

微咸水矿化度对重度盐碱土壤 入渗特征的影响

刘小媛¹,高佩玲^{1,2},张晴雯³,王乃江¹,赵连东¹

(1.山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000; 2.山东理工大学 资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000;
3.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100086)

摘要:通过微咸水室内一维垂直入渗试验,分析了淡水以及4种不同矿化度(2,3,4,5 g·L⁻¹)微咸水对重度盐碱土壤累积入渗量、湿润锋运移深度、土壤含水率、入渗历时、入渗速率的影响。结果表明:累积入渗量、湿润锋运移深度、土壤含水率随微咸水矿化度的增加呈现增大的趋势,但与淡水相比,2,3,4,5 g·L⁻¹微咸水的累积入渗量、湿润锋运移深度随入渗时间的变化差异较小;同一土层,土壤含水率大小比较:淡水 < 5 g·L⁻¹ < 3 g·L⁻¹ < 2 g·L⁻¹ < 4 g·L⁻¹;在微咸水灌溉条件下,累积入渗量与湿润锋运移深度呈线性关系。采用 Kostiakov 模型, Philip 模型和 Green-Ampt 模型模拟微咸水入渗过程,结果显示, Kostiakov 模型可以更好地描述重度盐碱土入渗率与入渗时间的关系。

关键词:微咸水;湿润锋;累积入渗量;土壤含水率;入渗率模型

中图分类号: S152.7⁺2; S278 **文献标志码:** A

Effect of mineralization degree of infiltration water on infiltration characteristics of severely saline-alkali soil

LIU Xiao-yuan¹, GAO Pei-ling^{1,2}, ZHANG Qing-wei³, WANG Nai-jiang¹, Zhao Lian-dong¹

(1. Institute of Agriculture Engineering and food science, Shandong University of technology, Zibo, Shandong 255049, China;

2. Institute of Resources and Environment engineering, shandong University of technology, Zibo, Shandong 255049, China;

3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100086, China)

Abstract: One-dimension vertical water infiltration experiments were conducted using a vertical soil column. The study was conducted to study the relations between cumulative infiltration, wetting front depth, soil moisture content, infiltration rate and infiltration time under different mineralization degree of infiltration water. The results showed that cumulative infiltration, wetting front depth, soil moisture content increased with the mineralization degree of infiltration water. However, compared with fresh water, the changes of wetting front depth and cumulative infiltration of 2, 3, 4 g·L⁻¹ and 5 g·L⁻¹ is smaller. In the same depth of soil, soil moisture content was characterized by fresh water < 5 g·L⁻¹ < 3 g·L⁻¹ < 2 g·L⁻¹ < 4 g·L⁻¹. Cumulative infiltration was in good linear relationship with wetting front depth under brackish water irrigation. The Kostiakov infiltration model, Philip infiltration model and Green-Ampt infiltration model was compared in terms of quantifying saline water infiltration process, by which Kostiakov model was proposed.

Keywords: brackish water; wetting front depth; cumulative infiltration; infiltration moisture content; infiltration model

我国淡水资源缺乏,时空分布不均,但浅层地下微咸水资源比较丰富。依据微咸水分类标准,我国一般认为含盐量在 2~5 g·L⁻¹ 范围内的水资源为微咸水^[1]。据统计,中国地下微咸水资源约 200 亿

m³,其中可开采水量为 130 亿 m³,大部分存在于地下 10~100 cm 处,宜于开采利用。山东省处于我国黄淮海平原的中部,是我国严重缺水省份之一,水资源已经成为制约山东省社会经济发展的“瓶颈”。山

收稿日期:2016-11-03

修回日期:2016-11-29

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07203-007);国家自然科学基金(41402208);山东省自然科学基金(ZR2011EL020);国家级大学生创新创业训练计划项目(201510433047);山东省自然科学基金项目(ZR2016EEM34)

作者简介:刘小媛(1991—),女,山东青岛人,硕士研究生,研究方向为农业水土工程。E-mail:402983329@qq.com。

通信作者:高佩玲(1973—),女,新疆石河子人,教授,博士,研究方向为水文及水资源。E-mail:gaopljx@163.com。

张晴雯(1975—),女,宁夏人,研究员,博士,研究方向为土壤侵蚀和面源污染控制研究。E-mail:zhangqingwen@caas.cn。

东省矿化度大于 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水资源主要分布在黄泛平原区和滨海平原区,总面积 $18\,091\text{ km}^2$,其中潍坊、东营、滨州分布面积较大,科学合理开发利用微咸水资源,对于缓解淡水资源短缺,扩大农业水源,抗旱增产有着极其重要的作用。

