

·水土资源与环境·

文章编号: 1672-3317(2023)12-0140-09

错位滴头的3条毛管高频灌溉对 棉田盐分的影响及节水效果

董文明^{1,2}, 孟丽君^{1,2}, 韩思敏^{1,2}, 阿亚库孜·塔力达吾汗^{1,2}, 穆哈西^{1,2*}

(1.新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052;

2.新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要:【目的】针对新疆降水稀少、蒸发量大, 干旱缺水, 土壤盐碱化蔓延, 改良盐碱地用水量大等问题, 通过室内外试验进行对比研究, 提出节水改良盐碱地的新技术。【方法】以滴灌条件下盐分积累在湿润体边缘的规律为依据, 将现有的滴灌改为错位滴头的3条毛管, 确定3条毛管的间距、滴水规则、灌水定额及洗盐定额等参数, 研究湿润体盐分的运移过程。【结果】在土壤性质及水质不变的条件下, 对错位滴头的3条毛管采用滞后滴水的方法, 灌水6次之后湿润体内取土检测盐分, 探究棉花根区盐分的变化过程。湿润体水平距为40 cm处的垂线盐分从105.21 g/kg降到49.015 g/kg, 该方法可扩大根区湿润体的脱盐范围, 与滴灌相比可永久性节约每年3次的压盐水量。【结论】棉花根区的脱盐范围随灌水次数的增多而逐步扩大, 脱盐范围的大小与土壤体积质量、灌水方法、次数、滴水规律、土壤盐分、水源的盐分及灌水周期有关。

关键词: 错位滴头的3条毛管; 滞后滴水; 棉花根区; 洗盐定额; 降低盐分节约水量

中图分类号: S156.4; X53

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023035

OSID:



董文明, 孟丽君, 韩思敏, 等. 错位滴头的3条毛管高频灌溉对棉田盐分的影响及节水效果[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 140-148.

DONG Wenming, MENG Lijun, HAN Simin, et al. An Innovated Drip Irrigation Technique for Improving Water Use Efficiency and Increasing Salt Leaching from Cotton Fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 140-148.

0 引言

【研究意义】改良盐碱地的周期长, 每年压盐用水量高达8 000~10 000 m³/hm² (图1)^[1-3]。新疆属于西北干旱地区, 近年来, 因为滴灌技术的普及, 土壤盐分积累在湿润体边缘, 导致土壤盐碱化 (图2)。为了控制滴灌所造成的盐碱化问题, 每年分别在春季播种前、秋季、冬季对农田共进行3次压盐, 秋季压盐灌水定额为3 000~4 500 m³/hm²甚至更多^[4-6]。因此, 对干旱地区而言, 采用节水措施改良盐碱地意义重大。

【研究进展】世界各国从20世纪60年代开始研究盐碱地改良, 国内外改良盐碱地的措施有: ①农业改良措施 (耕作施肥、覆盖地膜、水盐耦合法); ②水利改良措施 (明沟排盐、暗管排盐、用微咸水或淡水压盐、磁化水浇灌、混合灌、高频灌); ③生物改良措施 (种植碱蓬、羊草、田菁、苜蓿、秸秆覆盖、栽树

或栽种水稻); ④化学改良措施 (石膏轮灌、石膏施用、电磁改良、土壤改良剂); ⑤土壤酸碱度 (增加土壤有机质、石灰质肥料) 等5种措施^[6-7]。虽然盐碱地改良研究很多, 但实际应用中仍主要采用大水压盐 (或每年压盐3次) 的方法^[7-8]。土壤盐碱化的蔓延严重制约新疆农业生产和经济的可持续发展^[9-10]。【切入点】盐分随水运移, 滴灌条件下盐分积累在湿润体边缘, 综合考虑灌水周期、冲洗盐分的程度、土壤颗粒级配、水质等因素计算确定洗盐定额。将现有的滴灌毛管改为错位滴头的三条毛管, 对三条毛管采用滞后滴水的方法, 研究高频灌溉对棉田根区盐分影响及节水效果^[11-13]。【拟解决的关键问题】根据当地土壤性质、栽种模式来确定灌水定额, 同时以正常生长棉花根区的土壤盐分作为标准盐分 (S), 以将栽种棉花的土壤盐分作为冲洗盐分的目标 (S_0), S_0 与 S 的比值来计算确定冲洗定额 (洗盐定额)。采用滴头错位的3条毛管灌水的方法针对性滴水把湿润体内积累的盐分往外追压, 从而扩大根区湿润体的脱盐范围, 局部压盐, 可永久性节约每年3次的压盐水量, 为节水冲洗根区盐分提供理论和实践依据。

收稿日期: 2023-02-02

修回日期: 2023-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (3236130344); 大学生创新项目 (dxscx2023399)

作者简介: 董文明 (1977-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士研究生, 主要从事节水灌溉及荒漠化治理方面的研究。E-mail: Dwm163204@126.com
通信作者: 穆哈西 (1967-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事农业水利工程及荒漠化治理方面的研究。E-mail: m8777360@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议



图 1 大水压盐改良盐碱地

Fig.1 Improving saline-alkali land with high water pressure salt



图 2 滴灌条件下土壤的盐碱化

Fig.2 Salinization of soil under drip irrigation

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 试验条件。2015 年 4 月—2022 年 9 月在新疆农业大学实验室进行,以野外试验结果作为参考,最高气温 25 °C,最低气温 20 °C。试验土取自呼图壁二十里店棉花基地,试验材料有环刀、土钻、尺子、

烘干箱、铝盒、电子秤、支管及毛管。对试验土进行晒干、粉碎,用孔径为 5 mm 的筛子过筛后,分层夯实倒入试验土箱里(土壤含水率及体积质量调节成原土壤一致),试验土箱深度为 1.0 m,宽度及长度均为 1.5 m。土壤含水率采用烘干法,土壤体积质量采用环刀法,土样盐分(8 大离子)采用溶液法。

