

# 塔里木灌区膜下滴灌的棉花需水量及节水效益

闫映宇

(新疆维吾尔自治区水土保持生态环境监测总站, 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 为了确定适宜的灌溉制度, 2008 年通过田间灌溉试验, 采用水量平衡法研究了塔里木灌区膜下滴灌棉花需水和耗水规律。以田间试验数据为基础, 拟合了棉花的水分生产函数模型, 分析评价了膜下滴灌棉花的节水效益。结果表明: 塔里木灌区膜下滴灌棉花需水量为 543 mm, 其中苗期 252 mm, 蕾期 186 mm, 花铃期 316 mm, 吐絮期 139 mm。随滴灌量减小, 耗水量减小。滴灌量影响棉花各生育阶段的耗水量及产量, 并不影响耗水比例。相应于灌溉水利用效率最高点的滴灌量要低于产量最高点的, 因此节水与增产产生矛盾, 仅从节水角度考虑, 滴灌量为  $3\,091\text{ m}^3/\text{hm}^2$  时, 可以达到最大灌溉水利用效率, 要获得最大产量, 滴灌量应满足  $3\,464\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。与漫灌相比, 膜下滴灌节水增产效益明显。在同一灌溉量下, 膜下滴灌增产 30.2%, 灌溉水利用效率提高 30.2%, 在同一产量水平下, 节水 29.3%, 灌溉水利用效率提高 41.5%。

**关键词:** 棉花需水量; 棉花耗水量; 节水效益; 膜下滴灌

中图分类号: S562; S274.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0123-05

## Cotton Water Requirements and Water Saving Benefit Under Mulched Drip Irrigation in Tarim Irrigated Area

YAN Yingyu

(General Station of Soil and Water Conservation and Ecoenvironmental Monitoring of Xinjiang, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** The primary purpose of this research was to give suitable irrigation program according to the growth period and water requirement. A cotton field experiment with mulched drip irrigation was conducted in Tarim Irrigated Area of Xinjiang in 2008. Water balance method was adopted to investigate the water requirement and water consumption pattern of cotton under mulched drip irrigation in Tarim Irrigated Area. Statistical analysis of experimental data of irrigation indicates that the relationship between yield of cotton and irrigation presents a quadratic parabola. We fit the model of cotton water production on the basis of field experimental data of cotton. And the analysis on water saving benefit of cotton under mulched drip irrigation was carried out. Results indicate that water requirements for the irrigated cotton are 543 mm in Tarim Irrigated Area; the water requirement at the seedling stage is 252 mm, it is 186 mm at budding stage, it is 316 mm at bolling stage and it is 139 mm at wadding stage; the irrigation amount determines the spatial distribution of soil moisture and water consumption during cotton life cycle. However, water consumption at different growth stages was inconsistent with irrigation. Quantitatively, the water consumed by cotton decreases upon the increase of irrigation amount. From the perspective of water saving, the maximal water use efficiency can reach to  $3\,091\text{ m}^3/\text{hm}^2$ . But the highest cotton yield demands  $3\,464\text{ m}^3/\text{hm}^2$  irrigation water. In summary, compared to the conventional drip irrigation, a number of benefits in water saving and yield increase were observed when using plastic mulch. At the same amount of irrigation, the cotton yield with plastic mulch was 30.2% higher than conventional practices, and the efficiency of water utilization increased by 30.2%. While at the same yield level, 29.3% of water was saved by using plastic mulch, and the efficiency increased by 41.5%.

