

滴灌流量对土壤水盐运移及再分布的作用规律研究*

刘春卿 杨劲松[†] 陈小兵 陈德明

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 通过室内土箱模拟试验, 对不同滴头流量处理的土壤水盐运移及再分布规律进行了研究, 结果显示: 两滴头交界面处的湿润锋依滴头流量不同而呈椭圆形或圆形; 大滴头流量促进了水分的水平运动, 水平扩散速率明显大于垂直入渗速率; 随着滴头流量的减小, 水平和垂直方向的入渗距离逐渐接近; 土壤湿润体体积与总灌水量有关, 而与滴头流量并无显著相关; 根据湿润锋的运动, 给出了试验用土大田建议滴头流量; 滴灌结束后, 水盐经历了一个非常重要的再分布过程, 经过再分布, 土壤水盐进一步向深层运移, 促进了上层土壤的淡化, 小滴头流量的淋盐效果明显好于大滴头流量; 土壤盐分的运移在前 3 天的再分布中最为活跃; 试验得出了保证作物生长需要和淋盐需要的每滴头灌溉水量, 对实践具有一定的指导意义。

关键词 滴灌; 水盐运移; 再分布

中图分类号 S152.7

文献标识码 A

新疆是典型的大陆性干旱气候, 降雨稀少, 蒸发强烈, 可用水资源有限, 节水灌溉是绿洲农业发展的必然。我国是世界上滴灌面积最大的国家, 新疆膜下滴灌面积目前已达 11.3 万 hm^2 。现代农业机械化、规模化条件下, 灌溉扩展和大规模节水灌溉的实施使新疆土壤的盐渍化呈现出新的问题和特征^[1,2]。对这种新的灌溉方式下的土壤水盐运移规律和长期影响进行研究, 具有重要的理论价值和现实意义, 对指导农业生产将起到积极的作用。

滴灌是最有效的灌溉方法之一, 其田间水分利用效率高达 90%, 相对于喷灌 60%~80%、表面灌溉 50%~60% 的水分利用效率, 其节水效果更为明显^[3]。高频滴灌避免了两次灌溉之间土壤的过分干燥, 相对于低频灌溉方式, 土壤有更平均的盐分浓度, 减少了盐分胁迫的机会。盐分被持续淋洗出湿润区, 积累于远离活动根区的湿润锋处, 为作物创造了良好的生长条件。

滴灌入渗仅发生在滴头周围一个很小的区域, 水分呈明显的三维运动。与普通灌溉方式下水盐的一维运动相比, 滴灌条件下的水盐运移呈现不同的规律。滴灌条件下的湿润体形状受滴头流量、灌水量、土壤初

始含水量、土壤质地等因素的影响^[4,5]。湿润体形状近似为半椭球体, 水平和垂直方向的最大入渗距离与入渗时间存在极显著的幂函数关系, 湿润体体积和灌水量之间存在显著的线性关系^[6]。经水流淋洗, 滴头附近含盐率明显较初始值降低, 离滴头越远, 含盐率增加越快, 至湿润锋前缘含盐率达到峰值^[7]。滴灌作为新型的灌溉方式, 受到较多的关注和研究^[8,9], 但由于上边界条件的复杂性, 水分运动的多维性以及灌溉的高频性, 目前对滴灌条件下水盐在土壤中的运动研究还很不充分。本试验采用负压计和盐分传感器对新疆盐土两滴头交汇处的湿润体运移和距滴头不同距离和深度处的盐分特征进行了模拟研究, 以期对滴灌条件下的水盐运移特征有更多层面的了解。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤采自石河子大学附属试验农场, 经风干碾碎, 过 2 mm 筛, 吸管法进行颗粒分析, 砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 63.28%、20.04% 和 16.68%, 为砂质壤土。采用烘干法测定风干土含水量为 1.63% (烘干

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (kzcx2-yw-406-3)、国家重点基础研究发展规划项目 (2005CB121108)、国家高技术研究发展计划 (863 计划) 重点项目 (2006AA100207)、新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室开放课题 (200401) 和中国科学院南京土壤研究所创新方向项目资助

