

膜下滴灌条件下灌水水质和流量对土壤盐分分布影响的田间试验研究

马东豪¹, 王全九^{1,2}, 来剑斌³

(1. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048; 2 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3 中国农业大学, 北京 100094)

摘要: 膜下滴灌是一种既节水, 又能抑制土壤盐分上移的灌水技术。该文着重研究在田间条件下, 滴头流量、灌水量和灌水水质对微咸水点源入渗水盐运移的影响。研究表明, 在充分供水条件下, 水平湿润锋和积水锋面随时间的推进符合幂函数关系; 滴头流量越小, 沿土壤深度方向上的盐分含量越小; 滴头流量越大, 水平方向含盐量随距离增加的趋势越不明显; 灌水量是微咸水灌溉条件下控制盐分累积的一个重要因素, 灌水量不足, 没有足够的入渗水量以确保盐分的淋洗; 灌水矿化度的升高会显著增加土壤表层的含盐量。

关键词: 微咸水; 膜下滴灌; 滴头流量; 灌水水质; 土壤盐分

中图分类号: S153.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6819(2005)03-0042-05

马东豪, 王全九, 来剑斌. 膜下滴灌条件下灌水水质和流量对土壤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 with English abstract)

0 引言

目前, 咸水与微咸水灌溉方式主要有漫灌、沟灌、喷灌和滴灌。漫灌和沟灌耗水量大, 而喷灌和滴灌属于高效节水型灌溉方式。从节水角度讲, 喷滴灌具有明显优势, 但从微咸水利用的角度来看, 滴灌具有明显优势。首先, 滴灌方式完全可以避免叶面烧死现象; 此外, 滴头下方土壤盐分的分布形状有利于作物生长, 并且维持一个高的基质势, 有利于根系的生长发育^[1]。由于滴灌的淋洗作用, 盐分向湿润锋附近积累, 在滴头下方的土壤含盐量比较小, 有利于作物正常生长^[2]。覆膜种植是近几年发展起来的一种新型种植技术, 不仅具有提高地温和节水效果, 而且可以抑制地下水中盐分向土壤的积累。将覆膜种植技术与滴灌技术结合起来, 不仅可以减少棵间蒸发, 抑制地下水盐分的上移, 而且在滴灌的淋洗作用下, 可以为作物主根系创造一个良好的水盐环境^[3], 是一种很有发展潜力的微咸水利用技术。就淡水点源入渗特性已进行了大量研究^[4-8], 并取得了一系列成果。但在田间, 由于作物生长、微生物活动和有机质的作用, 土壤中大孔隙发育, 存在优先路径, 其水盐运移特征与扰动土有很大差异, 再加上田间土壤特性及其水盐分布的空间变异性, 室内试验结果很难直接用于田间土壤水盐运动分析。此外, 在微咸水灌溉条件下, 灌水水质会

对土壤的理化性质产生严重影响, 进而改变土壤结构, 引起土壤入渗特性的变化, 所以在微咸水灌溉条件下, 土壤水盐运移特征可能与淡水入渗存在很大差异, 只有准确把握微咸水灌溉条件下的土壤水盐运移规律, 才能高效安全地利用微咸水。本文就微咸水灌溉条件下, 滴头流量、灌水量和灌水水质对土壤水盐运移的影响进行了田间试验研究。

1 试验区概况

新疆阿克苏市阿瓦提县地处中纬度欧亚大陆腹地, 属暖温带大陆性荒漠气候, 夏季炎热, 冬季寒冷, 四季分明, 降水量少, 蒸发量大, 干旱指数 14, 日照长, 霜期短, 热量丰富, 昼夜温差大。年平均气温 10.4~11.1, 气温年际变化较小, 但各月气温变化很大, 气温年较差 34.2, 日较差为 12~16。年降水量 46.7~61.2 mm, 年最大降水量为 110 mm, 年最小降水量仅 10.3 mm, 降水量多集中在夏季, 占全年降水量的 57%。全年平均风速 2.1 m/s, 3~5 月多为扬沙浮尘天气, 每年浮尘天气 51.6 天, 最大风速 20 m/s。年蒸发量 1877.5~2337.4 mm, 一年中 4~8 月份蒸发量最大, 占年蒸发量的 71.5%。年日照数 2570~2778 小时, 年平均太阳总辐射量为 573.4~607 kJ/cm²。年平均无霜期 193 天, 热量丰富, 昼夜温差大。阿瓦提县封冻 (10 cm 土壤稳定冻结) 日期为 11 月 26 日, 完全融化日期为 3 月 13 日, 最大冻土深度为 64 cm。潜水水位在 2 m 左右。

