Zeqian,DONG Xiaoxia,WANG Xuejun,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):12-18. (in Chinese)
- 12 孙泽强,董亮,王学君,等. 咸水滴灌补灌对土壤水盐分布和棉花产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2014,33(4-5):273-277.
SUN Zeqiang,DONG Liang,WANG Xuejun,et al. Effects of supplementary irrigation with saline water under drip irrigation on soil water and salt distributions and cotton yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2014,33(4-5):273-277. (in Chinese)
- 13 李发永,王兴鹏,王龙,等. 微咸水膜下滴灌条件下南疆棉花水肥耦合规律研究[J]. 旱地区农业研究,2013,31(2):146-151.
LI Fayong,WANG Xingpeng,WANG Long,et al. Coupling effects of water and fertilizer with drip irrigation of brackish water under film for cotton in south Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2013,31(2):146-151. (in Chinese)
- 14 王艳芳,曹玲,陈宝悦,等. 咸淡水交替灌溉对芹菜生长及品质的影响[J]. 北方园艺,2014(10):5-8.
WANG Yanfang,CAO Ling,CHEN Baoyue,et al. Effect of alternative irrigation with saline and fresh water on growth and quality of celery[J]. Northern Horticulture,2014(10):5-8. (in Chinese)
- 15 焦艳平,潘增辉,张艳红,等. 微咸水灌溉对河北低平原区土壤盐分及棉花的影响[J]. 灌溉排水学报,2012,31(5):31-34.
JIAO Yanping,PAN Zenghui,ZHANG Yanhong,et al. Effect of saline water irrigation on soil salt and cotton in hebei low plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2012,31(5):31-34. (in Chinese)
- 16 闵伟,侯振安,冶军,等. 灌溉水盐度和施氮量对棉花根系分布影响研究[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(4):858-867.
MIN Wei,HOU Zhen'an,YE Jun,et al. Effects of water salinity and nitrogen rate on yield,WUE and NUE of cotton under drip irrigation with saline water conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2013,19(4):858-867. (in Chinese)
- 17 马琳,李红丽,董智,等. 不同浓度 NaCl 盐处理对 4 种牧草种子萌发和生长的影响[J]. 内蒙古农业大学学报,2009,30(2):125-130.
MA Lin,LI Hongli,DONG Zhi,et al. The influence of different NaCl concentration treatment on seed germination and growth of 4 species herbages[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University,2009,30(2):125-130. (in Chinese)
- 18 冯棣,张俊鹏,孙池涛,等. 长期咸水灌溉对土壤理化性质和土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(3):171-176.
FENG Di,ZHANG Junpeng,SUN Chitao,et al. Effects of long-term irrigation with saline water on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(3):171-176. (in Chinese)
- 19 吴忠东,王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(7):64-70.
WU Zhongdong,WANG Quanjiu. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):64-70. (in Chinese)
- 20 刘春成,李毅,郭雨俊,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)
- 21 雪静,王全九,毕远杰. 咸水间歇供水土壤入渗特征[J]. 农业工程学报,2009,25(5):14-19.
XUE Jing,WANG Quanjiu,BI Yuanjie. Soil infiltration properties with slight saline water intermittent application[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(5):14-19. (in Chinese)
- 22 张俊鹏,冯棣,郑春莲,等. 咸水灌溉对土壤水热盐变化及棉花产量和品质的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(9):161-167.
ZHAN Junpeng,FENG Di,ZHENG Chunlian,et al. Effects of saline water irrigation on soil water-heat-salt variation and cotton yield and quality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(9):161-167. (in Chinese)
- 23 张俊鹏,冯棣,曹彩云,等. 咸水灌溉对覆膜棉花生长与水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(5):448-455.
ZHANG Junpeng,FENG Di,CAO Caiyun,et al. Effects of irrigation with saline water on growth and water use efficiency of film-mulched cotton plant[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2014,32(5):448-455. (in Chinese)
- 24 杨传杰,罗毅,孙林,等. 灌溉水矿化度对玛纳斯流域棉花生长影响的试验研究[J]. 资源科学,2012,34(4):660-667.
YANG Chuanjie,LUO Yi,SUN Lin,et al. Experimental study on the impacts of the irrigation water salinity on cotton growth in Manas River oasis, Xinjiang[J]. Resources Science, 2012,34(4):660-667. (in Chinese)
- 25 张俊鹏,孙景生,李科江,等. 不同灌溉方式下底墒水矿化度对棉花出苗率的影响[J]. 灌溉排水学报,2011,30(3):51-55.
ZHANG Junpeng,SUN Jingsheng,LI Kejiang,et al. Effects of water salinity before sowing on cotton emergence rate under different irrigation methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2011,30(3):51-55. (in Chinese)
- 26 冯棣,张俊鹏,申孝军,等. 不同矿化度咸水造墒对棉花出苗及幼苗生长的影响[J]. 灌溉排水学报,2013,32(6):12-14.
FENG Di,ZHANG Junpeng,SHEN Xiaojun,et al. Effects of different salinity water for increasing soil water before sowing on cotton emergence and seedling growth[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2013,32(6):12-14. (in Chinese)
- 27 王春霞,王全九,刘建军,等. 灌水矿化度及土壤含盐量对南疆棉花出苗率的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(9):28-33.
- 28 汪啸,王在敏,靳孟贵. 灌溉水中 NaCl 和 Mn 对棉花生长及产量的拮抗效应[J]. 中国生态农业学报,2014,22(5):571-577.
WANG Xiao,WANG Zaimin,JIN Menggui. Antagonistic effect of Mn and NaCl in irrigation water on cotton growth and yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2014,22(5):571-577. (in Chinese)
- 29 张文,周广威,闵伟,等. 长期咸水滴灌对棉花产量、土壤理化性质和排放 N_2O 的影响[J]. 农业环境科学学报,2014,33(8):1583-1590.
ZHANG Wen,ZHOU Guangwei,MIN Wei,et al. Effects of drip irrigation with saline water on cotton yield, soil physical and chemical properties, and soil N_2O emission[J]. Journal of Agro-Environment Science,2014,33(8):1583-1590. (in Chinese)