

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.020

干旱绿洲区膜下滴灌棉田土壤盐分时空变化特征研究

姚宝林^{1,2} 李光永¹ 叶含春² 李发永²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 基于 Penman - Monteith 公式设计一定梯度的灌水定额和灌水次数双因素组合试验, 通过 2012—2014 年连续 3 a 免冬、春灌膜下滴灌棉花田间定位试验研究, 测定分析土壤盐分时空变化规律及其对棉花产量的影响。结果表明: 膜下滴灌棉花生育期 0 ~ 30 cm 土壤盐分变幅大于 40 ~ 100 cm, 较小的灌水定额和灌水次数使 0 ~ 30 cm 盐分变幅增大, 棉花苗期和花铃期变幅最为明显。灌水定额对土壤剖面盐分变异程度影响弱于灌水次数。增加灌水定额有利于减小棉花各生育阶段 0 ~ 30 cm 土壤盐分含量。土壤剖面盐分呈“C”形分布, 0 ~ 40 cm 土壤盐分含量灌水 12 次比灌水 16 次大 1.74%, 50 ~ 80 cm 土层土壤盐分含量灌水 16 次比灌水 12 次大 1.71%, 灌水次数对 90 ~ 100 cm 土层土壤盐分影响不明显。同一灌水次数下, 460 mm 灌溉定额籽棉产量最高, 适宜灌溉定额下, 16 次灌水次数籽棉产量高于灌水 12 次籽棉产量。灌溉水利用效率随灌水定额的降低和灌水次数的增加而提高, 在南疆水资源短缺情况下高频次小定额灌溉可获得最大的灌溉水利用效率。当 0 ~ 30 cm 初始土壤含盐量 (2.03 g/kg) 小于 3.0 g/kg 时, 棉花生育期 460 mm 灌溉定额、16 次灌水次数, 不会产生土壤盐分累积情况, 可作为南疆干旱区免冬、春灌适宜棉花灌溉制度。

关键词: 棉田; 干旱绿洲区; 免冬、春灌; 膜下滴灌; 土壤盐分

中图分类号: S276.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0151-11

Characteristics of Spatial and Temporal Changes in Soil Salt Content in Cotton Fields under Mulched Drip Irrigation in Arid Oasis Regions

Yao Baolin^{1,2} Li Guangyong¹ Ye Hanchun² Li Fayong²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China)

Abstract: On the basis of Penman - Monteith formula, the double-factor combination experiments were designed, and the factors included certain gradients of the irrigation quotas and irrigation frequencies. Through consecutive 3-year investigations concerning field experiments of cotton under conditions of mulched drip irrigation with no-winter and spring irrigation (NWSI) from 2012 to 2014, the rules for changes in soil salt content were determined, and the effects of these changes on cotton yield were analyzed. The results showed that during the growth period of cotton, soil salt content within soil layer depths of 0 ~ 30 cm was more conspicuous than that within soil layer depths of 40 ~ 100 cm, smaller irrigation quotas and less irrigation frequency brought about increased magnitudes of changes within soil layer depths of 0 ~ 30 cm, and such changes became the most salient at seedling stage as well as blossing and boll-forming stages. Effects of irrigation quotas on salt content in soil profiles were weaker than such effects exerted by irrigation frequencies. Enhancement of irrigation quotas was beneficial for reductions of salt content within soil layer depths of 0 ~ 30 cm at different stages of cottons growth. Salt content in soil profiles exhibited a “C”-shaped distribution: within soil layer depths of 0 ~ 40 cm, salt content was

收稿日期: 2015-06-10 修回日期: 2015-09-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAC10B01)和国家自然科学基金项目(51169024)

作者简介: 姚宝林(1978—), 男, 博士生, 塔里木大学副教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: yaobaolinabcde@163.com

通信作者: 李光永(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: lgycu@163.com

1.74% greater under 12 irrigations than that under 16 irrigations; within soil layer depths of 50 ~ 80 cm, salt content was 1.71% higher under 16 irrigations than that under 12 irrigations; whereas within soil layer depths of 90 ~ 100 cm, irrigation frequency exerted insignificant effects on salt content. Under the same irrigation frequency, the maximum seed cotton yield occurred under the irrigation quota of 460 mm. Under favorable irrigation quotas, seed cotton yield was greater under 16 irrigations than that under 12 irrigations. Irrigation water use efficiency (IWUE) was enhanced under lowered irrigation quotas and increased irrigation frequencies, and in South Xinjiang afflicted by water deficit, the maximum IWUE can be acquired under high irrigation frequencies and low irrigation quotas. Within soil layer depths of 0 ~ 30 cm, when initial soil salt content amounted to 2.03 g/kg (less than 3.0 g/kg), during the growth period of cotton, an irrigation quota of 460 mm with 16 irrigations did not lead to the situation of soil salt accumulation. Therefore, it can be regarded as a suitable irrigation scheduling for NWSI in arid regions in South Xinjiang.

Key words: cotton fields; arid oasis regions; no-winter and spring irrigation; drip irrigation under mulch; soil salt content

引言

滴灌使作物根系区域土壤保持湿润状态、作物行间土壤保持相对干燥状态,这种“干湿”界面对于调控土壤盐分变化以及重新分配水盐对作物生长的影响等有着较好的正面效应,并且膜下滴灌可改善土壤结构、提高表层土壤饱和含水量进而影响土壤水盐分布,所以滴灌技术作为最适合盐碱地的有效灌溉技术之一得到广泛应用^[1-4]。膜下滴灌具有保水、调温、减少病虫害、增产提质等特点^[5-6]。自1996年在新疆生产建设兵团第(农)八师121团(沙湾县炮台镇)试验成功以来,截止2012年新疆膜下滴灌面积已超过 $2.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[7]。

研究表明膜下滴灌棉花根区土壤一般在垂直方向某一层范围出现脱盐,水平方向在棉花宽行出现盐分积累,但脱盐深度和积盐范围有所不同^[8-10],但也有研究表明土壤湿润峰处的盐分积累现象不会造成整个土层含盐量的增高^[11]。灌水量和灌溉频率(次)作为影响土壤水盐分布的重要参数,一般研究认为随着灌水量的增加,土壤盐分峰值位置呈现下移的趋势^[12]。高频率灌溉有利于提高作物产量、水分利用效率和洗盐效果^[3,13-15],但也有部分学者研究发现高频率灌溉和低频率灌溉对作物产量的影响不明显^[16],可能是由于气候和土壤条件的不同所导致的^[17],高频率灌溉和低频率灌溉均不利于棉花生长^[18]。也有学者在高含盐量(0.8%)和低含盐量土壤中(0.08%)研究发现在灌水量相同条件下高频率灌溉可降低土壤含盐量,并且使棉花增产28%,灌溉频率对低含盐量土壤棉花生长和产量没有显著影响^[19]。

