

# 土壤水分调控对南疆滴灌棉花产量及 土壤水盐分布的影响

何平如, 张富仓, 侯翔皓, 刘蓝骄, 孟晓琛, 张晨阳, 成厚亮

(西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室/西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**针对南疆地区水资源短缺、土壤盐渍化严重等问题,研究生育期土壤水分调控对膜下滴灌棉花土壤水盐分布、盐分积累及棉花产量的影响,确定适宜于南疆地区的灌溉制度。以田间持水量(FC)为土壤水分上限,设置 5 个土壤水分下限处理,分别为 85%FC( $T_1$ ), 75%FC( $T_2$ ), 65%FC( $T_3$ ), 55%FC( $T_4$ )和 45%FC( $T_5$ )。结果表明:灌水后,水平方向随着距滴灌带距离的增加,土壤含水率逐渐变小,表现为带下>窄行>宽行>裸地,土壤含盐率呈相反的规律分布。土壤水分下限定越高,灌水越频繁,土壤剖面有较高的水分含量和较低的盐分积累,棉花产量较高;土壤水分下限较低时,由于较高的次灌水量,可将较多的盐分淋洗出作物根区,但灌水频率低,灌溉定额小,棉花产量较低。在生育期末各处理在膜内膜外均积盐,膜内积盐少于膜外,主根区积盐量大于次根区积盐量,盐分积累总量呈现  $T_3 > T_5, T_1 > T_2, T_4$ 。建议南疆棉花膜下滴灌的适宜土壤水分下限为 75%FC,非生育期冬灌定额为 300 mm,生育期灌溉定额为 334 mm,整个生育期灌水 12 次。

**关键词:**水分调控; 灌水下限; 膜下滴灌; 水盐运移; 棉花产量; 灌溉制度

中图分类号:S274.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0084-09

## Effects of Soil Water Regulation on Cotton Yield and Soil Water-Salt Distribution Under Drip Irrigation in Southern Xinjiang

HE Pingru, ZHANG Fucang, HOU Xianghao, LIU Lanjiao,

MENG Xiaochen, ZHANG Chenyang, CHENG Houliang

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education/Institute of Water-Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Considering the shortage of water resources and serious soil salinization in southern Xinjiang, the effects of soil water regulation on soil water-salt distribution, salt accumulation and cotton yield under mulched drip irrigation were determined, while FC, the field capacity, was used as the upper limit of soil water, five soil water lower limit levels were set as 85% FC ( $T_1$ ), 75% FC ( $T_2$ ), 65% FC ( $T_3$ ), 55% FC ( $T_4$ ) and 45% FC ( $T_5$ ), respectively. The results showed that, after irrigation, the soil water content gradually decreased with the increase of the distance from the drip irrigation belt, showing as belt > narrow row > wide row > bare land, while the soil salt content was in the opposite law. When the soil water lower limits was high, the more frequent the irrigation, the higher the soil moisture content and the lower salt accumulation, lead to high cotton yield. When it was low, more salt can be washed out of the crop root zone due to the higher secondary irrigation amount, but the irrigation frequency was low, the irrigation total amount was small, caused the cotton yield was low. At the end of the growth period, the salt in the film and outside the film are all accumulated. The salt accumulated in the film was less than that outside the film and the salt content in the main root zone was larger than that in the secondary root zone. The total salt accumulation showed as  $T_3 > T_5, T_1 > T_2, T_4$ . The soil water lower limit of cotton under mulched drip irrigation in southern Xinjiang is suggested to be 75% FC, and winter irrigation is carried out during non-growing period with the quota of 300 mm, the irrigation quota for growth period is 334 mm, and 12 times irrigation in the whole growth period.

收稿日期:2019-09-14

修回日期:2019-10-24

资助项目:国家重点研发计划课题“田间节水减排控盐关键技术与产品”(2017YFC0403303)

第一作者:何平如(1994—),女,湖北建始县人,硕士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:hepingru68@163.com

通信作者:张富仓(1962—),男,陕西武功县人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:zhangfc@nwsuaf.edu.cn

**Keywords:** water regulation; irrigation lower limit; mulched drip irrigation; water and salt migration; cotton yield; irrigation system

缺水 and 土壤盐渍化是限制干旱地区农业可持续发展的两个关键因素<sup>[1]</sup>。新疆地处内陆干旱区,降水稀少,蒸发强烈,盐碱土分布广泛,水资源严重匮乏<sup>[2]</sup>。南疆地区因棉花产量高,品质优,色泽洁白,目前已成为中国最大的优质棉生产基地<sup>[3]</sup>,2012 年该区棉花种植面积  $7.655\ 7\times 10^5\ \text{hm}^2$ ,占全疆棉花种植面积的 70.7%,总产  $1.345\ 0\times 10^6\ \text{t}$ ,占全疆总产的 69.3%<sup>[4]</sup>。南疆棉花的灌水方式均为膜下滴灌,但农民节水意识薄弱,滴灌常常演变为漫灌,田间灌溉水利用效率低,灌溉水大量回补地下水。由于特殊的地质、气候条件以及多年来不合理开发利用水土资源,致使当地土壤次生盐渍化较为严重,盐碱危害导致作物减产,形成大面积中、低产田,降低了土地生产效益<sup>[5]</sup>。根据“盐随水动”的原则,土壤水分是控制盐分运动的主要因素,灌水量的多少会影响土壤剖面中盐分的分布,灌水量较低难以将土壤表层聚集的盐分向下淋洗,灌水量过高会使土壤的积盐深度加深,导致盐分进入地下水体,在蒸发强烈时还会促进盐分向上迁移<sup>[6]</sup>。因此,通过土壤水分下限调控确定合理的灌水定额和灌水频率对土壤中水盐的运移影响很大。

