

咸淡水分配比例对盐碱土壤水分入渗特征与脱盐效果的影响

王乃江¹, 高佩玲^{1,2}, 赵连东¹, 刘小媛¹, 潘英华³

(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. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025)

摘要:以黄河三角洲重度盐碱化土壤为研究土样,在室内对其进行垂直一维积水入渗试验,研究 5 种咸淡水分配比例下累积入渗量、湿润锋深度和入渗率随时间的变化规律及灌溉后土壤脱盐深度、脱盐率。结果表明:(1)首轮微咸水入渗结束后,第二轮淡水灌溉的过程中,在同一时间,与全部微咸水灌溉相比,累积入渗量、湿润峰深度和入渗率均产生了明显的下降,并且淡水灌水量越多,下降的幅度越大,但其仍显著大于全部淡水灌溉;(2)累积入渗量与湿润锋深度呈良好的线性关系,回归方程的决定系数 R^2 均大于 0.99;与 Green-Ampt 模型和 Philip 模型相比,Kostiakov 公式更适于描述入渗率与时间的关系;(3)咸淡水分配比例对土壤脱盐深度影响较小,但对脱盐深度内的脱盐率影响显著,在一定深度范围内,咸、淡水先后灌溉下土壤脱盐率远远大于全部微咸水灌溉,与全部淡水灌溉差异较小,但随着土层深度的继续增加,其土壤脱盐率明显小于全部淡水灌溉,与全部微咸水灌溉基本一致。

关键词:重度盐碱化土壤;咸淡水分配比例;土壤水分入渗特征;土壤脱盐效果;黄河三角洲

中图分类号:S156.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2016)06-0100-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2016.06.018

Influence of Distribution Proportion Between Brackish and Fresh Water on Water Infiltration Characteristics and Desalting Effect in Saline-Alkali Soil

WANG Naijiang¹, GAO Peiling^{1,2}, ZHAO Liandong¹, LIU Xiaoyuan¹, PAN Yinghua³

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo,

Shandong 255000; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025)

Abstract: Taken the severe saline-alkali soil of the Yellow River Delta as research soil sample, the vertical one-dimensional ponding infiltration experiments were conducted in the laboratory to study the change laws of cumulative infiltration, wetting front depth and infiltration rate with time, soil desalting depth, and desalting rate after irrigation under five distribution proportions between brackish and fresh water. The results showed that: (1) After the first round of brackish water infiltration finished, compared with all brackish water irrigation at the same time, cumulative infiltration, wetting front depth and infiltration rate obviously declined in the process of the second round of fresh water irrigation, in addition, the more fresh water used for the irrigation, the more obviously these parameters declined, but these parameters were still significantly higher than those for all fresh water irrigation. (2) Cumulative infiltration had good linear relationship with wetting front depth, with all coefficients of determination of regression equations being greater than 0.99. Kostiakov formula was more suitable for describing the relationship between infiltration rate and time than Green-Ampt model and Philip model. (3) Distribution proportion between brackish and fresh water had slight effect on soil desalting depth, but it had significant effect on desalting rate within soil desalting depth. Soil desalting rate under successive brackish and fresh water irrigation was far greater than all brackish water irrigation and was slightly different from that under all fresh water irrigation within a certain depth range, but it was obviously less than that under all fresh water irrigation and essentially equal

收稿日期:2016-05-31

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

第一作者:王乃江(1990—),男,山东省菏泽人,硕士研究生,主要从事农业水土工程研究。E-mail:wangnjhz@163.com

通信作者:高佩玲(1973—),女,河南省禹州人,博士,教授,主要从事农业水土工程研究。E-mail:gaoplj@163.com

to that under all brackish water irrigation when soil layer depth further increased.

