文章编号:1000-7601(2019)05-0027-06 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.05.05

蕾期和花铃期不同灌水下限对滴灌棉花产量的影响

潘俊杰[1],付秋萍[1],阿布都卡依木·阿布力米提[1,2],马英杰[1]

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 2.北京联创思源测控技术有限公司,北京 100085)

摘 要:为探究棉花生长关键时期灌溉预警线,2017年在新疆呼图壁县开展了蕾期和花铃期灌水下限分别为55%(仅蕾期)、65%和75%田间持水量(θ_f)及其不同组合的大田试验,研究了不同滴灌条件下棉花的生长及产量状况。结果表明:灌水下限的提升对株高和生物量有明显的促进作用,在蕾期灌水下限从55%θ_f增至75θ_f,棉花株高和生物量分别增加了0.18~0.19 cm·d^{-1}和11.58~20.44 g;在花铃期灌水下限从65%θ_f增至75θ_f,棉花株高和生物量分别增加了0.04~0.10 cm·d^{-1}和3.47~4.04 g;蕾期和花铃期灌水下限分别为65%θ_f和75%θ_f时单铃重和单株成铃数分别为5.58 g和7.79个·株$^{-1}$,显著高于其他处理;蕾期和花铃期灌水下限均为75%θ_f时耗水量最大,为517.05 mm;蕾期和花铃期灌水下限分别为55%θ_f和65%θ_f时籽棉产量显著低于其他处理;蕾期和花铃期灌水下限分别为65%θ_f和75%θ_f时与均为75%θ_f时产量无显著性差异。综上,棉花蕾期和花铃期灌水下限分别为65%θ_f和75%θ_f为适宜的灌溉预警线。以播后天数为自变量,Logistic模型可以很好地模拟棉花的株高和生物量,以耗水量和株高为自变量预测棉花生物量变化情况的模型可为滴灌棉花灌水量及生长状况预测提供指导。

关键词:灌水下限;棉花;滴灌;蕾期;花铃期;Logistic模型

中图分类号:S275.6;S562 **文献标志码**:A

Effects of irrigation limits at bud stage and flowering stage on yield of drip irrigation cotton

PAN Jun-jie[1], FU Qiu-ping[1], Abudoukayimu · Abulimiti[1,2], Ma Ying-jie[1]

(1. *College of Hydraulic and Civil Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830052, *China*;
2. *Beijing Unism Technologies*, *Inc.*, *Beijing* 10008, *China*)

Abstract: To explore the suitable lower limits of drip irrigation, a field experiments including the lower irrigation limits, which were 55% (bud stage only), 65% and 75% of field capacity and the different combination at bud stage and flowering stage was carried. The growth and yield of cotton under different drip irrigation conditions were studied. The results showed that the increase of irrigation water limit obviously promoted effect on plant height and biomass. With the increase in irrigation water limit, the plant height increased 0.18~0.19 cm·d^{-1} at bud stage and 0.04~0.10 cm·d^{-1} at flowering and boll stages, the biomass increased 11.58~20.44 g·plant^{-1} at bud stage and 3.47~4.04 g·plant^{-1} at flowering and boll stages. When the lower limits of irrigation was at 65% θ_f at bud stage and 75% θ_f at flowering and boll stages, the boll weight per plant was 5.58 g and the number of bolls per plant was 7.79, which was obviously higher than others; When the lower limits of irrigation was 75% θ_f at bud, flowering and boll stages, the water consumption was more than others at 517.05 mm. When the lower limits of irrigation was 55% θ_f at bud stage and 65% θ_f at flowering and boll stages, the yield of seed cotton was significantly lower than that of other treatments. There was no significant difference in yield between the treatments, which the lower limits of irrigation was 65% θ_f at bud stage and 75% θ_f at flowering and boll stages, and the treatment that the

收稿日期:2018-08-21 **修回日期**:2019-07-03

基金项目:新疆维吾尔自治区科技支疆项目(2016E02105);干旱区枣树节水调质技术及智能决策系统研发创新团队(XJEDU2017T004);新疆农业大学博士后经费项目

