

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.020

# 不同灌溉制度对棉田盐分分布与脱盐效果的影响\*

王峰 孙景生 刘祖贵 宁慧峰 强小嫚 申孝军

(中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002)

**摘要:** 以直径 20 cm 蒸发皿蒸发量为基础, 采用双因素组合随机区组设计, 研究了不同灌溉制度对膜下滴灌棉田土壤盐分分布与脱盐效果的影响。结果表明: 增大灌水频率与灌水定额, 有利于对棉花根区盐分在水平方向的淋洗, 5 d 和 8 d 灌水频率对水平方向含盐量有影响的土层深度分别为 0~20 cm 和 0~30 cm; 5 d 灌水频率的土壤盐分随深度的增加呈现先降后升趋势, 8 d 灌水频率 0~100 cm 深度内各土层含盐量相差不明显, 中等灌水定额 (T60) 0~60 cm 土层含盐量小于高水 (T80) 和低水 (T40) 处理; 与播前相比, 棉花收获时 0~20 cm 含盐量降低, 但 30~60 cm 土层含盐量增加, 0~60 cm 土层含盐量总体表现增加, 中等灌水定额 (T60) 处理含盐量变化幅度最小, 脱盐率为 0.44%。灌水处理对 0~100 cm 深度土壤总含盐量无明显影响。此外, 灌水量过高与过低均不利于提高棉花产量, 与其他处理相比, 高频 (5 d) 中定额灌溉 (T60) 处理不但可以获得合理的盐分分布与脱盐效果, 且籽棉产量最高, 为 9.18 t/hm<sup>2</sup>, 是实现抑盐、控水、高产、高效的适宜棉花灌溉制度。

**关键词:** 棉田 灌溉制度 膜下滴灌 盐分分布 产量

中图分类号: S275.6; S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)12-0120-08

## Effect of Different Irrigation Scheduling on Salt Distribution and Leaching in Cotton Field

Wang Feng Sun Jingsheng Liu Zugui Ning Huifeng Qiang Xiaoman Shen Xiaojun

(Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

**Abstract:** An experiment with two factors randomized block experimental design was conducted based on the evaporation of standard 20 cm pan to study the effect of different irrigation scheduling on salt distribution and salinity leaching in soil profile of cotton field with drip irrigation under plastic mulch. The results showed that to increase irrigation frequency and water amount was beneficial to soil salinity leaching in horizontal direction. The actual depths of soil salinity leaching for 5 d and 8 d frequency treatments were 0 to 20 cm and 0 to 30 cm respectively. As the soil depth increased, the soil salinity content for 5 d frequency treatment showed a first rising and then decreasing trend, while for the 8 d frequency treatment, it kept an approximately constant value in 0 to 100 cm soil profile. The soil salt content in 0 to 60 cm soil depth for medium water amount treatment (T60) was lower than that of high (T80) or low (T40) treatment. Compared with the soil salt content before sowing, the salt content in 0 to 20 cm soil layer at harvest time increased and decreased in 30 to 60 cm soil layer. The salt content within 0 to 60 cm soil layer showed an increasing trend as a whole. The salt content of medium water amount treatment (T60) showed a minimum variation, and the desalting rate was 0.44%. The irrigation scheduling had no significant effects on soil salt content in 0 to 100 cm soil layer. In addition, with the same irrigation frequency, applying high or low water amount was not beneficial to boll weight and yield improvement however. Combining high irrigation frequency (5 d) with medium water amount (T60)

收稿日期: 2013-06-04 修回日期: 2013-07-05

\* 现代农业棉花产业技术体系建设专项资金资助项目 (CARS-18-19)

作者简介: 王峰, 助理研究员, 主要从事农业灌溉理论与技术研究, E-mail: wfguy@126.com

通讯作者: 孙景生, 研究员, 主要从事节水农业与水资源优化配置研究, E-mail: jshsun623@yahoo.com.cn

treatment acquired the highest seed cotton yield by  $9.18 \text{ t/hm}^2$ , and it was regarded as the optimal irrigation scheduling for reasonable soil salt distribution, good salt leaching effect, higher yield and effective water application.

**Key words:** Cotton field Irrigation scheduling Drip irrigation under plastic mulch Salt distribution Yield

## 引言

土壤盐渍化是指可溶性盐分在土壤中积累并达到对作物生长产生有害影响的程度<sup>[1]</sup>。新疆是我国土壤盐渍化程度比较严重的地区,其灌区盐渍化耕地面积约为  $1.47 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占全疆耕地总面积的 32%<sup>[2]</sup>。膜下滴灌是新疆棉田普遍采用的节水灌溉技术,该技术不仅可以节约灌水量,而且能在作物根区形成脱盐体,有效抑制土壤盐渍化对作物的危害,但脱盐效果受多种因素影响。吕殿青等研究表明,滴头流量、土壤初始含水率与含盐量的增加均不利于脱盐,但增加灌水量可以扩大达标脱盐区的范围<sup>[3]</sup>。赵成义等研究发现,土壤湿润峰与盐分峰值随滴灌量的增加而下移,灌水量越大,脱盐效果越好<sup>[4]</sup>。张江辉等研究表明滴头流量与滴头下方的土壤含盐量呈负相关,灌水历时与土壤盐分淋洗效果及压盐深度呈正相关<sup>[5]</sup>。王卫华等认为缩小滴头间距对土壤盐分淋洗更有利<sup>[6]</sup>。杨鹏年等研究表明大流量单管铺设方式比双管更易于淋洗土壤剖面盐分<sup>[7]</sup>。上述研究对采用膜下滴灌开发利用盐碱地具有重要指导作用,但研究多采用普通滴灌的灌溉制度,考虑气象、作物、灌溉频率等因素,制定既保证作物高产又能有效抑制土壤盐渍化的合理灌溉制度研究尚不多见。

