

微咸水微润灌溉下土壤水盐运移特性研究

张珂萌¹ 牛文全^{1,2} 汪有科^{1,2} 薛万来^{2,3} 张子卓¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
3. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要: 为探明土壤水分和盐分在利用微咸水进行微润灌溉条件下的运移情况,采用室内土箱模拟试验方式,设置2.0、2.5、3.0、3.5、5.0 g/L 5种不同矿化度处理,以蒸馏水处理作对照,共入渗72 h。结果表明:入渗结束时在不同方向上的最大运移距离随矿化度增大呈先增大后减小趋势,在3.0 g/L处理下达到最大值,且微咸水处理的湿润锋运移距离均大于蒸馏水处理;将累积入渗量代入 Kostiakov 入渗公式,入渗系数随矿化度的增大呈先增大后减小趋势,入渗指数不断减小;土壤电导率以微润带为轴心向四周不断增大,在湿润锋处达到最大值,脱盐区与湿润体形状相关,呈圆环状分布;入渗结束后土壤剖面平均含盐量与蒸馏水处理之间无显著性差异,脱盐半径随矿化度的增大呈线性递减趋势;利用微润灌进行灌溉,土壤盐分存在表聚和底聚现象,且表层积盐更为严重。

关键词: 矿化度; 入渗; 水盐分布; 微润灌溉

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0175-08

Characteristics of Water and Salt Movement in Soil under Moistube-irrigation with Brackish Water

ZHANG Kemeng¹ NIU Wenquan^{1,2} WANG Youke^{1,2} XUE Wanlai^{2,3} ZHANG Zizhuo¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to explore the movement characteristics of water and salt in soil under moistube-irrigation with brackish water, an indoor soil box simulation experiment was conducted under five different mineralization degree treatments with distilled water as control in 72 h. The results showed that with the rise of mineralization degree, the maximum migration distance presented a trend of first increase and then decrease in different directions and reached the highest when the degree of mineralization was 3.0 g/L. And the distances of wetted front under treatments of brackish water were all greater than that of distilled water. Then the cumulative infiltration was substituted into the Kostiakov infiltration equation and the infiltration coefficient showed a trend of rise first and then fall with the increase of mineralization degree, while infiltration index continued to decline. The soil conductivity was increased constantly to all around with the moistube-irrigation zone as axis and reached the peak at the wet front. The desalting area was related to the shape of the wetted body and distributed in circular shape. There was no significant difference in the average salt content of soil profile between brackish and distilled water after infiltration. The desalination radius was decreased linearly with the increase of mineralization degree. Both surface and bottom convergence phenomenon existed and the salification in soil surface was more serious under moistube-irrigation.

Key words: mineralization degree; infiltration; distributions of water and salt; moistube-irrigation

引言

我国人均淡水资源不足且污染严重,农业用水

利用效率低下^[1]致使灌溉水资源日益短缺,而微咸水分布广、储量^[2],已成为重要的灌溉水源^[3],在淡水十分紧缺的华北和西北地区有着广阔的开发利

收稿日期: 2016-07-05 修回日期: 2016-10-28
基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAC01B03)和陕北水蚀区植被功能调控技术与示范项目(2015BAC01B03)
作者简介: 张珂萌(1989—),女,博士生,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: zksummerfool@163.com
通信作者: 汪有科(1956—),男,研究员,博士生导师,主要从事作物高效用水和水土保持研究,E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

用前景,如何利用微咸水进行农业灌溉对于缓解我国淡水资源紧缺具有重要意义。近年来,部分学者利用微咸水针对不同灌溉方式^[4-8]、土壤质地以及作物^[9-13]开展了大量研究,普遍认为:①微咸水灌溉对土壤结构的影响主要表现在土壤交换性钠和土壤溶液电导率 2 个方面,提高土壤盐分浓度有利于促进土壤颗粒的絮凝作用和团聚性、加强土壤稳定性、增加土壤中大孔隙、增强渗透性能;同时,Na⁺ 过量会造成土壤颗粒松散,降低土壤渗透能力^[14-18],利用微咸水灌溉存在矿化度临界值。②利用微咸水灌溉产生轻微的盐分胁迫可以在一定程度上提高小麦^[9]、棉花^[10-11]、甜瓜^[12]等作物的产量和品质,但对番茄^[13]没有显著影响,不同作物对盐分的耐受性呈现差异,应将植物根区的盐分控制在植物对盐分的耐受范围内,才不至造成减产。③滴灌、涌泉灌溉等间歇灌溉对土壤盐分淋洗效果较漫灌、沟灌等一次灌溉淋洗效果明显,盐分在湿润锋处累积^[19],脱盐区的形状根据不同灌溉方式下湿润区形状呈现差异,如漫灌呈浅宽式、滴灌为宽窄式^[20];另有研究者对微咸水进行磁化处理,发现磁化处理后的微咸水可以有效增益盐敏植物对盐渍化土壤环境

