

灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响

唐胜强^{1,2} 余冬立^{1,2}

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 为研究淡水与微咸水降水头入渗的差异, 采用矿化度为 1.0 g/L 的微咸水与去离子淡水, 对滨海围垦区粉砂土与南京黄棕壤土进行了一维降水头积水入渗试验。试验结果表明, 采用微咸水入渗可以增大 2 种土壤的入渗能力, 且对黄棕壤土的影响更为明显。利用 Philip 入渗模型对试验数据进行拟合, 结果表明, 模型可以较为精确地描述 2 种土壤的微咸水降水头入渗过程, 且模型对黄棕壤土入渗过程的拟合精度更高。土壤水分与盐分再分布过程中, 在粉砂土上层, 微咸水灌溉对盐分的淋洗效果与淡水灌溉相近, 但在土壤深层微咸水灌溉使土壤的积盐量显著高于淡水。采用淡水灌溉的黄棕壤土, 土壤表层脱盐、深层积盐; 采用微咸水灌溉的土柱剖面均明显积盐, 且因表层土壤孔隙结构被破坏, 持水能力增强, 使表层土壤与深层土壤均积累了较高含量盐分。

关键词: 一维积水入渗; 降水头; 滨海盐碱土; 微咸水; 土壤盐分再分布

中图分类号: S152.7⁺2; S156.4⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0108-07

Influence of Water Quality on Soil Saturated Hydraulic Conductivity and Infiltration Properties

Tang Shengqiang^{1,2} She Dongli^{1,2}

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation - Drainage and Agricultural Soil - Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the differences in falling-head infiltration between fresh water and saline water, one-dimensional precipitation-head water infiltration column experiments were carried out for two soils, i. e., coastal saline-alkali soil and yellow-brown soil by using either fresh water or saline water with mineralization of 1.0 g/L. The results showed that higher infiltration rates were obtained for saline water than for fresh water and the wetting front advance was faster for both soils. It indicated that saline water could enhance the infiltration capacity of the two soil types. This was especially so for the yellow-brown soil because it had better structure and was more readily affected by salt in saline water. The analysis of Philip infiltration modeling showed that the model was able to describe process of both saline and fresh water falling-head infiltrations in both soil types. However, the model predictions of measured yellow-brown soil data were poorer than those of saline-alkali soil data. This was caused by soil sorptivity, which was a constant in the Philip model, and it could not describe the slight decrease in infiltration capacity, which occurred with increase of infiltration duration, as accurately for the yellow-brown soil as it could for the saline-alkali soil. During the redistribution processes of water and salt, the salt leaching was similar under saline and fresh water infiltration in the upper levels of saline-alkali soil columns because desalting

收稿日期: 2016-03-21 修回日期: 2016-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471180)、中央高校基本科研业务费专项(2015B14814)、河海大学优秀创新人才支持计划项目和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 唐胜强(1990—),男,博士生,主要从事农业水土过程研究,E-mail: tsq360@gmail.com

通信作者: 余冬立(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事农田水土过程与侵蚀控制研究,E-mail: shedongli@hhu.edu.cn

was the main process occurred in those layers. However, salt accumulation was evidently greater under saline water infiltration than that under fresh water infiltration in layers closer to the wetting front. The salt content was increased in the upper layers while it was decreased in the deeper layers of yellow-brown soil under fresh water infiltration; but it was increased in all of layers under saline water infiltration; and the top and bottom layers both had the highest levels of saltiness, because the salt was retained specifically in the top soil layers due to the damage in the soil structure and the increase in water retention capacity, while it was leached from middle layers into lower layer to some extent.

Key words: one-dimensional ponding infiltration; reducing head; coastal saline-alkali soil; saline water; soil salt redistribution