蒸发皿蒸发量是反映温度、湿度、风速、太阳辐射及平流等气象要素对蒸发力影响的综合物理参数<sup>[8]</sup>,利用蒸发皿蒸发量与作物蒸腾量之间的关系来指导灌溉,是一种简单可靠且操作性强的灌溉计划制定方法。直径 20 cm 蒸发皿是我国气象站测定

水面蒸发的常用设备,由于具有价格低廉、安装和读取方便等优点,不少学者已将其蒸发量用于制定温室番茄、黄瓜、草莓及冬小麦等作物的适宜灌溉制度<sup>[9-12]</sup>,结果表明作物累积耗水量与蒸发皿累积蒸发量之间存在较好的线性关系,采用蒸发皿蒸发量指导作物灌溉是可行的。但目前将其应用在膜下滴灌棉花方面并探讨不同灌溉制度对棉田盐分分布与脱盐效果影响的报道还较少。因此,本文以直径 20 cm 标准蒸发皿蒸发量为基础,研究不同灌溉制度对膜下滴灌棉田土壤盐分分布、脱盐效果及产量的影响,旨在通过田间试验,提出一种简单合理的棉花膜下滴灌灌水模式,以有效减少土壤盐渍化的危害。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验在中国科学院阿克苏农田生态系统国家野外科学观测研究站(E  $80^{\circ}51'$ , N  $40^{\circ}37'$ , a. s. l. 1 028 m)进行。该站位于塔里木河三大源流交汇点附近的平原荒漠绿洲区内,距阿克苏市区 80 km。试验区属典型暖温带荒漠半荒漠干旱气候,多年平均气温  $11.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 207 d,年日照时数 2 948 h,降水量  $45.7 \text{ mm}$ ,水面蒸发量高达 2 500 mm。试验区春季常有大风浮尘,有时出现夏季持续高温。农作物主要为棉花和红枣。

试验田土壤为硫酸盐化潮土,1 m 深土层内的土壤理化性质及机械组成如表 1 所示。灌区地下水平均矿化度为  $0.45 \text{ g/L}$ ,成分以氯化物和硫酸盐为主,地下潜水位为  $5.0 \sim 8.0 \text{ m}$ 。

表 1 土壤理化性质及机械组成

Tab. 1 Soil physical properties and mechanical distribution

土层 深度/cm	土壤干容积 密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	田间持水量 $/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	$\text{Cl}^{-1}/\text{SO}_4^{-2}$	颗粒质量含量百分数/%			土壤 质地
				<0.002 mm	0.002 ~ 0.02 mm	>0.02 mm	
0 ~ 10	1.52	0.36	0.048	4.65	46.26	49.09	粉砂壤土
10 ~ 20	1.58	0.39	0.052	4.76	47.93	47.32	粉砂壤土
20 ~ 30	1.59	0.40	0.044	4.67	49.07	46.26	粉砂壤土
30 ~ 40	1.58	0.41	0.036	11.62	73.82	14.56	粉砂壤土
40 ~ 60	1.56	0.43	0.087	15.71	79.81	4.48	粉砂粘壤土
60 ~ 80	1.56	0.40	0.054	5.82	47.93	46.26	粉砂壤土
80 ~ 100	1.54	0.36	0.073	3.89	38.86	57.25	砂壤土

## 1.2 试验设计

试验采用灌水频率与灌水定额双因素组合随机区组设计,共6个处理(表2),3次重复,18个小区。灌水频率设5 d和8 d 2个水平,灌水定额设3个水平,分别为T80( $K_{cp1} = 0.8$ )、T60( $K_{cp2} = 0.6$ )和T40( $K_{cp3} = 0.4$ ),其灌水定额计算式为<sup>[13]</sup>

$$I = E_{pan} K_{cp} P_i \quad (1)$$

其中

$$P_i = \frac{a}{b} \quad (2)$$

式中  $I$ ——灌水定额,mm

$E_{pan}$ ——灌水间隔周期内直径20 cm蒸发皿的累积蒸发量,mm

$K_{cp}$ ——作物-蒸发皿系数

$P_i$ ——覆盖度系数

$a$ ——各生育阶段(蕾期、花铃前期和花铃后期)一膜宽度内棉花冠层横向宽度,cm

$b$ ——膜宽,200 cm

表2 试验设计

Tab.2 Experiment design

灌水频率/d	灌水定额处理	生育阶段				
		苗期	蕾期	花铃前期	花铃后期	吐絮期
5	T80	不灌水	$E_{pan} K_{cp1} P_1$	$E_{pan} K_{cp1} P_2$	$E_{pan} K_{cp1} P_3$	不灌水
	T60	不灌水	$E_{pan} K_{cp2} P_1$	$E_{pan} K_{cp2} P_2$	$E_{pan} K_{cp2} P_3$	不灌水
	T40	不灌水	$E_{pan} K_{cp3} P_1$	$E_{pan} K_{cp3} P_2$	$E_{pan} K_{cp3} P_3$	不灌水
8	T80	不灌水	$E_{pan} K_{cp1} P_1$	$E_{pan} K_{cp1} P_2$	$E_{pan} K_{cp1} P_3$	不灌水
	T60	不灌水	$E_{pan} K_{cp2} P_1$	$E_{pan} K_{cp2} P_2$	$E_{pan} K_{cp2} P_3$	不灌水
	T40	不灌水	$E_{pan} K_{cp3} P_1$	$E_{pan} K_{cp3} P_2$	$E_{pan} K_{cp3} P_3$	不灌水