**Keywords:** cotton water requirements; cotton water consumption; water saving Benefit; drip irrigation under mulching

膜下滴灌是新疆绿洲农业最为有效的节水灌溉技术,因其具有显著的节水、保温、抑盐、增产效果,在新疆棉田中已获得大面积推广应用。由于滴灌特有的介面特征,显现出在水盐运行环境、运移变化特点、脱盐程度等方面与传统和单一的灌溉方式有着明显不同的特点,膜下滴灌棉田水盐运移规律受到广大学者的广泛关注。国内已对滴灌条件下的土壤水分运动规律及影响因素、湿润体运移的影响因素进行了深入研究<sup>[1-8]</sup>。棉花膜下滴灌土壤盐分运移规律、分布及累积特征等方面研究也取得了重要进展<sup>[9-11]</sup>。孙林等<sup>[12]</sup>还对长期滴灌棉田土壤盐分演变趋势进行了预测。汪有科等<sup>[13]</sup>对节水增产灌溉模式也进行了探讨。由于膜下滴灌已经改变了以往的水分运移规律,普通灌溉条件下的作物需水规律和灌溉制度不能照搬于膜下滴灌,然而目前对于人们更加关心的膜下滴灌棉花需水耗水规律、节水增产效益、适宜灌溉制度等方面的研究还不足。学者对北疆膜下滴灌棉花需水规律、耗水规律及灌溉制度的研究取得了一些成果<sup>[14-15]</sup>。南疆地区作物需水规律的研究主要针对普通灌溉方式进行,通过长期研究建立了一些作物需水量计算模型<sup>[16-17]</sup>。但对膜下滴灌棉花需水规律及灌溉制度的研究极少,刘新永等<sup>[18]</sup>对南疆膜下滴灌棉花耗水规律以及灌溉制度进行了研究,但仍无法满足整个南疆地区膜下滴灌棉花种植推广的需要。全面了解膜下滴灌棉花需水耗水规律、对比分析不同灌溉方式用水效率、节水效益等对于节水农业的发展、加强水资源的集约管理、水分利用效率的提高和棉花产量的模拟预测等均具有重要意义和作用。但在水资源匮乏的南疆地区有关膜下滴灌棉田需水规律、灌溉制度及棉花水分生产函数,尤其是不同灌溉方式水分利用效率、节水效益的对比研究目前还很欠缺。为此,本文拟通过不同灌溉量的田间小区试验,利用水分动态监测资料,基于水量平衡原理,研究塔里木灌区膜下滴灌棉花生育期的耗水规律,从而确定膜下滴灌棉田水均衡及各要素间的转化关系;建立膜下滴灌、普通漫灌棉花产量与灌水量的定量关系,对比分析膜下滴灌的节水效益,为塔里木灌区科学合理的灌溉及有限水资源的合理配置提供科学的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2005—2012 年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(40°37'N, 80°45'E)进行。该地气候属于暖温带干旱气候,年平均气温 11.2℃,与同纬度地区相比,夏季温度偏高、冬季温度

偏低、春秋季节气温变化剧烈。年降水量 45.7 mm,年水面蒸发量 2 500 mm,无霜期 207 d,全年日照时数 2 940 h,年太阳辐射总量 6 000 MJ/m<sup>2</sup>。试验地土壤为粉砂壤土。

### 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,灌溉量共设 6 个水平,分别为:4 265 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (I), 3 926 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (II), 3 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (III), 3 271 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (IV), 2 947 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (V), 2 618 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (VI), 每处理 4 次重复,小区面积 389.2 m<sup>2</sup>。供试棉花品种为中棉 49,株行距采用宽窄行配置[(10+65+10+60)cm],即 1 膜种植 4 行棉花,窄行距 10 cm,宽行距 65 cm,膜间距 60 cm,株距均为 10 cm。4 月 28 日播种,播种前施磷酸二铵 450 kg/hm<sup>2</sup> 作基肥。全生育期灌溉采用滴灌模式,滴灌带铺设在宽行中央,每 7 天滴灌 1 次,每次灌溉持续 7~11 h,6 月 24 日(蕾期)第 1 次灌水,共灌水 10 次。在第 3~6 次灌溉时,随水追施尿素 450 kg/hm<sup>2</sup>,磷酸二氢钾 150 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 研究方法

1.3.1 土壤水分观测 在不同水分处理棉花宽行、窄行、膜间分别埋设中子管,用中子水分仪(CNC503DR)测定 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 土层的土壤含水量。每隔 2 d 测定 1 次,滴灌前后加测。为了解决中子仪测定表层土壤水分不准确的问题,利用烘干法对中子仪进行标定。

1.3.2 参考作物蒸散量 ET<sub>0</sub> 的确定 采用 FAO (Smith, 1991)推荐的 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量 ET<sub>0</sub><sup>[19]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中:ET<sub>0</sub>——参考作物蒸散量(mm);R<sub>n</sub>——作物表层的净辐射量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];G——土壤热通量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)],T——日平均温度(℃);u<sub>2</sub>——2 m 高度的日平均风速(m/s);e<sub>a</sub>—e<sub>d</sub>——饱和水汽压差(kPa);Δ——饱和水汽压—温度曲线上的斜率(kPa/℃);γ——干湿表常数(kPa/℃)。根据阿克苏试验站全年气象资料,通过上式计算得到参考作物蒸散量 ET<sub>0</sub>。

