

不同矿化度咸水结冰灌溉对重度盐碱地土壤 水分入渗和盐分运移的影响

李争争, 屈忠义, 杨 威, 何 婧

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探究不同矿化度咸水结冰灌溉对重度盐碱地土壤水分入渗和盐分运移的影响。采用室内有机玻璃土柱模拟试验, 设置 3 个梯度灌水水质(蒸馏水、3 g/L 微咸水、10 g/L 咸水)和 2 种灌溉方式(结冰灌溉、直接灌溉)的 6 种不同处理, 对土壤的水分入渗特性及脱盐效果进行对比分析研究。结果表明: (1) 3 个梯度灌水水质下, 结冰灌溉方式的土壤初始入渗速率分别是直接灌溉方式的 8.2、4.6、5.8 倍。结冰灌溉方式下, 灌溉水矿化度越高, 土壤入渗速率越快; (2) Kostiakov 模型适合拟合不同矿化度咸水结冰灌溉方式下的土壤水分入渗过程, Horton 模型适合拟合不同矿化度咸水直接灌溉方式下的土壤水分入渗过程; (3) 3 个梯度灌水水质下, 直接灌溉方式 0—60 cm 土层土壤含水率较结冰灌溉方式分别提高 1.4%~6.3%, 1.6%~3.6%, 0.9%~7.6%; (4) 各处理下 0—30 cm 土层土壤脱盐效果较为显著, 盐分不断向土层 60 cm 处迁移, 各处理土壤脱盐率逐渐降低。0—30 cm 土层处, 淡水直接灌溉方式下土壤脱盐率最大(93%~97%), 3 g/L 微咸水结冰灌溉的脱盐率次之(87%~91%)。50—60 cm 土层处, 淡水结冰灌溉方式下土壤脱盐率最高(13.3%), 其次为 3 g/L 微咸水结冰灌溉方式(9.1%)。综合考虑, 3 g/L 微咸水结冰灌溉能够提高土壤水分入渗速率, 有效降低 0—60 cm 土层的土壤盐分含量。

关键词: 咸水结冰灌溉; 入渗; 模型模拟; 水盐迁移

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0304-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.042

Effects of Freezing Irrigation with Different Saline Water on Soil Water Infiltration and Salt Transport in Severely Saline-Alkali Soil

LI Zhengzheng, QU Zhongyi, YANG Wei, HE Jing

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract: The objective of this study was to determine the effect of freezing irrigation with saline water of different salinity on soil water infiltration and salt transport in severely saline-alkali soil. In order to compare and analyze the soil water infiltration characteristics and desalination effect, this study adopted an indoor simulation test of soil column made of organic glass. Six treatments with 3 different water quality (distilled water, 3 g/L brackish water, 10 g/L saline water) and 2 different methods (freezing irrigation, direct irrigation) were set up. The results showed that: (1) The initial infiltration rate of freezing irrigation was 8.2, 4.6 and 5.8 times higher than those of direct irrigation under three irrigation water quality. Under the freezing irrigation mode, the higher salinity of irrigation water, the faster soil infiltration rate. (2) Kostiakov model was suitable for fitting the soil water infiltration process under different saline water under freezing irrigation. Horton model is suitable for fitting the soil water infiltration process under direct irrigation. (3) The soil moisture contents in 0—60 cm soil layer of direct irrigation increased by 1.4%~6.3%, 1.6%~3.6%, 0.9%~7.6% respectively compared with those of freezing irrigation under the three irrigation water quality. (4) The desalination effect of 0—30 cm soil layer was more significant under each treatment, the salt was moved to 60 cm soil layer continuously, and the desalination rate of each treatment decreased gradually. In 0—30 cm soil, the desalination rate of fresh water under direct irrigation was the highest, which was 93%~97%, followed by 3 g/L of freezing irrigation, which was 87%~91%. In 50—60 cm soil, the desalination rate of fresh water under freezing irrigation was the highest, which was 13.3%, followed by 3 g/L brackish

收稿日期: 2020-11-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(41761050)

第一作者: 李争争(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事盐碱地水盐运移研究。E-mail: lizhengzheng0411@163.com

通信作者: 屈忠义(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事区域土壤水土环境及节水灌溉理论技术应用研究。E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

water freezing irrigation, which was 9.1%. Comprehensive consideration, salint water of 3 g/L with freezing irrigation could improve soil water infiltration rate, effectively reduce soil salt content in 0—60 cm.

Keywords: freezing saline water irrigation; infiltration; model simulation; water and salt migration

内蒙古具有广阔的后备耕地资源,据统计^[1],内蒙古盐碱地面积达到 $365.16 \times 10^4 \text{ hm}^2$,盐碱地的广泛分布严重制约了农业的高效发展。该地区农业灌溉用水主要为黄河水。随着节水工程的实施,引黄灌溉水量大幅度减少^[2]。在引黄水量及淡水资源紧缺的情况下,开发利用咸水资源进行农业生产及盐碱地改良成为重要途径之一^[3]。史培军等^[4]为解决北部地区淡水资源缺乏问题,提出了利用海冰制备淡水的想法。后续有学者^[5-7]在该想法上进行试验研究,利用咸水结冰灌溉的方法改良盐碱土,咸水结冰灌溉成为一种新型的咸水利用方法。

咸水结冰灌溉是咸水在结冰条件下使水咸淡分离,再利用结冰融化时咸水先流出,淡水后流出的原理,对土壤起到一定的洗盐作用^[8]。据调查^[5],滨海地区地下水矿化度达到 7~27 g/L。更多的学者在滨海地区利用该地区高矿化度的地下咸水进行结冰灌溉试验研究。李宪等^[9]利用 8,16,24,36 g/L 矿化度咸水对海滨地区盐碱土进行室内土柱咸水结冰灌溉试验发现,矿化度低于 16 g/L 时,适宜咸水结冰试验;张秀梅等^[10]、郭凯等^[11]、潘洁等^[12]均在滨海盐碱地上开展了灌溉水量为 180 mm、矿化度为 7.362~14.27 g/L 的地下咸水结冰灌溉的野外试验。已有研究^[10-12]发现,矿化度为 7.362~14.27 g/L 咸水结冰灌溉方式下土壤盐分均有效降低,且 0—20 cm 土层土壤盐分迅速降低,20 cm 以下土层土壤盐分基本稳定在同一水平。张越等^[13]研究表明,淡水直接灌溉、7.5 g/L 咸水结冰灌溉方式下土壤的脱盐效果及脱盐深度均优于 15 g/L 咸水结冰灌溉。进一步说明了在进行咸水结冰灌溉时并不是咸水的矿化度较高,土壤的脱盐效果就越好。