作者简介:潘俊杰(1993-),男,湖北天门人,硕士研究生,研究方向为灌溉节水理论。E-mail:panjunjie910@163.com

通信作者:付秋萍(1980-),女,新疆奇台人,博士,主要从事节水灌溉及水肥高效利用研究。E-mail:caufuqiuqing@126.com

lower limits of irrigation was 75% of field capacity at bud stages and flowering and boll stages. Therefore, the best lower limits of irrigation was 65% θ_f at bud stage and 75% θ_f at flowering and boll stages. In regard to the number of days after sowing as independent variable, Logistic model can simulate cotton plant height and biomass very well, and then the water consumption was introduced, a model for predicting cotton biomass change with water consumption and plant height as independent variables was established. This study could provide guidance for the prediction of irrigation water limit and growth status of cotton drip irrigation in similar areas.

Keywords: lower limits of irrigation; cotton; drip irrigation; bud stage; flowering and boll stage; Logistic models

膜下滴灌技术的引入,使新疆地区的棉花产量增加了 20%~50%,水分用量减少了 20%~50%[1],且新疆成为了中国最大的产棉基地[2]。随着智慧农业的推进和自动化技术的发展,设定适宜灌溉预警线的主观调控灌水方式逐渐得到重视,以期减少过多的棵间蒸发和奢侈蒸腾,促进棉花高产和提高水分利用效率[3-4]。因此,研究不同灌水下限棉花的长势,探寻适宜的灌水下限,对推进新疆地区精准农业的发展具有现实意义。

灌水下限指土壤含水量下降过程中棉花产量显著受水分亏缺影响的土壤含水量[5]。且灌水下限直接影响棉花蒸腾和土壤蒸发,进而影响对灌溉期内的灌水周期、灌水定额和灌溉定额等,对灌溉制度的制定有重大意义[6-7]。汪昌树等[8]研究了不同灌水下限膜下滴灌棉花,发现耗水量和灌水频率会随着灌水下限的增加而增加,而盐分分布剖面会随着灌水下限的降低而增大。申孝军等[9]研究了不同水面蒸发系数下膜下滴灌棉花蕾期、花铃前期、花铃后期的灌水定额分别为 70%、100%和 50%的水面蒸发量,证明棉花在不同的生育期对水分的敏感程度不一样。李彦等[10]研究了不同棉花生育期内适宜的灌水下限,发现膜下滴灌棉花在苗期、蕾期、花铃期和吐絮期适宜的灌水下限分别为 60%~65%、65%~70%、80%~85%和 55%~65%田间持水率。申孝军等[11]研究了地下滴灌和膜下滴灌不同灌水下限对棉花生长、耗水量、产量、水分利用效率和纤维品质的影响,发现蕾期和花铃期控水下限分别为 60%和 75%的田间持水率能够在提高水分利用效率的同时获得较好的棉花产量和纤维品质。董雪妮等[12]对棉花的耐旱基因进行了研究,认为 *KcE RF-PeD REB2a* 基因能使棉花的耐旱耐盐性得到提升。申孝军等[13]研究了气象因子和叶面积指数与棉花耗水量的关系,构建了滴灌棉田实时灌溉预报模型。然而,不同灌水下限棉花的生长模型鲜有研究。因此,确定棉花栽培的灌水下限,有利于种植区精准灌溉技术的提升,同时构建不同灌水下限棉花的生长模型,助力当地农户向"温"、"光"、"水肥"要棉[14],促进棉花精准施肥和灌溉预测的实现。为此,本文结合呼图壁地区的土壤和农艺现状,研究蕾期和花铃期不同灌水下限棉花的株高、生物量和经济性状,采用 Logistic 曲线拟合棉花株高、生物量,通过耗水量和株高最大值与生物量最大值的函数关系构建生物量与株高的函数关系,助力棉花精准灌溉预测。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2017 年在昌吉州呼图壁县大丰镇现代化灌溉示范地进行。试验地位于天山中段北麓(东经 86.63°,北纬 44.18°),属于中温带大陆半荒漠干旱性气候,平均年降雨量 167 mm,年平均气温 5~6℃,日照时数 2 750~3 090 h。试验地土壤类型为沙壤土,土壤容重 1.54 $g \cdot cm^{-3}$,地下水埋深 15 m。土壤有机质 9.56 $g \cdot kg^{-1}$,全氮 3.1 $g \cdot kg^{-1}$,碱解氮 35.42 $mg \cdot kg^{-1}$,速效磷 14.54 $mg \cdot kg^{-1}$,速效钾 126.99 $mg \cdot kg^{-1}$。供试棉花品种为新陆棉早 57 号,2017 年 4 月 22 日播种,9 月 30 日收获。试验采用 1 膜 6 行的机采棉种植模式,作物行距 66 cm+10 cm,株距 10 cm。滴灌带铺设模式为 1 膜 3 带,分别布置在距第 1 行棉花垂直距离 20、96 cm 和 142 cm 的位置。滴灌带管径 16 mm,滴头流量 1.8 $L \cdot h^{-1}$,滴头间距 0.3 m。