的适应性^[21]。微润灌溉属于连续灌溉,通过地埋微润管,减小地表蒸发并将水缓慢输送到作物根区土壤^[18],形成近似圆柱体形^[22-23]湿润体以满足植物需水。然而目前有关利用微咸水进行微润灌溉时土壤中水-盐运移过程、脱盐区域的大小、盐分累积位置等研究尚不足。本文通过室内土箱模拟试验,分析不同矿化度微咸水微润灌溉下土壤水-盐运移特性、湿润土壤脱盐区域等,以期微咸水微润灌溉提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

试验用土取自陕西杨凌渭河三级阶地农田壤土。取土深度为 0~40 cm,将取得的土壤经风干、碾压、过筛(孔径 2 mm)、均匀混合制成室内试验土样。试验土壤的颗粒组成采用 MS2000 型激光分析粒度仪(英国马尔文公司)测定,按国际制土壤质地三角形分类,粉粒(粒径 0.002~0.02 mm)质量分数在 50% 以上,粘粒(粒径 0~0.002 mm)质量分数低于 15%,试验所用土壤类型为粉质粘壤土。供试土壤的具体理化性质见表 1。

表 1 供试土样的理化性质
Tab. 1 Physical and chemical properties of soil

土样物理性质						
各粒径颗粒质量分数/%			土质	饱和含水率/ %	初始电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	全盐量/%
0.02~2 mm	0.002~0.02 mm	0~0.002 mm				
32.064	56.088	11.848	粉质粘壤土	39.0	267	0.3
土壤主要离子质量分数/%						
K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
0.154	3.185	0.469	0.461	1.520	0.948	1.800

1.2 试验水质

研究灌溉水水质对土壤入渗的影响主要有灌溉水矿化度和钠吸附比(Sodium adsorption ratio, SAR) 2 个指标,NIKOS 等^[24]发现矿化度小于等于 3 g/L 条件下,可以认为入渗水的 SAR 对土壤盐分分布无显著影响,肖振华等^[25]通过试验初步提出了引起碱害的 SAR 临界值为 14 (mmol/L)^{1/2},为避免碱害发生,本次试验用水的 SAR 采用 14 (mmol/L)^{1/2}。矿化水根据蒲城卤阳湖地区地下微咸水盐分组成特点,由 NaHCO₃、Na₂SO₄、MgSO₄、MgCl₂、CaCl₂ 配制而成,各矿化度下基本离子浓度如表 2 所示。

1.3 试验装置

试验装置由土箱和供水装置 2 部分组成。试验土箱尺寸(长×宽×高)为 120 cm×50 cm×50 cm,由厚度为 10 mm 有机玻璃制成。土箱两侧打有直径为 25 mm 的对称小孔(距土箱上沿 250 mm 侧沿

表 2 试验配置不同矿化度微咸水的基本离子浓度

Tab.2 Ion content of water with different mineralization degrees							mol/L
矿化度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	基本离子浓度						
	Na^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	
2.0	0.429 8	0.081 4	0.072 0	0.276 2	0.624 6	0.516 0	
2.5	0.537 2	0.101 8	0.090 0	0.345 2	0.780 8	0.645 0	
3.0	0.644 7	0.122 1	0.108 0	0.414 3	0.936 9	0.774 0	
3.5	0.752 0	0.142 5	0.126 0	0.483 4	1.093 1	0.903 0	
5.0	1.074 5	0.203 5	0.180 0	0.690 5	1.561 5	1.290 0	

15 mm)为微润带穿过该土箱供水的进出口。供水装置为马氏瓶,提供恒定水头,其横截面积 25 cm²,高 70 cm。微润带为双层结构,直径 25 mm,内层厚度 0.06 mm,微孔直径 10~900 nm 不等,外层为无纺布保护层以增加微润带强度。微润带长度与土箱长度均为 120 cm,进口端连接供水系统,出口端封

闭,试验土箱与马氏瓶利用橡皮软管连接,土箱表面塑封,如图 1 所示。

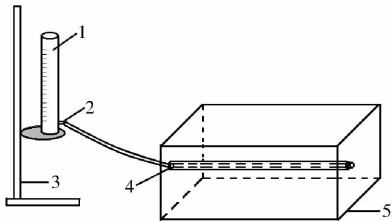


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental equipment

1. 马氏瓶 2. 输水软管 3. 可移动支架 4. 微润带 5. 试验土箱

1.4 试验方法及测定内容

试验共设定 5 种矿化度,分别为 2.0、2.5、3.0、3.5、5.0 g/L 作微咸水处理,以蒸馏水(0 g/L)处理作为对照。本次试验设置微润带埋深为 15 cm^[22],压力水头设置为 180 cm。将试验土样(容重 1.35 g/cm³,风干含水率 2.9%)装入土箱,层间打毛,以便于充分接触,表面用塑料膜覆盖,防止土壤水分蒸发。试验过程中记录不同时刻马氏瓶的水位线。微润带充水埋入土后,立即开始用秒表记录灌水时间,按照先密后疏的原则,入渗 72 h 后停止供水,用 1 cm 土钻取样,取样点位置沿管带的水平和垂直方向同时进行,间距为 5 cm。

