

燥红土微咸水滴灌下水盐运移规律的试验研究

董丽艳,王卫华

(昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要:为了探讨燥红土地区微咸水滴灌的水盐运移规律,对该地区容重为 $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的红壤土,进行了不同灌水矿化度($2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)的单、双点源入渗试验及不同滴头流量($2.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $4.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)的单点源入渗试验,采用室内三维土箱入渗,分析滴头流量及矿化度对该地区红壤土水盐运移规律的影响。结果表明:单点源入渗试验中,矿化度一定($2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)的条件下,灌溉时间在 150 s 后, $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量下湿润锋运移速率快且稳定,平均推进速率达 $1.65\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,最终推进深度达 22 cm ,可以达到灌溉要求,优于 $4.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量的综合性能且节省灌溉水;在滴头流量一定($3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)的条件下,湿润锋推进深度随矿化度的增加而增加,其速率排序为: $2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}<4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}<8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,其推进深度分别为 21.5 、 22.4 、 22.78 cm 。双点源试验中,矿化度为 $8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的滴头正下方及交汇部分含水率均达到 $0.4\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右;但 $8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度下含盐量可达 0.4% ,不适合作物生长,而矿化度为 $4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水灌溉时,在交汇部分会形成一个含盐量 0.1% 左右的适合作物生长的低盐区域。在滴头流量为 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,将单、双点源入渗试验的同一入渗深度处进行对比分析发现,随着矿化度增大,地表湿润比由 87% 增加到 90.8% ; $8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度下交汇时间比 $2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度下提前 16 min ;矿化度为 $8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时在 $0\sim15\text{ cm}$ 土层,交汇区含盐量相对于相同湿润位置处单点源的含盐量增加了 37% ,而矿化度不大于 $4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,含盐量增加比率几乎为负值,可知矿化度为 $4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的土壤积盐不显著且含水率高。在灌溉水资源匮乏的云南燥红土地区推广应用微咸水滴灌时,可参考滴头流量 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,微咸水矿化度 $\leq 4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 用于作物栽培实践。

关键词:微咸水滴灌;燥红土;水盐运移;矿化度;湿润峰

中图分类号:S274.1 **文献标志码:**A

Study of movement of water and salts in dry red soil under drip irrigation with brackish water

DONG Li-yan, WANG Wei-hua

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: In order to better understand the water and salt transport of brackish water drip irrigation in dry red soil region, single and double point source infiltration experiments with different irrigation salinity ($2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) and single point source infiltration experiments with different dripper discharge ($2.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $4.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) were carried out on red soil with a bulk density of $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. The effects of dripper discharge and salinity on water and salt transport in red loam soil were analyzed. The results showed that under the fixed salinity ($2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), the movement rate of wetting front was fast and stable after 150 seconds , and the average advancing rate was $1.65\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ under $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ dripper discharge. The final wetting depth was 22 cm , which meets the irrigation requirements. Its comprehensive performance was better than $4.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ dripper discharge and effectively saved irrigation water. Under certain conditions ($3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$), the propulsive depth of wetting front increased with increasing salinity, and its velocity was $2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}<4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}<8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, and the propulsive depth was 21.5 cm , 22.4 cm and 22.78 cm , respectively. In the double point source exper-

iment, the water content of the dripper with salinity of $8.33\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $4.86\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ was about $0.4\text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, while the salt content of the dripper with salinity of $8.33\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ was about 0.4%, which was not suitable for the crop-growth. When the water salinity of $4.86\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ was irrigated, a low salinity area with salinity of about 0.1% was formed in the intersection part. When the dripper flow rate was $3.74\text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, comparing the same infiltration depth of single and double point source infiltration tests, it is found that increasing salinity made the surface wetting ratio increase from 87% to 90.8%. The intersection time at $8.33\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ salinity was 16 minutes earlier than that at $2.88\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ salinity. The salinity at 0~15 cm soil layer at $8.33\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ of drip water salinity at the same wetting position increased by 37% over that at the single point source. When the salinity was not more than $4.86\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, the salt content increase ratio was almost negative. While the irrigation salinity was at $4.86\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, salt accumulation was not significant and the water content was high. When using drip irrigation with brackish water in dry red soil area of Yunnan Province where irrigation water resources are scarce, the drip flow rate of $3.74\text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ with $\leq 4.86\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ salinity of brackish water can be used for crop cultivation practice.