通过前人^[14-15]试验发现,矿化度>7 g/L 的地下咸水结冰灌溉试验较多,微咸水直接灌溉的试验研究也较

为广泛。但利用盐碱地暗管排出的咸水和微咸水进行结冰灌溉的试验研究相对较少,鲜有研究应用 Philip 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型模拟不同矿化度结冰灌溉下土壤入渗特征。通过结合前人^[9,11,13-14]的试验方法,以达拉特旗重度盐碱地土壤为改良对象,采取室内一维土柱试验探讨不同矿化度咸水结冰灌溉、直接灌溉试验对重度盐碱地土壤水分入渗及盐分淋洗效果的影响,研究不同灌溉方式下土壤水分的入渗性能、不同时段土壤含水率分布规律及土壤盐分动态变化,评价 Philip 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型 3 种入渗模型的适用性,为盐碱地暗管排出的咸水资源利用提供重要的科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗王爱召镇东兴村重度盐碱地,取样深度为 0—20 cm。土壤经自然风干、碾压、均匀混合后过 2 mm 网筛以备室内试验时使用。利用激光粒度仪 HELOS/BS(德国新帕泰克公司)测定的各个粒径含量,根据美国农业部制土壤质地三角图判断土壤的质地,其物理性质见表 1。

根据本团队野外试验测定的排水水质数据可知,暗管排水矿化度一般在 8~13 g/L,而暗管排水进入到排水沟后,矿化度有所降低,变化为 2~3 g/L,但离子组成成分一致。由于微咸水的矿化度一般在 1~3 g/L,咸水的矿化度一般在 3~10 g/L,排水沟矿化度属于微咸水范围内,暗管排水矿化度与咸水矿化度范围较为接近。因此,选取矿化度为 3 g/L 的微咸水,矿化度为 10 g/L 的咸水水质进行室内咸水结冰灌溉试验。灌溉用的咸水、微咸水参照达旗暗管排水的矿化度组成离子成分进行配置,配置各化学试剂质量见表 2。

表 1 供试土壤物理性质

土层 深度/cm	颗粒组成体积分数/%			土壤质地	容重/ (g·cm ⁻³)	田间 持水率/%	饱和 含水率/%	土壤含盐量/ (g·kg ⁻¹)
	砂粒	粉粒	黏粒					
	0.05~2 mm	0.002~0.05mm	<0.002 mm					
0—20	60.82	33.80	5.38	砂壤土	1.45	27.12	32.56	12.50

1.2 试验设计

试验于 2020 年 9—11 月在内蒙古农业大学冻融实验室开展,共设置 3 个梯度灌水水质(0 g/L 蒸馏水、3 g/L 微咸水、10 g/L 咸水)和 2 种灌水方式(结冰灌溉、直接灌溉)6 个处理,分别为淡水结冰灌溉(D0)、3 g/L 微咸水结冰灌溉(D3)、10 g/L 咸水结冰灌溉(D10)、淡水直接灌溉(L0)、3 g/L 微咸水直接

灌溉(L3)、10 g/L 咸水直接灌溉(L10),每个处理设置 3 组重复试验。根据当地灌水需求,设置各个处理的灌水量均为 150 mm。

采用有机玻璃土柱进行试验的模拟,车升国等^[16]通过土柱模拟试验发现,咸水结冰灌溉能够显著降低 0—40 cm 土层盐分累积,故本试验取土深度设置为 0—60 cm,以探究耕作层土壤水盐的变化情

况,将供试土壤按 1.45 g/cm³ 的容重装入直径 9 cm,高 90 cm 的土柱中。土柱底部装 5 cm 高的石英砂,石英砂粒径为 5~10 mm,装土高 60 cm。结冰灌溉和直接灌溉试验开始前,在装好的每个土柱中灌入 1.5 L 的淡水,使土柱中各层的土壤含水率与野外农田的土壤含水率保持相似水平,土壤含水率在 25% 左右。

表 2 不同矿化度咸水各个化学试剂质量配比

化学试剂	单位:g/L	
	咸水 (矿化度 10 g/L)	微咸水 (矿化度 3 g/L)
KHCO ₃	0.667	0.200
K ₂ SO ₄	0.249	0.075
MgSO ₄	1.539	0.462
CaCl ₂	1.485	0.446
NaCl	2.839	0.852
Na ₂ SO ₄	3.221	0.965
总计	10.000	3.000

结冰灌溉:将淡水、3 g/L 微咸水、10 g/L 咸水按 150 mm 的灌水量分别灌溉到 3 个各层土壤含水率均达到 25% 的土柱中,冷冻室的温度维持在-15℃,使之温度与冬季室外温度在同一水平,保证灌溉后立即结冰。冷冻 48 h,拿到室内进行融化,融化过程中用日光灯模拟自然条件下的阳光照射,日光灯照射时间为 8:00—17:00,共计 9 h。在融化过程中,冰层由四周向中间融化,融化出的水分向深层土壤运移,灌溉水的液面高度开始下降。

直接灌溉:将淡水、3 g/L 微咸水、10 g/L 咸水按 150 mm 的灌水量分别灌入到 3 个各层土壤含水率均达到 25% 的土柱中,用日光灯模拟自然条件下阳光照射,日光灯照射时间为 8:00—17:00,共计 9 h。随着入渗时间的推移,灌溉水向土壤深层迁移,灌溉水的液面高度开始下降。

