

膜下滴灌水盐运移影响因素研究*

吕殿青¹ 王全九^{1,2} 王文焰² 邵明安¹

(1 中科院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西杨凌 712100; 2 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘 要 通过室内盐碱土入渗模拟试验, 探求了膜下滴灌滴头流量、灌水量、土壤初始含水量、土壤初始含盐量等因素对土壤水盐运移的影响。研究表明: 滴头流量的增加, 地表积水范围增大, 湿润体垂直距离减小, 滴头附近的含水量增加, 不利于作物正常生长的淡化区的形成; 灌水量的增加使得湿润体的范围增加, 同时有利于作物正常生长的淡化区的形成; 土壤初始含水量增加, 湿润体范围增大, 滴头附近的含水量增加, 但不利于作物正常生长的淡化区的形成和超过作物耐盐度的淡化区的发展; 土壤初始含盐量的增加使得达标脱盐系数减小。这对合理利用膜下滴灌技术体系开发盐碱地提供一定的指导, 有利于为滴灌系统的设计提供更合理的技术参数和进行膜下滴灌条件下的盐分管理。

关键词 膜下滴灌, 滴头流量, 土壤水分运动, 土壤溶质迁移

中图分类号 S152

水资源短缺以及因次生盐碱化导致的土壤质量退化已成为当今农业可持续发展的重要限制因素。膜下滴灌将先进的滴灌技术与覆膜种植技术有机结合, 使开发利用盐碱地、防止次生盐碱化和改善环境质量成为可能^[1]。膜下滴灌由于覆膜种植, 大大抑制了蒸发与土壤积盐, 同时通过滴灌作用淡化了主根区盐分, 为作物正常生长创造了一个良好的水盐环境。这在新疆农八师的生产实践中已得到部分证实。在膜下滴灌的过程中, 对特定的土壤, 其水盐运移受滴头流量、灌水量、土壤初始含水量、土壤初始含盐量等因素的影响^[1~5]。膜下滴灌系统的设计需要考虑这些因素的影响。本文通过膜下滴灌盐碱土入渗试验, 旨在分析膜下滴灌滴头流量、流量、土壤初始含水量、土壤初始含盐量对其水盐运移的影响, 为滴灌系统的设计提供合理的技术参数, 同时也为提高膜下滴灌洗盐效果提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自新疆盐碱区, 土壤颗粒组成采用吸管法, 分析结果表明供试土壤为粉沙质粘壤土。对试验土样按土水比 1: 5 进行浸提, 测得其初始含盐量为 14.2 g kg^{-1} , 根据新疆垦局提出的土壤盐化等

* 中科院知识创新工程项目(KZCX2-411)和霍英东教育基金(71028)资助

收稿日期: 2000- 11- 06; 收到修改稿日期: 2001- 07- 27

级标准,该土壤属于强度盐碱土。经测定土样中盐分以氯化钠为主,属于氯化物盐土。

1.2 试验系统

整个试验系统由试验土箱和供水系统组成,下面分别介绍:

1.2.1 试验土箱 由于膜下滴灌土壤水分运动和溶质迁移过程所形成的湿润体是以点源为中心的一个椭球体或球体,因而本试验取膜下滴灌所形成湿润体的二十四分之一作为研究对象,采用了扇形试验土箱。它是利用有机玻璃加工而成,扇形土箱的边长为45 cm,高为50 cm。土箱采用装配式结构,便于试验结束后取土样,测定土样的含水量和离子浓度。

1.2.2 供水系统 采用注射器针头(7号)作滴头,并利用马氏瓶向滴头供水,以维持恒定的滴头流量。滴头流量可通过调节马氏瓶高度及其进气口、出水口的开度来实现。

1.3 试验设计

为了研究膜下滴灌水盐运移的影响因素,进行了不同滴头流量、灌水量以及土壤初始含水量下水盐运移试验。试验方案如表1所示。

表1 膜下滴灌土壤水盐运移试验方案

Table 1 Experimental design of soil water movement and salt transport through film drip irrigation

