

微咸水滴灌条件下沙穴种植的土壤水盐二维空间分布规律

何 婧, 屈忠义, 刘 霞, 高晓瑜, 胡 敏, 李争争, 刘祖汀

(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: 河套灌区重度盐碱土具有结构性差、导水率低的特点, 且该地区淡水资源短缺, 为提高土壤水入渗性能, 合理开发利用微咸水资源, 可在滴头下方设置沙穴并利用微咸水灌溉。为探明不同矿化度微咸水滴灌的沙穴种植条件下二维土壤水盐分布规律, 采用室内 50 cm×50 cm 二维土槽模拟试验, 设置蒸馏水(0 g/L), 2.0, 3.0, 4.0 g/L 4 种不同矿化度处理, 试验历时 100 h。结果表明: 在深度 5 cm 距滴头两侧 15~20 cm 及滴头下方 25 cm 的盐碱土处, 土壤含水量较高, 沙土土壤含水率随着矿化度的增加而增加, 盐碱土土壤含水率随着矿化度的增加呈现先增加后降低的趋势, 采用 3.0 g/L 灌溉水滴灌时, 盐碱土含水率最大(变异系数为 7.64%), 说明利用 3.0 g/L 微咸水灌溉可有效提高沙穴种植条件下土壤含水率; 入渗 100 h 后盐分主要聚集在滴头下方 25~30 cm 处, 沙穴结构试验中, 灌溉水矿化度为 4.0 g/L 的情况下土壤平均电导率最大(变异系数为 50.59%), 水平方向盐分淋洗效果优于垂直方向, 且灌溉水矿化度越低, 淋洗效果越显著, 蒸馏水处理脱盐率为 13.99%, 灌溉水矿化度为 2.0, 3.0, 4.0 g/L 时积盐率分别为 7.93%, 14.57%, 30.05%, 脱盐半径随矿化度的增大而减小, 3.0 g/L 与 2.0 g/L 积盐量差异不显著($P=0.460>0.05$), 与 4.0 g/L 处理下积盐量差异显著($P=0.024<0.05$)。结合土壤水盐空间分布规律, 利用 3.0 g/L 微咸水可提高盐碱土土壤含水率, 控制沙穴种植结构土壤积盐量, 提高根系层土壤保水性。

关键词: 重度盐碱土; 沙穴种植; 水盐分布; 变异系数; 盐分淋洗

中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)03-0332-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.048

Spatial Distribution of Soil Water and Salt Under Sand Hole Planting with Drip Irrigation of Brackish Water

HE Jing, QU Zhongyi, LIU Xia, GAO Xiaoyu, HU Min, LI Zhengzheng, LIU Zuting

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

Abstract: The heavy saline alkali soil in Hetao irrigation area has the characteristics of poor structure and low water conductivity, and the fresh water resources in this area are in short supply. In order to improve the infiltration performance of soil water and reasonably develop and utilize the brackish water resources, a sand hole can be set under the dripper and the brackish water can be used for irrigation. In order to find out the influence of different salinity and brackish water drip irrigation on the distribution of water and salt in soil under the sand hole planting, this study adopted the indoor simulation test of 50 cm × 50 cm two-dimensional soil tank, and set four different salinity treatments of distilled water (0 g/L), 2.0, 3.0 and 4.0 g/L, the experimental duration was 100 hours. The results showed that the soil water content was higher in the saline alkali soil with the depth of 5 cm and at the distance of 15~20 cm from both sides of the dripper and 25 cm below the dripper. The soil water content of the sandy soil increased with the increase of water salinity. The soil water content of the saline alkali soil increased first and then decreased with the increase of the salinity. When using 3.0 g/L water drip irrigation, the water content of the saline alkali soil was the largest (coefficient of variation was 7.64%). Therefore, using 3.0 g/L water irrigation could effectively improve the soil moisture content under sand hole planting; after 100 hours of infiltration, the salt was mainly concentrated at 25~30 cm below the dripper. In the sand hole structure test, when the salinity of irrigation water was

收稿日期: 2019-11-11
资助项目: 国家自然科学基金项目(41761050, 51869019)
第一作者: 何婧(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事盐碱地改良研究。E-mail: 649247923@qq.com
通信作者: 屈忠义(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事区域水土环境与节水灌溉理论技术应用研究。E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

4.0 g/L, the average conductivity of soil was the largest (coefficient of variation was 50.59%). The effect of salt leaching in horizontal direction was better than that in vertical direction, and the lower salinity of irrigation water gave the more significant leaching effect. The desalination rate of distilled water treatment was 13.99%, and the salt accumulation rates were 7.93%, 14.57% and 30.05% for irrigation the salinity of 2.0, 3.0 and 4.0 g/L, respectively. The desalination radius decreased with the increase of the salinity, and the difference between the salt accumulation of 3.0 g/L and 2.0 g/L was not significant ($P = 0.460 > 0.05$), which two were significantly different from that of 4.0 g/L ($P = 0.024 < 0.05$). Combined with the spatial distribution law of soil water and salt, 3.0 g/L brackish water could be used to improve the soil water content of saline alkali soil, control the salt accumulation in sand holes, and improve the soil water conservation of root layer.

Keywords: heavy saline alkali soil; sand hole planting; distribution of water and salt; coefficient of variation; salt leaching

盐碱荒地主要分布在我国的西北地区^[1],内蒙古河套灌区土壤盐碱化已有相当长的历史,其特殊的气候条件、不利的地理环境、广泛的盐分来源及人为因素是产生土壤盐碱化的主要原因^[2]。重度盐碱土由于过多的 Na^+ 存在,使土壤结构性较差,入渗率低,导致盐分淋洗困难^[3]。沙穴种植是干旱盐碱地区改善土壤结构采取的一种种植方式^[4]。有研究^[5]表明,“沙穴+滴灌”种植后,其土壤水分入渗性能得到显著改善,土壤盐分组成发生变化,有利于微生物和作物根系生长发育^[1],提高作物产量。

微咸水灌溉对土壤水盐分布的影响是目前国内外学者广泛关注的问题。我国把微咸水矿化度一般定义为 2.0~5.0 g/L^[6]。有研究^[7]表明,土壤入渗能力与微咸水矿化度呈现抛物线变化过程,在 3.0~4.0 g/L 入渗能力最大。利用微咸水灌溉在一定程度可改善西葫芦^[8]、棉花^[9]、玉米^[10]等产量和品质,但是利用高矿化度微咸水灌溉会导致根系层土壤盐分累积,抑制作物生长^[11]。适宜矿化度微咸水滴灌可达到节水增产的目的,

同时具有一定的压盐效果^[12],减轻土壤盐分对作物的危害程度^[13],具有良好的应用前景。而重度盐碱土在“沙穴+滴灌”的种植条件下,不同矿化度微咸水对土壤水盐分布规律有待进一步研究。

本研究通过室内二维沙穴试验模拟不同矿化度微咸水滴灌条件下重度盐碱土换沙处理后土壤水盐空间的分布规律,探求适宜沙穴种植条件下的微咸水灌溉的矿化度范围,为高效节水及微咸水资源的合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤基本性质

供试土壤为内蒙古河套灌区杭锦后旗重度盐碱土,取土深度为 0—40 cm,土壤容重为 1.45 g/cm³,沙土土壤容重为 1.65 g/cm³,土壤经自然风干,碾碎后过 2 mm 筛备用。根据激光粒度仪 HELOS/BR(德国新帕泰克公司)测得各粒径含量,根据美国农业部制土壤质地三角图判断土壤质地,其基本理化性质见表 1。