Keywords: severe saline-alkali soil; distribution proportion between brackish and fresh water; infiltration characteristics of soil water; soil desalting effect; Yellow River Delta

黄河三角洲土地资源丰富,且黄河冲积年均造地 1 000 hm² 左右,是中国东部沿海后备土地资源最多、开发潜力最大的地区^[1],在实现全国新增 1 000 亿斤粮食生产能力规划中起着关键作用^[2],但受河流、陆地、海洋等多种动力系统的作用,该地区土壤盐碱化问题非常严重^[3],拥有未利用盐碱化土地 18 万 hm²^[4]。因此,寻求合理、高效的改良措施对于提高土壤环境质量、增加作物产量具有重要的现实意义。

改良盐碱地的首要任务是降低土层盐分含量,常用的方法和技术包括水利工程、农艺、化学和生物措施等^[5]。其中,以淡水淋洗为基础的水利工程措施是治理盐碱地最有效的方法^[6],但在淡水资源匮乏的黄河三角洲推广实施难度较大^[7],尤其是近年来,随着黄河两岸社会经济的发展和生态环境用水量的增加,黄河下游来水量不断减少^[8],导致该地区淡水资源供需矛盾愈加尖锐。然而,黄河三角洲地下(微)咸水储量丰富,并且埋深普遍较浅,大部分地区为 1~3 m^[7,9],开采潜力大,为缓解该地区淡水资源短缺和灌溉淋洗改良盐碱地提供了一种有效的途径。

与传统的淡水灌溉淋洗相比,由于(微)咸水含有大量的化学元素,其灌溉不可避免的会增加土壤的盐分含量,但如果方法得当,(微)咸水淋洗可有效控制土壤盐分,防治作物盐害^[10-11]。冬季咸水结冰灌溉是一种新型的盐碱地改良方法,并取得了良好的效果^[6,12-14],此方法充分利用季节温度的变化规律,在冬季低温条件下,对盐碱地进行咸水灌溉,使地表覆盖冰层从而影响土体内部的冻融过程,减缓潜在积盐作用,并利用春季冰层融化时咸水先流出,淡水后流出的原理淋洗土壤盐分,达到改良盐碱地的目的^[13]。但冬季咸水结冰灌溉的实施受气象因素影响较大,只能在冬季进行和明显降低春季土壤的盐分含量,而黄河三角洲春秋季节多干旱,雨量小,加之气温高、风速大、蒸发强,使占土地面积 75% 以上的盐化土及盐土地表盐分积累加重,出现土壤返盐的情况^[15]。

为了在淡水缺乏的黄河三角洲充分利用地下丰富的(微)咸水资源来改良盐碱地,本文以山东省东营市垦利县的重度盐碱化土壤为研究对象,依据冬季咸水结冰灌溉后不同矿化度融水先后入渗淋洗盐碱地的原理,在室内进行垂直一维积水入渗试验的过程中,将灌水定额分配成不同比例的两份,一份为微咸水,一份为淡水,先后进行咸、淡水灌溉,研究累积入渗量、湿润锋深度与入渗率随时间的变化规律和入渗

结束后土壤的脱盐深度与脱盐率。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤于 2015 年 5 月 17 日取自山东省东营市垦利县,从土表至 60 cm 深度每隔 20 cm 分层取土,其中原状土取回后,立即测定土壤容重、饱和含水率和田间持水率,分别为 1.41 g/cm³,33.63% 和 27.85%;扰动土经风干、碾压、过筛(2 mm)、均匀混合后制备成室内试验土样,其初始含水率为 1.00%,砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)的含量分别为 75.70%,21.53% 和 2.78%,全盐量为 4.099 g/kg,属于重度盐碱化土壤^[16]。

1.1.2 灌溉水质与水量 试验用水包括淡水和微咸水,其中淡水为实验室内的蒸馏水,矿化度为 0 g/L;微咸水按照取样地区地下水的盐分组成特点,利用 NaHCO₃、Na₂SO₄、CaCl₂、MgCl₂ 和 NaCl 室内配制而成,矿化度为 3 g/L,Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻和 HCO₃⁻ 的浓度分别为 0.711,0.140,0.140,1.283,0.336,0.391 g/L。