## 1.3 种植方式与农艺措施

试验采用一膜二管六行滴灌带铺设方式(图1),行内株距为10 cm。试验田于2月18日春灌,4月21日翻耕,同时施用尿素(总氮质量分数不小于46.4%)150 kg/hm<sup>2</sup>、富过磷酸钙(有效磷质量分数不小于30.0%)750 kg/hm<sup>2</sup>、硫酸钾镁(氧化钾质量分数不小于24%,镁质量分数不小于6%,硫质量分数不小于16%)300 kg/hm<sup>2</sup>作为底肥。棉花品种为塔棉2号,于4月25日播种,9月23日开始采摘,10月25日采摘完毕。在棉花蕾期和花铃期分4次共随水追施棉花专用肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O(质量比)为16:29:6)400 kg/hm<sup>2</sup>。除灌水外,其他农艺措施均按当地常规进行管理。

试验用井水灌溉(矿化度为0.22 g/L),水表量测灌水量,所用滴灌系统配备有完好的首部调压泵、施肥罐及网式过滤器等设备。滴灌带直径16 mm,滴头间距30 cm,流量为2 L/h。试验小区长15 m,宽6.99 m(3个地膜)。

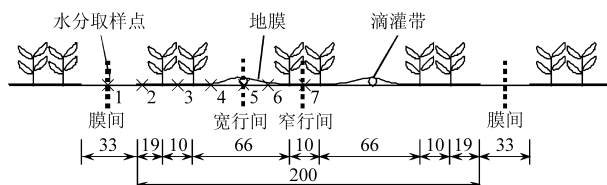


图1 一膜二管六行种植模式及土壤水分采样点示意图

Fig.1 Cropping spaces of 1 film-2 drip lines-6 rows plantation model and soil moisture sampling position

## 1.4 土壤样品采集

播种前在试验地随机选取5个地膜取土,采样

点为1和7(图1)。在各生育阶段最后1次灌水前及灌水后,于每小区中心膜上取土,采样点为1~7,取样深度均为10、20、30、40、60、80和100 cm。每个处理重复3次,平均值为处理代表值。

## 1.5 测定项目与方法

### (1) 土壤溶液电导率

称取过1 mm筛的风干土样20 g置于三角瓶中,加入100 mL蒸馏水,将三角瓶放在振荡机上振荡10 min,静置15 min后进行过滤,制成水土质量比为5:1的清液<sup>[14]</sup>。

用DDB-303A型(上海精科)便携式电导率仪测定清液的电导率。

### (2) 土壤含盐量

土壤含盐量由电导率与含盐量之间的标定关系计算。标定公式用干燥残渣法获得,具体方法为:根据试验测定的土壤电导率范围,按一定梯度分别吸取40 mL土壤浸出液放入瓷蒸发皿中,在水浴上蒸干并用过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)氧化有机质,然后在105 ℃的干燥箱中干燥至恒量,称量即得干燥残渣质量<sup>[14]</sup>。土壤盐分质量比S(g/kg)为

$$S = \frac{1000m_1}{m_2} \quad (3)$$

式中  $m_1$ ——干燥残渣质量,g

$m_2$ ——40 mL浸出液对应的风干土样质量,取8 g

根据测得的土壤盐分质量比与对应浸提液电导率,得到标定关系式为

$$S = 5.839C_{5:1} \quad (n = 36, R^2 = 0.9695) \quad (4)$$

式中  $C_{5:1}$ ——土壤浸提液电导率, mS/cm

### (3) 土壤含水率及作物耗水量

土壤含水率用干燥法测定。根据灌溉试验规范<sup>[15]</sup>, 作物耗水量  $T_c$  用水量平衡法计算

$$T_c = \Delta I + \Delta W + P - R - D \quad (5)$$

式中  $T_c$ ——作物耗水量, mm

$\Delta I$ ——分阶段灌水定额, mm

$\Delta W$ ——对土壤含水率进行面积加权计算后所得 1 m 深土层内储水量变化值, mm

$P$ ——有效降雨量, mm

$R$ ——地表径流, mm  $D$ ——渗漏量, mm

考虑到试验地地势平坦, 无径流发生, 故  $R = 0$ ; 由于灌溉方式为滴灌, 灌水定额较小, 深层渗漏可忽略, 故  $D = 0$ , 则式(5)变为

$$T_c = \Delta I + \Delta W + P \quad (6)$$

### (4) 产量及构成因子

根据棉花吐絮情况分 3 次采摘, 采摘时在每小区内随机挑选 3 个 2.33 m × 1.25 m 的样方, 称取每次实际采摘的棉花产量, 同时记录铃数和百铃质量, 棉花总产量计算式为

$$Y = 0.01n_p w \rho \quad (6)$$

式中  $Y$ ——棉花总产量, t/hm<sup>2</sup>

$n_p$ ——单株棉铃数, 个/株

$w$ ——单铃质量, g

$\rho$ ——种植密度, 株/m<sup>2</sup>

### (5) 水分利用效率

基于灌水量和耗水量的水分利用效率  $E_l$  和  $E_r$  (kg/m<sup>3</sup>) 计算式<sup>[16]</sup>为

$$E_l = \frac{10Y}{I} \quad (7)$$

$$E_r = \frac{10Y}{T_c} \quad (8)$$

## 1.6 数据分析方法

采用 SAS 8.2 软件及 Excel 2003 进行数据分析。方差分析与多重比较分别用 GLM 程序及 DUNCAN 新复极差法进行, 差异显著性概率为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌溉制度 0 ~ 100 cm 土层水平方向含盐量的变化特征