引言

水分入渗是组成田间水分循环过程的一个重要环节^[1],受土壤初始含水率、质地、供水强度和供水水质等因素的影响。微咸水入渗过程中,水体盐分离子与土壤胶体颗粒发生作用,改变了土壤的孔隙结构,影响土壤的入渗过程^[2]。在 0~3.2 g/L 矿化度范围内,入渗水矿化度的增加增大了盐碱土的入渗率及湿润锋推进速度^[3-4]。入渗水矿化度大于 3 g/L 时,矿化度和 Na^+ 总量共同影响土壤结构,土壤入渗能力随灌水矿化度增加而增大的幅度减小^[5]。低于 15.6 g/L 的高矿化度咸水略微降低了滨海盐碱土的入渗性能,矿化度继续增大时,入渗能力则不再降低^[6]。灌溉淡水、微咸水均能使土壤全盐量降低^[7]。李毅等^[8]根据实测资料,建立了含盐率和盐分浓度与深度之间的指数函数关系,并能较好地预测再分布达到平衡时的水盐运移特征。这些研究主要基于定水头积水入渗试验,而采用变水头入渗的试验研究还较少。微咸水入渗影响土壤理化特征,改变了现有淡水入渗公式推求的基本条件^[9],当含盐入渗水进入土壤,伴随着土壤盐分被淋洗,土壤内部不同深度土层的盐分含量随入渗水的运移逐渐出现分异,进而影响土壤入渗能力,在不同的恒定压力水头下,土壤初始入渗率、稳定入渗率、吸渗率均随土壤含盐量的增大而减小^[10]。在降水头入渗条件下,水力参数的变异也可能因入渗水头的变化,影响土壤垂向上水分和盐分的运移与分布,呈现出不同于定水头入渗的特征,因此开展微咸水降水头积水入渗试验研究有助于探讨现有入渗公式的适用性和进行土壤水盐运移的定量分析。本文采用室内一维降水头入渗试验,研究入渗水盐分含量(去离子水、矿化度为 1.0 g/L 微咸水)对不同类型土壤(滨海粉砂土、南京黄棕壤土)导水特性及水分动规律等特征的影响,以期合理确定农田微咸水灌溉技术参数提供必要的理论依据。

1 研究区概况

试验于 2015 年 7—9 月份在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室(31°86'N, 118°60'E)进行。试验区属亚热带湿润气候,冬冷夏热,四季分明,年平均降水量为 1 021.3 mm,年平均蒸发量为 900 mm,年平均气温为 15.7℃,最热月平均温度为 28.1℃,年无霜期为 237 d,年均日照时数为 2 212.8 h。

2 材料与方法

试验土壤采自江苏省南通市如东县九龙垦区,垦区地理坐标为 32°12'~32°36'N, 120°42'~121°22'E,濒临黄海,属典型的粉砂淤泥质海岸。该区地势平坦,于 2007 年围垦,未种植作物,除零星的耐盐植物外,全为裸露地面。供试土壤经自然风干,去除石块等杂质后过 1 mm 筛备用。另外,选取实验室节水园区典型菜地土壤作为对照,土壤类型为黄棕壤土。围垦区粉砂土砂粒(0.05~0.25 mm)、粉砂粒(0.002~0.05 mm)和粘粒(小于 0.002 mm)分别占 38.6%、52.9%和 8.5%,而黄棕壤土颗粒组成相应值分别为 10.8%、43.2%和 46.0%。

将供试土样按围垦区粉砂土 1.35 g/cm³、黄棕壤土 1.30 g/cm³的容重分层(每层 15 cm)均匀地装入有机玻璃土柱,土柱内直径 20 cm,高 100 cm,填土深度为 75 cm。在土柱底部留有排气孔以便消滅土柱中气体压缩对水分入渗的阻力作用。分别采用去离子淡水和矿化度为 1.0 g/L 的微咸水进行变水头入渗试验,去离子淡水由去离子纯水机制备,微咸水由 NaCl 和去离子水配制而成。围垦区粉砂土土柱入渗初始水头为 20 cm,黄棕壤土土柱入渗初始水头为 10 cm。试验开始前,在土柱顶部铺一层滤纸,并在滤纸上铺一层塑料薄膜使其贴紧土柱内壁,加入定量入渗水于薄膜上。试验开始时,记录土柱顶部水位;然后小心划破底部薄膜使积水逐渐下渗,尽可能减轻灌水对土壤表面的扰动和破坏。入渗开

始后,土柱上方水位逐步降低,按照先密后疏的原则选取时间点记录土柱上方的水位高度和湿润锋的深度。当上方入渗水全部入渗后,间隔一定时间(粉砂土为0、2、4、6 h,黄棕壤土为0、8、20 h),从土柱表层至湿润锋附近每隔 10 cm 取土样,测定土样含水率及电导率。同时,根据入渗试验的填土容重装入环刀,分别采用去离子淡水和矿化度为 1.0 g/L 的微咸水进行定水头入渗试验,根据达西定律计算获得 2 种土壤分别采用淡水与微咸水入渗下的饱和导水率。