2 试验方法

为了分析田间膜下微咸水滴灌的水盐运移特征, 在阿瓦提县三场九连棉花地进行了不同滴头流量、灌水量

收稿日期: 2004-04-30 修订日期: 2004-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371057); 国家 863 计划项目 (2002AA 6Z3201) 资助

作者简介: 马东豪 (1980-), 男, 汉族, 河南南阳人, 硕士生, 主要从事土壤物理方面的研究。西安 西安理工大学水资源研究所, 710048

和灌水水质的点源入渗试验。

2.1 试验土壤特性

试验前在1 m 深土层内用环刀分5层(每层20 cm)测定容重和提取土样,并测定土壤含水量和含盐量,并利用吸管法测定土壤的颗粒组成,分析结果如表1所示。

表1 土壤基本物理属性

Table 1 Basic physical properties of soil

取土深度 /cm	在某粒径范围的颗粒百分比/%			土壤 类型	容重 /g·cm ⁻³	含盐量 /%
	0.02~ 2.0 mm	0.002~ 0.02 mm	< 0.002 mm			
0~ 20	56	40	4	砂壤土	1.34	0.82
20~ 40	68	24	8	砂壤土	1.49	0.58
40~ 60	75	21	4	砂壤土	1.31	0.22
60~ 80	63	28	9	砂壤土	1.33	0.23
80~ 100	50	36	14	壤土	1.33	0.20

2.2 试验水质

为了研究不同滴头流量、灌水水质与灌水量条件下土壤水盐运移特征,分别利用矿化度为0.3、1.2、3.0和5.0 g/L 的微咸水进行试验。由于当地有两种水源,即渠水和地下水,其矿化度分别为:0.3和7.3 g/L。因此采用当地的渠水和地下水按比例混合方式配置试验所需的水样,混合比例如表2所示。

表2 试验用水含盐量

Table 2 Salt content of water for the experiment

渠水和地下水的混合比例	1.0	9.1	3.2	2.3
试验水矿化度/g·L ⁻¹	0.3	1.2	3	5
钠吸附比	1	6	13	16

2.3 试验过程

试验田主要种植棉花,试验在棉花地的行间进行。试验前先对地面进行平整,试验过程中利用马氏瓶供水,并用软管将马氏瓶与医用针头连接,通过调节阀门的开度来控制滴头流量。试验开始前用量桶对滴头流量进行标定。考虑到土壤结构及水盐状况的空间变异性,每一组试验在同一天,及相邻地块完成,以减少试验初始条件的差异。为了研究滴头流量对土壤水盐运移的影响,利用矿化度为3 g/L 的微咸水进行滴头流量为1.24、1.83、2.55 L/h 的点源入渗试验,入渗历时为3 h。为了分析灌水量对土壤水盐运移的影响,以滴头流量为1.83 L/h 为例,进行了入渗历时分别为1.5 h、3 h和5 h 的点源入渗试验。为了分析灌水水质对土壤水盐运移的影响,进行了矿化度为0.3、1.2、3.0和5.0 g/L 的滴灌试验,滴头流量为1.83 L/h,试验时间为3 h。点源入渗试验过程中,定时测量积水面半径及水平湿润锋前进距离,试验结束后,迅速取土,测定入渗剖面上的含水率和含盐量分布。