[†] 通讯作者, E-mail: jsyang@issas.ac.cn

作者简介: 刘春卿 (1970~), 女, 博士研究生, 主要从事土壤水盐运移模拟及作物耐盐性研究。E-mail: cqliu@issas.ac.cn

收稿日期: 2007-09-15; 收到修改稿日期: 2007-04-16

土)。田间持水量为 21.06%,凋萎含水量为 8.03%。土壤初始含盐量 1.059 g kg^{-1} , pH9.15。

1.2 试验装置

试验装置为一矩形有机玻璃箱,长×宽×高为 $45 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$,如图 1。滴头位于 15 cm 一边的中央,该装置组成一单位容积土壤体。分别在距滴头横向 15、30、40 cm,垂向 5、20、40 cm 处埋设张力计和盐分传感器各 9 只,用于动态监测滴灌条件下水分和盐分的运移。

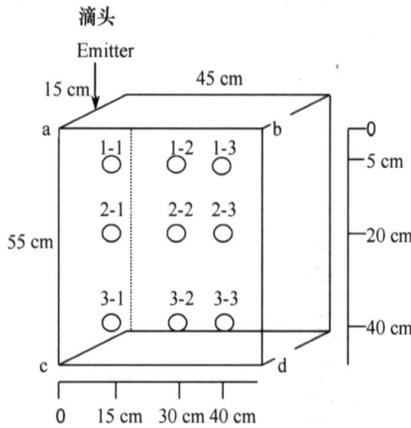


图 1 模拟试验装置图

Fig. 1 Schematic plan of the apparatus in the simulation experiment

1.3 试验方法

参考石河子垦区 0~20 cm 土样离子分析结果配制含盐模拟土,模拟土为含盐 4.2 g kg^{-1} 干土,混匀,按 1.55 g cm^{-3} 干容重分层(5 cm)装入试验土箱,共 50 cm 高。采用 9 号针头,通过供水水头调控滴头流量,利用马氏瓶稳压供水。三个滴头流量分别设为 1.0 L h^{-1} 、 0.5 L h^{-1} 和 0.25 L h^{-1} 。

当两滴头流量相等时,其交汇界面将形成零通量面。滴灌开始后,水分进行自由入渗,当运动至土箱边缘时,出现零通量面(abcd 面),水分向下运动,通过有机玻璃箱体将观察到的不同时刻湿润锋运移位置标示于试验土箱上,此即为两滴头交汇处零通量面的湿润锋运移位置。滴灌结束后覆盖防止土表蒸发,再分布过程中于不同时刻读取负压计和盐分传感器读数对土壤水盐运移进行动态监测,并将湿润锋运移位置标示于试验土箱。

2 结果与分析

2.1 不同滴头流量处理零通量面处湿润锋运移特征

1.0 L h^{-1} 的滴头水流量较大,试验开始后土表很

快形成积水并逐步扩展,2 h 后土表全部积水,2.5 h 时积水达 0.5 cm。试验进行 4 h 后,积水已达 1.2 cm,结束试验时共灌水 3 975 ml。滴头下湿润锋深 16 cm,覆盖防蒸发。试验结束后,记录张力计和盐分传感器读数。以后每天上午 9:00 和下午 6:00 读取传感器读数。 0.5 L h^{-1} 的滴头流量试验处理,4 h 时土表已基本全部积水,结束试验时共灌水 3 844 ml,覆盖防蒸发。 0.25 L h^{-1} 滴头流量试验因滴头流量小,共灌水 2 620 ml,未有积水形成。三种处理的湿润锋运移如图 2 所示。

从图 2 可以看出,大滴头流量促进了水分的水平运移,水平扩展速率明显大于垂直入渗速率。随着滴头流量的减小,水平和垂直方向的入渗距离逐渐接近,在 0.25 L h^{-1} 滴头流量时,水平和垂直方向的入渗距离已相当接近。低流量的滴灌促进了水分的垂直入渗,故对根系深的作物可选用较低流量的滴头,对浅根性作物可选用较大的滴头流量,使湿润体范围与根系分布区域相符,提高水分利用效率。