3 结果与分析

3.1 淡水与微咸水条件下土壤饱和导水率变异

根据达西定律,入渗量决定于土壤水力传导度和土水势梯度,而土壤水力传导度又主要由土壤质地、容重、结构、含水率和基质势等因素决定^[11]。2 种土壤分别采用淡水与微咸水入渗所测定的饱和导水率如图 1 所示。粉砂土采用淡水入渗时饱和导水率为 0.114 cm/min,采用微咸水入渗时为 0.118 cm/min,比淡水入渗增大 3.5%;黄棕壤土采用淡水入渗时饱和导水率为 0.021 cm/min,采用微咸水入渗时为 0.027 cm/min,比淡水入渗增大 28.6%。同一土壤,容重越小、孔隙结构越好,导水能力越大^[12]。试验中虽然粉砂土容重大,饱和导水率却显著高于黄棕壤土,主要是由于粉砂土砂性强,质地较粗。土壤质地主要通过对土壤孔隙尺寸和分布的影响来影响土壤水力传导度,特别是通过影响大孔隙与传导孔隙

实现^[11],质地越粗,透水性能越强。

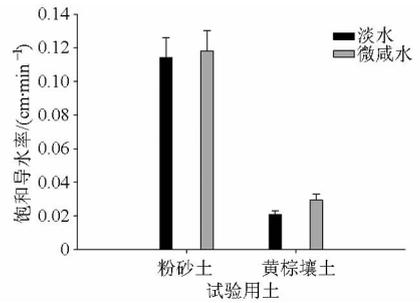


图 1 微咸水与淡水入渗条件下的饱和导水率变化
Fig. 1 Saturated hydraulic conductivity variation with fresh water and saline water infiltrations

2 种土壤在微咸水入渗下测得的饱和导水率均大于淡水测定下的饱和导水率。微咸水入渗水中的盐分可促使扩散双电子层向黏粒表面压缩,从而降低土壤颗粒间排斥力,增强土壤胶体的凝絮作用,有助于团粒结构的形成,增强土壤导水能力^[13]。同时,黄棕壤土土壤饱和导水率受入渗水中盐分影响而增大的幅度明显大于粉砂土,主要是因为粉砂土本身结构性差^[10]。

3.2 灌溉水质对降水头入渗过程参数的影响

图 2 显示了 2 种土壤微咸水与淡水入渗时累积入渗量与湿润锋随时间的变化。经过相同入渗时间,采用微咸水入渗时的累积入渗量及湿润锋推进深度均大于淡水入渗情况。粉砂土入渗开始 60 min 后,淡水入渗的累积入渗量与湿润锋推进深度分别为 16.4 cm 与 44.3 cm,微咸水入渗的累积入渗量与湿润锋推进深度分别为 17.4 cm 与 48.0 cm,累积入