1.2 试验设计

本试验采用不同灌水定额,在蕾期设置 3 个灌水下限:55%田间持水率(θ_f)(WD_1和 WD_2)、65%θ_f(WD_3和 WD_4)和 75%θ_f(WD_5和 WD_6));在花铃期设置 2 个灌水下限:65%θ_f(WD_2、WD_4和 WD_6)和 75%θ_f(WD_1、WD_3和 WD_5),共 6 个试验处理,具体见表 1。每个处理设置 3 个重复,共 18 个小区。各试验小区长宽为 10 m×7.2 m,(每个小区包含 9 条毛管,毛管间距为 0.66 m)。田间持水量为 35.63%(体积含水率),土层深度 60 cm。

土壤含水量通过 FDS100 墒情传感器实时监控得到,当土壤含水量达到对应下限值时将进行灌溉,灌水定额通过式(1)计算得到:

$$1000M = hp(\theta_{田} - \theta_{下限}) \tag{1}$$

式中,M 为灌水定额(mm);p 为湿润比,取 0.74;h 为计划湿润层深度,蕾期取 0.4 m,花铃期取 0.6 m;θ 为体积含水率(%)。每小区在中间位置埋设 FDS100 墒情传感器,埋深分别为 10、25 cm 和 40 cm。

表 1　滴灌试验方案设计

Table 1　Scheme of field irrigation of the experiment

灌水处理 Irrigation treatment	灌水下限 Low irrigation limit/% θ_f		灌水定额 Irrigation quota/mm		灌水量 Irrigation amount/mm
	蕾期 Bud stage	花铃期 Blossoming and boll-forming stage	蕾期 Bud stage	花铃期 Blossoming and boll-forming stage	
WD_1	55	75	45.00	37.50	352.50
WD_2	55	65	45.00	52.50	300.00
WD_3	65	75	35.25	37.50	368.25
WD_4	65	65	35.25	52.50	315.75
WD_5	75	75	25.50	37.50	376.50
WD_6	75	65	25.50	52.50	339.00

1.3　测定项目及数据分析

1.3.1　株高测定　试验初期选择各处理平均水平的代表性植株 10 株,用标签牌做标记,测定棉株株高,每隔 10 d 观测 1 次,一直到花铃期棉花株高不再增加为止。株高为地面到棉花主茎顶部生长点的高度,用卷尺进行测量。

1.3.2　产量和单株成铃数　采用样田法,在吐絮期选取长×宽为 3 m ×2.4 m 的小区进行测产并重复 3 次,取其均值,折算成产量,以代表该处理总产量。同时统计各小区株数和单株结铃数。

1.3.3　棉花生长曲线　本文采用以播后天数为自变量来模拟株高和生物量生长规律的 Logistic 模型,方程如下:

$$F = \frac{K}{1 + be^{-ct}} \tag{2}$$

式中,F 为因变量可代表生物量(B)或者株高(H)(g·株$^{-1}$ 或者 cm);t 为播后天数;K 为 F 的最大值即最大生物量(Bm)或者最大株高(Hm)(g·株$^{-1}$ 或者 cm);b 和 c 为经验系数,株高和生物量的经验系数分别用 b_1、c_1 和 b_2、c_2 来区别。