1.3 指标测定方法

各个处理灌溉水液面高度均为 150 mm,以先紧后宽的时间间隔记录入渗一定时间后灌溉水液面高度情况。由于试验开始前土壤中的含水率已灌溉到 25%,结冰灌溉融化入渗及直接灌溉入渗过程速率将降低,因此初始入渗 1 h 记录 1 次,后期 6 h 记录 1 次,从而反映出不同时段土壤的入渗性能。为保证融化过程中土壤水分入渗的连续性 & 土体内部结构稳定,待入渗结束后分别对第 1,3,6,10 天的土壤进行取样,土样从土柱侧壁的取样孔中取出,取土深度分别为 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60 cm,并将取好的土样装到密封袋里,测定不同处理下 0—60 cm 土壤水盐运移情况。

(1)土壤入渗速率:通过测定液面高度,换算出土壤入渗量,记录其 & 入渗时间之间的关系,从而计算

土壤入渗速率。

(2)土壤含水率:采用烘干法^[17]测定。

(3)土壤盐分:测定 25℃ 时土水质量比为 1:5 的土壤浸提液的电导率^[17],然后计算土壤盐分含量:

$$Q=3.609EC-0.523$$

(1)

式中:Q 为土壤盐分含量(g/kg);EC 为土壤浸提液的电导率(mS/cm)。

(4)土壤脱盐率:土壤脱盐率=(初始土壤盐分含量(g/kg)-灌水后土壤盐分含量(g/kg))/初始土壤盐分含量(g/kg)

1.4 数据处理

利用 Excel 2007 软件进行数据处理,Origin 2017 软件进行绘图。采用 SPSS 19.0 软件进行显著性分析,应用 Matlab 2014a 软件进行土壤水分入渗过程的拟合,模拟的模型为:

(1)Philip 入渗模型

$$f(t)=0.5st^{-0.5}+f_c$$

(2)

式中:f(t)为土壤入渗速率(mm/min);t 为入渗时间(min);f_c为土壤稳定入渗速率(mm/min);s 为土壤吸渗率(mm/min^{1/2})^[17]。

(2)Kostiakov 入渗模型

$$f(t)=at^b$$

(3)

式中:a 为第 1 个单位时间末的土壤入渗率(mm/min);b 为随着时间的变化土壤水分入渗速率的快慢程度,无量纲^[17]。

(3)Horton 入渗模型

$$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$$

(4)

式中:f₀为土壤的初始入渗速率(mm/min);k 为衰减指数^[17]。

上述模型利用决定系数 R²、均方根误差 RMSE 来判断模型模拟的精度,当 R² 越接近于 1,且 RMSE 越靠近 0,说明方程拟合的程度越好。

2 结果与分析

2.1 不同处理下重度盐碱化土壤水分入渗规律

不同处理下土壤水分入渗速率随时间变化见图 1。结冰灌溉条件下呈现灌溉水矿化度越大、土壤入渗速率越快的现象。0~5 000 min 时,D10、D3 处理下的土壤水分入渗速率较 D0 处理分别提高 25.6%,16.3%。3 g/L 微咸水结冰灌溉与 10 g/L 咸水结冰灌溉处理均在 5 000 min 左右入渗完毕。0~6 000 min 时,L3 与 L10 处理土壤入渗速率较 L0 处理分别提高 72%,62%,L3 处理土壤入渗速率较 L10 处理土壤入渗速率提高 6% 左右。淡水直接灌溉方式下大约 16 000 min 后入渗完成。说明直接灌溉下,灌溉水矿化度越高,土壤入渗速率越慢。

D0、D3、D10 处理下土壤初始的入渗速率依次为 0.20,0.22,0.26 mm/min,分别是 L0、L3、L10 处理下土壤初始入渗速率的 8.2,4.6,5.8 倍。D0、D3、D10 处理下土壤稳定入渗速率分别为 0.014,0.024,0.026 mm/min,L0、L3、L10 处理下土壤稳定入渗速率分别为 0.006,0.015,

0.013 mm/min。不同矿化度咸水结冰灌溉方式下的土壤初始入渗速率、稳定入渗速率均高于不同矿化度咸水直接灌溉方式,各处理土壤入渗速率大小顺序为 D10>D3>D0>L3>L10>L0。整体来说,结冰灌溉方式下能够提高土壤水分的入渗速率。

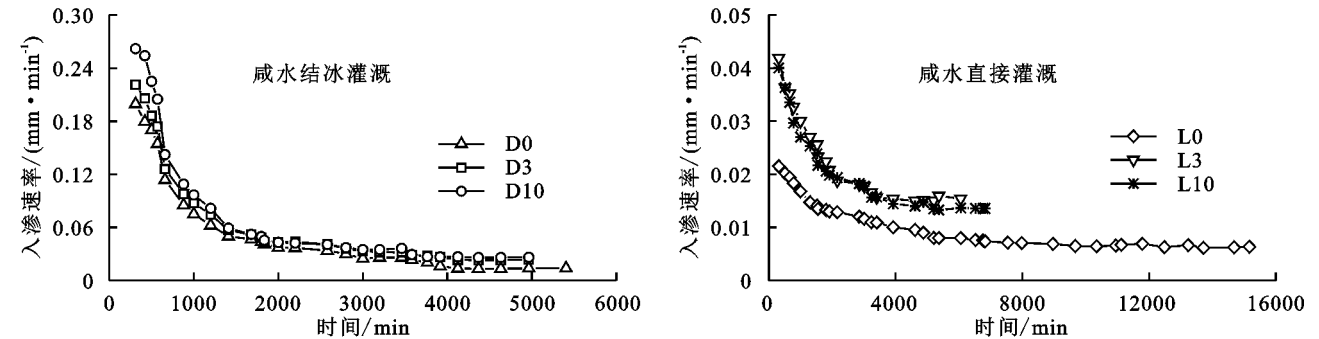


图 1 不同处理下土壤水分入渗速率随时间变化

2.2 不同处理下重度盐碱化土壤水分入渗模型分析

Philip 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型对不同处理下土壤水分入渗拟合结果见表 3。Philip 模型拟合不同矿化度咸水结冰灌溉方式下的土壤水分入渗时发现,灌溉水的矿化度越高, R^2 越小,为 0.947 1~0.970 1, RMSE 为 0.009 6~0.017 3 mm/min。利用 Philip 模型拟合不同矿化度直接灌溉方式下的土壤水分入渗时, R^2 为 0.803 3~0.835 5, RMSE 为 0.002 4~0.004 4 mm/min。D0、D3、D10 处理的吸渗率分别为 9.141, 10.090, 12.250 mm/min^{1/2},远大于不同矿化度咸水直接灌溉方式下的吸渗率,L0、L3、L10 处理的吸渗率均未达到 1 mm/min^{1/2},说明不同矿化度咸水直接灌溉方式下土壤初始入渗速率较慢。D0、D3、D10 处理下模拟的 f_c 值为负值,与实际稳定速率符号相反,说明 Philip 模型对不同矿化度咸水结冰灌溉方式下土壤水分入渗进行拟合时适用性较低。

