

膜下滴灌条件下棉花年际需水量变化试验分析

翟超^{1,2},周和平^{1,2},谢富明^{1,2},赵健^{1,2}

(1.新疆维吾尔自治区水利管理总站,新疆乌鲁木齐 830000;
2.新疆灌溉中心试验站,新疆乌鲁木齐 830000)

摘要:为探索新疆准噶尔盆地南缘区膜下滴灌棉花年际需水量、水分生产率、作物系数、生长动态等变化,连续 3 年开展了灌溉试验,研究棉花耗水规律及气象因素对耗水规律的影响。结果表明:棉花生育期总耗水量随灌水量增加而增大,各处理(处理 T1、T2、T3、T4 分别为 300、375、450、525 m³·hm⁻²)耗水量差异显著,耗水量在 343 ~ 625 mm 之间;不同年份气象要素中气温对棉花生育阶段需水量影响最大;棉花皮棉产量与全生育期灌水量呈二次抛物线关系,水分生产率随灌水量的增加而降低,其值范围 0.65 ~ 0.34 kg·m⁻³;不同时期棉花作物系数大小表现为:开花~吐絮>现蕾~开花>吐絮~收花>出苗~现蕾>播种~出苗,全生育期作物系数呈现单峰值变化,峰值出现在开花~吐絮期;生育期内棉花株高、叶面积指数和叶绿素均呈先增后减,最后保持平稳的趋势。不同处理棉花株高和叶面积指数与灌水量呈正比关系,随灌水量增大而增加,全生育期内株高和叶面积指数峰值出现在花铃期,叶绿素峰值出现在蕾期。

关键词:膜下滴灌;棉花;需水量;水分生产率;作物系数
中图分类号: S275.6; S562 **文献标志码:** A

Experimental analysis of annual water requirements change of cotton by drip irrigation under film

ZHAI Chao^{1,2}, ZHOU He-ping^{1,2}, XIE Fu-ming^{1,2}, ZHAO Jian^{1,2}

(1. The Xinjiang Uygur Autonomous Region water resources management station, Urumqi, Xinjiang 830000, China;
2. Xinjiang Irrigation Centre, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: In order to explore the changes of annual water requirements, water productivity, crop coefficient, growth dynamic of cotton by drip irrigation under film in southern margin of the Zhungaer Basin, Xinjiang, continuously carried out 3 years experiment, to research and analyze the rule of cotton water consumption and its response to meteorological factors. The results showed that: The total water consumption in cotton growing period was increased with increasing of irrigation quantity, the water consumption differences was significant for each treatment (T1, T2, T3 and T4 were 300, 375, 450 m³·hm⁻² and 525 m³·hm⁻², respectively), the water consumption was between 343 ~ 625 mm. Among the meteorological factors of different years, the temperature has the greatest impact on the cotton water requirements in growing period. The ginned cotton yield with the irrigation quantity in whole growing period assumed quadratic parabola relation. The WUE was decreased with increase of irrigation amount, its value range in 0.65 ~ 0.34 kg·m⁻³. The size of crop coefficient was expressed as lowering ~ boll opening > budding > flowering > boll opening ~ receiving flowers > seedling ~ squaring > seeding ~ seedling emergence. The crop coefficients in whole growth period were appeared a single peak change and peak value was appeared in flowering ~ boll opening stage. In growth period of cotton, the plant height, leaf area index and chlorophyll, the whole trend was increase at first, and then decrease, ultimately remained smooth and steady. Under different treatments, the plant height and leaf area index was proportional to irrigation amount, increased with the increase of irrigations water. The peak value of plant height and leaf area index was appeared in the blossing and boll-forming stage and the peak value of the chlorophyll was appeared in the bud stage.

Keywords: drip irrigation under film; cotton; water requirements; water productivity; crop coefficient

收稿日期:2016-07-10 修回日期:2016-09-23
基金项目:新疆水利科技专项(2013G02)
作者简介:翟超(1986—),男,新疆奇台人,硕士,研究方向为节水灌溉。E-mail:494419789@qq.com。
通信作者:周和平(1958—),男,湖北孝感人,教授级高工,主要从事农业节水、水管理技术等研究。E-mail:xjslzhp@126.com。