灌水定额的计算公式^[17]为:

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

式中: H 为土壤计划湿润层深度,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%; $\gamma_{\pm}$ 为土壤容重,取 1.41 g/cm³。由公式(1)计算得到一次试验的灌溉水量为 22.71 cm。

1.2 试验装置与方案

1.2.1 试验装置 本试验的装置主要有土柱和供水设备。土柱采用厚为 0.5 cm 的有机玻璃材料制作而成,内直径为 8 cm,高为 90 cm;土柱侧面 10 cm 以下,每隔 5 cm 有一直径为 1.5 cm 的圆形取样口。利用马氏瓶供水,其内直径为 8 cm,高为 50 cm,供水水头控制在 2 cm 左右。土柱与马氏瓶外壁均标有刻度,用于观测马氏瓶水位和湿润锋深度。

1.2.2 试验方案 以全部淡水和微咸水灌溉为对照,设置了 3 种咸淡水分配比例,分别为 2:1,1:1 和 1:2,即把灌水定额分成 2 轮入渗,第一轮为微咸水,第二轮为淡水,单轮入渗结束后,立即进行下一轮灌溉,共 5 个处理,每个处理 3 个重复,具体的试验方案见表 1。

表 1 不同咸淡水分配比例下灌溉试验方案

处理	全部微咸水灌溉	咸：淡=2：1	咸：淡=1：1	咸：淡=1：2	全部淡水灌溉
微咸水灌溉量	22.71	15.14	11.355	7.57	0
淡水灌溉量	0	7.57	11.355	15.14	22.71

1.3 试验过程与测试指标

试验土样按照取样地 0—60 cm 土层的平均容重 1.41 g/cm³,分 16 层均匀填充到土柱中,每层 5 cm,装土高度为 80 cm。在填充好的土表放置一张与土柱内截面积相同的滤纸,以防止灌水时对表土的冲刷,并且在试验开始之前,打开土柱下部的取样口,避免入渗过程中土壤中的空气封闭。

试验过程中,定时记录马氏瓶水位和土柱中的湿润锋深度。当灌水定额入渗结束后,立即从土表至湿润锋处每隔 5 cm 提取土样,进行土壤盐分含量的测定,每个土样均做 3 次平行测定,具体的测定方法^[18]为:将烘干的土样(从土柱中取出来的新鲜土样,置于(105±2)℃的恒温烘箱中烘烤 12 h)磨碎,过 1 mm 筛后,准确称量 6 g 置于 50 ml 的离心管中,加无二氧化碳蒸馏水 30 ml,盖紧瓶塞,振荡 3 min,静置澄清后,利用 DDS-11A 型电导率仪测其上清液的电导率,并校正为 25℃下的电导率,然后转化为土壤含盐量。

1.4 基本理论

土壤水分入渗模型和入渗模型参数是农田灌水水流分析及数值模拟的重要依据,本文采用 3 种常用的入渗模型研究入渗率与时间的关系^[19]。

(1)Green-Ampt 模型。当入渗历时较长或积水深度较浅时,Green-Ampt 入渗模型可表示为:

$$i=[K_s(\theta_s-\theta_i)S_f]\frac{1}{I}+K_s \tag{2}$$

式中: i 为地表入渗率(cm/min); K_s 为土壤表征饱和导水率(cm/min),有时称饱和导水率,主要取决于土壤封闭空气对入渗的影响程度^[20]; S_f 为湿润锋处的土壤水吸力(cm); θ_s 为土壤饱和含水率(cm³/cm³); θ_i 为土壤初始含水率(cm³/cm³); I 为累积入渗量(cm)。

(2)Philip 模型:

$$i=\frac{1}{2}St^{-0.5}+A \tag{3}$$

式中: i 为地表入渗率(cm/min); S 为土壤吸渗率(cm/min^{0.5}); A 为稳定入渗率(cm/min); t 为入渗时间(min)。

(3)Kostiakov 公式:

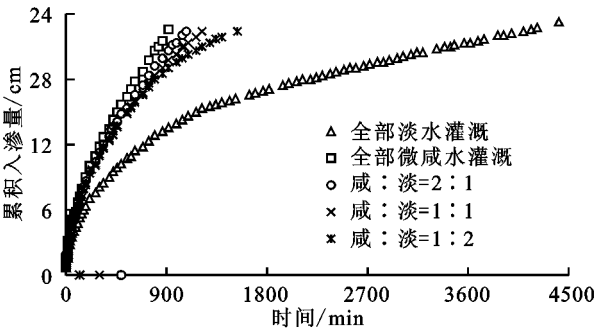
$$i=Kt^{-a} \tag{4}$$

Kostiakov 入渗方程是一个典型的经验公式,式中: i 为地表入渗率(cm/min); t 为入渗时间(min); K 、 a 是由试验资料拟合得到的参数,其中 a 为入渗指数,反映了入渗率的衰减速度,其值越大,入渗率衰减的越快。

2 结果与分析

2.1 咸淡水分配比例对土壤水分入渗特征的影响

2.1.1 对累积入渗量的影响 累积入渗量是入渗开始后一定时间内,通过地表单位面积入渗到土壤中的总水量,了解其与入渗历时的关系,对于分析灌溉、降雨入渗等问题十分重要^[21]。由图 1 可知,所有处理的累积入渗量均随时间的延长而增加,但增加的速度逐渐减慢,灌水定额入渗结束所用的时间全部淡水灌溉(4 404 min)>咸：淡=1：2(1 363 min)>咸：淡=1：1(1 040 min)>咸：淡=2：1(967 min)>全部微咸水灌溉(906 min)。在入渗初期,不同咸淡水分配比例下土壤水分运动差异性较小,累积入渗量基本一致;随着入渗历时的增加,首轮微咸水入渗结束,进入第二轮淡水灌溉后,在同一时间,与全部微咸水灌溉相比,累积入渗量产生了一定程度的下降,并且淡水所占灌水定额的比例越大,下降的幅度越明显,但在所有处理中,全部淡水灌溉下入渗率最小,主要原因是首轮微咸水灌溉下土壤溶液中的盐分浓度逐渐增大,扩散双电子层向黏粒表面压缩,土壤颗粒之间的排斥力降低,进而增强了土壤胶体的絮凝能力,有助于形成团粒结构,使得土壤导水能力增强^[22],为后续入渗创造了有利条件。



注:首轮入渗结束的时间,分别为 500,307,131 min。下同。

图 1 不同咸淡水分配比例下累积入渗量随时间的变化曲线

2.1.2 对湿润锋深度的影响 水分下渗过程中,土壤被湿润的先头部位与干土层形成的明显交界面称为湿润锋,其与土表的垂直距离即为湿润锋深度。由图 2 可知,从整体上看,在同一入渗历时,全部微咸水灌溉下湿润锋深度>咸：淡=2：1>咸：淡=1：1>咸：淡=1：2>全部淡水灌溉,对比图 1 可知,其与累积入渗量随时间的变化规律基本一致,为了定量研究两者的关系,利用通过原点的线性方程进行拟合:

$$I=nZ_f \tag{5}$$

式中: I 为累积入渗量(cm); Z_f 为湿润锋深度(cm); n

为拟合参数。具体的拟合结果见表 2。

由表 2 可知,累积入渗量与湿润锋深度呈良好的线性关系,回归方程的决定系数 R^2 均在 0.99 以上。拟合参数 n 值的变化规律为全部微咸水灌溉>咸:淡=2:1>咸:淡=1:1>咸:淡=1:2>全部淡水灌溉,说明当灌水定额入渗结束时,湿润锋深度与淡水所占灌水定额的比例呈正比,造成这一现象的原因,一方面是淡水所占灌水定额的比例越大,入渗历时越长,土壤水分有更多的时间垂直向下运动;另一方面是微咸水改变了土壤结构,提高了土壤的持水能