3 试验结果分析

3.1 滴头流量对微咸水滴灌水盐运移特征的影响

滴头流量是滴灌系统的一个重要设计参数,也是影响滴灌条件下水盐运移的要素之一,为了研究微咸水滴

灌时滴头流量对土壤水盐运移特征的影响,进行了不同滴头流量的点源入渗试验。

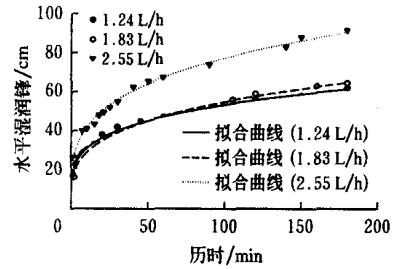


图1 不同滴头流量下的水平湿润锋变化曲线

Fig 1 Horizontal wet front changing curve under different drip rates

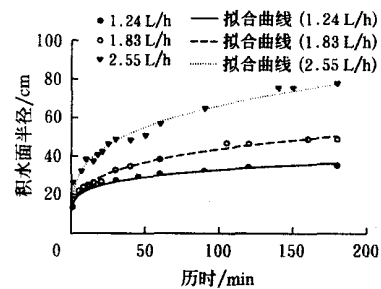


图2 不同流量下的积水面变化曲线

Fig 2 Ponding water area changing curve under different drip rates

图1和图2显示了不同滴头流量(1.24、1.83、2.55 L/h)下,水平湿润锋和积水面半径随时间的变化过程。由图1和图2可知,滴头流量越大,水平湿润锋和积水锋面前进越快,分别用幂函数拟合水平湿润锋和积水锋面随时间的变化曲线,拟合结果如下:

水平湿润锋曲线拟合结果:

$$q = 1.24 \text{ L/h} \quad X_f = 17.7495t^{0.2389} \quad R = 0.9942 \quad (1)$$

$$q = 1.83 \text{ L/h} \quad X_f = 14.9360t^{0.2824} \quad R = 0.9919 \quad (2)$$

$$q = 2.55 \text{ L/h} \quad X_f = 22.5715t^{0.2673} \quad R = 0.9903 \quad (3)$$

积水面曲线拟合结果:

$$q = 1.24 \text{ L/h} \quad r = 14.9055t^{0.1732} \quad R = 0.9856 \quad (4)$$

$$q = 1.83 \text{ L/h} \quad r = 14.1229t^{0.2458} \quad R = 0.9869 \quad (5)$$

$$q = 2.55 \text{ L/h} \quad r = 19.6023t^{0.2647} \quad R = 0.9704 \quad (6)$$

式中 q ——滴头流量, L/h; X_f ——水平湿润锋, cm; r ——积水面半径, cm; t ——入渗历时, min; R ——相关系数。

拟合结果表明,用幂函数拟合水平湿润锋曲线,相关系数均在0.99以上;积水面曲线拟合的相关系数也均在0.97以上。这表明幂函数可以很好地描述微咸水点源入渗水平湿润锋和积水面的发展过程。这与Khan (1996)的田间淡水试验结果^[6]和付琳(1983)、吕谋超(1996)和吕殿青(2000)的室内淡水试验结果^[5,7,8]是一致的。