1.0 L h^{-1} 和 0.5 L h^{-1} 两种滴头流量处理,滴灌结束时总滴灌水量基本相同,随后经相同历时的再分布后,湿润锋的运移深度基本相同,可见不同的滴头流量并不显著影响湿润锋的运移深度,其深度主要受单位土体总灌溉水量的影响。低滴头流量(0.25 L h^{-1})处理,水平方向水分运动受到基质势梯度作用,垂直方向受到基质势和重力势梯度作用,尤其当入渗历时不断增加时,重力势的作用会越来越明显,所以虽然总灌水量较少,但因湿润土体范围有限,历时较长,在垂直方向的入渗深度超过了高滴头流量。

因试验用土导水率低,极易形成地表积水,地表积水形成后,形成垂直向下的水流,此时与普通灌溉方式的水分运移没有太大的区别,失去了滴灌的局部灌溉意义,达不到节水目的。从图 2a 可见,土表积水后,湿润锋几乎呈一条直线向下运移,所以不能采用太大的滴头流量。具体选择滴头流量时,可用测定的土壤入渗速率作参考,根据作物的根系形状进行选择。在本模拟试验中,土壤的饱和和导水率为 12.46 cm d^{-1} ,经测试当采用 0.4 L h^{-1} 时,普通灌水量($750 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$)时,湿润锋的水平运移距离最终为距滴头 30 cm 左右,基本在新疆常用覆膜方式(一膜二带四行,作物行距 $30 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$)的覆膜范围之内,可有效减少地表蒸发,提高水分利用效率,这对蒸发强烈的干旱地区节水是非常重要的。