近年来,国内外一些学者对微咸水灌溉与土壤水盐运移及作物生长之间的关系做了相关研究。在微咸水灌溉对土壤理化性质的影响方面,苏莹等^[2-5]研究表明,在一定矿化度范围内,土壤入渗能力随着微咸水矿化度的增加而增大;但超过一定的矿化度,随着矿化度的增加,带入土壤中钠离子数量增加,土壤导水能力下降。任长江等^[6]研究了不同初始氯化钠含量对入渗特性的影响,认为土壤初始含盐量越高,入渗湿润锋、累积入渗量和入渗率越小。毕远杰等^[7]得出入渗水头对入渗系数、入渗指数、累积入渗量以及湿润锋推进距离都有显著的影响,呈现出显著性起伏与相对平稳的交替趋势。针对微咸水灌溉对作物生长以及产量的影响,学者们主要研究了作物对盐分的抵抗、吸收及其在作物体内的转移^[8-20]。研究表明:微咸水灌溉在带入土壤水分的同时带入盐分,不仅造成盐渍化的潜在危机,而且可能对植株生长造成直接影响。以上研究主要集中于对微咸水灌溉下非盐碱土壤水盐运移特征的研究,对于微咸水灌溉条件下重度盐碱耕地土壤水盐运移规律的研究尚未报道。

本文以山东省东营市重度盐碱土为研究对象,分析微咸水灌溉条件下土壤水盐运移规律。通过室内试验,研究淡水及 4 种不同矿化度 ($2, 3, 4, 5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 微咸水对重度盐碱土累积入渗量、湿润锋运移深度、土壤含水率、入渗历时、入渗速率的影响;分析微咸水灌溉条件下,土壤水入渗模拟模型的适用性。以上研究将为重度盐碱耕地微咸水合理高效利用,提供理论和数据支持。

1 材料与方法

1.1 供试土样的基本性质

供试土壤取自山东省东营市垦利县的棉花耕地,从表层至 60 cm 深度每隔 20 cm 分层取土,土样经过风干、碾压、筛分 (2 mm 筛)、均匀混合后制备成室内试验土样。对土壤的基本物理化学性质进行测定,风干土含水率为 1.00% ,饱和含水率为 33.63% , $\text{EC}_{5:1}$ 为 $0.965\text{ ms}\cdot\text{cm}^{-1}$,初始含盐量为 $4.099\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,按照我国华北平原土壤盐碱化程度分级标准,供试土壤为重度盐碱化土壤。利用 Mastersizer3000 型激光粒度仪测定土壤颗粒组成,颗粒组成见表 1,且按照国际制土壤质地分类标准对供试土壤的质地进行划分。在取扰动土的同时,利用 200 mm^3 环刀分层 ($0\sim 20, 20\sim 40, 40\sim 60\text{ cm}$) 取原状土,在室内测定土壤容重为 $1.41\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和田间持水率为 27.85% 。

表 1 供试土壤颗粒组成及分类

Table 1 Granulometric composition and classification of the experimental soil

土壤 Soil	颗粒组成 Grain composition / %			土壤质地 Soil texture
	砂粒 ($2\sim 0.02\text{ mm}$)	粉粒 ($0.02\sim 0.002\text{ mm}$)	黏粒 ($< 0.002\text{ mm}$)	
	Sand grain	Silt	Cosmid	
盐碱土 Saline-alkali soil	75.70	21.53	2.78	砂质壤土 Sandy loam

1.2 灌溉水量及水质

灌水量根据 SL207-98《节水灌溉技术规范》^[21] 中的有关参数和试验地的实际情况采用下式计算:

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

式中, H 为土壤计划湿润层深度,由于在地下水位较高的盐碱化地区,计划湿润层深度不宜大于 60 cm ,故 H 取 60 cm ; $\theta_{\max}$ 为土壤计划湿润层所允许的最大含水率(占干土重),一般为田间持水率,取 27.85% ; θ_0 为土壤计划湿润层初始含水率(占干土重),取 1.00% ; γ 为土壤容重,取 $1.41\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。由公式(1)计算得到一次实验的灌溉水量为 22.71 cm 。