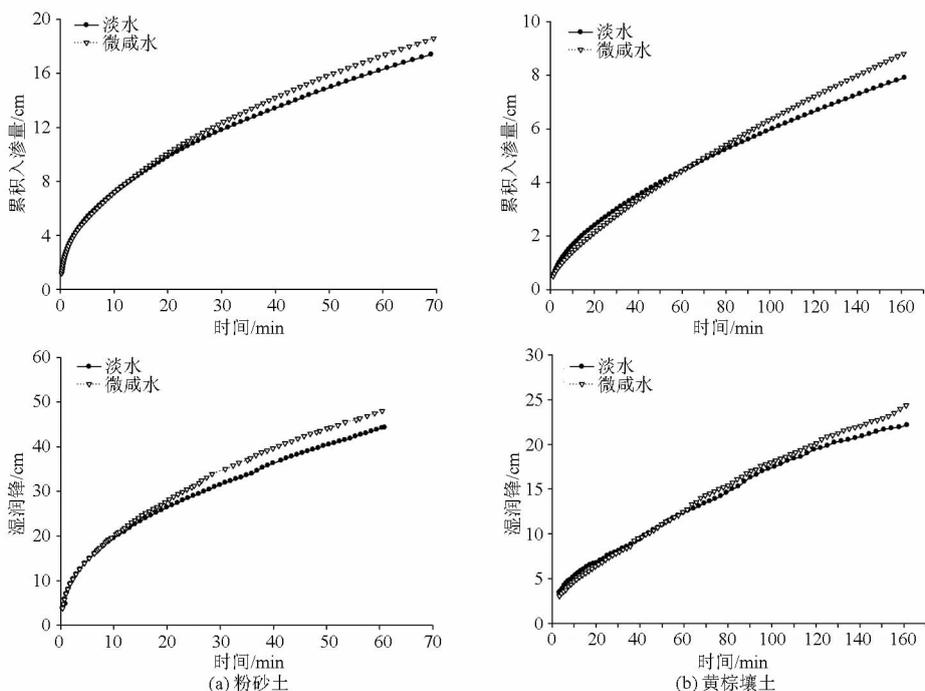


图 2 累积入渗量与湿润锋随时间的变化曲线

Fig. 2 Variations of cumulative infiltration and wetting front with time

渗量与湿润锋推进深度分别增大 6.1% 和 9.0%。黄棕壤土入渗开始 120 min 后,淡水入渗的累积入渗量与湿润锋推进深度分别为 6.7 cm 与 19.6 cm,微咸水入渗的累积入渗量与湿润锋推进深度分别为 7.2 cm 与 20.1 cm,累积入渗量与湿润锋推进深度分别增大 7.4% 和 2.5%。

为定量分析入渗水水质对入渗特征的影响,采用 Philip 入渗模型对试验资料进行拟合。对于均质土壤一维垂直入渗问题,PHILIP^[14]认为入渗过程中累积入渗量与时间呈幂指数关系,模型为

$$i = \frac{1}{2}St^{-\frac{1}{2}} + A \quad (1)$$

式中 S ——土壤吸渗率, $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$

t ——入渗时间, min

A ——稳渗率, cm/min

对于短历时的入渗,在土壤基质势占优势的情况下,Philip 入渗模型可简化为

$$i = \frac{1}{2}St^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

拟合参数如表 1 所示,拟合决定系数 R^2 均大于 0.9,表明 Philip 模型对淡水和微咸水降水头积水入渗过程具有较好的适用性,特别是对黄棕壤土入渗过程的拟合决定系数更高。相对于粉砂土,黄棕壤土结构性好、孔隙大,随着表层土壤粘粒吸水湿润,大量粘粒迅速软化膨胀并相互粘结,表层大孔隙结构坍塌破坏,土壤由疏松变密实,土壤水力传导度降低^[15]。而在土柱下层,土壤孔隙结构破坏小,使得土柱形成上层孔隙小、下层孔隙大的二元

结构。入渗水进入土壤后,上层湿土毛管吸力作用强于下层,抑制水分依靠重力下渗,且表层粘结阻碍土层内空气排出,使得黄棕壤土入渗能力随入渗过程的进行有一定程度的降低;粉砂土本身结构性差^[10],入渗能力随入渗过程未发生明显变化,而在简化的 Philip 模型中,吸渗率是常数,因此,模型对粉砂土入渗过程的拟合精度略高于黄棕壤土。

表 1 Philip 入渗模型拟合结果

Tab. 1 Philip infiltration model fitted parameters

入渗水	粉砂土		黄棕壤土	
	$S/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5})$	R^2	$S/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5})$	R^2
淡水	2.188	0.990	0.611	0.987
微咸水	2.246	0.992	0.659	0.950

采用拟合的吸渗率计算不同水质灌溉下 2 种土壤入渗率,计算值与实测数据一致性较好(图 3)。吸渗率可以表征土壤入渗能力,粉砂土采用微咸水入渗时的吸渗率比淡水增大 2.7%,黄棕壤土采用微咸水入渗的吸渗率比淡水增大 7.6%。相比于淡水入渗,2 种土壤采用微咸水时的吸渗率都增大,同时黄棕壤土增大的幅度大于粉砂土,这与饱和导水率测量试验结果相一致,说明微咸水入渗增大了土壤导水能力,且这一作用对黄棕壤土更为明显。入渗水中的微量盐分促进土壤团粒结构的形成,增强土壤导水能力,使 2 种土壤的饱和导水率和吸渗率都得以增大,这种作用对结构性较好的黄棕壤土影响更为明显。

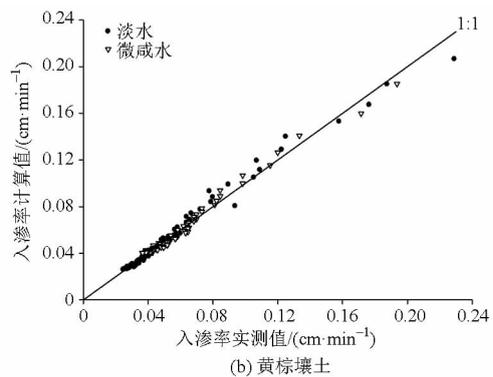
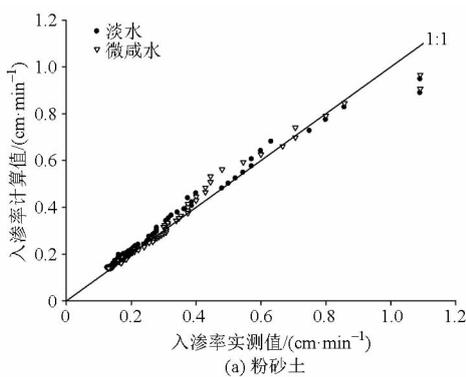