Key words: drip irrigation with brackish water; dry red soil; water and salt migration; salinity; wetting front

随着经济飞速发展,人口迅速增长,水资源日益剧减,尤其是淡水资源急剧减少,已成为不可忽视的问题,合理的利用水资源显得尤为重要^[1]。同时,由于工业和生活用水量比重不断加大,导致可用的农业灌溉水资源日益紧缺。为解决农业灌溉水资源短缺的问题,除了提高淡水资源利用效率,还可以研究和开发利用早期认为不适宜灌溉的劣质水^[2-4],如微咸水。合理开发利用微咸水已成为缓解淡水供需紧张的一个重要举措。由于微咸水中含有一定量的盐离子,用其灌溉必然会对作物及土壤带来一定的影响。所以,采取适宜的灌溉方式及掌握灌溉后水盐运移规律,这是合理利用微咸水的关键所在。

云南省地下水资源天然补给量为 $752.44 \times 10^8\text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,其中微咸水 $1.24 \times 10^8\text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,半咸水 $0.62 \times 10^8\text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,咸水 $3.11 \times 10^8\text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$;全省地下水可开采量为 $177.63 \times 10^8\text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,初步统计实际开采量仅占可采资源量的 3.53%,为 $6.28 \times 10^8\text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,地下水的利用率仅占全省地下水资源的 0.85%^[5];加之地区分布差异较大,降水时空分布不均,干湿两季差异明显,人们节水意识不强;近年来由于自然、人为因素造成很多河流、湖泊及水库水质恶化,水量不断减少,某些地区河流甚至出现断流现象。因此,在云南红土地区发展微咸水灌溉,提高水资源利用效率是非常有必要的。

前人研究结果表明利用,微咸水、咸水灌溉,与优质水灌溉相比减产不大。马文军^[6]在河北省曲周县对微咸水灌溉下褐土化潮土上的作物产量的影响研究,得出在微咸水灌溉下的冬小麦或玉米产量一般可以达到淡水灌溉下的 85%~90%,并节约了 60%~75%的淡水资源。滴灌是一种灌溉水分利

用效率较高的灌溉方式,在微咸水灌溉中使用滴灌,盐分主要分布在湿润体边缘,并且会在滴头下方形成一个有利于作物生长的淡化区。吴忠东^[7]在南皮生态试验站,通过室内一维土柱试验研究了粉质粘壤土在矿化度为 $3\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的微咸水灌溉下,灌水量对土柱各深度积盐规律、不同深度土层平均含盐量变化规律的影响;蒲胜海等^[8]对新疆的砂壤土进行了三维土箱的微咸水滴灌入渗试验,得出利用微咸水滴灌能形成一个含水率较高且含盐量较低的区域,为作物提供一个良好的水盐环境。目前,国内外学者对于微咸水灌溉后的土壤质量、作物产量、土壤水盐运移情况和灌溉制度等方面开展了大量研究^[9-17],但以上研究多基于干旱半干旱地区,供试土样多为黄土、黑土和褐土,而水资源总量丰富但局部分布不均的云南红土高原燥红土微咸水滴灌下水盐分布的研究却鲜见报道。本文基于前人研究基础,通过室内三维土箱入渗试验着重研究了云南燥红土在不同矿化度、不同滴头流量下,水平、竖直方向上水盐分布规律、湿润锋运移痕迹、剖面含水率、含盐量变化规律等,旨在构建适合该地区的微咸水科学灌溉模式,为今后进一步研究该地区微咸水灌溉对作物生长及产量影响的机理奠定基础。

1 试验内容与方法

1.1 供试土样

容重为 $1.2\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的供试土样经过风干、碾磨过 2 mm 的筛,采用马尔文 MS 2000 激光颗粒分析仪测定土壤机械组成,采集 10 份土样进行分析,取其平均值。供试土样质地为:粉粒、砂粒、黏粒的体积百分含量分别为 28.63%、16.80%、54.57%;并且

利用国际制土壤质地分类标准对供试土样进行分类,试验使用的土壤类型为燥红土,质地类型为黏壤土;试验测得该土壤饱和含水率为 $41\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$,土壤初始含水率为 $0.03\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$,初始含盐量为 0.04% ;用离心机法测得容重为 $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的红壤土样本含水率和相应压强间的关系,绘制出土壤水分特征曲线如图 1。

1.2 试验设计

在容重 $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、滴头流量 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 下进行不同矿化度的入渗试验,采用去离子水与 NaCl 按一定配比分别配置 3 个矿化度水平,即:1(矿化度 $2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),2(矿化度 $4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),3(矿化度 $8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$);分别将这 3 个处理进行单点源、双点源入渗试验,总计 6 个处理,各处理重复 3 次。

在容重 $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、矿化度 $2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下进行不同滴头流量的单点源入渗试验,分别为:1(滴头流量 $2.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$),2(滴头流量 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$),3(滴头流量 $4.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$),共 3 个处理,各处理重复 3 次。试验结果采用各组数据的平均值进行分析。