2) 标准土盐分(s)。以正常生长棉花根区土壤的盐分作为标准土盐分,土壤初始平均盐分(离子总量) 7.756 g/kg,取土深度为 50 cm, pH=7.15,初始含水率 6%(体积含水率),土壤体积质量为 1.25 g/cm³,水样盐分(离子总量) 0.567 g/kg, pH=6.05。正常生长棉花根区土壤的初始盐分检测值如表 1 所示。

3) 目标土盐分(S_0)。以将栽种棉花的土壤盐分作为目标土盐分,将栽种棉花的土壤初始平均盐分(离子总量) 105.21 g/kg,取土深度为 50 cm, pH=8.72,初始含水率 6%(体积含水率),土壤体积质量为 1.25 g/cm³(土壤体积质量),如表 2 所示。

4) 以表 2 中的土壤作为洗盐研究目标,在滴头流量为 3 L/h、高频灌溉的条件下,采用错位滴头的 3 条毛管滞后滴水的方法,灌水 6 次后结束试验,在湿润体的水平距 40 cm 处垂线每 10 cm 取土检测盐分(8 大离子),探究棉花根区盐分的变化过程,解释了冲洗定额的重要性及节水效果。

表 1 正常生长棉花根区土的垂线盐分

Table 1 Vertical salinity of soil in normal growing cotton root zone

土层深度/cm	g/kg									均值
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	离子总量	
0	0	0.128	0.054	0.249	0.068	0.046	0.001	0.019	0.567	0.071
0~10	0	0.185	1.566	10.260	2.397	0.658	0.028	1.750	16.843	2.105
10~20	0	0.178	0.261	4.603	1.318	0.244	0.024	0.370	6.997	0.875
20~30	0	0.185	0.313	3.883	1.179	0.183	0.024	0.293	6.059	0.757
30~40	0	0.152	0.278	3.308	0.919	0.280	0.024	0.208	5.170	0.646
40~50	0	0.174	0.313	2.253	0.440	0.268	0.029	0.233	3.709	0.464
平均含盐量	0	0.175	0.546	4.861	1.251	0.327	0.026	0.571	7.756	0.969

表 2 将栽种棉花的目标土垂线盐分

Table 2 Vertical salinity of target soil where cotton will be planted

土层深度/cm	g/kg									均值
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	离子总量	
0~10	0	0.550	8.180	47.860	2.120	1.580	0.012	41.120	101.422	12.678
10~20	0	0.630	8.370	48.920	1.450	1.280	0.024	41.360	102.034	12.754
20~30	0	0.610	8.590	50.660	2.320	1.560	0.036	41.650	105.426	13.178
30~40	0	0.730	9.080	51.810	2.510	1.660	0.125	41.820	107.735	13.467
40~50	0	0.780	9.280	52.460	2.620	1.840	0.258	42.210	109.448	13.681
平均含盐量	0	0.660	8.700	50.340	2.200	1.580	0.090	41.630	105.21	13.152

1.2 灌水参数的确定方法

1.2.1 试验设备参数的确定方法

首先采用单管滴水,在湿润体内取土检测盐分,根据湿润体盐分的运移规律确定滴头间距、滴头流量、滴水时间、毛管间距、滴头的位置及滴水规则。

1) 滴头间距、滴头流量及滴水时间的确定。在滴头间距为 20 cm 的条件下,分别做以下 4 种试验:试验 1 是滴头流量为 2 L/h,滴灌滴水为 2 h 之后结束

试验;试验 2 是滴头流量为 2 L/h,滴灌滴水为 3 h 之后结束试验;试验 3 是滴头流量为 3 L/h,滴灌滴水 2 h 之后结束试验;试验 4 是滴头流量为 3 L/h,滴灌滴水 3 h 之后结束试验。以上的每种试验结束之后采用湿润体内取土检测盐分和晒干剖面的方法(如图 3 所示),确定湿润体的脱盐边界线、过渡区边界线及积盐边界线。

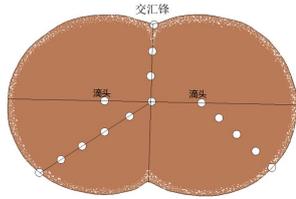


图3 单管2个滴头滴水的湿润体

Fig.3 Wet body with single pipe and two drippers dripping water

①选定最优的试验方法。以4种试验湿润体水盐的检测结果为依据(表3)。根据滴头流量为3 L/h时,由于滴头流较大,因此,滴灌滴水2 h之后,在相邻2个滴头湿润体的交汇处不会出现积累盐分的现象(如图3所示);②根据4种试验湿润体的水平和垂线每5 cm处取土检测盐分(8大离子),判断盐分

表3 4种试验湿润体水盐的检测结果

Table 3 Test results of water and salt in four kinds of wet body

试验编号	滴头距/cm	滴头流量/(L·h ⁻¹)	滴水时间/h	下渗深度/cm	扩散半径/cm	过渡区边界线/cm	脱盐边界线/cm	积盐边界线/cm	脱盐效果
1	20	2	2	32.8	21.5	15.2	15.2	21.5	一般
2	20	2	3	39.3	23.9	20.6	20.6	23.9	一般
3	20	3	2	37.9	24.2	18.7	18.7	24.2	最好*
4	20	3	3	45.5	26.6	21.4	21.4	26.6	好

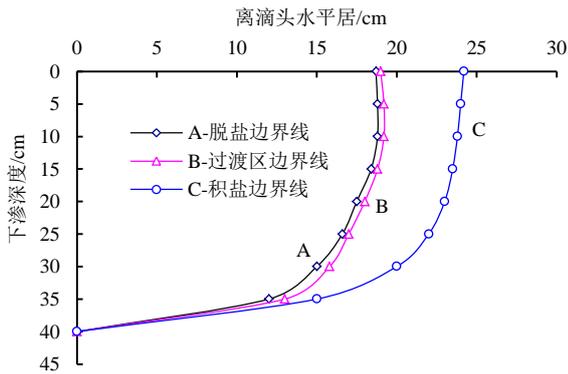


图4 湿润体剖面图

Fig.4 Wet body section

2) 毛管间距及滴头位置的确定。根据表3中的试验3的数据为依据确定毛管间距。在土壤性质、滴头流量及滴水时间不变的条件下,待定的参数有:毛管间距、滴头的位置和滴水时间间隔等4个参数,为了降低自变量参数的个数:①首先根据表3的数据绘制单管的湿润体图(如图5所示),以根据图5中的毛管湿润体的扩散半径为依据,确定3条毛管的间距。图5可看出,在错位滴头的3条毛管滞后滴水的条件下,中心1号毛管左右的2号和3号毛管落在中心1号毛管脱盐范围之内,因此,2号和3号毛管继续淋洗中心1号毛管湿润体边缘积累的盐分,所以中心1号毛管左右的2号和3号毛管间距定为15 cm(如图6所示);②滴头位置的确定:图5和图6进行分析可知:相邻的2个滴头同时滴水时,2个滴头湿润体间会产生交汇处,为了淋洗交汇处的盐分,中心1号