图 3 计算和实测的入渗率

Fig. 3 Calculated and measured infiltration rates

3.3 灌溉水质对水盐再分布的影响

3.3.1 水分再分布

粉砂土土柱上 20 cm 深水柱约 80 min 后全部入渗进入土柱内,而黄棕壤土土柱上 10 cm 深水柱约 220 min 后才全部入渗进入土柱。入渗结束后,水分进入再分布过程,2 种土壤剖面含水率均表现出明显的波动特征。入渗过程中水头不断下降,水分入

渗率同时受上层积水水头变化和各层土壤水势差的共同影响,从而使得垂向上水分呈现出并不连续的变化;在积水入渗结束后,因为相邻土层含水率不同而使各层土壤吸力的变化也不连续,含水率的层间波动有增大的趋势。

如图 4 所示,水分再分布过程中,黄棕壤土土柱表层含水率一直显著高于下层。由于入渗过程

中黄棕壤土上层土壤大孔隙被破坏,土壤入渗能力降低而持水能力增大,进入土层中的入渗水只能以极小的速率向下层运移,水分更多地保存在

上层土壤中。各土层土壤结构的变化导致持水性相应改变,最终影响不同深度土层上累积的盐分含量。

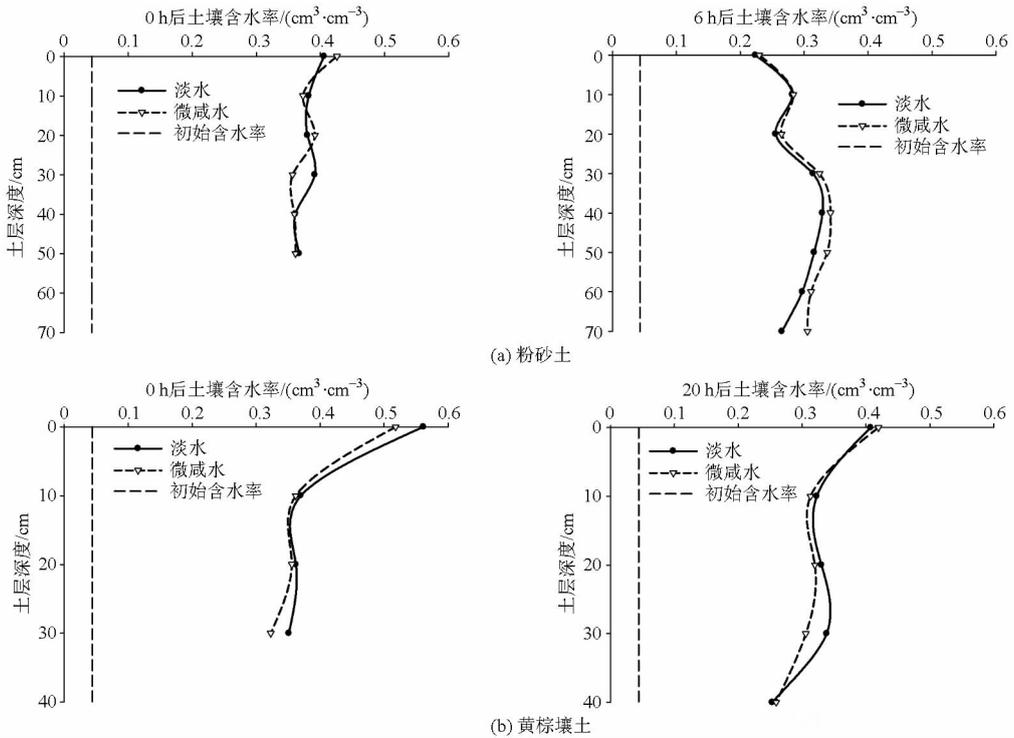


图4 粉砂土与黄棕壤土积水入渗结束后含水率剖面

Fig.4 Soil water content profiles of silt and yellow-brown soils during redistribution process