表 1 供试土样主要理化性质

土质类型	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤质地	pH	EC/ ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	初始 含水率/%
	0.05~2 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm				
沙土	92.79	6.72	0.48	砂土	7.72	0.376	3.51
盐碱土	36.37	59.39	4.24	粉壤土	8.86	5.030	4.55

1.2 试验装置

试验采用透明有机玻璃二维土槽进行模拟,试验装置由土槽槽体及供水系统两部分组成,见图(1)。土槽长 50 cm,高 50 cm,槽体宽 5 cm,利用直径为 15 cm,高度 70 cm 的马氏瓶作为供水装置及恒定水头,出口处利用软橡胶管与 7 号输液器连接模拟滴灌,接口处利用生胶带及防水胶带固定,滴头位置为槽体表面中间处,在距离土槽顶部 30 cm 处放置 275 W 的强光灯模拟日光,见图 2。

1.3 试验方法

试验于 2019 年 3 月 10 日至 4 月 25 日在内蒙古

农业大学水利与土木建筑工程学院土力学实验室进行。试验将风干的供试土壤利用干堆法每 5 cm 分层进行土体填装,换沙部分在土槽正中央进行,沙穴长 20 cm,深度 20 cm,厚 5 cm。土槽装填完成后静置 24 h,使土体沉降均匀,槽体内各层土分布平衡。共设 3 种矿化度微咸水进行处理,蒸馏水(0 g/L)为空白对照,各处理见表 2,灌溉水根据内蒙古河套灌区微咸水水质及各离子含量配置人工微咸水 2.0,3.0,4.0 g/L,各矿化度配比见表 3。根据野外滴灌水量换算成室内灌溉定额为 2.05 L,为缩短试验周期,灌水周期为 24 h,灌水天数为 4 天,灌水定额为 0.51 L,灌

水前利用 10 mL 量筒对滴头流量进行校订,每日开灯时间持续 10 h,试验共计 100 h。

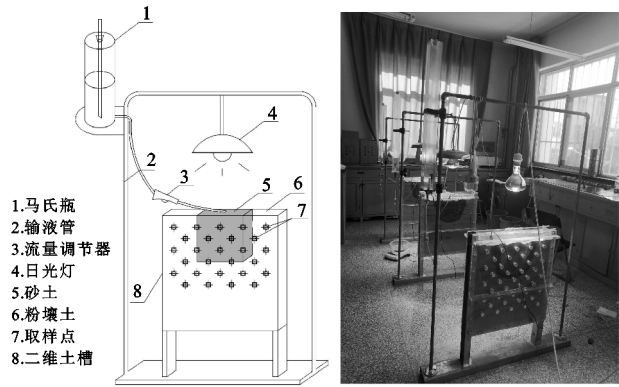


图 1 试验装置示意

为分析入渗 100 h 后二维土槽内土壤水盐分布规律,在有机玻璃板面设置水平间距为 10 cm,垂直间距为 5 cm,直径为 1 cm 的取样孔,深度 5,15,25 cm 每层设置 5 个取样孔,深度 10,20,30 cm 每层设置 4 个取样孔,交错进行取样,每取样点间隔处为格点,取样点位置分布见图 2。

利用直径为 5 mm 的土钻取土于铝盒中,105 ℃ 烘箱烘干至恒重测定土壤质量含水率,土壤盐分性质采用水土比(重量)为 5 : 1 的饱和泥浆法进行,称重风干土样于离心管内过夜浸泡,使用梅特勒—托利多电导率仪(FE38—Standard)在离心管中测定饱和土壤浸提液的电导率为土壤电导率。

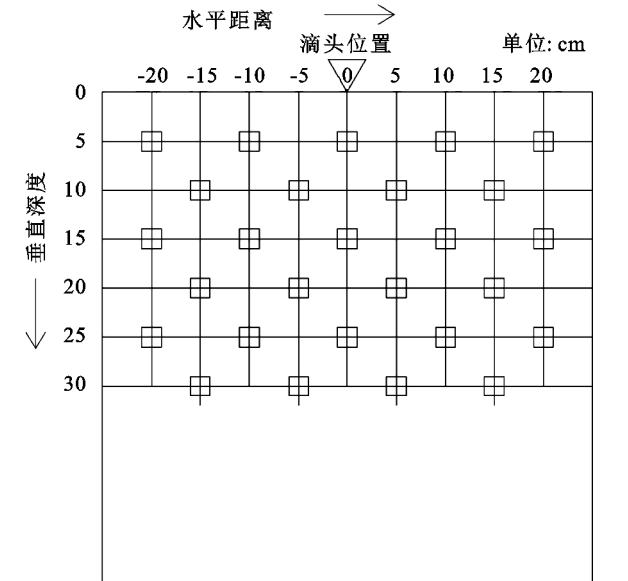


图 2 二维土槽试验装置取样点

表 2 人工二维土槽模拟试验处理及设计

序号	处理	矿化度/(g · L ⁻¹)
1	CK	0
2	W2	2
3	W3	3
4	W4	4

表 3 不同矿化度微咸水配比			单位:g
药品	2 g/L	3 g/L	4 g /L
CaCl ₂	0.259	0.387	0.518
NaHCO ₃	0.359	0.539	0.718
K ₂ SO ₄	0.331	0.497	0.662
MgCl ₂	0.369	0.554	0.738
MgSO ₄	0.682	1.023	1.364
合计	2.000	3.000	4.000

1.4 数据处理与分析

根据取样点实测值变化情况,将格点水盐数据利用线性插补法补齐,为对比不同矿化度微咸水与蒸馏水(0 g/L)的土壤水盐变化情况,利用变异系数(CV)进行表征。采用 Excel 2010 软件进行图形绘制及显著性分析, Surfer 12 软件进行二维水盐图形绘制, AutoCAD 2014 软件进行脱盐区半径绘制。

$$CV=\frac{\sqrt{(S_i-S_0)^2}}{S_0}$$

(1)

式中: S_i 为各处理($i=2,3,4$)土壤含水率(%)和电导率(mS/cm); S_0 为蒸馏水土壤含水率(%)和电导率(mS/cm)。

2 结果与分析

2.1 微咸水对沙穴土壤水分空间分布的影响

土壤水分是影响作物生长发育的物质基础,研究各剖面处微咸水滴灌沿水平方向土壤水分含量的分布规律对作物根系层生长发育具有很大影响,沙穴种植条件下,不同矿化度微咸水滴灌的土壤含水率沿着水平方向存在差异。由图 3(a)~图 3(c)可知,不同处理的土壤含水量均呈现先降低后升高的趋势,大致呈对称分布,在同一深度距滴头水平距离 10 cm 内,4.0 g/L 处理含水率均高于其他处理,平均分别高出 15.11%,14.80%,7.93%;距滴头>10 cm 处,0 g/L 处理含水率均高于其他处理,平均分别高出 3.10%,3.04%,14.23%,当距滴头 15—20 cm 深度处,土壤水在滴头两侧 15 cm 处聚集;由图 3(d)可知,不同矿化度微咸水滴灌条件下土壤含水率呈现先增加后减小的对称分布,在滴头处含水率最大,后随水平距离的增加逐渐降低至初始土壤含水率,4.0 g/L 处理下土壤含水率均低于其他处理,平均分别低于 30.61%,25.51%,24.49%,与图 3(a)~图 3(c)含水率分布情况存在差异。因此,水平距离 10 cm 处,在深度<15 cm 时土壤含水率沿水平方向显著上升;在深度 25 cm 时土壤含水率沿水平方向显著下降,在各处理中,4.0 g/L 处理在沙土平均土壤含水率最大,盐碱土平均土壤含水率最小。