的变化过程,选定试验3为较优;③土壤水盐的各向运移与土壤的物理及化学性质(土壤的体积质量、比重、通气性、透水性、养分状况、黏结性、可塑性、耕性及磁性等)有关。根据表3的数据进行分析,滴头流量为3 L/h、滴水时间为2 h的试验3是最优的(如表3所示)。因此,绘制试验3的水盐运移过程线(如图4所示),曲线C表示积盐边界线,水平扩散半径为24.2 cm,下渗深度为40 cm;曲线B表示过渡区边界线,水平扩散半径为18.7 cm,下渗深度为37.8 cm;水平距C和水平距B的差值为9.2 cm,这表明18.7~24.2 cm的区域为积盐区;曲线A表示脱盐边界线,水平扩散半径为18.7 cm,下渗深度为37.9 cm(如图4所示)。

毛管与左右2号和3号毛管的滴头错位布置时,左右的2号和3号毛管易淋洗中心1号毛管湿润体交汇处积累的盐分,此方法即错位滴头的3条毛管方法(如图6所示)。毛管间距和滴头位置确定了之后,扩大湿润体的脱盐范围和淋洗盐分的效果取决于滴水时间间隔,因此,再确定滴水时间间隔(即滴水规则)。

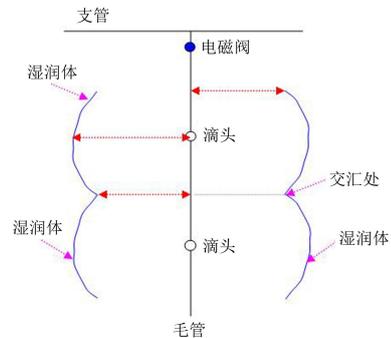


图5 单管湿润体示意图

Fig.5 Schematic diagram of single tube wetting body

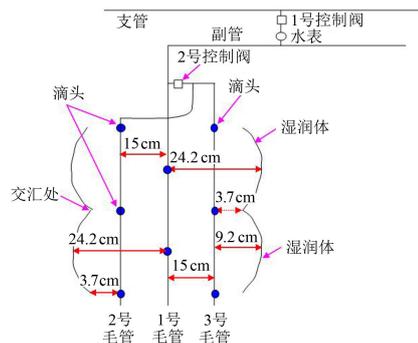


图6 3条毛管的布置示意图

Fig.6 Layout diagram of three capillary tubes

3) 3条毛管滴水时间间隔(滴水规则)的确定。滴水间隔是指中心1号毛管与左右的2号和3号毛管开始滴水的时间间隔。以表3中试验3的数据为依据,中心的1号毛管提前滴水2h之后2号和3号毛管开始滴水(即滞后滴水方法),这时1号2号3号毛管同时滴水。如1号毛管从08:00开始滴水12:00停水,2号和3号毛管从10:00开始滴水12:00停水,即滞后滴水同时停水的规则(滴水时间可以调节),滴水规则如图7所示。



图7 3条毛管滴头的滴水规则

Fig.7 Dropping rules of three capillary droppers

4) 大田栽种棉花模式。根据土壤性质选定栽种模式(如图8所示),为节约成本设置2个控制阀(电磁阀),该系统由2个控制阀(电磁阀)来自动完成作业。该系统由控制阀和水表来调节灌水量,水通过1号控制阀(电磁阀)进入水表,然后直接流入中心的1号毛管,中心的1号毛管滴水2h之后,2号控制阀自动开启,这时1号2号3号同时滴水2h后结束试验(如图8所示)。

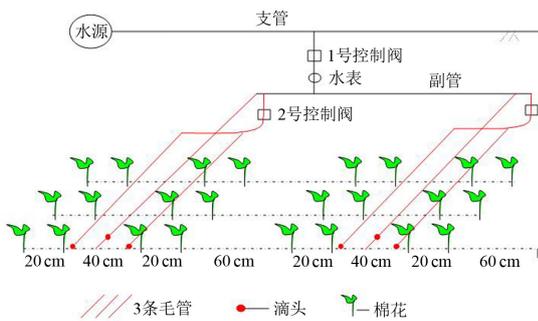


图8 大田栽种棉花模式示意图

Fig.8 Schematic diagram of cotton planting mode in field

1.2.2 灌水参数的确定方法

作物对土壤水分、养分以及盐分的承受能力是有限的,为达到作物正常生长,并保持稳产的目标,对作物进行的灌水量可分为灌水定额及冲洗盐分定额,并必须满足:冲洗盐分定额 $M \geq$ 灌水定额 m_{\max} 的要求。