用干燥法测定土壤含水率,将测定完含水率的土壤按照土水质量比 1:5 进行浸提,使用哈纳多参数分析仪 Hi-4522 型(意大利)测定土壤浸提液电导率。试验结束后,累积入渗量根据马氏瓶刻度和横截面积计算,平均入渗率为单位时间内累积入渗量。

各处理重复 3 次,分析数据时取平均值,采用 SPSS 17.0 对试验数据进行双尾 -t 检验和 Duncan 多重比较分析,用 Excel 进行图形绘制。

2 试验结果分析

2.1 微咸水对土壤入渗特征的影响

2.1.1 微咸水对土壤湿润锋运移距离的影响

图 2 是连续入渗 0.5、30、72 h 时,土壤湿润锋在水平、垂直向上和垂直向下 3 个方向的运移距离随入渗水矿化度增加的变化趋势。图 2a 表明灌水初期(0.5 h)不同矿化度下的微咸水在水平方向的运移距离大于其他 2 个方向,湿润锋运移距离在 3 个方向上基本随入渗水矿化度的增加而呈先增大后减小的趋势;图 2b、2c 表明灌水中期(30 h)和灌水后期(72 h)矿化度为 3.0 g/L 处理的湿润锋运移距离在不同运移方向上均大于 2.5 g/L 和 3.5 g/L,达到最大,说明在相同的土壤质地、容重、初始含水率和入渗时间下利用微咸水进行微润灌溉时湿润锋运

移距离的最大值处于 3.0 g/L 附近,本次试验中 3.0 g/L 处理的湿润锋运移距离在试验结束时为最大值;入渗 72 h 末 3.0 g/L 处理在垂直向下方向的湿润锋运移距离较蒸馏水处理随灌水增加的百分比分别为 50%、30% 和 25%,微咸水在连续灌溉下的湿润锋运移距离的增加程度逐渐降低。

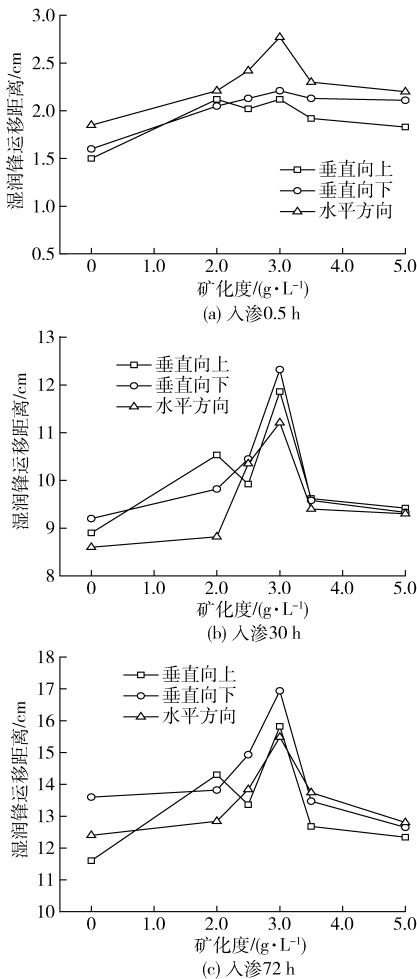


图 2 入渗 0.5、30、72 h 时湿润锋运移距离与矿化度之间的变化曲线

Fig. 2 Changing curves of maximum wetting front with different mineralization degrees of saline water in different time

表 3 为入渗 72 h 后不同矿化度湿润锋运移距离。垂直向下、向上和水平方向上不同矿化度湿润锋运移距离的标准差分别为 1.50、1.51 和 1.07,对样本均值双尾 -t 检验, $P \leq 0.05$,垂直向下和向上方向的决定系数 R^2 为 0.825,垂直向上和水平方向的决定系数 R^2 为 0.946,垂直向下和水平方向的决定系数 R^2 为 0.875,表明当矿化度相同时,湿润锋在不同方向上的运移距离差异较小,矿化度对不同方向运移距离的影响不显著,利用微润灌进行微咸水灌溉的湿润体近似圆形;不同矿化度对湿润锋运移距离影响的显著性分析结果表明 0、3.5、5.0 g/L 之

间的差异不显著,2.0、2.5、3.5 g/L 之间的差异不显著,但 3.0 g/L 矿化度条件下湿润锋运移距离显著高于其他处理,并在表层出现一定的积水,积水深小于 1 cm。

表 3 入渗 72 h 湿润锋运移距离
Tab.3 Transport distance of wetting front under different salinities in different directions after 72 h

矿化度/(g·L ⁻¹)	垂直向下	垂直向上	水平方向
0	13.60 ^e	11.60 ^e	12.40 ^e
2.0	13.82 ^b	14.30 ^b	13.82 ^b
2.5	14.93 ^b	13.36 ^b	13.84 ^b
3.0	16.94 ^a	15.82 ^a	15.48 ^a
3.5	13.47 ^{bc}	12.68 ^{bc}	13.74 ^{bc}
5.0	12.65 ^e	12.34 ^e	12.80 ^e