1.3 试验装置与测定项目

由土箱和供水系统构成试验装置,利用蠕动泵控制滴头流量,一定时间内用量筒标定流速。为观察三维入渗下土壤水分运动的情况,本试验采用 $40\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ 玻璃土箱,每 5 cm 装填 1 次土,夯实,层间打毛,装土高度共计 35 cm。单点源试验中,把滴头 1 放置在土箱一角处;双点源试验中,把滴头 1 放置在图 2 所示土箱的 2 个角部(2 个滴头 1 即是双点源滴头的位置)。从该角顶点处分别标记与土箱边壁成 30° 和 60° 位置线,不同时刻用彩色图钉在所画的线上标记,方便记录水平运移距离。试验中采用先密后疏的时间间隔记录数据,当湿润锋边界迁移到距土箱底部 5 cm 处时,试验结束。不同时刻下在土箱侧壁标记湿润锋运移痕迹,试验结束

后于水平方向间隔 10 cm,垂直方向间隔 5 cm 取土,直到湿润锋干湿交界处。双点源试验中,湿润锋干湿交界未达到距土箱底部 10 cm 处。烘干法测含水率。称取烘干后过 1 mm 筛的土样 20 g,按 5 : 1 的水土比进行混合,用振荡器振荡摇匀 5 min,过滤后得到清液,用 DDSJ-308A 型雷磁电导率仪测定土壤电导率值,利用标定曲线得出土壤含盐量。以下着重对垂直滴灌带滴头位置剖面、平行滴灌带滴头位置剖面和湿润锋交汇剖面等 3 个特征剖面(如图 2)的水盐运移情况进行分析。

2 结果分析

2.1 垂直滴灌带滴头位置剖面

2.1.1 单点源入渗下矿化度对湿润锋推进速度的影响 为探讨滴入不同矿化度的水后土体中水盐受矿化度影响的变化规律,对土壤容重为 $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,滴头流量为 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 下不同矿化度对湿润锋推进深度的影响进行分析,如图 3。用多项式对湿润锋推进深度与时间的关系进行拟合, R^2 (相关系数)均达到 0.99 以上,表明相关显著。由图 3 可看出,湿润锋推进深度随时间的变化趋势较平缓,湿润锋推进深度随矿化度增大分别为 21.5、22.4、22.78 cm。湿润锋的推进速度随着入渗水矿化度的升高而呈上升趋势。归因于入渗水盐分提高有利于土壤团聚体的形成,降低了土壤颗粒间的排斥力,进而增强了土壤胶体的絮凝性、增加了土壤大孔隙的比例,促进水分在土壤中的入渗。这与蒲胜海等^[8]的观点相符;对新疆砂壤土进行微咸水滴灌入渗试验时,微咸水中含有一定量的盐分离子,当这些离子进入土壤以后,与土壤胶体颗粒以及化学

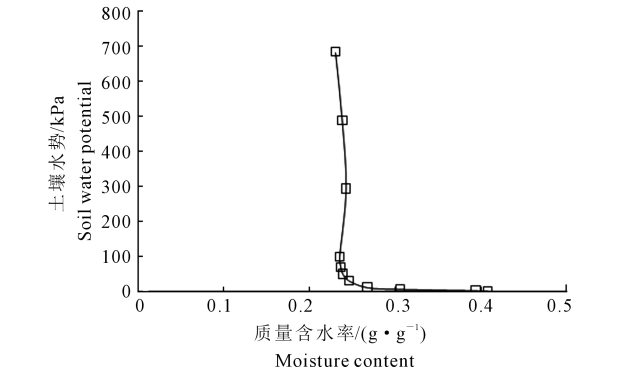


图 1 土壤水分特征曲线

Fig.1 Characteristic curve of soil moisture

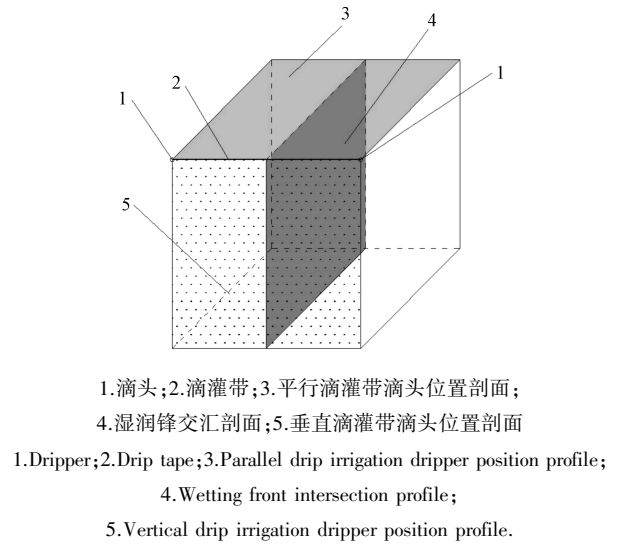


图 2 土箱特征剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of drizzling profile