20 世纪 90 年代以来,国内外学者围绕干旱区膜下滴灌棉田土壤水盐运移、土壤水分调控、灌溉制度等方面进行了大量的研究。土壤水分是盐分运移的载体,在滴灌条件下,随着水分的入渗,水流可将盐分带入湿润锋边缘,使土壤盐分在三维空间发生运移<sup>[7]</sup>。灌水前,棉田膜内表层和下层含水量均高于裸地,而盐分含量及变幅略低于裸地,滴灌灌水后滴灌带下方区域的土壤盐分最低,在生育期结束后盐分积累在膜间<sup>[8-10]</sup>。在膜下滴灌条件下随着灌水量的增加,滴头附近的土壤含水量增大,湿润体水平距离和垂直距离也增加,湿润体范围增大<sup>[11]</sup>。根据土壤水分下限调控灌水,可以通过连续监测土壤含水率间接调控作物的灌水时间、灌水定额和灌水频率<sup>[12-13]</sup>。Tedeschi 等<sup>[14]</sup>研究结果表明,高频灌水决定了土壤剖面较高的水分含量和较低的盐分积累,低频灌水由于较高的次灌水量,可将较多的盐分淋洗出作物根区。汪昌树等<sup>[15]</sup>认为灌水下限定的高时,灌水频率增加,增大了田间耗水量且滴灌土壤水分水平运动距离和范围有限,对盐分的淋洗效果一般;灌水下限较低时,次灌水量大,灌溉定额增加,综合控盐效果较好,棉花产量较高。但牟洪臣等<sup>[16]</sup>认为降低灌水定额增加灌水次数可防治过多水分入渗地下,且吴争

光、张琼等<sup>[17-18]</sup>认为高频率灌溉的洗盐效果优于低频率,可以有效抑制土壤返盐。关于棉花灌溉制度的研究较多,崔永生等<sup>[19]</sup>在南疆第一师水利局灌溉试验站的研究表明生育期灌溉定额 420 mm 是南疆干旱区较为适宜的灌溉制度。刘新永等<sup>[20]</sup>于 2004 年在南疆尉犁县的研究表明,505 mm 的灌溉量可满足棉花对水分的需求,但他只是探讨了南疆尉犁县膜下滴灌条件下棉花充分灌溉的灌溉制度。

膜下滴灌试验取得了很多研究成果,但前人的研究大多按确定的灌溉定额或者参考作物蒸发蒸腾量来指导灌溉,采用土壤水分调控进行灌溉的较少,灌溉制度及节水抑盐机理还有待进一步研究,因此,开展基于不同土壤水分下限棉花膜下滴灌水盐运移的研究是必不可少的内容。为了深入探讨膜下滴灌棉田土壤水盐运移规律,通过研究不同的土壤水分下限调控对棉花产量和土壤水盐运移及积累特征的影响,旨在探究适合南疆棉花生长的土壤水分下限水平,为总结膜下滴灌棉田节水控盐与高产的高效模式提供科学的依据。

# 1 试验材料与方法

## 1.1 试验区概况

该试验区位于新疆库尔勒市尉犁县 31 团二连 ( $40^{\circ}53'03''\text{N}$ ,  $86^{\circ}56'58''\text{E}$ ),海拔 900 m 左右,多年平均降水量 34.1 mm,蒸发量为 2 417 mm,同期蒸发量为降水量的 50~80 倍,平均气温 11℃,昼夜温差大,日照时间长,多年日照均值为 2 941.8 h,无霜期 180~220 d。试验地以砂壤土为主,土壤理化性质具体见表 1。试验区地表水水源为恰拉水库,在汛期 8 月、9 月、10 月份,恰拉水库水矿化度 1.0~2.5 g/L。棉花生育期内试验区地下水埋深为 1.3~2.1 m,最大埋深和最小埋深分别出现在 7 月初和 9 月底,地下水位较高。水面蒸发量在播后 30~70 d 较高,即 5—6 月蒸发强烈。

表 1 播前土壤理化性质

深度/ cm	初始 含水率/%	田间 持水量/%	容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	电导率/ ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ )	初始含盐量/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
0—10	15.21	20.67	1.59	186.70	0.46
10—20	15.02	22.82	1.44	173.80	0.43
20—40	19.91	16.78	1.63	189.90	0.46
40—60	24.70	19.89	1.57	218.05	0.53
60—80	20.46	12.20	1.70	256.35	0.63
80—100	22.54	8.12	1.66	255.85	0.63

1.2 试验设计

试验选取棉花(新陆中 66 号)为供试作物,于 2018 年 4 月 11 日播种,并于当年 9 月 20 日收获,整个生育期 160 d。试验共设置 5 个处理,每个处理 3 个重复,共 15 个小区,种植模式采用一膜两管四行,见图 1,棉花种植行距 10 cm×66 cm×10 cm,宽行距为 66 cm,窄行距为 10 cm,膜间距为 46 cm,株距 10 cm,一膜宽 106 cm;一个小区四膜宽为 6 m,长度为 9 m,每个小区之间设置的保护行为 1 m,每个小区面积 60 m<sup>2</sup>,试验田共用地 900 m<sup>2</sup>。试验地采用冬灌的方式在秋收后对土壤进行压盐处理,冬灌定额为 3 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。各处理施肥水平一致,肥料采用施肥灌随水滴施入,滴头流量 2.4 L/h,由于棉花前中期需肥量较高,在蕾期、花期、铃期及吐絮期施肥量所占总施肥量的比例分别为(N 300 kg/hm<sup>2</sup>—P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg/hm<sup>2</sup>—K<sub>2</sub>O 60 kg/hm<sup>2</sup>)25%,30%,30%和 15%,试验期间的打顶、打药、除草等田间管理措施均与当地传统种植保持一致。

本文按 FC(田间持水量)的不同百分比为土壤水分下限进行灌溉。由于该试验地是盐碱地,为了减轻土壤盐碱化达到控盐的目的,以田间持水量为土壤水分上限,以 10%的梯度选取不同的土壤水分下限,记录各处

理在各生育期的灌水量及灌水时间,设置土壤水分下限为田间持水量的 85%,75%,65%,55%,45%。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水率的测定及灌水量的计算 于棉花播前在试验田地按 4 钻 6 层法取土样,采用环刀取土样测定土壤的田间持水量和容重。采用传统的土钻取土烘干法测定土壤含水率,见图 1,取土样时以滴头为中心,在宽行、滴灌带、窄行及膜外裸地,分别取 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm 和 80—100 cm 土层土壤。试验期间采用不间断监测,出现降雨情况,继续进行监测,各处理土壤含水率小于设置下限即进行灌溉,灌至田间持水量。根据棉花各生育期设定的土壤水分上下限,计算单次灌水量并换算到试验小区,棉花各生育期单次灌水量计算公式为:

$$M=10\times\gamma\times H\times p\times(\theta_{\max}-\theta_{\min})$$
 (1)

式中: $M$  为各生育期单次灌水量(mm); $\gamma$  为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $H$  为土壤计划湿润层深度(cm),蕾期取 40,花期、铃期与吐絮期取 60; $p$  为湿润比,此处取 0.7; $\theta_{\max}$  为田间持水量,即土壤水分上限; $\theta_{\min}$  为灌前计划湿润层深度内的土壤平均质量含水率,即土壤水分下限。