膜下滴灌技术在新疆发展迅速,新疆统计局数据显示^[1],膜下滴灌面积从 2002 年 12 万 hm² 扩大到 2012 年的 200 万 hm²,新疆棉花种植面积从 2002 年 94 万 hm² 增加到 2012 年的 164.67 万 hm²。准噶尔盆地南缘区是北疆地区棉花主要产区,占全疆棉花产量的 35% 左右。气温对棉花生长影响较大,近 50 年的温度升高是过去 100 年的 2 倍^[2]。近年西北干旱区气温上升幅度为 0.33℃·10a⁻¹,其中北疆增温幅度大于其它地区^[3]。已有研究表明^[4]作物生长及农业生产受气候变化影响导致作物耗水变化,加上气候变异带来的降水波动,引起灌溉需水量的变化。目前针对气候变化对作物需水量影响研究方法有两种,一是通过收集历史气象资料,分析历年影响作物需水量变化的主要气象因素以及多年需水量变化趋势^[5-8];另一种是将历史气象资料与模型相结合,预测未来年份作物需水量变化趋势^[9-13],两种方法均采用 FAO56-PM 法计算作物灌溉需水量。然而,新疆棉花膜下滴灌需水规律研究大部分集中在 2000 年左右^[14-17]。近 15 年间气象环境也发生变化,但近期关于膜下滴灌棉花不同年际间需水规律和相关生理指标及特征研究较少。本文通过 2013—2015 年灌溉试验研究,利用气象资料、实测作物需水量、作物产量和生理特征数据,研究准噶尔盆地南缘区棉花生育期灌溉需水量变化、主要气象影响因素及其规律,作物产量、水分生产率、生理特征与灌水量的关系,为灌区合理配置灌溉用水、提高水分利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于新疆灌溉中心试验站,地处昌吉市滨湖镇 13 户村(87°18'E,44°01'N),平均海拔 600 m。该区处于天山北坡冲积、洪积平原南缘,属天山北坡带头屯河流域,年均降水 181.7 mm、年蒸发 1 739.1 mm、日照时数 7.8 h,年均气温 13.1℃,≥0℃积温 3 834.3℃以上,属典型内陆干旱性气候。研究区地下水埋深 2.5~4.5 m,棕漠土类土壤质地为中—轻壤,0~120 cm 土层土壤干容重 1.46~1.65 g·cm⁻³,耕作层 1.50~1.60 g·cm⁻³,0~120 cm 土层田间持水量(干土重)18.8%~23.9%,耕作层 20.1%~23.4%;地表与地下水矿化度 3~4 g·L⁻¹,按等级划分属弱咸水,土壤全盐小于 0.2%,无盐渍化;耕作层土壤有机质 1.59%,肥力属中偏下水平,土壤有效氮 90.84 mg·kg⁻¹,有效磷 41.63 mg·kg⁻¹,有效钾 421.2 mg·kg⁻¹。研究区建有 2 组地下廊道防雨棚

式测坑设施,其中 1 组具有土壤水分、温度、盐分自动采集,适应不同灌溉试验设计需要的自动化设施。测坑设施总面积 604 m²,每组测坑面积 301.54 m²(长 32.25 m,宽 9.35 m),试验处理小区 24 个,以廊道为中心,两侧分布 12 个(长×宽,3.333 m×2 m,面积 6.67 m²)试验处理小区,2 组测坑共计 48 个试验处理小区。

1.2 试验设计

供试品种为当地广泛种植的 T10。于 2013 年 4 月 24 日播种,9 月 26 日收获;2014 年 4 月 29 日播种,9 月 18 日收获。2015 年 4 月 22 日播种,9 月 18 日收获;按照当地种植方式布置,一膜两管四行,膜宽 125 cm,株距 10 cm,行距 12 cm。采用迷宫式滴灌带,滴头间距 20 cm,设计滴头流量为 2.4×10⁻³ m³·h⁻¹,用水表控制灌水量。灌水周期、次数、施肥及病虫害防治均按当地农业种植管理方式,灌水周期为 10 d 一次,关键生育期 5 d 一次,2013 年灌水 11 次,2014、2015 年灌水 12 次。试验设计按《灌溉试验规范》(SL13-2004),采用灌水定额单因素试验,作物全生育期设置 4 个处理水平,重复 3 次(表 1)。

表 1 灌溉试验方案

Table 1 The design scheme of the irrigation experiment	
处理 Treatment	灌水定额/(m ³ ·hm ⁻²) Test irrigation quota
T1	300
T2	375
T3	450
T4	525