1.3.3 膜下滴灌棉花需水量 ET<sub>c</sub> 及作物系数 K<sub>c</sub> 确定方法 棉花需水量与其影响因素之间的数学模型如下:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中:ET<sub>c</sub>——作物需水量(mm);ET<sub>0</sub>——参考作物蒸散量(mm);K<sub>c</sub>——作物系数。首先计算出参考作

物蒸散量  $ET_0$ ，再在充分湿润的土壤条件下实测作物需水量  $ET_c$ ，二者的比值即为膜下滴灌条件下的棉花系数  $K_c$ 。

1.3.4 膜下滴灌棉花耗水量确定方法 根据农田水量平衡原理<sup>[20]</sup>，膜下滴灌棉田水量平衡简化式为：

$$ET=I-(W_2-W_1)-BW \tag{3}$$

式中： $ET$ ——棉花耗水量(mm)； $W_1$ ——时段初 100 cm 土体储水量(mm)； $W_2$ ——时段末 100 cm 土体储水量(mm)； $I$ ——灌水量(mm)； $BW$ ——根系层(100 cm)下界面水分交换量(mm)，取向向下为正。由公式(3)计算棉花耗水量，根系层界面通量由达西定律计算。

1.3.5 数据处理 数据采用单因子方差分析(One-way ANOVA)，如果 ANOVA 结果显著，再用最小显著差数法(LSD)对各处理进行两两配对多重比较。所有统计分析均采用 Excel 和 SPSS 13.0 完成。

表 1 不同水分处理棉花各生育阶段的耗水量

处理	苗期(43 d)		蕾期(30 d)		花铃期(61 d)		吐絮期(60 d)		全生育期
	耗水量/ mm	耗水强度/ (mm·d <sup>-1</sup> )	耗水量/ mm	耗水强度/ (mm·d <sup>-1</sup> )	耗水量/ mm	耗水强度/ (mm·d <sup>-1</sup> )	耗水量/ mm	耗水强度/ (mm·d <sup>-1</sup> )	耗水量/ mm
I	55.4±2.5	1.3±0.06	99.2±0.9a	3.3±0.03a	336.0±3.9a	5.5±0.06a	134.0±2.7a	2.2±0.04a	624.5±4.3a
II	54.3±1.5	1.3±0.04	92.3±0.6b	3.1±0.02b	295.7±2.2b	4.9±0.04b	128.7±1.5b	2.1±0.03b	571.0±6.6b
III	54.4±1.4	1.3±0.03	83.5±1.7c	2.8±0.06c	288.0±4.3c	4.7±0.07c	117.3±3.1c	2.0±0.05c	543.2±6.7c
IV	55.7±3.5	1.3±0.08	85.4±1.4cd	2.9±0.05cd	266.8±4.5d	4.4±0.07d	118.7±2.5cd	2.0±0.04cd	526.5±4.0d
V	51.7±3.0	1.2±0.07	80.6±1.0e	2.7±0.03e	251.5±4.1e	4.1±0.07e	94.7±3.0e	1.6±0.05e	478.5±6.4e
VI	55.0±1.8	1.3±0.04	74.3±0.7f	2.5±0.02f	227.7±3.5f	3.7±0.06f	84.2±2.5f	1.4±0.04f	441.2±7.8f

注：不同小写字母表示处理间差异达显著水平( $p<0.05$ )，下表同。

由表 2 可以看出，各阶段耗水量占总耗水量的百分数(模系数)差异显著，苗期最小，在 8.9%~12.5%；花铃期达到最大值 51.6%~53.8%，蕾期为 15.4%~

2 结果与分析

2.1 膜下滴灌棉花耗水量与耗水规律

由表 1 看出，滴灌量对棉花耗水量的影响显著，随滴灌量减小，棉花总耗水量减小。由于苗期土壤水分一致，各处理耗水量基本相同，从蕾期开始经过灌水处理，耗水量随滴灌量减小而减小。各处理棉花花铃期耗水量最大，其次是蕾期，苗期和吐絮期较小。各处理棉花的日耗水强度，苗期差异不明显，其值为 1.2~1.3 mm/d；蕾期以后日耗水强度增大，并随滴灌量的增加而增大。蕾期各处理在 2.5~3.3 mm/d；进入花铃期后，日耗水强度达到最大值，其值在 3.7~5.5 mm/d 变化；吐絮期又降低，约 1.4~2.2 mm/d。可见，膜下滴灌棉花花铃期是其生育期中耗水强度最大的阶段，耗水量占全生育期耗水总量的 50%之多，其次是蕾期，苗期和吐絮期最小。