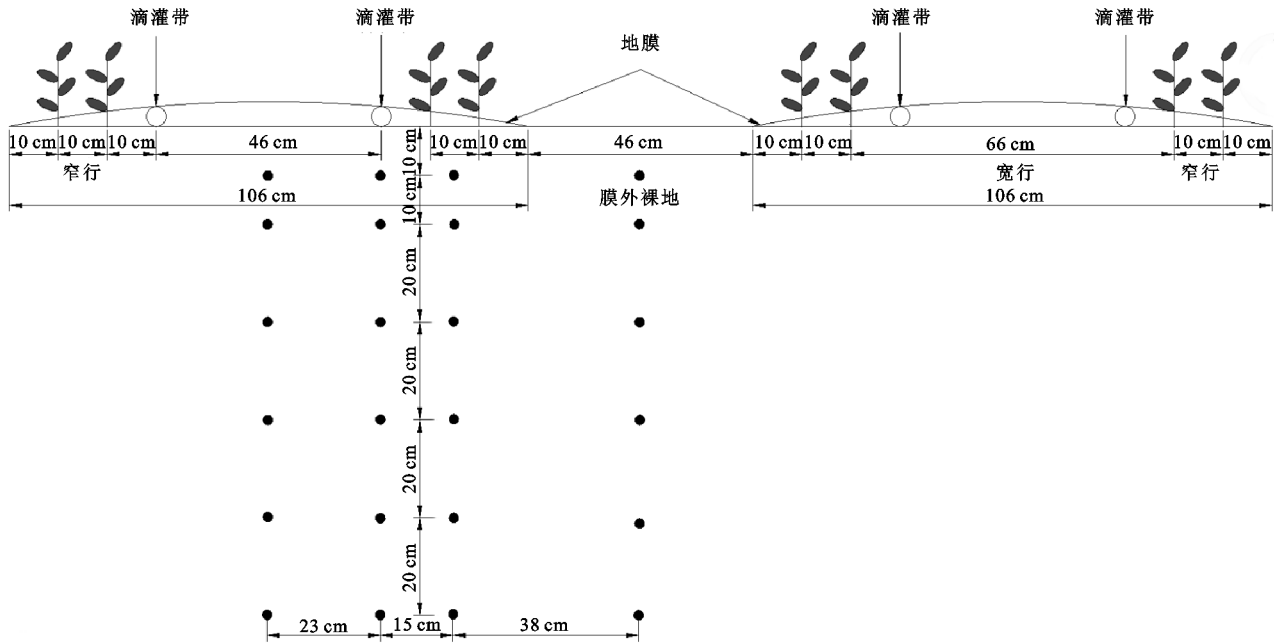


图 1 田间试验土壤取样点位图

1.3.2 土壤电导率和盐分的测定 土壤浸提液电导率(EC,dS/m)和土壤含盐量(SC,g/kg)常被用来表征土壤盐度。从试验田取回的土样经自然风干后碾压过 2 mm 孔径标准筛,将过筛后的土样与去离子水按 1:5 搅拌混合,静置一段时间澄清后,用雷磁 DDS-HA 电导仪测定上清液电导率,根据试验率定

结果,SC 与 EC<sub>1:5</sub> 可通过如下线性关系进行换算:

$$SC=2.446EC_{1:5}$$
 (2)

1.3.3 土壤盐分积累 盐分的累积量( $\Delta S$ ,g/m<sup>2</sup>)为收获初期与播前土壤剖面盐分的差值,根据膜内宽行、带下、窄行不同位置权重计算膜内土壤盐分积累量,裸地的土壤盐分变化代表膜外土壤盐分积累量,

盐分积累总量根据膜内膜外位置进行加权平均,公式如下:

$$\Delta S_{in} = \sum_{i=1}^n 10 H_i \gamma_i \left( \frac{23}{106} \Delta SC_{i, wide} + \frac{38}{106} \Delta SC_{i, drip} + \frac{45}{106} \Delta SC_{i, narrow} \right) \quad (3)$$

$$\Delta S_{out} = \sum_{i=1}^n 10 H_i \gamma_i \Delta SC_{i, bare} \quad (4)$$

$$\Delta S = \frac{106}{152} \Delta S_{in} + \frac{46}{152} \Delta S_{out} \quad (5)$$

式中:Δ*S*<sub>in</sub>, Δ*S*<sub>out</sub>, Δ*S* 分别为膜内盐分积盐量、膜外盐分积盐量及盐分积累总量; Δ*SC*<sub>*i*, wide</sub>, Δ*SC*<sub>*i*, drip</sub>, Δ*SC*<sub>*i*, narrow</sub>, Δ*SC*<sub>*i*, bare</sub> 分别为第 *i* 层收获初期与播前宽行、滴灌带、窄行、裸地的土壤含盐量的变化量; *H<sub>i</sub>* 为第 *i* 层土壤的土层深度 (cm); γ<sub>*i*</sub> 为第 *i* 层土壤的容

重; *i* = 1, 2, ⋯, 6。

1.4 数据处理与分析方法

利用 SPASS 20.0 和 Excel 2007 软件统计分析试验所得数据; 利用 Surfer 12.0 绘图软件绘制土壤剖面水分和盐分的变化规律。

2 结果与分析

2.1 根据土壤水分下限确定田间灌水方案

根据棉花生育特性, 将棉花整个生育期划分为 5 个生育阶段, 根据土壤水分下限确定的田间灌水方案见表 2, 苗期灌一次活苗水后, 蕾期从 6 月 14 日开始灌水一直到吐絮期 8 月 29 日灌水停止。

表 2 不同灌水处理间田间灌水方案

处理	生育期灌水定额(mm)和灌水次数					灌溉 定额/mm	灌水 次数	灌水 频率/d
	苗期 (04-11—06-05)	蕾期 (06-06—06-30)	花期 (07-01—07-25)	铃期 (07-26—08-19)	吐絮期 (08-20—09-20)			
T <sub>1</sub>	15×1	13×6	19×6	19×7	19×2	378	22	4
T <sub>2</sub>	15×1	21×3	32×3	32×4	32×1	334	12	8
T <sub>3</sub>	15×1	29×2	45×2	45×2	0	253	7	13
T <sub>4</sub>	15×1	38×1	58×1	58×1	58×1	227	5	19
T <sub>5</sub>	15×1	46×1	70×1	70×1	0	201	4	26