对 Logistic 方程求一阶导函数,得式(3),用以描述生物量积累速率随时间变化过程的单锋曲线。

$$V = \frac{Kbce^{-ct}}{(1 + be^{-ct})^2} \tag{3}$$

式中,V 为干物质积累速率(g·株$^{-1}$·d^{-1})。

求解 Logistic 方程的二阶导函数并令其等于 0,得干物质积累速率最快的时间点,即 $T_0 = \frac{\mathrm{In}b}{c}$,带入一阶导函数得最大速率 $V_m = \frac{Kc}{4}$。求解 Logistic 方程三阶导函数并令其等于 0,得干物质快速积累开始时间($T_1 = \frac{\mathrm{In}b - \mathrm{In}(2 + \sqrt{3})}{c}$)和结束时间($T_2 = \frac{\mathrm{In}b - \mathrm{In}(2 - \sqrt{3})}{c}$),同时得干物质快速积累持续时间 $GT = T_2 - T_1$。

1.3.4　水分利用效率　水分利用效率的计算公式为:

$$WUE = Y/ET \tag{4}$$

式中,WUE 为水分利用效率(kg·mm^{-1}·hm^{-2});Y 为籽棉产量(kg · hm^{-2});ET 为棉花生育期内耗水量(mm)。

2　结果与分析

2.1　不同灌水处理对滴灌棉花株高的影响

株高受土壤含水量影响较大,不同灌水处理下蕾期和花铃期株高随播种后天数变化,并存在差异。由图 1 可见,各处理棉花株高的增长速度随着时间推移而增大,在人工打顶(播后 70 d)之后棉花株高增长缓慢并趋于稳定。在蕾期(播后 50~74 d),相对于 WD_1、WD_2处理,WD_3、WD_4处理与 WD_5、WD_6处理的棉花株高平均日增长量分别增加了 0.18 cm·d^{-1}和 019 cm·d^{-1};在花铃期(播后 75~125 d),相对于 WD_1、WD_3 和 WD_5 处理,WD_2、WD_4 和 WD_6处理棉花株高的平均日增长量增加介于 0.04~0.10 cm·d^{-1}之间,说明灌水下限的提升会对蕾期和花铃期棉花株高增长提供助力,且在蕾期更加明显。

株高是棉花重要的生理指标,适宜的株高是棉花高产的基础条件。应用 Logistic 曲线 $F = \frac{K}{1+be^{-ct}}$(其中 K 为最大株高 H_m,F 为因变量株高 H),对灌溉期不同灌水下限处理株高进行拟合,并进行了标

准化处理,具体见表 2。Logistic 曲线对株高的拟合中 R^2>0.94,表明其对株高的生长过程能够较好地体现。由表 2 可看出,分别应用 Logistic 函数与各处理的株高值进行拟合所得 c_1 变化较小,而不同处理的 b_1 和 Hm 变化幅度较大;说明 b_1 和 Hm 的改变导致了不同灌水处理的差异。

2.2　不同灌水处理下滴灌棉花生物量的 Logistic 模拟

棉花生物量的积累将直接影响产量因素。由表 3 可见,通过建立不同处理生物量与播后天数的 Logistic 模型,拟合值与实测值相关系数 $R^2 \geq 0.98$,能较好地代表各处理生物量积累过程。各处理间棉花生物量的积累过程都符合"S"型曲线,且积累过程大致可以分为 3 个阶段:在 0~T_1 时间段,棉花处于苗期(播后 0~50 d)和蕾期,为促进棉花根系深扎,棉花干物质积累速度缓慢;在 T_1~T_2 时间内,棉花蕾期和花铃期,土壤含水量的提升以及适时的补充为棉花的快速生长提供了有利条件;在 T_2 至收获期,棉花处于花铃期和吐絮期(播后 125~161 d),棉花生物量的积累在一段时间内变化缓慢,并随着叶片的衰老等生物开始缓慢降低。