滴灌是局部灌溉, 土壤湿润体随滴水的进行在垂直和水平 2 个方向均有扩散, 使土壤含盐量呈现一定的空间分布特征。不同灌水频率与定额处理 0 ~ 100 cm 土层水平方向含盐量变化特征如图 2 和

图 3 所示。由图 2 可以看出, 采用 5 d 灌水频率, 滴头下方 0 ~ 20 cm 的含盐量最低, 其次为膜中心、边行中央与裸地中央。在 30 ~ 100 cm 土层, 土壤含盐量在水平方向相差不大。采用 8 d 灌水频率, 滴头下方 0 ~ 30 cm 深度内的土壤含盐量明显低于膜中心、边行中央与裸地中央, 40 ~ 100 cm 深度无显著差异。这是因为湿润体是从滴头处开始扩散, 滴头附近土壤经常保持较高的含水率而使盐分得到淋洗, 含盐量较低, 膜中心与边行中央由于滴水扩散速度减慢而使盐分得到积累, 裸地中央距离滴头较远, 含水量更低, 加之无地膜覆盖, 棵间蒸发强烈, 表层盐分积累也最多。由图 3 可看出, 不同灌水定额处理对水平方向盐分的影响主要集中在 0 ~ 30 cm 土层, 对 40 ~ 100 cm 深度含盐量的水平分布影响不显著。随着灌水定额的降低, 0 ~ 30 cm 土层内水平方向含盐量差异逐渐减小。例如, T80 处理滴头下方 0 ~ 30 cm 土层平均含盐量为 16.41 g/kg, 相比裸地中央降低 2.69 g/kg, 降幅为 14.1%。而 T40 处理滴头下方 0 ~ 30 cm 土层平均含盐量较裸地中央同层次土壤降低 1.75 g/kg, 降幅为 9.3%。这说明在本试验条件下, 滴水在水平扩散过程中将盐分带到湿润体边缘, 且影响只限于地表以下 0 ~ 30 cm 土层, 土壤含盐量由大到小依次为滴头下方、膜中心、边行中央和裸地中央。

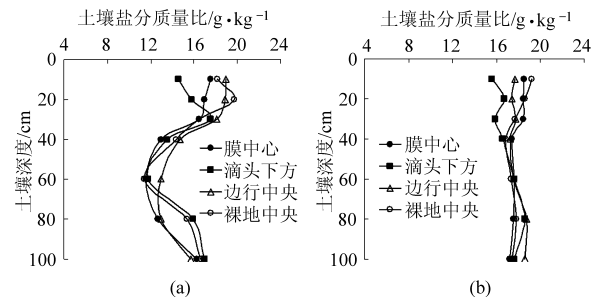


图 2 不同灌水频率下 0 ~ 100 cm 土层水平方向含盐量的变化特征

Fig. 2 Salinity distribution changes in horizontal direction from 0 to 100 cm soil layer for different irrigation frequency treatments

(a) 5 d (b) 8 d

### 2.2 不同灌溉制度 0 ~ 100 cm 土层垂直方向含盐量的变化特征

不同水分处理垂直方向 0 ~ 100 cm 土层的含盐量变化特征如图 4 所示。结果表明, 采用 5 d 灌水频率, 0 ~ 30 cm 土层出现盐分积累, 含盐量较高, 30 ~ 80 cm 土层含盐量最低, 80 ~ 100 cm 土层的含盐量与 0 ~ 30 cm 土层差异不大。8 d 灌水频率 0 ~ 100 cm 深度内各土层含盐量相差不明显, 基本为 16.99 ~ 18.16 g/kg。5 d 灌水频率 40 ~ 80 cm 土层

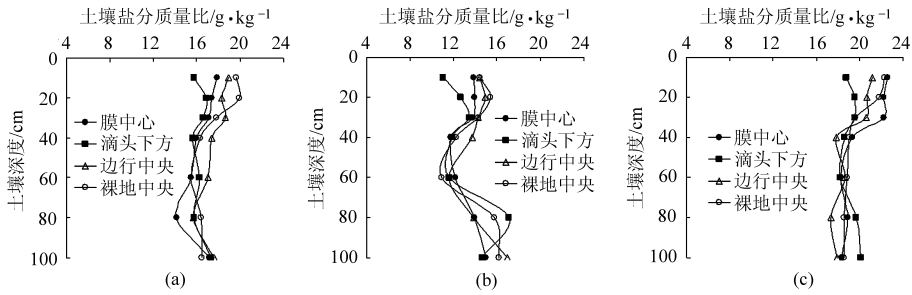


图3 不同灌水定额处理下0~100 cm土层水平方向含盐量的变化特征

Fig. 3 Salinity distribution changes in horizontal direction from 0 to 100 cm soil layer for different irrigation amount treatments