室内试验所采用的不同矿化度的微咸水是利用

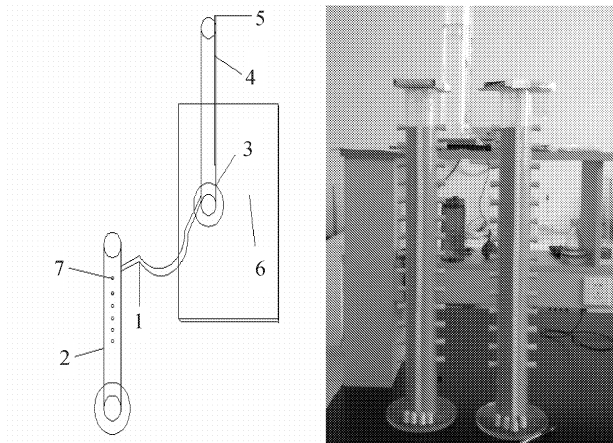
化学试剂配制而成,根据试验水质需要,利用研究区浅层地下水的化学组成进行配水。不同矿化度微咸水所需各种可溶性盐的量见表 2。同时使用蒸馏水作为淡水 ($0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 对照。

1.3 试验设备

试验设备主要包括试验土柱和供水设备。试验土柱采用有机玻璃材料制成,内径为 8 cm ,高为 90 cm ,土柱侧面 10 cm 以下,每隔 5 cm 开一圆形取样口,其直径为 15 mm ,便于取土进行土壤含水率分析;利用马氏瓶供水,其内径为 8 cm ,高为 50 cm ,供水水头控制在 2 cm 左右。在试验前按照当地平均容重分 16 层(每层 5 cm 厚)均匀填装。试验装置如图 1 所示。

表 2 不同矿化度水质化学组成
Table 2 The chemical composition of different saline water

矿化度/(g·L ⁻¹) Mineralization	NaHCO ₃ /(g·L ⁻¹)	Na ₂ SO ₄ /(g·L ⁻¹)	CaCl ₂ /(g·L ⁻¹)	MgCl ₂ /(g·L ⁻¹)	NaCl /(g·L ⁻¹)
5.001	0.898	0.828	0.647	0.923	1.705
4.000	0.718	0.662	0.518	0.738	1.364
3.001	0.539	0.497	0.383	0.554	1.023
2.000	0.359	0.331	0.259	0.369	0.682



注:1.输水软管;2.试验土柱;3.马氏瓶;4.进气管;5.进气口;6.桌面;7.取土口
Note:1, water hose; 2, soil column; 3, markov bottle; 4, air inlet vent; 5, air inlet; 6, desk; 7, soil extraction port

图 1 一维垂直积水入渗试验装置图

Fig.1 Experiment device diagram of one dimension
vertical infiltration test

1.4 试验过程

将初始含水量为 1% 的供试土样按土壤容重 1.41 g·cm⁻³分 16 层(每层 5 cm 厚)均匀装入土柱,每层装入质量为 358.00 g 土壤后,利用压实器压实土壤,使其达到规定高度 5 cm,填装完毕后,在土表放置与土柱截面积相同的滤纸,以防止灌水时对表土的冲刷。利用马氏瓶供水,进行垂直入渗试验。

在试验过程中,按照先密后疏的时间间隔定时观察、记录土柱湿润锋迁移深度和马氏瓶水位。当灌水定额入渗结束后,立即从土表至湿润锋处每隔 5 cm 沿垂向提取土样,用烘干法测定土壤含水量。

1.5 土壤入渗过程模型简介

土壤水分入渗指降水或灌溉水由地表进入土壤的过程,属于土壤水分运动的一部分,并与地表产流、降雨后土壤水再分配、农田水分最优调控、土壤侵蚀、养分随水分的迁移、农业面源污染等问题密切相关。

土壤入渗模型能够表示入渗速率随时间变化规

律,从而对土壤入渗过程作出定性或定量的评价。国内外一些学者对此进行了研究,并提出了许多入渗模型,目前影响较大的有 Green – Ampt 模型, Kostiakov 模型, Kostiakov – Leiwis 模型, philip 模型和 Horton 模型等^[22-26]。基于实测数据,利用以下三种模型进行分析。

