文章编号:1000-7601(2019)03-0083-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.03.10

根据气象信息指导南疆棉花膜下滴灌的试验研究

樊 凯[1,2],高 阳[1],王兴鹏[3],王洪博[3],段爱旺[1]

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所/农业部作物需水与调控重点实验室,河南 新乡 453003;2.中国农业科学院研究生院,北京 100081;
3.塔里木大学水利与建筑工程学院,新疆 阿拉尔 843300)

摘 要:为了探索利用气象信息指导膜下滴灌棉花科学灌溉的可行性,在南疆阿拉尔布设田间试验,根据自动气象站采集的气象信息计算作物蒸发蒸腾量(ET_c),当蒸发蒸腾量与降水量的差值累计达到 30 mm 时即进行灌溉。试验设置 3 个灌水定额处理,T1:24 mm,T2:30 mm,T3:36 mm,分别为水分亏缺量的 0.8,1.0 和 1.2 倍,同时设置 1 个当地生产中的常规灌溉处理作为对照(T4),重复 3 次。试验过程中,对不同处理棉田的土壤水分动态变化、植株生理指标、籽棉及皮棉产量、灌溉水利用效率和田间水利用效率进行了监测与分析。结果表明:根据气象信息指导灌溉的处理生育期耗水量在 361.8~435.2 mm,且灌水定额越大,全生育耗水量越多,但均显著低于常规灌溉处理 522.1 mm 的总耗水量。根据气象信息确定灌溉时间的处理,籽棉产量与灌水定额呈显著的正相关关系,T3 处理籽棉产量 7 072.05 kg·hm^{-2}与 T4 对照处理 7 245.28 kg·hm^{-2}的籽棉产量无显著差异,但灌水量却减少了 164 mm;灌溉水利用效率随着灌水定额的增加而减小,但均显著高于对照处理。综合灌水量、产量及水分利用效率等因素考虑,认为当棉田作物蒸发蒸腾量与降水量的差值累计达到 30 mm 灌溉+灌水定额 36 mm 的组合,可以在保证棉花不减产的条件下,显著提高灌溉水利用效率和田间水利用效率,适用于南疆地区根据气象信息指导膜下滴灌棉花的灌溉管理。

关键词:膜下滴灌;棉花;蒸发蒸腾量(ET_c);气象信息;灌溉策略;水分利用效率

中图分类号:S562;S274.3 **文献标志码**:A

Study on cotton drip irrigation under film mulching in southern Xinjiang based on meteorological information

FAN Kai[1,2], GAO Yang[1], WANG Xing-peng[3], WANG Hong-bo[3], DUAN Ai-wang[1]

(1. *Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Xinxiang, Henan* 453003, *China*;
2. *Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*;
3. *College of Water Conservancy and Architectural Engineering of Tarim University, Alaer, Xinjiang* 843300, *China*)

Abstract: In order to explore the feasibility of guiding cotton drip irrigation under mulch according to meteorological information in southern Xinjiang, a field experiment was conducted in Alar, southern Xinjiang. The irrigation was carried out when the difference between evapotranspiration and precipitation reached 30 mm. The evapotranspiration of crops (ET_c) was calculated from weather data collected by automatic meteorological station. There were four treatments including three irrigation quotas (T1:24 mm, T2:30 mm, and T3:36 mm) and a conventional irrigation treatment (T4), which was considered as a control. Each treatment was triplicated. During the experiment, the dynamic changes in soil moisture, physiological indexes of plant, yield of seed-cotton and lint-cotton, irrigation water use efficiency, and field water use efficiency were monitored and analyzed. The results showed that the water consumption of the treatments guiding irrigation by meteorological information was between 361.8~435.2 mm, it was noticed that the greater irrigation quota was, the more water consumption during the whole growth

收稿日期:2018-09-26 **修回日期**:2019-04-09

基金项目:中国农业科学院科技创新工程;国家"十二五"重点研发计划(2016YFCD400208)

作者简介:樊凯(1992-),山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为作物水分生理与高效用水。E-mail:fak866@163.com

通信作者:段爱旺(1963-),山西长治人,研究员,主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail:duanaiwang@aliyun.com

period was. However, it was significantly lower than the total water consumption of 522.1 mm under conventional irrigation. Furthermore, unginned cotton yield was positively correlated with irrigation quota. There was no significant difference in unginned cotton yield between T3 treatment (7 072.05 kg · hm^{-2}) and T4 control treatment (7 245.28 kg · hm^{-2}). The irrigation water use efficiency decreased with increasing irrigation quota but was significantly higher than that of the control treatment. Taking in account the yield and water use efficiency of different irrigation treatments, it is concluded that when the difference of evapotranspiration and precipitation was 30 mm, 36 mm irrigation quota can significantly improve the irrigation water use efficiency and field water use efficiency without impacting cotton yield, which is suitable for southern Xinjiang.