成分发生物理化学作用,使土壤结构及孔隙特征发生变化,从而影响土壤的入渗特性。

2.1.2 单点源入渗下滴头流量对湿润锋推进速度的影响 对土壤容重为 $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,矿化度为 $2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 不同滴头流量下的微咸水滴灌湿润锋推进深度进行分析,如图 4 所示,误差棒浮动范围比较均匀,说明样本数据变异性较小;相同容重、相同矿化度下,随滴头流量的增加,湿润锋推进深度增大,滴头流量越大,湿润锋推进深度的增幅也越大,随着入渗时间的延长,湿润锋推进速度在减缓。30~150 s 时,滴头流量 $2.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 下湿润锋运移速率最快;150~870 s 时,滴头流量 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 下湿润锋运移速率比较稳定,平均推进速率达 $1.65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且几乎大于 $4.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量下湿润锋运移速率;870 s 之后, $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量下湿润锋运移速率

仍有部分大于 $4.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量运移速率。 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量下湿润锋推进深度比 $2.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量下平均增加了 0.55 cm ,滴头流量 $4.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 下湿润锋推进深度比 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量下的推进深度平均增加了 1.17 cm 。一方面是由于微咸水具有增强土壤凝絮作用,增加大孔隙土壤的比例,从而有利于水分入渗;另一方面,由于滴头流量的改变使土壤水势发生变化,从而提高土壤的导水率。滴头流量是滴灌设计中的重要技术参数,滴头流量过小,土壤湿润区域小,不能为作物根区提供必需的水分,滴头流量过大会形成地表径流,浪费灌溉用水。同时不同水质下滴头流量对湿润体的影响也不相同^[18-19]。最终湿润锋推进深度均接近 22 cm ,相差不大,因此建议推广使用 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的滴头流量。对于根系较短的浅层作物,在地表下 $10\sim15\text{ cm}$,滴头流量 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 下的水分运移速率比较稳定,利于作物根系吸收利用水分,而对于根系较发达的深层作物,滴头流量 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $4.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 下水分所能到达的土层几乎一致。

2.1.3 双点源入渗下矿化度对水分分布特征的影响 入渗水中的离子成分除了影响土壤入渗特性以外,还在不同程度上影响土壤水分分布特征。利用 Surfer 8.0(三维立体图制作软件)分别做出不同矿化度下,土壤容重为 $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、滴头流量为 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的滴灌带位置剖面含水率等值曲线分布特征图,见图 5。由图 5 可知, $0\sim10\text{ cm}$ 土层土壤含水率与饱和含水率值基本接近, 10 cm 土层以下含水率大约在饱和含水率的 $60\%\sim80\%$;当矿化度 $\leq 4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $10\sim15\text{ cm}$ 土层含水率基本稳定在一个值附近,变化不大;总体来看,等值含水率曲线近似椭圆曲线,图中 2 个滴头正下方及交汇部分含水率均比较大;随着土层深度的增加,土壤含水率不断减小。这是因为入渗水矿化度的增大使土壤中溶液盐离子浓度增大,盐离子活跃使土壤黏粒膨胀,降低了土壤颗粒间的排斥力,从而土壤的容水性能也相应降低^[20]。对比分析图 5a、b、c,可以看出图 5a 中交汇部分含水率与图 b、c 交汇处含水率分布明显不同,并且在同一入渗深度处,入渗水矿化度越高,土壤剖面含水率也越大。由于入渗水矿化度的增加导致土壤溶液浓度增大,溶质势减小,对水分子吸引力变大,进而增强了土壤的持水性能。

2.1.4 双点源入渗下矿化度对盐分分布特征的影响 土壤容重为 $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,滴头流量为 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的不同矿化度下土壤剖面等值含盐量曲线分布图见图 6。由图 6 可知:整个土壤剖面含盐量并非

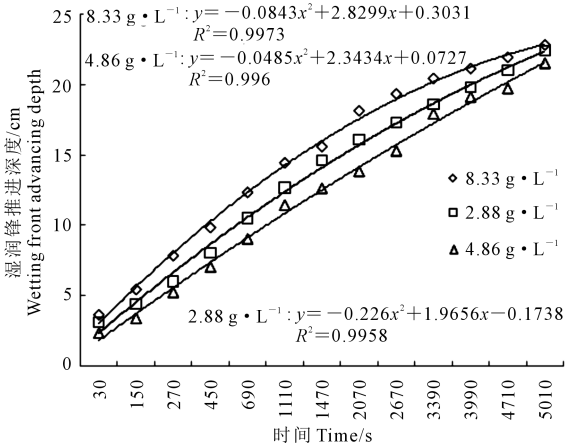


图 3 不同矿化度下湿润锋推进深度随时间的变化曲线
Fig.3 Wetting front advancing curve with time under different salinity