注:同列数值后不同字母表示差异显著, $P < 0.05$,下同。

2.1.2 微咸水对土壤入渗参数的影响

土壤入渗参数是反映入渗条件下入渗速率的重要参数,受土壤质地、结构、容重等因素的影响。对于同一土壤,入渗水矿化度也影响土壤的入渗性能,进而影响其入渗参数。

Kostiakov 经验入渗公式能很好地描述微咸水的土壤入渗特征^[26-27],即土壤累积入渗量与入渗时间的关系,拟合决定系数 R^2 在 0.99 以上。Kostiakov 经验入渗公式为

$$I = kt^a \tag{1}$$

式中 I ——累积入渗量,cm t ——入渗时间,h
 k ——入渗系数 a ——入渗指数

由表 4 可以得到,入渗系数 k 随矿化度的增加呈先增加后减小趋势,并在 3.0 g/L 处达到最大值,且微咸水处理的 k 值均大于蒸馏水处理,灌溉水的矿化度对入渗系数 k 具有显著影响。入渗指数 a 随着矿化度的增大呈先减小后在 5.0 g/L 时与蒸馏水处理相近。利用微咸水灌溉时,存在一个矿化度的临界值,随矿化度的增大, k 值逐渐增大, a 值逐渐减小,但超过该临界值时,随着矿化度的继续增大 k 值呈递减趋势,本次试验验证该值在微润灌条件下位

表 4 矿化度对 Kostiakov 入渗参数的影响
Tab.4 Effect of mineralization of saline water on infiltration parameters of Kostiakov model

矿化度/(g·L ⁻¹)	k	a	R^2
0	2.086 ^a	0.850 ^a	0.999
2.0	3.162 ^b	0.801 ^b	0.997
2.5	4.162 ^c	0.791 ^c	0.999
3.0	5.546 ^d	0.775 ^d	0.998
3.5	3.391 ^e	0.773 ^d	0.994
5.0	2.748 ^f	0.834 ^e	0.999

于 3.0 g/L 附近,表中 a 值在 5.0 g/L 时增大,说明当微咸水矿化度增加到 5.0 g/L 时不再促进微润灌溉条件下微咸水的入渗。

2.2 微咸水入渗对土壤脱盐区的影响

入渗 72 h 后,沿微润管垂直方向上取样测土壤电导率,当不同深度实测电导率低于初始电导率时称为脱盐,脱盐区域边沿与微润管的距离为脱盐半径。图 3 为灌溉水矿化度与脱盐半径的关系。

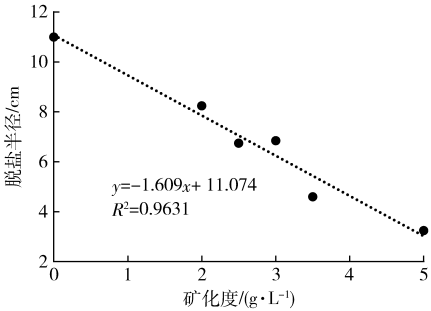


图 3 矿化度与脱盐半径的关系

Fig.3 Relationship between salinity and radius of desalination in soil

从图 3 可以看出,微润灌脱盐半径随矿化度的增加呈线性递减趋势,蒸馏水处理的脱盐半径最大,但矿化度 2.5 g/L 与 3.0 g/L 处理的差异较小,而矿化度 3.0 g/L 与 3.5 g/L 的差异较大,分析其原因是处理 3.0 g/L 和处理 3.5 g/L 之间含盐量差异并不大,但 3.0 g/L 的入渗量远大于 3.5 g/L,盐随水运移而造成 3.0 g/L 处理的脱盐半径大于 3.5 g/L。从脱盐半径的变化趋势分析,矿化度为 3.0 g/L 是一个拐点,当矿化度小于 3.0 g/L 时,湿润体脱盐占优,反之则积盐占优。

2.3 微咸水入渗对土壤剖面盐分积累的影响

土壤电导率与土壤含盐量之间存在正相关关系,可用电导率反映土壤含盐量的变化情况^[26]。图 4 是距离微润管带水平方向 5 cm 处,垂直方向上不同矿化度条件下入渗 72 h 时土壤电导率的变化。

由图 4 可知,微润灌土壤电导率分布以微润带(埋深 15 cm 处)为轴心向四周逐渐增大,在湿润锋处达到最大值。微润带以上部分(0~15 cm),相同深度的湿润土壤电导率随着灌溉水矿化度的增大而增大;微润带以下部分(15~30 cm),总体与上部相似,相同深度湿润土壤电导率随着灌溉水矿化度的增大而增大,但 3.0 g/L 处理下的电导率变化曲线与 2.5 g/L 处理出现交叉,3.0 g/L 处理的脱盐区域略大于 2.5 g/L 处理,在 2.5~3.0 g/L 之间即使增加灌溉水的矿化度也不会造成进一步积盐。不同矿化度(0~5.0 g/L)湿润锋垂直向下与表层运移距离