沙穴结构下,不同矿化度微咸水处理下土壤含水率在垂直方向分布情况与水平方向不同。由图 4(a)、(b)可知,不同处理的土壤含水率均呈现先增

加后减少的趋势,且在深度 20—25 cm 处显著增加,25 cm 处含水率最大,在同一水平距离下距滴头深度 <15 cm 处,含水率随着矿化度的增加而增加,4.0 g/L 处理含水率均高于其他处理,分别平均高出 14.56%,12.62%,6.80%,在距滴头深度 >15 cm 处,含水率随着矿化的增加先增加后减少,4.0 g/L 含水率比 0~3.0 g/L 分别低 12.98%,9.85%,11.70%;由图 4(c)、(d) 可知,不同处理下土壤含水率呈现先缓慢增加后迅速降低的变化趋势,在深度 30 cm 处降低至初始土壤含

水率,在深度 5—15 cm 处含水率最大,4.0 g/L 处理含水率低于其他处理,分别平均低于 19.90%,14.72%,17.57%。说明不同剖面处垂直方向的土壤含水率分布存在明显差异,在深度 15 cm 处,剖面距离 <10 cm 时土壤含水率在垂直方向上显著增加,剖面距离 20 cm 时土壤含水率在垂直方向显著降低;在深度 20 cm,剖面距离 15 cm 土壤含水率迅速降低,直至初始含水率,在剖面距离 15~20 cm,深度 0—20 cm 处,土壤含水率随着灌溉水矿化度的增加而降低。

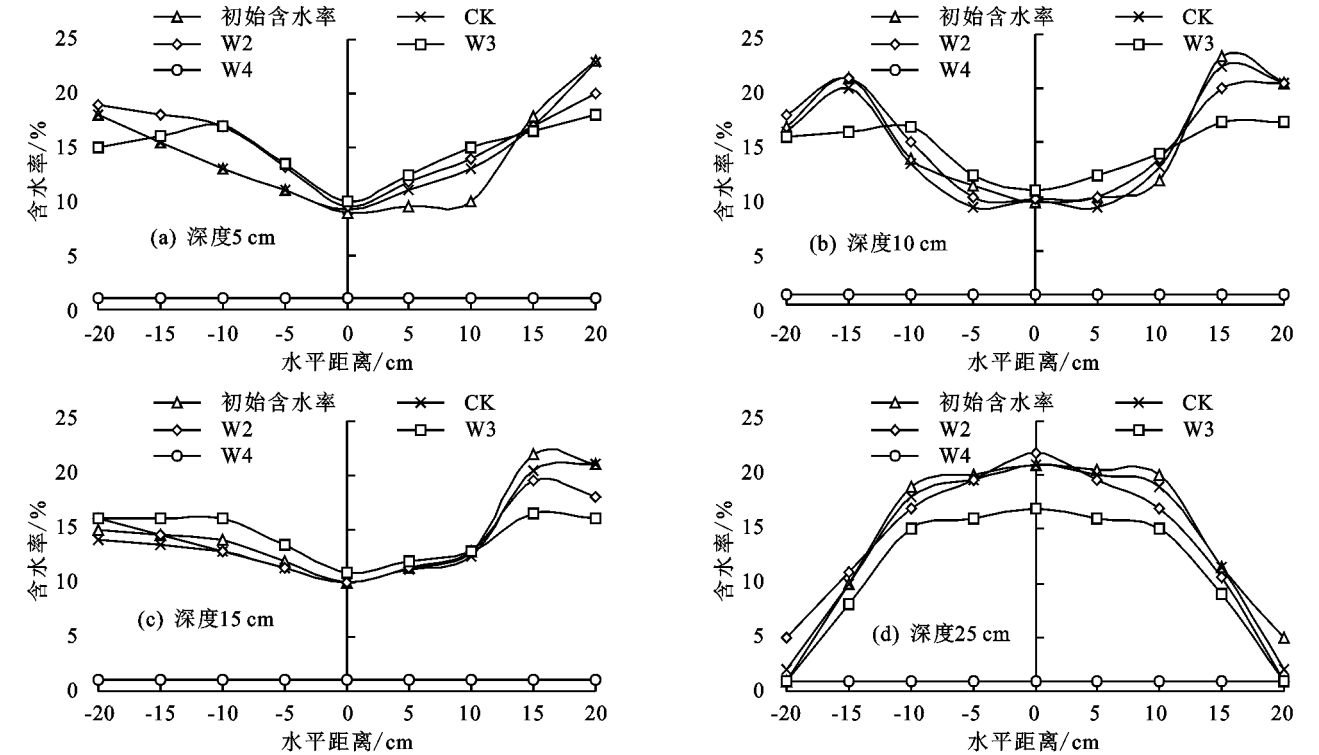


图 3 不同矿化度对沙穴结构水平方向土壤含水率分布影响

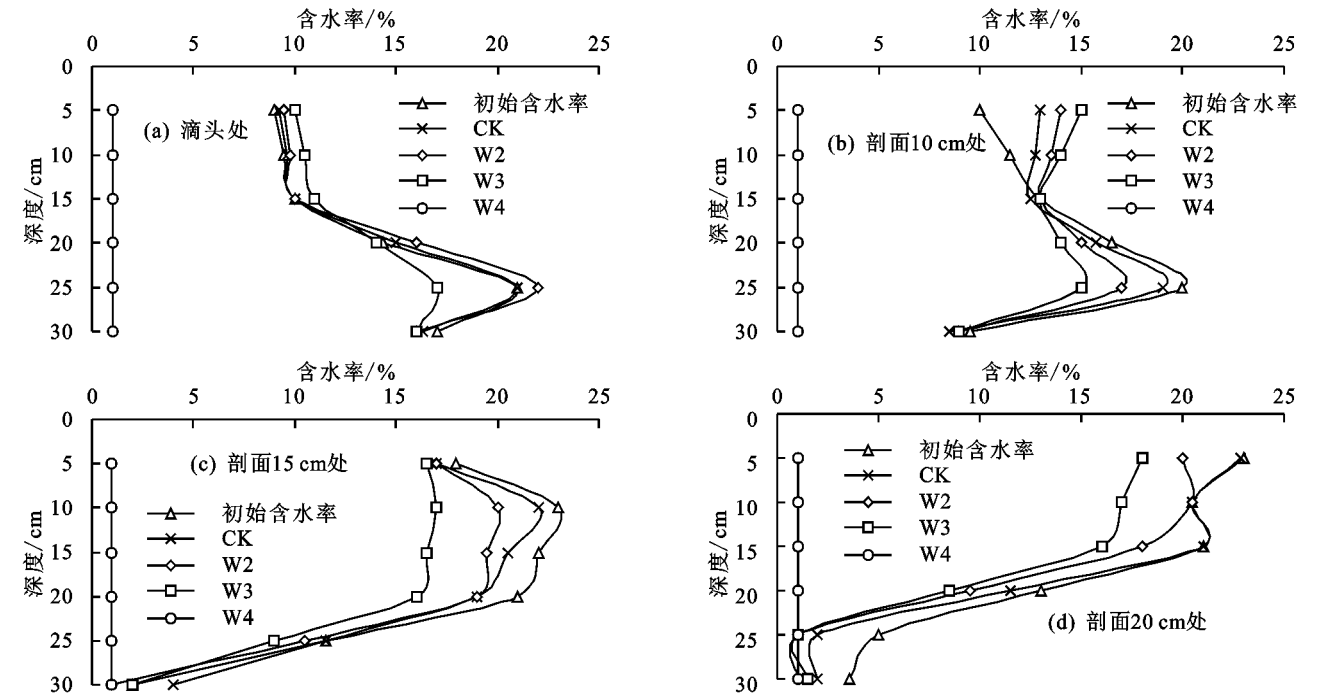


图 4 不同矿化度对沙穴结构垂直方向土壤含水率分布影响

图 5 为不同矿化度微咸水滴灌条件下土壤含水率分布二维等值线图,其中阴影部分为沙土,其余部分为盐碱土。由图 5 可知,各处理下土壤含水率从滴头沿水平方向变化趋势基本一致,在表层深度处土壤含水率均随着水平距离的增加而增加,从滴头沿垂直方向变化趋势为先增加后减小至初始含水率,沙土处含水率较小,滴头(0 cm)下方深度为 25 cm 处及滴头两侧深度 5—15 cm 处盐碱土的含水率明显高于其