Keywords: drip irrigation under mulch; cotton; evapotranspiration (ET_c); meteorological information; irrigation strategy; water use efficiency

新疆南部地区日照充足、降水稀少、蒸发强烈，农业生产的发展完全依赖于水资源的可利用数量，是典型的灌溉农业区。该地区农业用水占区域总用水量的90%以上，进一步拓展的潜力几乎为零。因此，大力发展节水灌溉，提高灌溉水利用效率对于保障南疆地区农业生产的可持续发展具有重要意义。

膜下滴灌是将覆膜栽培与滴灌技术相融合的一种新型栽培模式[1]，自1996年提出以来，已在新疆地区得到大面积推广应用，目前应用面积高达266万 hm^2[2]，成为棉花栽培的主导模式。有关新疆膜下滴灌棉花适宜的灌溉制度及灌水量的研究已有许多[2-22]，蔡焕杰等[3]通过研究确定了荒漠气候区膜下滴灌棉花适宜的灌水定额及灌水次数；刘新永等[4]通过田间试验，制定了南疆膜下滴灌棉花在充分供水条件下的灌溉制度；杨鹏年等[5]、黄晓敏等[13]针对浅层地下水对灌溉的补偿作用，研究了不同地下水埋深下的膜下滴灌棉花的灌溉制度。这些研究多从固定灌水周期和固定灌水定额出发探求最优的灌溉制度，这样处理的好处是成果易于理解与使用，不足之处是无法根据各地的实际气象条件及棉花生长状况来调整灌水量和灌水时间，容易在一些特殊年份引起较大的偏差。为了提高灌溉的精准性，赵波[6]采用根据土壤墒情监测结果进行灌溉决策的思路，研究了膜下滴灌棉花自动化灌溉适宜的土壤水分控制指标。许多地区也建设了根据土壤墒情监测信息指导棉田灌溉，甚至是自动控制灌溉的系统，试图做到适时、适量、精准、自动灌溉。但从实际生产中的应用情况看，效果还不是太理想，主要问题有几个方面：一是设置的土壤墒情监测点数量很少，监测结果的代表性不足，易产生较大的偏差；二是系统运行易受到人为或其他外来因素影响，可靠性没有保证，对农田耕作的影响也较大；三是系统建设费用较高，严重制约其大面积的推广应用。

作物的蒸腾蒸发过程在很大程度上决定于气象条件，因此根据气象信息进行农田灌溉管理具有较好的理论基础。相较于土壤墒情信息的监测，气象信息的监测更为方便，代表的区域面积也更大。在生产实践中，或通过两种方法来实施这一技术：一是对于较大规模的种植户或兵团的团场，可以自主设立自动气象站，并预置相应的程序，自动计算并输出逐日ET_0值，甚至(ET_c-P)的值，用户只要记住各田块上次灌溉的时间，然后根据这些信息即可确定累计(ET_c-P)值，当该值达到30 mm时，即是需要灌溉的时间，这样的方法也很容易置入自动灌溉控制系统，实施自动灌溉；对于小规模的零散种植户，在大面积推广应用时，可以委托气象站或农技服务部门定时向广大种植户提供逐日ET_0值或者(ET_c-P)值，供种植户使用；在建立农田管理档案的情况下，也可由农技服务部门直接向种植户推送需要灌溉的信息。一般情况下，一个气象监测点至少可以控制直径为50 km的区域。基于这样的考虑，本试验依据在试验田实时获取的气象数据，利用FAO-56推荐的方法估算膜下滴灌棉田的作物蒸发蒸腾量(ET_c)，将其作为灌溉决策的重要参数，然后结合设置不同的灌水定额，探索在南疆地区根据气象信息指导膜下滴灌棉花精准灌溉的可行性及适宜的灌溉管理方案。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在新疆生产建设兵团一师水利局水土保持试验站开展。该站距离阿拉尔市区10 km，地理坐标为81°2′E，40°6′N，海拔1 014 m。试验站所在区域属典型的内陆极端干旱气候区，多年平均气温11.3℃，降水量45.7 mm，蒸发量2 217.75 mm，日照时数2 950 h，无霜期207 d。试验区地下水埋深整

个棉花生育期均在 3 m 以上,土壤质地为砂壤土,0~100 cm 土层平均容重为 1.58 g·cm^{-3},田间质量持水率为 22.1%。

1.2　试验设计

1.2.1　灌水时间确定　试验自蕾期(5 月 25 日)开始,利用气象信息计算确定每天的水分盈亏量,当累计亏水量达到 30 mm(即累计作物腾发量(ET_c)-降雨量(P)= 30 mm)时进行灌水。

作物蒸发蒸腾量(ET_c)采用 FAO-56 推荐的单作物系数法计算[7]:

$$ET_c = ET_0 \times K_c \tag{1}$$

参考作物需水量(ET_0)采用 FAO-56 修正并推荐的 Penman-Monteith 公式[7]计算。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \dfrac{900}{T+273} u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\, u_2)} \tag{2}$$

式中,R_n 为净辐射(MJ·m^{-2}·d^{-1}),G 为土壤热通量(MJ·m^{-2}·d^{-1}),T 为平均气温(℃),e_d 为实际水汽压(kPa),Δ 为温度-饱和水汽压关系曲线上 T 处的切线斜率(kPa·℃$^{-1}$),γ 为湿度表常数(kPa·℃$^{-1}$),u_2 为高度 2 m 处的风速(m·s^{-1}),e_a 为饱和水汽压(kPa)。