滴头流量 Dripping rate(L h ⁻¹)	灌水量 Amount of accumulated infiltration(L)	土壤初始含水量 Initial soil water content (cm ³ cm ⁻³)	土壤初始含盐量 Initial soil salt content (g kg ⁻¹)
0.460	9.33	0.045	14.2
1.513	9.33	0.045	14.2
1.037	9.33	0.045	14.2
1.037	7.26	0.045	14.2
1.037	12.3	0.045	14.2
1.539	12.3	0.045	14.2
1.750	12.3	0.045	14.2
1.037	9.33	0.128	14.2
1.037	9.33	0.228	14.2
2.121	12.7	0.045	14.2
2.121	12.7	0.045	5.1
2.121	12.7	0.045	11.5
2.121	12.7	0.045	18.8

1.4 试验方法

将试验土样风干过筛后,测定土壤的初始含水量,根据土壤初始含水量和土壤容重(1.5 g cm⁻³),分层(每层厚度为5 cm)均匀地将土样装入试验土箱内。在试验过程中,量测土壤湿润体水平距离和垂直距离随时间的变化。试验结束后取土,用烘干法测定所取土样的含水量,用浸提法测定土样的含盐量。

2 结果与分析

2.1 试验装置的检验

为了检验扇形试验土箱边界对土壤水盐运移的影响,利用常规的方形土箱(90°)与扇形土箱进行了对比试验。其试验结果状况如图1(a)、(b)所示。

结果表明:与方形土箱相比,扇形土箱边界对水盐运移没有特殊的影响。同时扇形土箱不仅比方形土箱节约大量的试验土样,且便于用γ射线法测定土壤含水量分布和取样测定土壤盐分状况。

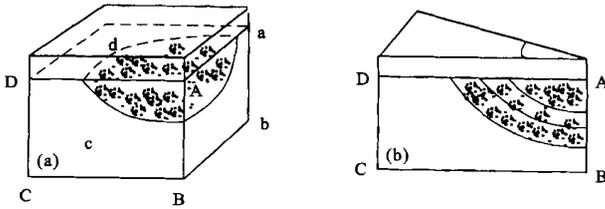


图 1 方形土箱(a)与扇形土箱(b)对比试验图

Fig 1 Comparison test between quadrat column (a) and fan-shaped column (b)

2.2 膜下滴灌水盐运移特性

由于膜下滴灌盐碱化土壤入渗能力较小且大都小于滴头流量,因而在滴头附近将产生一定地表积水,这加速了土壤水分在水平方向的运移速率,致使土壤湿润体的水平半径大于垂直半径,呈现为椭球形。同样土壤地表积水也影响着土壤含水量的分布,用绘图软件(SURFER)对实测各点的含水率值进行处理可获得含水量等值线剖面图。其结果表明,土壤含水量等值线剖面形状类似于湿润体形状,水平方向的含水率值大于垂直方向的含水率。

土壤盐分随着土壤水分的运动而迁移,由于地表积水范围的影响,使得土壤水分的水平运动速率大于垂直运动速率,因而导致了土壤盐分水平迁移速率大于垂直迁移速率。土壤含盐量的等值线分布形状类似于土壤含水量的等值线分布形状^[6]。

在膜下滴灌过程中,盐分随着灌溉水被带到湿润区边缘,距滴头较近的区域土壤含盐量低于土壤初始含盐量,而较远的区域土壤含盐量高于土壤初始含盐量。因此可将膜下滴灌入渗过程中土壤含盐量低于土壤初始含盐量的区域称之为脱盐区,而将土壤含盐量高于土壤初始含盐量的区域称之为积盐区。膜下滴灌所形成的脱盐区又可分为两个子区,一是作物可以正常生长的淡化区,可称之为达标脱盐区;一是超出作物耐盐度(例如,棉花耐盐度为 5 g kg^{-1})的淡化区,可称之为未达标脱盐区。这样在一次膜下滴灌后,从土壤盐分重新分布后的盐分状况与作物生长的关系来看,土壤盐分的分布状况可划成三个区,即达标脱盐区、未达标脱盐区及积盐区。为了使研究结果具有普遍性,同时也考虑到根据每次滴灌湿润体的水平扩展距离来判定土壤达标脱盐区的范围,将达标脱盐区的水平距离与整个湿润体的水平距离的比值定义为达标脱盐区系数(W_h);而将未达标脱盐区的水平距离与湿润体的水平距离比值定义为未达标脱盐区系数(W_l);再将积盐区的水平距离与湿润体水平距离的比值定义为积盐区系数(W_c)。其表达式如下:

$$W_h = r_h / R \quad W_l = r_l / R \quad W_c = r_c / R$$

其中 r_h 、 r_l 、 r_c 、 R 分别为达标脱盐区水平距离、未达标脱盐区水平距离、积盐区水平距离和湿润体水平距离^[6]。

由于膜下滴灌湿润体的形状、大小和土壤水分运动均受滴头流量、灌水量、土壤初始含水量、初始含盐量及滴头间距等因素的影响^[1-5],因此土壤盐分所形成的三个区域的特性必然受到这些因素的影响。

2.3 滴头流量对水盐运移的影响

滴头流量在膜下滴灌中是一个最重要的因素,它不仅影响地表积水范围的大小,而且直接影响湿润体的形状和大小、土壤含水量、含盐量的分布^[1~5]。

2.3.1 对地表积水范围的影响 图2显示了滴头流量与地表积水范围的关系。滴头流量对地表积水范围的影响可概括为:当滴头流量小时,相应的地表积水范围也小,随着时间的延长增长缓慢;当滴头流量大时,地表积水范围也大,且随着时间的延续增长迅速。同时也可知,地表固定积水范围(X)与滴头流量(q)符合幂函数关系。因此对于特定的土壤,特定的滴头流量可用来估计地表固定积水范围的大小。

2.3.2 对湿润特性的影响 湿润特性指湿润体的形状和大小。图3是相同灌水量下滴头流量与湿润体大小的关系。从图3可看出,滴头流量越大,水分在水平方向的运动速率越大,相应的湿润体垂直距离则减小;滴头流量越小,达到相同水量所需的时间越长,最终湿润锋的轮廓越大。

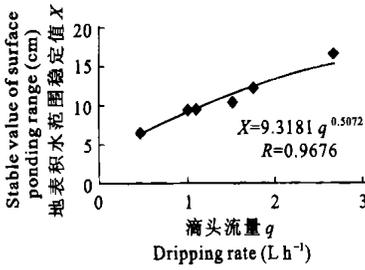


图2 不同流量下地表积水范围的变化
Fig.2 Surface ponding range at different dripping rate

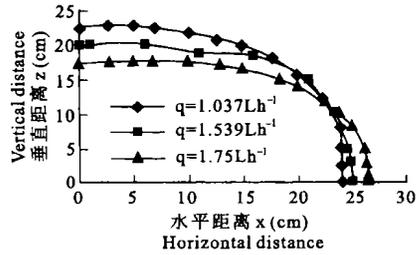


图3 不同滴头流量下湿润体的变化(灌水量为12.3 L)
Fig.3 The wetted soil at different dripping rate

2.3.3 对土壤含水量分布的影响 图4说明了相同灌水量不同滴头流量下土壤含水量在剖面上的分布状况。实验结果表明,滴头流量越大,相同湿润区域的含水量也就越大,反之则小;在相同的灌水量下,滴头流量增加,湿润土体内滴头附近各节点的含水量增加。

2.3.4 对土壤含盐量分布的影响 由于试验土样的入渗能力小于滴头流量,因此形成表面积水,致使湿润体的水平距离大于垂直距离,由于盐分迁移受水分运动的影响,因而盐分分布具有类似的特征。经过对实测资料分析,在相同灌水量下,随着滴头流量的增加,脱盐区与达标脱盐区的水平距离增加,垂直距离减小,这就充分说明了滴头流量的增加有利于水平压盐,而不利于垂直向下压盐。表2就显示了相同灌水量不同流量下 W_h 、 W_1 、 W_c 三个盐分系数。

由表2可知,在相同的灌水量下,随着滴头流量的增加,达标脱盐区系数 W_h 减小,积盐区系数 W_c 增大,这就表明随着滴头流量的增加,不利于作物正常生长的淡化区的形成。同时也表明随着滴头流量的增加,土壤盐分迁移总量与速率不一定增加。因此利用膜下滴灌开发利用盐碱地时滴头流量不宜过大。

表 2 相同灌水量(9.33 L)不同流量下的盐分系数

Table 2 The salt coefficients at different dripping rate with a given accumulated infiltration(9.33 L)