16.8%，吐絮期为 19.1%~22.5%，但处理之间差异不明显。说明滴灌量只影响棉花耗水量，并不影响各阶段的耗水比例。

表 2 不同水分处理棉花各生育阶段的耗水比例

生育时期	时间/d	耗水比例						%
		I	II	III	IV	V	VI	
苗期	43	8.9±2.1	9.5±2.2	10.0±2.0	10.6±1.4	10.8±1.3	12.5±1.5	
蕾期	30	15.9±0.5	16.2±0.8	15.4±1.0	16.2±0.6	16.8±0.8	16.8±1.1	
花铃期	61	53.8±2.3	51.8±2.3	53.0±2.0	50.7±1.5	52.6±2.1	51.6±1.2	
吐絮期	60	21.4±1.9	22.5±2.5	21.6±1.2	22.5±2.6	19.8±1.3	19.1±1.9	
全生育期	194	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

2.2 膜下滴灌棉花需水量和需水规律

从表 3 可以看出，膜下滴灌棉花全生育期需水量为 543.2 mm。不同生育阶段，需水量差异显著。苗期最小为 54.4 mm，占生育期总需水量的 10.0%，需水强度 1.3 mm/d；花铃期最大为 288.0 mm，占生育期总需水量的 53.0%，需水强度 4.7 mm/d；蕾期需水量 83.5 mm，占生育期总需水量的 15.4%，需水强

度 2.8 mm/d；吐絮期需水量 117.3 mm，占生育期总需水量的 21.6%，需水强度 1.9 mm/d。

2.3 膜下滴灌棉花水分生产函数

膜下滴灌棉花籽棉产量  $Y$  与生育期滴灌量  $I$  的关系如图 1 所示。经回归分析得二者之间符合二次抛物线关系：

$$Y = -0.0026I^2 + 18.015I - 24845$$
$$(R^2 = 0.9592, n = 6) \quad (4)$$

为了分析灌溉效应,引入灌溉平均产量 AI 和灌溉边际产量 MI 两个基本概念,且定义灌溉平均产量 AI 是指平均投入每单位灌水量所获得的产量<sup>[21]</sup>,即

灌溉水分利用效率;灌溉边际产量 MI 是指增加单位灌水量所增加的产量,它是  $Y-I$  关系的一阶导数, AI, MI 的单位为  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m}^3)$ 。

$$MI = dY/dI = 18.015 - 0.0052I \quad (5)$$

$$AI = Y/I = 18.015 - 0.0026I - 24845/I \quad (6)$$

表 3 膜下滴灌棉花需水量及其规律

生育期 (月-日)	时间/ d	参考作物 蒸散量/mm	作物系数	需水量/ mm	需水强度/ (mm·d <sup>-1</sup> )	模系数/%
苗期(04-25—06-08)	43	251.9±7.0a	0.22±0.003a	54.4±1.4a	1.3±0.03a	10.0±2.0a
蕾期(06-08—07-08)	30	186.0±6.0b	0.45±0.010b	83.5±1.7b	2.8±0.06b	15.4±1.0a
花铃期(07-08—09-07)	61	315.7±4.5c	0.91±0.010c	288.0±4.3c	4.7±0.07c	53.0±2.0a
吐絮期(09-07—11-07)	60	139.3±6.1d	0.84±0.03d	117.3±3.1d	1.9±0.05d	21.6±1.2a
全生育期	194	892.9	0.61	543.2	2.7	100.0

由图 1 可见,3 条曲线有两个重要的转折点把  $Y-I$  曲线分为 3 段:第 1 个点是  $MI-I$  曲线与  $AI-I$  曲线的交点 C,是平均产量曲线的最高点,该点边际产量等于平均产量,灌溉水分利用效率最大为  $1.941 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m}^3)$ ,对应的滴灌量为  $3\,091 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ;第 2 个点是  $Y-I$  曲线的最高点 D,该点边际产量 MI 等于零,产量最大为  $6\,360 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,滴灌量为  $3\,464 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,灌溉水分利用效率为  $1.836 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m}^3)$ 。曲线第 1 段是从原点到 D 点,边际产量大于平均产量,产量增加的幅度大于灌水量增加的幅度。属于棉花水分极缺区,该段灌溉量的增加会显著提高产量,因此只要水量允许,就应予以投入;第 2 段是从 C 点到 D 点,虽然边际产量大于零,但已小于平均产量,产量增加的幅度小于灌水量增加的幅度,属于棉花水分缺乏调节区,调节滴灌量为  $3\,091 \sim 3\,464 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,当滴灌量达到  $3\,464 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  时,产量最大。第 3 段是 D 点以后,边际产量小于零,产量随灌水量增大而减小,属于奢侈灌溉区。