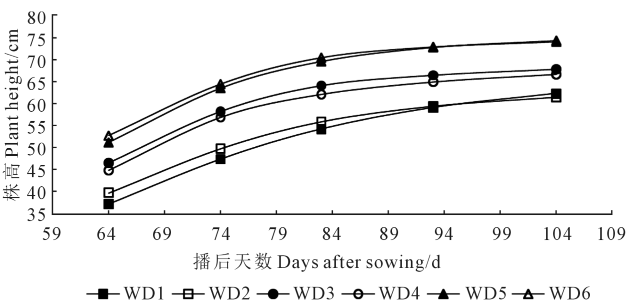

图 1　不同灌水处理对滴灌棉花株高的影响

Fig.1　Effects of different irrigation limits on the plant height of cotton

表 2　不同灌水处理下滴灌棉花株高的 Logistic 模型拟合参数

Table 2　The Logistic model fitting parameters of different irrigation limits on the plant height of cotton

模型参数 Model parameter	灌水处理 Irrigation treatment						平均值 Average
	WD_1	WD_2	WD_3	WD_4	WD_5	WD_6	
Hm	64.82	63.01	68.33	66.48	75.1	74.21	68.66
b_1	65.16	100.48	220.8	300.91	148.83	250.86	181.17
c_1	0.07	0.08	0.10	0.10	0.09	0.10	0.09
R^2	0.99	0.99	0.97	0.94	0.99	0.97	–

由表 3 可知,相对于 WD_1、WD_2处理,WD_3、WD_4与 WD_5、WD_6的棉花平均最大生物量分别增加了 11.58 g 和 20.44 g;WD_1和 WD_2、WD_3和 WD_4、WD_5和 WD_6间棉花平均最大生物量的差值分别为−4.04,−3.88 g 和−3.47 g;说明蕾期和花铃期灌水下限的提升都有助于生物量的增加。T_0、T_1和 T_2的在不同处理棉花间规律表现一致,蕾期灌水下限对 T_0、T_1和 T_2的影响较大。相对于 WD_1处理,其余处理棉花的 V_m分别增加了−0.16、0.10、0.03、0.37 g · d^{-1}和 0.26 g · d^{-1},说明 V_m随着灌水下限的提升而增加。不同灌水下限对快速积累期持续的时间 GT 影响不明显。

2.3　不同灌水处理对滴灌棉花经济性状的影响

不同的灌水处理对棉花生长影响明显,从而导致棉花的籽棉产量、衣分、单铃重、单株成铃数、耗水量以及 WUE 出现差异。由表 4 可知,WD_2和 WD_4处理的水分利用效率显著高于其他处理,而 WD_5处理显著低于其他处理,棉花在水分下限过高的情

表 3　不同灌水处理下滴灌棉花生物量的 Logistic 模型拟合参数

Table 3　The Logistic model fitting parameters of different irrigation limits on the biomass of cotton

模型参数 Model parameter	灌水处理 Irrigation treatment						平均值 Average
	WD_1	WD_2	WD_3	WD_4	WD_5	WD_6	
Bm	88.42	84.38	99.92	96.04	108.57	105.10	96.24
b_2	133.30	122.94	90.42	128.35	130.99	114.13	120.02
c_2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
T_1	50.84	53.06	48.33	53.70	47.90	49.55	–
T_2	88.29	93.05	88.26	93.68	83.35	87.71	–
T_0	69.57	73.06	68.29	73.69	65.62	68.63	–
V_m	1.55	1.39	1.65	1.58	1.92	1.81	–
GT	37.45	39.99	39.93	39.98	35.46	38.16	–
R^2	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	–

表 4　不同灌水处理下滴灌棉花的经济性状

Table 4　Economic characters of drip irrigation cotton under different treatments

灌水处理 Irrigation treatment	籽棉产量/(kg · hm^{-2}) Seed cotton yield	衣分/% Lint percentage	单铃重/g Boll weightp	单株成铃数 Boll number per plant	耗水量/mm Water consumption	WUE /(kg · mm^{-1} · hm^{-2})
WD_1	4843.35bc	0.42abc	5.39abc	7.07ab	467.57c	10.36b
WD_2	4789.95c	0.43ab	5.28bc	6.85b	416.73e	11.49a
WD_3	5216.85a	0.41c	5.58a	7.79a	505.73a	10.32b
WD_4	5029.95abc	0.42bc	5.39abc	7.11ab	443.33d	11.35a
WD_5	5137.95ab	0.43a	5.47ab	7.17ab	517.08a	9.94c
WD_6	5197.35a	0.42bc	5.14c	6.58b	491.75b	10.57b

注:同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

Note: The different lowercase letters within one column mean significant difference among treatments at P<0.05. The same below.