作物系数(K_c)是实际蒸散发(ET_c)与参考作物腾发量(ET_0)的比值。作物系数分为双作物系数和单作物系数,双作物系数将土壤蒸发和作物蒸腾分开考虑,而单作物系数则将两者结合在一起考虑。本试验采用单作物系数法,利用 FAO-56 给定的作物系数参考值计算棉花需水量。

作物系数在生长初期和生长中期是一个常数,分别为K_{c-ini} 和$K_{c-\mathrm{mid}}$,在生长最后阶段是$K_{c-\mathrm{end}}$,在快速生长期和生长后期,K_c 呈线性变化。FAO-56 给定的参考值需根据当地的气候条件进行调整。提供的$K_{c-\mathrm{ini}}$ 需要考虑湿润条件(灌溉和降雨)的频次,当灌溉或降雨的强度小于 10 mm 时,还需要考虑潜在蒸发的强度。FAO-56 提供了用于调整较小灌溉和降雨强度条件下的$K_{c-\mathrm{ini}}$ 图表,$K_{c-\mathrm{ini}}$ 被看作是降雨或灌溉频次和潜在蒸发强度的函数。$K_{c-\mathrm{mid}}$ 需根据当地的气象条件、作物高度进行调整,计算公式如下:

$$K_{c-\mathrm{mid}} = K_{c-\mathrm{mid}(Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \tag{3}$$

其中,$K_{c-\mathrm{mid}}$ 是根据当地气候条件调整的后的 FAO 作物系数,$K_{c-\mathrm{mid(Tab)}}$ 是 FAO-56 给定的标准条件下的参考值,u_2 是高度为 2 m 处的平均风速,$RH_{\min}$ 是平均最小相对湿度,h 为生长中期作物高度。$K_{c-\mathrm{end}}$ 的调整方法与$K_{c-\mathrm{mid}}$ 一致,使用的是生长后期对应的参数。

试验区周边地区,棉花在蕾期和花铃期累计作物腾发量(ET_c)的多年平均值为 380 mm,多年平均有效降雨量(P)为 45.7 mm,在充分考虑降雨对土壤水的补给作用的条件下,棉花生育期需灌水约 334.3 mm。

蔡焕杰等[3]研究发现,在荒漠气候区膜下滴灌棉花全生育期灌水 12~14 次,灌水定额 25~30 mm 之间可实现优质高产和提高水分利用率的目的。王峰等[8]的研究指出,在南疆一膜两带六行的种植模式下,棉花生育期内灌水 12 次,灌水量控制在 300 mm 左右是比较适宜的灌溉制度,与蔡焕杰等人研究结果接近。据此,将单次灌水量控制在 30 mm 左右。

1.2.2　灌水定额设置　灌水定额设置 3 个水平,分别为水分亏缺量的 0.8、1.0 和 1.2 倍,即 T1:30×0.8=24 mm,T2:30×1.0=30 mm,T3:30×1.2=36 mm,另设 1 个按照当地常规灌溉制度进行灌溉的处理 T4,作为对照。T4 处理的第一次灌水日期为 6 月 15 日,然后按照蕾期灌水周期 7 d、花铃期灌水周期 5 d、灌水定额 40 mm 的模式进行灌溉。每个处理设置 3 个重复,共 12 个小区,按照完全随机区组设计进行田间布置。

1.3　栽培模式及灌溉管网布置

试验田棉花于 4 月 3 日播种,7 月 11 日打顶,10 月 20 日全部收获完毕。试验地在 2016 年 11 月进行冬灌,灌水定额 200 mm;2017 年 3 月进行春灌,灌定额 100 mm。

施肥方式为随水施肥,第一次灌溉按 150 kg·hm^{-2}用量施用尿素,第二次灌溉不施肥,第三次按 150 kg·hm^{-2}施用滴灌专用肥(总养分≥43%,N∶P_2O_5∶K_2O =18∶12∶13),至 8 月 20 日施最后一次肥。

供试棉花品种为“新陆中 56”,覆膜种植,田间布置方式为一膜两带六行[23](见图 1),行距为 10 cm+66 cm+10 cm+66 cm+10 cm,株距 10 cm。膜宽 2 m,两膜之间留未覆膜白地 33 cm。滴灌带规格为 Φ16 mm,滴头间距 20 cm,滴头流量 2.29 L·h^{-1},供水压力 0.1 MPa。每个试验小区长 22 m,宽度为 3 个膜带,约 6 m,使用同一个支管供水,由安装在支管上的水表和闸阀监测与控制各试验小区的灌水量。