3.3.2 盐分再分布

图5显示了粉砂土土柱入渗结束0h与6h后的剖面土壤电导率分布。经入渗淋洗后,粉砂土土壤电导率在表层较小,在湿润锋处急剧增加至最大值。微咸水入渗后土壤各层电导率均大于淡水入渗处理,特别是在湿润锋附近,微咸水入渗处理下的土壤电导率显著高于淡水入渗处理,并远高于土壤初始电导率。粉砂土具有较低的持水性,入渗水能较快向下部土层运移,而水分是盐分迁移的载体和介质,使得上部土层中盐分迅速向下迁移;另外,围垦区粉砂土自身盐分含量高,无论淡水或微咸水入渗,土柱上部均以盐分淋洗为主,电导率均降至较低水

平。微咸水中盐分随入渗水进入下层土壤,相对于淡水入渗,微咸水入渗使土柱湿润锋附近盐分含量明显高于淡水入渗处理。试验结果说明,微咸水灌溉粉砂土上层脱盐效果与淡水灌溉相差不大,但在土壤下层,盐分积累十分明显。

图6为黄棕壤土土柱入渗结束后0h与6h后的剖面土壤电导率分布。黄棕壤土盐分再分布过程中,淡水入渗土柱土壤电导率随深度增加而增大,表明淡水入渗淋洗盐分向深层迁移;微咸水入渗土柱土壤电导率随深度增加先减小而后增大,表层土壤在积水结束后孔隙结构发生较大程度的破坏,持水能力增强,入渗水溶液易于滞留在表层,从而使表层

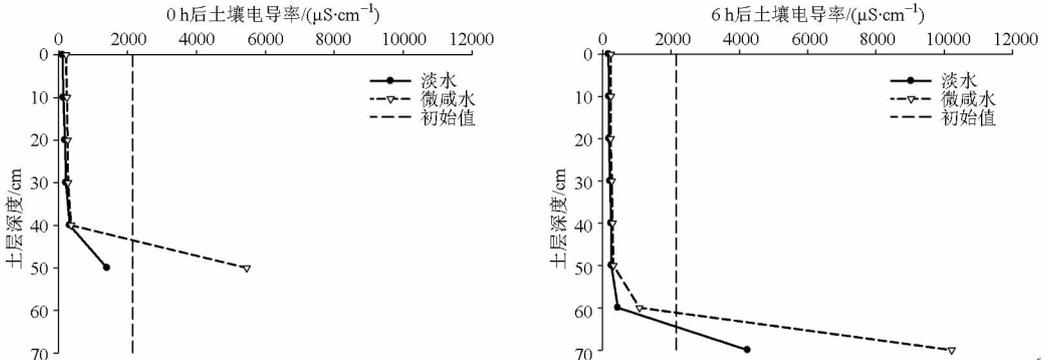


图5 粉砂土积水入渗结束0h与6h后的土壤电导率剖面

Fig.5 Soil electrical conductivity profiles in silt soil after 0h and 6h of ponding infiltration

土壤保持较高含盐量;表层以下各层土壤孔隙破坏程度变小,有利于下层水分的继续运移和盐分的淋洗,使得 10~40 cm 深度的各层土壤电导率随深度增加而增大。淡水入渗处理,土壤盐分经过 20 h 再

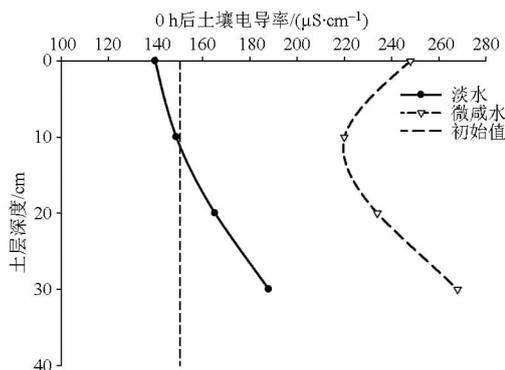


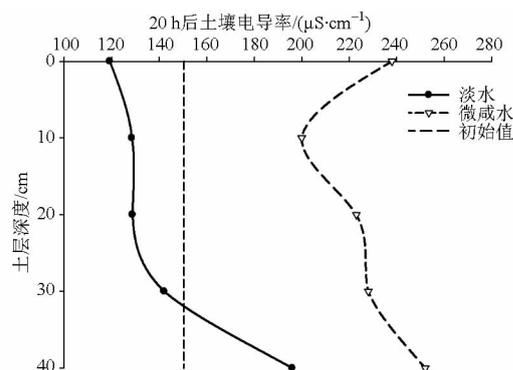
图 6 黄棕壤土积水入渗结束 0 h 与 20 h 后的土壤电导率剖面

Fig. 6 Soil electrical conductivity profiles in yellow-brown soil after 0 h and 20 h of ponding infiltration