力^[23],使湿润锋推进受阻,其中微咸水入渗量越大,受阻的程度越严重。

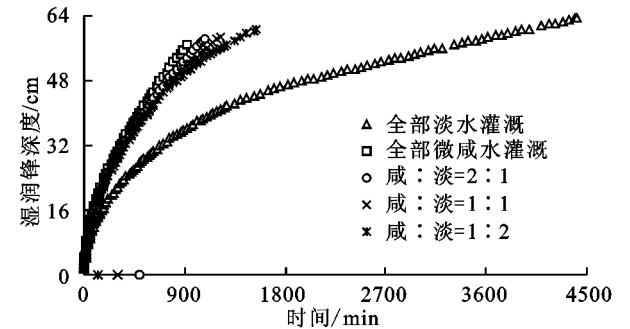
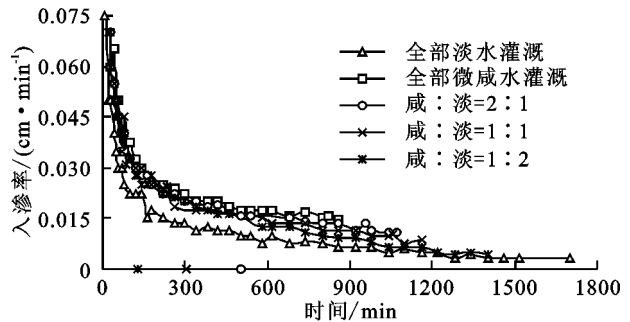


图 2 不同咸淡水分配比例下湿润锋深度随时间的变化曲线

表 2 不同咸淡水分配比例下累积入渗量与湿润锋深度线性方程的拟合结果

处理	全部微咸水灌溉	咸:淡=2:1	咸:淡=1:1	咸:淡=1:2	全部淡水灌溉
n	0.3902	0.3832	0.3802	0.3758	0.3665
R^2	0.9990	0.9997	0.9997	0.9990	0.9996

2.1.3 对入渗率的影响 入渗率是指单位时间内通过地表单位面积入渗到土壤中的水量,其在任意时刻的大小与此时地表处的土壤水分通量相等^[19],反映了土壤的入渗性能,图 3 为咸淡水分配比例对入渗率的影响。



注:在 1 700 min 左右,淡水入渗达到相对稳定状态,故其 1 700 min 后入渗率随时间的变化过程在图中没有显现出来。

图 3 不同咸淡水分配比例下入渗率随时间的变化曲线
风干土积水入渗,在起始阶段由于土壤基质势梯

度大,水分运动受重力势影响较小,入渗率保持在较高水平,随着时间的延长,重力势逐渐取代基质势,入渗率不断减小,直至基质势为零,入渗趋于稳定^[24],该规律如图 3 所示,不同咸淡水分配比例下入渗率在前 200 min 左右急剧降低,之后缓慢减小,最终趋近于某一定值,即稳定入渗率。在入渗初期,不同处理之间的入渗率差异较小;随着入渗的继续进行,在同一时间,与全部微咸水灌溉相比,第二轮淡水灌溉对土壤水分具有明显的减渗作用,并且淡水灌水量越多,减渗作用越大,但另一方面,由于首轮微咸水灌溉改变了土壤孔隙分布特征,使土壤中大孔隙所占比例增加,为后期淡水入渗提供了有利通道^[25],故全部淡水灌溉下入渗率<咸:淡=1:2<咸:淡=1:1<咸:淡=2:1<全部微咸水灌溉。