1) 灌水定额的确定。①确定灌水定额的依据:所有作物的灌水定额是必须综合考虑灌区的地理位置(山区、平原区、降水量、南疆、北疆等)、作物

类型及计划湿润层深度(作物种类、各生育期耗水量等)、土壤类型、田间持水率、土壤含水率上限和下限等因素^[14];灌水定额是指一次灌水单位灌溉面积上的灌水量,也就是无雨条件下,灌水定额是作物耗水量旺盛时最大1次灌水量满足作物蒸腾量(作物、气象、土壤与农业措施等),作物正常生长所需的水量^[15]。灌水定额用最大净灌水深度表示时,最大净灌水深度是指当土壤缺水量达到允许缺水量时为补充该缺水量所需要的水深,可按下式计算^[16]:

$$m_{\max} = 0.1 \times \gamma \times H \times p \times (\theta_{\max} - \theta_{\min}), \quad (1)$$

$$m_{\min} < m_{\text{净}} \leq m_{\max},$$

$$\theta_{\text{凋萎}} < \theta_{\min} \leq \theta_{\max},$$

式中: m_{\max} 灌水定额或最大灌水深度 (mm); γ 为土壤体积质量 (g/cm^3); H 为计划湿润层深度 (m); p 为土壤湿润比 (%); θ_{\max} 为土壤田间持水率,即允许土壤含水率上限(占干土质量百分数); θ_{\min} 为计划湿润层内允许土壤含水率下限(占干土质量百分数); 二者差值 ($\theta_{\max} - \theta_{\min}$) 为土壤有效持水率(占干土质量百分数); $m_{\text{净}}$ 为净灌水深度 (mm); $\theta_{\text{凋萎}}$ 为土壤的凋萎系数。

土壤体积质量为 $\gamma = 1.25 \text{ g}/\text{cm}^3$, 计划湿润深度 $H = 0.6 \text{ m}$, 通过观测得 $\theta_{\max} = 26\%$, $\theta_{\min} = 6\%$, 计算土壤湿润比 $p = 31\%$, 数据代入式(1)计算得: $m_{\max} = 47 \text{ mm}$, 换算后净灌水定额为 $480 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

②设计灌水周期(T)的确定

$$T = m_{\max} / I_a, \quad (2)$$

式中: T 为设计灌水周期 (d); m_{\max} 为最大灌水定额 (m^3/hm^2); I_a 为作物蒸腾散量 (mm/d), 取 $I_a = 6.4 \text{ mm}/\text{d}$ ^[16]; 按式(2)计算灌水周期为 $T = 5 \text{ d}$ 。

③1次灌水延续时间的确定。1次灌水延续时间为通过滴头将灌水量灌到毛灌水深度所需要的灌水时间,作物的灌水延续时间不仅与作物类型及栽种模式有关,而且栽种作物的地理位置也有密切的关系,如干旱区灌水次数多,北方区雨水量多,灌水次数少。

2) 洗盐定额的确定

①洗盐定额。洗盐定额(或盐分淋洗定额)不仅与土壤的化学性质、物理性质及生物性质有关系,而且水源的盐分及洗盐定额的多少也有密切的关系,所以滴水量小于等于土壤下渗能力的条件下,必须满足:洗盐定额 $M \geq$ 灌水定额 m_{\max} 的要求。

②洗盐定额的确定。土壤中的盐分溶于水形成含盐溶液,随淋洗水而下渗,淋洗盐分定额是指计划淋洗土层的含盐量淋洗到作物所能允许的含盐程度时,单位面积上所需要的淋洗水量。淋洗盐分定额的大小取决于土壤的盐碱化程度、盐分组成及其在土壤中的分布状况和淋洗脱盐标准、土层颗粒级配、

计划冲洗土层厚度,还取决于土壤水分的物理性质,地下水的出流条件等,淋洗盐分定额按下式计算获得^[17-19]:

$$M=m_1+m_2+e-p, \quad (3)$$

式中: M 为洗盐定额 (m^3/hm^2); m_1 为计划淋洗层内冲洗以前的含水率 (W) 与最大持水率 (W_0) 的差 (m^3/hm^2); m_2 淋洗走计划淋洗层中的过多盐分所需要的水量 (或淋洗定额中起输送作用的部分水量), 单位 (m^3/hm^2); e 为淋洗时期内的蒸发损失量 (m^3/hm^2), 试验在室内实验室进行, 所以该项可忽略不计; p 为淋洗时期可利用的降水量 (m^3/hm^2), 该项也可忽略不计, 所以式 (3) 可简化写成式 (4) 的形式:

$$M=m_1+m_2, \quad (4)$$

$$m_1=W-W_0, \quad (5)$$

m_2 的计算式很多, 以土壤盐分为基础计算时, 在 s_0 为淋洗前土壤中的盐分, 本试验用盐渍土的盐分 (g/kg); s 为淋洗后所允许的土盐分, 本试验用标准土盐分 (g/kg); W 为计划淋洗层的最大持水率, 则淋洗后的含盐浓度为 s/W , 使含盐量为 s_0 的土壤达到含盐浓度为 s/W 时, 所需要的水量 $s_0 (s/W)$, 若计划层原有含水率为 W_0 , 则淋洗定额 M 应为:

$$M=W (s_0/s) - W_0, \quad (6)$$

将式 (4)、式 (5) 代入式 (6) 后, 得 m_2 的计算公式为:

$$m_2=W ((s_0/s) - 1), \quad (7)$$

经式 (5) $m_1=(26-6)=20 (\text{m}^3/\text{hm}^2)$, $W=390 (\text{m}^3/\text{hm}^2)$, 查表 1 和表 2 得: $s_0=105.21 \text{ g}/\text{kg}$, $s=7.756 \text{ g}/\text{kg}$, 按式 (7) 计算 $m_2=4 900.65.71 (\text{m}^3/\text{hm}^2)$, 代入式 (4) 得: $M=5 200.65 (\text{m}^3/\text{hm}^2)$; 当洗盐定额 $M \geq$ 灌水定额 m_{\max} 时, 地面不会产生积水现象, 因此, 按照水定额 $m_{\max}=480 (\text{m}^3/\text{hm}^2)$ 进行灌溉, 灌水次数为 $M:m_{\max}=11$ 次, 这表明: 按计算灌水定额灌水 11 次才能达到淋洗盐分的要求, 土壤盐分大, 淋洗定额大, 淋洗次数也多。

1.3 获取试验数据的方法

1) 数据测定方法。在膜下滴灌条件下 5 d 灌 1 次水和 2 天灌 1 次水进行比较可知: 2 d 灌 1 次水的湿润体略大于 5 d 灌 1 次水的湿润体, 对棉花根区盐分影响的差异不大, 因此, 只讨论灌水 6 次对棉花根区盐分的影响。根据已确定的滴头流量为 3 L/h、滴头间距为 20 cm、毛管间距为 15 cm 等参数, 采用错位滴头的 3 条毛管滞后滴水的方法, 灌水 6 次后结束试验。与此同时, 在湿润体内水平和垂线每 10 cm 处取土检测盐分, 绘制土壤盐分的变化过程 (如图 9 所示)。对图 9 进行分析可知: 检测盐分的点数和数据