南疆塔里木盆地具有丰富的光热资源、土地资

源以及稳定的水资源,农业用水占总用水量95%以上,灌溉绿洲面积达 $2.23 \times 10^6 \text{ hm}^2$,是中国最大的棉花生产基地。目前对于膜下滴灌土壤盐分运移规律和影响因素方面研究成果大都是在南疆常规冬、春灌情况或北疆干播湿出条件下获得,北疆和南疆在气候特征、土壤类型、降水(雪)量、冬季土壤冻融过程等均有差异,南疆膜下滴灌棉田目前依然沿袭常规的冬、春灌模式,每年常规冬、春灌灌水定额约占全年灌溉定额的50%,一次漫灌常使地下水位上升0.5 m左右^[10]。基于目前已获得研究成果在南疆开展免冬、春灌膜下滴灌技术,尝试通过增加棉花吐絮期灌水量和灌水次数,将目前传统的冬、春灌洗盐压碱调整为棉花生育期滴灌控盐。免冬、春灌改变了留秆棉田冬季土壤冻融和春季蒸发所引起的土壤盐分迁移过程,通过播前犁地、整地等措施使棉花膜间和行间土壤盐分进行重新混合,导致土壤盐分年际间时空变化更为复杂。本文通过田间定位试验,研究南疆免冬、春灌膜下滴灌棉花生育期盐分时空变化特征,探讨南疆免冬、春灌留秆棉田棉花生育期适宜节水控盐灌溉制度,为南疆膜下滴灌棉花种植和水土资源可持续发展提供基本依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地基本概况

试验于2012—2014年在塔里木大学水利与建筑工程学院试验基地(79°23'33" ~ 81°53'45"E, 40°20'00" ~ 41°47'18"N)进行,试验地此前采用常规冬、春灌膜下滴灌种植棉花。海拔高度1020 m,年均气温10.8℃,年均降水量40.1 ~ 82.5 mm,年均蒸发量1976.6 ~ 2558.9 mm,为典型极端干旱气候区,地下水埋深在3 m以下。试验地土壤基本理化参数见表1。

表 1 试验地土壤基本理化参数

Tab. 1 Soil physical and chemical properties measured at the experimental field

土层深度/ cm	土壤干容重/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	田间持水率 (质量分数)/%	阴离子相对含量 ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$)	土壤颗粒质量分数/%			土壤质地
				0~0.002 mm	0.002~0.02 mm	>0.02 mm	
0~10	1.36	19.25	0.042	6.48	41.57	51.95	砂壤土
10~20	1.41	19.34	0.038	6.21	44.26	49.53	砂壤土
20~30	1.43	19.51	0.046	5.89	47.55	46.56	砂壤土
30~40	1.36	20.14	0.035	9.45	41.67	48.88	砂壤土
40~60	1.38	21.12	0.044	8.37	46.81	44.82	砂壤土
60~80	1.45	24.24	0.051	16.51	48.14	35.35	粉质粘土
80~100	1.42	21.28	0.047	7.56	38.22	54.22	砂壤土

1.2 试验设计及农艺管理

试验采用灌水次数和灌水定额双因素组合设计,共 6 个处理,每个处理 3 次重复,共 18 个小区,小区面积为 $5.4\text{ m}\times 20\text{ m}$,为便于管理和定位研究,每个处理的 3 个重复小区作为一个滴灌灌水单元,进水口位置分别安装水表和施肥器进行单独控制,各处理之间设置隔离带,棉花采用“一膜两带四行”种植及滴灌带敷设方式,棉花行距为 $30\text{ cm}+60\text{ cm}+30\text{ cm}$,株距 10 cm ,采用单翼迷宫式滴灌带,直径 16 mm ,滴头间距 30 cm ,实测滴头流量为 1.8 L/h ,棉花为当地主栽品种“新陆中 28 号”(图 1)。灌水次数设 12 次和 16 次 2 个水平^[13-14,19],分别用 T12 和 T16 表示。灌水定额根据 Penman-Monteith 公式 (FAO 1998) 实时计算的 ET_0 和文献灌水量作为参考值^[11-12,18,20-21], ET_0 计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中 ET_0 ——参考作物蒸发蒸腾量,mm/d
 R_n ——净辐射量, $\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
 G ——土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
 γ ——湿度计常数, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$
 T ——日均气温, $^\circ\text{C}$
 U_2 ——离地面 2 m 高处的风速, m/s
 e_a ——饱和水汽压, kPa
 e_d ——实际水汽压, kPa
 Δ ——温度-饱和水汽压关系曲线在 T 处的切线斜率, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$

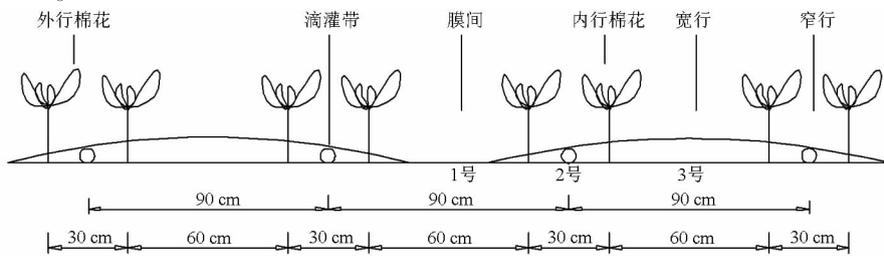


图 1 一膜两带四行种植模式与土壤取样点示意图

Fig. 1 Field scheme of four cotton rows with one dripping pipe under plastic film mulching and soil water content sampling point

气象数据由试验基地自动气象站实时获取,计算过程参照 SL 13—2004《灌溉试验规范》进行。设计 I1、I2 和 I3 3 个灌水定额,共计 6 个处理,2012—2014 年 3 年 ET_0 和日均温度变化如图 2 所示,试验设计及灌水方案见表 2。

各处理每年 4 月中、下旬进行棉杆拔除、清地、犁地、耙地、敷带覆膜、播种等耕作环节,犁地时施入尿素 $180\text{ kg}/\text{hm}^2$,磷酸二氢铵 $225\text{ kg}/\text{hm}^2$,硫酸钾镁 $150\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。棉花蕾期和花铃期分 4 次随水滴入棉花滴灌专用肥 (N、 P_2O_5 、 K_2O 质量比为 16:29:6) $450\text{ kg}/\text{hm}^2$,生育期病虫害防治和生长调节剂 (缩节胺) 的喷施及其他农艺措施各处理均相同。试验灌

溉水为井水,矿化度 0.11 g/L ,灌前抽入 30 m^3 水池通过调压水泵经过过滤器、流量计等滴灌系统首部后在各处理进水口位置安装水表记录灌水量。

1.3 试验测定项目及方法

每个试验小区土壤盐分取样时间为播前,和生育期间隔 7~10 d 进行,每个小区采用土钻取土,取土位置分别在膜间 (1 号)、滴灌带下 (2 号) 和宽行 (3 号) 3 个位置,如图 1 所示。由于“一膜两带四行”种植模式棉花根系主要分布在膜间、窄行和宽行位置,本文主要讨论 0~100 cm 垂直方向和以滴灌带为中心两侧水平方向 45 cm 范围土壤盐分。取土深度 100 cm,每隔 10 cm 为一层,将 3 个位置相应

