

间歇组合灌溉对中度盐化土壤 水盐运移规律的影响研究

刘小媛^{1,2}, 张晴雯¹, 高佩玲^{2,3}, 杨大明²

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100086; 2.山东理工大学 农业工程与食品科学学院,山东 淄博 255049;
3.山东理工大学资源与环境工程学院,山东 淄博 255049)

摘 要:为了探究合理的微咸水农田灌溉模式,以中度盐化土壤为研究对象,在室内进行一维垂直积水入渗试验,研究不同咸淡水组合次序和间歇时间条件下土壤水盐运移规律,并对土壤盐分分布指标进行评价。结果表明:(1)间歇组合灌溉模式下各土层的土壤含水率均大于淡水直接灌溉,且与微咸水直接灌溉差异较小;先咸后淡土壤含水率变异系数介于 9.24~16.62 之间,相对于先淡后咸(11.54~20.88),土壤含水率分布更均匀。(2)在同一土层深度处,间歇组合灌溉模式下的土壤含盐量均小于微咸水直接灌溉,与淡水灌溉差异较小;在 0~20 cm 土层,先淡后咸土壤含盐量大于先咸后淡,而在 20~55 cm 土层,先咸后淡大于先淡后咸。(3)对土壤盐分评价指标进行分析表明,先咸后淡含盐量峰值大于先淡后咸;先淡后咸脱盐率平均值大于先咸后淡;在间歇组合灌溉模式下,脱盐区深度介于 47.97~51.63 cm、达标脱盐区深度介于 46.6~50.7 之间,均超过了 0~45 cm 作物根系密度较大的土层;脱盐率平均值(0.36~0.543)、含盐量峰值(3.741~5.967)均高于微咸水直接灌溉,间歇组合灌溉更有利于为作物提供良好的生长环境。

关键词:中度盐化土壤;间歇组合灌溉模式;土壤盐分;评价指标

中图分类号:S275.8 **文献标志码:**A

Effects of alteration irrigation on soil water and salt transport in moderately saline soil

LIU Xiao-yuan^{1,2}, ZHANG Qing-wen¹, GAO Pei-ling^{2,3}, YANG Da-Ming²

(1. *Institute of Environmental and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100086;*
2. *Institute of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;*
3. *Institute of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China*)

Abstract: One dimensional vertical infiltration experiments were carried out to explore characteristics of water and salt transport in soil under alteration irrigation (AI) in moderately saline soil and evaluate the indexes of salinity distribution. The results showed that: (1) The soil water content with the AI treatment was higher than that with sole freshwater irrigation (F), but slightly differed from that of the sole brackish water irrigation (B). The variation coefficients of soil water content in soil after the irrigation sequence of brackish water irrigation followed by fresh water (B-F) varied from 9.24 to 16.62, which were less than that of irrigation of fresh water first followed by brackish water (F-B); (2) Within the same soil depth, the soil salinity content of treatment AI was less than that of treatment B, but slightly differed from treatment F. In the top 20 cm soil layers, the soil salinity content of treatments F-B was greater than that of B-F, but in 20~55 cm soil layers, the soil salinity content of treatments B-F was greater than that of F-B; (3) The analyses of the evaluation indexes of salinity distribution indicated that the peak value of soil salinity of treatment B-F was greater than that of F-B. The soil desalination zone varied from 47.97 to 51.63

cm depth and the complied desalination zone varied from 46.6 to 50.7 cm, which was deeper than depth of dense crop roots (0~45 cm). The average desalination rate (0.36~0.543) and the peak value of soil salinity (3.741~5.967) in treatments ICI were higher than that in B, indicating that the ICI is more favorable than other irrigation methods to provide suitable soil water-salt environment for crops growth.