多, 为清楚地解释根系发育范围内盐分 (8 大离子) 的变化情况, 选择检测盐分点的位置是非常重要的。因此, 采用以下方法来选择检测盐分点的位置。

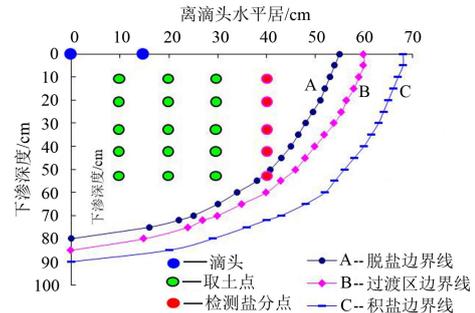


图 9 盐分变化过程及检测盐分点

Fig. 9 Salt change process and salt detection point

2) 检测盐分点位置的选择。在滴头流量为 3 L/h 的条件下, 采用错位滴头的 3 条毛管滞后滴水的方法, 灌水 6 次后结束试验, 检测湿润体内盐分的结果表明: ①滴灌的湿润体随灌水次数的增多而变大, 湿润体内盐分也向湿润体边缘方向运移 (积累), 湿润体脱盐边界线内的盐分逐渐降低, 盐分积累在湿润体边缘; ②本试验研究的对象是棉花为主, 由于研究植物类型的不同, 植物根系的发育范围也不相同, 棉花垂直根系主要分布在 0~50 cm 的深度, 85% 的毛根系在 0~30 cm 的范围之内, 水平根系主要分布在 25~30 cm 的范围之内^[20]。综合分析上述 2 种原因, 以棉花根系水平和垂线发育范围为依据, 在湿润体内离滴头水平距为 40 cm 处垂线不同深度取土检测盐分 (如图 9 所示)。通过湿润体水平和垂线每 10 cm 处取土检测盐分 (8 大离子) 绘制盐分变化过程及检测盐分点 (如图 9 所示)。在图 9 中的 A 曲线表示脱盐边界线, B 曲线表示过渡区边界线, C 曲线表示积盐 (湿润体) 边界线, 一般 A 曲线和 B 曲线之间的范围称为积盐区。在此基础上, 以土样初始盐分为依据, 与灌水 6 次后检测的盐分进行对比, 计算湿润体离滴头水平距为 40 cm 处垂线向下盐分的降低量, 并解释其错位滴头滞后滴水的 3 条毛管对湿润体内盐分的影响及节水效果。

2 结果与分析

2.1 错位滴头的 3 条毛管高频灌溉结果

当地棉花栽种模式为 20 cm×40 cm×20 cm×60 cm, 灌水延续时间为 8 h, 灌水定额 480 (m^3/hm^2) 的条件下, 对收集的 5 a 资料进行分析 (2015 年 3 月至 9 月—2019 年 3 月至 9 月), 本试验以气温最高的 2018 年 7 月为例, 该月份的灌水周期为 5 d, 灌溉频率为 5 d 灌 1 次水和 2 d 灌 1 次水的试验, 试验结果如表 4 所示。

表 4 每 5 天灌 1 次水和每 2 天灌 1 次水的结果

日期	0701	0704	0707	0710	0713	0716	0719	0722	0725	0728	0731	合计
5 d 灌 1 次水	480	-	480	-	480	-	480	-	480	-	480	2 880
2 d 灌 1 次水	261.8	261.8	261.8	261.8	261.8	261.8	261.8	261.8	261.8	261.8	261.8	2 880

在膜下滴灌条件下 5 d 灌 1 次水和 2 d 灌 1 次水对棉花根区盐分影响的差异不大^[21]。因此, 该文只讨论灌水周期为 5 d 时, 高频灌溉对棉田根区盐分的变化过程。灌水周期超过 5 d 之后不管是膜下滴灌还是露地(无覆膜)栽种的棉花, 高频灌溉对其根区盐分的影响大^[21]。

2.2 错位滴头的 3 条毛管灌水 6 次对目标土湿润体盐分的影响

错位滴头的 3 条毛管对湿润体垂线盐分的影响。滴头流量为 3 L/h, 灌水周期为 5 d 的条件下, 灌水 6 次之后, 检测湿润体内水平距为 40 cm 处的垂线盐分, 检测的盐分如表 5 所示。由表 5 可知, 湿润体内的盐

分随灌水次数的增多而降低, 湿润体内盐分逐渐向湿润体边缘积累。灌水 6 次后湿润体内水平距为 40 cm 处垂线盐分(8 大离子)的降低量也有差异, 降低盐分的平均值按大小序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{K}^+$, 总的趋势来看垂线 50 cm 以上的盐分呈下降的趋势, 脱盐效果很明显(表 5)。

计算湿润体内水平距为 40 cm 处垂线盐分的降低量。盐渍土的初始盐分(来自表 2)减去灌水 6 次后湿润体内水平距为 40 cm 处垂线盐分(表 5), 可获得灌水 6 次后湿润体内水平距为 40 cm 处垂线盐分的降低量(表 6)。

表 5 目标土灌水 6 次后湿润体内水平距为 40 cm 处的垂线盐分

土层深度/cm	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	离子总量	均值
0~10	0	0.250	3.718	20.755	0.964	0.718	0.005	15.691	42.101	5.263
10~20	0	0.286	3.805	23.236	0.659	0.582	0.011	16.800	45.379	5.672
20~30	0	0.277	3.905	24.027	1.055	0.709	0.016	17.932	47.921	5.990
30~40	0	0.332	4.127	25.550	1.141	0.755	0.057	18.009	49.971	6.246
40~50	0	0.425	5.062	27.615	1.429	1.004	0.141	24.024	59.700	7.463
平均值	0	0.314	4.123	24.237	1.050	0.754	0.046	18.491	49.015	6.127