滴头流量 Dripping rate (Lh^{-1})	不同滴头流量(Lh^{-1}) 的盐分系数 The salt coefficient at different dripping rate		
	0.460	1.086	1.513
W_h	0.7826	0.7511	0.7059
盐分系数 ¹⁾ W_1	0.087	0.0987	0.0672
W_c	0.1340	0.1502	0.2269

1) W_h 、 W_1 、 W_c 分别为达标脱盐区系数(Coefficient of up-to-par desalination zone), 未达标脱盐区系数(Coefficient of not up-to-par desalination zone), 积盐区系数(Coefficient of accumulated salt zone)

2.4 灌水量对水盐运移的影响

图 4(a) 和图 5 显示了相同滴头流量不同灌水量下的土壤含水量等值线剖面。由图 4(a) 和图 5 可知, 随着灌水量的增加, 滴头附近的含水量增大。图 6 显示了同一滴头流量不同灌水量下的湿润体的变化。结果表明滴头流量相同时, 随着灌水量的增加, 湿润体水平距离与垂直距离也增加, 从而湿润体的范围增大。

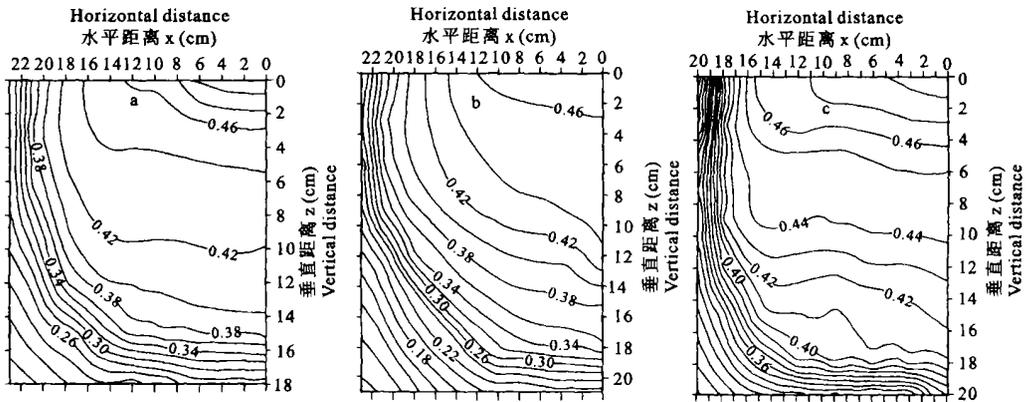


图 4 湿润体内土壤含水量分布(灌水量 9.33 L, 土壤初始含水量 $0.045\text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) (a) $q=1.037\text{ Lh}^{-1}$ (b) $q=0.460\text{ Lh}^{-1}$, (c) $q=1.513\text{ Lh}^{-1}$)

Fig. 4 Distribution of soil water content in wetted soil

灌水量的增加, 必然增加湿润体半径和利于作物正常生长的达标脱盐区的范围。在实际田间灌溉时, 田间所布置的滴头流量很难保持一致, 在这种情况下, 更重要的是分析不同灌水量对土壤水盐运移的影响。表 3 为相同流量下不同灌水量对 W_h 、 W_1 、 W_c 的影响。

由表 3 可见, 在相同滴头流量下, 随着灌水量的增加, 达标脱盐区系数 W_h 增加, 而其它两个系数关系不明显。这就说明随着灌水量的增加, 湿润体的范围增加, 同时也有利于作物正常生长的淡化区的形成。

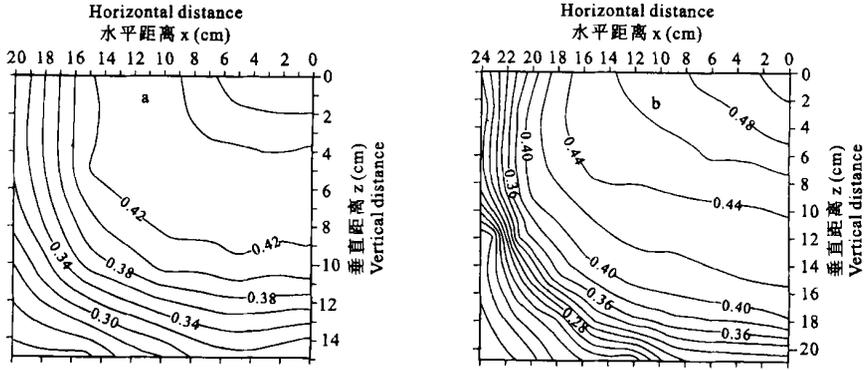


图 5 湿润体内土壤含水量分布((a) $q = 1.037 \text{ L h}^{-1}, t = 7 \text{ h}$ (b) $q = 1.037 \text{ L h}^{-1}, t = 12 \text{ h}$)