(1) Kostiakov 入渗模型:

$$I = Kt^\alpha \tag{2}$$

式中, I 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); K , α 为入渗参数。

$$i(t) = Kt^{-\alpha} \tag{3}$$

式中, $i(t)$ 为 t 时刻的入渗率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); K 为入渗系数,表示第一时间末的土壤入渗率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); t 为入渗时间(min)。

Kostiakov 入渗方程是一个典型的经验公式,模型参数较容易通过实测资料或试验获取,因而在田间灌溉,短历时入渗研究和实践中得到普遍应用。

(2) Philip 入渗模型:

$$I = 1/2St^{-0.5} + A \tag{3}$$

式中, I 为入渗率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); S 为土壤吸湿率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.5}$); t 为入渗时间(min); A 为常数($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$),通常代表稳定入渗率或稳定下渗强度。

(3) Green – Ampt 入渗模型:

$$i(t) = K_s(Z_f + S_f + H)/Z_f \tag{4}$$

式中, $i(t)$ 为 t 时刻的入渗率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); K_s 为土壤表征饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); H 为土壤表面积水深度(cm); S_f 为湿润锋面吸力(cm); Z_f 为湿润锋深度(cm)。

该模型研究的是初始干燥土壤在薄层积水条件下入渗问题。基本假定:入渗时存在明确水平湿润锋面,同时具有固定不变的吸力 S_f ,土壤含水率分布呈现阶梯状,湿润区为饱和含水量,湿润锋前为初始含水率。

本文将采用这些模型,对微咸水灌溉条件下重度盐碱土入渗过程进行模拟,分析其适用性。

2 结果与分析

2.1 微咸水矿化度对累积入渗量的影响

累积入渗量指在一定时间内通过单位面积的总水量。不同矿化度微咸水灌溉下,累积入渗量随入渗时间的变化如图 2。5 个处理的累积入渗量均随着时间的延长而增加,但增长的速度逐渐变缓,灌水定额入渗结束时入渗历时大小顺序为: $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}<3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}<4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}<2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}<\text{淡水}$ 。在相同入渗历时内,随着入渗水矿化度的增加,累积入渗量也随之增加。造成这种变化规律的原因是微咸水改善了土壤结构,增强了土壤的导水能力,使累积入渗量也随之增加。但与淡水相比, $2,3,4,5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水累积入渗量随入渗时间的变化差异较小,曲线基本重合,主要原因可能是研究土样是重度盐碱土壤,离子含量丰富,且为砂质壤土,大孔隙多,入渗能力较强,故入渗水矿化度增加对其影响相对较小。

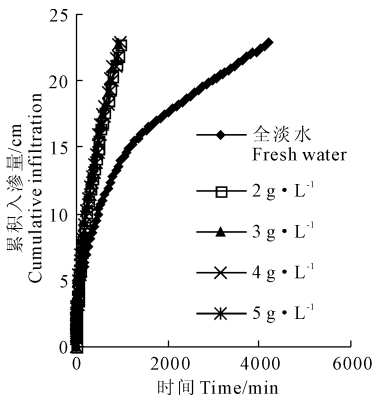


图 2 不同矿化度微咸水累积入渗量随时间的变化
Fig.2 Relationship between cumulative infiltration and time under different mineralization degrees of infiltration water

由图 2 可知,不同矿化度累积入渗量随入渗时间的增加呈现幂函数增加趋势,符合 Kostiakov 模型对累积入渗量 I 与入渗时间 t 之间关系的表述。因此,利用 Kostiakov 模型对试验数据进行拟合,拟合结果如表 3 所示,其中 R^2 为决定系数。

由表 3 可知,采用 Kostiakov 模型模拟不同矿化度微咸水灌溉下累积入渗量与时间关系时,决定系数均大于 0.99,幂函数关系成立。在不同矿化度微咸水灌溉条件下,入渗指数 α 变化较小,在 0.498 ~ 0.514 之间。但淡水与微咸水的入渗指数 α 差异明显,淡水低于微咸水。随着入渗水矿化度的增加,累积入渗量也随之增加。总体而言,在不同入渗水矿