应用 Kostiakov 模型拟合不同矿化度咸水结冰灌溉方式下的土壤水分入渗过程中 R^2 较高,D0、D3、D10 处理分别为 0.972 3,0.970 9,0.960 7, RMSE 分别为 0.009 3,0.010 5,0.014 9 mm/min,说明不同矿化度咸水

结冰灌溉方式下土壤水分入渗过程在该模型下拟合得较好。D0、D3、D10 处理下 a 值分别为 37.53,33.75,58.54 mm/min,第 1 时段末的累积入渗量较高,说明结冰灌溉方式下土壤初始入渗速率较快。Kostiakov 模型拟合不同矿化度咸水直接灌溉方式下的土壤水分入渗过程时,L0、L3、L10 处理下的 R^2 分别为 0.913 5,0.925 1,0.918 2, RMSE 分别为 0.001 5,0.003 0,0.002 9 mm/min。

利用 Horton 模型拟合 D0、D3、D10 处理下土壤水分入渗过程时, R^2 分别为 0.907 6,0.897 0,0.876 4, RMSE 分别为 0.016 9,0.019 7,0.026 5 mm/min,拟合的 f_c 值与真实的稳定入渗速率相差 0.01 mm/min。利用 Horton 模型拟合 L0、L3、L10 处理下的土壤水分入渗过程时, R^2 均在 0.98 以上, RMSE 均<0.001 mm/min,真实的稳定入渗速率与拟合的 f_c 值基本一致,说明不同矿化度直接灌溉方式下土壤水分入渗过程适合利用 Horton 模型进行拟合。

综合考虑,Kostiakov 模型适合拟合不同矿化度咸水结冰灌溉方式下的土壤水分入渗过程,而 Horton 模型更好地拟合不同矿化度咸水直接灌溉方式下的土壤水分入渗过程。

表 3 3 种模型对不同处理下土壤水分入渗过程的拟合结果

处理	Philip 模型				Kostiakov 模型				Horton 模型			
	$s/$ (mm·min ^{-1/2})	$f_c/$ (mm·min ⁻¹)	R^2	RMSE/ (mm·min ⁻¹)	$a/$ (mm·min ⁻¹)	b	R^2	RMSE/ (mm·min ⁻¹)	k	$f_c/$ (mm·min ⁻¹)	R^2	RMSE/ (mm·min ⁻¹)
D0	9.1410	-0.0583	0.9701	0.0096	37.5300	-0.8966	0.9723	0.0093	0.0009	0.0094	0.9076	0.0169
D3	10.0900	-0.0612	0.9634	0.0118	33.7500	-0.8598	0.9709	0.0105	0.0008	0.0140	0.8970	0.0197
D10	12.2500	-0.0809	0.9471	0.0173	58.5400	-0.9232	0.9607	0.0149	0.0009	0.0125	0.8764	0.0265
L0	0.4183	0.0062	0.8033	0.0024	0.0878	-0.2630	0.9135	0.0015	0.0005	0.0067	0.9890	0.0005
L3	0.7422	0.0131	0.8355	0.0044	0.1702	-0.2683	0.9251	0.0030	0.0007	0.0146	0.9954	0.0007
L10	0.7124	0.0119	0.8268	0.0042	0.1607	-0.2685	0.9182	0.0029	0.0007	0.0135	0.9924	0.0009

2.3 不同处理下重度盐碱化土壤水分含量的变化

灌溉水向深层土壤入渗过程中,各层土壤水分均受到补给,待入渗结束后对不同处理下垂直方向上土壤

含水率进行分析,变化情况见图 2。从灌溉水入渗完成后第 1 天来看,随着土层深度的增加,L0 处理下土壤含水率呈现增加的趋势,土层且各层土壤含水率在

29.92%~32.28%,0—60 cm 土层土壤含水率几乎接近于饱和,D0、D3、D10、L3、L10 处理的表层(0—10 cm)土壤含水率几乎达到饱和,均在 30.96%~32.76%。随着土层深度的增加,土壤含水率呈现降低的趋势,但均大于土壤初始含水率(25%),说明随着土层深度的增加,土壤水分向深层的补给量逐渐变小。灌溉水自入渗完成的 3~6 天,各个处理土壤含水率随土层深度的增加而增加,深层较表层土壤含水率提高 1%~3%。入渗完毕后第 10 天,各层土壤含水率逐渐降低至初始含水率附

近,0—60 cm 土层的土壤平均含水率从大到小的顺序为 L0>L10>L3>D0>D3>D10,分别为 26.89%,26.63%,25.92%,25.68%,25.12%,24.94%。

总体来看,随着入渗完成后时间的推移,L0、L3、L10 处理 0—60 cm 土层的土壤含水率均大于 D0、D3、D10 处理的土壤含水率,分别较 D0、D3、D10 处理提高 1.4%~6.3%,1.6%~3.6%,0.9%~7.6%,说明不同矿化度咸水直接灌溉方式下的土壤含水率高于不同矿化度咸水结冰灌溉方式。