3.4 讨论

在较高初始水头(20 cm)作用下,围垦区粉砂土在入渗界面的土壤会变密实,容重增大,孔隙率减小^[16],但土壤结构性差,使得孔隙率变化幅度较小,且因为粘粒含量低,土壤颗粒吸水后,对孔隙结构的破坏程度比黄棕壤土小,因此随着水分持续入渗,其入渗能力的衰减速度较黄棕壤土小。微咸水入渗条件下,虽然增大了土壤入渗能力,但这种增大作用随累积入渗量的增大而逐渐减弱。有研究表明,当入渗水矿化度大于 3.0 g/L 时,累积入渗量和稳渗率随矿化度的继续升高而减小,表明随着进入土壤中的 Na^+ 总量增加,土壤颗粒分散和黏粒膨胀,破坏土壤团聚体,导致土壤入渗能力增加幅度变缓^[9]。目前,较多试验研究表明随灌溉水矿化度增加入渗能力先增大后减小,至于能引起入渗能力突变的微咸水矿化度阈值,有的研究认为是 3 g/L^[17],也有研究认为是 2 g/L^[18]。试验所采用的微咸水矿化度为 1.0 g/L,虽然没有达到 2.0 g/L 的标准,但当累积入渗量持续增大,土壤中 Na^+ 总量相应增加后,所引起的破坏土壤团聚体结构的作用已逐渐显现。同时,土壤盐分增加导致土壤持水能力增大^[19],这就使土壤入渗能力虽大于淡水入渗,但入渗能力的衰减速度却要略高于淡水入渗处理;同时由于黄棕壤土初始盐分含量明显小于粉砂土, Na^+ 对黄棕壤土团聚体结构的破坏作用更为明显,因此黄棕壤土在微咸水下入渗能力的衰减速度要大于粉砂土。有研究得出 Philip 模型在入渗时间较短情况下计算精度比较高,但当入渗时间较长,Philip 模型的计算精度出现较大偏差^[20]。较长入渗历时情况下,土壤的入渗能力逐渐发生变化,而吸渗率作为常数不足以反映这种变化,简化的 Philip 入渗模型对长历时入渗过程

分布后,仅在湿润锋附近电导率高于初始值,而微咸水入渗处理下,土柱 0~40 cm 各层的电导率均显著高于初始值,表明微咸水灌溉使黄棕壤土土柱剖面均处于积盐过程。



的拟合精度就会变差。试验采用的黄棕壤土入渗历时比粉砂土长,结构变化的影响逐渐显现,入渗能力的改变使得采用 Philip 模型拟合的精度要低于粉砂土。因此,在较长历时微咸水积水入渗过程中,土壤水分与盐分含量的不断变化使土壤入渗能力也在一定程度上发生变化,微咸水变水头入渗下土壤水盐运移过程机制相对于淡水入渗过程更加复杂。生产实践中,微咸水灌溉往往历时较长,水头变化更多样,灌溉有间歇,水质有交替,在这样的复杂条件下,土壤结构,特别是表层土壤结构和导水特性必将表现出较强的时间变异性。从精准农业的水资源高效利用角度来看,土壤结构或导水性能的季节(时间)变异在田间水盐运移过程及其模拟中是否具有重要影响,如何影响,尚需加以研究。

4 结论

(1) 微咸水灌溉下土壤入渗能力均增大,黄棕壤土导水率增大更为明显。相对于淡水入渗,粉砂土和黄棕壤土采用微咸水入渗时,饱和导水率分别增大 3.5% 与 28.6%,土壤吸渗率分别增大 2.7% 与 7.6%。利用 Philip 模型可以精确描述 2 种土壤降水头入渗过程,相对于粉砂土,黄棕壤土入渗过程拟合精度略高。

(2) 水分再分布过程中,2 种土壤剖面水分呈现波动特征;粉砂土含水率在湿润锋附近较大,黄棕壤土表层含水率高于湿润锋处。表明黄棕壤土表层孔隙结构破坏减弱了水分入渗,表层持水能力增强。盐分再分布过程中,微咸水入渗处理下粉砂土土柱上层电导率与淡水入渗处理无显著差别,但湿润锋处电导率显著大于淡水入渗处理,表明在围垦区粉砂土上层,微咸水灌溉对盐分的淋洗效果与淡水灌