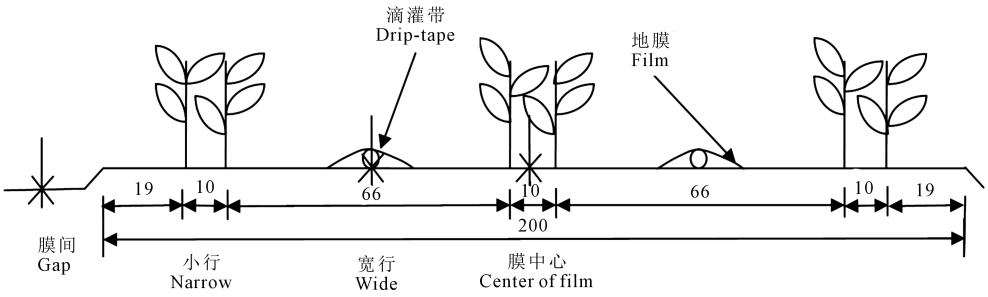


图 1 滴灌带布置方式/cm

Fig.1 Scheme of cotton field layout

1.4 观测项目及观测方法

1.4.1 土壤含水率 每个处理选择一个试验小区，在小区中部选择一条具有良好代表性的滴灌带，在其正下方安装 EM50 土壤水分自动监测系统，探头安装深度为 10、20、40、60 cm 和 80 cm，并在每个生育阶段内用土钻取土对仪器设备进行校正。

1.4.2 植株生长发育指标 从棉花现蕾期开始，在每个试验小区内选择具有较好代表性的 3 株棉花进行标记，每 10 d 测定一次株高，每 15 d 测定一次叶面积。株高为地面到冠层自然顶部的高度用直尺测定；叶面积测定时，用直尺逐个量取标记棉株叶片的长度和最大宽度值，用“单叶面积 = 长×宽×0.75”计算各叶片的面积，然后将所有单叶面积值累加，得到单株叶面积。植株生物量每 15 d 测定一次，在各试验小区内随机选择 3 个具有较好代表性的棉株，连根拔起，除掉附带的土壤后，置于烘箱中在 105℃下杀青 30 min，之后调至 65℃烘干至恒重，取出称取棉株的总重量，分解后再测取棉株各组成部分的干物质质量。

1.4.3 气象信息观测 气象信息由设置在试验田内的 HOBO 自动气象站记录，监测项目包括气温、太阳辐射、风速、风向、相对湿度、降水量等项目，每 10 min 记录一次。每天早上 8：00 定时下载气象数据，利用相应的程序计算ET_0、ET_c和水分亏缺量，并计算确定自上次灌溉后的累计水分亏缺量。

1.5 数据分析处理

采用 SAS ver9.2 与 Microsoft Excel 对数据进行统计分析和作图，采用 Duncan’s 新复极差法进行方差分析和差异性检验（$\alpha = 0.05$）。文中平均值指其加权平均值，加权平均值 = ∑（样品含量×取样深度/分析深度）。

2 结果与分析

试验执行期间，利用自动气象站监测的气象信息，根据 Penman-Monteith 公式计算的每日参考作物蒸散量（ET_0），采用单作物系数法确定棉田每日蒸散量（ET_c），以及 2017 年 5-9 月逐日降雨量的变化与分布情况如图 2 所示。

2.1 不同处理的土壤含水率动态

棉花进入蕾期（5 月 25 日）后开始进行灌水处理，一直持续至花铃期结束（8 月 24 日）。T1、T2 和 T3 处理的第一水灌水日期为 6 月 7 日，T4 常规灌溉处理则为 6 月 15 日，各处理的实际灌水情况见表 1。文献[9,14-15]及本试验取样结果显示，膜下滴灌条件下，地表以下 40 cm 土层范围集中了 85% 以上的根系，为棉花的主根区。据此，取 0～40 cm 处不同深度测量值的算术平均值为主根区土壤平均含水率，生育期内各处理主根区的土壤含水率动态变化如图 3 所示。从图 3 可以看出，各处理土壤含水率变化周期与灌水周期一致，每次灌水前都处于相对低值，灌水后显著增加。根据气象信息指导灌溉的

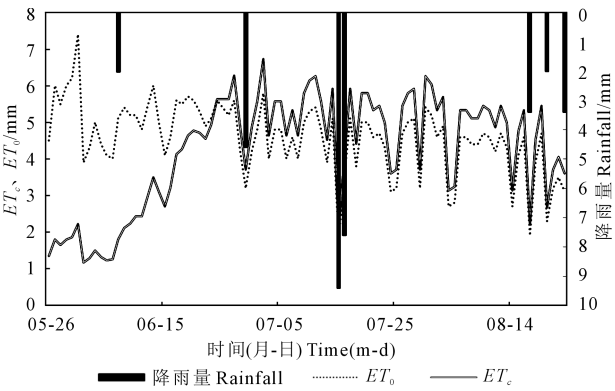


图 2 ET_0、ET_c及降雨量

Fig.2 ET_0、ET_c and rainfall

表 1 各处理实际灌溉情况

Table 1 Irrigation conditions of all treatments

处理 Treatment	灌水定额/mm Irrigation quota	灌水次数 Frequency of irrigation	总灌水量/mm Total irrigation water
T1	24	11	264
T2	30	11	330
T3	36	11	396
T4	40	14	560

处理,土壤含水率变化趋势一致,因灌水定额的不同,呈 3 种梯度,即 T3>T2>T1,且 3 个处理的灌前土壤含水率的相对低值在蕾期呈现出逐渐降低趋势,进入花铃前期后又开始上升,之后逐渐趋于稳定。T4 对照处理灌前土壤含水率的相对低值与其他 3 个处理呈现出不同的变化趋势,从蕾期到花铃期,先增大后减小,在花铃前期达到峰值,之后逐渐减小,并在花铃后期趋于稳定。