基于实测数据,利用 Green-Ampt 模型、Philip 模型和 Kostikov 公式拟合入渗率随时间的变化过程,结果见表 3。

表 3 不同咸淡水分配比例下入渗模型的拟合结果

处理	Green-Ampt 模型			Philip 模型			Kostiakov 公式		
	S_f	K_s	R^2	S	A	R^2	K	a	R^2
全部微咸水灌溉	49.2727	0.0083	0.9793	0.7208	0.0019	0.9919	0.3340	0.4696	0.9905
咸:淡=2:1	188.3288	0.0024	0.9929	0.7018	0.0001	0.9939	0.3319	0.4858	0.9948
咸:淡=1:1	88.7403	0.0043	0.9714	0.6508	0.0011	0.9813	0.3415	0.5041	0.9894
咸:淡=1:2	-170.0950	-0.0029	0.9865	0.7312	-0.0034	0.9890	0.4731	0.5897	0.9684
全部淡水灌溉	-57.5102	-0.0058	0.9873	0.5852	-0.0037	0.9881	0.4574	0.6542	0.9688

由表 3 可知,Kostiakov 公式最适于描述不同咸淡水分配比例下入渗率随时间的变化规律,拟合方程的决定系数 R^2 均大于 0.96;入渗指数 a 的大小与淡水所占灌水定额的比例呈正比,说明全部淡水灌溉下入渗率的衰减速度>咸:淡=1:2>咸:淡=1:1>咸:淡=2:1>全部微咸水灌溉,与图 3 展现出来的结果基本一致。尽管 Green-Ampt 模型和 Philip 模型

的拟合效果较好,决定系数 R^2 在 0.971 4~0.993 9 之间,但在拟合的具体方程中,部分参数(湿润锋处的土壤水吸力 S_f 、饱和导水率 K_s 和稳定入渗率 A)出现负值,不符合垂直一维积水入渗的实际情况,模型在应用的过程中有待对参数进一步优化。

2.2 咸淡水分配比例对土壤脱盐效果的影响

2.2.1 对土壤脱盐深度的影响 无论咸淡水分配比

例如何,微咸水灌溉必定会增加土壤整体的盐分含量,但另一方面,由于水分的淋洗作用,会把土层分为土壤脱盐区(土壤含盐量低于初始水平)和积盐区(土壤含盐量高于初始水平)两部分^[26],从而在一定深度内改良盐碱土壤。

由图 4 可知,不同咸淡水分配比例下土壤脱盐深度的变化规律为全部淡水灌溉>咸:淡=1:1>咸:淡=1:2>咸:淡=2:1>全部微咸水灌溉,但所有处理的土壤脱盐深度在 45.01~50.13 cm 之间,变幅为 5.12 cm,不足整个土壤计划湿润层(60 cm)的 1/10,并且土壤脱盐深度系数(土壤脱盐深度与入渗结束时湿润锋深度的比例)均在 0.78 左右,说明咸淡水分配比例对土壤脱盐深度的影响相对较小。

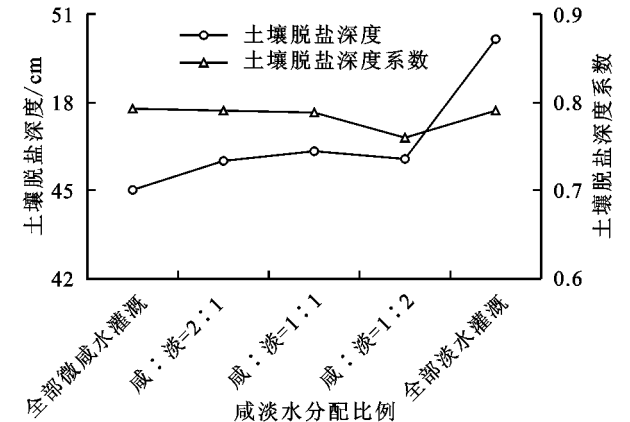


图 4 不同咸淡水分配比例下土壤脱盐深度与土壤脱盐深度系数

2.2.2 对土壤脱盐率的影响 为了进一步研究不同咸淡水分配比例下水分对土壤盐分的淋洗作用,计算土壤脱盐深度内的脱盐率,具体的计算方法为:

$$\text{脱盐率} = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中: S_1 为土壤初始含盐量(g/kg); S_2 为灌溉后的土壤含盐量(g/kg),计算结果见图 5。由图 5 可知,在一定深度范围内,咸淡水分配比例为 2:1,1:1,1:2 的土壤脱盐率与全部淡水灌溉差异较小,明显大于全部微咸水灌溉,并且淡水所占灌水定额的比例越高,这一深度范围越大,说明与直接利用微咸水灌溉相比,先灌微咸水后灌淡水的灌溉模式在一定程度上可以显著提高盐碱土壤的脱盐效果;但当土层深度大于 10,20,30 cm 时,咸淡水分配比例为 2:1,1:1,1:2 的土壤脱盐率分别出现了一个明显的下降过程,之后脱盐率远远小于全部淡水灌溉,与全部微咸水灌溉基本一致。故在实际灌溉中,需要根据作物根系的主要活动层选择合适的咸淡水分配比例,土壤耕层(0—20 cm)作为作物根系分布最多的区域^[16],对于作物的生长发育具有重要的作用,为了使其脱盐充分,咸淡水分配不能大于 1:1。

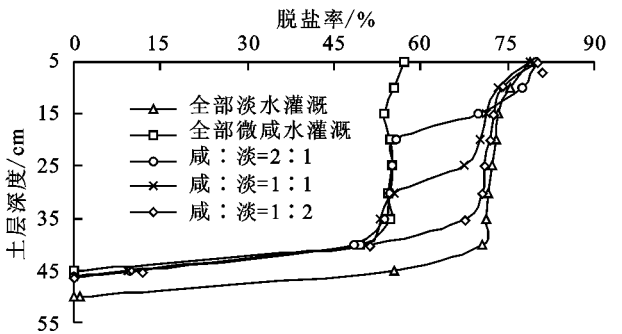


图 5 不同咸淡水分配比例下土壤脱盐深度内脱盐率的垂直变化特征

3 结论

研究土样取自山东省东营市垦利县,通过室内土柱模拟试验,从理论上分析了一次灌溉中不同咸淡水分配比例对土壤水分入渗特征与脱盐效果的影响,得到的结论为:

(1)在入渗初期,不同咸淡水分配比例下土壤水分入渗特征差异较小,但随着时间的推移,在同一入渗历时,淡水所占灌水定额的比例越大,土壤水分的人渗能力越弱,故全部微咸水灌溉入渗结束所用时间<咸:淡=2:1<咸:淡=1:1<咸:淡=1:2<全部淡水灌溉。

(2)在整个入渗过程中,累积入渗量与湿润锋深度呈良好的线性关系($R^2 > 0.99$);通过 Green-Ampt 模型、Philip 模型和 Kostikov 公式的回归分析发现,对于黄河三角洲重度盐碱化土壤,Kostikov 公式模拟不同咸淡水分配比例下入渗率随时间的变化规律效果最优,适用性更强。

(3)在一定深度范围内,与全部微咸水灌溉相比,先灌微咸水后灌淡水的灌溉模式可以显著提高土壤的脱盐效果,使脱盐率与全部淡水灌溉差异较小,为了使土壤耕层(0—20 cm)脱盐充分,淡水所占灌水定额的比例不能小于 0.5。但在盐碱土壤的实际灌溉中,对于农作物来说,分析其生长发育与土壤脱盐后盐分含量的响应关系具有更重要的意义,此问题会在后续的工作中进一步研究。

参考文献:

[1] 常春艳,赵庚星,李晋,等.黄河三角洲典型生态脆弱区土壤退化遥感反演[J].农业工程学报,2015,31(9):127-132.

[2] 武兰芳,柏林川,欧阳竹,等.山东省环渤海平原区粮食产出潜力与技术途径分析[J].中国生态农业学报,2014,22(6):682-689.

[3] 王卓然,赵庚星,高明秀,等.黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征[J].生态学报,2016,36(4):1040-1049.