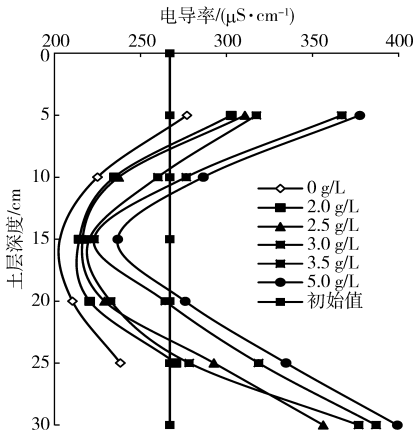


图 4 不同矿化度下土壤电导率随土壤深度的变化
Fig. 4 Changes of soil EC value with soil depth for different mineralization degrees of saline water

分别为 26. 8、28. 82、29. 93、31. 94、28. 47、27. 65 cm，对照图 4 垂直向下土壤电导率随矿化度变化情况发现湿润土壤中的电导率随微咸水的入渗向湿润锋附近增大，即盐分随入渗向湿润锋处累积，垂直向上的变化情况与之一致，微咸水微润灌盐分分布与湿润体形状。图中分界线 267 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 为土壤初始电导率，不同深度湿润土壤的电导率大于土壤初始电导率视为积盐，随灌溉水矿化度的增加表层积盐深度也随之增加并分布在距表层 11. 9 cm 内，底部同时存在积盐且蒸馏水处理较其他微咸水处理轻微，微润灌溉盐分随水上移和底层迁移同时存在，但浅层土壤更易积盐。

由图 5 试验结束时不同矿化度下水平距离微润带 5 cm 处土壤剖面平均电导率分布，可进一步分析矿化度对土壤剖面电导率的影响。由图 5 可知，蒸馏水处理的平均电导率低于土壤初始电导率，具有一定的洗盐作用，而利用微咸水灌溉则不同程度地增加了土壤的含盐量。单因素方差分析得到不同矿化度条件下土壤电导率变化不显著 ($P = 0. 149$)，在矿化度小于等于 5. 0 g/L 且距表层 25 cm 内土壤中的平均电导率受矿化度影响有升高的趋势，但之间的差异不显著，说明利用微咸水进行灌溉矿化度在 2. 0 ~ 5. 0 g/L 以内对土壤总含盐量的影响差异不大，但在微润灌溉入渗的方式下不同深度土层盐分分布存在一定的差异 (表 5)。

表 5 为不同深度土层 5 个矿化度的平均电导率。可看出不同深度土层之间的电导率有显著性差异 ($P \leq 0. 05$)，5 cm 处平均电导率最大，与其他各土层差异显著，其次是 25 cm 处，而 15 cm 和 20 cm 差异不显著，20 cm 和 10 cm 差异不显著。随微咸水的入渗，盐分随水分以埋管 15 cm 处为中心呈对称分布，在 5 cm 和 25 cm 处积盐较为严重，10 ~ 20 cm 内

的电导率均小于初始电导率 (表 1, 267 $\mu\text{S}/\text{cm}$)，说明位于湿润体内盐分降低，得到淋洗；盐分在湿润锋处积累最为严重，产生盐分表层和深层双聚的现象，且盐分的表聚程度大于底层聚集情况。

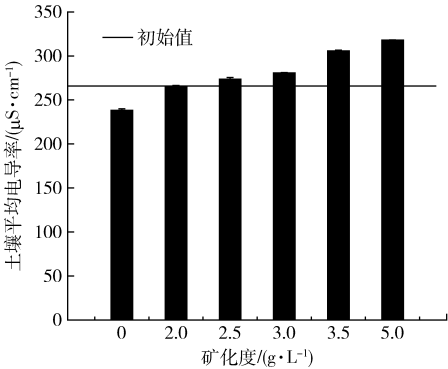


图 5 矿化度对土壤剖面平均电导率的影响
Fig. 5 Effects of different mineralization degrees on averaged EC value in soil profile

表 5 微咸水灌溉下不同深度平均电导率
Tab. 5 Average EC value in different depths of soil by irrigation with mineralized water

土层深度/cm	5	10	15	20	25
平均电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	335. 00 ^a	259. 00 ^c	222. 08 ^d	244. 44 ^{cd}	298. 90 ^b

3 讨论

(1) 微润灌条件下，入渗水矿化度对入渗及湿润锋运移距离的影响

湿润锋运移距离、入渗系数 k 通常受土壤质地^[28]、灌溉水水质^[29]、初始含水率^[14]、供水压力^[26]等的影响；而入渗指数 a 主要与土壤的机械组成、结构、供水强度和初始含水率等因素有关，当土壤结构改变，孔隙度增大，导水性增强时湿润峰运移距离和 k 值就会增大^[30]，土壤骨架发生一定的变形，使得入渗界面的土壤结构密实，入渗指数则减小^[25]。微咸水的水盐运移特征主要是由入渗水的矿化度和土壤中 Na^+ 浓度共同决定的^[25,31]，在矿化度小于等于 3. 0 g/L 时，矿化度占主要作用，能够增强土壤的凝聚作用^[14]，增加土壤的有效孔隙，改善导水性能，故 k 值和湿润锋运移距离随矿化度的增大而增大；当矿化度继续增加到大于 3. 0 g/L 时， Na^+ 浓度由表 2 中的 0. 644 7 mol/L 增加到 1. 074 5 mol/L，土壤结构主要由 Na^+ 作用，使得土壤团粒结构分散膨胀，连通性孔隙变小和阻塞^[26]，降低导水性能，土壤更加密实，此时 k 值和湿润锋运移距离会逐渐减小， a 值减小。表 4 中蒸馏水处理和 5. 0 g/L 处理 a 值相近，说明当矿化度升高到 5. 0 g/L 时，土壤结构发生较大改变^[32]，发生崩解等现象造成土壤松动致使 a 值