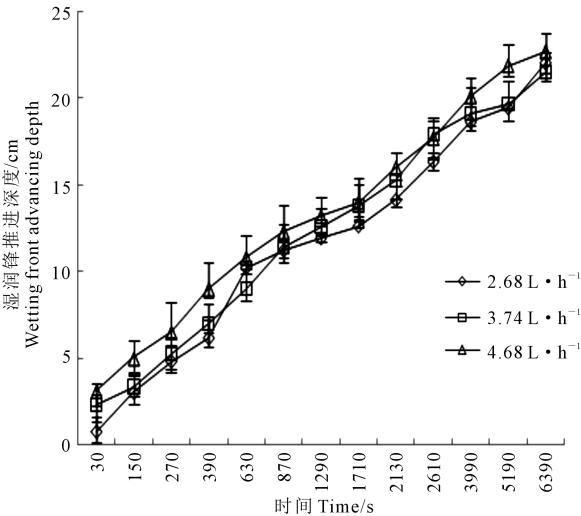


图 4 不同滴头流量下湿润锋推进深度随时间的变化曲线
Fig.4 Wetting front advancing curve with time under different dripper discharge

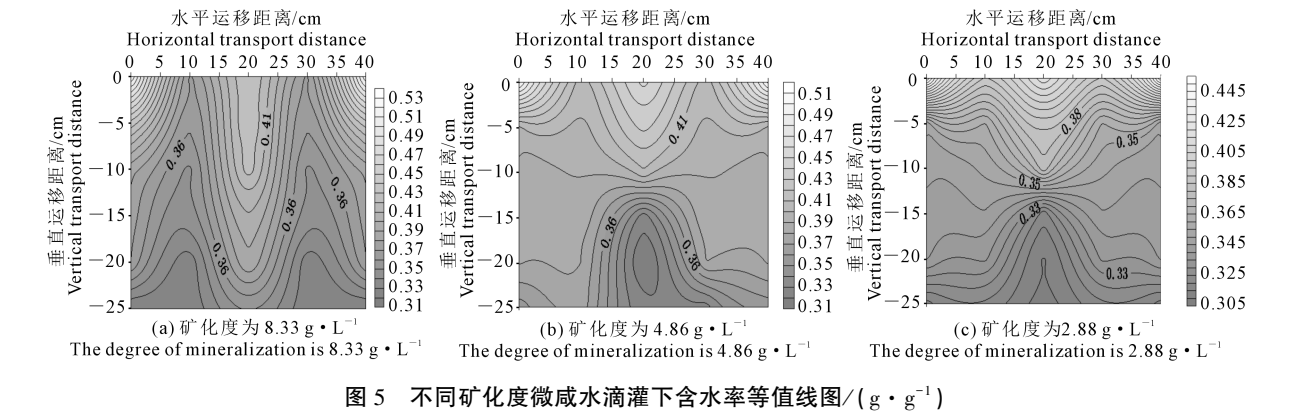


Fig.5 Contour map of water content under drip irrigation of brackish water with different salinity

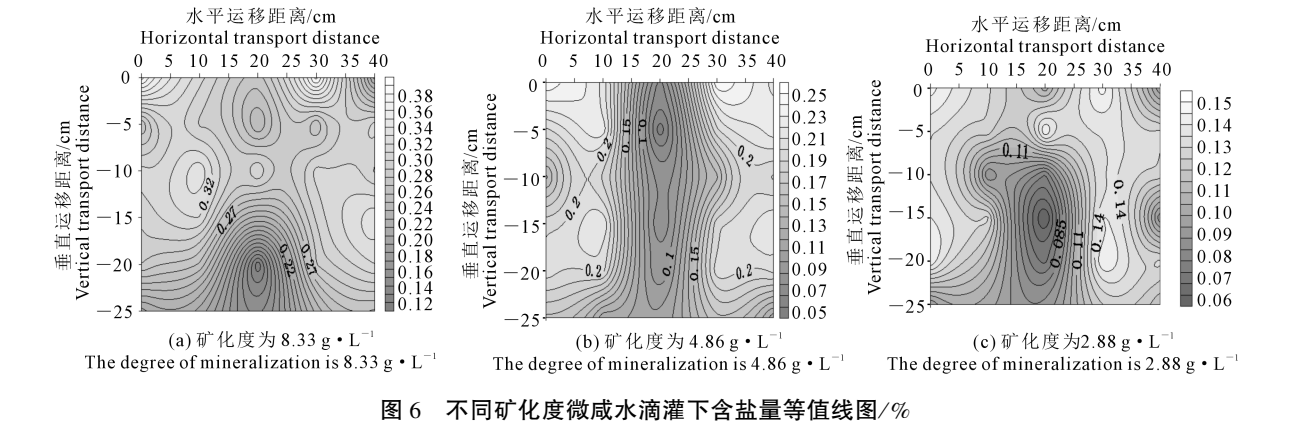


Fig.6 Contour map of salt content under drip irrigation of brackish water with different salinity