他位置,沙土和盐碱土交界处土壤含水率差异显著,湿润锋边缘突降为土壤初始含水率,槽内土体含水率大致呈现对称分布,沙穴结构下 0~3.0 g/L 处理间土壤含水率分布差异不明显,4.0 g/L 处理土壤含水率明显低于其他处理。这是因为沙土和盐碱土的黏粒含量不同,不同土质之间存在较大孔隙,且微咸水中盐离子附着于土粒表面,改变颗粒间隙,影响土壤水的入渗性能。

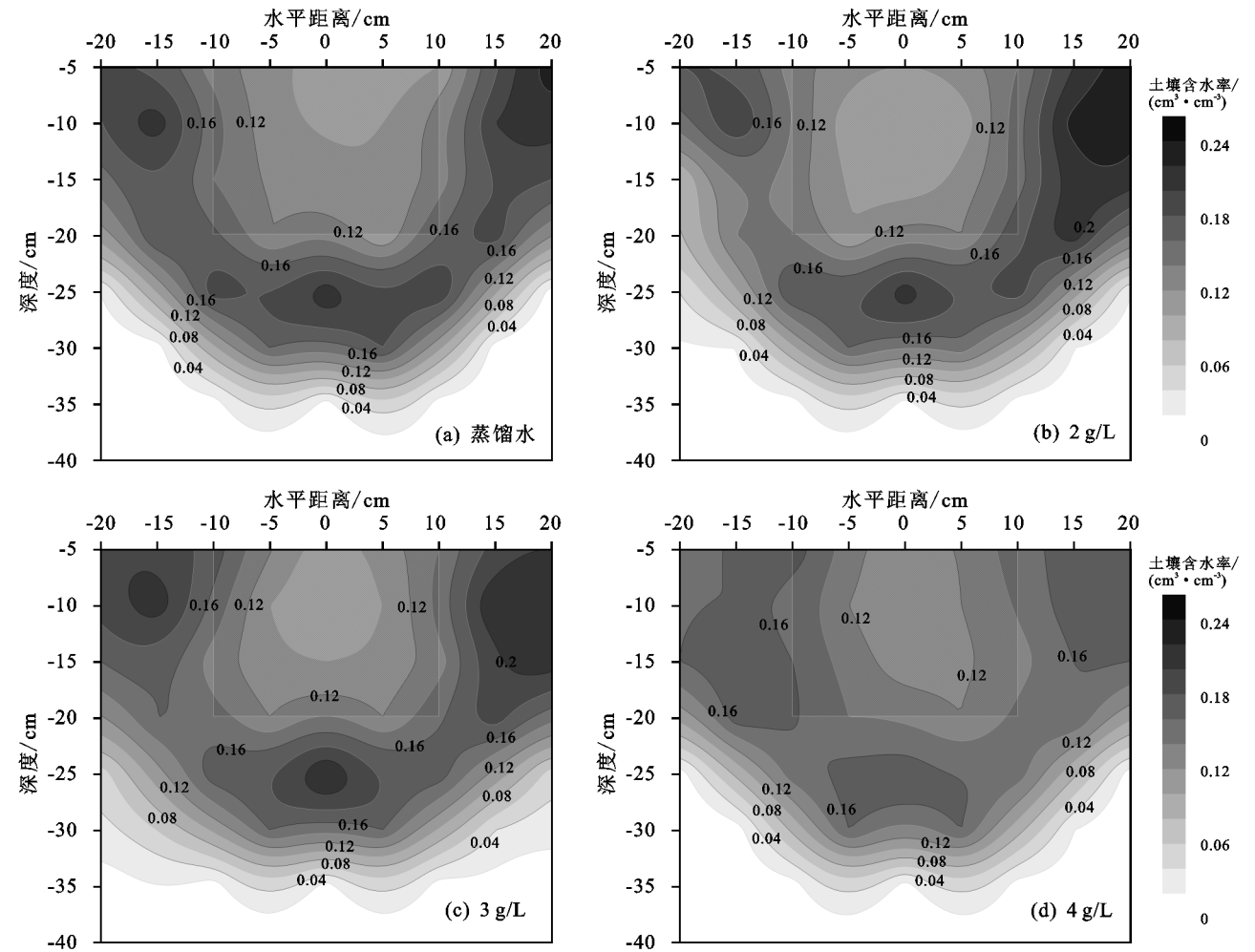


图 5 不同矿化度下土壤含水率分布二维等值线

表 4 为不同处理土质平均含水率、变异系数(对比蒸馏水处理)数据。从表 4 可知,沙土含水率随着矿化度的增加而增加,4.0 g/L 微咸水处理沙土平均土壤含水率最大(26.41%),变异系数为 23.30%,而盐碱土含水率随着矿化度增加呈现先增加后降低的趋势,在灌溉水为 3.0 g/L 时达到最大值,蒸馏水和 2.0 g/L 处理差异小,变异系数为 0.40%,4.0 g/L 灌溉水质的在盐碱土含水率最低,变异系数为 14.00%,总体分析,3.0 g/L 微咸水处理在沙穴种植条件下平均含水率最高,沙穴变异系数为 7.62%,4.0 g/L 的土壤含水率最低,变异系数为 2.82%,说明高矿化微咸水可显著增加沙土及盐碱土的含水率,而矿化度高于 3.0 g/L 时,盐碱土含水率显著降低。

表 4 不同矿化度下土壤平均含水率及变异系数

单位: %

处理	平均土壤含水率			变异系数		
	沙土	盐碱土	沙穴	沙土	盐碱土	沙穴
CK	21.42	27.78	25.51	0	0	0
W2	23.46	27.89	26.31	9.52	0.40	3.14
W3	24.49	29.11	27.46	14.33	4.79	7.64
W4	26.41	23.89	24.79	23.30	14.00	2.82

通过分析不同矿化度微咸水在沙穴种植结构下对水平、垂直方向上土壤含水率分布影响,得出其原因是在滴头两侧 10 cm、深度 0—20 cm 进行换沙处理,较沙土而言,盐碱土的黏粒含量高,初始含盐量大,对水分吸持作用显著。同时一定程度矿化度微咸水滴灌可增加沙土和盐碱土的土壤含水率,而过高矿

化度微咸水灌溉使盐碱土含水率降低,其原因是人工配置微咸水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量高于 Na^{+} , 钠吸附比偏小,微咸水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 促进土壤颗粒扩散,减少胶体颗粒膨胀和分散,增加土壤孔隙,改善土壤的渗透性^[1],而过高矿化度处理降低了沙土和盐碱土的土壤溶质势差值,在增加了沙土土壤含水率的同时降低了盐碱土水分入渗量,综合分析 4.0 g/L 微咸水降低沙穴结构土壤持水性,3.0 g/L 微咸水灌溉提高盐碱土水分入渗性能,增加沙穴结构土壤水分含量。