化度下,入渗系数 K 变化幅度不大。

表 3 不同矿化度下累积入渗量与时间 t 拟合结果
Table 3 The fitting results between cumulative infiltration and time

参数 Parameters	矿化度 Mineralization/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)				
	0(CK)	2	3	4	5
K	0.6132	0.7033	0.6558	0.6026	0.67220
α	0.4418	0.4982	0.5144	0.5202	0.5092
R^2	0.9955	0.9991	0.9997	0.9992	0.9985

2.2 微咸水矿化度对湿润锋运移深度的影响

湿润锋指在湿润带的末端,土壤含水量突变,与干层土有明显的界面。不同矿化度微咸水入渗过程中湿润锋随入渗时间的变化过程见图 3。不同矿化度微咸水在入渗初期,湿润锋运移深度增加较快,当入渗持续一段时间后,湿润锋的增加速率逐渐变小。在相同入渗历时内,随着入渗水矿化度的增加,湿润锋运移深度也相应增大。这表明:在微咸水入渗过程中,在一定浓度范围内,随着微咸水矿化度的增加,土壤中的盐分浓度不断增大,土壤颗粒之间的排斥力降低,进而促进颗粒间絮凝,改变了土壤团粒结构,增加了土壤颗粒的团聚性,使土壤中大孔隙增加,提高了水分在土壤中的入渗能力。

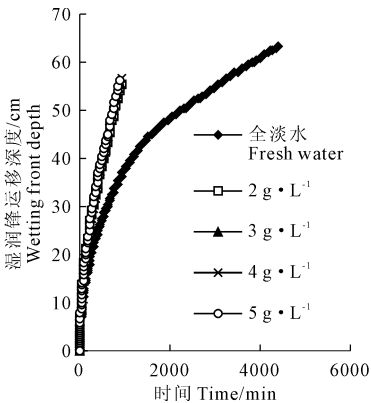


图 3 不同矿化度微咸水湿润锋随时间的变化
Fig.3 Relationship between wetting front depth and time under different mineralization degree of infiltration water

2.3 湿润锋与累积入渗量的关系

由图 3 可知,湿润锋与时间亦呈幂函数变化趋势关系,对不同矿化度微咸水湿润锋与时间进行了拟合,得到幂函数系数 A, β ,拟合结果见表 4。

由表 4 可知,微咸水灌溉下, t 的指数非常小,可近似认为利用微咸水灌溉时,湿润锋与累积入渗量成线性关系,即 $H = CI$ 。

表 4 湿润锋与累积入渗量的关系

Table 4 Relationship between wetting front of soil and cumulative infiltration volume

参数 Parameters	矿化度 Mineralization/(g·L ⁻¹)				
	0(CK)	2	3	4	5
A	0.1441	1.6165	1.598	1.5311	1.7824
β	1.2732	0.5137	0.5192	0.5212	0.5005
H/I	0.2350 <i>t</i> ^{0.8314}	2.2985 <i>t</i> ^{0.0155}	2.4367 <i>t</i> ^{0.0048}	2.5408 <i>t</i> ^{0.001}	2.6516 <i>t</i> ^{-0.0087}

对湿润锋与累积入渗量关系进行拟合,见表 5。随着入渗水矿化度的增加,拟合系数 *C* 也随之增大,即累积入渗量随着矿化度的增加而增大。拟合结果与试验所得结果一致。

表 5 湿润锋与累积入渗量 H-I 的拟合结果

Table 5 The fitting results between wetting front depth and cumulative infiltration

项目 Item	矿化度 Mineralization/(g·L ⁻¹)			
	2	3	4	5
<i>C</i>	0.3968	0.3981	0.3916	0.3955
<i>R</i> ²	0.9994	0.9998	0.9998	0.9997

2.4 微咸水矿化度对土壤含水率分布特征的影响

土壤含水率指近地表的含水率。不同矿化度微咸水灌溉条件下,实测土壤含水率与土层深度间变化关系见图 4。由图 4 可知,由于入渗过程中土壤表面积水的存在,土壤表层含水率基本为饱和含水率,随着入渗深度的增加,土壤质量含水率呈陡峭的下降趋势,在湿润锋处达到最小值。随着微咸水矿化度的增加,同一土层的含水率呈现增大的趋势。矿化度为 4 g·L⁻¹ 的微咸水入渗结束后土壤含水率最大,大于 2,3,5 g·L⁻¹,均远远大于淡水。这主要是由于随着微咸水矿化度的增加,由入渗水带入土壤中的 Na⁺ 数量随之增加,Na⁺ 使土壤颗粒收缩,胶体颗粒的分散和膨胀,破坏土壤团聚体结构,导致土壤导水能力降低,从而导致土壤含水率减少。