溉相近,在土壤深层微咸水灌溉使盐分大量积累。黄棕壤土土柱在淡水入渗处理下各层电导率随深度增加而增大;微咸水入渗处理下电导率随深度增加先减小后增大,且均高于土壤初始值。表明淡水灌

溉使土壤表层脱盐、土壤深层积盐;微咸水灌溉使黄棕壤土土柱剖面均处于积盐过程,且表层土壤因孔隙结构破坏导致持水能力增强,使表层土壤与深层土壤均积累了较高含量盐分。

参 考 文 献

- 1 余冬立,刘营营,刘冬冬,等. 土壤容重对海涂垦区粉砂土水分垂直入渗特征的影响研究[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(6): 749-761.
SHE Dongli, LIU Yingying, LIU Dongdong, et al. Study on impact of soil bulk density on infiltration properties of silt soil in coastal reclamation regions[J]. Research of Agriculture Modernization, 2012, 33(6): 749-761. (in Chinese)
- 2 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 3 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)
- 4 吴忠东,王全九,苏莹,等. 不同矿化度微咸水对土壤入渗特征的影响研究[J]. 人民黄河, 2005, 27(12): 49-50.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu, SU Ying, et al. Study on the influence of slightly salty with different degree of mineralization to soil infiltration[J]. Yellow River, 2005, 27(12): 49-50. (in Chinese)
- 5 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): 21-25.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Infiltration characteristics of brackish water by one dimensional algebraic model [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 21-25. (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 sail water in coastal saline soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 250-253. (in Chinese)
- 7 张余良,王正祥,廉晓娟,等. 滨海盐土灌水脱盐动态的土壤质地和水质差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 515-520.
- 8 李毅,邵明安,王文焰,等. 有限深土体中再分布的土壤水盐运移试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 40-43.
LI Yi, SHAO Ming'an, WANG Wenyan, et al. Experimental study on characteristics and forecasting of soil water and salt movement affected by redistribution[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 40-43. (in Chinese)
- 9 王全九,毕远杰,吴忠东. 微咸水灌溉技术与土壤水盐调控方法[J]. 武汉大学学报:工学版, 2009, 42(5): 559-564.
WANG Quanjiu, BI Yuanjie, WU Zhongdong. Irrigation technique of saline water and regulation and control method of soil water and salt[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(5): 559-564. (in Chinese)
- 10 SHE Dongli, GAO Xuemei, WANG Peng, et al. Comparison of soil hydraulic properties with different levels of soil salinity and sodicity[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(8): 5351-5360.
- 11 泰勒 S A(美). 物理的土壤学[M]. 华孟, 陈志雄, 译. 北京: 农业出版社, 1983.
- 12 王小彬,蔡典雄,高绪科,等. 不同农业措施对土壤持水特征的影响及其保水作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(4): 297-304.
WANG Xiaobin, CAI Dianxiong, GAO Xuke, et al. Effect of various agricultural practices on soil water retention[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1996, 2(4): 297-304. (in Chinese)
- 13 GAWAD G A, ARSLAN A, GAIHBE A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999-2000)[J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1-2): 39-53.
- 14 PHILIP J R. The theory of infiltration: 1. the infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345-357.
- 15 郭会敏,樊贵盛. 有压入渗条件下土壤结构与相对稳定入渗率间的关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 104-106.
GUO Huimin, FAN Guisheng. Relation between soil structure and the relative stable infiltration rate under the condition of surface water pressure infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 104-106. (in Chinese)
- 16 马娟娟,孙西欢,李占斌. 入渗水头对土壤入渗参数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(5): 53-55.
MA Juanjuan, SUN Xihuan, LI Zhanbin. Effect on soil infiltration parameters of infiltration head[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(5): 53-55. (in Chinese)
- 17 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): 64-75.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effect on both soil in filtration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 64-75. (in Chinese)
- 18 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(5): 84-87.
GUO Tailong, CHI Daocai, WANG Quanjiu, et al. Experimental study on salt and water movement affected by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 84-87. (in Chinese)
- 19 FENG Yongjun, NIE Junhua, ZHANG Hong. Correlation between soil water retention capability and soil salt content [J]. Pedosphere, 2000, 10(3): 275-280.
- 20 王全九,来剑斌,李毅. Green-Ampt模型与 Philip入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13-16.
WANG Quanjiu, LAI Jianbin, LI Yi. Comparison of Green-Ampt model with Philip infiltration model[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 13-16. (in Chinese)