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分测定 采用 TRIME 水分仪分别在播种前、收获后、灌水前,灌水后按 20 cm 分层测定 0~120 cm 土壤含水率。耗水量按照水量平衡公式计算:

$$ET = P + W + K - C - \Delta S \quad (1)$$

式中, P 为有效降雨量(mm); W 为灌水量(mm); K 为地下水补给量(mm); C 为深层渗漏量(mm); ΔS 为土壤储水量的变化量(mm)。试验区为有底测坑和防雨棚条件, $P = K = 0$,同时由于是滴灌,属于浅层局部湿润灌溉,深层渗漏量 C 可以忽略不计。故上式(1)可以写成:

$$ET = W - \Delta S \quad (2)$$

本文有效降雨的计算采用美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量分析方法^[18-20]:

$$P_e = \begin{cases} \frac{P(4.17 - 0.2P)}{4.17}, & P < 8.3 \text{ mm} \\ 4.17 + 0.1P, & P \geq 8.3 \text{ mm} \end{cases} \quad (3)$$

式中, P_e 为有效降水量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); P 为总降水量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。

1.3.2 作物系数的计算 作物系数(K_c)是计算作物需水量的重要参数,其计算公式可用实测作物蒸腾量(ET)与同时间段内参考作物蒸腾量(ET_0)的比值表示。

$$K_c = (ET)/(ET_0) \tag{4}$$

1.3.3 水分利用效率的计算 水分利用效率计算公式为^[21]

$$WUE = Y_a/ET_a \tag{5}$$

式中, WUE 为水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Y_a 为皮棉产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET_a 为生育期间实际耗水量(mm)。

1.3.4 产量测定与考种 棉花成熟后进行田间调查统计,各试验处理小区选择 5 个面积为 1 m^2 的区域考种,收花 2~3 次,并用小型轧花机脱籽。

1.3.5 生育期动态记载及数据处理 采用直尺测量生育期株高、叶面积,采用 SPAD-502Plus 便携式叶绿素仪测定叶绿素相对值,采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行数据处理分析。

2 结果与分析

2.1 膜下滴灌棉花生育期耗水规律

由表 2 不同试验处理棉花生育期耗水分析可知,总耗水量随灌水量增加而显著增大,各年份 T4 处理比 T3、T2 和 T1 处理分别高 15.04%~13.00%、28.52%~27.24%和 43.27%~37.40%,T3 处理比 T2 和 T1 分别高 17.48%~14.36%和 34.14%~26.32%,T2 处理比 T1 高 20.64%~13.96%。

棉花生育期内耗水量随灌水量增加而增大,在出苗~现蕾、现蕾~开花、开花~吐絮阶段差异显著。出苗~现蕾阶段各年份 T4 处理耗水量比 T3、T2 和 T1 处理分别高 25.07%~9.95%、34.61%~32.22%和 56.38%~41.07%,T3 处理比 T2 和 T1 处理分别高 27.39%~10.76%和 41.79%~28.53%,T2 处理比 T1 处理高 34.77%~9.88%。现蕾~开花阶段各年份 T4 处理耗水量比 T3、T2 和 T1 处理分别高 11.15%~11.12%、26.73%~20.57%和 42.80%~34.09%,T3 处理比 T2 和 T1 处理分别高 17.53%~10.70%和 35.64%~25.89%,T2 处理比 T1 处理高 22.89%~12.03%。开花~吐絮阶段各年份 T4 处理阶段耗水量比 T3、T2 和 T1 处理分别高 14.55%~14.50%、30.39%~25.19%和 44.74%~32.84%,T3 处理比 T2 和 T1 处理分别高 18.53%~12.50%和 35.33%~21.44%,T2 处理比 T1 处理高 20.62%~10.22%。

各处理生育期内耗水模数变化规律为:播种~出苗阶段耗水模数为 1.70%~3.68%,出苗~现蕾阶段为 13.22%~31.38%,现蕾~开花阶段为 18.84%~32.47%,开花~吐絮阶段达最大值 25.26%~34.60%,吐絮~收花阶段为 14.56%~22.17%。各处理播种~出苗阶段耗水强度最小为 0.86~1.88 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;出苗~现蕾阶段耗水强度为 1.04~3.25 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,现蕾~开花阶段气温升高,植株生长旺盛,耗水强度为 3.59~6.37 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,开花~吐絮阶段,是营养和生殖生长并进期,耗水强度达最大为 2.51~6.86 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,吐絮~收花阶段,植株叶片逐渐凋零,耗水强度下降为 1.87~4.69 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,全生育期棉花平均日耗水强度变化范围为 3.05~3.55 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

以上分析看出,棉花生育期总耗水量随灌水量增加而显著增大;不同处理在出苗~现蕾、现蕾~开花、开花~吐絮阶段耗水量差异显著,这是由于不同灌溉处理下总耗水量存在差异,且在开花~吐絮阶段不同灌溉处理间差异最大,说明这一时期棉花对水分需求最大。