(4)。普通漫灌棉花产量与灌溉量的关系式如下:

$$Y = -0.000973I^2 + 7.5986I - 9761.7$$
$$(R^2 = 0.9672, n = 6) \quad (7)$$

由图 2 可以看出,灌溉量小于  $3\,464 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  时,两种灌溉方式棉花产量都随灌溉量增加而增大,膜下滴灌棉花产量大于普通漫灌,并且增加幅度也大于普通漫灌,说明膜下滴灌棉花对灌溉水分的敏感性大于普通漫灌。灌溉量增加到  $3\,464 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  (G 点),膜下滴灌棉花产量达最大  $6\,360 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,灌溉水利用效率为  $1.836 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m}^3)$ ,此时普通漫灌棉花产量  $4\,885 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,灌溉水利用效率  $1.410 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m}^3)$ ,膜下滴灌增产  $30.2\%$ ,灌溉水利用效率提高  $30.2\%$ 。灌溉量在  $3\,464 \sim 3\,905 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  时,膜下滴灌棉花产量随灌溉量增加而减小,而普通漫灌棉花产量随灌溉量增加继续增大,灌溉量增大到  $3\,905 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  (H 点)时,普通漫灌棉花产量达最大  $5\,074 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,灌溉水利用效率为  $1.299 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m}^3)$ 。当膜下滴灌棉花产量等于普通漫灌棉花的最大产量时,滴灌量为  $2\,761 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,灌溉水利用效率为  $1.838 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m}^3)$ ,比普通漫灌节水  $29.3\%$ 。灌水量大于  $3\,905 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  后,两种灌溉方式棉花产量都随灌溉量增加而减小。两种灌溉方式棉花产量都达到最大时,膜下滴灌棉花比普通漫灌节水  $11.3\%$ ,增产  $25.3\%$ ,灌溉水利用效率提高  $41.3\%$ 。