升高。

(2)微润灌溉条件下,入渗水矿化度对湿润体含盐量及脱盐半径的影响

微咸水本身含有一定的盐分,利用微咸水灌溉必然会给土壤带来额外的盐分积累,盐分在土壤中的分布状况对植物生长有极重要的影响^[33]。土壤盐分的表聚现象在地表灌溉方式下主要受土壤表面蒸发和植物根系作用^[10],而在微润灌溉方式下湿润土壤中盐分随水分入渗以微润带为圆心向四周扩散,与湿润体形状相关,呈圆环状分布^[34],故加剧了盐分的表聚。

微润灌溉湿润土壤盐分分布除与土壤质地、埋深、供水压力等有关还与灌溉水质等有关。由表2微咸水的各离子浓度可知,随着矿化度增大,各离子浓度增大的幅度都一致,阳离子中 Na^+ 浓度占总含盐量21.49%,远大于 Ca^{2+} (4.07%)、 Mg^{2+} (3.6%);阴离子中 Cl^- 浓度(13.81%)小于 HCO_3^- (31.23%)、 SO_4^{2-} (25.8%),由表1可知,试验土样中 Na^+ 占阳离子总量的75%,而 SO_4^{2-} 占阴离子总量的36%,土壤中盐分随入渗的运移主要还是受 Na^+ 和 SO_4^{2-} 影响,对于 Na^+ 而言,当土壤中的 Na^+ 浓度增加50%以上(大于3.0 g/L)会造成土壤团聚体膨胀,堵塞土壤孔隙;对于 SO_4^{2-} 而言, Na^+ 置换出的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合易生成沉淀阻塞孔隙,降低入渗速率,并逐渐积累到湿润锋以外,故 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 主要分布在湿润体外围^[25],而 Cl^- 、

Na^+ 和 HCO_3^- 则主要分布在湿润体内^[31]。微咸水灌溉无论是不同的灌溉方式(如表面灌溉^[23]、地下滴灌^[26]和负压渗灌^[35]),还是不同土壤质地(如壤土、砂壤土^[36]和含黏土夹层^[37])的土壤在大田试验或室内试验^[18]都存在一个临界的矿化度,即微咸水灌溉的合理矿化度应控制在3.0 g/L以内,保证在增大入渗的同时不会使土壤严重积盐。说明微咸水灌溉确实存在一个最优的矿化度,在灌溉时应该控制灌溉水矿化度的上限,这对土壤积盐影响较大。

4 结论

(1)微润灌溉条件下,微咸水入渗结束时的土壤湿润锋运移距离、入渗系数 k 值随矿化度的增大先增大再减小,入渗指数 a 值逐渐减小,灌溉水矿化度存在临界值3.0 g/L使湿润锋运移距离和 k 值达到最大。

(2)利用微润灌进行灌溉时,土壤盐分分布存在向表层和土壤深层聚积现象,且表层更易积盐。

(3)微咸水微润灌溉土壤盐分以微润带为中心对称分布且逐渐增大,并在湿润锋处达到最大值;微咸水灌溉增加土壤的含盐量,且同一土层深度土壤含盐量随矿化度的增大而增大,土壤平均含盐量在不同矿化度处理之间无显著性差异,微咸水入渗对不同土层盐分分布影响显著;脱盐半径与灌溉水矿化度呈线性负相关关系;脱盐区围绕微润带分布,积盐区在湿润锋附近,湿润体外侧,呈圆环状分布。