2.2 气象因素变化规律

由表 3 可知,气象因素中平均温度、有效降雨、太阳辐射、相对湿度呈逐年增长趋势,2015 年平均温度比前两年高 7.3%~17.0%,有效降雨高 2.5%~22.8%,太阳辐射高 1.57%~12.1%,相对湿度高 15.0%~23.5%。平均温度和太阳辐射的峰值出现在现蕾~开花阶段,有效降雨和相对湿度的峰值出现在吐絮~收花阶段,风速的峰值出现在播种~出苗阶段。

2.3 气象因素对棉花生育期需水量的影响

为分析气象因素对棉花需水量的影响,采用 Pearson 相关分析法,对 2013—2015 年气象要素与棉花生育期需水量进行相关分析,由表 4 结果看出,不同气象要素与各生育期需水量的相关关系不同,太阳辐射、风速在播种~出苗、吐絮~收花阶段与需水量呈正相关关系,相对湿度在出苗~现蕾阶段与需水量呈负相关,平均温度在现蕾~开花、开花~吐絮阶段与需水量呈正相关,相关性显著($P \leq 0.05$)。由于处理在雨棚下试验,有效降雨因素影响不显著。为深入研究影响需水量变化的主要气象因素,采用线性逐步回归的方法分析了气象因素变化与棉花需水量之间的关系,其中平均温度的变化对其影响最为突出,线性回归方程的决定系数均达到 0.74。

2.4 作物系数分析

三年间棉花各处理作物系数的变化规律见表

5,年际作物系数随灌水定额增加而增大,其值在 0.56~1.08 之间变化,各生育阶段作物系数变化为:播种~出苗阶段作物系数 0.23~0.50,出苗~现蕾阶段作物系数 0.25~0.76,现蕾~开花阶段作物系数 0.78~1.33,开花~吐絮阶段作物系数在 0.72~1.64,吐絮~收花阶段作物系数 0.62~1.19。综合分析表明,三年间作物系数开花~吐絮阶段最大,其值为 1.13,播种~出苗作物系数最小,其值为0.31。

表 2 2013—2015 年不同处理棉花耗水规律

Table 2 The water consumption rule of cotton for each treatment in 2013—2015																	
年份 Year	处理 Treat- ment	播种 ~ 出苗 Seeding ~ seedling emergence			出苗 ~ 现蕾 Seedling ~ squaring			现蕾 ~ 开花 Budding ~ flowering			开花 ~ 吐絮 Flowering ~ boll opening			吐絮 ~ 收花 Boll ~ receiving flowers			全生 育期 Growth period
		耗水量 Water consum- tion /mm	耗水 强度 Water consumption intensity /(mm·d ⁻¹)	耗水 模数 Water modulus /%	耗水量 Water consum- tion /mm	耗水 强度 Water consumption intensity /(mm·d ⁻¹)	耗水 模数 Water modulus /%	耗水量 Water consum- tion /mm	耗水 强度 Water consumption intensity /(mm·d ⁻¹)	耗水 模数 Water modulus /%	耗水量 Water consum- tion /mm	耗水 强度 Water consumption intensity /(mm·d ⁻¹)	耗水 模数 Water modulus /%	耗水量 Water consum- tion /mm	耗水 强度 Water consumption intensity /(mm·d ⁻¹)	耗水 模数 Water modulus /%	
2013	T1	9.19a	1.53a	2.68a	100.19d	1.89d	29.2a	64.66c	3.59c	18.84a	93.01d	2.51d	27.1a	76.09b	2.53b	22.17a	343.14d
	T2	10.01a	1.67a	2.51a	116.6c	2.20c	29.23a	83.85b	4.66b	21.02a	103.6cd	2.8cd	25.97a	84.77b	2.83b	21.25a	398.83c
	T3	9.77a	1.63a	2.1b	140.18b	2.64b	30.1a	100.47ab	5.58ab	21.57a	118.4b	3.20b	25.42a	96.88b	3.23b	20.8a	465.7b
	T4	11.3a	1.88a	2.06b	172.03a	3.25a	31.38a	113.04a	6.28a	20.62a	138.48a	3.74a	25.26a	113.3a	3.78a	20.66a	548.15a
2014	T1	13.2a	1.65a	3.68a	82.00b	1.86b	22.84a	97.74c	3.91c	27.22a	113.79d	3.79d	31.69b	52.29b	1.87b	14.56a	359.02d
	T2	13.76a	1.72a	3.19b	90.99b	2.07b	21.07a	117.78b	4.71b	27.27a	143.35c	4.78c	33.19a	66.01b	2.36b	15.28a	431.89c
	T3	13.79a	1.72a	2.64c	125.3ab	2.85ab	23.94a	131.8ab	5.28ab	25.2b	175.96b	5.87b	33.62a	76.45b	2.73b	14.61a	523.4b
	T4	10.22a	1.28a	1.7d	139.15a	3.16a	23.13a	148.29a	5.93a	24.65b	205.92a	6.86a	34.23a	98.03a	3.50a	16.29a	601.61a
2015	T1	6.93a	0.86a	1.95b	46.86c	1.04c	13.22b	115.12d	4.11d	32.47a	119.47d	3.51d	33.7a	66.07c	2.87c	18.63a	354.45d
	T2	8.04a	1.00a	1.8b	71.84b	1.59b	16.08a	130.86c	4.66c	29.29b	150.51c	4.42c	33.69a	85.39b	3.71b	19.11a	446.64c
	T3	9.86a	1.23a	1.83b	80.5ab	1.78ab	14.95b	158.68b	5.66b	29.48b	184.75b	5.43b	34.32a	104.4a	4.50a	19.39a	538.19b
	T4	14.55a	1.81a	2.32a	107.44a	2.38a	17.19a	178.59a	6.37a	28.58b	216.21a	6.35a	34.6a	108.02a	4.69a	17.28a	624.81a