由式(1)-(6)可知,积水面曲线的拟合指数随滴头流量的增加而增大,但是水平湿润锋曲线的拟合系数和

指数, 以及积水面曲线的拟合系数无明显变化规律, 这与吕殿青(2000)室内淡水试验得到的结果不同^[5]。

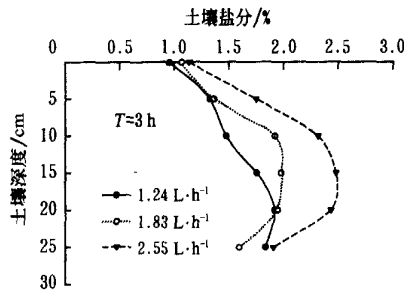


图3 不同滴头流量纵向土壤盐分分布

Fig 3 Vertical soil salt content distribution under different drip rates

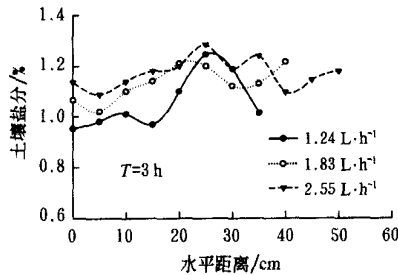


图4 不同滴头流量水平方向土壤盐分分布

Fig 4 Horizontal soil salt content distribution under different drip rates

图3和图4分别显示了不同滴头流量的点源入渗结束时, 土壤盐分在滴头下方的纵向分布和在地表的水平分布状况, 图中 T 表示入渗历时。由图3可知, 滴头流量越大, 纵向剖面上的盐分含量越高, 这与室内淡水试验的结果一致; 滴头流量在 1.5 L/h 左右时, 土壤盐分淋洗比较充分, 所以对于试验土壤, 滴头流量取 1.5 L/h 是合理的。由图4可知, 滴头流量越大, 水平方向含盐量随距离增加的趋势越不明显, 这是由于在滴头流量较大的情况下, 地面积水面积大, 其压盐作用使得水平洗盐作用减弱; 此外, 同一位置的含盐量有随滴头流量增大而增加的趋势。这是由于微咸水入渗时, 带入土壤的盐分会随土壤含水量增加的结果, 而水平方向含水量随滴头流量的增加而增加已为上面所证实。由上述结果可知, 滴头流量的增加不利于垂向压盐; 并且在微咸水灌溉条件下, 水平洗盐效果也会因滴头流量的增加而减弱, 土壤含盐量有随滴头流量的增加而增大的趋势。

3.2 灌水量对微咸水滴灌水盐运移特征的影响

在新疆阿克苏地区, 土壤盐碱化比较严重, 土壤本身含盐量很高, 再加上地下水矿化度高, 水位低, 降雨稀少, 蒸发强烈, 土壤表层积盐很快; 在利用微咸水的过程中, 若灌水量不足, 则土壤盐分得不到有效淋洗, 土壤盐碱化程度必将进一步加剧。因此, 合理的灌水定额是微咸水灌溉中的又一重要设计参数。为了研究不同灌水量对土壤盐分运移状况的影响, 进行了不同历时的点源入渗试验。

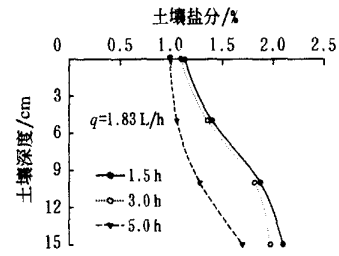


图5 不同灌水量纵向土壤盐分分布

Fig 5 Vertical soil salt content distribution under different irrigated water volumes

图5显示了相同的滴头流量(1.82 、 1.83 和 1.86 L/h)和灌水水质(3 g/L), 不同入渗历时(1.5 、 3 和 5 h)的点源试验结束时滴头下方的土壤盐分分布。由图5可知, 在土壤表层 15 cm 范围内, 随灌水量的增加, 土壤含盐量不断减少。 1.5 h 和 3 h 的含盐量剖面在纵向和水平方向差异不大, 这可能是由于入渗水量太少, 水分主要用于满足土壤缺水量, 不足以淋洗土壤盐分。图5表明在整个剖面上 5 h 时的含盐量明显降低。由此可见, 灌水量是微咸水灌溉条件下控制盐分累积的一个重要因素, 只有达到一定的灌水量, 上层土壤盐分才会得到充分淋洗。

3.3 灌水水质对微咸水滴灌水盐运移特征的影响

许多研究结果表明, 微咸水灌溉会导致土壤中盐分的累积。累积程度与灌水矿化度和灌水量有关, 进入土壤的盐分会随灌水量的增加和灌水矿化度的升高而增加; 盐分累积深度与降雨量、灌水矿化度、灌水方式、灌水制度和土壤性质等密切相关^[9]。土壤盐分一方面为作物生长提供必需的营养元素, 另一方面又通过渗透效应和特殊离子效应抑制作物生长。尤其是过量钠盐的存在会严重降低土壤的通透性, 使土壤的可耕性变差。由于管理措施在微咸水灌溉中控制土壤盐分累积的作用有限, 盐分平衡主要还是通过盐分淋洗维持。对于特定的土壤, 淋洗系数受土壤导水能力和灌水效率所限, 不可能设计太大, 所以不同的土壤对灌水矿化度有不同的承受能力。评价现有的咸水资源是否适于灌溉, 以及如何安全利用这些微咸水资源都需要研究不同矿化度的咸水灌溉会对土壤水盐运移产生什么样的影响。