(a) T80 (b) T60 (c) T40

含盐量较8 d处理明显降低,其他土层含盐量相差不显著。从灌水定额看,T80和T40处理存在明显的分层现象,其中0~30 cm土层的含盐量较高,平均分别为17.11和20.79 g/kg,40~100 cm含盐量相对较低,平均分别为15.42和18.28 g/kg。在两个层次内部,土壤含盐量随深度变化不明显。随着深度的增加,T60处理0~100 cm土层含盐量呈现先降后升的趋势,其中0~30 cm、60~100 cm土层的平均含盐量分别为14.72和15.71 g/kg,30~60 cm土层含盐量最低,平均为12.96 g/kg。这说明滴灌虽然在上层可以将土壤盐分沿水平方向淋洗到湿润体外缘,起到“驱盐”作用,但受作物蒸腾、根系吸水和土壤水分垂向运动等因素的影响,整个上层土壤的平均盐分仍基本高于下层。但与其他处理相比,采用高频(5 d)与中等灌水定额(T60)处理,作物0~60 cm根系活动层的含盐量相对较低。

含盐量则增加,平均增幅为18.96%和41.32%,60~100 cm土层又表现为脱盐,平均脱盐率为8.36%和10.38%。从0~60 cm作物主根系层看,5 d和8 d灌水频率处理在全生育期的盐分均表现增加,平均增幅分别为1.91%和11.25%。这说明经过一个生长季后,土壤主根系层均出现轻微次生盐渍化,但5 d灌水频率的盐分增量低于8 d处理,高频灌溉更利于减轻土壤次生盐渍化。从灌水定额看,T80和T60处理对0~20 cm土层含盐量的淋洗作用明显,平均脱盐率分别为18.33%和13.12%,而T40处理0~20 cm土层含盐量在生长季前、后变化不大,平均增幅仅为0.31%。3种灌水定额处理20~60 cm土层的含盐量均呈增加趋势。受水分转移的影响,60~100 cm土层含盐量则有不同程度的降低。从0~60 cm主根系层看,T80和T40处理的土壤含盐量较播种前分别增加0.90和1.09 g/kg,增幅为6.62%和8.01%。T60处理变化幅度最小,脱盐率为0.44%。这说明采用中等灌水定额处理,更利于为作物创造适宜的根区水盐环境。此外,对0~100 cm土层的分析表明,5 d和8 d灌水频率处理收获时在该层的平均含盐量分别为14.14和14.78 g/kg,较播种前(14.52 g/kg)分别降低2.62%和增加1.79%。T80、T60、T40处理收获时在该层的平均含盐量分别为14.01、14.17和14.69 g/kg,较播种前分别降低3.51%、2.41%和增加1.17%。说明在本试验条件下,无论采用何种灌水频率与灌水定额处理,滴灌种植一个季节后0~100 cm土层的总含盐量变幅均小于5%,基本没有发生次生盐渍化。

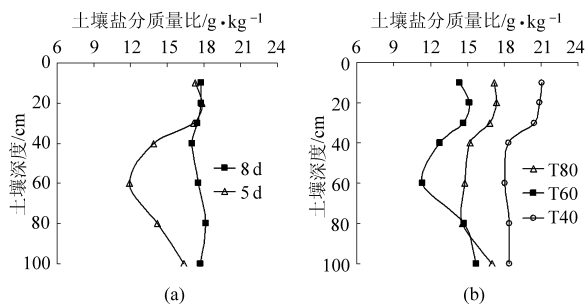


图4 不同灌溉处理下垂直方向0~100 cm土层含盐量的变化特征

Fig. 4 Salinity distribution changes in vertical direction from 0 to 100 cm soil layer for different irrigation treatments

(a) 灌水频率 (b) 灌水定额处理

### 2.3 不同灌溉制度的土壤盐分平衡

播前和收获时的土壤盐分平衡是判断土壤次生盐渍化的重要标志。表3为各处理不同土层盐分在一个生长季的变化。结果表明,从4月到10月,5 d和8 d灌水频率处理0~20 cm土层表现为脱盐,其脱盐率分别为16.54%和21.18%。20~60 cm土层

### 2.4 不同灌溉制度的耗水量、产量与水分利用效率

不同灌溉处理的耗水量及产量如表4所示。从表中可以看出,采用5 d灌水频率,T80、T60、T40处理的耗水量分别为555.0、467.8和373.3 mm,而采用8 d灌水频率,其耗水量分别为552.0、467.1和380.4 mm。可见,灌水量越大,其耗水量也越大,而不同灌水频率相同灌水定额处理的耗水量则基本相

表 3 不同灌溉处理土壤含盐量的变化

Tab. 3 Changes of soil salinity for different irrigation treatments

土壤深度/cm	播前土壤盐分质量比/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	收获前土壤盐分质量比/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$					一个生长季盐分变化/%				
		灌水频率/d		灌水定额处理			灌水频率/d		灌水定额处理		
		5	8	T80	T60	T40	5	8	T80	T60	T40
0~20	19.59	16.35	15.44	16.00	17.02	19.65	-16.54	-21.18	-18.33	-13.12	0.31
20~60	10.60	12.61	14.98	13.75	11.79	12.22	18.96	41.32	29.72	11.23	15.28
60~100	15.90	14.57	14.25	13.28	15.12	14.67	-8.36	-10.38	-16.48	-4.91	-7.74
0~60	13.60	13.86	15.13	14.50	13.54	14.69	1.91	11.25	6.62	-0.44	8.01
0~100	14.52	14.14	14.78	14.01	14.17	14.69	-2.62	1.79	-3.51	-2.41	1.17