注:不同小写字母表示同一时期不同灌溉处理差异显著($P\leq 0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments in the same stage. The same as below.

表 3 2013—2015 年棉花不同生育期气象要素变化

		平均气温/℃ Average temperature			风速/(m·s ⁻¹) Wind speed			有效降雨/mm Effective rainfall			太阳辐射/(MJ·m ⁻²) Solar radiation			相对湿度/% Relative humidity		
生育期 Growth stage		2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015
播种~出苗 Seedling ~ seedling emergence		11.1	12.4	16.2	1.35	1.50	1.50	3.0	4.0	0.0	242.6	200.8	251.2	45.4	50.5	47.6
出苗~现蕾 Seedling~ squaring		17.6	19.6	20.6	0.3	1.3	0.4	23.0	26.0	22.0	252.5	230.2	224.8	42.0	39.4	53.4
现蕾~开花 Budding~ flowering		23.0	25.6	28.8	0.8	0.9	0.5	6.0	7.0	6.0	261.7	222.5	272.4	39.9	44.4	54.8
开花~吐絮 Flowering ~ boll opening		22.5	25.0	27.8	0.9	1.0	0.3	5.0	6.0	28.0	210.6	203.5	229.5	43.2	48.0	54.4
吐絮~收花 Boll~ receiving flowers		21.0	23.4	21.0	1.0	0.7	0.5	24.0	34.0	23.0	180.0	167.8	188.0	47.0	48.0	60.5
全生育期 Growth period		19.0	21.2	22.9	0.9	1.0	0.6	61.0	77.0	79.0	229.5	205.0	233.2	41.4	46.0	54.1

表 4 棉花不同生育阶段灌溉需水量与气象要素的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of irrigation requirements and meteorological factors in different growth stages of cotton		气象要素 Meteorological factor				
不同生育阶段灌溉需水量 Irrigation requirement at different stage		有效降雨量 Effective rainfall/mm	太阳辐射 Solar radiation /(MJ·m ⁻²)	相对湿度 Relative humidity/%	平均温度 Average temperature/℃	风速 Wind speed /(m·s ⁻¹)
播种 ~ 出苗 Seeding ~ seedling emergence		- 0.965	0.999 *	- 0.637	0.734	0.832 *
出苗 ~ 现蕾 Seedling ~ squaring		- 0.924	0.798	- 0.929 *	0.194	0.084
现蕾 ~ 开花 Budding ~ flowering		0.522	0.117	- 0.412	0.999 *	0.040
开花 ~ 吐絮 Flowering ~ boll opening		0.289	- 0.686	- 0.407	0.688 *	0.479
吐絮 ~ 收花 Boll ~ receiving flowers		- 0.522	0.990 *	0.758	- 0.290	0.625

注：* 为 0.05 水平 (双侧) 上显著相关。 Note: Significant correlation at the $P < 0.05$ level (bilateral).