图 4 显示的是各灌水处理在蕾期、花铃前期和花铃后期的土壤含水率剖面分布情况。可以看出,不同生育阶段各处理的土壤含水率剖面分布均随着土层深度的增加而增大,在 60 cm 处达到峰值后又逐渐减小。0~40 cm 土层土壤含水率的波动幅度较大,60 cm 以下土壤含水率变化幅度逐渐减小,在 80 cm 处土壤含水率基本保持稳定。T4 对照处理因灌水定额大,灌水间隔时间短,0~60 cm 土层的土壤含水率要显著大于其他 3 个处理,而 T1~T3 处理在该土层的土壤含水率与灌水定额呈正相关关系。

2.2　不同处理的水分消耗规律

试验结果(表 2)表明,各处理的总耗水量及生育期内各阶段耗水量差异较大。T4 作为对照处理,供水充分,其耗水量最大;T1 处理灌水量最小,耗水量也最小;其他处理耗水量在两者之间浮动。从土壤水的供需关系来看,虽然苗期植株弱小,蒸腾微弱,

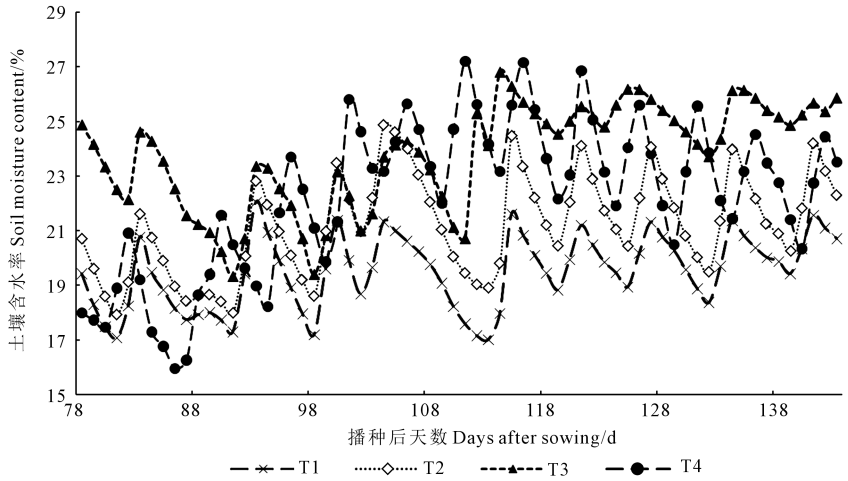


图 3　各处理主根区土壤水分动态图

Fig.3　Soil water dynamic diagram in main root zone of each treatment

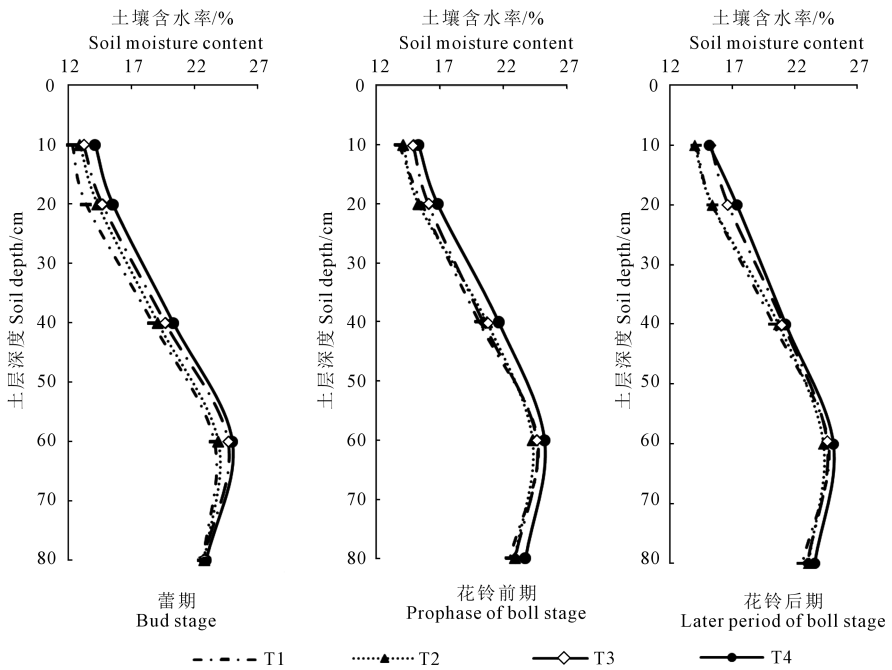


图 4　各处理不同生育阶段内平均土壤含水率剖面分布图

Fig.4　Map of average soil water content profiles of each treatment at different growth stages

地面覆膜抑制了蒸发[25],但由于苗期不进行灌溉,降水稀少,耗水量仍远大于补给量。而播种前进行的春灌,使土壤贮水充足,在没有灌水及降雨补给的情况下,棉花苗期的生长发育得到了保障。进入蕾期后,各处理的灌水及降雨补给量仍不能满足其耗水需求,仍需土壤贮水的补给。花铃期随着灌水时间间隔的缩短,T4 处理逐渐出现了供过于求的现象,T3 处理则接近于供需平衡,而其他 2 个处理仍出现了不同程度的水分亏缺。