2.2 不同滴头流量处理土体含水量特征

滴灌结束后,对土体各处的含水量进行了监测,各处水吸力见表 1。

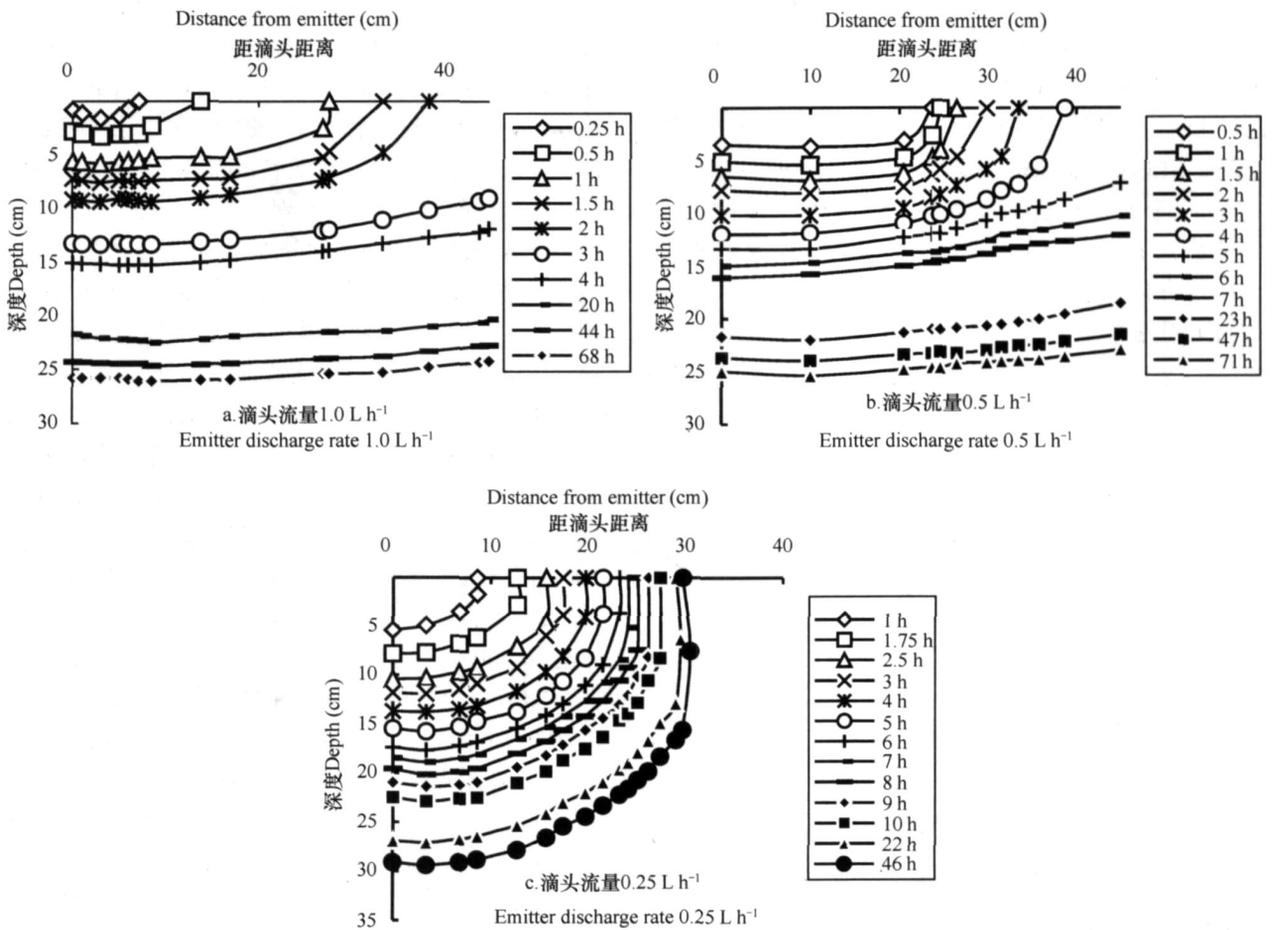


图2 三种滴头流量处理的湿润锋运移图

Fig. 2 Movement of wetted front in treatments different in emitter discharge rate

表1 土体各处的水吸力随时间的变化特征

Table 1 Changes in water suction of the solum with time of water infiltration (kPa)

滴头流量 Emitter discharge rate (L h ⁻¹)	时间 Time (h)	张力计编号 Number of tensiometer					
		1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
1.0	4	0	0	0	90	91	90
	20	5	6	6	7	26	83
	29	6	7	7	19	20	24
	44	8	10	9	18	20	23
	53	9	10	9	18	20	23
	68	10	11	10	18	20	23
	92	16	16	16	23	21	24
0.5	7	0	0	0			
	23	7	7	7			
	32	9	9	8	25		
	47	10	11	10	22	23	24
	71	13	14	14	25	24	30
	95	15	16	15	26	24	30
	119	18	18	17	27	25	30
0.25	22	8	87		17		
	46	12	85		21		
	108	24	84		32		

滴灌结束时,湿润体内土壤处于过饱和状态,张力计读数为零,随后饱和土体水分向非饱和土体运动,处于脱水过程,水吸力增大,张力计读数增大;非饱和土体处于吸水过程,含水量增加,张力计读数减小。对于 1.0 L h^{-1} 和 0.5 L h^{-1} 滴头流量处理由于土表普遍积水,所以同一层距滴头不同距离的张力计读数基本相同,随水分再分布的进行,第二层的张力计读数经过一个先降低后增加的过程,从而反映了水分的运动过程。 0.25 L h^{-1} 滴头流量由于湿润范围有限,编号 1-2 的张力计读数虽然略有降低,但仍超过 80 kPa ,指示此处土壤含水量仍然非常低。在当前的大田自动灌溉工程中,根据埋设的水势传感器数据判断湿润范围和土体含水量,进而确定需灌水量和灌溉时间,在现行的控制灌溉中得到广泛的应用。

2.3 不同滴头流量处理土壤盐分运移特征

不同滴头流量对土壤盐分的淋洗也是一个值得关心的问题,尤其对于含盐量较高的干旱半干旱地区。

从图 3 可见, 1.0 L h^{-1} 滴头流量处理下,滴灌结束时,第一层(距土表 5 cm)的平均 EC 值为 15.11 dS m^{-1} ,受随后的水分再分布影响,第一层的盐分浓度迅速减小,20 h 后平均为 7.18 dS m^{-1} ,随后进入缓慢下降阶