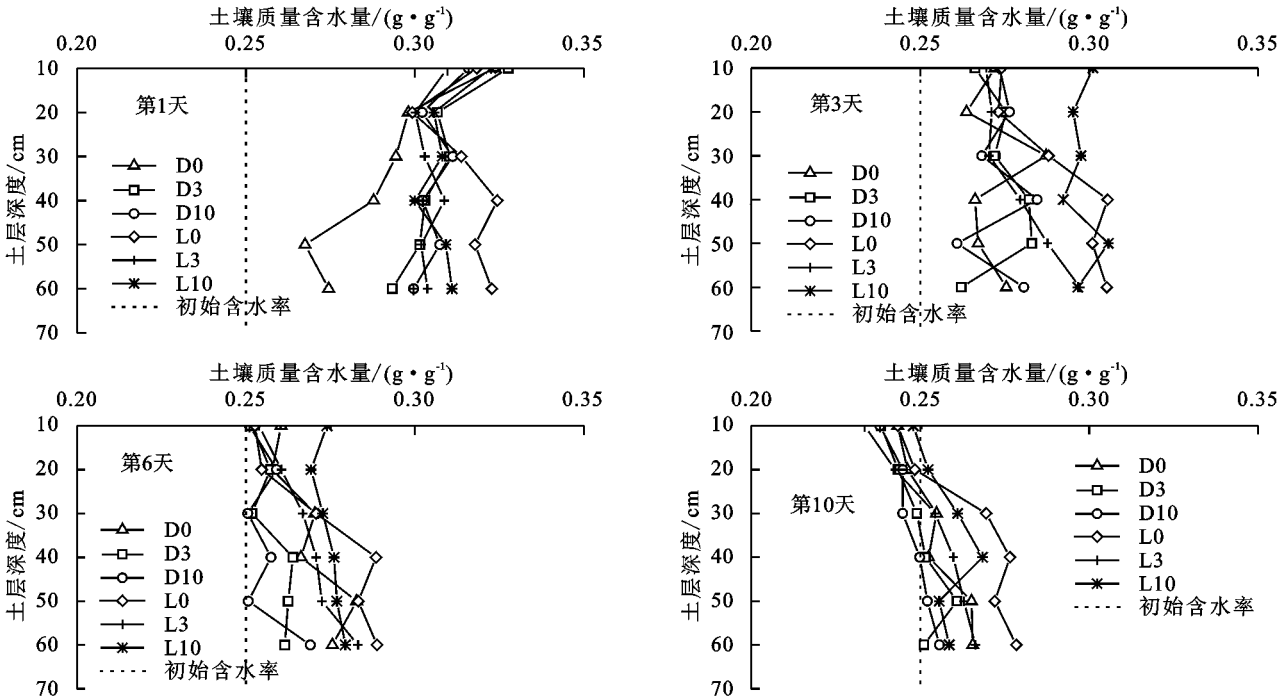


图 2 不同处理下土壤含水率动态分布

2.4 不同处理下土壤盐分淋洗效果

“盐随水走”是土壤盐分运移的特点,待入渗结束后对不同处理下土壤盐分在垂直方向上分布规律进行分析。由图 3 和表 4 可知,入渗完成后不同时期下,各处理的土壤盐分均随着土层深度的增加呈现逐渐增大的趋势。原因是水分向深层土壤迁移中携带盐分一起运动,使得深层土壤盐分显著高于表层。入渗完成后不同时期下,表层(0—30 cm)处土壤盐分均显著降低,D0、D3、D10、L0、L3、L10 处理下,土壤 0—30 cm 处脱盐率分别为 76%~83%,87%~91%,80%~86%,93%~97%,81%~87%,62%~76%,D10、L3 处理土壤脱盐情况一致。通过显著性分析发现,入渗结束后的第 1 天和第 10 天,D0、D10、L3 处理 0—30 cm 土层的土壤脱盐率情况无显著性差异($P>0.05$),而 D3、L0、L10 处理与 D0、D10、L3 处理 0—30 cm 土层的土壤脱盐率情况有显著性差异($P<0.05$)。说明该灌水量下,能够显著降低 0—30 cm 处的土壤盐分含量,且淡水直接灌溉方式下的土壤脱盐效果最优,3 g/L 微咸水结冰灌溉方式下的土壤脱盐效果次之。通过对>30 cm 土

层的土壤盐分进行分析发现,不同时期下,各处理在 30—40 cm 土层处土壤盐分变化显著,D0、D3、D10、L0、L3、L10 处理下 40 cm 土层处土壤盐分含量分别是 30 cm 土层处土壤盐分含量的 1.76~3.42,3.48~3.94,2.97~3.88,7.33~9.98,1.98~5.17,1.84~2.80 倍。淡水直接灌溉方式下土壤盐分在 40 cm 土层处增幅最大,3 g/L 微咸水结冰灌溉方式下土壤盐分增幅次之,是由于 0—30 cm 土层处土壤盐分随水分向 40 cm 土层以下土壤迁移的结果;且相同处理下,随着入渗完成时间的推移 40 cm 土层处土壤盐分逐渐降低,而 50—60 cm 土层处土壤盐分呈现先降低再升高的过程。说明随着入渗结束后时间的增加,“盐随水走”,土壤水分通过重力作用向下层迁移,使得土壤盐分向深层累积。通过对 50—60 cm 土层处脱盐率分析,入渗完成第 1 天时,L0、L3、L10 处理土壤脱盐率呈现负值,而 D0、D3、D10 处理土壤脱盐率呈现正值,脱盐率分别为 14.6%,19.7%,8.7%。入渗完成后的 3~10 天,D0、D3、D10、L0、L3、L10 处理土壤脱盐率分别为 14.9%~13.3%,25.1%~9.1%,16.6%~0.4%,

8.9%~8.4%,11.2%~-1.6%,9.3%~-8.9%,随着入渗完成时间的推移,土壤脱盐率逐渐减小,淡水结冰灌溉方式下土壤脱盐效果最优,3 g/L 微咸水直接灌溉方式下的土壤脱盐效果次之。