3.3.1 灌水水质对土壤水分运动的影响

图6和图7显示了不同水质的微咸水点源入渗试验结束时, 土壤在点源下方和水平方向上的水分分布状况, 图中 V 表示入渗水量。由图6可知, 用的微咸水入渗, 土壤含水率在纵向剖面上差异不大。由图7可知, 不同水质入渗对水平方向上水分运动的影响比垂向明显, 且距离越远土壤含水率差异越大, 但也无明显的随水质变化的规律。虽然微咸水灌溉会影响土壤理化性质, 进而改变土壤入渗性能, 但田间土壤结构较稳定, 大孔隙发育, 大部分水分传输由大孔隙完成, 所以灌水水质在短时间内对土壤水分运动的影响可能并不显著。在水平方向, 含水率随灌水水质波动较大, 但由于地表积水, 含水率的测量误差也较大。所以, 在田间条件下灌水水质

是否影响水分入渗特性, 如果存在这种效应, 它将在多大程度上影响土壤水分运动, 有待于在田间进行更为深入的研究。

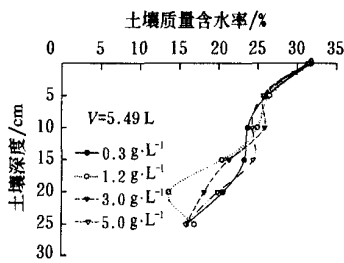


图6 不同水质点源入渗纵向土壤含水率分布
Fig 6 Vertical soil water content distribution under different water qualities

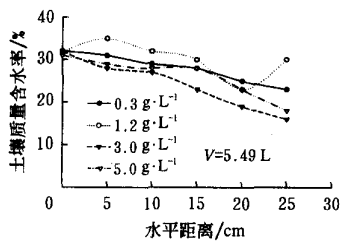


图7 不同水质点源入渗水平方向土壤含水率分布
Fig 7 Horizontal soil water content distribution under different water qualities

3.3.2 灌水水质对土壤盐分运移的影响

图8显示了不同矿化度(0.3、1.2、3和5 g/L)的微咸水入渗后, 土壤表层含盐量随入渗水质的变化规律, 图中V表示入渗水量。由图8可知, 土壤表层含盐量随灌水矿化度的升高显著增加。由此可见, 在微咸水灌溉条件下, 灌水带来的盐分将成为表土盐分累积的一个重要因素。所以, 对来水水质的及时、准确检测是安全利用微咸水必不可少的前提条件。

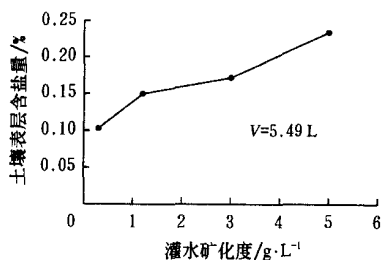


图8 灌水水质对表土含盐量的影响
Fig 8 Effect of water quality on surface soil salt content

图9显示了不同水质的微咸水点源入渗试验结束时, 土壤在水平方向上的盐分分布状况。由图9可知, 当灌水矿化度为3和5 g/L时, 水平方向的洗盐过程不明显; 而用矿化度为0.3和1.2 g/L的水入渗, 洗盐效果异常显著, 土壤盐分含量在湿润锋处达最大值。正是由于这种作用, 0.3 g/L的土壤盐分含量在距滴头10 cm处较3和5 g/L小, 而在距滴头10 cm以外急剧增加, 很快超过3和5 g/L的土壤含盐量; 并且, 3和5 g/L的土壤

含盐量变化曲线比较平缓, 5 g/L的处理土壤含盐量整个剖面都比3 g/L的处理大。由图9还可发现, 在距滴头10 cm以内的饱和区, 土壤盐分比较稳定, 且随灌水矿化度的增加而增大, 这表明在微咸水入渗条件下, 土壤盐分主要受灌水矿化度控制。由上面的分析发现3 g/L是土壤盐分分布特征发生变化的转折点, 这与许多研究的结果类似, 在没有其它辅助的控制盐分累积的措施下, 3 g/L是适宜灌溉的微咸水水质的上限。