2.2 微咸水入渗对沙穴土壤盐分空间分布影响

土壤盐分是影响作物根系生长发育的主要因素之一,研究各剖面处微咸水滴灌沿水平方向土壤盐分含量的分布规律对作物正常生长发育具有重要意义,沙穴种植条件下,不同矿化度微咸水滴灌的土壤电导率沿着水平方向存在差异。

由图 6(a)、(b)可知,深度 5 cm 处各处理下土壤电导率沿水平方向变化均随着距离的增加而增加,峰值出现在剖面 20 cm 处;深度 10 cm 时,3.0、4.0 g/L

的峰值所在位置发生变化,位于剖面 15 cm 处;由图 6(c)可知,深度 25 cm 时各处理的土壤电导率存在差异,除 4.0 g/L 外,0~3.0 g/L 微咸水灌溉土壤 EC 值均低于初始值,脱盐率分别为 47.15%,25.52%,19.47%,峰值出现在水平距离 20 cm 处,而 4.0 g/L 土壤盐分在水平距离 10 cm 处聚集;由图 6(d)可知,深度 30 cm 各处理下土壤电导率均随着水平距离的增加而降低,灌溉水矿化度越高,土壤电导率峰值越大,各处理土壤电导率较初始值平均分别增加 18.47%,26.99%,44.92%,80.11%,3.0 g/L 与 4.0 g/L 处理电导率差异尤为明显且与图 6(a)~图 6(c)不同。这是因为盐碱土初始电导率高,“盐随水来”盐分主要累积在湿润锋附近,4.0 g/L 微咸水中 Na^{+} 含量较高,影响盐碱土黏粒分散,降低土壤水的入渗性能,盐分随水分累积在深度 25—30 cm 处,而矿化度低于 3.0 g/L 微咸水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量较高,增加土粒间孔隙度,提高土壤水入渗性能,盐分向深层累积,沿水平方向具有较好淋洗效果。

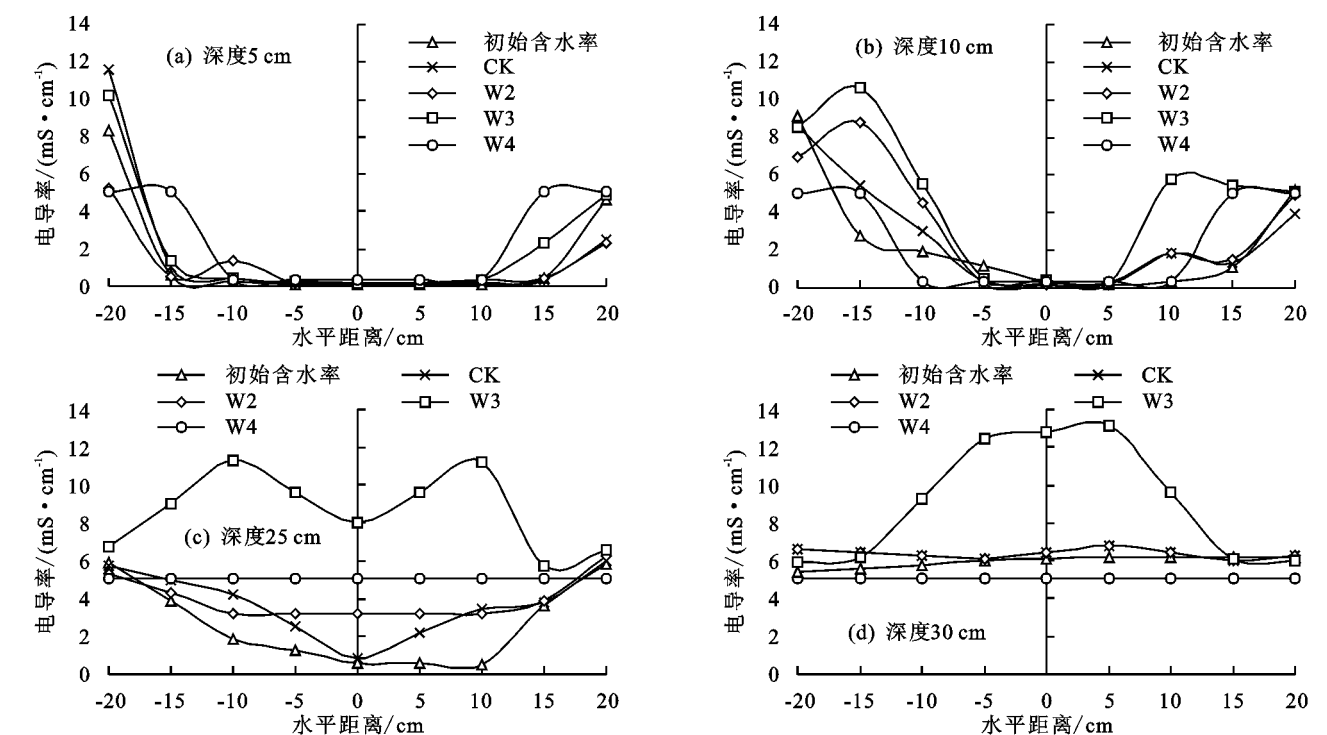


图 6 不同矿化度对沙穴结构水平方向土壤电导率分布影响

沙穴结构下,不同矿化度微咸水处理下土壤电导率在垂直方向分布情况与水平方向不同。从图 7(a)、(b)可以看到,不同矿化度处理下土壤电导率沿垂直方向变化趋于一致,均在异质土壤交界处大幅度变化,在土层深度 25 cm,0~3.0 g/L 处理均具有脱盐效果,脱盐率分别为 87.47%,82.83%,36.35%,4.0 g/L 处理积盐率为 59.19%;在剖面 10 cm 处,峰值位置发生变化,0~3.0 g/L 位于深度 30 cm 处,4.0 g/L

位于深度 25 cm 处,3.0 g/L 与 2.0 g/L 处理变化差异小,与 4.0 g/L 处理变化差异大;从图 7(c)可知,剖面 15 cm 处,土壤电导率呈现先略减少,随后在湿润锋处急剧增加,沿垂直深度低于 25 cm 时,0~4.0 g/L 处理土壤电导率均低于初始电导率,平均脱盐率分别为 72.09%,67.16%,63.50%,42.20%,深度为 30 cm 时盐分累积;从图 7(d)可知,距滴头 20 cm 剖面处,各处理下土壤电导率沿垂直方向不存在明显规