Keywords: moderately saline-sodic soil, alteration irrigation; soil salinity; evaluation index

在干旱半干旱地区分布着大面积的盐碱土壤,而在非盐碱化地区,由于灌溉管理不善,灌溉水的渗漏引起地下水位升高和强烈蒸发,从而引起土壤次生盐碱化,严重影响农业的发展^[1-2]。为使水盐得以调控,水利改良盐碱土方面的措施主要包括灌溉淋洗(以水洗盐)、排水携盐(带走盐分),而灌溉淋洗应用较为普遍。改良盐碱土壤首先是降低作物根系土层的盐分含量,为作物提供良好的土壤水盐环境^[3-7]。在利用微咸水灌溉方面,微咸水矿化度是决定土壤剖面盐分分布的主要因素,对于轻度盐碱化土壤,当灌溉水矿化度小于 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,土壤耕层脱盐,盐分累积在湿润锋处;当灌溉水矿化度大于 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,各土层含盐量大于初始值,基本处于积盐状态^[8-9]。对于不同钠吸附比的微咸水,主要影响土壤中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的分布,当 SAR 较高时, Na^+ 的危害主要集中于表层 15 cm 范围内,土壤深层受 Na^+ 影响较小^[2]。已有研究表明,利用微咸水灌溉不仅可以使作物增产,而且可以改良盐碱土壤。基于此,有学者提出了集咸淡水组合灌溉模式、间歇灌溉方式、作物轮作等一体化的微咸水灌溉调控技术。咸淡水组合灌溉即根据作物不同的生育期、微咸水和淡水资源量等,确定组合次序和水量,以达到作物产量最优的效果。间歇灌溉改善了传统地面灌水方法的效果,利用微咸水进行间歇灌溉,较连续灌溉增渗,间歇入渗湿润锋运移深度大于连续入渗^[10]。研究表明,在相同的灌溉水质条件下,微咸水间歇灌溉模式不同,则灌水效果不同^[11-12]。因此,有必要对微咸水间歇组合灌溉模式进行研究,验证不同的微咸水间歇组合灌溉模式对盐分淋洗效果的影响,以期在维持土壤可持续利用的条件下,使土壤的水盐时空分布有利于作物生长,提高产量。

本文以地处黄河三角洲地区的山东省滨州市滨城区的中度盐碱耕地为研究对象,在室内进行一维垂直积水入渗试验,分析对比不同间歇组合灌溉参数(咸淡水间歇时间和组合次序)对中度盐碱土壤水盐运移规律的影响,以期为黄河三角洲地区利用微咸水进行灌溉提供理论支持和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自山东省滨州市滨城区的小麦耕地,在 0~80 cm 土层每隔 20 cm 分层取扰动土和原状土,每层三个重复。原状土取回后,立即测定土壤容重和田间持水率;扰动土取回后经过风干、碾压、筛分(2 mm 筛)、均匀混合后制备成室内试验土样,测定土壤初始含水率、全盐量、 $\text{EC}_{5:1}$;利用 Mastersizer 3000 型激光粒度仪测定土壤颗粒组成,并按照国际制土壤质地分类标准对试验土壤质地进行划分,具体结果见表 1,表 2。根据华北平原土壤盐碱化程度分级标准^[13],供试土壤为中度盐碱化土壤。

1.2 灌溉水质及水量

试验用水包括淡水和 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水。其中淡水使用的是蒸馏水,矿化度为 $0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;微咸水是根据研究区潜层地下微咸水的盐分组成,在室内利用化学药剂室内配制而成。各种可溶性盐浓度见表 3。

表 1 供试土壤颗粒组成及分类

Table 1 Particle distribution and classification of the studied soil				
土壤 Soil	颗粒组成 Particle distribution/%			土壤质地 Soil texture
	砂粒 (2~0.02 mm) Sand	粉粒 (0.02~0.002 mm) Silt	黏粒 (<0.002 mm) Clay	
盐化土 Saline soil	20.26	76.78	2.96	粉砂质壤土 Sandy loam

表 2 供试土壤的基本理化性质

Table 2 Soilphysical and chemical properties

土壤 Soil	土壤容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) Bulk density	田间持水率/% Field water holding capacity	风干土含水率/% Soil water content	$\text{EC}_{5:1}/(\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1})$	全盐量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Soil salinity content
盐化土 Saline soil	1.39	28.62	2.00	0.961	2.381

表 3 灌溉水质化学组成/(g·L⁻¹)

矿化度 Mineralization	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	MgCl ₂	NaCl
3.002	0.783	0.602	0.377	0.644	0.596

灌水定额根据下式计算得^[14]:

$$m = \frac{h(\theta_{\max} - \theta_0)\gamma_{\pm}}{\gamma_{\text{水}}} = \frac{60 \times (28.62\% - 2\%) \times 1.39}{1}$$
$$= 22.2 \text{ cm} \tag{1}$$