注: “15×1”是灌水定额为 15 mm, 灌水次数为 1 次。

2.2 土壤水分调控对产量及水分利用效率的影响

土壤水分下限调控下的棉花产量均随着土壤水分下限的增大逐渐增大, 水分利用效率随着土壤水分下限的增大逐渐减小(表 3)。不同土壤水分下限处理的棉花最终产量为 T<sub>1</sub> > T<sub>2</sub> > T<sub>3</sub> > T<sub>4</sub> > T<sub>5</sub>, 其中, T<sub>1</sub> 处理皮棉产量高达 3 484.94 kg/hm<sup>2</sup>, 分别比 T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub> 增加 2.77%, 10.68%, 20.42% 和 21.46%,

T<sub>1</sub> 与 T<sub>2</sub> 处理间没有显著性差异, 灌水下限定为 85%FC 和 75%FC 时棉花产量较高。不同土壤水分下限调控下, T<sub>5</sub> 处理的水分利用效率最高为 0.78 kg/m<sup>3</sup>, 分别比 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 增加 27.86%, 16.42%, 8.33% 和 11.43%, 减少灌水量可以提高棉花对土壤水分的吸收作用, 提高了水分利用效率, 避免了灌溉水资源的无效浪费。

表 3 土壤水分下限调控对棉花产量及水分利用效率的影响

处理	单株 有效铃数	单铃重/ g	收获密度/ (10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	衣分/%	皮棉产量/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	耗水量/ mm	WUE/ (kg · m <sup>-3</sup> )
T <sub>1</sub>	6.29ab	5.26a	25.72a	48.18a	3484.9a	568.0	0.61a
T <sub>2</sub>	7.08a	5.24a	22.66b	47.45b	3391.0a	509.0	0.67b
T <sub>3</sub>	6.33ab	5.24a	23.33b	47.87b	3148.7b	436.0	0.72b
T <sub>4</sub>	5.97b	5.25a	23.00b	47.23b	2894.0c	412.3	0.70b
T <sub>5</sub>	6.07b	5.12b	22.67b	47.91b	2869.2c	366.6	0.78c

2.3 膜下滴灌土壤水盐分布

2.3.1 土壤剖面水分动态变化 图 2 为 2018 年棉花不同生育期 0—100 cm 土层土壤水分变化, 横坐标 23 cm 处为水平方向滴灌带的位置。由于进行过冬灌, 播前土壤含水率大, 因此苗期灌水未做处理, 均灌 15 mm 的活苗水, 苗期 0—40 cm 土层土壤含水率为 20% 左右, 40—100 cm 土层土壤含水率为 26% 左右。从各土层土壤含水率分布情况可以看出, 各处理 0—100 cm 土层土壤含水率分布规律基本一致, 竖直方

向上, 膜内膜外 0—60 cm 土层土壤含水率随土层深度的增加逐渐增大, 60—100 cm 土层土壤含水率随土层深度的增加逐渐减小; 水平方向上, 0—40 cm 土层内, 各处理膜内土壤含水率明显高于膜外土壤含水率, 40—100 cm 土层土壤含水率膜内膜外差异不大, 特别是 80—100 cm 土层在整个生育期土壤含水率基本保持不变, 土壤含水率维持在 23% 左右。

蕾期灌水前, 在土壤水分蒸发和作物蒸腾的作用下, 各处理的土壤含水率较苗期明显减少, 特别是主根



区(0—40 cm 土层)水分含量明显减少,而次根区(40—100 cm 土层)水分含量变化不大。进入花期和铃期后棉花枝状叶茂,很大程度上减小了土壤水分蒸发,灌水对土壤水分的影响逐渐明显,灌水措施明显增加 0—40 cm 土层的水分含量。水平方向随着距滴灌带距离的增加,土壤含水率逐渐变小,表现为带下>窄行>宽行>裸地。进入吐絮期,停止灌水后,土壤含水率较花期和铃期时减少,各处理土壤含水率为 16.71%~19.92%,其中  $T_1$  处理最高, $T_3$  处理最低,处理间差异较前期减弱。 $T_3$  处理灌水定额为 45 mm, $T_5$  处理灌水定额为 70 mm, $T_3$ 、 $T_5$  处理在铃期灌水后,土壤含水率一直大于土壤水分下限,吐絮期末灌水,而此时  $T_3$  处理 50—60 cm 土层土壤含水率为 18%,70—90 cm 土层土壤含水率为 23%, $T_5$  处理在 30—40 cm 土层土壤含水率达到 18%,50—90 cm 土层土壤含水率均达到 23%,说明灌水定额越大,保墒能力越强。采用土壤水分下限控制灌水, $T_1$  处理 0—60 cm 土层土壤平均含水率的变化范围为 16.48%~19.39%,每次进行小定额灌溉,土壤水分含量一直处于较高水平; $T_5$  处理 0—60 cm 土层土壤平均含水率的变化范围为 8.72%~19.39%,灌水前土壤含水率最低,棉花因缺水产生亏缺。

**2.3.2 土壤剖面盐分动态变化** 2018 年棉花生育期土壤剖面全盐含量动态变化如图 3 所示。4 月 11 日播种后,5 月 1 日取各处理的土壤进行测定,土壤初始含盐量较低(0.45 g/kg 左右)。各处理在苗期灌一次活苗水(15 mm)后,到了蕾期取 6 月 19 日的土壤(灌前),各处理土壤含盐量较苗期时都产生了积盐现象,土壤含盐量为 2 g/kg 左右,从蕾期进行灌水处理。到了花期,根据土壤水分下限各处理灌水时间不一致,7 月 19 日  $T_2$  处理灌水 32 mm, $T_3$  处理灌水 45 mm,7 月 23 日  $T_1$  处理灌水 19 mm, $T_4$  处理灌水 58 mm, $T_5$  处理灌水 70 mm,7 月 26 日测得的结果显示, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理相比于蕾期,产生了盐分积累,土壤含盐量为 2.4 g/kg,说明  $T_1$  处理一次灌水未能将盐分淋洗, $T_2$ 、 $T_3$  处理在灌水后 7 d 盐分又达到较高水平;而  $T_4$ 、 $T_5$  处理在灌水后 3 d 将盐分淋洗至 1 g/kg, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理土壤盐分含量显著大于  $T_4$ 、 $T_5$  处理,说明  $T_4$ 、 $T_5$  处理一次灌水能将盐分有效淋洗,灌水量为 58 mm 能将盐分深层淋洗至较低水平。

到了铃期, $T_4$  处理在 8 月 9 日灌水 58 mm,在 8 月 19 日对其余各处理进行了灌水,8 月 22 日测得的结果显示,各处理土壤含盐量较花期时减少。一方面,随着棉花的生长,棉花枝状叶茂,很大程度上减小了土壤水分蒸发,继而减小了表层土壤盐分的聚集;另一方面,经过多次灌水,土壤含盐量减少,主根区土