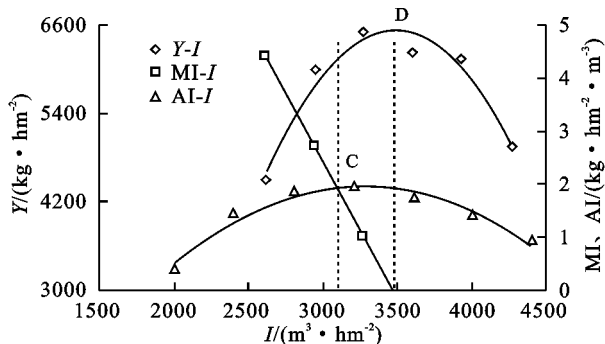


图 1 膜下滴灌棉花产量、平均产量、  
边际产量与灌水量的关系

## 2.4 膜下滴灌棉田节水效益

膜下滴灌及普通漫灌条件下,棉花产量与灌溉量的关系如图 2 所示,经回归分析,均符合二次抛物线关系。膜下滴灌棉花产量与滴灌量的关系见公式

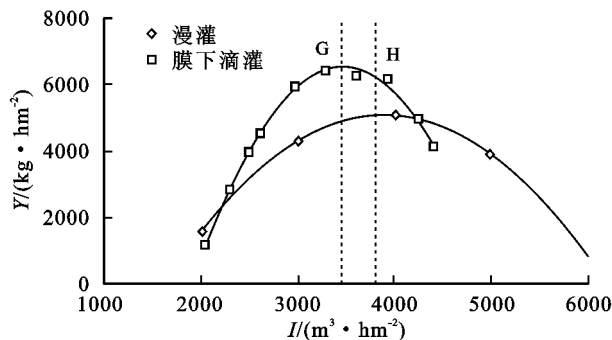


图 2 不同灌溉方式棉花滴灌量与产量关系

### 3 结论与讨论

塔里木灌区膜下滴灌棉花全生育期需水量 543 mm, 苗期最小占生育期总需水量的 10.0%, 花铃期最大占 53.0%, 蕾期占 15.4%, 吐絮期占 21.6%。不同滴灌量下, 棉花实际耗水量与需水量有差值, 表现出不同程度的盈亏。滴灌量在  $3\ 600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$  时, 水分供需平衡。滴灌量的大小直接影响棉花产量及灌溉水利用效率的高低, 其关系符合二次抛物线, 遵循“报酬递减规律”。但产量的最高点与灌溉水利用效率的最高点并不一致, 相应于灌溉水利用效率最高点的滴灌量要低于产量最高点的滴灌量, 因此节水与增产存在矛盾。仅从节水角度考虑, 滴灌量为  $3\ 091\ \text{m}^3/\text{hm}^2$  时, 可以达到最大灌溉水利用效率, 但此时棉花产量比最高产量降低 5.7%。要获得最大产量, 滴灌量应满足  $3\ 464\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。在滴灌量小于  $3\ 091\ \text{m}^3/\text{hm}^2$  阶段, 属于膜下滴灌棉花水分极缺区, 若水资源允许, 应尽量予以投入; 在滴灌量为  $3\ 091 \sim 3\ 464\ \text{m}^3/\text{hm}^2$  阶段, 属于水分缺乏调节区; 在滴灌量大于  $3\ 464\ \text{m}^3/\text{hm}^2$  阶段, 产量随滴灌量增大而减小, 属于奢侈灌溉区。

在同一管理模式下, 膜下滴灌棉花的最高产量大于普通漫灌, 在二者都达到最高产量时, 膜下滴灌棉花比普通漫灌节水 11.3%, 增产 25.3%, 灌溉水利用效率提高 41.3%。在同一灌溉量(膜下滴灌棉花产量最大时的灌溉量)下, 膜下滴灌比普通漫灌增产 30.2%, 灌溉水利用效率提高 30.2%。在同一产量(漫灌棉花最大产量)下, 膜下滴灌比普通漫灌节水 29.3%, 灌溉水利用效率提高 41.5%, 说明在目前普通漫灌棉花的产量水平及水资源利用条件下, 采用膜下滴灌技术, 发展节水农业, 有巨大的增产潜力, 可大幅度提高灌溉水利用效率。从可持续发展的角度出发, 探索膜下滴灌的生态环境效应及土壤盐分发展趋势, 确定膜下滴灌技术适宜性评价指标, 从而建立干旱区绿洲节水农业的生态安全及可持续性评估机制, 是新疆乃至西北干旱区发展可持续节水农业的根本要求。

#### 参考文献:

[1] 李毅, 王文焰, 王全九, 等. 温度势梯度下土壤水平一维水盐运动特征的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 4-8.

[2] 王新平, 李新荣, 康尔泗. 干旱沙区滴灌条件下水盐运移过程试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(3): 44-48.

[3] 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, 17(2): 47-50.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 李明思, 康绍忠, 孙海燕. 点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 32-35.

[7] 万素梅, 胡守林, 翟云龙. 膜下滴灌棉花土壤水分动态变化研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 90-91.

[8] 闫映宇, 林新慧. 灌溉方式对土壤水分运动参数的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 160-165.

[9] 魏光辉, 董新光, 杨鹏年, 等. 棉花膜下滴灌土壤盐分运移规律分析[J]. 水土保持研究, 2009, 6(6): 162-166.

[10] 弋鹏飞, 虎胆·吐马尔白, 吴争光, 等. 棉田膜下滴灌年限对土壤盐分累积的影响研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 118-122.

[11] 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研究[J]. 干旱区地理, 2009, 32(6): 892-898.

[12] 孙林, 罗毅. 长期滴灌棉田土壤盐分演变趋势预测研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 186-192.

[13] 汪有科, 吕雯, 王德轩, 等. 节水增产灌溉模式研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 153-153.

[14] 蔡焕杰, 邵光成. 荒漠气候区膜下滴灌棉花需水量和灌溉制度的试验研究[J]. 水利学报, 2002(11): 119-123.

[15] 慕蔡芸, 马富裕, 郑旭荣, 等. 覆膜滴灌棉田蒸散量的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 25-29.

[16] 胡顺军, 艾尼瓦尔·吾买尔, 宋郁东, 等. 南疆棉田实际蒸散量的计算模式[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 40-42.

[17] 胡顺军, 王举林, 宋郁东. 阿拉尔灌区棉田蒸散量计算模型[J]. 干旱区地理, 2002, 25(3): 241-244.

[18] 刘新永, 田长彦, 马英杰, 等. 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): 108-112.

[19] Smith M. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirement[R]. Rome: FAO, 1991.

[20] 赵聚宝, 徐祝龄, 钟兆站, 等. 中国北方旱地农田水分平衡[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[21] 胡顺军, 周宏飞, 宋郁东, 等. 渭干河灌区棉花高产节水优化灌溉制度试验研究[J]. 灌溉排水, 2000, 19(4): 25-29.