式中, h 为土壤计划湿润层深度(cm),取 60 cm; $\theta_{\max}$ 为土壤计划湿润层允许的最大含水率,一般为田间持水率(占干土重),取 28.62%; θ_0 为土壤计划湿润层初始含水率(占干土重),取 2%; $\gamma_{\pm}$ 、 $\gamma_{\text{水}}$ 分别为土壤干容重和水的密度,取 1.39 g·cm⁻³ 和 1 g·cm⁻³。

1.3 实验装置

整个试验系统包括试验土柱和供水装置。试验土柱用内直径为 8 cm,高为 90 cm 的有机玻璃制成。为取土分析土壤水分和盐分含量,在土柱侧面 10 cm 以下,每隔 5 cm 开一直径为 15 mm 的圆形取样口;利用马氏瓶自动供水,其截面积为 50.24 cm²,高为 50 cm,供水水头控制在 1.5~2 cm。土柱与马氏瓶外壁标有刻度,用于观测马氏瓶水位和湿润锋运移深度。

1.4 试验方案与观测方法

本研究以全淡水(矿化度 0 g·L⁻¹)、微咸水直接灌溉(3 g·L⁻¹) 作为对照,在相同的微咸水矿化度和咸淡水组合比例条件下,设置两种咸淡水组合次序,分别为先咸后淡、先淡后咸;四种咸淡水间歇时间,分别为 0、30、60、120 min。在试验过程中,将

灌水定额分成两份,分别为微咸水和淡水,单轮灌溉结束,间歇一定的时间后,进行下一轮灌溉,共 10 个处理,每个处理重复 3 次。

将初始含水率为 2% 的试验土样按土壤容重 1.39 g·cm⁻³ 分 16 层均匀装入土柱,每层 5 cm,装土高度为 80 cm。填装完毕后,在土表放置一张与土柱内截面积相同的带孔滤纸以防止灌水时对表土的冲刷。利用马氏瓶自动供水,将土壤表面积水深度控制在 1.5~2 cm 之间。在试验过程中记录湿润锋运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 提取土样,用烘干法测定土壤含水率,利用 DDS-11A 型电导率仪测定水土比为 5:1 的土壤溶液电导率,并对已测得的土壤含盐量与土壤浸提液电导率建立关系,具体的关系式为:

$$y = 2.160EC_{5:1} + 0.303 \tag{2}$$

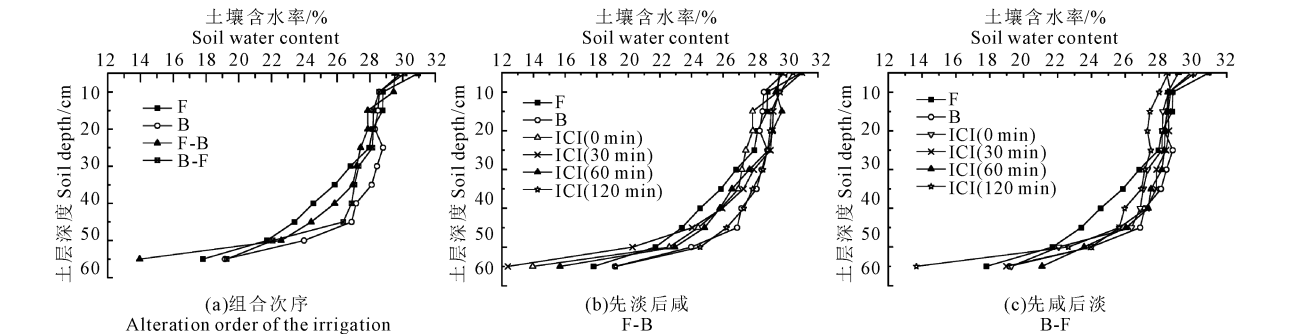
式中, y 为土壤含盐量(g·kg⁻¹); $EC_{5:1}$ 为 25℃ 下水土比为 5:1 的土壤浸提液电导率(mS·cm⁻¹)。

2 结果与分析

2.1 土壤水分垂直分布特征

土壤含水量是土壤绝对含水量相对于土壤的特性指标,是土壤水分研究的重要组成部分。Goleman 和 Bodamn 将土壤含水率剖面分为 4 个区:饱和区、含水率有明显降落的过渡区、含水率变化不大的传导区和含水率迅速减小至初始值的湿润区^[15]。