壤盐分淋洗至 0.7 g/kg 左右。 $T_1$ 、 $T_2$  处理随着灌水频率的增加,膜外表层土壤盐分也得到淋洗,而  $T_5$  处理由于土壤水分下限较低,长时间未灌水,灌水后主根区土壤盐分只能淋洗至 1.2 g/kg 左右,这说明土壤的脱盐程度不仅受灌水定额的影响,与灌水频率也有关,灌水定额小,灌水频率大也能将主根区土壤盐分淋洗至较低水平,大灌水定额能一次将盐分彻底淋洗至土壤深层,随着棉花生长和土壤蒸发,盐分又产生了积累,而小灌水定额虽一次不能彻底淋洗土壤盐分,随着灌水次数的增多,淋盐的效果相对更好。

到了吐絮期,8 月 29 日停止灌水,9 月 20 日进行测产,此时各处理土壤含盐量为 1~1.5 g/kg, $T_1$ 、 $T_2$  处理宽行和膜外裸地 0—30 cm 土层土壤含盐量较高,竖直方向上膜内、膜外土壤含盐量随着土层深度的增加,逐渐减小, $T_4$ 、 $T_5$  处理将盐分淋洗至 60—80 cm 土层及膜外,80—100 cm 土层随着土层深度的增加,土壤含盐量逐渐减小。各处理生育期平均盐分含量值均呈现滴灌带处最低,窄行和宽行次之,膜外最大,这是因为盐分的运移主要受水分运移的影响,盐分随水运动,土壤盐分含量随着土壤湿润锋的推移使得表层土壤盐分以滴头为中心向土壤深层和膜外裸地淋洗,而膜外裸地仅有少量灌溉水淋洗盐分,且蒸发强烈使下层盐分随水上移,在上层土壤中集聚。

## 2.4 膜下滴灌土壤盐分积累规律

膜下滴灌棉花在  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$  处理下收获初期与播前土壤剖面盐分含量变化情况见图 4,根据土壤水分下限调控灌水,在吐絮期, $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_4$  处理进行灌水, $T_3$  和  $T_5$  处理未灌水。整体来看,在生育期末各处理的盐分在膜内膜外均积盐,受膜内盐分水平迁移和表土蒸发影响,膜内积盐少于膜外;受表土蒸发的影响,主根区(0—40 cm 土层)积盐量大于次根区(40—100 cm 土层)积盐量。

从图 4 可以看出,与  $T_2$  处理相比, $T_1$  处理膜内盐分积累量与  $T_2$  处理没有显著性差异,膜外盐分积累量显著多于  $T_2$  处理,这是由于  $T_1$  处理土壤水分下限较高,灌水定额较小,一方面,滴灌土壤水分竖直和水平运动距离和范围有限,灌溉水向膜外湿润范围小,膜外主要受到表土蒸发的影响,盐分大量聚集在土壤上层,另一方面, $T_1$  处理灌水频率大,随着灌水频率的增加,湿润峰不断扩大,越多的盐分迁移到膜外。 $T_3$  处理在吐絮期末灌水,由于灌水定额小于  $T_5$  处理,膜内积盐最大,膜外积盐次于  $T_5$  处理。 $T_5$  处理膜内 0—40 cm 土层土壤含盐量与  $T_1$ 、 $T_2$  处理相比差异不大,膜外 0—40 cm 土层的土壤盐分相对较大,膜外土壤积盐严重,这是由于  $T_5$  处理土壤水分下限较低,灌水定额大,膜内土

壤盐分随着湿润峰迁移到膜外,且吐絮期未进行灌水,膜外土壤在表土蒸发下上层积盐。 $T_4$  处理在吐絮期灌水后,灌溉水将 0—40 cm 土层盐分淋洗至膜内 40—100 cm 土层及膜外 0—40 cm 土层,膜内 0—

40 cm 土层的盐分显著低于其他处理,而  $T_1, T_2$  处理在吐絮期同样进行了灌水,说明灌水定额越大,对膜内 0—40 cm 土层淋盐效果更好。膜内膜外 0—100 cm 土层盐分积累总量呈现  $T_3 > T_5, T_1 > T_2, T_4$ 。