Fig. 5 Distribution of soil water content in wetted soil

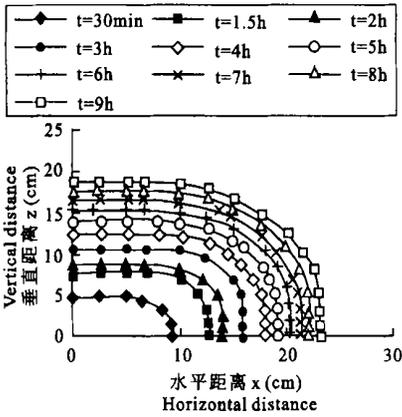


图 6 湿润体大小的变化($q = 1.037 \text{ L h}^{-1}$)

Fig. 6 Changes in the volume of wetted soil

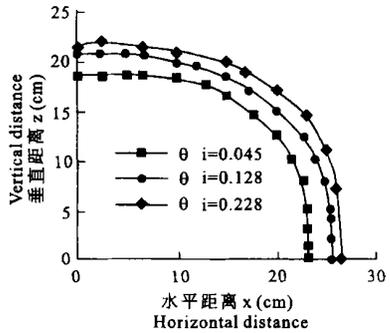


图 7 不同初始含水量下湿润体变化($q = 1.037 \text{ L h}^{-1}, t = 9 \text{ h}$)

Fig. 7 The volume of wetted soil at different initial soil water content

表 3 相同滴头流量(1.037 L h^{-1})不同灌水量下的盐分系数

Table 3 The salt coefficients at different accumulated in filtration with a given dripping rate (1.037 L h^{-1})

灌水量 Accumulated infiltration(L)	不同灌水量(L)下盐分系数 The salt coefficients at different accumulated in filtration		
	7.26	9.33	12.3
W_h	0.7243	0.7511	0.7558
盐分系数 W_1	0.0079	0.0987	0.0682
W_c	0.1960	0.1502	0.1760

2.5 土壤初始含水量对水盐运移的影响

不同的土壤初始含水量下在试验结束时所形成湿润体的形状如图 7 所示。随着土壤初始含水量的增加,水分运动加快,最终形成的湿润体也增大。图 4(a)和图 8 为滴头流量

和灌水量不变的情况下土壤初始含水量对剖面含水量分布的影响。结果表明,随着土壤初始含水量的增加,滴头附近各节点的含水量也相应增加。

土壤盐分溶液的浓度分布是盐分迁移的一个重要指标。在相同的灌水量和滴头流量下,因土壤初始含水量的不同所导致的含水量分布的差异影响着土壤中的盐分分布。不同初始含水量下达标脱盐区系数的变化如表4所示。

表4 不同土壤初始含水量下的盐分系数

Table 4 The salt coefficients at different initial soil water content

土壤初始含水量 Initial soil water content ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)		不同土壤初始含水量 ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) 盐分系数		
		Salt coefficient at different initial soil water content		
		0.045	0.128	0.228
盐分系数	W_h	0.7511	0.7431	0.7790
	W_1	0.0987	0.0984	0.0968
	W_c	0.1502	0.1584	0.1842

由表4可见,随着土壤初始含水量的增加,达标脱盐区系数 W_h 、未达标脱盐区系数 W_1 减小,而积盐区系数 W_c 增大。这就显示了土壤初始含水量的增加不利于作物正常生长的淡化区的形成和超过作物耐盐度的淡化区的发展。因此在膜下滴灌开发盐碱地时,要选择较小的土壤初始含水量进行压盐。