2.1.1 组合次序对土壤水分再分布的影响研究
不同咸淡水组合次序下土壤含水率随土层深度的变化规律如图 1a 所示。由图 1a 可知,间歇组合灌



注:F 表示全淡水灌溉;B 表示微咸水直接灌溉;F-B 表示先淡后咸;B-F 表示先咸后淡;ICI(0 min)、ICI(30 min)、ICI(60 min)、ICI(120 min) 分别表示表示间歇组合灌溉 0 min、30 min、60 min、120 min,下同。

Note: F denotes sole fresh water irrigation; B denotes sole brackish water irrigation; F-B denotes the alteration sequence of fresh water irrigation first and brackish water irrigation later; B-F denotes the alteration sequence of brackish water irrigation first and fresh water irrigation later; ICI(0 min), ICI(30 min), ICI(60 min), and ICI(120 min) denote alteration irrigation of 0, 30, 60 min, and 120 min, respectively.

图 1 间歇组合灌溉对土壤水分垂直分布特征的影响

Fig.1 Effects of alteration irrigation on vertical distribution of soil moisture

溉模式下各土层的土壤含水率均大于淡水直接灌溉,且与微咸水直接灌溉差异较小。随着土层深度的增加,土壤含水率呈现减小的趋势。当土层深度小于 15 cm 时,先淡后咸土壤含水率大于先咸后淡;当土层深度大于 15 cm 时,先咸后淡土壤含水率大于先淡后咸,说明首轮灌溉水质对土壤大孔隙的形成起决定性作用,先灌咸水使土壤入渗性能增强。

2.1.2 间歇时间对土壤水分运移规律的影响研究

图 1b、c 为不同间歇时间下土壤含水率随土层深度的变化规律。由图 1b、c 可知,对于所有处理,在 5~50 cm 的过渡区和传导区,土壤含水率随着土层深度的增加逐渐减小,但减小的速度较缓慢;在>50 cm 的湿润区,土壤含水率迅速减小至土壤初始含水率。对于先淡后咸间歇组合灌溉模式,在 5~30 cm 土层,同一深度处各处理土壤含水率变化不大;在 30~55 cm 深度处差异较显著。在先咸后淡间歇组合灌溉模式下,当间歇时间为 0,30,60 min 时,同一深度处土壤含水率基本一致;当间歇时间为 120 min 时,土壤含水率偏小,但都大于淡水灌溉。

为了进一步分析间歇组合灌溉参数对土壤剖面含水率的影响,引入代表土壤剖面含水率离散程度的评价指标变异系数^[16-18],计算公式如下:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\%$$

(3)

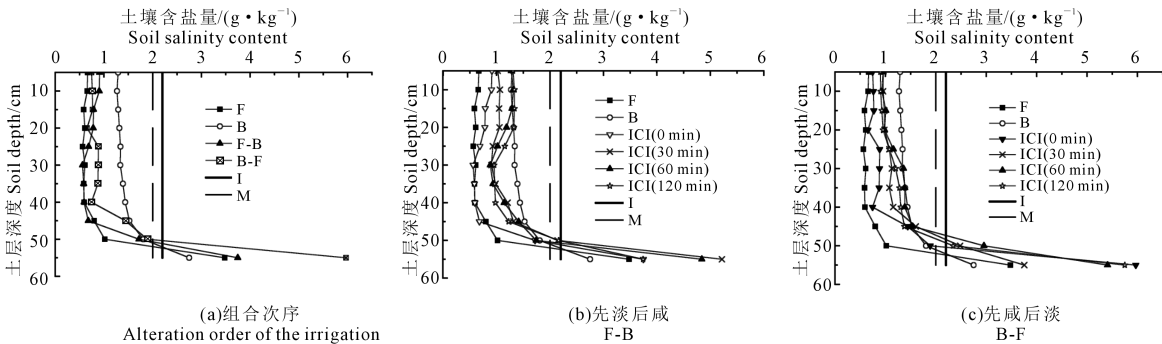
式中, CV 、 S 、 $\bar{X}$ 符号排斜体分别为各土层土壤含水率的变异系数(%)、标准差(%)、平均值(%)。