况下无法充分的利用土壤水分;WD_3、WD_4、WD_5和WD_6处理棉花的籽棉产量显著高于 WD_1和 WD_2,而WD_3、WD_4、WD_5和 WD_6处理差异不显著,说明蕾期灌水下限过低会显著降低棉花的产量;WD_1、WD_3和WD_5处理的耗水量分别显著高于 WD_2、WD_4和WD_6,WD_5和 WD_6处理的耗水量分别显著高于 WD_3和 WD_4,说明灌水下限的上升会增加土壤水分的消耗;WD_3单铃重和单株成铃数都显著高于其他处理,分别为 5.58 g 和 7.79 个・株$^{-1}$,而衣分显著低于其他处理,说明灌水下限主要通过单铃重和单株成铃数来促进植株获得高产,且为获得最佳的产量蕾期和花铃期应当设置的灌水下限分别为 65%θ_f和 75%θ_f。

2.4　株高与地上部生物量的模型构建

由表 3 和表 4 可知,应用 Logistic 模型对不同灌水处理下棉花生物量和株高模拟过程中,不同的灌水下限对生物量和株高的变化趋势影响不大,但对棉花生物量和株高的最大值影响较大。根据二次多项式回归方程 $y=a+bx+cx^2$,得到生物量和株高最大值与作物耗水量拟合的方程如下:

$$Bm = -154.92 + 7.34ET - 0.03ET^2, R^2 = 0.83 \tag{5}$$

$$Hm = -2634.09 + 81.20ET - 0.55ET^2, R^2 = 0.87 \tag{6}$$

式中,Bm 为最大生物量(g・株$^{-1}$);Hm 为最大株高(cm);ET 为棉花生育期内耗水量(mm)。

以上 $R^2 > 0.83$,说明二次多项式能较好地模拟生物量、株高与耗水量之间的关系。

株高是生物量形成的基础,而相对于生物量的数据,株高的数据更容易获取,因此,应当建立生物量与株高之间的关系式,

$$B = Bm/(b_2 \times \frac{Hm - H}{b_1 \times H} + 1) \tag{7}$$

不同耗水量会直接影响株高和生物量的形成,因此应当引入耗水量来分析株高与生物量之间的关系。其转换关系如下:将式 5 和式 6 带入式 7 中,即可通过植株的耗水量和株高来得出棉花植株的生物量,具体关系式如下:

$$B = (-154.92 + 7.34ET - 0.03ET^2)/ \left(b_2 \times \frac{-2634.09 + 81.20ET - 0.55ET^2 - H}{b_1 H} + 1\right) \tag{8}$$

3　讨　论

株高是棉花达成理想株型的重要因素,合理的株高能为棉花提供合理的叶层分布,同时能协调棉花生殖生长和营养生长[15-16]。不同处理的棉花株高增长表现为前期缓慢增长、中期快速增长、后期趋于平缓的趋势[17],这与本文的结论一致。苏里坦等[18]对分根交替膜下滴灌棉花展开研究,发现棉花的株高随着土壤含水量的增加而增加,本试验也得出株高的增长速率在蕾期和花铃期都随着灌水下限的增加而增加。然而申孝军等[9]的研究发现在棉花蕾期适度水分胁迫及花铃期恢复供水处理下,棉花株高不但没有大幅降低,反而有一定的提升,这可能是与棉花灌溉期开始前的初始含水率和初始高度有关;或者因为苗期对棉花没有进行控水,蕾期的水分胁迫促进棉花的侧根生长和主根下扎,进入花铃期后,有利的根系为棉花株高生长提供了助力,导致与本文不一致的试验结论。王乐等[17]对不同品种棉花的株高变化动态展开了研究,发现株高与有效积温能较好地用 Richards 函数进行拟合,而 Richards 函数与 logistic 函数的曲线形状相似,这与本试验结果一致:株高的生长过程能用模型较好地进行拟合。