参 考 文 献

- 1 韩洪云,赵连阁.中国灌溉农业发展——问题与挑战[J].水利经济,2004,22(1):54-58.
HAN Hongyun, ZHAO Lian'ge. Development of science and technology on conservancy under the market economy[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2004, 22(1): 54-58. (in Chinese)
- 2 张新民.干旱区水资源量与质统一管理研究[D].西安:西安理工大学,2000.
ZHANG Xinmin. Water quantity and quality unified management research in arid areas[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000. (in Chinese)
- 3 王艳娜,侯振安,龚江,等.咸水资源农业灌溉应用研究进展与展望[J].中国农学通报,2007,23(2):393-397.
WANG Yanna, HOU Zhen'an, GONG Jiang, et al. Development and expectation of utilization of saline water resources in agriculture irrigation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(2): 393-397. (in Chinese)
- 4 吴昌娟,张玉龙,虞娜,等.保护地节点渗灌下水肥耦合对土壤全盐量的影响[J].土壤通报,2013,44(4):897-904.
WU Changjuan, ZHANG Yulong, YU Na, et al. Effects of the coupling of water and fertilization on total salt of the soil with node subsurface irrigation in protected field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(4): 897-904. (in Chinese)
- 5 HU Hongchang, TIAN Fuqiang, HU Heping. Soil particle size distribution and its relationship with soil water and salt under mulched drip irrigation in Xinjiang of China [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(6): 1568-1574.
- 6 陈树飞,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.
CHEN Shufei, HE Xinlin, WANG Zongfei, et al. Development of research on drip irrigation of saline water[J]. Water Saving Irrigation, 2010(2): 6-9. (in Chinese)
- 7 雪静,王全九,毕远杰.微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 saline water intermittent application[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 14-19. (in Chinese)
- 8 王丹,康跃虎.微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征[J].农业工程学报,2007,23(2):83-87.
WANG Dan, KANG Yuehu. Distribution characteristics of different salt ions in soil under drip irrigation with saline water[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 83-87. (in Chinese)

- 9 巨龙,王全九,王琳芳,等. 灌水量对半干旱区土壤水盐分布特征及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(1):86–90.
JU Long, WANG Quanjiu, WANG Linfang, et al. Effects of irrigation mounts on yield of winter wheat and distribution characteristics of soil water-salt in semi-arid region[J]. Transactions of the CSAE,2007, 23(1): 86–90. (in Chinese)
- 10 张伟,吕新,李鲁华,等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报,2008,24(8):15–19.
ZHANG Wei, LÜ Xin, LI Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang region[J]. Transactions of the CSAE,2008, 24(8): 15–19. (in Chinese)
- 11 宰松梅,仵峰,温季,等. 不同滴灌方式对棉田土壤盐分的影响[J]. 水利学报,2011,42(12):1496–1503.
ZAI Songmei, WU Feng, WEN Ji, et al. Effect of drip fustigation on soil salinity of cotton field in Northwest China[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2011,42(12):1496–1503. (in Chinese)
- 12 AMNON B, SHABTAI C, YOEL D M, et al. Effects of timing and duration of brackish irrigation water on fruit yield and quality of late summer melons[J]. Agricultural Water Management, 2005,74(2):123–134.
- 13 万书勤,康跃虎,王丹,等. 微咸水滴灌对黄瓜产量及灌溉水利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(3):30–35.
WAN Shuqin, KANG Yuehu, WANG Dan, et al. Effects of saline water on cucumber yields and irrigation water use efficiency under drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3):30–35. (in Chinese)
- 14 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 contention slight saline water infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2004,18(1): 51–53. (in Chinese)
- 15 王全九,单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(12):117–127. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151217&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.017.
WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(12):117–127. (in Chinese)
- 16 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(增刊):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(Supp.): 84–87. (in Chinese)
- 17 肖娟,雷廷武,李光永. 水质及流量对盐碱土滴灌湿润锋运移影响的室内试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(2):88–91.
XIAO Juan, LEI Tingwu, LI Guangyong. Laboratory experiment study on the effects of water quality and emitter discharge on wetted soil geometry and volume[J]. Transactions of the CSAE,2007, 23(2): 88–91. (in Chinese)
- 18 史晓楠,王全九,苏莹. 微咸水水质对土壤水盐运移特征的影响[J]. 干旱区地理,2005,28(4):516–520.
SHI Xiaonan, WANG Quanjiu, SU Ying. Effects of slight salt water quality on the characteristics of soil water and salt transference[J]. Arid Land Geography,2005,28(4):516–520. (in Chinese)
- 19 彭振阳,伍靖伟,黄介生. 采用间歇灌溉进行土壤盐分淋洗的适用性[J]. 水科学进展,2016,27(1):31–39.
PENG Zhenyang, WU Jingwei, HUANG Jiesheng. Feasibility of applying intermittent irrigation on solute leaching[J]. Advances in Water Science,2016,27(1):31–39. (in Chinese)
- 20 鲁为华,任爱天,杨洁晶,等. 滴灌苜蓿田间土壤水盐及苜蓿细根的空间分布[J]. 农业工程学报,2014,30(23):128–137.
LU Weihua, REN Aitian, YANG Jiejing, et al. Soil water and salt movement and spatial distribution of fine alfalfa roots under drip irrigation[J]. Transaction of the CSAE, 2014,30(23):128–137. (in Chinese)
- 21 刘秀梅,王华田,王延平,等. 磁化微咸水灌溉促进欧美杨 1–107 生长及其光合特性分析[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊1):1–7.
LIU Xiumei, WANG Huatian, WANG Yanping, et al. Analysis of magnetic salinity water irrigation promoting growth and photosynthetic characteristics of *Populus × euramericanna* ‘Neva’[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.1):1–7. (in Chinese)
- 22 张俊,牛文全,张琳琳,等. 微润灌溉线源入渗湿润体特性试验研究[J]. 中国水土保持科学,2012,10(6):32–38.
ZHANG Jun, NIU Wenquan, ZHANG Linlin, et al. Experimental study on characters of wetted soil in moistube irrigation[J]. Science of Soil and Water Conservation,2012,10(6):32–38. (in Chinese)
- 23 牛文全,张俊,张琳琳,等. 埋深与压力对微润灌溉湿润体水分运移的影响[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(12):128–134.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131221&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.021.
NIU Wenquan, ZHANG Jun, ZHANG Linlin, et al. Effects of buried depth and pressure head on water movement of wetted soil during moistube-irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(12):128–134. (in Chinese)
- 24 NIKOS J W, JAMES W B, KRISTA E P, et al. Basics of salinity and solidity effects on soil physical properties[R]. Bozeman: Montana State University, 2003.
- 25 肖振华,万洪福,郑连芬. 灌溉水质对土壤化学特征和作物生长的影响[J]. 土壤学报,1997,34(3):272–285.
XIAO Zhenhua, WANG Hongfu, ZHENG Lianfen. Effect of irrigation water quality on soil chemical charateritics and crop growth[J]. Acta Pedologica Sinica,1997,34(3):272–285. (in Chinese)
- 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):64–75.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effect on both infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):64–75. (in Chinese)
- 27 仵峰,吴普特,范永申,等. 地下滴灌条件下土壤水能态研究[J]. 农业工程学报,2008,24(12):31–35.