表 5 2013—2015 年不同处理条件下棉花各生育阶段作物系数

Table 5 Crop coefficient of cotton in each growth stage under different treatment during 2013—2015		生育期 Growth period					
年份 Year	试验处理 Treatment	播种 ~ 出苗 Seeding ~ seedling emergence	出苗 ~ 现蕾 Seedling ~ squaring	现蕾 ~ 开花 Budding ~ flowering	开花 ~ 吐絮 Flowering ~ boll opening	吐絮 ~ 收花 Boll ~ receiving flowers	全生育期 Growth period
2013	T1	0.25a	0.36c	0.80c	0.78d	0.63b	0.56d
	T2	0.29a	0.42c	0.93b	1.02c	0.70b	0.67c
	T3	0.29a	0.54b	1.12b	1.13b	0.96a	0.81b
	T4	0.35a	0.64a	1.26a	1.52a	1.16a	0.99a
2014	T1	0.32a	0.45d	0.78c	0.91d	0.62c	0.64d
	T2	0.33a	0.50c	0.94b	1.14c	0.79b	0.77c
	T3	0.33a	0.68b	1.05b	1.40b	0.91a	0.94b
	T4	0.25a	0.76a	1.18a	1.64a	1.17a	1.08a
2015	T1	0.23b	0.25c	0.86c	0.72d	0.72c	0.59d
	T2	0.27b	0.39b	0.98b	0.91c	0.93b	0.74c
	T3	0.34b	0.44b	1.18b	1.12b	1.14a	0.89b
	T4	0.50a	0.59a	1.33a	1.31a	1.19a	1.04a

由图 1 可知,生育期内作物系数呈单峰变化,不同年份峰值出现时期不同,2013、2014 年峰值出现在开花 ~ 吐絮阶段,2015 年峰值出现在现蕾 ~ 开花阶段。通过分析气象数据可知,2015 年现蕾 ~ 开花阶段最高气温达 45.2℃,受气温影响,此阶段棉花参考作物蒸腾量与实际耗水量相关性较大,同时该阶段耗水量分别比 2013、2014 年同期高 37.93%、15.01%,耗水强度也高于其它年份。受灌水量影响,T4 的实际蒸发蒸腾量高于其它处理,在全生育期内,相应阶段的作物系数也高于其它处理。

2.5 生理指标分析

表 6 为各处理棉花株高、叶面积指数和叶绿素测定结果,各处理苗期 ~ 花铃期,株高与叶面积指数随灌水量增大而增加,吐絮期略有降低,随后保持平稳,全生育期呈单峰变化,峰值出现在花铃期。叶绿素峰值出现在蕾期,此时是棉花营养生长最旺盛时

期。T3 处理叶面积指数高于其它处理,较高叶面积指数提高了棉花光合作用,有利于生殖生长阶段有机物的积累。

2.6 水分生产率分析

表 7 为 2013—2015 年灌水量与产量、水分利用率分析结果,可以看出,不同灌水量处理棉花产量差异较显著。三年最高产量对应灌水定额均为 450 m³·hm⁻²,最低产量灌水定额为 300 m³·hm⁻²,T3 处理比 T4、T2 和 T1 处理产量分别高 6.18% ~ 1.82%、11.38% ~ 9.67% 和 25.92% ~ 11.39%。各处理产量与生育期灌水量呈二次曲线关系,随灌水量的增加产量先增后减,经优化分析棉花生育期灌水量 496 ~ 605 m³·hm⁻²,产量可达 2 280 ~ 2 400 kg·hm⁻²。水分生产率随灌水量增加而降低,变幅 0.65 ~ 0.34 kg·m⁻³之间。