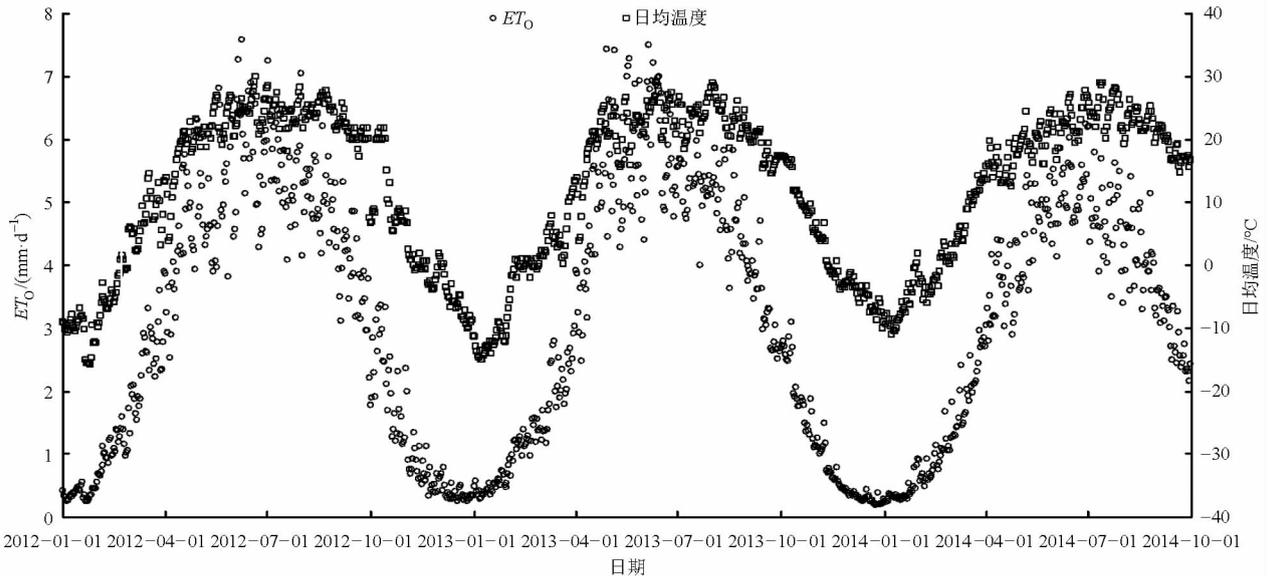
图2 2012-01-01—2014-10-01 ET_0 和日均温度变化Fig.2 Reference evapotranspiration (ET_0) and daily temperature changes in 2012-01-01—2014-10-01

表2 2012—2014年膜下滴灌棉花试验设计与灌水方案

Tab.2 Experimental design and irrigation treatment for film mulching drip irrigation of cotton in 2012—2014

处理	苗期		蕾期		花铃期		吐絮期		灌溉定额/ mm
	灌水定额/mm	灌水次数	灌水定额/mm	灌水次数	灌水定额/mm	灌水次数	灌水定额/mm	灌水次数	
I1T12	0.20 ET_0 ^a		0.50 ET_0		0.75 ET_0		0.40 ET_0		360.00 ± 44.54
	38.67 ± 2.31 ^b		69.67 ± 5.51		189.67 ± 9.07		62 ± 29.31		
I2T12	0.25 ET_0	2	0.60 ET_0	3	0.85 ET_0	5	0.55 ET_0	2	459.33 ± 98.15
	48.67 ± 2.31		83.00 ± 6.56		214.33 ± 9.29		85 ± 39.69		
I3T12	0.30 ET_0		0.75 ET_0		0.95 ET_0		0.70 ET_0		532.00 ± 101.06
	58.33 ± 2.89		103.67 ± 7.09		239.33 ± 9.45		109 ± 52.37		
I1T16	0.20 ET_0		0.50 ET_0		0.75 ET_0		0.40 ET_0		360.00 ± 44.54
	38.67 ± 2.31		69.67 ± 5.51		189.67 ± 9.07		62 ± 29.31		
I2T16	0.25 ET_0	3	0.60 ET_0	4	0.85 ET_0	7	0.55 ET_0	2	459.33 ± 98.15
	48.67 ± 2.31		83.00 ± 6.56		214.33 ± 9.29		85 ± 39.69		
I3T16	0.30 ET_0		0.75 ET_0		0.95 ET_0		0.70 ET_0		532.00 ± 101.06
	58.33 ± 2.89		103.67 ± 7.09		239.33 ± 9.45		109 ± 52.37		

注:灌水定额、灌溉定额为2012—2014年3a的平均值。a为灌水定额计算值,b为灌水定额真实值,数据格式为“平均值±标准差”,其余同。

土层土样混合作为一个小区土样进行测定,每层湿土土样称取40g左右,风干过1mm土筛后称取20g置于容积为250mL的三角瓶中,按照土水质量比1:5加入100mL的蒸馏水在振荡机上振荡10min,静止15min后进行过滤,用DDSJ-308A型电导率仪测定浸提液电导率(EC),用干燥残渣法标定后换算成土壤盐分质量比($y = 0.0037x + 1.0291$, $R^2 = 0.976$, $n = 115$; y 为含盐量, g/kg, x 为电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$),3个重复数据平均得到处理数据。吐絮期籽棉人工采摘,采摘时在各处理小区选取面积为2.0m×1.8m的样方,称取每次实际采摘籽棉产量并记录棉株数,则棉花总产量计算式为

$$Y = 0.001n_i g_i \rho \quad (2)$$

式中 Y ——籽棉产量, kg/hm^2

n_i ——单株棉铃数,个/株

g_i ——单铃质量, g

ρ ——种植密度,株/ hm^2

灌溉水利用效率(IWUE)计算公式^[15-16]为

$$I_{\text{WUE}} = \frac{Y}{I} \quad (3)$$

式中 I_{WUE} ——灌溉水利用效率, kg/m^3

I ——灌溉定额, mm

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2003进行数据处理和制图,并用SPSS 16.0进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 土壤含盐量随时间变化