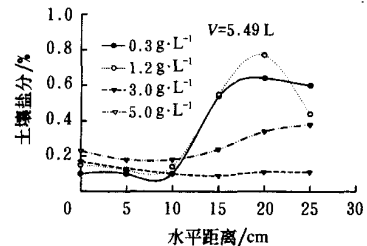


图9 不同水质点源入渗水平方向土壤盐分分布
Fig 9 Horizontal soil salt content distribution under different water qualities

4 结 语

通过对不同滴头流量(1.24、1.83、2.55 L/h)的田间微咸水点源入渗试验结果分析, 发现在充分供水条件下, 水平湿润锋和积水面随时间的推进符合幂函数关系; 滴头下方土壤水分在纵向的分布与滴头流量关系不明显, 而水平方向上土壤含水量随滴头流量的增大而增大; 滴头流量越小, 土壤盐分的淋洗越充分。不同历时(1.5、3和5 h)的微咸水点源入渗试验结果表明, 灌水量是微咸水灌溉条件下控制盐分累积的一个重要因素, 当灌水时间小于3 h时, 水分主要用于补充土壤缺水量, 没有足够的渗漏量以确保盐分的淋洗, 当灌水时间达到5 h时, 土壤盐分得到充分淋洗, 含盐量迅速降低。不同矿化度(0.3、1.2、3和5 g/L)的微咸水点源入渗试验结果表明, 灌水矿化度的升高会显著增加土壤表层的含盐量; 并且灌水矿化度越高, 灌溉过程中的洗盐作用越不明显; 在饱和区内, 土壤盐分比较稳定, 其大小主要受灌水矿化度控制; 灌水水质在短时间内对土壤水分运动影响不大。对于新疆砂壤土, 适宜的灌水水质上限为3 g/L, 对控制盐分有利的滴头流量大约在1.5~2 L/h左右, 入渗历时取多长需根据土壤初始含盐量、作物耐盐度和根区活动范围具体确定。

[参 考 文 献]

[1] Halhevet J, I Shainberg, J. Shalhevet (eds). Management of irrigation with brackish water [J]. New York: Soil Salinity under Irrigation, 1984: 298- 318
 [2] Yaron Pattern of salt distribution under trickle irrigation [M]. Ecological Studies Berlin Heidelberg: New York, 1973, 5: 389- 394
 [3] 王全九, 等. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J]. 灌溉排水, 2002, 21(4): 73- 77.
 [4] 王全九, 王文焰, 等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究 [J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 54- 57.

- [5] 吕殿青 土壤水盐运移试验研究与数学模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2000
- [6] Khan A A, et al Field evolution of water and solute distribution from a point source[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1996, 122: 221- 227.
- [7] 付琳 滴灌时的土壤浸润状况[J]. *灌溉排水*, 1983, 1(3): 36- 45
- [8] 吕谋超, 等 地下和地表滴灌土壤水分运动的室内试验研究[J]. *灌溉排水*, 1996, 14(1): 42- 44
- [9] Feigen A. Effect of irrigation with treated sewage effluent on soil, plant and environment, irrigation with treated sewage effluent [M]. *Management for Environmental Protection*, 1990

Field experimental studies on the effects of water quality and drip rate on soil salt distribution in drip irrigation under film

Ma Donghao¹, Wang Quanjiu^{1,2}, Lai Jianbin³

(1. *Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;* 2. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming, Yangling 712100, China;* 3. *China Agricultural University, Beijing 100094, China*)

Abstract: Drip irrigation under film is a new technology with great potential to use saline water safely, which can not only save water but also prevent soil salt from moving up. In the paper, importance is focused upon the effects of drip rate, irrigated water amount and water quality on water and salt movement during point source infiltration. Point source infiltration experiments were conducted in field with different saline water and drip rates. The results indicate that power function fits well to the advances of horizontal wet front and ponding water area with time under the condition of sufficient water supply; the smaller the drip rate, the less the salt content along soil depth; the larger the drip rate, the more indistinctly the tendency of salt content increases with distance. It can also be found that irrigated water volume is a key factor to control salt cumulation when irrigating fields with saline water. Insufficient irrigation cannot guarantee enough leaching of soil salt for small infiltration volume. Besides, the rise of the salt content of irrigated water will increase salt content of the surface soil remarkably.

Key words: saline water; drip irrigation under film; drip rate; water quality; soil salt content