表 6 目标土灌水 6 次后湿润体盐分的降低量

土层深度/cm	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	离子总量	均值
0~10	0	0.300	4.462	27.105	1.156	0.862	0.007	25.429	59.321	7.415
10~20	0	0.344	4.565	25.684	0.791	0.698	0.013	24.560	56.655	7.082
20~30	0	0.333	4.685	26.633	1.265	0.851	0.020	23.718	57.505	7.188
30~40	0	0.398	4.953	26.260	1.369	0.905	0.068	23.811	57.764	7.221
40~50	0	0.355	4.218	24.845	1.191	0.836	0.117	18.186	49.748	6.218
平均值	0	0.346	4.577	26.105	1.154	0.830	0.045	23.141	56.198	7.025

对表 6 垂线为 30~40 cm 土层的盐分进行分析可知: 灌水 6 次后湿润体内 0~40 cm 的盐分呈减少的趋势。垂线向下运移的盐分积累在 40 cm 以下, 土壤盐分随水运移积累在湿润体边缘。盐分垂线向下的降低量不仅与灌水次数有关, 而且土壤体积质量、易溶盐的多少及灌水间隔也有关系。在错位滴头的 3 条毛管滞后滴水的条件下, 灌水 6 次后垂线向下 0~40 cm 之间的盐分呈降低趋势, 尤其是 0~30 cm 土层内的降低量最多。 SO_4^{2-} 在垂线向下 0~40 cm 范围内的降低量较大, 其余的盐分逐渐降低向湿润体边缘运移。这进一步说明, 湿润体内的盐分(8 大离子)随灌水次数的增多而向湿润体边缘运移, 逐步积累在湿润体边缘。

灌水前后垂线平均盐分的运移过程。采用标准盐

分、目标土初始盐分与目标土灌水 6 次后的盐分绘制湿润体盐分的分布图(图 10)。结果表明: 标准土盐分均值曲线 A(表 1 的最后 1 列), 目标土灌水前盐分均值 B 曲线(来自表 2 的最后 1 列), 灌水 6 次后盐分的均值 C 曲线(来自表 5 的最后 1 列), B 和 C 曲线的差值是表明目标土灌水 6 次后盐分的降低效果(图 10)。对图 10 进行分析可知: 在湿润体离滴头水平距为 40 cm 处垂线向下盐分的降低量也有差异, 湿润体垂线为 0~30 cm 土层内的盐分的降低量最多, 30 cm 以下盐分的降低量少, 土壤易溶盐量越多, 降低的盐分越多, 反之相反, 这进一步表明盐分积累在湿润体边缘的原理。

目标土壤灌水前后垂线盐分的变化过程。目标土

灌水前表 2 的值与灌水 6 次后表 5 的值绘制湿润体离滴头水平距为 40 cm 处垂线盐分的变化 (如图 11 和图 12 所示)。目标土灌水前的 SO_4^{2-} 离子、 Cl^- 离子、 Na^+ 离子都大, 灌水 6 次后积累在垂线 50 cm 以下, 盐分随水运移的效果很明显, 降低得也很明显 (如图 11 和图 12 所示)。

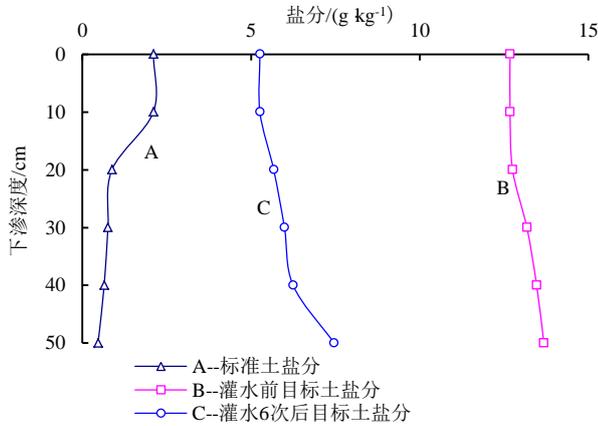


图 10 灌水前后垂线盐分的运移过程

Fig.10 Migration process of vertical salt before and after irrigation

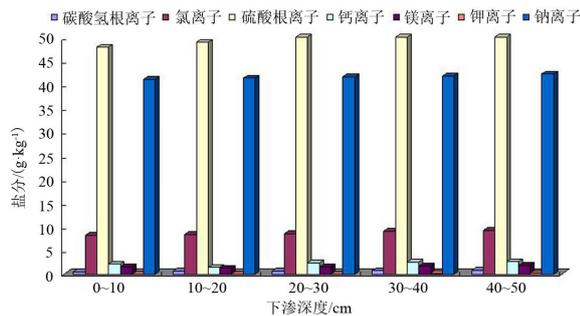


图 11 目标土初始盐分

Fig. 11 Initial salt content of target soil

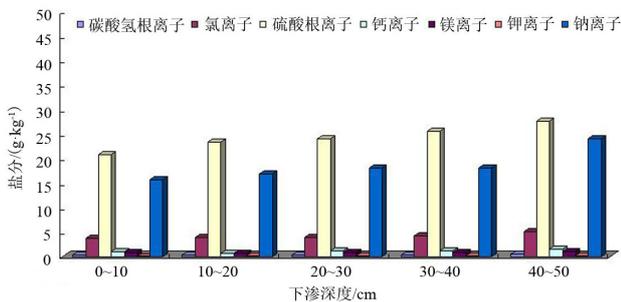


图 12 目标土灌水 6 次后盐分的变化过程

Fig.12 Salt change process of target soil after six times of irrigation

3 讨论

1) 作物根系的特征。由于研究植物类型的不同, 植物根系的发育范围也不相同, 作物根区的盐分随灌水次数的增多而运移积累在湿润体边缘^[22]。研究结果

显示: 采用错位滴头的 3 条毛管灌水 6 次时, 土壤湿润体内 40 cm 内盐分的淋洗率为 54.5%。按计算值 11 灌水次, 那再灌水 5 次时, 其余 45.5% 的盐分可以洗到 50 cm 以下, 土壤盐分随灌水次数的增多而降低, 该结论与前人^[23]研究一致, 土壤盐分随水运移及积累在湿润体边缘。