均与入渗水的矿化度密切相关。根据土壤各层(0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm, 15~20 cm, 20~25 cm)含盐量的平均值分析矿化度对土壤剖面盐分分布的影响,可以看出:(1)0~10 cm 土层内含盐量逐渐减小,10 cm 以下土层的含盐量在增大,这是由于在入渗过程中,土壤表面蒸发导致水分向上移动且把盐分带到了表层,并在 10 cm 土层处达到最小值;随着土层深度加深,含盐量逐渐增加。(2)交汇部分形成一个较大区域的低盐区(低于 0.1%),从图 a 矿化度为 $8.33 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的含盐量等值线图中可以看出,0~13 cm 土层区域含盐量在 0.3%~0.4%之间,含盐量过高不适宜作物生长;由图 6b 中看出:在 2 个滴头下形成的湿润锋交汇剖面上含盐量均在 0.1%~0.25%之间,且该剖面其他位置的最大含盐量为 0.25%。由图 5b 可以看出该交汇区域含水率高,说明如果对该地区作物进行微咸水滴灌,可采用矿化度 $\leq 4.86 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的微咸水进行灌溉;从图 6c 中可以看出 0~7 cm 土层含盐量在 0.13%~0.15%之间,7 cm 以下的土层是低盐区。(3)同一入渗深度,矿化度越高,含盐量也越大,在微咸水入渗时,增加入渗水的矿化度,实际就是增加土壤通量浓度,从而增加抑制了盐分从小孔隙扩散到大孔隙,降低了盐分

的运移速率,从而使得同一入渗深度的土层含盐量随矿化度的增加而增加。

2.2 平行滴灌带滴头位置剖面

双点源入渗试验中,在平行滴灌带滴头位置剖面上,随着入渗时间的延长,相邻两滴头的湿润锋相会产生一个交汇区,不同灌溉水质下水平湿润距离的不同导致双点源交汇及交汇区大小的不同。交汇区湿润宽度与水平湿润距离之比定义为地表湿润比^[20]。表 1 给出了 3 种矿化度下交汇区湿润参数。从表 1 中可以看出,随着灌水矿化度的升高,所需交汇时间缩短。如 $8.33 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 矿化度下交汇时间比 $2.88 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 矿化度下提前 16 min。随灌水矿化度的增加,交汇区湿润宽度增大,地表湿润比也在增加。从图 7 中可以看出,单点源入渗试验中,在地表水平方向上,随灌水矿化度的增加,距离滴头越远,含水率越低,这是水分由滴头向四周扩散的结果;地表水平方向高矿化度微咸水灌溉的含水率大于低矿化度灌溉含水率,这是由于土壤盐分一方面可以增加土壤的凝絮性和有效孔隙;另一方面灌水矿化度的升高使土壤中钠离子含量增加,钠离子有分散土壤颗粒的作用,使得土壤的导水通气能力降低,水平扩散能力提高。表 1 中也可以看出随灌

水矿化度增加,水平湿润距离也增加。而平行滴灌带滴头位置剖面上含盐量运移规律与垂直滴灌带滴头位置剖面相同,故不再分析。

2.3 湿润锋交汇剖面

在实践中对作物进行灌溉时,多数情况下都是多滴头同时运行且滴头间距不大,相邻滴头间将出现重叠现象,即交汇区域。该区域的湿润体特征值将会呈现特殊的分布规律。因此将本次试验滴头流

表 1 不同矿化度下交汇区湿润参数

Table 1 Wetting parameters of intersection area under different salinity			
矿化度 Mineralization /(g · L ⁻¹)	交汇时间 Interchange time /min	水平湿润宽度 Horizontal wet width/cm	交汇区湿润宽度 Intersection area wet width/cm
2.88	69	36.1	31.4
4.86	64	38.2	33.9
8.33	53	42.6	38.7

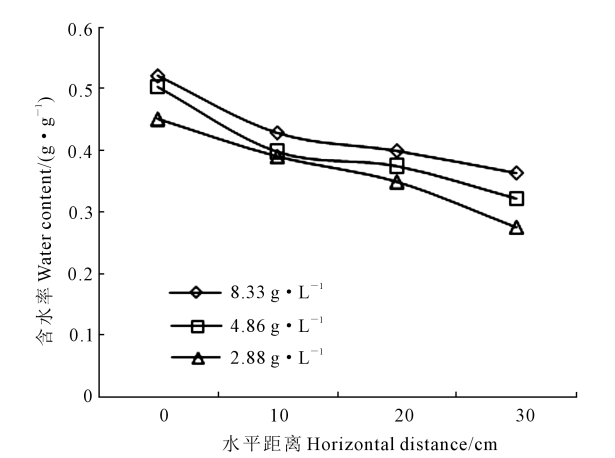


图 7 单点源入渗不同矿化度下含水率分布图

Fig.7 Distribution of moisture content at different salinity under single point source infiltration