因此,本研究发现,入渗结束后不同时期,各个处理均在 0—30 cm 土层处土壤的脱盐效果最为显著,

淡水直接灌溉方式下土壤脱盐率最大,3 g/L 微咸水结冰灌溉方式下土壤脱盐效果次之,随着入渗完成至第 10 天时,在 50—60 cm 土层处,淡水结冰灌溉方式下土壤脱盐率最大,3 g/L 微咸水结冰灌溉方式下土壤脱盐效果次之。综合考虑,认为 3 g/L 微咸水结冰灌溉对 0—60 cm 土层具有更好的脱盐效果。

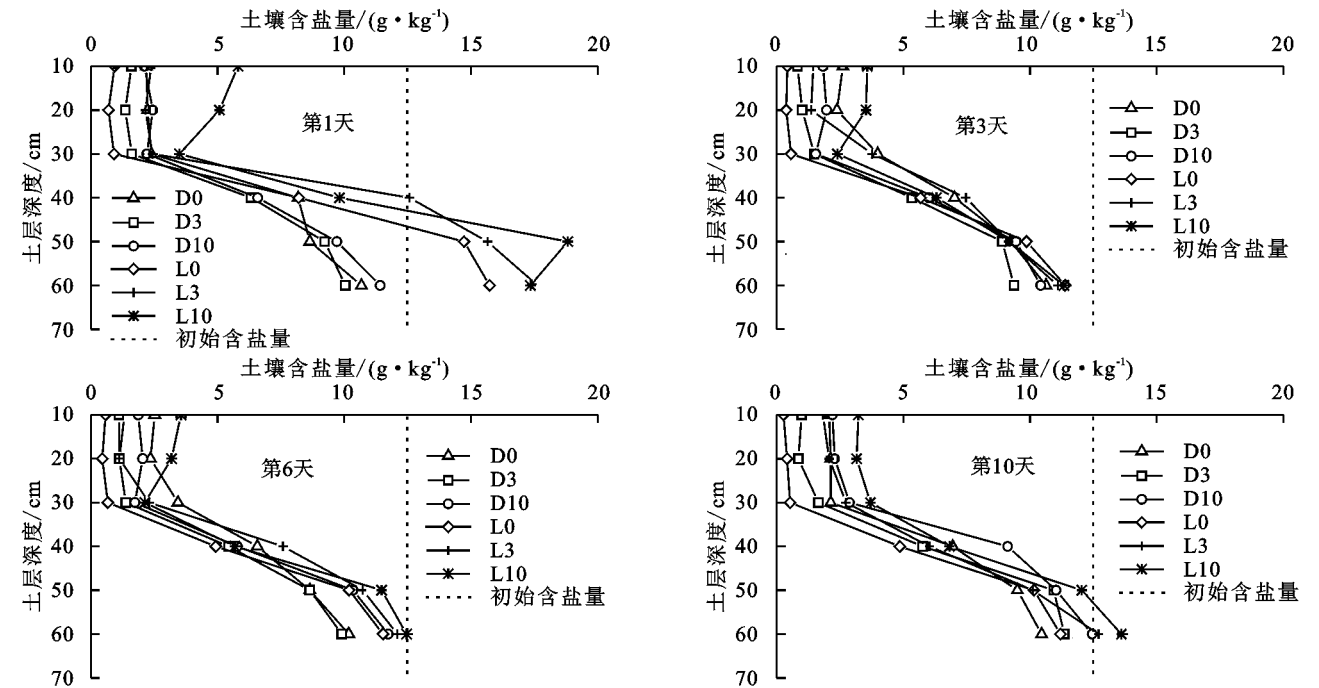


图 3 不同处理下土壤盐分动态分布

表 4 不同处理下土壤脱盐率 单位: %

时间/d	土层深度/cm	D0	D3	D10	L0	L3	L10
1	0—10	82.4c	87.2b	83.1c	92.5a	80.9c	53.5d
	10—20	82.1c	89.1b	80.5c	94.4a	82.8c	59.4d
	20—30	80.9c	87.1b	82.3c	92.7a	80.5c	72.0d
	30—40	34.5b	49.4a	47.3a	34.4b	-0.6d	21.5c
	40—50	30.9a	26.2ab	22.3b	-17.8c	-25.2c	-50.6d
	50—60	14.6ab	19.7a	8.7b	-25.9c	-41.0d	-38.8d
	60—70	14.6ab	19.7a	8.7b	-25.9c	-41.0d	-38.8d
3	0—10	79.1e	93.4b	85.3d	96.6a	88.4c	71.4f
	10—20	80.9e	91.9b	84.2d	96.9a	89.1c	71.8f
	20—30	68.1d	88.1b	87.6b	95.4a	69.8d	80.8c
	30—40	43.8d	57.3a	52.0bc	54.6ab	40.2d	49.5c
	40—50	26.1ab	28.7ab	24.4ab	21.1b	26.8ab	26.5ab
	50—60	14.9bc	25.1a	16.6b	8.9d	11.2bcd	9.3cd
	60—70	14.9bc	25.1a	16.6b	8.9d	11.2bcd	9.3cd
6	0—10	79.8d	91.2b	85.0c	95.4a	89.4b	71.5e
	10—20	81.2d	91.0b	83.6c	96.4a	91.0b	74.5e
	20—30	72.5e	89.0b	86.1c	94.6a	81.6d	82.9d
	30—40	47.4c	56.5ab	53.7b	60.6a	39.3d	54.5b
	40—50	30.9a	30.9a	17.3b	18.5b	14.1bc	8.2c
	50—60	18.6a	20.8a	6.1bc	7.8b	3.3bc	0.3c
	60—70	18.6a	20.8a	6.1bc	7.8b	3.3bc	0.3c
10	0—10	83.4cd	92.1b	82.3d	97.8a	85.4c	66.2e
	10—20	82.9c	93.1b	81.6c	96.7a	83.4c	74.7d
	20—30	82.9c	86.8b	77.0d	95.7a	78.1d	70.4e
	30—40	44.4c	53.9b	27.0d	61.1a	51.7b	45.4c
	40—50	24.0a	12.5bc	11.7c	18.8ab	19.1ab	3.7d
	50—60	13.3a	9.1b	0.4c	8.4b	-1.6c	-8.9d
	60—70	13.3a	9.1b	0.4c	8.4b	-1.6c	-8.9d