律,盐分分布与湿润体边缘趋于一致。这是因为盐分随土壤水分运移至土槽内,由于不同土质的黏粒含量及初始含盐量存在差异,沿垂直方向土壤盐分在沙土

及盐碱土交界处变化显著,同时因各处理间阳离子浓度不同使土壤水入渗性能存在差异,矿化度高于 3.0 g/L 时,沿着垂直深度的增加,土壤积盐效果明显。

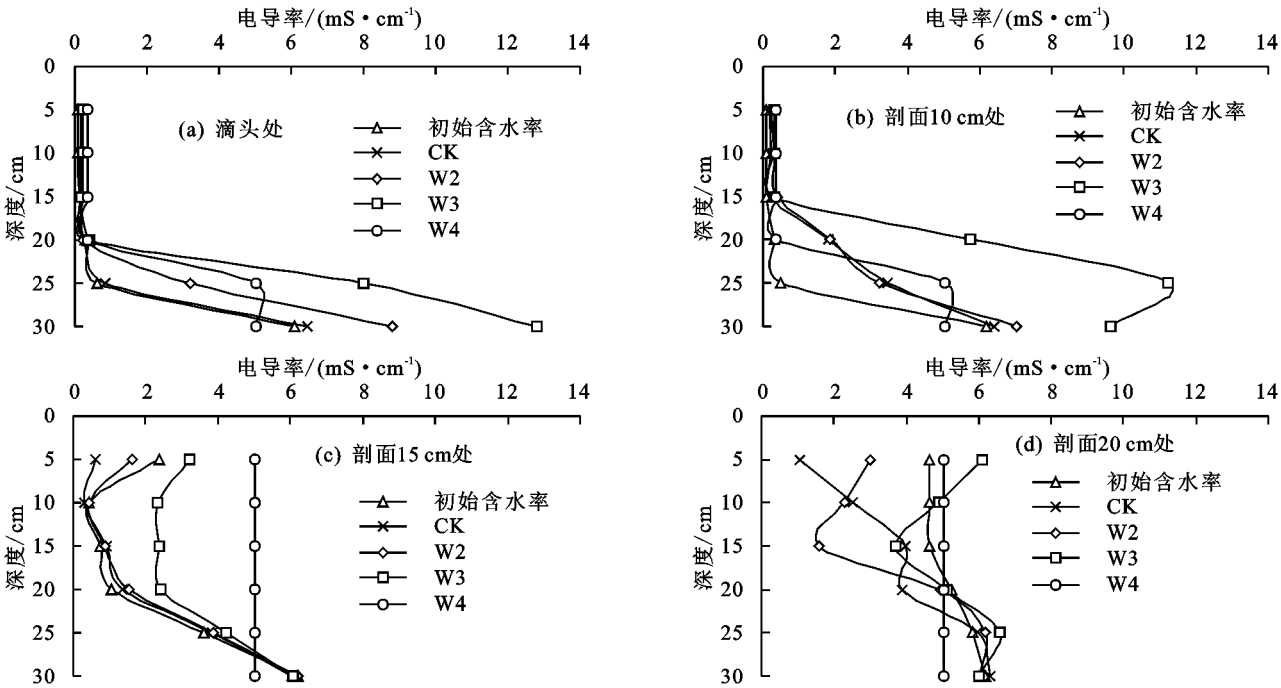


图 7 不同矿化度对沙穴结构垂直方向土壤电导率分布影响

图 8 为不同矿化度微咸水滴灌条件下沙穴结构土壤电导率二维等值线分布,阴影部分为沙土,其余部分为盐碱土。由图 8 可知,不同矿化度处理下,土壤电导率空间分布规律一致,即在沙土与盐碱土交界处,盐碱土处依次可分为盐分淋洗区($EC < 5.03$ mS/cm)、盐分累积区($EC > 5.03$ mS/cm)和盐分不变区($EC = 5.03$ mS/cm)。盐分淋洗区在滴头附近呈 1/2 椭圆状分布,矿化度越小,盐分淋洗区在垂直方向分布越远,水平方向分布呈先减少后增加的变化趋势,在 3.0 g/L 水平范围最大,且 3.0 g/L 灌溉条件下土壤电导率在水平方向范围比垂直方向区域大。盐分累积区分布在盐分淋洗区外侧,呈点源分布,矿化度越小,盐分累积区在垂直方向分布分布越远,在水平方向分布越近。盐分不变区是盐分累积区外层土壤电导率不发生变化的区域,因水分未运移到该地区,土壤盐分不发生变化。蒸馏水滴灌下槽体内土壤电导率较小,且具有较好的盐分淋洗效果,2.0~4.0 g/L 处理均存在不同程度的积盐现象,2.0 g/L 积盐分布较集中,3.0,4.0 g/L 积盐范围较广泛。

表 5 为不同处理下土壤平均电导率、变异系数(对比蒸馏水处理)与脱盐率表。由表 5 可知,各土质电导率均随着矿化度的增加而增加,沙穴结构下,4.0 g/L 微咸水处理土壤平均电导率值最大,对比蒸馏水,2.0~4.0 g/L 的变异系数分别为 2.36%,14.35%

和 50.59%。利用蒸馏水处理的土壤平均电导率低于土壤电导率初始值(3.99 mS/cm),对盐碱土具有较好的淋洗效果,且灌溉水矿化度越低,淋洗效果越显著,蒸馏水处理脱盐率为 14.07%,2.0~4.0 g/L 积盐率分别为 7.83%,14.46%,29.92%,3.0 g/L 与 2.0 g/L 积盐量差异不显著($P = 0.460 > 0.05$),与 4.0 g/L 积盐量差异显著($P = 0.024 < 0.05$)。故当灌溉水矿化度高于 3.0 g/L 后,沙穴土壤盐分累积量显著提升,土壤积盐效果显著,实际条件下,较高矿化度微咸水灌溉农田时,考虑到经济效益,利用 3.0 g/L 微咸水灌溉最佳。

2.3 微咸水入渗对土壤脱盐区的影响

图 9 为不同矿化度微咸水与脱盐半径的关系图。入渗 100 h 后,脱盐区域边缘呈椭圆形,其半径为脱盐半径。从图 9 可以看出,脱盐半径随矿化度的增加呈递减的趋势,用 Excel 2010 拟合相关系数 $R^2 = 0.9819$ 。蒸馏水处理的脱盐半径最大,2.0 g/L 与 3.0 g/L 处理差异性不明显,脱盐半径分别为 6.80,6.40 cm,而矿化度 3.0 g/L 与 4.0 g/L 差异性明显,脱盐半径分别为 6.40,5.31 cm,从脱盐半径的变化趋势分析,矿化度为 3.0 g/L 是一个边界点,当矿化度小于 3.0 g/L 时,湿润体盐区域不明显,高于 3.0 g/L 时,湿润体盐占优。

通过分析不同矿化度微咸水滴灌对沙穴种植结

构在水平、垂直方向土壤盐分分布情况及脱盐区的影响,得出 3.0 g/L 灌溉条件下土壤盐分淋洗范围在水平方向比垂直方向广,各处理间盐分主要累积在湿润锋附近,灌溉水矿化度越高,土壤电导率越大,当灌溉水矿化度高于 3.0 g/L 时,沙穴土壤盐分累积量显著提升,脱盐半径随着矿化的降低而增加,蒸馏水处理脱盐率及脱盐半径最大,矿化度 4.0 g/L 处理下湿润体积盐差异显著。这是因为盐分在土壤中主要依靠对流—弥散作用运移,且沙土和供试土壤间存在较大

空隙,土壤盐分随土壤水运移至下层,形成盐分淋洗区,随着土壤盐分的运移,在淋洗区外层形成盐分累积区,在湿润体外缘,因土壤水分未运移至此,故盐分不发生变化,为盐分不变区。同时因灌溉水矿化度不同,盐离子对盐碱土入渗性能产生影响,各处理间盐分分布区域不同,综合分析各土质间盐分含量及脱盐半径得出,当矿化度高于 3.0 g/L 时,土壤积盐效果显著,湿润体积盐占优,故微咸水矿化度越高,土壤平均电导率越大,脱盐半径越小。