2012—2014年3a土壤含盐量随时间变化如图3所示。2013年土壤剖面含盐量变幅大于2012、

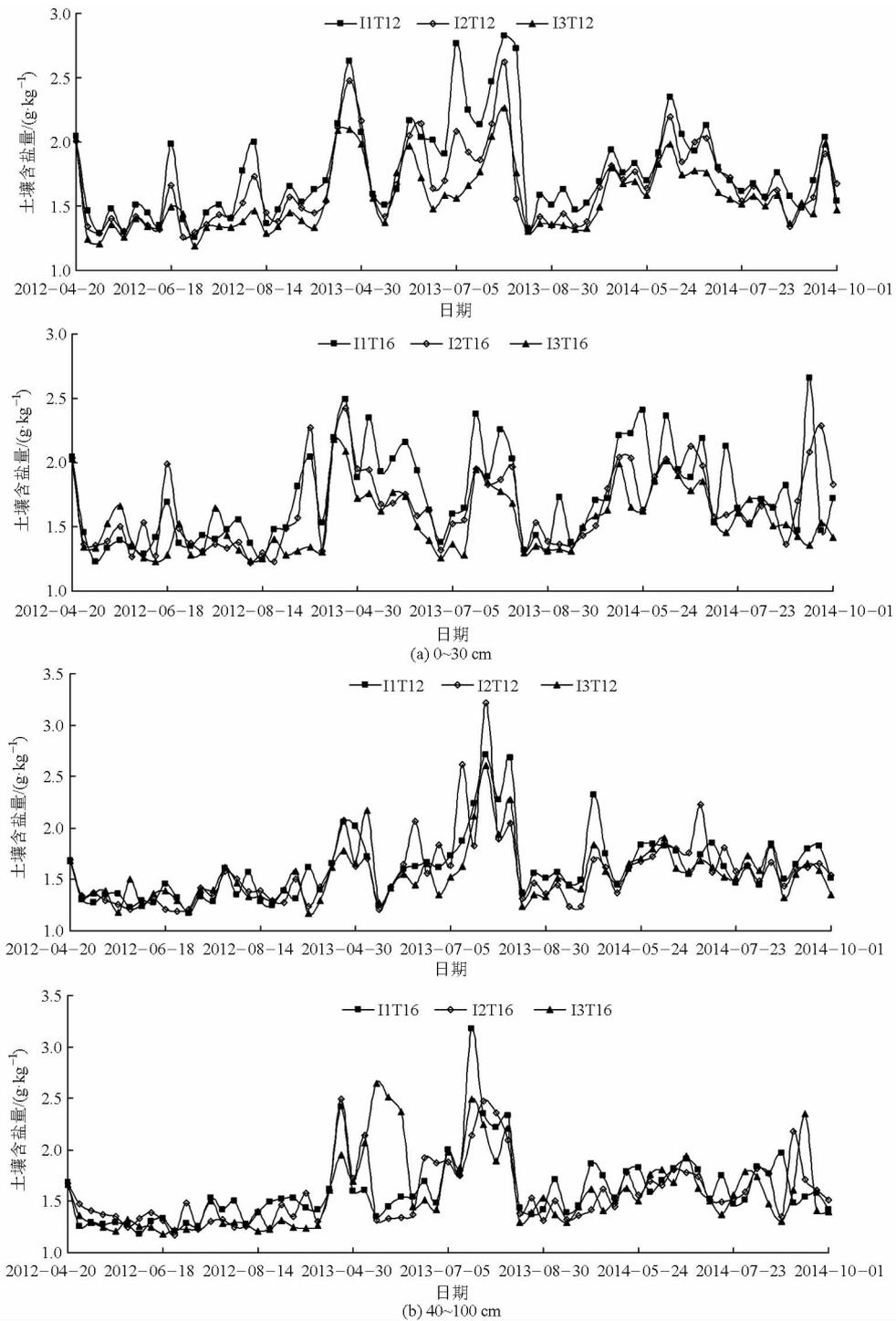


图 3 2012-04-20—2014-10-01 膜下滴灌棉花土壤盐分变化

Fig. 3 Soil salt content of cotton drip irrigation under plastic film in 2012-04-20—2014-10-01

2014 年,出现这一现象主要是试验地 2012 年之前采用常规冬、春灌膜下滴灌技术,土壤盐分淋洗充分,2012 年各处理土壤含盐量变化平稳,2013 年土壤含盐量增加,可能是由于前期一直采用常规冬、春灌淋洗盐分模式使土壤剖面盐分分布均匀,而采用免冬、春灌模式后,经过 2012 年度棉花生长季和冬季冻融作用导致 2013 年播前和全生育期土壤盐分增加,通过增加棉花吐絮期灌水量和土壤剖面盐分的自平衡过程,2014 年土壤盐分变化趋于稳定。

3 a 各处理膜下滴灌棉花生育期 0~30 cm 土壤含盐量变幅大于 40~100 cm,较少的灌水次数和灌水定额使 0~30 cm 盐分变幅增大,在棉花苗后期和花铃期变幅最为明显,苗后期土壤上层盐分的剧烈波动主要是此时棉花遮荫率小,苗期灌水溶解了土壤中的盐分,在蒸发作用下土壤下层盐分按照“盐随水动”的运移特点向上移动和灌水共同所引起;花铃期棉花处于生殖生长阶段,棉株生长茂盛耗水强度最大,同时由于棉花根系吸水作用及施肥因素,各处

理盐分出现剧烈波动^[9]。

为了更好地分析和比较各处理土壤盐分在生育期的差异性,选取统计中描述变异度的变异系数 C_V 进行分析,变异系数 C_V 反映了随机变量的离散程度,其计算公式为

$$C_V = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

式中 σ ——样本标准差

μ ——样本均值

根据土壤盐分变异划分等级($C_V \leq 0.1$ 为弱变异, $0.1 < C_V \leq 1$ 为中等变异, $C_V > 1$ 为强变异)判别,3年各处理盐分均为中等变异(表3),表明膜下滴灌棉花种植模式土壤含盐量变异系数波动较小,可有效维持膜下土壤含盐量稳定^[22]。2012年和2014年各处理土壤盐分变异系数0~30 cm大于深层40~100 cm,由棉花生育期灌水、施肥和蒸散等原因引起。2013年土壤盐分变异程度则为深层40~100 cm大于0~30 cm,可能是由于灌溉模

式的改变导致下层土壤盐分在灌溉和蒸散共同作用下使下层土壤盐分剧烈波动。0~30 cm 土层3 a 盐分变异幅度相同灌水定额下12次灌水次数大于16次灌水次数,其中I2T16处理3 a 盐分变异系数变化幅度最小(C_V 为19.16%~20.71%)。40~100 cm 土层3 a 盐分变异幅度相同灌水定额下16次灌水次数比12次灌水次数变异明显,I3T12盐分变异系数变化幅度最小(C_V 为13.56%~24.13%),I3T16变化幅度最大(C_V 为11.08%~31.26%)。0~100 cm 盐分变异系数由大到小为:2013年(C_V 平均为27.12%)、2014年(C_V 平均为16.84%)、2012年(C_V 平均为13.52%)。灌水定额对土壤剖面盐分变异程度的影响弱于灌水次数。相同灌溉定额下,减少灌水次数,灌水时间间隔延长,在腾发作用下土壤盐分向表层积聚,而灌水次数增加,使上层土壤长时间保持在湿润状态,盐分表聚现象减弱,盐分变异程度降低。

表3 2012—2014年土壤盐分变异系数

Tab.3 Soil salt content coefficient of variation in 2012—2014

处理	2012年			2013年			2014年		
	0~30 cm	40~100 cm	0~100 cm	0~30 cm	40~100 cm	0~100 cm	0~30 cm	40~100 cm	0~100 cm
I1T12	16.44	12.99	14.03	25.85	29.86	28.66	16.95	16.52	16.65
I2T12	13.38	12.78	12.96	24.17	29.97	28.23	14.54	14.29	14.37
I3T12	12.93	13.56	13.37	19.68	24.13	22.79	15.57	13.69	14.25
I1T16	18.62	12.81	14.55	23.84	30.57	28.56	25.85	16.35	19.20
I2T16	20.71	12.51	14.97	19.16	30.47	27.08	20.37	16.91	17.95
I3T16	11.54	11.08	11.22	17.50	31.26	27.42	15.89	19.80	18.63

连续3 a 棉花各生育阶段平均土壤含盐量变化如图4和图5所示。12次灌水0~30 cm 含盐量蕾期最大,花铃期和吐絮期逐渐减小,16次灌水除吐絮期含盐量略有增加外,蕾期和花铃期含盐量均小于12次灌水处理,分别减小了5.36%和5.16%。16次灌水在蕾期和花铃期比12次灌水更能使土壤0~30 cm 保持较小土壤含盐量。40~100 cm 12次

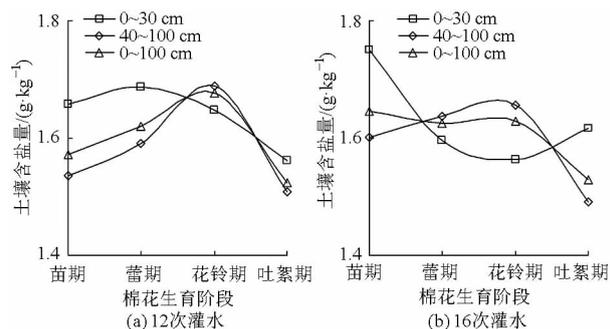


图4 不同灌水次数棉花生育期土壤盐分变化

Fig.4 Soil salt content change in cotton growth stage under different irrigation frequencies