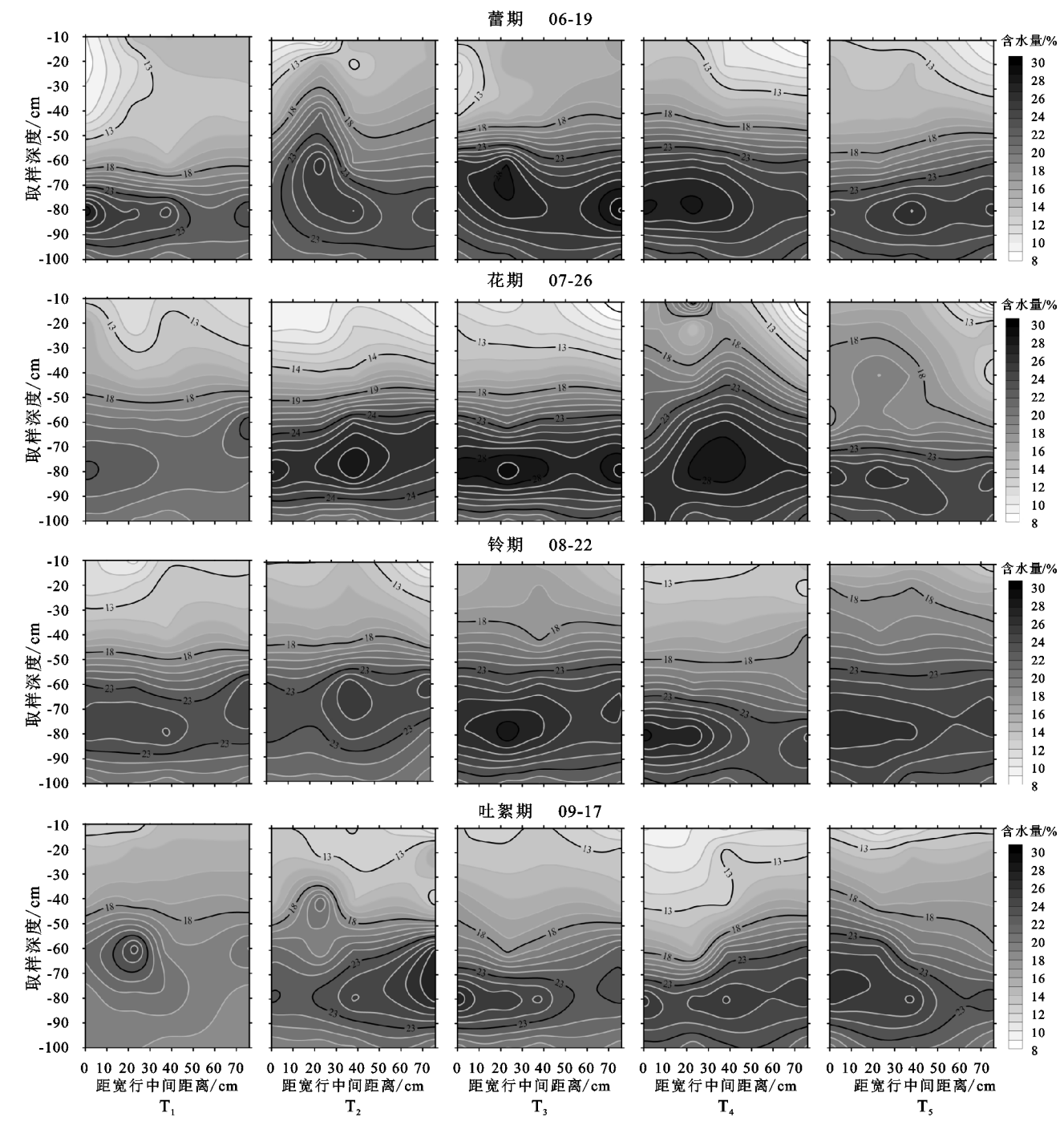


图 2 棉花不同生育期各处理土壤含水量动态变化

### 3 讨论

由于进行过冬灌,播前土壤含水率较大,在土壤水分蒸发作用下,土壤含水率逐渐减少,蕾期灌水后土壤含水率逐渐增大,到铃期时土壤含水率达到最大,吐絮期停止灌水后土壤含水率又逐渐减小。土壤盐分的变化特征是播前土壤盐分很小,苗期土壤盐分

升高,到蕾期和花期土壤含盐量持续升高,到铃期土壤盐分减少,吐絮期时土壤含盐量又有所增高,充分体现了“盐随水动”的特点。高龙等<sup>[21]</sup>认为作物主根区土壤含水率自靠近滴灌带的宽行往外至膜间逐渐降低,土壤含盐率呈相反的规律分布,灌溉期靠近灌溉带的主根区土壤处于脱盐状态,远离灌溉带的土壤处于积盐状态。本文结果与之一致,地膜中央滴头

处土壤含盐量最低,由于受到灌溉水分淋洗充分,该处各层剖面土壤水分达到饱和使含盐量较低,棉花窄行比滴头附近区域大,是盐分随水扩散的结果,裸地因蒸发强度大和湿润峰的盐分运移及交汇作用,