[4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.黄河三角洲高效生态经济区发展规划[EB/OL].(2009-12-01)[2016-05-25].
<http://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20091223/00123f3eabca0c9bf64b01.pdf>,2009.

- [5] 岳燕,林启美,郭维娜,等.不同土层加入生物质炭对盐分淋洗的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):62-67.
- [6] 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.
- [7] 庞桂斌,张双,傅新,等.黄河三角洲地区农业节水分区与适宜节水模式[J].中国农村水利水电,2016(4):21-24,28.
- [8] 赵天义,崔天娇.黄河下游水量减少带来的问题及治理对策[J].人民黄河,2013,35(2):1-2,5.
- [9] 安乐生,赵全升,叶思源,等.黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应[J].水科学进展,2011,22(5):689-695.
- [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] 张建国,徐新文,雷加强,等.水质对咸水滴灌土壤盐分淋洗过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):52-55,61.
- [12] 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.
- [13] 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(增刊):187-192.
- [14] 李宪,李亚光.不同矿化度咸水冬季结冰灌溉对滨海盐碱土的改良效果[J].中国水土保持科学,2015,13(3):64-68.
- [15] 田家怡,王秀凤,蔡学军,等.黄河三角洲湿地生态系统保护与恢复技术[M].青岛:中国海洋大学出版社,2005:3.
- [16] 桑以琳.土壤学与农作学[M].北京:中国农业出版社,2005:151.
- [17] 汪志农.灌溉排水工程学[M].第2版.北京:中国农业出版社,2010:40.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000:22-24,179-187.
- [19] 樊贵盛,李雪转,李红星.非饱和土壤介质水分入渗问题[M].北京:中国水利水电出版社,2012:5-6,22,23.
- [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.
- [21] 张振华,谢恒星,刘继龙,等.气相阻力与土壤容重对一维垂直入渗影响的定量分析[J].水土保持学报,2005,19(4):36-39.
- [22] Gawad G A, Arslan A, Gaihbe A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999—2002) [J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1/2): 39-53.
- [23] 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.
- [24] 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):749-752,761.
- [25] 吴忠东,王卫华,张照录,等.咸淡组合淋洗对土壤水盐分布特征的影响[J].排灌机械工程学报,2014,32(12):1085-1090.
- [26] 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):64-69,75.
- (上接第 99 页)
- [5] Polyakov V O, Nearing M A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions[J]. Catena, 2003, 51(1): 33-43.
- [6] Merten G H, Lafren J M, Bradford J M. Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(3): 861-868.
- [7] Léonard J, Richard G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength[J]. Catena, 2004, 57(3): 233-249.
- [8] Nouwakpo S K, Huang C H. A fluidized bed technique for estimation soil critical shear stress[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76: 1192-1196.
- [9] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. Tracing sediment dynamics and sources in eroding rills with rare earth elements[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(3): 287-294.
- [10] Lei T W, Zhang Q W, Yan L J, et al. A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill[J]. Geoderma, 2008, 144(3): 628-633.
- [11] 雷廷武,张晴雯,赵军,等.细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J].土壤学报,2002,39(4):476-482.
- [12] 雷廷武,张晴雯,赵军.陡坡细沟含沙水流剥蚀率的试验研究及其计算方法[J].农业工程学报,2001,17(3):24-27.
- [13] 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J].土壤学报,2002,39(6):882-886.
- [14] 张光辉,刘宝元,何小武.黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J].水土保持学报,2005,19(4):48-52.
- [15] 丁文峰.紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学参数关系研究[J].泥沙研究,2010(6):16-22.
- [16] 雷俊山,杨勤科,郑粉莉.黄土坡面细沟侵蚀试验研究及土壤抗冲性评价[J].水土保持通报,2004,24(2):1-4.
- [17] Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow[J]. Soil Technology, 1992, 5(4): 289-301.
- [18] 雷廷武,张晴雯,闫丽娟.细沟侵蚀物理模型[M].北京:科学出版社,2009.