和16次灌水土壤盐分变化过程相同,但16次灌水土壤含盐量小于12次灌水。从0~100 cm 土层范围看,16次灌水次数花铃期土壤盐分峰值小于12次灌水土壤盐分峰值。

棉花各生育阶段0~30 cm 土壤含盐量随灌水定额的增加而降低,均表现为 $I3 < I2 < I1$, 苗期I3比I2、I1分别减小3.76%和36.00%;蕾期减小9.58%和53.44%;花铃期减小3.15%和11.14%,吐絮期减小12.37%和15.92%。40~100 cm 土壤含盐量在花铃期达到最大,表现为 $I1 > I2 > I3$, I1比I2、I3分别高4.64%和6.70%。增加灌水定额有利于减小棉花各生育阶段土壤含盐量,尤以0~30 cm 土壤范围最为明显。免冬、春灌膜下滴灌棉花蕾期和花铃期增加灌水定额和灌水次数有利于土壤上层盐分的淋洗和脱盐。

2.2 不同灌溉制度土壤剖面含盐量变化

不同灌水定额和灌水次数0~100 cm 剖面3 a 平均土壤含盐量如图6所示。土壤剖面盐分呈“C”

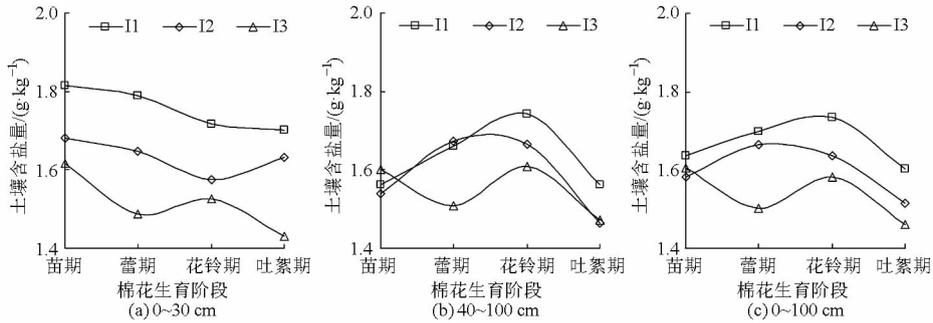


图5 不同灌水定额棉花生育期土壤盐分变化

Fig. 5 Soil salt content change in cotton growth stage under different irrigation quotas

形分布, 0~40 cm 和 90~100 cm 土壤含盐量高于 50~80 cm。增加灌水次数有利于土壤上层盐分淋洗, 但下层盐分淋洗不充分, 0~40 cm 土壤含盐量灌水 12 次比灌水 16 次高 1.74%, 50~80 cm 之间土壤含盐量灌水 16 次比灌水 12 次高 1.71%, 灌水次数对 90~100 cm 土层范围土壤盐分影响不明显。灌水定额的增加有利于上层土壤盐分的淋洗且主要集中在 0~60 cm 范围, 随土壤深度的增加, 灌水定额对土壤盐分的影响减弱, 0~10 cm 土壤含盐量 I1 比 I2、I3 分别高 4.53% 和 13.42%, 0~60 cm I1 比 I2、I3 分别高 4.61% 和 10.39%, 100 cm 处 3 种灌水定额土壤含盐量均在 1.68 g/kg 左右。频繁灌水使表层土壤中的盐分随水移动并淋洗到浸润体外缘, 但是受作物根系吸水、腾发、施肥和土壤水分垂向运动等因素的影响, 土壤上层平均含盐量高于下层, 较大的灌水定额和灌水次数更能创造作物根系层适宜的土壤盐分环境。

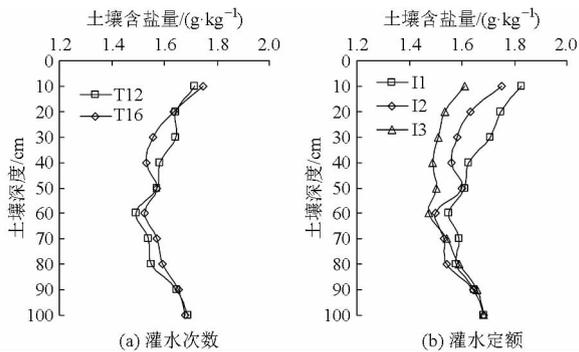


图6 3 a 不同灌溉制度棉花生育期土壤剖面平均盐分分布

Fig. 6 Average soil salt content under different irrigation regimes in cotton growth period during three years

2.3 不同灌溉制度对播前土壤盐分的影响

冬季休闲期棉田在冻融和蒸发作用下土壤盐分表聚明显, 播前土壤含盐量较大。一般研究认为, 棉花各生育阶段耐盐程度以萌芽出苗时期最小, 幼苗阶段对盐分最为敏感, 董合忠等研究滨海盐碱土表明当土壤含盐量为 2 g/kg 以下时, 棉花基本能正常

出苗、成苗; 当含盐量为 2~3 g/kg 时, 只有 60%~78% 的种子可以出苗, 45%~55% 的种子能够成苗; 含盐量超过 4 g/kg 时, 出苗率为 40% 左右, 成苗率不足 30%^[23]。王春霞等研究得出棉花出苗时土壤含盐量的临界值为 4.2 g/kg^[24]。所以对 3 a 各处理播前土壤盐分进行分析(表 4)。免冬、春灌 3 a 0~30 cm 和 0~100 cm 播前土壤含盐量为 2013 年 > 2012 年 > 2014 年, 12 次和 16 次灌水次数播前 0~30 cm 土层土壤含盐量 2014 年比 2012 年和 2013 年分别减少了 8.72% 和 17.72%, 含盐量减少从大到小依次为 I3 (17.57%)、I1 (10.76%)、I2 (10.62%), 0~100 cm 土壤含盐量 12 次和 16 次灌水分别减少了 8.01% 和 10.65%, 不同灌水定额土壤含盐量减少从大到小依次为 I3 (15.77%)、I2 (9.78%)、I1 (2.51%)。2012—2014 年各处理 0~100 cm 土壤含盐量减少从大到小依次为 I3T16 (20.34%)、I3T12 (11.24%)、I2T12 (10.06%)、I2T16 (9.50%)、I1T12 (2.78%)、I1T16 (2.23%)。由于冬季休闲期棉田采用留秆措施, 免冬、春灌使棉田休闲期土壤含水率降低, 土壤表层一直处于干燥状态, 改变了常规冬、春灌条件下土壤冻融过程和蒸发过程, 降低了休闲期由于冻融和蒸发使盐分向土壤上部运移的驱动力, 可见, 棉花生育期采用合理的灌水定额和灌水次数可维持免冬、春灌棉田播前较低的含盐量。

2.4 不同灌溉制度棉花产量与灌溉水利用效率

3 a 籽棉产量和灌溉水利用效率如表 5 所示。同一灌水次数下, 籽棉产量从大到小依次为 I2、I3、I1, 12 次灌水中 I2T12 籽棉产量为 6 661.05 kg/hm², 比 I3T12、I1T12 分别增产 0.78% 和 3.99%, 16 次灌水中 I2T16 籽棉产量为 6 745.66 kg/hm², 比 I3T16、I1T16 分别增产 2.04% 和 2.56%。同一灌水定额下, I1T16、I2T16 比 I1T12、I2T12 籽棉产量分别增加 2.77% 和 1.27%, 但 I3T16 比 I3T12 籽棉产量减少 0.02%。相同灌水次数下, 适量灌水定额有利于提高籽棉产量, 而在适量灌水定额下, 16 次灌水更有