2.3 不同处理对棉花生长发育及产量的影响

不同灌水处理下的棉花株高生长过程如图 5(A)所示。T1~T3 处理生长过程基本一致,前期增长缓慢,在播种 85 d 后,进入快速生长期,至 96 d 时生长基本停止;而 T4 处理的快速生长期要比其他 3 个处理提前,在播种 64 d 后其株高日增长量就达到了1.19 cm·d^{-1},至播种后 85 d,T4 处理的株高长至 51.4 cm,其他 3 个处理均略低于它,T1 处理最低,为 47.84 cm。相比于对照处理,根据气象信息指导灌溉的处理,前期灌水定额小,灌水时间间隔长,棉花植株生长发育滞后。因灌水定额最小,T1 的株高及其日增长量显著低于 T2 和 T3 处理;T2 和 T3 处理虽有灌水定额差异,但自第一次灌水之后,2 个处理的株高没有明显差异。说明较高的灌水定额虽有助于棉花生长速度的提高,但单纯的提高灌水定额对棉花生长的促进作用有限。

不同灌水处理的棉花叶面积变化如图 5(B)所示。单株叶面积在棉花生育期内呈现出先增大后减小的趋势。T1~T3 处理的叶面积增长趋势基本一致,而 T4 作为对照处理,自播种 64 d 后与其他 3 个处理的差异逐渐增大。播种 85 d 后 T4 处理的叶面积比 T1~T3 分别低了 43.2%、51.9%和29.5%。播种后 105 d 依据气象信息指导灌溉的 T1~T3 处理叶面积达到峰值,且灌水定额越高,叶面积越大。而对照处理 T4 则相对滞后,在播种 120 d 后才达到峰值。说明传统灌溉方式的高定额、短周期持续促进了棉花的生长,使棉花生育阶段延长,发育滞后[24]。

表 2 各处理耗水规律

Table 2 Water consumption of each treatment

处理 Treatment	蕾期 Bud stage			花铃前期 Prophase of boll stage			花铃后期 Later period of boll stage			总耗水量 Total water consumption /mm
	灌水量 Irrigation amount /mm	耗水量 Water consumption /mm	耗水强度 Water consumption rate /(mm·d^{-1})	灌水量 Irrigation amount /mm	耗水量 Water consumption /mm	耗水强度 Water consumption rate /(mm·d^{-1})	灌水量 Irrigation amount /mm	耗水量 Water consumption /mm	耗水强度 Water consumption rate /(mm·d^{-1})	
T1	48	93.62c	3.02c	72	78.64d	3.93b	120	145.47c	3.73c	317.69c
T2	60	95.17c	3.07c	90	87.5c	4.37b	150	176.82b	4.53b	370.16c
T3	72	107.57b	3.47b	108	124.31b	6.22a	180	187.59b	4.81b	419.56b
T4	120	141.98a	4.58a	160	135.6a	6.78a	280	260.13a	6.67a	522.12a

注:同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

Note: Different letters in the same column mean significant difference among treatments at P<0.05 level. The same below.

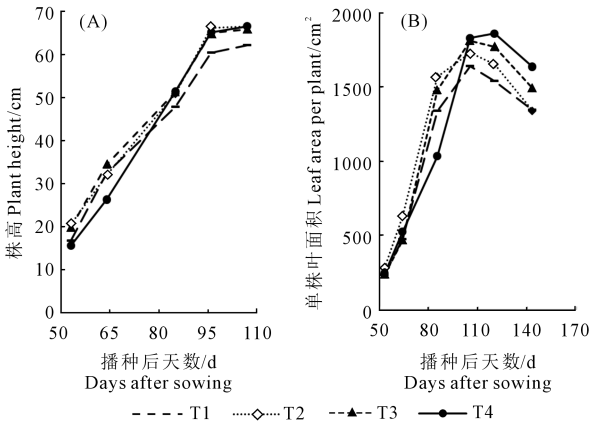


图 5 不同处理下株高、叶面积变化过程

Fig.5 Changes of plant height and leaf area under different treatments

不同灌水处理的棉花地上干物质量如图 6 所示。随着棉花的生长发育,植株茎干重、蕾铃干重、地上部干物质总量均不断增加,其中蕾铃干重的增长极为显著,T3、T4 处理从盛蕾期至盛铃期蕾铃干重增长比例分别高达 1 735%、1 466%。这是由于棉株生殖生长所占比例不断提高,光合产物向生殖器官运输累积导致的。开花期及盛花期,T1、T2 处理干物质总量及蕾铃干物质量显著高于 T3,这是由于低灌水定额造成的一定程度的水分亏缺,棉花营养生长受阻,提前进入生殖生长导致的[22]。相对的,T4 处理蕾铃占地上干物质的比例为 47.80%,显著

低于 T1 处理的 54.2%,此时对照处理的营养生长依然旺盛。盛铃期, T1~T3 处理干物质总量 T1<T2<T3,与灌水定额呈正相关关系,说明较高的灌水定额可以显著增加光合产物的合成与积累。T4 处理干物质总量为 146.19 g·株$^{-1}$,与 T3 无显著差异。