蕾期和花铃期的不同灌水下限会对棉花的生物量快速积累终止点 T_2、日最大增长量出现的时间 T_0 和最大生物量积累速率 V_X 产生影响,进而对棉花生物量的最大值产生影响,这与闫映宇[19]和王海江[20]等人的研究结果一致。文中研究结果表明,棉花生物量积累速率随着灌水下限的提高而增大。由于各小区的打顶时间一致,株高对棉花的生物量的最大值起到一定限制作用,进而影响了各处理的快速积累期持续的时间及最大生物量。文中研究结果表明,棉花生物量的积累随时间变化符合 Logistic 模型,与宋为超等[21]研究结果一致。

蕾期灌水下限为 55%θ_f时,导致棉花株高生长缓慢,进而花铃期复水后棉花的产量仍然得不到提高,且显著低于蕾期灌水下限为 65%θ_f和 75%θ_f的处理,这与岳晶晶等[22]研究结果一致。而蕾期灌水下限为 75%θ_f,花铃期的灌水下限为 65%θ_f时,棉花的单铃重和单株成铃数显著小于其他处理,说明蕾期灌水下限的提高能为棉花的打下较好的株型,但是花铃期水分亏缺时较好的株型反而会影响棉花的产量形成。

Logistic 模型最初由 Verhulst 提出,它以时间为自变量,以描述植株的生长过程[23]。棉花株高[24]和生物量[25]以时间为自变量,用 Logistic 模型进行模拟,获得了较好效果,与本试验结果一致。而不同处理间棉花株高和生物量随着耗水量而发生变化,因此需将耗水量引入标准化的株高和生物量的

Logistic 模型。王淑芬等[26]研究了不同灌水量和灌水次数下棉花的株高，并建立了棉花株高与耗水量的一元一次方程。王亮等[27]发现棉花的耗水量随着干物质量的增加而增加。本文以株高为自变量，引入了耗水量，建立了株高与生物量的 Logistic 模型，并有较好的拟合效果，与王翔翔[28]试验结果一致。

4 结 论

本文通过在蕾期和花铃期设置不同的灌水下限，研究了灌水下限对棉花株高、生物量和经济性状的影响，得出如下结论：

蕾期和花铃期灌水下限的提升促进了株高和生物量的增长；在蕾期，相对于 55%θ_f的灌水下限处理，65%θ_f与 75%θ_f的灌水处理株高平均日增长量和平均最大生物量分别有 0.18~0.19 cm·d^{-1}和 11.58~20.44 g 的增长；在花铃期，相对于 65θ_f的灌水处理，75%θ_f的灌水下限处理株高平均日增长量和平均最大生物量分别增加了 0.04~0.10 cm·d^{-1}和 3.47~4.04 g。

棉花在蕾期和花铃期灌水下限为 65%θ_f和 75%θ_f是最适宜的，该处理单铃重和单株成铃数分别为 5.58 g 和 7.79 个·株$^{-1}$，产量 5 216.85 kg·hm^{-2}，均高于其他处理，与蕾期和花铃期灌水下限均为 75%θ_f无显著差异，而水分利用效率显著高于蕾期和花铃期灌水下限均为 75%θ_f的处理。

株高和生物量的 Logistic 模型其 R^2 分别大于 0.94和 0.98，Logistic 模型能较好地模拟株高和生物量的生长，且引入耗水量，建立了以最大株高与耗水量为自变量预测生物量的模型，可为棉花的生长状况及产量提供预测与指导。

参 考 文 献：

[1] 吴恩忍，郭新萍，苏安久. 北疆棉花膜下滴灌高产优质栽培技术[J]. 新疆农垦科技，2001,1(2):14-15.

[2] Wang C, Isoda A, Wang P. Growth and yield performance of some cotton cultivars in Xinjiang, China, an arid area with short growing period[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2004, 190(3):177-183.