同。在产量及构成因子方面,采用同一灌水频率, T60 处理的单株铃数、单铃质量和籽棉产量基本均高于 T80 与 T40 处理。如采用 5 d 灌水频率, T60 处理的籽棉产量为  $9.18 \text{ t}/\text{hm}^2$ , 较 T80 和 T40 处理分别增产 0.53 与 0.29  $\text{t}/\text{hm}^2$ , 增幅为 6.1% 和 3.3%。8 d 灌水频率时, T60 则较 T80 和 T40 分别增产 0.53 与 0.38  $\text{t}/\text{hm}^2$ , 增幅为 6.2% 和 4.3%。在同一灌水定额, 5 d 灌水频率的籽棉产量高于 8 d 处理, 前者 T80、T60 和 T40 灌水定额处理分别较后者增产 0.05、0.05 与 0.24  $\text{t}/\text{hm}^2$ , 增幅为 0.59%、0.55% 和 1.56%。说明采用同一灌水频率, 灌水定额过高与过低均不利于棉花增产, 而对同一灌水定额, 高频灌

溉更有利于提高棉花产量。方差分析表明, 不同灌溉制度处理的棉花产量及构成因子之间差异不显著, 这可能与个别处理重复间差异较大有关。从水分利用效率看, 当灌水频率相同时, 水分利用效率均随灌水量的减少而增加。例如, 5 d、T40 处理的  $E_r$  为  $1.56 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 较 5 d、T60 和 5 d、T80 处理分别增加 0.42 与 0.82  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 增幅为 21.3% 和 52.7%。在同一灌水定额处理, 5 d 灌水频率的水分利用效率高于 8 d 处理。方差分析表明, 在同一灌水频率, 不同灌水定额处理的  $E_r$  差异显著, 同一灌水水平不同灌水频率处理间差异不显著。各处理  $E_r$  的表现规律与  $E_f$  基本一致。

表 4 不同灌溉处理的耗水量及产量

Tab. 4 Evapotranspiration and cotton yield of different irrigation treatments

灌水频率/d	灌水定额	灌水量/mm	耗水量/mm	单株铃数/个	单铃质量/g	籽棉产量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	$E_r/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$E_f/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
5	T80	385.6	555.0	5.65 <sup>a</sup>	5.94 <sup>a</sup>	8.65 <sup>a</sup>	1.56 <sup>c</sup>	2.24 <sup>c</sup>
	T60	294.8	467.8	5.91 <sup>a</sup>	6.03 <sup>a</sup>	9.18 <sup>a</sup>	1.96 <sup>b</sup>	3.11 <sup>b</sup>
	T40	204.0	373.3	5.65 <sup>a</sup>	6.11 <sup>a</sup>	8.89 <sup>a</sup>	2.38 <sup>a</sup>	4.36 <sup>a</sup>
8	T80	391.4	552.0	5.69 <sup>a</sup>	5.92 <sup>a</sup>	8.60 <sup>a</sup>	1.56 <sup>c</sup>	2.20 <sup>c</sup>
	T60	299.2	467.1	5.86 <sup>a</sup>	6.05 <sup>a</sup>	9.13 <sup>a</sup>	1.95 <sup>b</sup>	3.05 <sup>b</sup>
	T40	206.9	380.4	5.72 <sup>a</sup>	5.94 <sup>a</sup>	8.75 <sup>a</sup>	2.30 <sup>a</sup>	4.23 <sup>a</sup>

注:表中数据为 3 个重复的平均值,同一列数据后不同小写字母表示在  $P < 0.05$  水平差异显著。

### 3 讨论

在膜下滴灌条件下,滴水从滴头处沿水平和垂直方向扩散,将盐分带到湿润体边缘,从而形成一定的盐分空间分布。本试验中,不同灌溉制度对水平方向盐分的影响基本集中在 0~30 cm 土层,土壤含盐量由小到大依次为滴头下方、膜中心、边行中央与裸地中央,在 30~100 cm 土层,土壤含盐量在水平方向差异不显著。这是因为盐随水分的运动而迁移,滴头下方土壤含水量较高,盐分一直得到淋洗,含盐量最低,在膜中心和窄行中央,滴水扩散速度逐渐减慢,盐分被积累。裸地中央由于距离滴头最远,很少能灌上水,加之无地膜覆盖,裸地蒸发强烈,盐分表层积累也最多,这与王海江等的结论相一致<sup>[17]</sup>。在垂直方向上,5 d 灌水频率 0~100 cm 土

层含盐量呈现先降后增趋势,8 d 灌水频率处理各土层相差不明显,前者 40~80 cm 土层含盐量显著低于后者,且灌水定额过大与过小均不利于 0~60 cm 作物主根层的脱盐,中等灌水定额的土壤含盐量相对较低。这可能与土壤盐分的返向运动有关,因为土壤盐分运移过程不仅包括盐随水分入渗的分布过程,同时也包括盐随土壤水分蒸散的返向运动,且土壤盐分返向运移在很大程度上受灌水周期影响。高频灌水时,由于在前次灌水停止后,土壤盐分还未来得及向上迁移就又进行下次灌水,使得土壤盐分随滴水再次向下及周围运移,同时灌水次数较多,淋洗次数也就越多,从而能更好地抑制由蒸散引起的盐分返向运移。低频灌溉灌水间隔时间较长,当新的一次灌水开始时,土壤盐分返向运移已比较明显,且灌水次数少,洗盐效果有限,盐分淋洗和返盐有可能

达到平衡,各土层含盐量相差不明显。在灌水量方面,增加灌水定额虽然可以增加盐分的淋洗量,但同时也会带来较强的土壤蒸散,带动下层盐分上移,使得作物根系活动层出现集盐。较小灌溉定额由于灌水量最小,淋洗效果十分有限,土壤返盐严重,含盐量较高。相比之下,中等灌水定额不仅具有一定淋洗作用,又可有效防止土壤返盐,作物主要耕作层的含盐量相对最低,这与张琼、郑耀凯的结论相一致<sup>[18-19]</sup>。