2.5 入渗率模型分析

土壤入渗率又称土壤渗透速率,其在任意时刻的大小 *i(t)* 与此时代表处的土壤水分通量 *q(0, t)* 相等,反映了土壤的入渗性能。

目前的土壤入渗模型大多针对淡水入渗过程建立起来的,这些模型是否适合描述微咸水入渗过程需要深入研究。因此本研究分别用 philip 模型, Green - Ampt 模型, Kostiakov 模型对不同矿化度下微咸水入渗试验数据进行拟合,比较三种模型的适用性。采用三种模型拟合后的入渗参数、相关性以及显著性见表 6。

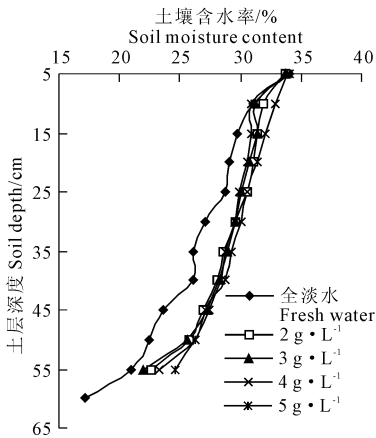


图 4 不同矿化度下土壤含水率随土层深度的变化

Fig.4 Moisture content of soil profile under different mineralization degree of infiltration water

从表 6 可以看出,采用 philip, Green - Ampt, Kostiakov 模型对不同矿化度下微咸水入渗试验进行模拟,决定系数都在 0.94 以上。其中, Philip 模型, Green - Ampt 模型在对淡水入渗过程拟合时,得到的稳定入渗率 *A*, 土壤表征饱和导水率 *K_s*, 湿润峰处的土壤水吸力 *S_f* 为负数, 与实际情况不符。Kostiakov 模型中, 入渗指数 *α* 随入渗水矿化度的增加而降低, 入渗系数 *k* 随入渗水矿化度的增加呈现增加的趋势, 说明微咸水矿化度越高, 入渗率衰减越慢。与 Green - Ampt 模型和 Philip 模型相比, Kostiakov 公式的拟合结果更符合于入渗的真实过程。

3 结论与讨论

山东省东营市重度盐碱土壤在华北地区非常典型, 本文对微咸水一维垂直入渗试验中微咸水矿化度对重度盐碱土壤入渗特征的影响进行了研究。通过研究得到以下结论:

1) 累积入渗量和湿润锋运移深度随微咸水矿化度的增加呈现增大的趋势, 但是增加幅度在减小。不同矿化度微咸水湿润锋与累积入渗量呈线性关系, 累积入渗量、湿润锋运移深度与入渗时间均呈幂函数关系。

表 6 三种模型拟合分析结果
Table 6 The analysis results of three models

模型 Model	参数 Parameters	矿化度 Mineralization/(g·L ⁻¹)				
		0(CK)	2	3	4	5
Kostiakov 模型 Kostiakov model	α	0.6542	0.4766	0.4696	0.4563	0.4515
	k	0.4574	0.3329	0.3340	0.3025	0.3066
	R^2	0.9688	0.9863	0.9905	0.9820	0.9849
	显著性 Significance	* *	* *	* *	* *	* *
Philip 模型 Philip model	S	0.5852	0.7310	0.7208	0.6888	0.6540
	A	-0.0037	0.0003	0.0019	0.0019	0.0050
	R^2	0.9881	0.9693	0.9919	0.9802	0.9665
	显著性 Significance	* *	* *	* *	* *	* *
Green - Ampt 模型 Green - Ampt model	K_s	-0.0058	0.0050	0.0083	0.0085	0.0096
	S_f	-57.51	87.79	49.27	41.72	41.17
	R^2	0.9873	0.9585	0.9793	0.9703	0.9482
	显著性 Significance	* *	* *	* *	* *	* *

注 Note: * 0.01 < P < 0.05; * * P < 0.01.