从棉花产量结果(表 3)看出,T4 对照处理籽棉产量最高,根据气象指导灌溉的 3 个处理籽棉产量随着灌水定额的增加而增加,其中灌水定额最高的 T3 处理,籽棉产量仅比 T4 低了 2.45%,其 WUE 值虽然是 3 个处理中最低的,但仍比 T4 高了 15.87%。说明根据气象指导灌水的灌溉方式在保证产量的前提下能显著提高 WUE 值。

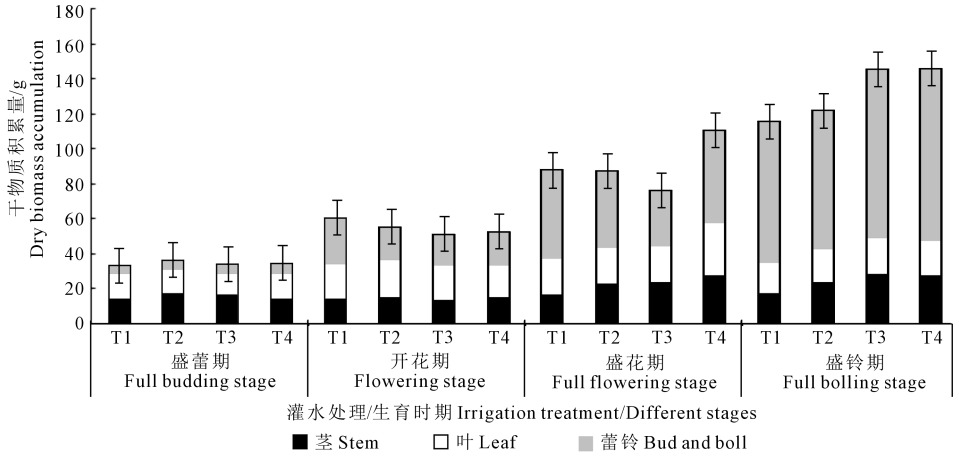


图 6　不同处理下地上干物质变化

Fig.6　Change of aboveground dry matter of cotton under different treatments

表 3　不同处理对棉花产量和灌溉水利用效率的影响

Table 3　Effects of different treatments on cotton yield and irrigation water use efficiency

处理 Treatment	单铃重/g Boll mass	籽棉产量/(kg·hm^{-2}) Unginned cotton	衣分率/% Lint	灌溉水利用效率/(kg·m^{-3}) Irrigation water use efficiency	WUE/(kg·m^{-3}·hm^{-2})
T1	5.04b	5945.25c	45.79a	1.03a	0.75a
T2	6.05a	6626.70b	44.60b	0.90a	0.78a
T3	5.87ab	7072.05a	45.20ab	0.81ab	0.73a
T4	6.08a	7245.28a	45.55a	0.59b	0.63b

3　讨　论

本试验中,常规灌溉处理灌水定额最大,灌水时间间隔相对较短,生育期内灌水量和耗水量最大,在不同土壤深度处各生育阶段的平均土壤含水率也处在最高水平。T1~T3 处理,灌水定额越高,棉花主根区土壤含水率及纵向剖面处土壤含水率越高,生育期内耗水量也越高。T1~T3 灌水量分别为 264、330、396 mm,这与蔡焕杰等[3]提出的膜下滴灌棉花灌水量可降至 240~345 mm 的结论基本一致。从阶段耗水量来看,花铃期最大,占全生育期耗水的 60%以上[4]。

T1~T3 与 T4 处理的叶面积分别于播种后 105 d 和 120 d 达到最大值,说明常规灌溉的高灌水定额、短灌水周期对于棉花生长具有持续促进作用,并在一定程度上使棉花生育阶段延长,发育滞后。余美等[10]的研究也发现过量灌溉会造成棉花生长过于旺盛,贪青晚熟。

各处理产量随着灌水量的增加而增加,而灌溉水生产率则随着灌水量的增加而减少,与杨九刚等[11]的研究结论相似。T3 处理的产量最高为 7 072.05 kg·hm^{-2},与 T4 的 7 245.28 kg·hm^{-2}无显著差异,而 WUE 值却比 T4 提高了 15.87%。说明以气象信息为基础进行灌溉是可行的。

T4 对照处理与其它 3 个处理在土壤水分动态及棉花生长发育上的差异,除了受灌水定额的影响,还与灌水周期有关。杨九刚等[11]在研究中发现,棉花的生长发育受灌水定额和灌水周期双重作用的影响,高龙等[9]在研究中注意到棉田盐分的累积运移也受这两个因素的影响。根据气象信息指导灌溉的 3 个处理,单次灌水时间由选定的累计亏水值(即累计作物腾发量(ET_c)-降雨量(P))及气象因素来决定。选定的亏水值较大时,灌水时间间隔长,单次灌水需补充的水分较多,容易造成深层渗漏;选定的亏水值较小时,灌水时间间隔短,但对设备及能源的损耗较大。因此对累积亏水值的选