段。随第一层盐分的向下运移,第二层盐分传感器处含盐量迅速增加,随后又进一步向深层运移,44 h 时第二层处的 EC 值平均为 18.48 dS m^{-1} ,随后也进入缓慢下降阶段。在同一层中,随距滴头距离的增加,盐分浓度表现出增加的趋势,显示在水平方向,盐分随水分的运移向远离滴头的方向运移。 0.5 L h^{-1} 滴头流量处理下,滴灌结束时,第一层的 EC 值平均为 17.91 dS m^{-1} ,32 h 时第一层的盐分浓度减小为 7.80 dS m^{-1} 。当水分运动至第二层时,第二层的盐分浓度迅速增大,并因水分继续向深层运动而降低,3 d 后变化趋缓。小滴头流量(0.25 L h^{-1})下,盐分表现了同样的运移规律。随水分的再分布,1-1 和 2-1 处的盐分浓度降低。当水分运动至 1-2 处时,1-2 处经历了一个盐分浓度增加随后降低的过程。从上述分析可见,滴灌结束后,水盐都经历了一个重要的再分布过程,进一步促进了盐分向远离滴头和向深层运移,再分布 3 d 后盐分运移趋缓。同时,不同的滴头流量对盐分的淋洗效果是不同的, 0.5 L h^{-1} 滴头流量处理的第一层和第二层处含盐量明显小于 1.0 L h^{-1} 滴头流量相应深度的含盐量,显示低滴头流量有利于盐分向深层运移,淋洗盐分采用低滴头流量较好。