表4 不同处理2012—2014年播前土壤盐分变化

Tab.4 Change of soil salt content of pre-sowing for different treatments during 2012 to 2014

g/kg

土层深度/cm	时间	I1T12	I2T12	I3T12	I1T16	I2T16	I3T16
0~30	2012-04-20	2.05 ± 0.01 ^b	2.01 ± 0.04 ^b	2.02 ± 0.12 ^{ab}	2.04 ± 0.20 ^b	2.04 ± 0.10 ^b	2.02 ± 0.07 ^a
	2013-04-22	2.63 ± 0.03 ^a	2.48 ± 0.10 ^a	2.09 ± 0.10 ^a	2.49 ± 0.15 ^a	2.42 ± 0.12 ^a	2.09 ± 0.10 ^a
	2014-04-19	1.93 ± 0.02 ^c	1.82 ± 0.09 ^c	1.80 ± 0.10 ^b	1.72 ± 0.08 ^c	1.80 ± 0.18 ^b	1.53 ± 0.15 ^b
40~100	2012-04-20	1.69 ± 0.10 ^b	1.69 ± 0.05 ^b	1.68 ± 0.09 ^{ab}	1.67 ± 0.10 ^b	1.68 ± 0.11 ^b	1.67 ± 0.11 ^b
	2013-04-22	2.22 ± 0.09 ^a	2.20 ± 0.07 ^a	1.87 ± 0.11 ^a	2.44 ± 0.11 ^a	2.47 ± 0.11 ^a	1.99 ± 0.12 ^a
	2014-04-19	1.81 ± 0.06 ^b	1.67 ± 0.11 ^b	1.65 ± 0.10 ^b	1.75 ± 0.13 ^b	1.67 ± 0.10 ^b	1.45 ± 0.08 ^c
0~100	2012-04-20	1.80 ± 0.05 ^b	1.79 ± 0.10 ^b	1.78 ± 0.11 ^a	1.79 ± 0.09 ^b	1.79 ± 0.10 ^b	1.77 ± 0.13 ^a
	2013-04-22	2.05 ± 0.04 ^a	2.08 ± 0.13 ^a	1.78 ± 0.08 ^a	2.41 ± 0.24 ^a	2.49 ± 0.16 ^a	1.95 ± 0.18 ^a
	2014-04-19	1.75 ± 0.12 ^b	1.61 ± 0.14 ^b	1.58 ± 0.07 ^b	1.75 ± 0.11 ^b	1.62 ± 0.11 ^b	1.41 ± 0.06 ^b

注:同一土层同一列数据后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

表5 不同灌溉制度2012—2014年棉花产量与灌溉水利用效率

Tab.5 Cotton yield and IWUE under different irrigation schedules during 2012 to 2014

处理	2012年		2013年		2014年	
	产量/(kg·hm ⁻²)	IWUE/(kg·m ⁻³)	产量/(kg·hm ⁻²)	IWUE/(kg·m ⁻³)	产量/(kg·hm ⁻²)	IWUE/(kg·m ⁻³)
I1T12	6495.65 ± 8.36 ^c	1.69	6290.81 ± 79.80 ^b	1.76	6399.59 ± 60.96 ^b	2.13
I2T12	6621.98 ± 22.17 ^a	1.46	6560.70 ± 108.82 ^{ab}	1.57	6800.47 ± 101.91 ^a	1.97
I3T12	6553.58 ± 26.20 ^b	1.22	6535.05 ± 72.55 ^{ab}	1.33	6739.38 ± 73.36 ^a	1.70
I1T16	6510.18 ± 8.97 ^c	1.69	6418.98 ± 120.01 ^{ab}	1.80	6788.65 ± 231.58 ^a	2.26
I2T16	6642.64 ± 11.08 ^a	1.46	6783.71 ± 281.13 ^a	1.62	6810.63 ± 91.81 ^a	1.97
I3T16	6563.55 ± 16.12 ^b	1.23	6508.69 ± 35.27 ^{ab}	1.32	6751.70 ± 52.96 ^a	1.70

利于提高籽棉产量,3 a 试验结果显示,I2T16 籽棉产量最高,平均为 6745.66 kg/hm²。2013 年平均籽棉产量出现小幅减产,可能是由于 2013 年花铃期土壤含盐量在 3.0 g/kg 附近剧烈波动对棉花生殖器官生长产生不利影响造成的。

相同灌水次数下,灌溉水生产效率均随灌水定额增加而减小。3 a 平均 IWUE 12 次灌水:I1T12 比 I2T12 和 I3T12 分别提高 11.6% 和 31.29%,16 次灌水:I1T16 比 I2T16 与 I3T16 分别提高 13.86% 和 35.29%。相同灌水定额下灌水 16 次 IWUE 高于 12 次灌水处理,且随灌水定额的增加 IWUE 逐渐减小。

3 讨论

3.1 灌水量和灌水次数对土壤盐分分布的影响

灌水量与灌水次数影响膜下滴灌棉花生育期土壤盐分时空分布。土壤盐分的变化与土壤水分运移密切相关,灌溉使土壤含水率增大,将溶解于土壤水中的盐分沿土壤水平和垂直方向向湿润体边缘推移,盐分向深层淋洗。一般研究认为,灌水量越大、水分渗漏越多,随渗漏淋洗的盐分也增多,留在主根区的盐分减少、淋洗深度越深^[12-13,18]。但也有研究表明增加或减小灌溉定额均会增大主根系层土壤剖面含盐量,中等灌水定额主根系层 0~60 cm 土层含盐量显著小于大定额和小定额灌水量^[15]。棉花生

育期表层土壤盐分变化幅度大,下层盐分变化缓慢,变化幅度小,主要是由强烈蒸发和灌水共同引起的。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发,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小,淋洗效果十分有限,土壤返盐严重,含盐量较高^[13,15]。

相同灌水定额条件下,高频灌溉土壤表层洗盐效果比低频灌溉明显要好,高频灌溉有效地抑制了土壤返盐^[13-14],尤其在棉花蕾期和花铃期采用高频灌溉^[25],而低频灌溉有利于下层盐分的淋洗^[3]。增加灌水量和灌水次数使棉花蕾期和花铃期土壤盐分维持在较低的水平,减小盐分的剧烈波动,在灌水和蒸发共同作用下土壤水分携带盐分运移,灌水次数越多说明灌水周期越短,由于在灌水停止后,土壤盐分在蒸发的作用下还未来得及向上运移就又进行了下次灌水,使得土壤盐分随灌溉水下移及侧移,从而能够较好地抑制土壤盐分由于蒸发引起的返移。较少的灌水次数对应的灌水间隔时间较长,在灌水间隔时间内土壤盐分在蒸发的作用下反向运移,使洗盐效果变弱,盐分变化波动明显。

高频灌溉棉花籽棉产量高于低频灌溉棉花籽棉产量^[3,15,25]。高含盐量土壤花铃期高频灌溉与低频灌溉相比,可使棉花增产 28%,而对于低盐土,灌溉频率对棉花生长和产量没有显著的影