注:表中同行不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

3 讨论

土壤水分入渗与土壤质地、土壤结构、土壤前期含水量、供水方式、灌水水质等因素有关^[18]。本研究通过分析不同矿化度咸水结冰灌溉、直接灌溉方式对重度盐碱地土壤水分入渗规律发现,结冰灌溉方式下,灌溉水的矿化度越高,土壤的入渗速率越快,与田宇等^[19]研究结果一致。前人^[20-21]研究发现,咸水直接灌溉方式下土壤水分的入渗特性较淡水直接灌溉方式显著提高,与本试验研究结果相同。但本试验研究发现,直接灌溉方式下,在 0~6 000 min 时,3 g/L 微咸水灌溉后土壤入渗速率较 10 g/L 咸水灌溉后土壤入渗速率提高 6%,毕远杰等^[22]研究发现,微咸水灌溉能够改变土壤的结构特性,增大土壤入渗的能力。当灌溉水矿化度较高时,土壤的结构被破坏,土壤孔隙度下降,导致土壤水的渗透性降低^[23],所以出现直接灌溉方式下,3 g/L 微咸水灌溉后土壤入渗速率高于 10 g/L 咸水灌溉后土壤入渗速率的现象。郭凯等^[6]在田间利用 13.5 g/L 的咸水进行结冰灌溉时发现,咸水融化后可产生 75% 以上的微咸水(<3 g/L)和淡水。本试验 10 g/L 的咸水结冰灌溉融化后,能够成为微咸水直接灌溉,导致高矿化度咸水结冰灌溉与高矿化度咸水

直接灌溉方式下土壤入渗规律不同。本研究不同矿化度咸水结冰灌溉方式下土壤入渗速率要高于直接灌溉方式下土壤入渗速率,可能是由于土壤前期含水率有 25%,土柱中的土壤经过冷冻,土壤中的水分结冰膨胀,使得土壤孔隙撑大,在室内融化过程中,土壤孔隙中的水分被融化,但是孔隙没有变小,使得结冰灌溉处理下的土壤入渗速率高于直接灌溉处理的土壤入渗速率。

土壤入渗是一个复杂的水分运动过程,利用不同模型进行模拟是探索水分运动规律的有效途径,目前 Philip 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型被学者广泛应用^[17,24]。孙福海等^[25]发现,Philip 模型适合模拟均质土壤入渗过程,Kostiakov 模型适合描述短时间内的土壤入渗过程,而 Horton 模型适合描述长历时的土壤入渗过程。本研究利用这 3 种模型对不同矿化度咸水结冰灌溉、直接灌溉方式下的土壤水分入渗过程进行拟合时发现,由于结冰灌溉试验融化入渗时间较短,不同矿化度结冰灌溉方式下的土壤水分入渗过程利用 Kostiakov 模型进行拟合时,决定系数较高;而直接灌溉入渗时间较长,Horton 模型拟合不同矿化度直接灌溉方式下的土壤水分入渗过程时, R^2 较高,符合 Kostiakov 模型和 Horton 模型的应用特点。

不同矿化度咸水结冰灌溉及直接灌溉方式下土壤含水率分布情况存在差异。本研究发现,入渗完成 10 天后,各个处理 0—60 cm 土层土壤平均含水率大小为 $L0 > L10 > L3 > D0 > D3 > D10$,与车升国等^[16]研究中土壤含水率呈现淡水直接灌溉 > 咸水直接灌溉 > 咸水结冰灌溉的规律一致。本试验不同处理土壤含水率与土壤入渗率呈负相关,土壤水分入渗速率越快,其土壤含水率较小,土壤水分入渗直接影响土壤含水率的分布状况^[18]。10 g/L 咸水直接灌溉方式下的土壤含水率高于 3 g/L 微咸水直接灌溉方式,原因是由于高矿化度水灌溉时总孔隙度降低,土壤持水量增加^[23]。结冰灌溉咸水融化时,咸水先入渗,淡水后入渗^[8],且冰冻后土壤孔隙度增加,持水性降低,使得结冰灌溉处理后土壤含水率低于直接灌溉处理。

分析土壤脱盐效果时发现,对于 0—30 cm 土壤来说,淡水直接灌溉方式下土壤脱盐效果最好,且(3, 10 g/L)咸水结冰灌溉方式下土壤脱盐效果分别优于(3, 10 g/L)咸水直接灌溉方式,与张越等^[13]研究结论一致。本试验发现,3 g/L 微咸水直接灌溉处理与 10 g/L 咸水结冰灌溉处理土壤脱盐效果一致,由于高矿化度咸水结冰灌溉融化后,矿化度降到微咸水,甚至淡水进行直接灌溉^[6],使得这 2 种灌溉方式下土壤脱盐

效果相同。淡水结冰灌溉方式下的土壤脱盐效果较咸水结冰灌溉差,原因是微咸水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 能够替代土壤中 Na^+ 离子,提高土壤通透性^[7],咸水先融化,淡水后淋洗,有效降低土壤盐分含量。

4 结 论

(1)不同矿化度咸水结冰灌溉方式下土壤入渗速率高于不同矿化度咸水直接灌溉方式,前者土壤初始入渗速率分别是后者的 8.2, 4.6, 5.8 倍;且结冰灌溉方式下,灌溉水矿化度越大,土壤入渗速率越快。

(2)Kostiakov 模型适合拟合不同矿化度咸水结冰灌溉方式下土壤水分入渗过程,而 Horton 模型更好地拟合不同矿化度咸水直接灌溉方式下的土壤水分入渗过程。

(3)不同矿化度咸水直接灌溉方式下土层 0—60 cm 的土壤含水率较不同矿化度咸水结冰灌溉条件下分别提高 1.4%~6.3%, 1.6%~3.6%, 0.9%~7.6%。