土壤含盐量高于前两处。水平方向随着距滴灌带距离的增加,土壤含水率逐渐变小,表现为带下>窄行>宽行>裸地,土壤含盐量高低顺序为带下<窄行<宽行<裸地。

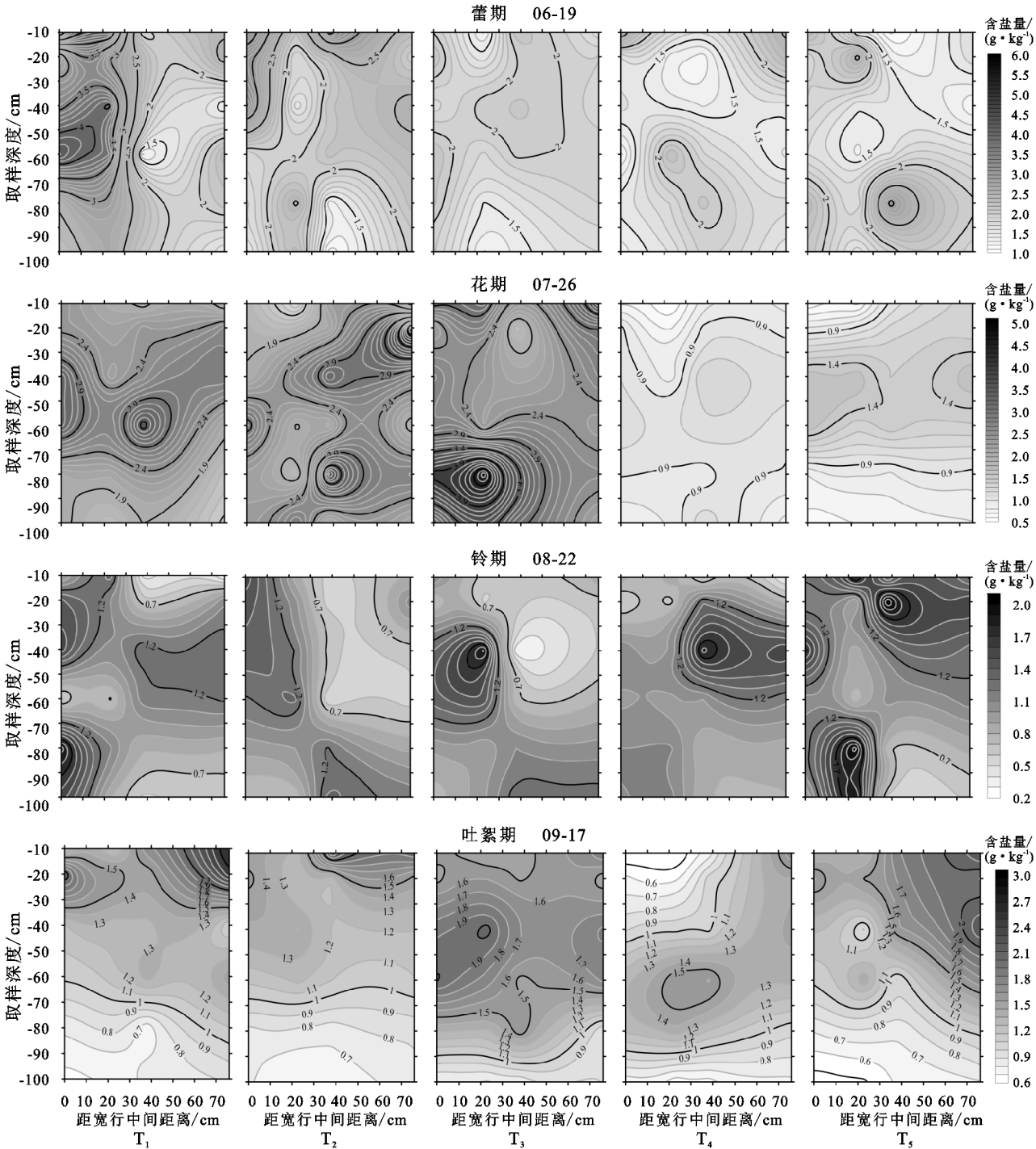


图 3 棉花不同生育期各处理土壤含盐量动态变化

张伟等<sup>[22]</sup>初步得出从生育初期到生育末期的过程中,各土层含盐量都有不同程度的加大,垂直方向盐分的积累在土层范围内是逐渐增加的,深层土层盐分积累受到膜下滴灌的影响较小。王增丽等<sup>[23]</sup>认为在土壤水分蒸发过程中,在垂直方向上,土壤表层发生积盐现象,中层发生脱盐现象,深层土壤盐分变化

基本稳定,在灌溉过程中,随灌水定额的增加,土层发生积盐、脱盐现象的深度增加。张磊等<sup>[24]</sup>认为灌水后,各处理土壤含水率均逐渐升高,以膜下 0—20 cm 最为显著,裸地 0—60 cm 变化不明显。本文结果与之相似,灌水后,膜内膜外的土壤含水率均随土层深度的增加先逐渐增大后逐渐减小,0—40 cm 土层内,



各处理膜内土壤含水率明显高于膜外土壤含水率, 40—100 cm 土层土壤含水率膜内膜外差异不大, 特别是 80—100 cm 土层土壤含水率基本保持不变。在生育期末各土层盐分变化规律是各处理在膜内膜外均积盐, 受膜内盐分水平迁移和表土蒸发影响, 膜内积盐少

于膜外; 受表土蒸发的影响, 主根区积盐量大于次根区积盐量, 膜外土壤盐分主要受表土蒸发的影响, 越接近地表, 土壤盐分所受影响越大, 膜外土壤表层 0—10 cm 的盐分积累量大于土壤深层的积盐量, 膜内膜外 0—100 cm 土层盐分积累总量呈现  $T_3 > T_5, T_1 > T_2, T_4$ 。

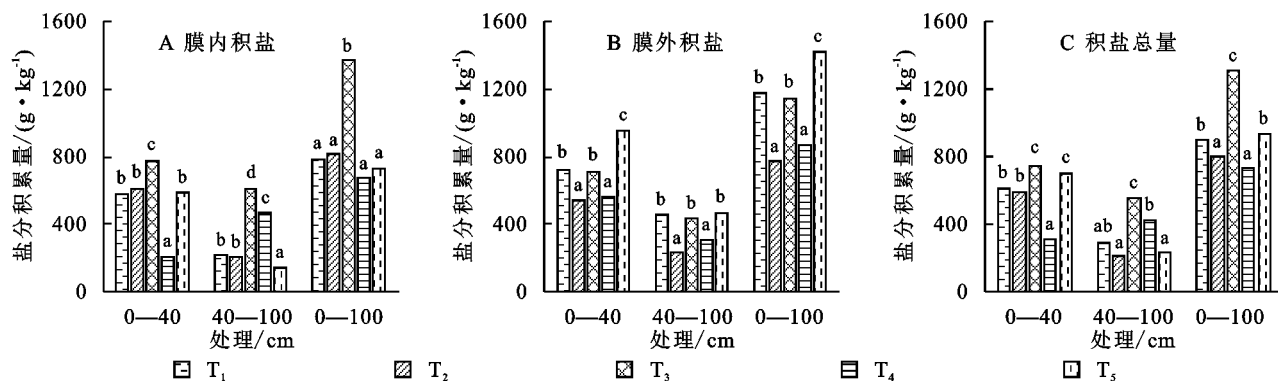


图4 吐絮期不同处理盐分积累量

本文与汪昌树等<sup>[14]</sup>的研究结果不同, 土壤水分下限定的高时, 灌水越频繁, 土壤剖面有较高的水分含量和较低的盐分积累, 棉花产量高; 土壤水分下限较低时, 灌水定额大, 灌溉水向膜外湿润范围大, 滴灌湿润峰的竖直距离大, 但灌水频率低, 灌溉定额最小, 棉花产量较低。这与李金刚等<sup>[25-27]</sup>在河套灌区的研究结果一致, 他们认为随着灌水下限的增大, 灌水越频繁, 湿润层土体含水率增大, 越多的盐分迁移到膜外, 玉米产量随着灌水下限的降低而减少。邹小阳等<sup>[6]</sup>认为存在极限埋深的阈值, 地下水埋深应该大于极限埋深阈值, 以避免土壤盐渍化。由于巴州灌溉试验站地下水位较低(为 4~6 m), 不存在地下水补给, 本试验地 2017 年进行过冬灌, 地下水位较高(为 1.3~2.1 m), 李金刚<sup>[25-26]</sup>和孙贯方<sup>[27]</sup>等的试验地在上一年进行过秋浇, 地下水水位都较高(1.89~3.08 m)。当土壤水分下限较低时, 随着土壤水分的逐渐减少, 地下水向上补给, 土壤含水率很难达到设置的下限, 因此灌水次数少, 大灌水定额将盐分淋洗至土壤深层后, 随着地下水向上补给并产生潜水蒸发, 土壤盐分又不断在表层集聚, 土壤积盐严重。

膜下滴灌使盐分在空间位置上的差异性分布只是在作物生长季节有助于作物避盐, 但是一旦经过下茬耕作, 盐分重新均匀分布, 将逐渐使表层土壤含盐量上升<sup>[22]</sup>。Liu 等<sup>[28]</sup>结果表明滴灌不能使根区土壤盐分浸出, 为防止根区积累过多的盐分, 必须进行洗盐以维持土壤水盐平衡。在生育期末各处理各土层膜内膜外均积盐, 因此, 定期进行大水漫灌洗盐如进行冬灌是土壤脱盐的有效手段。杨九刚等<sup>[29]</sup>认为南疆棉花膜下滴灌灌溉定额宜控制在 375~450 mm, 灌水频次宜控制在 12~16 次。Tan 等<sup>[30]</sup>采用作物生长模型进行模拟的结果表明南疆地区粉质壤土适