响^[19]。高频灌溉时用小灌溉定额产量较高,低频灌溉时大灌溉定额产量较高^[14]。灌水量过高与过低均不利于提高棉花产量,高频中定额灌溉可获得较高产量^[15]。

3 a 试验中,灌水 16 次、中等灌溉定额 12 (460 mm) 籽棉产量最高,平均为 6 745.66 kg/hm²,主要是灌水次数和灌水定额的增加对根区 0~30 cm 土壤盐分进行了有效淋洗,促进了根系的生长和对水分及养分的吸收,从而提高了棉花的经济产量^[9,20]。相同灌水次数下,较低灌水定额 IWUE 较高,同一灌水定额中,灌水 16 次 IWUE 高于 12 次灌水处理^[15]。

3.2 膜下滴灌盐分平衡分析

干旱绿洲农田盐分变化是一个较为复杂的过程,除与灌水量和灌水频率有关外,土壤质地、初始含盐量、灌溉水质、地下水水位与矿化度、根系吸水、作物蒸腾和棵间蒸发等因素也对其产生影响。大量

研究表明,由于滴灌灌水量小,对盐分的淋洗有限,而土壤蒸发会将下层土壤盐分带到上层,在长期滴灌条件下,土壤耕作层盐分累积,出现土壤盐渍化问题^[3,8-9,20],但也有学者研究发现滴灌使根层土壤盐分变小,不会出现土壤次生盐渍化^[7,26]。新疆塔里木灌区常规冬、春灌用水占总用水量的 55%~65%,其中冬灌占 35%~40%,春灌占 20%~25%,灌溉定额 450~840 mm。按传统的方式要达到压盐洗盐的效果,就需要采用大定额的大水漫灌,但会导致地下水水位抬升、水质恶化、土壤发生次生盐渍化,形成水盐失衡的不良循环^[10,27]。本研究发现,对沙漠土,当棉花播前土壤 0~30 cm 含盐量小于 3 g/kg (初始含盐量 2.03 g/kg),棉田冬季休闲期采用棉秆留秆措施,通过增加膜下滴灌棉花吐絮期灌水量和灌水次数,经过连续 3 a 免冬、春灌膜下滴灌,2014 年棉花生育末期各处理 0~100 cm 土层土壤较 2012 年播前均处于脱盐状态(表 6)。

表 6 2014 年与 2012 年相比各处理膜下滴灌土壤脱盐率

Tab. 6 Desalination rates of different treatments in 2014 compared with 2012

土层深度/cm	I1T12	I2T12	I3T12	I1T16	I2T16	I3T16	%
0~30	16.45 ± 1.79 ^b	24.90 ± 3.05 ^a	26.93 ± 4.33 ^a	10.11 ± 4.31 ^c	15.33 ± 4.16 ^{bc}	29.87 ± 2.28 ^a	
40~100	8.66 ± 2.74 ^b	10.86 ± 5.54 ^b	19.42 ± 4.47 ^a	10.10 ± 2.67 ^b	13.14 ± 3.89 ^{ab}	16.13 ± 5.57 ^{ab}	

土壤脱盐率 0~30 cm 高于 40~100 cm,相同灌水次数下脱盐率随灌溉定额增加而提高,0~30 cm 土层脱盐率在 10.11%~29.87% 之间,40~100 cm 脱盐率在 8.66%~19.42% 之间,这一研究结果与国内部分研究结果一致^[7,26],但也有研究表明长期滴灌棉花根区会出现土壤盐分的累积^[3,8-9,20],这可能是由于南疆常规膜下滴灌是在冬、春灌模式下进行,吐絮期不灌水,而北疆部分膜下滴灌棉田在吐絮期末进行茬灌,棉花生育期不同的灌水模式导致膜下滴灌棉花根区土壤盐分在年际间变化不一,当前棉花膜下滴灌灌溉定额一般在 345~390 mm^[26],南疆免冬、春灌膜下滴灌通过增加棉花吐絮期灌水量和冬季棉田留秆措施,可降低翌年播前土壤上层盐分的累积,使棉花生育期及棉田年际之间土壤盐分维持在较低的水平,短时间内不会出现土壤盐渍化问题,棉花生育期 460 mm 以上的灌溉定额和 16 次的灌水次数使根区土壤具有较低的含盐量,且经过连续 3 个生长季后,籽棉产量最高,可作为南疆免冬、春灌膜下滴灌棉花“一膜两带四行”种植模式适宜的灌溉参数。但鉴于试验周期只有 3 a,长期免冬、春灌土壤盐分时空变化特征还需要进一步研究。

土壤含盐量和土壤盐渍化状况受地下水水位及矿化度影响较大,地下水埋深是土壤产生盐渍化的

一个决定性条件,地下水埋深愈浅,蒸发量越大,土壤积盐越严重,地下水埋深较深的区域土壤含盐量低。现有研究成果表明,浅层地下水埋深在 1.5~2.5 m 时,有利于作物生长,但从控制土壤盐碱化的角度看,地下水埋深宜控制在 2.0 m 左右^[28-29],位于该试验基地棉田 3 m 深地下水水位观测井在棉花生育期内均没有观测到地下水水位,所以本试验研究过程中没有考虑地下水水位和矿化度对土壤盐分的影响。而针对不同地下水埋深和矿化度条件下免冬、春灌膜下滴灌年内和年际间土壤剖面盐分变化和棉花生育期适宜灌溉制度还需要进一步研究。

4 结论

(1) 连续 3 a 免冬、春灌膜下滴灌播前和棉花生育期土壤盐分含量从大到小依次为:2013 年、2012 年、2014 年,第 2 年播前和棉花生育期出现土壤返盐,致使棉花生育期盐分剧烈波动,12 次灌水次数和较小灌水定额 0~30 cm 土层土壤盐分波动最为明显,增加灌水定额和灌水次数有利于播前和棉花生育期 0~30 cm 土层土壤盐分的淋洗。灌水定额比灌水次数更能影响 0~100 cm 土壤盐分的分布。

(2) 同一灌水次数下,460 mm 灌溉定额籽棉产量最高;适宜灌溉定额下,16 次灌水籽棉产量高于

12次灌水籽棉产量。IWUE随灌水定额的降低和灌水次数的增加而提高,在南疆水资源短缺情况下,高频次小定额灌溉可获得最大的IWUE。

(3)结合每年棉花播前、生育期土壤剖面盐分变异程度、盐分时空分布和产量状况,对于地下水埋

深大于3m的砂壤土和冬季休闲期采用留秆措施的免冬、春灌滴灌棉田,460mm灌溉定额(阶段灌水定额为播种-苗期 $0.25ET_0$ 、蕾期 $0.60ET_0$ 、花铃期 $0.85ET_0$ 、吐絮期 $0.55ET_0$)、16次灌水可作为适宜棉花节水控盐的灌溉制度。