由表 4 可知,在先淡后咸间歇组合灌溉模式下,

表 4 间歇组合灌溉土壤含水率变异系数

Table 4 Variation coefficients of soil moisture under alteration irrigation

处理 Treatment	先淡后咸 F-B				先咸后淡 B-F			
间歇时间 Time between irrigation	0	30	60	120	0	30	60	120
变异系数 Variation coefficient	17.13	20.88	15.87	11.54	11.84	11.08	9.24	16.62



注:I 表示土壤初始含盐量;M 表示作物最低耐盐限度
Note: I denotes initial salt tolerance; M denotes lowest salt tolerance of crop

图 2 间歇组合灌溉对土壤盐分垂直再分布特征的影响

Fig.2 Effects of alteration irrigation on vertical distribution of soil salinity

随着间歇时间的增加,土壤含水率变异系数先增大后减小;而先咸后淡土壤含水率变异系数随间歇时间的增加先减小后增大。在间歇时间为 0,30,60 min 时,先淡后咸土壤含水率变异系数大于先咸后淡,分别高 44.68% (0 min)、88.45% (30 min)、71.75% (60 min),说明先咸后淡间歇组合灌溉模式土壤剖面含水率分布更均匀,更有利于提高农田水资源的利用效率,能为作物提供更适宜的生长环境。

2.2 土壤盐分垂直分布特征

微咸水灌溉带入土壤中的盐分与土壤本身的化学元素产生交换吸附作用,改变了土壤的物理和化学特征,易造成土壤可溶性盐分含量过高,引起盐分胁迫,同时,在灌水量不足的情况下,易引起水盐联合胁迫,使植物产生不可逆的代谢失常,严重影响作物的发育和产量,甚至造成局部或整株植物死亡^[19-21]。因此,利用微咸水灌溉必须制定合理的灌溉制度,将盐分对土壤和作物的危害降到最低。

2.2.1 组合次序对土壤盐分再分布的影响研究

不同咸淡水组合次序下土壤含盐量随土层深度的变化规律如图 2a 所示。由图 2a 可知,在同一土层深度处,咸淡水间歇组合灌溉模式下的土壤含盐量均小于微咸水直接灌溉,与淡水灌溉差异较小;在 0~20 cm 土层,先淡后咸土壤含盐量大于先咸后淡,而在 20~55 cm 土层,先咸后淡土壤含盐量大于先淡后咸,说明先咸后淡有利于降低土壤上层的含盐量,而先淡后咸有利于降低土壤中下层的含盐量。

2.2.2 间歇时间对土壤盐分运移规律的影响研究

图 2b、c 显示了不同间歇时间条件下土壤含盐量随土层深度的变化规律。由图 2b 可知,在 5~30 cm 土层,先淡后咸土壤含盐量表现为:微咸水直接灌溉>间歇组合灌溉(120 min)>间歇组合灌溉(60 min)>间歇组合灌溉(30 min)>间歇组合灌溉(0 min)>淡水灌溉;在 30~55 cm 土层,对于间歇组合灌溉,变化规律与之相反。造成这种结果的主要原因可能是,随着停水时间的增长,土壤致密层形成的越充分,入渗率变小,导致微咸水集中在土壤上层,而入渗较早的淡水将盐分淋洗到下层土壤,从而出现了土壤中下层含盐量较低而土壤表层和底层含盐量较高的现象。

由图 2c 可知,在先咸后淡间歇组合灌溉模式下,在一定的土层深度范围内,咸淡水间歇组合灌溉土壤含盐量均小于微咸水直接灌溉。在 5~25 cm 土层,对于不同的间歇时间,土壤含盐量变化不大,随着土层深度的增加,差异越来越显著。可能是因为第二轮淡水入渗对表层的土壤具有一定的淋洗效果,随着土壤入渗率的降低,使盐分积聚在中下层土壤。

研究区主要以冬小麦-夏玉米轮作为主体的一年两熟种植制度,每种作物都有一定的耐盐极限,故我们选择这两种作物耐盐极限的最小值来评价微咸水灌溉模式的危害性,即为 $2.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [22-23]。由图 2 可知,对于不同的咸淡水间歇组合灌溉模式,入渗结束后,0~50 cm 土层盐分含量均小于作物耐盐度,不会对作物产生盐害。