宜灌溉量为 355~457 mm, 砂质壤土适宜灌水量为 406~462 mm。本文结果与之相似, 膜内膜外 0—100 cm 土层盐分积累总量呈现  $T_3 > T_5, T_1 > T_2, T_4$ , 皮棉产量  $T_1, T_2 > T_3 > T_4, T_5$ , 水分利用效率  $T_5 > T_2, T_3, T_4 > T_1$ , 综合考虑在保证棉花产量的同时达到节水排盐的目的,  $T_2$  处理较好, 建议南疆棉花生长的适宜灌水下限为 75%FC, 非生育期进行冬灌压盐, 冬灌定额为 300 mm, 生育期灌溉定额为 334 mm, 耗水量 509 mm, 整个生育期灌水 12 次, 具体的灌水根据土壤水分下限进行调控。

## 4 结论

(1) 灌水后, 水平方向随着距滴灌带距离的增加, 土壤含水率逐渐变小, 表现为带下 > 窄行 > 宽行 > 裸地, 土壤含盐率呈相反的规律分布; 随土层深度的增加, 膜内膜外的土壤含水率均先逐渐增大后逐渐减小, 主根区水分分布受灌溉水以及土壤蒸发的影响较大, 次根区水分波动较小, 特别是 80—100 cm 土层土壤含水率基本保持不变。

(2) 在生育期末各土层盐分变化规律是各处理在膜内膜外均积盐, 受膜内盐分水平迁移和表土蒸发影响, 膜内积盐少于膜外; 受表土蒸发的影响, 主根区积盐量大于次根区积盐量, 膜内膜外 0—100 cm 土层盐分积累总量呈现  $T_3 > T_5, T_1 > T_2, T_4$ 。

(3) 土壤的脱盐程度不仅受灌水定额的影响, 与灌水频率也有关。土壤水分下限定的高时, 灌水定额小, 虽一次不能彻底淋洗土壤盐分, 但随着灌水频率的增加, 灌溉水向膜外湿润范围逐渐增大, 越多的盐分迁移到膜外, 棉花产量较高; 土壤水分下限较低时, 灌水定额大, 灌水定额为 58 mm 能一次将盐分彻底淋洗至土壤深层, 由于较高的次灌水量, 可将较多的



盐分淋洗出作物根区,但灌水频率低,灌溉定额较小,随着棉花生长和土壤蒸发,盐分又产生了积累,棉花产量较低。

(4) 综合考虑在保证棉花产量的同时达到节水排盐的目的,建议南疆棉花生长的适宜灌水下限为75%FC,采用1膜2管四行的种植方式,非生育期进行冬灌压盐,冬灌定额为300 mm,生育期灌溉定额为334 mm,耗水量509 mm,整个生育期灌水12次。

#### 参考文献:

- [1] Li X W, Jin M G, Zhou N Q, et al. Evaluation of evapotranspiration and deep percolation under mulched drip irrigation in an oasis of Tarim basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 677-688.
- [2] 宁松瑞,左强,石建初,等.新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(22): 90-99.
- [3] 潘伟,杨德刚,杨莉,等.新疆棉花种植面积的时空变化及适度规模研究[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 415-420.
- [4] 张山清,普宗朝,李景林,等.气候变暖背景下南疆棉花种植区划的变化[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(5): 594-601.
- [5] 姚宝林.南疆免冬春灌棉田土壤水热盐时空迁移规律与调控研究[D].北京:中国农业大学,2017.
- [6] 邹小阳,刘涛,杨以翠,等.滴灌条件下土壤水盐运移特征及影响因素研究综述[J]. *现代农业科技*, 2018(22): 192-195.
- [7] 王全九,王文焰,汪志荣,等.盐碱地膜下滴灌技术参数的确定[J]. *农业工程学报*, 2001, 12(2): 47-50.
- [8] 马铃,曾胜何,马萍,等.棉花膜下滴灌水盐运动规律研究[J]. *新疆农业大学学报* 2001, 24(2): 30-34.
- [9] 张金珠.北疆膜下滴灌棉花土壤水盐运移特征及耗水规律试验研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2010.
- [10] Zhang Z, Hu H C, Tian F Q, et al. Soil salt distribution under mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2014, 104: 23-33.
- [11] 吕殿青,王全九,王文焰,等.膜下滴灌水盐运移影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2002, 39(6): 794-801.
- [12] Hanson B R, Orloff S, Peters D. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management[J]. *California Agriculture*, 2000, 54(3): 38-42.
- [13] Thompson R B, Gallardo M, Valdez L C, et al. Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 92(1/2): 13-28.
- [14] Tedeschi A, Menenti M. Simulation studies of long term saline water use: Model validation and evaluation of schedules [J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 54(2): 123-157.
- [15] 汪昌树,杨鹏年,姬亚琴,等.不同灌水下限对膜下滴灌棉花土壤水盐运移和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 232-238.
- [16] 牟洪臣,虎胆·吐马尔白,苏里坦,等.干旱地区棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 18-22.
- [17] 吴争光,虎胆·吐马尔白,张金珠,等.不同灌水频率棉花膜下滴灌土壤水盐运移规律研究[J]. *新疆农业大学学报*, 2009, 32(4): 50-54.
- [18] 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 (9): 123-126.
- [19] 崔永生,王峰,孙景生,等.南疆机采棉田灌溉制度对土壤水盐变化和棉花产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3634-3642.
- [20] 刘新永,田长彦,马英杰.南疆膜下滴灌棉花耗水规律以及灌溉制度研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(1): 108-113.
- [21] 高龙,田富强,倪广恒,等.膜下滴灌棉田土壤水盐分布特征及灌溉制度试验研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(12): 1483-1490.
- [22] 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.
- [23] 王增丽,董平国,樊晓康,等.膜下滴灌不同灌溉定额对土壤水盐分布和春玉米产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(12): 2345-2354.
- [24] 张磊,曾胜和,梁飞,等.滴水量对膜下滴灌水稻土壤水盐分布及产能的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(4): 110-113.
- [25] 李金刚,屈忠义,黄永平,等.微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 217-223.
- [26] Li J G, Qu Z Y, Chen J, et al. Effect of different thresholds of drip irrigation using saline water on soil salt transportation and maize yield[J]. *Water*, 2018, 10(12): 1855. doi:10.3390/w10121855.
- [27] 孙贯芳,屈忠义,杜斌,等.不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 144-152.
- [28] Liu M X, Yang J S, Li X M, et al. Distribution and dynamics of soil water and salt under different drip irrigation regimes in northwest China[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31: 675-688.
- [29] 杨九刚.南疆棉花膜下滴灌土壤水盐调控适宜灌溉制度研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2011.
- [30] Tan S, Wang Q J, Zhang J H, et al. Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 196: 99-113.