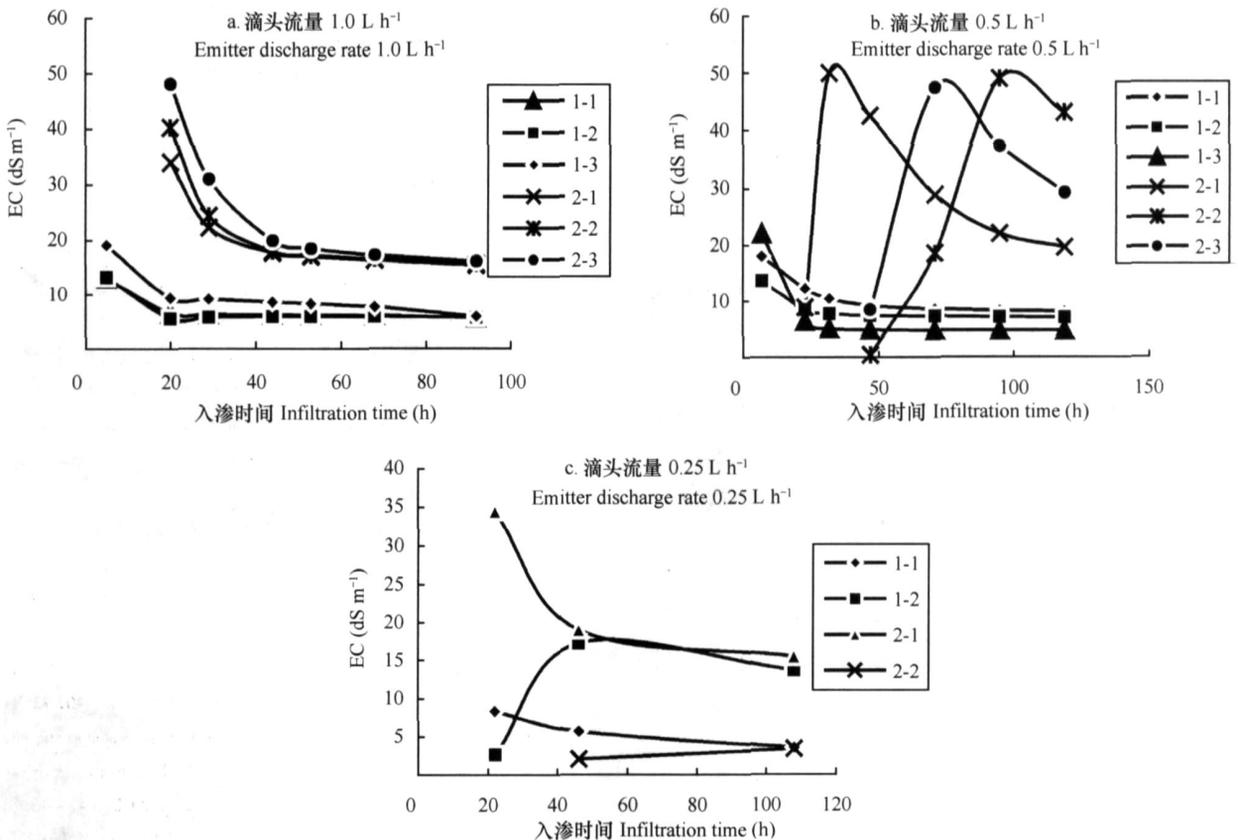


图 3 三种滴头流量处理对盐分的淋洗

Fig. 3 Salt leaching in treatments different in emitter discharge rate

2.4 洗盐水量的确定

在滴头下湿润锋未达土箱边缘(即未达零通量面)时,湿润锋形状与自由入渗相似,依滴头流量而定为椭圆形或圆形。当湿润锋运移至交汇界面(abcd面)时,交汇界面处的湿润锋向下运移速率迅速增大,超过滴头下湿润锋的向下运移速率,达到一定入渗时间后,交汇界面处的湿润深度与滴头下的湿润深度基本相等接近一条水平线^[10,11]。

假设入渗一定时间后,交汇界面处的湿润锋形状为圆形,且入渗深度与滴头下的湿润深度相等。以一个滴头为研究对象,此湿润区为一上、下底面均为1/4圆形,高为两滴头间距的柱形。假设根系深度为 r ,两滴头间距为 d ,湿润锋深度与根系深度相等,该柱形体积为:

$$v = \frac{1}{4} r^2 d \quad (1)$$

为保证作物的生长需要和洗盐需要,按15%的淋洗水量^[12]用于压盐,则每滴头灌溉水量为:

$$w = (1 + 0.15) v (m - \theta) \quad (2)$$

式中, w 为每滴头洗盐水量; v 为湿润体体积; m 为田间持水量; θ 为初始含水量。

另外,由于土壤水盐运移的复杂性,可通过在作物根区埋设盐分传感器对根区盐分状况进行实时监测,以便根据实时的盐分含量对灌溉淋洗水量进行调整。

3 结 论

1)在横向水流方向未受限制的情况下,纵向零通量面处的湿润锋形状为椭圆形或圆形,依滴头流量而定。因本实验土体仅相当于田间实际土体的1/2,所以建议大田滴头流量可采用 $0.7 \sim 0.8 \text{ L h}^{-1}$ 。

2)滴灌结束后,水盐均经历了一个重要的再分布过程,再分布过程对盐分的淋洗具有重要的作用,促进了盐分向深层运移,再分布3d后土体盐分含量基本达稳定状态。

3)小滴头流量对盐分的淋洗效果显著高于大滴头流量,这可以通过毛细管理论得到很好的解释。采用滴灌方式在土壤含水量较低时对大田土体进行洗盐是一项节水且效果很好的洗盐方式,在实践中将有重要的意义。

4)为保证作物的生长需要和洗盐需要,确定的每滴头灌溉水量为:

$$w = (1 + 0.15) v (m - \theta)$$

参 考 文 献

- [1] 王少丽,高占义,郭庭天. 灌区土壤盐渍化发展模拟预测与对策研究. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 71~76. Wang S L., Gao Z Y., Guo T T. Application of MODFLOW model in the study of soil salinization development and controlling measures (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(1): 71~76
- [2] 罗廷彬,任崑,李彦,等. 咸水灌溉条件下干旱区盐渍土壤盐分变化研究. 土壤, 2006, 38(2): 166~170. Luo T B., Ren W., Li Y., et al. Changes in soil salinity of saline soil irrigated with saline water in arid area (In Chinese). Soils, 2006, 38(2): 166~170
- [3] Dasberg S, Or D. Drip Irrigation. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1999. 162
- [4] 孙海燕,李明思,王振华,等. 滴灌点源入渗湿润锋影响因子的研究. 灌溉排水学报, 2004, 23(3): 14~16. Sun H Y., Li M S., Wang Z H., et al. Influence factors on soil wetting front under point drip irrigation (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(3): 14~16
- [5] 吕殿青,王全九,王文焰等. 膜下滴灌水盐运移影响因素研究. 土壤学报, 2002, 39(6): 794~801. Lu D Q., Wang Q J., Wang W Y., et al. Factors affecting soil water movement and solute transport for film drip irrigation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 794~801
- [6] 张振华,蔡焕杰,杨润亚. 地表滴灌土壤湿润体特征值的经验解. 土壤学报, 2004, 41(6): 870~875. Zhang Z H., Cai H J., Yang R Y. An empirical solution of characteristic values of wetted solum under surface drip irrigation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(6): 870~875
- [7] 李毅,王文焰,王全九等. 非充分供水条件下滴灌入渗的水盐运移特征研究. 水土保持学报, 2003, 17(1): 1~4. Li Y., Wang W Y., Wang Q J., et al. Experimental study on water and salt transport characteristics under infiltration of non-sufficient trickle irrigation (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1): 1~4
- [8] Zhou J B., Xi J G., Chen Z J., et al. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation. Pedosphere, 2006, 16(2): 245~252
- [9] 胡晓棠,李明思. 膜下滴灌对棉花根际土壤环境的影响研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 121~123. Hu X T., Li M S. Effect of trickle irrigation under sub-film on the soil conditions of rhizosphere in cotton (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3): 121~123
- [10] 刘世君. 膜孔多向交汇入渗湿润体特性试验研究. 地下水, 2004, 26(1): 65~68. Liu S J. Test and study on characteristics of wetted body of bilateral interference infiltration of film hole (In Chinese). Ground Water, 2004, 26(1): 65~68
- [11] 李毅,王文焰,王全九. 论膜下滴灌技术在干旱-半干旱地区节水抑盐灌溉中的应用. 灌溉排水, 2001, 20(2): 42~46. Li Y., Wang W Y., Wang Q J. A breakthrough thought for water saving and salinity control in arid and semi-arid area—Under-film trickle irrigation (In Chinese). Irrigation and Drainage, 2001, 20(2): 42~46
- [12] FAO. Drainage Design Factors. Irrigation and Drainage Paper No. 38. Rome, 1980. 52

MOVEMENT AND REDISTRIBUTION OF WATER AND SALT IN RELATION TO EMITTER DISCHARGE RATE

Liu Chunqing Yang Jinsong[†] Chen Xiaobing Chen Deming

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract A study on movement and redistribution of water and salt in soil in relation to emitter discharge rate was conducted through indoor simulation tests in soil columns. Results show that depending on emitter discharge rate, the wetted front at the meeting interface of waters from two emitters appeared to be either elliptical or circular. High emitter discharge rates accelerated horizontal movement of the water, resulting in greater horizontal dispersion rate than vertical infiltration rate. With decreased emitter discharge rate, the distance of horizontal infiltration approached to that of vertical infiltration. Wetted soil volume was related to total quantity of the irrigation water rather than emitter discharge rate. Based on the rules of wetted front movement, a proper emitter discharge rate was suggested for field practice. At the end of drip irrigation, water and salt had experienced important redistribution processes. The movement of water and salt to deeper soil layers promoted desalination of the upper soil layer. The effect was markedly better with low emitter discharge rates than high emitter discharge rates. The movement of salt was the most active on the first three days of redistribution. A proper water volume per emitter that satisfies both the demand of a crop for growth and the need of the soil for salt leaching was worked out through the experiment, which is sure of certain practical significance.

Key words Drip irrigation; Soil water and salt movement; Redistribution