(4)各处理在 0—30 cm 土层深度处土层脱盐效果较为显著,淡水直接灌溉方式下土壤脱盐率最大,为 93%~97%, 3 g/L 微咸水结冰灌溉方式下土壤脱盐率次之,为 87%~91%;在土层 50—60 cm 处,各处理土壤脱盐率随入渗完成时间推移逐渐降低,淡水结冰灌溉方式下土壤脱盐效果最优,为 13.3%, 3 g/L 微咸水结冰灌溉方式下土壤脱盐效果次之,为 9.1%。

综合考虑,3 g/L 微咸水结冰灌溉方式下土壤水分入渗速率较快,对 0—60 cm 土层土壤脱盐效果也较好,能够替代淡水直接灌溉方式进行盐碱地土壤的灌溉。

参考文献:

- [1] 李金刚.内蒙古河套灌区典型作物微咸水膜下滴灌—引黄补灌灌溉制度及水土环境效应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [2] 史海滨,杨树青,李瑞平,等.内蒙古河套灌区节水灌溉与水肥高效利用研究展望[J].灌溉排水学报,2020,39(11):1-12.
- [3] 唐秀楠,杨树青,苏瑞东,等.内蒙古河套灌区枸杞微咸水利用模式模拟及环境预测[J].节水灌溉,2015(5):52-56,59.
- [4] 史培军,哈斯,袁艺,等.渤海海冰作为淡水资源:脱盐机理与可利用价值[J].自然资源学报,2002,17(3):353-360.
- [5] 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 1):187-192.
- [6] 郭凯,巨兆强,封晓辉,等.咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望[J].中国生态农业学报,2016,24(8):

1016-1024.

[7] 杨帆,王志春,肖烨.冬季结冰灌溉对苏打盐碱土水盐变化的影响[J].地理科学,2012,32(10):1241-1246.

[8] 王文成,郭艳超,孙昌禹,等.咸水结冰灌溉对围海吹填海沙地盐分分布及植被构建的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(10):1409-1411.

[9] 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.

[10] 张秀梅,郭凯,谢志霞,等.冬季咸水结冰灌溉下滨海重盐碱地土壤水盐动态及对棉花出苗和产量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(10):1310-1314.

[11] 郭凯,张秀梅,李向军,等.冬季咸水结冰灌溉对滨海盐碱地的改良效果研究[J].资源科学,2010,32(3):431-435.

[12] 潘洁,肖辉,王立艳,等.咸水冰融化与土壤入渗过程不同盐分离子迁移规律研究[J].华北农学报,2012,27(1):210-214.

[13] 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.

[14] 李丹,万书勤,康跃虎,等.滨海盐碱地微咸水滴灌水盐调控对番茄生长及品质的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(7):39-50.

[15] 杨军,邵玉翠,高伟,等.微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量的影响研究[J].水土保持通报,2013,33(2):17-20,25.

[16] 车升国,林治安,左余宝,等.咸水结冰融水入渗对土壤水盐运移和玉米苗期生长的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(9):1210-1215.

[17] 周利颖,李瑞平,苗庆丰,等.河套灌区不同掺沙量对重度盐碱土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2020,36(10):116-123.

[18] 王全九.土壤物理与作物生长模型[M].北京:中国水利水电出版社,2016:29-30.

[19] 田宇,陈环宇,郭凯,等.不同咸水梯次滨海盐土入渗过程及水盐分布特征[J/OL].土壤学报:1-11[2021-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200908.1507.004.html>.

[20] 郭力琼.微咸水滴灌土壤水盐运移规律研究[D].太原:太原理工大学,2016:23-28.

[21] 赖羽寒,赵秀芳,傅瓦利,等.不同入渗水质对天津滨海吹填土淋洗脱盐的影响[J].节水灌溉,2014(5):55-58.

[22] 毕远杰,王全九,雪静.淡水与微咸水入渗特性对比分析[J].农业机械学报,2010,41(7):70-75.

[23] Huang C H, Xue X, Wang T, et al. Effects of saline water irrigation on soil properties in northwest China [J].Environmental Earth Sciences,2011,63(4):701-708.

[24] 巩炜,胡广录,付鹏程,等.干旱区沙漠-绿洲过渡带固沙植物的土壤水分入渗特征[J].中国沙漠,2020,40(5):200-208.

[25] 孙福海,肖波,张鑫鑫,等.黄土高原生物结皮覆盖对土壤积水入渗特征的影响及其模型模拟[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(10):82-91.

(上接第 303 页)

[9] 索滢,王忠静.典型节水灌溉技术综合性能评价研究[J].灌溉排水学报,2018,37(11):115-122.

[10] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.干旱区大田玉米膜下滴灌土壤水热效应研究[J].水土保持学报,2017,31(1):172-178.

[11] 杨恒山,薛新伟,张瑞富,等.灌溉方式对西辽河平原玉米产量及水分利用效率的影响[J]农业工程学报,2019,35(21):69-77.

[12] 戚迎龙,李彬,赵举,等.西辽河流域春玉米节水灌溉模式评价与优选[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):44-50.

[13] 刘战东,肖俊夫,刘祖贵,等.膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量的影响[J].灌溉排水学报,2011,30(3):60-64.

[14] 史海滨,田军仓,刘庆华,等.高等学校精品规划教材灌溉排水工程学[M].北京:中国水利水电出版社,2006.

[15] 戚迎龙,史海滨,李瑞平,等.膜下滴灌水氮耦合对玉米光合特性的影响[J].节水灌溉,2017(1):50-52.

[16] 肖俊夫,刘战东,南纪琴,等.不同水分处理对春玉米生态指标、耗水量及产量的影响[J].玉米科学,2010(6):94-97,101.

[17] 罗迪汉,王勇,宇宙.不同灌水定额对覆膜滴灌玉米生长、产量及水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2015(7):5-8.

[18] 张昊,郝春雷,孟繁盛,等.膜下滴灌条件下不同灌水量对玉米产量及土壤水分的影响[J].作物杂志,2016(1):105-109.

[19] 马金平,王福星,张岱,等.覆膜对玉米根系分布特性的影响[J].农业与技术,2018,38(4):21-22.

[20] 马赞花,薛吉全,张仁和,等.不同高产玉米品种干物质积累转运与产量形成的研究[J].广东农业科学,2010,37(3):36-40.