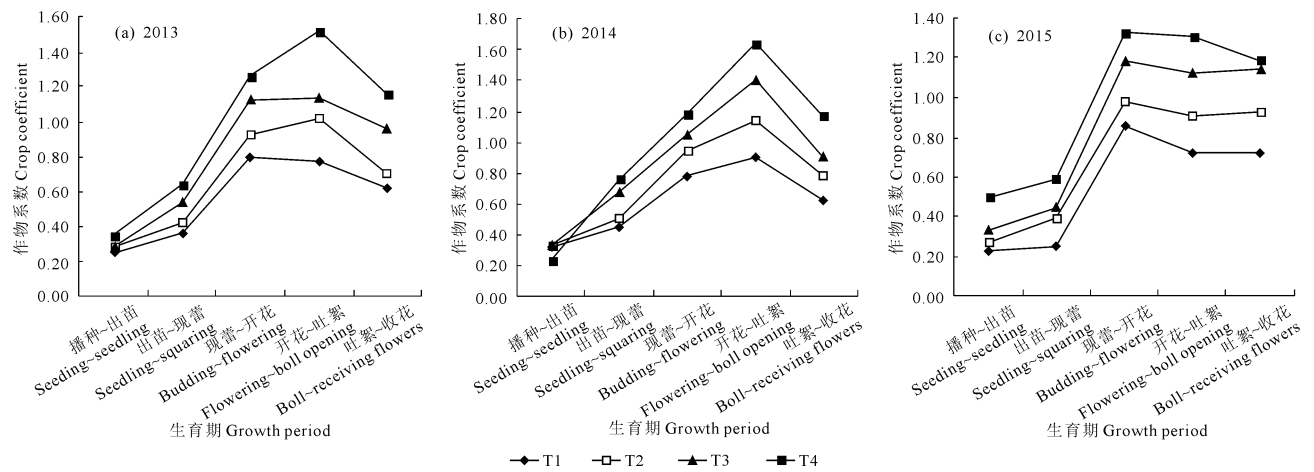


图 1 不同处理条件下棉花各生育期作物系数

Fig.1 Crop coefficient of cotton in each growth stage under different treatment

表 6 2013—2015 年不同处理条件下棉花株高、叶面积指数和叶绿素含量

Table 6 Plant height, leaf area index and chlorophyll concentration under different treatment in 2013—2015

年份 Year	处理 Treatment	苗期 Seedling			蕾期 Bud emergence			花铃期 Flowering			吐絮期 Boll opening		
		株高 Plant height /cm	叶面积 指数 Leaf area index	叶绿素含量 Chlorophyll concentration	株高 Plant height /cm	叶面积 指数 Leaf area index	叶绿素含量 Chlorophyll concentration	株高 Plant height /cm	叶面积 指数 Leaf area index	叶绿素含量 Chlorophyll concentration	株高 Plant height /cm	叶面积 指数 Leaf area index	叶绿素含量 Chlorophyll concentration
2013	T1	19.6a	0.12a	46.8a	64.6a	2.62a	68.5a	92.8b	5.18a	53.7b	80.5b	3.57a	60.4a
	T2	19.2a	0.18a	47.9a	59.6a	2.66a	62.1b	90.2b	5.87a	55.5b	79.8b	3.70a	60.7a
	T3	18.5a	0.15a	46.0a	60.8a	2.55a	69.9a	96.3b	5.43a	56.3b	84.3a	4.21a	62.2a
	T4	19.6a	0.15a	47.9a	62.5a	2.94a	71.1a	104.6a	5.26a	63.5a	88.4a	3.60a	58.8a
2014	T1	13.1a	0.07a	37.7b	55.0a	1.27b	66.1b	88.4b	3.30b	66.1a	87.1b	3.41b	62.4a
	T2	12.6a	0.07a	44.5a	58.4a	1.40a	62.4b	91.2b	3.07b	65.2a	95.5ab	3.46b	54.9b
	T3	13.5a	0.10a	44.1a	59.2a	1.51a	70.7a	101.4a	4.22a	59.5b	110.3a	4.07a	57.4b
	T4	12.4a	0.08a	46.0a	61.1a	1.38a	70.5a	105.0a	4.49a	56.4b	110.8a	4.02a	56.3b
2015	T1	15.8a	0.15a	58.6a	53.4b	1.66b	66.0a	92.8b	3.56b	57.8ab	94.5b	2.76c	50.9a
	T2	17.3a	0.08a	55.9a	50.1b	1.37c	67.7a	88.4b	3.57b	54.5b	92.0b	3.63b	55.4a
	T3	17.4a	0.19a	60.1a	58.7a	2.10a	62.7a	100.5a	3.65b	51.8b	96.8b	4.31a	53.6a
	T4	14.5a	0.12a	58.2a	51.3b	1.65b	55.2b	103.3a	4.69a	60.5a	102.3a	3.54b	47.5b

表 7 2013—2015 年不同处理下棉花灌水量、耗水量、产量和水分生产率

Table 7 Irrigation amount, water consumption, yield and WUE of cotton under different treatments during 2013—2015

试验处理 Treatment	灌水量/mm Irrigation			耗水量/mm Water consumption			皮棉产量/(kg·hm ⁻²) Lint yield			水分生产率/(kg·m ⁻³) Water productivity		
	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015
T1	330	360	360	343.1d	359.0d	354.4d	2240c	1623d	1863d	0.65a	0.45a	0.53a
T2	413	450	450	398.8c	431.9c	446.6c	2263c	1967c	2061c	0.57b	0.46a	0.46b
T3	495	540	540	465.7b	523.4b	538.2b	2528a	2192a	2327a	0.54b	0.42b	0.43c
T4	578	630	630	548.2a	601.6a	624.8a	2372b	2031b	2283b	0.43c	0.34c	0.37d