许多研究表明,由于滴灌的灌水量较小,对盐分淋洗有限,而土壤蒸散发又将下层土壤盐分带到上层,在长期滴灌条件下,土壤耕作层的盐分不断积累,导致出现土壤次生盐渍化问题<sup>[20-21]</sup>。但另一些研究则认为滴水只是将上层盐分带到土壤湿润锋的边缘处积累,经过次年春季耕翻,盐分又重新混合,从整个土壤观测剖面看,盐分不但不增加,甚至上层土壤环境质量还有可能逐步得到改善,因此不会出现土壤次生盐渍化<sup>[22-23]</sup>。本文结果表明,经过一个生长季的滴灌种植,高频和低频灌水处理0~60 cm作物主根系层的含盐量均增加,但高频处理平均增幅为1.91%,远小于低频处理的11.25%。同时增加或减小灌水定额,土壤根系层的盐分均增加,增幅为6.62%~8.01%,中等灌水定额则变幅不大,脱盐率为0.44%。从0~100 cm土层看,在本试验灌水频率和灌水定额条件下,滴灌种植一个生长季后该土层的总含盐量变幅均小于5%,基本没有发生次生盐渍化。这说明一个季度种植后,作物主根系层将发生轻微次生盐渍化,但从0~100 cm土层看,土壤次生盐渍化并不明显。相比其他处理,高频中定额灌溉可以减缓作物主根系层发生次生盐渍化。这可能是因为高频中等灌水定额不但具有一定淋洗次数,而且还有效抑制蒸散发带来的返盐情况,土壤含盐量整体较低。

在棉花产量及其构成因子方面,本试验中灌水定额过高与过低均不利于提高棉花单株铃数、单铃重及产量,高频灌溉棉花籽棉产量大于低频处理。其中,高频中定额处理籽棉产量最高,为9.18 t/hm<sup>2</sup>,略高于其他处理。这可能与土壤水盐环境及养分利用有关。当采用低频灌溉时,由于单次灌水定额较大,灌水间隔时间长,导致盐分淋洗不及时,蒸散发强

烈,土壤根系活动层盐分积累,水盐环境变差,同时较大的灌水量也造成肥料浪费,影响作物对水肥的吸收,降低蕾铃数和单铃重,引起减产。当灌水量过低时,则会增加土壤的返盐,同时不利于作物对水肥的吸收,作物生长缓慢,产量下降。相比之下,高频中量灌溉由于灌水及时和具有适宜的灌水量,土壤剖面水分分布均匀,并在淋洗盐分的同时,有效抑制返盐,水肥利用率较高,从而提高棉花的经济产量,这与刘梅先等的研究相一致<sup>[24]</sup>。

作物生产的最终目的是通过合理栽培管理,在充分利用水肥资源的条件下,尽可能获得高产。在本试验两种灌水频率条件下,虽然较低灌水定额处理的水分利用效率最高,但由于籽棉产量较中等灌水量处理降低3.2%,说明低灌水定额处理并不适宜。相比之下,高频中定额的F5T60处理具有较低的土壤含盐量,且经过一个生长季后,土壤次生盐渍化程度最低,产量和水分利用效率均较优,可以作为当地适宜的棉花灌溉模式。

## 4 结论

(1) 增大灌水频率与灌水定额,有利于对棉花根区盐分在水平方向的运移,5 d和8 d灌水频率对水平方向含盐量有影响的土层深度分别为0~20 cm和0~30 cm,其他土层影响较小。土壤含盐量在水平方向自滴头处向两侧逐渐增加。高频灌溉处理土壤含盐量随深度的增加呈现先降后增趋势,低频灌溉各土层含盐量相差不明显。增加或减小灌溉定额均会增大土壤剖面含盐量,中等灌水定额0~60 cm土层含盐量显著小于高水和低水处理。

(2) 经过一个生长季种植,棉花0~20 cm土层含盐量降低,但20~60 cm土层含盐量相对增加,0~60 cm土层出现轻微次生盐渍化,中等灌水定额处理含盐量变化幅度最小。灌水处理对0~100 cm深度土壤含盐量无明显影响,含盐量变幅为1.16%~3.45%。

(3) 灌水定额过高与过低均不利于提高棉花产量,相比之下,5 d灌水频率与中等灌水定额(作物-蒸发皿系数为0.6)处理不仅具有合理的盐分分布及脱盐效果,且籽棉产量最高,为9.18 t/hm<sup>2</sup>,是实现抑盐、控水、高产、高效的适宜棉花灌溉制度。

## 参 考 文 献

- 张伟,吕新,李鲁华,等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 15~19.  
Zhang Wei, Lü Xin, Li Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang Region[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 15~19. (in Chinese)
- 王芳芳,吴世新,乔木,等. 基于3S技术的新疆耕地盐渍化状况调查与分析[J]. 干旱区研究, 2009, 26(3): 366~371.  
Wang Fangfang, Wu Shixin, Qiao Mu, et al. Investigation and analysis on the salinization degree of cultivated in Xinjiang based on