2.3 间歇组合灌溉土壤盐分分布特征评价

为了进一步分析间歇组合光土壤盐分分布特

征,引入了一系列评价指标^[24-25]。土壤含盐量低于土壤初始含盐量的深度称为土壤脱盐区深度 h ;土壤脱盐区深度与入渗结束时的湿润锋运移深度的比值称为脱盐区深度系数;土壤含盐量低于作物耐盐度、作物可以正常生长的淡化区深度(0~45 cm 作物根系密集区)称为达标脱盐区深度;达标脱盐区深度与湿润锋运移深度的比值称为达标脱盐区深度系数;脱盐率(D)计算公式如下:

$$D=\frac{S_1-S_2}{S_1}\times 100\%$$

(4)

式中, S_1 为 0 ~ 55 cm 土层土壤初始含盐量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_2 为灌后 0 ~ 55 cm 土层土壤含盐量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

由表 5 可知,先咸后淡土壤脱盐区深度、脱盐区深度系数、达标脱盐区、达标脱盐区深度系数均小于先淡后咸;两者的含盐量峰值都出现在湿润锋位置,先淡后咸含盐量峰值介于 $3.741\sim5.216\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,先咸后淡介于 $3.755\sim5.967\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,总体而言,先咸后淡含盐量峰值大于先淡后咸;先淡后咸脱盐率平均值大于先咸后淡,说明先淡后咸组合次序土壤脱盐效果更好,更有利于为作物提供良好的生长环境。

对于两种不同的组合次序,在咸淡水间歇组合灌溉模式下,脱盐区深度、达标脱盐区深度均超过了 0~45 cm 作物根系密度较大的土层;脱盐率平均值($0.36\%\sim0.543\%$)、含盐量峰值($3.741\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\sim5.967\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)均高于微咸水直接灌溉。说明咸淡水间歇组合灌溉模式脱盐效果更好,能够减小作物遭受土层整体和局部高盐胁迫的风险。

表 5 间歇组合灌溉土壤盐分分布评价指标对比分析

Table 5 Comparative analysis on evaluation index of salinity distribution under alteration irrigation										
处理 Treatment	全淡水直接灌溉 F	微咸水直接 灌溉 B	先淡后咸 F-B				先咸后淡 B-F			
间歇时间/min Time between irrigation			0	30	60	120	0	30	60	120
脱盐区深度/cm Soil desalination zone depth	52.77	53.05	51.63	50.39	51.03	50.70	50.60	49.43	47.97	50.05
脱盐区深度系数 Soil desalination depth index	0.92	0.96	0.92	0.84	0.86	0.86	0.87	0.85	0.81	0.84
达标脱盐区深度/cm Complied desalination depth	51.99	51.03	50.70	49.80	50.40	49.5	50.10	47.3	46.6	49.5
达标脱盐区深度系数 Complied desalination depth index	0.90	0.93	0.90	0.83	0.85	0.84	0.86	0.81	0.79	0.83
含盐量峰值/(g·kg ⁻¹) Soil salinity peak	3.48	2.75	3.75	5.22	4.84	3.74	5.97	3.76	5.41	5.75
脱盐率平均值/% Average desalination rate	0.612	0.36	0.543	0.36	0.36	0.371	0.404	0.384	0.362	0.372

3 讨 论

3.1 间歇组合灌溉对土壤含水率的影响

间歇组合灌溉不仅可以节约淡水资源,而且可以提高水分利用效率、减少深层渗漏,为作物生长提供良好的生长环境^[25]。本研究的结果与前人的研究结果基本一致,在同一土层深度处,间歇组合灌溉模式下各土层的土壤含水率均大于淡水直接灌溉,且与微咸水直接灌溉差异较小,使大部分灌溉水贮存在土壤有效深度内,可有效改善土壤的蓄水能力。同时,在间歇组合灌溉模式中,先咸后淡土壤剖面含水率分布更均匀,有利于作物根系的生长。