量 3.74 L · h⁻¹,不同矿化度下单、双点源入渗试验的同一位置处(由于两滴头间距为 40 cm,故选取两滴头连线的中点即 20 cm 处断面和单点源滴灌下该断面不同入渗土层)水盐含量进行对比分析,如其增加比率为正值,则表示交汇区湿润锋面上的水盐含量大于单点源滴灌下相同位置的水盐含量,反之,则小于单点源滴灌下相同位置的水盐含量。表 2 给出了 3 种矿化度微咸水滴灌下不同入渗深度的水盐含量对比。

2.3.1 交汇区与单点源相同位置处含水率对比
表 2 可见,交汇作用对不同位置含水率大小分布的影响很大。各矿化度微咸水滴灌下,各入渗土层含水率增加比率在 2.42%~30.35%之间,且含水率增加比率全为正值,说明交汇区域含水率大于单点源滴灌下相同位置处的含水率,交汇作用增加了重叠部分的含水率。各矿化度微咸水滴灌下,交汇区域含水率随入渗土层深度的增加而降低。归因于交汇断面处于 2 个滴头中间的位置,交汇以前其水分为点源运动,水分在土壤基质势的作用下向四周运动,湿润锋逐渐扩大,随着入渗时间的推移,重力势逐渐取代基质势,成为水分运动的主要动力,湿润区也趋于稳定,交汇区域两侧的水势梯度基本一致,故含水率变化也相对稳定。

2.3.2 交汇区与单点源相同位置处含盐量对比
表 2 可见,矿化度为 8.33 g · L⁻¹的入渗各土层含盐量增加比率全为正值,说明随灌水矿化度的升高,交汇区湿润锋面上的含盐量比单点源滴灌下相同位置的含盐量增加更快,原因是在相邻 2 个滴头湿润锋运移的交汇区域,交汇时盐分聚集在湿润锋处,随着交汇时间延长,交汇区域两侧的水势梯度继

表 2 交汇作用对含水率和含盐量的影响

Table 2 The change of water content and salt content under intersection							
矿化度 Mineralization /(g · L ⁻¹)	深度 Depth/cm	含水量 Water content/(g · g ⁻¹)			含盐量 Salt content/%		
		单点处 Single point	交汇处 Interchange	增加比率/% Addition rate	单点处 Single point	交汇处 Interchange	增加比率/% Addition rate
2.88	0	0.35	0.39	10.09	0.11	0.11	-5.92
	5	0.32	0.41	21.87	0.12	0.15	19.18
	10	0.31	0.42	25.66	0.11	0.08	-38.72
	15	0.29	0.42	30.35	0.04	0.06	35.21
	20	0.27	0.38	27.75	0.23	0.07	-208.54
4.86	0	0.37	0.38	2.61	0.12	0.08	-64.03
	5	0.36	0.37	2.81	0.14	0.05	-154.43
	10	0.34	0.36	5.37	0.08	0.09	3.85
	15	0.32	0.34	6.73	0.04	0.08	54.29
	20	0.31	0.31	2.42	0.20	0.09	-126.76
8.33	0	0.36	0.43	16.59	0.18	0.27	34.50
	5	0.32	0.40	20.04	0.16	0.25	35.95
	10	0.35	0.43	17.68	0.15	0.31	52.42
	15	0.31	0.43	27.43	0.15	0.24	38.05
	20	0.31	0.39	21.30	0.12	0.12	4.01

续增大,使交汇区域扩大,盐分也重新分布,故交汇区域含盐量较高。随灌水矿化度增大,单点源微咸水滴灌下土壤表层盐分从0.11%增至0.18%;交汇区域土壤表层含盐量从0.11%增至0.27%。而灌水矿化度分别为 $2.88/4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,单点源滴灌下同一位置处含盐量的增加比率多为负值,而采用 $8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度的微咸水进行滴灌,会使交汇区域积盐明显,因而不建议使用高矿化度的微咸水对作物进行灌溉。