3 结 论

1) 棉花全生育期总耗水量随灌水量增加而增

大,不同年份各试验处理间耗水量变化较大;生育阶段耗水量,不同处理在出苗~现蕾、现蕾~开花、开花~吐絮阶段耗水量差异明显,这是由于不同灌溉

处理和年际气象因素对总耗水量影响较大,开花 – 吐絮阶段不同灌溉处理对棉花生长差异影响最大,说明这一时期水分需求敏感。

2) 气象要素对棉花生育期需水量影响,太阳辐射、风速在播种 ~ 出苗、吐絮 ~ 收花阶段与需水量呈正相关关系,相对湿度在出苗 ~ 现蕾阶段与需水量呈负相关关系,气温在现蕾 ~ 开花、开花 ~ 吐絮阶段与需水量呈正相关关系。全生育期气温变化对作物需水量影响最大,线性回归方程相关系数均达到 0.74。

3) 棉花皮棉产量与全生育期灌水量呈二次抛物线关系,经优化分析达到 $2\,280 \sim 2\,400\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相应灌水量为 496 ~ 605 mm,水分生产率为 $0.48 \sim 0.37\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

4) 棉花作物系数大小表现为:开花 ~ 吐絮 > 现蕾 ~ 开花 > 吐絮 ~ 收花 > 出苗 ~ 现蕾 > 播种 ~ 出苗,全生育期呈单峰变化,表现为先增后减规律,作物系数峰值出现在开花 ~ 吐絮期,其值为 1.13。播种 ~ 出苗期最小,其值为 0.31。

5) 生育期内棉花株高、叶面积指数和叶绿素含量,整体趋势为先增后减,最终保持平稳。株高和叶面积指数与灌水量呈正比,随灌水量增大而增加,峰值出现在花铃期,叶绿素含量峰值出现在蕾期。

6) 膜下滴灌棉花灌溉定额为 496 ~ 605 mm,灌水次数 10 ~ 12 次,其中苗期 3 次,蕾期 2 ~ 3 次,花铃期 4 ~ 5 次,吐絮期 1 次,平均灌水周期 10 d(蕾期、花铃期 5 d 一次)。

参 考 文 献:

[1] 新疆维吾尔自治区统计局新疆统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2012.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK and New York, USA: IPCC, 2007.

[3] 李 硕,沈彦俊.气候变暖对西北干旱区农业热量资源变化的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(2):227-235.

[4] 王卫光,彭世彰,缴锡云,等.气候变化对作物灌溉需水量研究

进展及述评[C]//农业工程学会年会会议论文集,2010:234-242.

[5] 黄仲冬,齐学斌,樊向阳,等.气候变化对河南省冬小麦和夏玉米灌溉需水量的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(4):10-13.

[6] 胡 玮,严昌荣,李迎春,等.气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J].生态学报,2014,34(9):2367-2377.

[7] 阎苗渊,马细霞,路振广,等.气候变化对人民胜利渠灌区作物灌溉需水量影响分析[J].灌溉排水学报,2013,32(4):64-66.

[8] 罗玉峰,彭世彰,王卫光,等.气候变化对水稻灌溉需水量的影响[J].武汉大学学报,2009,42(5):609-613.

[9] 王卫光,孙凤朝,彭世彰,等.水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟[J].农业工程学报,2013,29(14):90-98.

[10] 王卫光,彭世彰,孙凤朝,等.气候变化下长江中下游水稻灌溉需水量时空变化特征[J].水科学进展,2012,23(5):656-664.

[11] 丛振涛,辛 儒,姚本智,等.基于 HadCM3 模式的气候变化下北京地区冬小麦耗水研究[J].水利学报,2010,41(9):1101-1107.

[12] Wang W, Sun F, Luo Y, et al. Changes of rice water demand and irrigation water requirement in Southeast China under future climate change[C]// Procedia Engineering, 2012,28:341-345.

[13] Tao F, Hayashi Y, Zhang Z, et al. Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008,148:94-110.

[14] 蔡焕杰,邵光成,张振华.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] 李富先,杨芳芳,张 玲,等.棉花膜下滴灌需水规律和最大耗水时段及耗水量的研究[J].新疆农业大学学报,2002,25(3):43-47.

[16] 蔡焕杰,邵光成,张振华.不同水分处理对膜下滴灌棉花生理指标及产量的影响[J].西北农林科技大学学报,2002,30(4):29-32.

[17] 李明思,马富裕,郑旭荣,等.膜下滴灌棉花田间需水规律研究[J].灌溉排水,2002,21(1):58-60.

[18] Smith M C. A computer program for irrigation planning and management. Irrigation and Drainage Paper.46[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United,1992:20-21.

[19] Doll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements [J]. Water Resources Research,2002,38(4):1-8.

[20] Li Y, Yang X G, Ye Q, et al. Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961—2007[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(9):175-183.

[21] 刘 浩,孙景生,张寄阳,等.耕作方式和水分处理对棉花生产及水分利用的影响[J].农业工程学报,2011,27(10):164-168.