参 考 文 献

- 1 Khumoetsile Mmolawa, Dani Or. Root zone solute dynamics under drip irrigation;a review[J]. Plant and Soil,2000,222(1):163-190.
- 2 Wang Ruoshui, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. Salt distribution and the growth of cotton under different drip irrigation regimes in a saline area[J]. Agricultural Water Management,2011,100(1):58-69.
- 3 Liu Meixian, Yang Jingsong, Li Xiaoming, et al. Distribution and dynamics of soil water and salt under different drip irrigation regimes in Northwest China[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4): 675-688.
- 4 Zhou Shiqiao, Wang Jin, Liu Jinxian, et al. Evapotranspiration of a drip-irrigated, film-mulched cotton field in northern Xinjiang, China[J]. Hydrological Processes,2012,26(8):1169-1178.
- 5 Hou Xiaoyan, Wang Fengxin, Han Jiangjiang, et al. Duration of plastic mulch for potato under drip irrigation in an arid region of Northwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2010,150(1):115-121.
- 6 张治,田富强,钟瑞森,等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J]. 农业工程学报,2011,27(1):44-51.
Zhang Zhi, Tian Fuqiang, Zhong Ruisen, et al. Spatial and temporal pattern of soil temperature in cotton field under mulched drip irrigation condition in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 44-51. (in Chinese)
- 7 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.
Li Mingsi, Liu Hongguang, Zheng Xurong. Spatiotemporal variation for soil salinity of field land under long-term mulched drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 82-87. (in Chinese)
- 8 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)
- 9 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.
Mu Hongchen, Hudan Tumaerbai, Su Litan, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under mulch in arid region [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 18-22. (in Chinese)
- 10 周和平,王少丽,姚新华,等. 膜下滴灌土壤水盐定向迁移分布特征及排盐效应研究[J]. 水利学报,2013,44(11):1380-1389.
Zhou Heping, Wang Shaoli, Yao Xinhua, et al. Research on distribution characteristics and salt discharging effect of directional migration of water and salt in soil through drip irrigation under plastic film[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(11): 1380-1389. (in Chinese)
- 11 苏里坦,阿不都·沙拉木,宋郁东. 膜下滴灌水量对土壤水盐运移及再分布的影响[J]. 干旱区研究,2011,28(1):79-85.
Su Litan, Abudu Shalamu, Song Yudong. Effects of drip irrigation volume on soil water-salt transfer and its redistribution[J]. Arid Zone Research, 2011,28(1):79-85. (in Chinese)
- 12 张金珠,虎胆·吐马尔白,王一民,等. 不同灌溉定额对膜下滴灌棉花土壤盐分分布的影响研究[J]. 灌溉排水学报,2010,29(1):44-47.
Zhang Jinzhu, Hudan Tumarebai, Wang Yimin, et al. Influence of irrigation quota on distribution of soil salinity for cotton under mulched drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2010,29(1):44-47. (in Chinese)
- 13 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.
Wu Zhengguang, Hudan Tumarebai, Zhang Jinzhu, et al. A study on the transportation law of water and salt in soil under different frequencies of mulching-film drip irrigation of cotton[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2009,32(4):50-54. (in Chinese)
- 14 杨九刚,何继武,马英杰,等. 灌水频率和灌溉定额对膜下滴灌棉花生长及产量的影响[J]. 节水灌溉,2011(3):29-33.
Yang Jiugang, He Jiwu, Ma Yingjie, et al. Effects of irrigation frequency and quota on cotton growth and yield with drip irrigation under plastic film[J]. Water Saving Irrigation,2011(3):29-33. (in Chinese)
- 15 王峰,孙景生,刘祖贵,等. 不同灌溉制度对棉田盐分分布与脱盐效果的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(12):120-128.
Wang Feng, Sun Jingsheng, Liu Zugui, et al. Effect of different irrigation scheduling on salt distribution and leaching in cotton field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(12):120-128. (in Chinese)
- 16 Ucan K, Killi F, Gencoglan C, et al. Effect of irrigation frequency and amount on water use efficiency and yield of sesame (*Sesamum indicum* L.) under field condition[J]. Field Crops Research,2007,101(3):249-258.

- 17 El-Hendawy S E, Hokam E M, Schmidhalter U. Drip irrigation frequency; the effects and their interaction with nitrogen fertilization on sandy soil water distribution, maize yield and water use efficiency under Egyptian conditions[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2008, 194(3): 180 - 192.
- 18 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 - 1491.
Gao Long, Tian Fuqiang, Ni Guangheng, et al. Experimental study on soil water-salt movement and irrigation scheduling for cotton under mulched drip irrigation condition[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(12): 1483 - 1491. (in Chinese)
- 19 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. (in Chinese)
- 20 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 Irrigation Area[J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(6): 892 - 898. (in Chinese)
- 21 董楠, 吕新, 侯振安, 等. 基于彭曼公式的膜下滴灌棉田灌水量研究[J]. *新疆农业科学*, 2012, 49(4): 617 - 624.
Dong Nan, Lü Xin, Hou Zhen'an, et al. Study on the irrigation water amount under film mulch drip irrigation according to Penman - Monteith formula[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(4): 617 - 624. (in Chinese)
- 22 邢旭光, 赵文刚, 马孝义, 等. 覆膜滴灌条件下棉花根层土壤盐分时间稳定性研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 146 - 153.
Xing Xuguang, Zhao Wen'gang, Ma Xiaoyi, et al. Temporal stability of soil salinity in root zone of cotton under drip irrigation with plastic mulch[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 146 - 153. (in Chinese)
- 23 董合忠, 辛承松, 李维江, 等. 山东滨海盐渍棉田盐分和养分特征及对棉花出苗的影响[J]. *棉花学报*, 2009, 21(4): 290 - 295.
Dong Hezhong, Xin Chengsong, Li Weijiang, et al. Characteristics of salinity and fertility in coastal saline cotton fields in Shandong and their effects on cotton emergence[J]. *Cotton Science*, 2009, 21(4): 290 - 295. (in Chinese)
- 24 王春霞, 王全九, 刘建军, 等. 灌水矿化度及土壤含盐量对南疆棉花出苗率的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 28 - 33.
Wang Chunxia, Wang Quanjiu, Liu Jianjun, et al. Effects of mineralization of irrigation water and soil salinity on cotton emergence rate in Southern Xinjiang Uygur Autonomous Region of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(9): 28 - 33. (in Chinese)
- 25 余美, 杨劲松, 刘梅先, 等. 膜下滴灌灌水频率对土壤水盐运移及棉花产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(3): 18 - 24.
Yu Mei, Yang Jingsong, Liu Meixian, et al. Effects of mulched drip irrigation frequency on soil water-salt transport and cotton yield [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(3): 18 - 24. (in Chinese)
- 26 王振华, 杨培岭, 郑旭荣, 等. 新疆现行灌溉制度下膜下滴灌棉田土壤盐分动态[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 149 - 160.
Wang Zhenhua, Yang Peiling, Zheng Xurong, et al. Soil salt dynamics in cotton fields of drip irrigation under mulch under the existing irrigation system in Xinjiang [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(8): 149 - 160. (in Chinese)
- 27 周宏飞, 马金玲. 塔里木灌区棉田的水盐动态和水盐平衡问题探讨[J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24(6): 10 - 15.
Zhou Hongfei, Ma Jinling. Studies on water salt dynamics and balance of cotton crops land in Tarim Irrigation Region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24(6): 10 - 15. (in Chinese)
- 28 罗金明, 王永洁, 邓伟, 等. 浅地下水埋深微域尺度苏打盐渍土的积盐机理探讨[J]. *土壤学报*, 2010, 47(2): 238 - 245.
Luo Jinming, Wang Yongjie, Deng Wei, et al. Mechanism of salt-accumulation in micro-scale sodic saline soil as affected by shallow groundwater table[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 238 - 245. (in Chinese)
- 29 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1202 - 1210.
Guan Xiaoyan, Wang Shaoli, Gao Zhanyi, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1202 - 1210. (in Chinese)