3 结 论

本文通过对室内土箱微咸水滴灌入渗试验的水盐运移规律分析得出以下结论:1)在一定的土壤容重及矿化度条件下分别进行了3种滴头流量的单点源入渗试验,通过对水盐运移规律分析得知:随着滴头流量增大,会加大湿润锋的推进深度,最终的湿润深度推进达到22 cm,三者相差不超过1.2 cm;同时 $2.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量下湿润锋运移速率只在入渗刚开始最快,之后相对较慢;而 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量下湿润锋运移速率比较稳定,平均推进速率达 $1.65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且在整个人渗过程中大部分湿润锋运移速率均大于 $4.68\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量下的运移速率;2)在一定的土壤容重及滴头流量下分别进行了3种矿化度的单、双点源入渗试验,单点源入渗试验中,湿润锋推进深度随矿化度增大分别为:21.5、22.4、22.78 cm;双点源入渗试验中,矿化度增大,会在滴头正下方及交汇部分形成较高含水率区域;但 $8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度下含盐量比较大,达到0.4%左右,不适合作物生长,而在矿化度为 $4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水灌溉时,在交汇部分会形成一个含盐量0.1%左右的适合作物生长的低盐区域;3)在一定的土壤容重及滴头流量下,对比分析3种矿化度下单、双点源入渗试验同一入渗深度可知,入渗水矿化度越高,土壤剖面含水率、含盐量也越大,交汇时间更短; $8.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度下交汇时间比 $2.88\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度下提前16 min;3)该地区燥红土用矿化度 $\leq 4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水灌溉时,相比单点源滴灌下同一位置处含盐量的增加比率几乎为负值,积盐不显著;4)3个不同矿化度下微咸水滴灌后均在0~10 cm土层内含盐量逐渐减小,10 cm以下土层的含盐量则增大。综合以上结论,建议滴头流量 $3.74\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,微咸水矿化度 $\leq 4.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 可作为昆明燥红土地区开展微咸水滴灌的参考灌溉条件,其对不同作物生长的影响有待于在实践中进一步验证。

参 考 文 献:

- [1] 马丽娟,侯振安,闵伟,等.适宜咸水滴灌提高棉花水氮利用率[J].农业工程学报,2013,29(14):130-138.
- [2] 吴忠东,王全九.微咸水连续灌溉对冬小麦产量和土壤理化性质的影响[J].农业机械学报,2010,41(9):36-43.
- [3] Shani U, Dudley L M. Field studies of crop response to water and salt stress. Soil Science Society of America Journal [J], 2001, 65 (1): 1522-1528.
- [4] Ayars J E. Managing subsurface drip irrigation in the presence of shallow ground water [J]. Agricultural Water Management, 2001, 47 (3): 243-264.
- [5] 李从仁.云南省地下水资源分布特征及地下水环境问题[C]//中国地质矿产经济学会.资源·环境·循环经济——中国地质矿产经济学会2005年学术年会论文集,北京:中国大地出版社,2005: 512-516.
- [6] 马文军,程琴娟,李良涛,等.微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):73-80.
- [7] 吴忠东,王全九.不同初始含水率条件下的微咸水入渗实验[J].农业机械学报,2010,41(S1):53-58.
- [8] 蒲胜海,何新林,王振华,等.微咸水水源线源滴灌土壤水盐运移特征试验研究[J].中国农村水利水电,2009,(5):56-59.
- [9] 万书勤,康跃虎,王丹,等.华北半湿润地区微咸水滴灌对番茄生长和产量的影响[J].农业工程学报,2008,24(8):30-35.
- [10] 万书勤,康跃虎,王丹,等.华北半湿润地区微咸水滴灌番茄耗水量和土壤盐分变化[J].农业工程学报,2008,24(10):29-33.
- [11] 郭仁松,林涛,徐海江,等.微咸水滴灌对绿洲棉田水盐运移特征及棉花产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):211-216.
- [12] 邵建荣,张风华,董艳,等.干旱区微咸水滴灌条件下典型土壤盐碱化影响因素研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(6):216-221.
- [13] Incrocci L, Malorgio F, Della Bartola A, et al. The influence of drip irrigation or subirrigation on tomato grown in closedloop substrate culture with saline water[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 107:365-372.
- [14] Malash N, Flowers T J, Ragab R. Effect of irrigation systems and water management practices using saline and non-saline water on tomato production[J]. Agricultural Water Management, 2005, 78:25-38.
- [15] Archibald R D, Harper R J, Fox J E D, et al. Tree Performance and Root-Zone Salt Accumulation in Three Dryland Australian Plantations [J]. Agroforestry Systems, 2006, 66 (3): 191-204.
- [16] Crescimanno G, Garofalo P. Management of irrigation with saline water in cracking clay soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70 (5): 1774-1787.
- [17] Ashraf M, Saeed M M. Effect of improved cultural practices on crop yield and soil salinity under relatively saline groundwater applications [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2006, 20 (1): 111-124.
- [18] 王春霞,王全九,刘建军,等.微咸水滴灌条件下土壤水盐分布特征试验研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):30-35,57.
- [19] 王春霞,王全九,单鱼洋,等.微咸水滴灌下湿润锋运移特征研究[J].水土保持学报,2010,24(4):59-63.
- [20] 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.