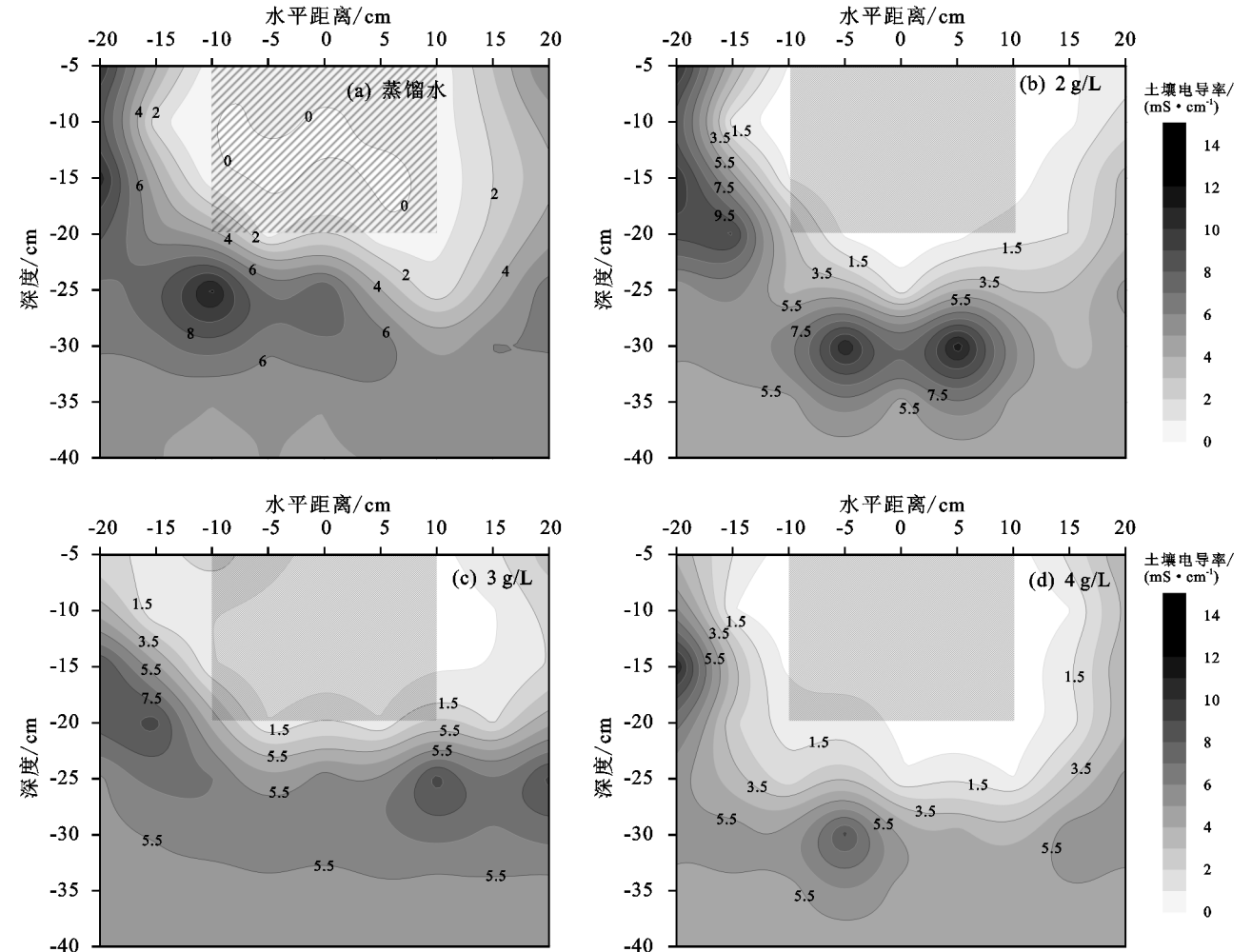


图 8 不同矿化度下土壤电导率分布二维等值线

处理	平均土壤电导率/ (mS·cm ⁻¹)			变异系数/%			脱盐率/ %
	沙土	盐碱土	沙穴	沙土	盐碱土	沙穴	
CK	0.26	4.34	3.43	0	0	0	13.99
W2	0.28	4.46	4.31	7.12	2.75	2.36	-7.93
W3	0.32	5.79	4.57	25.00	33.35	14.35	-14.57
W4	0.50	6.53	5.19	96.46	50.44	50.59	-30.05

3 讨论

重度盐碱土中,盐分及碱化度过高会造成土壤透水透气性能差,而“沙穴+滴灌”种植条件可改善盐碱土入渗性能^[1],提高根系层土壤的保水性。通过对不

同矿化度微咸水滴灌沙穴土壤结构水盐分布规律的分析,主要讨论点为:

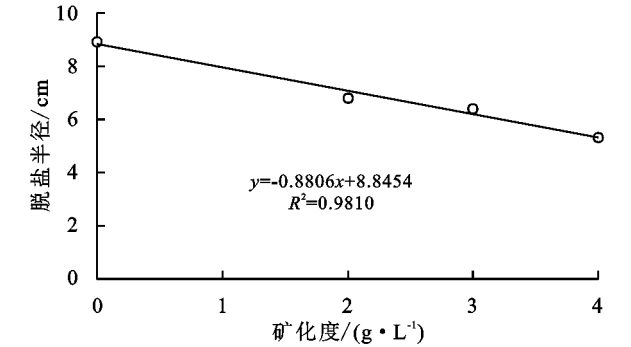


图 9 不同矿化度与脱盐半径的关系

(1)不同矿化度微咸水对沙土含水率存在差异。滴灌条件下盐分随水分进入沙穴土壤结构,因不同土质的土粒对水的吸持作用、土粒间对水的毛管作用和土壤初始含盐量不同,盐碱土基质势和溶质势低于沙土,沙穴结构中,沙土和盐碱土间存在较大孔隙,土壤水自沙土进入盐碱土后,其交界处土壤含水率变化差异显著,在水平和垂直方向,非饱和流土壤水易向盐碱土处运移^[14],高矿化度微咸水灌溉的土壤水势能发生变化,沙土与盐碱土间渗透压变小,溶质势差值变小,故灌溉水矿化度越高,沙土与盐碱土的土水势差值越少,沙土土壤含水率越高。在滴头深度 25 cm 盐碱土处,上面覆盖的沙土可有效抑制土壤水分蒸发,同时沙土土壤水能够向盐碱土部分运移补充,这与谭军利等^[15]研究覆砂措施对土壤水盐运移结果相一致。

(2)不同矿化度微咸水对沙穴结构土壤含水率存在差异。人工配置微咸水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量高于 Na^+ , 钠吸附比偏小,微咸水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 促进土壤颗粒扩散,减少胶体颗粒膨胀和分散,增加土壤孔隙,改善土壤的渗透性^[1],但是改善程度会随着 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度的增加而降低,3.0 g/L 微咸水可显著提升土壤的渗透性能^[16]。当矿化度高于 3.0 g/L 时,灌溉水 Na^+ 含量偏大,盐分随灌溉水进入盐碱土影响黏粒分散、扩张^[17],使土壤大孔隙分散成小孔隙,降低土壤入渗性能^[18],增加土层表面蒸发量,土壤盐分在表层聚集,这与田彤等^[19]研究结果一致。故 4.0 g/L 微咸水处理盐碱土壤含水率降低。

(3)不同水平及深度处土壤盐分累积存在差异。沙穴结构中盐分更易在盐碱土处累积,蒸发条件下,随着入渗水量的增加,土壤水重力势逐渐取代基质势,成为土壤水分运动的主要动力^[20],土壤水在垂直方向入渗面逐渐高于水平方向,盐分随水分在水平及垂直方向入渗,运移至盐碱土湿润锋附近聚集,随着土层深度的增加,剖面盐分运移可大致分为“脱盐—积盐—盐分不变”的分布情况^[21],盐分累积量呈现先增加后降低的趋势,这与王海霞等^[22]研究结果一致。滴头下方盐碱土的盐分累积量高于水平方向,垂直方向入渗量高于水平方向,水平方向比垂直方向淋洗范围大。