2) 错位滴头的 3 条毛管灌水对盐分的影响。以当地的盐碱土 (目标土) 为材料, 在土壤体积质量、水质及滴水量不变的条件下, 采用错位滴头的 3 条毛管灌水的方法, 灌水 6 次后湿润体离滴头水平距为 40 cm 处垂线每 10 cm 处取土检测的盐分 (8 大离子) 可知: 土壤初始盐分平均值 (离子总量均值) 从 105.21 g/kg 降到 49.015 g/kg, 这进一步说明作物根区盐分的降低过程, 该结论与前人^[24]研究一致, 湿润体内的盐分随灌水次数的增多而降低。

3) 节水效果。在目前采用的滴灌条件下, 不管种植果树还是密植作物每年大水压盐 3 次, 秋季 1 次的压盐用水定额为 3 000~4 500 m³/hm², 每年 3 次压盐水量为 9 000~1 3500 m³/hm²。采用 3 条毛管供水的条件下, 灌水定额 480 m³/hm², 假设按计划灌 11 次压盐, 年灌水定额为 5 280 m³/hm², 可永久性节约 3 720~8 220 m³/hm², 不用大水压盐。因此, 该方法与滴灌条件下每年 3 次压盐和大水压盐方法相比, 错位滴头的 3 条毛管灌水法的节水效果显著。前人研究结果是滴灌是一种节水压盐的形式, 该试验采用错位滴头的 3 条毛管灌水的方法, 针对性滴水把湿润体内积累的盐分往外追压, 从而扩大根区湿润体的脱盐范围, 此结果与前人^[25-26]研究结果一致。

4) 高频灌溉的影响。在膜下滴灌条件下 5 d 灌 1 次水和 2 d 灌 1 次水对棉花根区盐分影响的差异不大, 但是灌水周期超过 5 d 之后表土出现表土板结化→贫瘠化的现象^[27-28]。

4 结论

1) 错位滴头的 3 条毛管采用滞后滴水的条件下灌水 6 次之后, 土壤初始盐分平均值 (离子总量均值) 从 105.21 g/kg 降到 49.015 g/kg。湿润体的盐分随灌水次数的增多而降低, 盐分积累在湿润体边缘, 扩大根区湿润体的脱盐范围, 降低盐分对作物的影响。

2) 错位滴头的 3 条毛管针对性滴水把湿润体内积累的盐分往外追压, 从而扩大根区湿润体的脱盐范围, 局部压盐, 可永久性节约每年 3 次的压盐水量, 为节水冲洗根区盐分提供理论和实践依据。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 陈盛, 黄达, 王振昌, 等. 土壤盐分垂向非均匀分布下的番茄盐分生产函数研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 388-396.
CHEN Sheng, HUANG Da, WANG Zhenchang, et al. Salt production function in tomato under vertical uneven distribution of soil salt[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 388-396.
- [2] 郝远远, 徐旭, 任东阳, 等. 河套灌区土壤水盐和作物生长的 HYDRUS-EPIC 模型分布式模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 110-116, 315.
HAO Yuanyuan, XU Xu, REN Dongyang, et al. Distributed modeling of soil water-salt dynamics and crop yields based on HYDRUS-EPIC model in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 110-116, 315.
- [3] 桑以琳. 土壤学与农作学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
SANG Yilin. Soil science and farming science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [4] 穆哈西, 赛尔江·乌尔曼别克. 滴灌条件下积盐范围内混种耐盐草及盐分变化趋势的研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(5): 108-110.
MU Haxi, SAI ERJIANG Wuermanbieke. Drip irrigation conditions within the scope of mixed deposited salt resistant to salt grass and the changing trend of salt[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(5): 108-110.
- [5] 周和平, 王少丽, 吴旭春. 膜下滴灌微区环境对土壤水盐运移的影响[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 816-824.
ZHOU Heping, WANG Shaoli, WU Xuchun. Micro drip irrigation district environmental impact on soil water and salt transport[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 816-824.
- [6] 管孝艳, 王少丽, 吕焯, 等. 土壤水盐空间变异性及其尺度效应的多重分形分析[J]. 水利学报, 2013, 44(S1): 8-14.
GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, LYU Ye, et al. Analysis on spatial variability of soil water and salt and its scale effect based on multifractal[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(S1): 8-14.
- [7] 郭全恩. 土壤盐分离子迁移及其分异规律对环境因素的响应机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
GUO Quan'en. The response mechanism of soil salt ions transfer and diversity rule to environment factor[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.
- [8] 穆哈西, 吾买尔·吐尔逊, 赛力汗. 改良盐碱地的多环追压非等灌装置及其自动化装置: CN104823549A[P]. 2015-08-12.
- [9] 俞仁培, 杨道平. 土壤盐碱化及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 78-98.
YU Renpei, YANG Daoping. Soil salinization and its control[M]. Beijing: Science Press, 1982: 78-98.
- [10] 穆哈西, 董文明. 控制果树根系盐分的装置: CN210537327U[P]. 2020-05-19.
- [11] 董文明, 穆哈西, 吾买尔·吐尔逊, 等. 一种追压湿润锋边积累盐分的自动化三管装置: CN213523012U[P]. 2021-06-25.
- [12] 阿依波尔·达吾列提开来得, 董文明, 叶尔古丽·奴尔沙哈提, 等. 滞后连续滴水的自动化三管对北疆棉田湿润体盐分的影响[J]. 棉花科学, 2022, 44(3): 35-42.
A YIBOER · Da Wulietikailaide, DONG Wenming, E ERGULI · Nu Ershahati, et al. Effect of automatic three-pipe lagging continuous dripping on moisture body salt in cotton field in Northern Xinjiang[J]. Cotton Sciences, 2022, 44(3): 35-42.
- [13] 卞建民, 林年丰, 汤洁. 土地盐碱荒漠化预警理论及实证研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 207-209.
BIAN Jianmin, LIN Nianfeng, TANG Jie. Precaution theory and study on alkaline desertification of soil[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2003, 22(2): 207-209.
- [14] 郭元裕. 农田水利学[M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
GUO Yuanyu. Farmland water conservancy[M]. 3rd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1997.
- [15] 周和平, 徐小波, 兰玉军. 膜下滴灌条件下土壤水盐运移研究综述[J]. 节水灌溉, 2006(4): 8-10, 13.
ZHOU Heping, XU Xiaobo, LAN Yujun. Review of research on soil water and salt transportation under the condition of drip irrigation under film in Xinjiang area[J]. Water Saving Irrigation, 2006(4): 8-10, 13.
- [16] 张志新. 滴灌工程规划设计原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
ZHANG Zhixin. Principle and application of drip irrigation project planning and design[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [17] 石自堂. 农业水利工程专业实践教学指导书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
SHI Zitang. Practical teaching guide for agricultural water conservancy engineering specialty[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [18] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东. 基于土壤饱和入渗理论计算盐碱地冲洗定额[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 563-567.
HU Shunjun, TIAN Changyan, SONG Yudong. Calculation of salinity leaching quota based on saturated infiltration theory[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 563-567.
- [19] 魏新平, 舒仲英, 贾恢先. 用对流弥散方程确定脱盐系数[J]. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(4): 463-466.
WEI Xiping, SHU Zhongying, JIA Huixian. Determination of desalinization index by convective diffuse model[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2004, 39(4): 463-466.
- [20] 张琼, 李光永, 柴付军. 棉花膜下滴灌条件下灌水频率对土壤水盐分布和棉花生长的影响[J]. 水利学报, 2004, 35(9): 123-126.
ZHANG Qiong, LI Guangyong, CHAI Fujun. Effect of mulched drip irrigation frequency on soil salt regime and cotton growth[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(9): 123-126.
- [21] 李永山, 冯利平, 郭美丽, 等. 棉花根系的生长特性及其与栽培措施和产量关系的研究 I 棉花根系的生长和生理活性与地上部分的关系[J]. 棉花学报, 1992, 4(1): 49-56.
LI Yongshan, FENG Liping, GUO Meili, et al. Studies on the growth characteristics of root system and its relation with cultural practices and yield in cotton (*G. hirsutum* L.) I. relationships between the growth and physiological activity of the root system and the growth and development of the aboveground parts of cotton[J]. Acta Gossypii Sinica, 1992, 4(1): 49-56.
- [22] 单鱼洋. 干旱区膜下滴灌水盐运移规律模拟及预测研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.
SHAN Yuyang. Research on prediction and simulation of water and salt transport under drip irrigation with mulch in arid regional[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [23] 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
WANG Quanjiu, SHAO Ming'an, ZHENG Jiyong. Water movement and solute migration in soil[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [24] 杨玉辉, 周新国, 李东伟, 等. 暗管排水对南疆高水位膜下滴灌棉田盐分淋洗效果的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(11): 137-144.
YANG Yuhui, ZHOU Xinguo, LI Dongwei, et al. The efficacy of subsurface drain in desalinating cotton field with shallow groundwater and mulched drip-irrigation in Southern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(11): 137-144.
- [25] 王忠, 周和平, 张洪军. 新疆农业用水定额技术研究应用[M]. 中国农业科技出版社, 2013.
WANG Zhong, ZHOU Heping, ZHANG Hongjun. Research and application of agricultural water quota technology in Xinjiang[M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2013.