[3] 杜太生，康绍忠，张建华. 不同局部根区供水对棉花生长与水分利用过程的调控效应[J]. 中国农业科学，2007,40(11):2546-2555.

[4] 李桓，邓海龙，许亚群，等. 各生育期不同灌水下限对茄子生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 江西水利科技，2016,42(4):260-264.

[5] 沈荣开，张瑜芳，黄冠华. 作物水分生产函数与农田非充分灌溉研究述评[J]. 水科学进展，1995,6(3):248-254.

[6] 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.

[7] 申孝军，孙景生，刘祖贵，等. 灌水控制下限对冬小麦产量和品质的影响[J]. 农业工程学报，2010,26(12):58-65.

[8] 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.

[9] 申孝军，张寄阳，刘祖贵，等. 膜下滴灌条件下不同水分处理对棉花产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究，2012，30(2):118-124.

[10] 李彦，雷晓云，白云岗. 不同灌水下限对棉花产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报，2013,32(4):132-134.

[11] 申孝军，张寄阳，孙景生，等. 灌水模式及下限对滴灌棉花产量和品质的影响[J]. 排灌机械工程学报，2014,32(8):711-718.

[12] 董雪妮，高丽华，丁梦琦，等. KcERF-PeDREB2a 双价基因对棉花干旱、盐碱耐受性的影响[J]. 中国农业科技导报，2016，18(4):17-23.

[13] 申孝军，孙景生，李明思，等. 基于气象信息的膜下滴灌棉花实时灌溉预报[J]. 应用生态学报，2015,26(2):443-449.

[14] 白岩，毛树春，田立文，等. 新疆棉花高产简化栽培技术评述与展望[J]. 中国农业科学，2017,50(1):38-50.

[15] 杨成勋，张旺锋，徐守振，等. 喷施化学打顶剂对棉花冠层结构及群体光合生产的影响[J]. 中国农业科学，2016，49(9):1672-1684.

[16] 申孝军，孙景生，张寄阳，等. 滴灌条件下土壤平均含水率计算方法研究[J]. 水土保持学报，2011,25(3):241-253.

[17] 王乐，吴杨焕，李杰，等. 棉花株高变化动态分析及模型研究[J]. 新疆农业科学，2017,54(3):393-402.

[18] 苏里坦，虎胆·吐马尔白，张展羽. 分根交替膜下滴灌条件下南疆棉花耗水特性与生长特征[J]. 农业工程学报，2009,25(6):20-25.

[19] 闫映宇，赵成义，盛钰，等. 膜下滴灌对棉花根系、地上部分生物量及产量的影响[J]. 应用生态学报，2009,20(4):970-976.

[20] 王海江，崔静，侯振安，等. 膜下滴灌棉花水氮耦合对其干物质和水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报，2010,19(3):76-80.

[21] 宋为超，刘春雨，徐娇，等. 初花后土壤碱解氮浓度对棉花生物量和氮素累积特征的影响[J]. 作物学报，2013，39(7):1257-1265.

[22] 岳晶晶，孙景生，徐建新，等. 棉瓜间作条件下水分调控对棉花生育及水分生产效益的影响[J]. 灌溉排水学报，2012，31(5):35-39.

[23] Coleman J, Others A. Public and private schools. An analysis of high school and beyond: a national longitudinal study for the 1980's [J]. Academic Achievement, 1981, (11):89-91.

[24] 闫敏，王洪浩，王子胜，等. 不同间作模式对棉花、花生生长发育的影响[J]. 辽宁农业科学，2014,(6):15-18.

[25] 段云佳，谭玲，张巨松，等. 施氮量对枣棉间作系统棉花干物质和氮素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2012,18(6):1441-1448.

[26] 王淑芬，裴冬，贾金生，等. 膜下滴灌棉花关键生育期不同灌水量、灌水次数对其生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报，2005,20(5):76-80.

[27] 王亮，林涛，田立文，等. 残膜对棉田耗水特性及干物质积累与分配的影响[J]. 农业环境科学学报，2017,36(3):547-556.

[28] 王翔翔. 渭北旱塬作物生长特征及其管理模式研究[D]. 西安：中国科学院研究生院（教育部水土保持与生态环境研究中心），2015.