取,除了要考虑当地历时气象资料及灌溉经验外,还需参考土壤的田间持水率等物理特性及不同的灌水间隔对土壤盐分累积运移的影响。目前,这方面的研究仍十分有限,需要做更多的探索。

根据气象信息指导灌溉,除了可以利用实时气象资料外,还应充分考虑对预测气象资料的使用。当预测到有降雨发生时,可以适时将灌水时间推迟,以免灌水后降水造成不必要的深层渗漏。

4 结 论

1)受灌水定额大、灌水周期短的影响,常规灌溉处理棉花的生长发育比根据气象信息指导灌溉处理棉花相对滞后。

2)根据气象信息指导确定灌溉时间后,采用不同的灌水定额对棉花生长发育和产量有明显影响。较高的灌水定额可以显著增加株高,提升光合产物累积量,保证棉花产量,如 T3 处理的籽棉产量达到了 7 072.05 kg · hm^{-2}。相较而言,低灌水定额处理虽然可以促进棉花早熟,但棉花产量较低,T1 处理籽棉产量仅为 5 945.25 kg · hm^{-2}。

3)基于气象信息指导灌溉的处理能充分利用降雨,提高灌溉水利用效率。T1~T4 处理灌水量分别为 264、330、396、560 mm,灌溉水利用效率分别为 1.03、0.90、0.81、0.59 kg · m^{-3}。

4)综合灌溉用水量、产量及水分利用效率几方面的因素,认为当棉田作物蒸发蒸腾量与降水量的差值累计达到 30 mm 进行灌溉、灌水定额设置为 36 mm 的组合,可以在保证棉花产量不显著降低的条件下,显著减少灌溉用水量,提高灌溉水利用效率和田间水利用效率,适于在南疆地区根据气象信息指导膜下滴灌棉花时使用。

参 考 文 献:

[1] 武建设,陈学庚.新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J].农业工程学报,2015,31(18):5-10.

[2] 胡家帅,郑旭荣,王振华,等.不同滴灌灌水处理对南疆沙区红枣产量及品质的影响[J].节水灌溉,2016,(9):40-43.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 杨鹏年,吴彬,王水献,等.干旱区不同地下水埋深膜下滴灌灌溉制度模拟研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(3):76-82.

[6] 赵波. 膜下滴灌棉花自动化灌溉控制指标研究[D].石河子:石河子大学,2017.

[7] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guideline for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome: FAO, 1998: 15-64.

[8] 王峰,孙景生,刘祖贵,等.灌溉制度对机采棉生长、产量及品质的影响[J].棉花学报,2014,26(1):41-48.

[9] 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.

[10] 余美,杨劲松,刘梅先,等.不同膜下滴灌模式对土壤水分及棉花产量的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(12):2368-2374.

[11] 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):29-32.

[12] 王军,李久生,关红杰.北疆膜下滴灌棉花产量及水分生产率对灌水量响应的模拟[J].农业工程学报,2016,32(3):62-68.

[13] 黄晓敏,于宴民,汪昌树,等.干旱区膜下滴灌棉田灌溉制度及土壤水盐运移规律研究[J].节水灌溉,2017,(4):24-29.

[14] 李百凤,冯浩,吴普特.作物非充分灌溉适宜土壤水分下限指标研究进展[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):227-231.

[15] 危常州,马富裕,雷咏雯,等.棉花膜下滴灌根系发育规律的研究[J].棉花学报,2002,14(4):209-214.

[16] 魏光辉,马亮.干旱区不同地下水埋深与棉花膜下滴灌灌溉制度的响应研究[J].灌溉排水学报,2015,34(12):9-13.

[17] 刘晓伟,刘勤,吕军,等.近 54 年新疆地区水资源的气候特征分布[J].中国农学通报,2016,32(29):124-131.

[18] 姚宝林,程晨,杨晨.南疆膜下滴灌棉田土壤温度时空变化规律研究[J].节水灌溉,2016,(12):46-49.

[19] 李慧,虎胆·吐马尔白,杨鹏年,等.南疆膜下滴灌不同盐分棉田水盐运移规律研究[J].节水灌溉,2014,(7):4-6.

[20] 阿布都卡依木·阿布力米提,赵经华,马英杰,等.南疆自动化滴灌棉花灌溉制度的研究[J].节水灌溉,2017,(1):33-37.

[21] 赵波,王振华,李文昊.滴灌方式及定额对北疆冬灌棉田土壤水盐分布及次年棉花生长的影响[J].农业工程学报,2016,32(6):139-148.

[22] 李淦,高丽丽,康正华,等.不同灌水处理对机采棉干物质和氮素运移及产量的影响[J].棉花学报,2016,28(4):353-360.

[23] 严以绥.膜下滴灌系统规划设计与应用[M].北京:中国农业出版社,2003:1.

[24] Janat, M. Response of cotton to irrigation methods and nitrogen fertilization: Yield components, water-use efficiency, nitrogen uptake, and recovery[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2008,39(15):2282-2302.

[25] Luo H H, Yong H H, Zhang Y L, et al. Effects of water stress and rewatering on photosynthesis, root activity, and yield of cotton with drip irrigation under mulch [J]. Photosynthetica, 2016,54(1):65-73.