3.2 间歇组合灌溉对土壤含盐量的影响

目前关于间歇组合灌溉对土壤含盐量影响的研究报道较为少见。本研究发现先咸后淡有利于降低土壤上层(0~20 cm)的含盐量,而先淡后咸有利于降低土壤中下层(20~55 cm)的含盐量,这一结论与刘静妍等^[11]研究结果基本一致。本研究表明:咸淡水间歇组合灌溉模式下的土壤含盐量均小于微咸水直接灌溉,脱盐率平均值(0.36%~0.543%)、含盐量峰值(3.741~5.967 g·kg⁻¹)均高于微咸水直接灌溉,且入渗结束后,土壤含盐量小于作物耐盐度深度可达 50 cm,说明咸淡水间歇组合灌溉在不对作物根系密集区产生盐害的前提下,土壤脱盐效果更好,更有利于改良盐碱土壤及促进作物生长。

3.3 建议

综上所述,利用咸淡水间歇组合灌溉模式,有利于为作物提供良好的土壤水盐环境。由于时间与条件所限,本试验仅在室内条件下进行,所得结论有一定的局限性,需要大田试验验证。为了获得盐碱地作物高产优质效果,今后应综合考虑土壤盐分、pH 值及土壤盐分离子等重要参考指标,全面系统地研究它们对作物产量和品质的影响。

4 结 论

本文以中度盐碱土壤为研究对象在室内进行微咸水一维垂直积水入渗试验,分析了微咸水间歇组合灌溉土壤水盐再分布规律,得到如下结论:

(1)在 0~15 cm 土层,先淡后咸灌溉模式土壤含水率、土壤含盐量大于先咸后淡;在 15~55 cm 土层,先咸后淡土壤含水率、土壤含盐量大于先淡后咸;入渗结束后,所有处理的土壤含盐量小于作物耐盐度深度可达 50 cm,不会对作物产生盐害。

(2)对于先淡后咸间歇组合灌溉模式,在 5~30 cm 土层,同一深度处土壤剖面含水率变化不大;土壤含盐量表现为:微咸水直接灌溉>间歇组合灌溉(120 min)>间歇组合灌溉(60 min)>间歇组合灌溉(30 min)>间歇组合灌溉(0 min)>淡水灌溉;先淡后咸灌溉模式有利于降低中下层土壤溶液盐分含量。

(3)在先咸后淡组合灌溉模式下,间歇组合灌溉(0、30、60 min)同一深度处土壤含水率基本一致,间歇灌溉(120 min)土壤含水率偏小;在 5~25 cm 土层,间歇组合灌溉土壤含盐量变化不大,在 25~55 cm 土层,土壤含盐量差异越来越显著;先咸后淡有利于淋洗上层土壤溶液盐分含量。

间歇组合灌溉盐分分布均匀性更好,先淡后咸组合次序土壤脱盐效果更好。在黄河三角洲地区的盐碱耕地上,可根据作物的耐盐能力选择合理的微咸水间歇组合灌溉参数,以期达到使土壤环境质量达到最优、作物正常生长的效果。

参 考 文 献:

- [1] 范晓梅,刘高焕,唐志鹏,等.黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析[J].水土保持学报,2010,(1):139-144.
- [2] Rosenthal E, Zilberbrand M, Livshitz Y. The hydro-chemical evolution of brackish groundwater in central and northern Sinai (Egypt) and in the western Negev (Israel) [J]. Journal of Hydrology, 2007, 337(3):294-314.
- [3] 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,(12):117-126.
- [4] 王全九,徐益敏,王金栋,等.咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J].灌溉排水,2002,(4):73-77.
- [5] Li Y, Niu W, Xu J, et al. Root morphology of greenhouse produced muskmelon under sub-surface drip irrigation with supplemental soil aeration [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 201: 287-294.
- [6] Orlofsky E, Bernstein N, Sacks M, et al. Comparable levels of microbial contamination in soil and on tomato crops after drip irrigation with treated wastewater or potable water[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 215:140-150.
- [7] Ahmed O, Inoue M, Moritani S. Effect of saline water irrigation and manure plication on the available water content, soil salinity, and growth of wheat[J]. Agricultural Water Management, 2011, 97(1): 165-170.
- [8] 马东豪,王全九,苏莹,等.微咸水入渗土壤水盐运移特征分析[J].灌溉排水学报,2006,(1):62-66.
- [9] Rao S S, Tanwar S P S, Regar P L. Effect of deficit irrigation, phosphorous inoculation and cycocel spray on root growth, seed cotton yield and water productivity of drip irrigated cotton in arid environment [J]. Agricultural Water Management, 2016, 169: 14-25.