- 3S technology[J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(3): 366 ~ 371. (in Chinese)
- 3 吕殿青, 王全九, 王文焰, 等. 膜下滴灌土壤盐分特性及影响因素的初步研究[J]. *灌溉排水学报*, 2001, 20(1): 28 ~ 31. Lü Dianqing, Wang Quanjiu, Wang Wenyan, et al. Salt distribution and effect factors in soil under film drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2001, 20(1): 28 ~ 31. (in Chinese)
- 4 赵成义, 闫映宇, 李菊艳, 等. 塔里木灌区膜下滴灌的棉田土壤水盐分布特征[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(6): 892 ~ 898. Zhao Chengyi, Yan Yingyu, Li Juyan, et al. Distributed characteristics of soil water-salt of cotton field under drip irrigation under mulching in Tarim Irrigated Area[J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(6): 892 ~ 898. (in Chinese)
- 5 张江辉, 王全九, 巨龙, 等. 田间滴灌入渗与蒸发条件下土壤水盐分布特征[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(5): 684 ~ 690. Zhang Jianghui, Wang Quanjiu, Ju Long, et al. Distribution features of field soil water and salt under the drip irrigation and evaporation[J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(5): 684 ~ 690. (in Chinese)
- 6 王卫华, 王全九, 刘建军, 等. 膜下滴灌湿润体交汇区土壤水盐运移特征田间实验研究[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(4): 558 ~ 564.
- 7 杨鹏年, 董新光, 刘磊, 等. 干旱区大田膜下滴灌土壤盐分运移与调控[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 90 ~ 95. Yang Pengnian, Dong Xinguang, Liu Lei, et al. Soil salt movement and regulation of drip irrigation under plastic film in arid area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(12): 90 ~ 95. (in Chinese)
- 8 焦艳平, 赵勇, 张艳红, 等. 基于蒸发皿蒸发量的日光温室番茄滴灌水量研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(5): 133 ~ 138. Jiao Yanping, Zhao Yong, Zhang Yanhong, et al. Study on tomato drip irrigation scheduling in solar greenhouse based on water surface evaporation of a 20 cm standard pan[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(5): 133 ~ 138. (in Chinese)
- 9 Yuan Baozhong, Kang Yaohu, Nishiyama S. Drip irrigation scheduling for tomatoes in unheated greenhouses[J]. *Irrigation Science*, 2001, 20(3): 149 ~ 154.
- 10 Wang Zhenying, Liu Zuoxin, Zhang Zikun, et al. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation in Northeast China[J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 123(1): 51 ~ 57.
- 11 Yuan B Z, Sun J, Nishiyama S. Effect of drip irrigation on strawberry growth and yield inside a plastic greenhouse[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 87(2): 237 ~ 245.
- 12 Liu Haijun, Kang Yaohu. Sprinkler irrigation scheduling of winter wheat in the north China plain using a 20 cm standard pan[J]. *Irrigation Science*, 2007, 25(2): 149 ~ 159.
- 13 Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements[M]. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, Rome, 1977.
- 14 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 15 SL 13—2004 灌溉试验规范[S]. 2004.
- 16 Howell T A, Cuenca R H, Solomon K H. Crop yield response[M]//Hoffman G J, Howell T A, Solomon K H. *Management of Farm Irrigation Systems*, American Society of Agricultural Engineers, 1990.
- 17 王海江, 崔静, 王开勇, 等. 绿洲滴灌棉田土壤水盐动态变化研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(1): 136 ~ 138. Wang Haijiang, Cui Jing, Wang Kaiyong, et al. Soil water-salt dynamic change for cotton field under mulched drip irrigation on oasis in Xinjiang[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1): 136 ~ 138. (in Chinese)
- 18 张琼, 李光永, 柴付军, 等. 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, Cai Fujun, et al. Effect of mulched drip irrigation frequency on soil salt regime and cotton growth[J]. *Journal of Hydraulic*, 2004, 35(9): 123 ~ 126. (in Chinese)
- 19 郑耀凯, 柴付军. 大田棉花膜下滴灌灌溉制度对土壤水盐变化的影响研究[J]. *节水灌溉*, 2009(7): 4 ~ 7. Zheng Yaokai, Chai Fujun. Experimental research on effect of irrigation scheduling on moisture and salt change of mulched drip irrigation for cotton[J]. *Journal of Water Saving Irrigation*, 2009(7): 4 ~ 7. (in Chinese)
- 20 刘建军, 王全九, 张明, 等. 膜下滴灌土壤盐分年季变化特征研究[J]. *中国农村水利水电*, 2012(11): 48 ~ 52.
- 21 杨劲松, 陈小兵, 胡顺军, 等. 绿洲灌区土壤盐分平衡分析及其调控[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1 438 ~ 1 443. Yang Jinsong, Chen Xiaobing, Hu Shunjun, et al. Analysis of soil-salt balance and its control in oasis irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1 438 ~ 1 443. (in Chinese)
- 22 谭军利, 康跃虎, 焦艳萍, 等. 不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 59 ~ 63. Tan Junli, Kang Yuehu, Jiao Yanping, et al. Characteristics of soil salinity and salt ions distribution in salt-affected field under mulch-drip irrigation in different planting years[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(6): 59 ~ 63. (in Chinese)
- 23 李明思, 刘洪光, 郑旭荣. 长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 82 ~ 87.
- 24 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 膜下滴灌条件下滴水量和滴水频率对棉田土壤水分分布及水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3 203 ~ 3 210. Liu Meixian, Yang Jinsong, Li Xiaoming, et al. Effects of irrigation amount and frequency on soil water distribution and water use efficiency in a cotton field under mulched drip irrigation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(12): 3 203 ~ 3 210. (in Chinese)