(4)不同矿化度微咸水处理土壤盐分累积存在差异。微咸水灌溉条件下,对盐碱土而言,盐分淋洗主要集中在入渗初期入渗量较小时^[23],随着微咸水入渗量及灌溉水矿化度增加,土壤电导率值增加,2.0 g/L 与 3.0 g/L 间沙土入渗量差异不大,且钠吸附比较小,盐碱土结构不发生明显改变^[13],土壤盐分累积不显著。对比 3.0 g/L 微咸水,4.0 g/L 微咸水中

Na^+ 浓度高,盐分随水进入沙穴土壤结构中,改变了盐碱土壤结构,降低土壤水入渗性能^[12],使盐分更易在盐碱土处聚集,土壤盐分累积量增加,盐分淋洗区域变小,这与齐智娟等^[24]研究结果一致。故灌溉水矿化度越高,脱盐半径越小,脱盐效果降低。

本研究目的在于探索微咸水滴灌在沙穴种植结构下改善土壤水分入渗性能及分析盐分沉积规律,以提出适用田间种植的最优灌溉水矿化度及实施可行性。结果表明,利用 3.0 g/L 微咸水灌溉在沙穴种植结构下可有效提高土壤水分且积盐效果不显著,因此利用矿化度 3.0 g/L 微咸水对“沙穴+滴灌”的种植模式具有应用前景。但由于微咸水沙穴滴灌条件下,灌溉水质与异质土壤的可溶盐发生溶解、吸附、离子交换等一系列复杂的化学反应,将直接影响土壤水入渗性能及改变土壤理化性质,且土壤盐分的运移过程是溶质分子对流、弥散作用下共同作用的结果^[25],不同灌溉水质对土壤内部可交换性 Na^+ 反应过程有待进一步研究。

4 结论

(1)不同矿化度微咸水处理下沙土与盐碱土含水率差异显著。3.0 g/L 处理沙穴土壤结构总体含水量最大,变异系数为 7.64%,沙土土壤含水率随着矿化度的增加而增加,而矿化度高于 3.0 g/L 时,盐碱土土壤结构变差,土壤保水性降低,故沙穴种植条件下,利用 3.0 g/L 处理可明显提高土壤含水量。

(2)因“盐随水来,水走盐留”,土壤电导率随灌溉水矿化度的升高显著增加,在蒸发条件下,盐分随水分运移至土壤表层,土壤盐分主要累积在滴头下方盐碱土及湿润锋处,土壤 EC 值在水平方向累积量高于垂直方向。

(3)灌溉水质矿化度越高,其盐碱土洗盐效果越不明显,利用蒸馏水处理脱盐效果最好,脱盐率为 13.99%,3.0 g/L 与 2.0 g/L 处理积盐效果差异不显著($P=0.460$),与 4.0 g/L 处理积盐效果存在显著差异($P=0.024$),不同矿化度与土壤平均电导率单因素分析关系不显著,脱盐半径随矿化度的增加呈逐渐递减趋势,当高于 3.0 g/L 时,湿润体积盐明显增加。

以上结果表明,在沙穴种植结构下,利用 3.0 g/L 微咸水可提高土壤含水率,积盐效果不显著,结合实际条件在沙穴种植条件下,为提高作物根系层土壤含水率,控制盐分累积,考虑经济等因素,选用 3.0 g/L 微咸水灌溉最优。

参考文献:

[1] 张体彬,展小云,康跃虎,等.浅层填沙滴灌种植枸杞改

- 良龟裂碱土重度盐碱荒地研究[J].农业机械学报,2016,47(10):139-149.
- [2] 杜军,杨培岭,李云开,等.河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化[J].农业工程学报,2010,26(7):26-31,391.
- [3] 王全九,许紫月,单鱼洋,等.去电子处理微咸水矿化度对土壤水盐运移特征的影响[J].农业工程学报,2018,34(4):125-132.
- [4] Berezniak A, Ben-Gal A, Mishael Y, et al. Manipulation of soil texture to remove salts from a drip-irrigated root zone[J].Vadose Zone Journal,2017,17(1):1-11.
- [5] 薛铸,万书勤,康跃虎,等.龟裂碱地沙质客土填深和秸秆覆盖对作物生长的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(1):38-41.
- [6] 徐秉信,李如意,武东波,等.微咸水的利用现状和研究进展[J].安徽农业科学,2013,41(36):13914-13916,13981.
- [7] 王全九,毕远杰,吴忠东.微咸水灌溉技术与土壤水盐调控方法[J].武汉大学学报(工学版),2009,42(5):559-564.
- [8] 郭向红,毕远杰,孙西欢,等.西葫芦微咸水膜下滴灌土壤水盐运移对产量影响的预测模型[J].农业工程学报,2019,35(8):167-175.
- [9] 王在敏,何雨江,靳孟贵,等.运用土壤水盐运移模型优化棉花微咸水膜下滴灌制度[J].农业工程学报,2012,28(17):63-70.
- [10] 朱成立,舒慕晨,张展羽,等.咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J].农业机械学报,2017,48(10):220-228.
- [11] Flowers T J, Ragab R, Malash N, et al. Sustainable strategies for irrigation in salt-prone Mediterranean : SALTMED[J].Agricultural Water Management,2005,78(1):3-14.
- [12] 张珂萌,牛文全,汪有科,等.微咸水微润灌溉下土壤水盐运移特性研究[J].农业机械学报,2017,48(1):175-182.
- [13] 田富强,温洁,胡宏昌,等.滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望[J].水利学报,2018,49(1):126-135.
- [14] 张翼夫,李洪文,胡红,等.打孔灌沙促进漫灌下盐碱土水分下渗提高脱盐效果[J].农业工程学报,2017,33(6):76-83.
- [15] 谭军利,王西娜,田军仓,等.不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2018,34(17):100-108.
- [16] 李慧,林青,徐绍辉.咸水/微咸水入渗对土壤渗透性和盐分阳离子运移的影响[J].土壤学报,2020,57(3):656-666.
- [17] Oster J P, Jayawardane N S. Agricultural management of sodic soils [C]//Summerme, naidur. Sodic soils: Distribution, processes, management and environmental consequences. New York:Oxford University Press, 1998: 125-147.
- [18] 刘春成,李毅,郭丽俊,等.微咸水灌溉对斥水土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2011,27(8):39-45.
- [19] 田彤,李仙岳,史海滨,等.不同生育期淋洗对微咸水滴灌玉米农田水盐及产量的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):260-267.
- [20] 吴忠东,王全九.微咸水入渗水量对土壤水盐运移特征的影响[J].农业机械学报,2010,41(11):67-71,78.
- [21] 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1):84-87.
- [22] 王海霞,徐征和,庞桂斌,等.微咸水灌溉对土壤盐分分布及冬小麦生长的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):291-297.
- [23] 杨军,马艳,孙兆军.宁夏龟裂碱土水盐运移及时空分布特征[J].农业工程学报,2018,34(增刊1):214-221.
- [24] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.河套灌区不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究[J].水土保持学报,2017,31(2):301-308.
- [25] 邢小宁.微咸水滴灌条件下土壤水盐运移的试验研究[D].兰州:兰州大学,2010.