- WU Feng, WU Pute, FAN Yongshen, et al. Distribution of soil water potential energy under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 31–35. (in Chinese)
- 28 陈丽娟, 冯超, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44–51. CHEN Lijuan, FENG Chao, WANG Yu, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 44–51. (in Chinese)
- 29 MOHAMMAD R, EMDAD S R, RAINE R J, et al. Effect of water quality on soil structure and infiltration under furrow irrigation[J]. Irrigation Science, 2004, 23(2): 55–60.
- 30 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. XIAO Zhenhua, WAN Hongfu. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic and physical properties[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(3): 359–366. (in Chinese)
- 31 吴忠东, 王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 231–236. WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Study on impact of sodium adsorption ratio of saline water on soil physical and chemical properties and infiltration characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 231–236. (in Chinese)
- 32 HEYDARI N, DAS A, GUPTA R L. Salinity and solidity influences on infiltration during surge flow irrigation[J]. Irrigation Science, 2001, 20(4): 165–173.
- 33 ABDEL G G, ARSLAN A, GAIHBE A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria [J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(12): 39–53.
- 34 牛文全, 薛万来. 矿化度对微润灌溉土壤入渗特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 163–172. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140426&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.026. NIU Wenquan, XUE Wanlai. Effects of mineralization degrees on soil infiltration under moistube-irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 163–172. (in Chinese)
- 35 刘胜尧, 范凤翠, 李志宏, 等. 咸水负压灌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)
- 36 马东豪, 王全九, 来剑斌. 膜下滴灌条件下灌水水质和流量对盐分分布影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 42–46. MA Donghao, WANG Quanjiu, LAI Jianbin. Field experimental studies on the effects of water quality and drip rate on soil salt distribution in drip irrigation under film[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 42–46. (in Chinese)

(上接第 259 页)

- 8 童莉, 张政, 陈忠购, 等. 机械通风条件下连栋温室速度场和温度场的 CFD 数值模拟[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(6): 33–37. TONG Li, ZHANG Zheng, CHEN Zhonggou, et al. Simulation of mechanical ventilation for huabei type multispan plastic greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(6): 33–37. (in Chinese)
- 9 CHEN J, CAI Y, XU F, et al. Analysis and optimization of the fan-pad evaporative cooling system for greenhouse based on CFD[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(4): 1–8.
- 10 胥芳, 蔡彦文, 陈教料, 等. 湿帘-风机降温下的温室热/流场模拟及降温系统参数优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 201–208. XU Fang, CAI Yanwen, CHEN Jiaoliao, et al. Temperature/flow field simulation and parameter optimal design for greenhouses with fan-pad evaporative cooling system[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 201–208. (in Chinese)
- 11 任守纲, 杨薇, 王浩云, 等. 基于 CFD 的温室气温时空变化预测模型及通风调控措施[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 207–214. REN Shougang, YANG Wei, WANG Haoyun, et al. Prediction model on temporal and spatial variation of air temperature in greenhouse and ventilation control measures based on CFD[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 207–214. (in Chinese)
- 12 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 13 吴飞青, 张立彬, 胥芳, 等. 机械通风条件下玻璃温室热环境数值模拟[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 153–158. WU Feiqing, ZHANG Libin, XU Fang, et al. Numerical simulation of the thermal environment in a mechanically ventilated greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 153–158. (in Chinese)
- 14 何科爽, 孙丽娟, 黄震宇, 等. 南方连栋塑料温室冬季通风除湿开窗优化[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 186–191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121135&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.035. HE Keshi, SUN Lijuan, HUANG Zhenyu, et al. Optimization of vent configuration for ventilation dehumidification in multi-span plastic greenhouses[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 186–191. (in Chinese)
- 15 JB/T 10294—2013 湿帘降温装置[S]. 2013.