- [26] 杨红梅, 徐海量, 牛俊勇. 干旱区滴灌条件下防护林次生盐渍化土壤水盐运移规律研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 1 023-1 027.
YANG Hongmei, XU Hailiang, NIU Junyong. Soil water and salt transport in secondary salinized soil under shelterbelt using drip irrigation in arid zone[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(5): 1 023-1 027.
- [27] 陈文娟, 李明思, 李清林, 等. 覆膜滴灌条件下的土壤盐分表聚特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 93-100.
CHEN Wenjuan, LI Mingsi, LI Qinglin, et al. Salt accumulation and distribution under mulched drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 93-100.
- [28] 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 1-5.
XU Ying, CHEN Yaxin, SHI Haibin, et al. Scale effect of spatial variability of soil water-salt[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(2): 1-5.

An Innovated Drip Irrigation Technique for Improving Water Use Efficiency and Increasing Salt Leaching from Cotton Fields

DONG Wenming^{1,2}, MENG Lijun^{1,2}, HAN Simin^{1,2}, A Yakuzi TA Lidawuhan^{1,2}, MU Haxi^{1,2*}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: 【Objective】 Soil salinization is one of many factors faced by cotton production in Xinjiang. Improving irrigation is one way to mitigate their detrimental impact. In this paper, we present an innovative drip irrigation system to ameliorate the effect of soil salinization and conserve water resources.【Method】The proposed method was based on that under drip irrigation, salt accumulates in the periphery of the wetted zone around the drip emitters. We reconfigured the conventional drip irrigation system into a system consisting of three-capillary tubes with staggered emitters. Parameters, including spacing between the capillary tubes, drip layout patterns, irrigation amount, and salt leaching were determined experimentally to elucidate its efficacy on salt migration in the wetted zones. 【Result】 Keeping soil properties and water quality consistent, we implemented the staggered delivery of water through the system in a cotton field. After six rounds of irrigation, soil samples were collected from the wetted zone to assess salt content in it. The vertical salt content distribution at a location 40 cm from the wetted zone decreased from 105.21 g/kg to 49.015 g/kg. This means that the proposed system effectively increased the desalination of the root zone and resulted in a reduction in annual saltwater usage by three times per year, compared with conventional drip irrigation. 【Conclusion】 The expansion of the desalination zone in the root zone is contingent on factors such as soil bulk density, irrigation method, frequency, drip patterns, soil salinity, irrigation water salinity, and irrigation cycles. As irrigation rounds increase, the desalination range grows. The method hence offers a promising strategy for managing saline-alkali lands while in the meantime optimizing water use efficiency.

Key words: three capillary tubes of dislocation emitter; lagging dripping; cotton root zone; leaching quota; reduce salt and save water

责任编辑: 赵宇龙