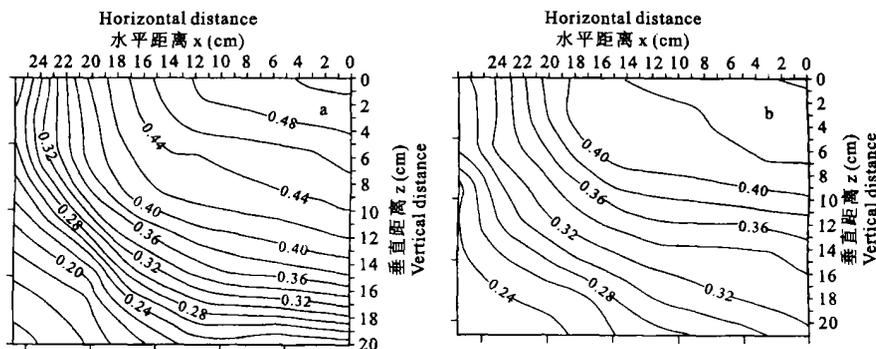


图8 湿润体内土壤含水量分布($q = 1.087 \text{ L h}^{-1}$, $t = 9 \text{ h}$) (a) 初始含水量为 $0.128 (\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$

(b) 初始含水量为 $0.228 (\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$

Fig. 8 Distribution of soil water content in wetted soil

2.6 土壤初始含盐量对水盐运移影响

土壤初始含盐量不同,也会影响到土壤中盐分的分布。随着土壤初始含盐量的增加,土壤溶液浓度增加,不利于上层盐分的向下运移,因而达标脱盐区系数减小。对于不同初始含盐量(5.1 g kg^{-1} , 11.5 g kg^{-1} , 14.2 g kg^{-1} , 18.8 g kg^{-1})的达标脱盐区系数分别为0.93、0.842、0.81、0.667。由此可见,随着土壤初始含盐量的增加,达标脱盐区系数减小。因此在滴灌开发利用盐碱地时,对不同土壤含盐量应根据达标脱盐区系数,确定合理的湿润体范围和合理的灌水量。

3 结 语

膜下滴灌的水盐运移不仅受到滴头流量、灌水量、土壤初始含水量及土壤初始含盐量的影响,而且也与土壤质地、滴头间距有着密切的关系。特别是在膜下滴灌开发利用盐碱地时,滴头间距的大小影响着湿润锋重叠的快慢,从而影响着洗盐的效果。

参 考 文 献

1. 张志新. 滴灌. 乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社, 1991
2. 刘晓英等. 滴灌条件下土壤水分运动规律的研究. 水利学报, 1990, (1): 11~ 21
3. 李光永等. 地理点源非饱和土壤水运动的数值模拟. 水利学报, 1996, (11): 47~ 51
4. Khan. Field evaluation of water and solute distribution of point source. J. Irrigation and Drainage Eng., 1996, 122(4): 221~ 227
5. Ward *et al.* Analysis of water and solute transport away from a surface point source. Soil Science Society Am. J., 1995, 59: 669~ 706
6. 王全九, 王文焰, 吕殿青等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究. 农业工程学报, 2000, 16(3): 54~ 57

FACTORS AFFECTING SOIL WATER MOVEMENT AND SOLUTE TRANSPORT FOR FILM DRIP IRRIGATION

Lü Dian-qing¹ Wang Quan-jiu^{1,2} Wang Wen-yan² Shao Ming-an¹

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, The State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming in the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100;

2 Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Summary

Film drip irrigation, which combines advanced dripping irrigation with film planting, is able to provide good environment for crop growth and a new concept for dealing with water crisis and exploitation of salinized land. Laboratory infiltration simulation was conducted to study water movement and solute transport in film drip irrigation as affected by dripping rate, accumulated infiltration, initial soil moisture content, initial soil salt content etc. The results showed that water content around dripper increased with increasing dripping rate which deterred the formation of desalination zone where crops can grow. Increase in accumulated infiltration increased the volume of wetted soil and favored the formation of desalination zone. As initial soil water content increased the volume of wetted soil and water content around dripper also increased which inhibited the formation of desalination zone. The increase in initial soil salt content would decrease the desalination coefficient. The present study provided useful data for the design of film drip irrigation system and practical measurement for the utilization of salinized land.

Key words Film drip irrigation, Dripping rate, Water movement, Solute transport