2) 不同矿化度微咸水土壤含水率随着土层深度的增加呈现减小的趋势。随着入渗的进行,湿润锋不断前移,含水率的分布曲线由比较陡直逐渐变为相对平缓。当微咸水矿化度增加时,同一土层的含水率亦呈现增大的趋势。

3) 采用 Kostiakov 模型, Philip 模型和 Green - Ampt 模型模拟了微咸水在重度盐碱土中的入渗过程。研究结果表明, Kostiakov 模型可以很好地描述重度盐碱土壤入渗率与入渗时间的关系。

本研究对于华北地区利用微咸水进行灌溉具有一定的指导意义。重度盐碱耕地土壤在不同微咸水灌溉模式下的水盐运移规律,将在后续研究中进一步分析。

参 考 文 献:

[1] 张启海,周玉香.微咸水灌溉发展的基础与措施探讨[J].中国农村水利水电,1998,(10):12-13.

[2] 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[J].人民黄河,2005,27(12):49-50.

[3] 刘婷珊,高艳明,李建设.不同矿化度微咸水入渗下土壤水盐运移特征研究[J].灌溉排水学报,2014,33(3):68-72.

[4] 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(Z1):84-87.

[5] 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,2008,6(7):1-4,17.

[6] 任长江,白丹,周文,等.土壤初始含盐量对水分入渗特性的影响[J].干旱区研究,2014,31(2):222-225.

[7] 毕远杰,孙西欢,马娟娟,等.不同入渗水头作用下一维垂直入渗特性[J].山西水利,2006,(2):75-78.

[8] 马文君,程琴娟,李良涛,等.微咸水灌溉下土壤水盐动态对作物产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):73-80.

[9] 王克全,何新林,王振华,等.不同灌水处理对滴灌春小麦生长及产量的影响研究[J].节水灌溉,2010,(9):41-42.

[10] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J].农业机械学报,2015,46(12):117-126.

[11] 栗涛,王全九.淡水入渗模型对微咸水入渗过程的适用性[J].排灌机械工 程报,2014,32(1):80-85.

[12] 吴忠东,王全九.不同初始含水率条件下的微咸水入渗试验[J].农业机械学报,2010,41(增刊):53-58.

[13] Dudely L M, Ben - Gal A, Shani U. Influence of plant, soil, and water on the leaching fraction[J]. Vadose Zone Journal, 2008,7(2):420-425.

[14] 樊丽琴,杨建国,尚红莺,等.淋洗水质和水量对宁夏龟裂碱土水盐运移的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):258-262.

[15] 陈书飞,何新林,汪宗飞,等.微咸水滴灌研究进展[J].节水灌溉,2010,(2):6-9.

[16] 毕远杰,王全九,雪静.微咸水造墒对油葵生长及土壤盐分分布的影响[J].干旱区资源与环境,2010,24(3):183-189.

[17] 邵建荣,张风华,董艳,等.干旱区微咸水滴灌条件下典型土壤盐碱化影响因素研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(6):216-221.

[18] 胡文明.微咸水灌溉对作物生长影响的试验研究[J].灌溉排水学报,2007,26(1):86-88.

[19] 寇伟峰,刘兆普,陈铭达,等.不同浓度海水对油葵幼苗光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J].西北植物学报,2006,26(1):73-77.

[20] 来剑斌.土壤水分运特征及其参数确定[M].西安:西安理工大学,2003.

[21] 水利部农村水利司,水利部农田灌溉研究所.SL207-98.节水灌溉技术规范[S].北京:中国标准出版社,1998.

[22] Or D, Silva H R. Prediction of surface irrigation advance using soil intake properties[J]. Irrigation Science, 1996,16(4):159-167.

[23] Horton R E. An Approach toward a physical interpretation of infiltration - capacity[J]. Soil Sci,1940,5(3):399-417.

[24] Green W, Ampt G. Studies on soil physics. The flow of air and water through soils[J]. J Agric Sci, 1911,4(1):1-24.

[25] Philip J. The theory of infiltration :Theinfiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957,83(5):345-357.

[26] Smith RE. The infiltration envelope; Results from a theoretical infiltrometer[J]. Journal of Hydrology, 1972,17:1-22.