

基于 DSSAT 模型的南疆膜下滴灌棉花生长与产量模拟

王兴鹏^{1,2} 辛 朗¹ 杜江涛³ 李明发⁴

(1.塔里木大学现代农业工程重点实验室,阿拉尔 843300; 2.农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室,石河子 832061;
3.兵团兴新职业技术学院建筑与水利工程学院,铁门关 841007;
4.新疆生产建设兵团第一师水文水资源管理中心,阿拉尔 843300)

摘要: 目前关于膜下滴灌棉花的灌水定额制定仍以田间灌溉试验为主,而考虑播期土壤含水率及采用模型的方法确定膜下滴灌棉花灌水定额的研究较少。本文通过 2017、2018 年两季的新疆南疆地区棉花大田试验,利用 2017、2018 年棉花开花期、成熟期的土壤含水率、叶面积指数、生物量和籽棉产量实测数据对 DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型进行参数校正和验证。试验共设计了 24、30、36 mm 3 个膜下滴灌棉花灌水定额水平,并采用验证的 DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型对 $1.2\theta_{FC}$ 、 $1.1\theta_{FC}$ 、 θ_{FC} 、 $0.9\theta_{FC}$ 、 $0.8\theta_{FC}$ 、 $0.7\theta_{FC}$ 、 $0.6\theta_{FC}$ 、和 $0.5\theta_{FC}$ (θ_{FC} 为田间持水率) 8 个不同初始土壤含水率条件下的膜下滴灌棉花的生长及产量进行了模拟。结果表明,模型经过参数校正和验证后对土壤含水率、棉花物候期、叶面积指数和籽棉产量的模拟值与实测值吻合度较好,能够满足大田膜下滴灌棉花的模拟精度要求,但对生物量的模拟与实测值偏差较大。同时,基于验证的 DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型对不同初始土壤含水率及灌水定额条件下的棉花籽棉产量和生物量进行了模拟。结果表明,棉花籽棉产量和生物量模拟值达到最大值的初始土壤含水率为 $0.8\theta_{FC} \sim \theta_{FC}$ 。同时,要保证棉花生育期灌溉定额在 330 ~ 396 mm 之间。模拟结果在南疆地区的棉花播期及生育期灌溉管理中可供借鉴使用。

关键词: 棉花; 产量; 生物量; 播前土壤含水率; 膜下滴灌; DSSAT 模型

中图分类号: S274.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0314-08

OSID:



Simulation of Cotton Growth and Yield under Film Drip Irrigation Condition Based on DSSAT Model in Southern Xinjiang

WANG Xingpeng^{1,2} XIN Lang¹ DU Jiangtao³ LI Mingfa⁴

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Engineering, Tarim University, Alar 843300, China
2. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832061, China
3. College of Architecture and Hydraulic Engineering,
Xinjiang Production and Construction Corps Xingxin Vocational and Technical College, Tiemenguan 841007, China
4. Hydrological and Water Resources Management Center of the First Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Alar 843300, China)

Abstract: At present, the formulation of the irrigation quota of cotton under film drip irrigation condition is still based on the field irrigation experiments, while there are few studies on determining the irrigation quota of cotton under film drip irrigation condition by considering the soil moisture content during sowing time or by modeling. Through the continuous field test of cotton field trials in the southern Xinjiang region in 2017 and 2018, the DSSAT - CROPGRO - Cotton model was parameter calibrated and verified by using the measured biomass, soil moisture contents, leaf area index and yield data of cotton flowering and maturity in 2017 and 2018, respectively. Under film drip irrigation condition, three cotton irrigation quota levels, 24 mm, 30 mm, and 36 mm, were designed in the experiment. The validated DSSAT - CROPGRO - Cotton model was also used to simulate the growth and yield of under-membrane drip irrigated cotton under eight different initial soil moisture content conditions of $1.2\theta_{FC}$, $1.1\theta_{FC}$, θ_{FC} , $0.9\theta_{FC}$, $0.8\theta_{FC}$, $0.7\theta_{FC}$, $0.6\theta_{FC}$, and $0.5\theta_{FC}$ (θ_{FC} is the field water holding rate). The results showed that the simulated values of cotton phenology, soil moisture contents, leaf area index and cotton yield

were well agreed with the measured values after parameter calibrated and model verification, meeting the requirements of cotton simulation accuracy under film drip irrigation condition in the field. However, the simulated biomass values deviated obviously from the measured ones. At the same time, based on the verified DSSAT – CROPGRO – Cotton model, the yield and biomass of cotton were simulated under different conditions of initial soil moisture content and irrigation quota. The results showed that the maximum simulated yield and biomass of cotton corresponded to an initial soil moisture content of $0.8\theta_{FC} \sim \theta_{FC}$. Accordingly, irrigation quota should be between 330 mm and 396 mm during cotton-growing period. The simulation results can be used for reference in the cotton planting and irrigation management in southern Xinjiang.

Key words: cotton; yield; biomass; soil moisture content before sowing; drip irrigation under film; DSSAT model

0 引言

新疆南疆地区地处天山南麓,光照时间长、气候干旱,适宜棉花种植,种植面积约为 132 万 hm^2 ,占新疆棉花总种植面积的 63% 左右。南疆地区属于典型的干旱绿洲农业灌溉区,农业灌溉用水占总用水量的 90% 以上。在棉花种植过程中,依然存在灌溉水利用率低、水资源浪费严重、棉花灌水定额不统一的问题,且田间灌溉试验仍是主导棉花灌溉制度制定的主要方法。然而,由于田间灌溉试验的周期长、影响因素多、劳动强度大、测定标准不统一等,使得相同区域确定的试验结果也会出现较大差异。另外,土壤初始含水率是确定棉花播期蓄墒水量和出苗率的控制指标,考虑土壤初始含水率对于合理制定棉田春灌蓄墒水量和保障棉花出苗率,进而提升灌溉水利用效率和棉花产量具有重要意义。

作物生长模型能定量、动态地描述作物生长、发育和产量形成过程及其对环境的影响^[1-2]。作物生长模型所具有的系统性、预测性、机理性和通用性等特征,与田间试验相比较,可节省大量人力和物力^[3]。农业技术转移决策支持系统 (Decision support system for agrotechnology transfer, DSSAT),是目前使用较为广泛的作物模型系统之一^[4-6]。模型涵盖了美国众多著名作物模型,例如 CERES 和 CROPGRO,其中 DSSAT 系统中专门用于小麦的 CERES – Wheat 模型和棉花的 DSSAT – CROPGRO – Cotton 模型应用较为广泛^[7-12]。研究表明,DSSAT – CROPGRO – Cotton 模型是模拟灌水制度的有效工具,模型能精确模拟不同灌水方式处理的棉花物候期和产量。MUHAMMAD 等^[13]认为该模型能够对棉花管理实践决策支持系统的模型潜力进行评估,包括确定棉花生产的最佳种植日期等。并且在不同的施氮和种植日期互作条件下,DSSAT – CROPGRO – Cotton 模型能较好地模拟棉花物候期、叶面积指数和产量,长历史时期的季节性蒸发蒸腾量 (ET) 和不同

灌溉水平下棉花产量的长期时间分布以及每单位水的边际价值^[14-16]。同时,模型也反映出在正常天气条件下采用亏缺灌溉可以节约用水而不会对籽棉产量产生不利影响。但是,在干旱条件下,应考虑亏缺灌溉存在产量损失增加的风险^[11]。AMIN 等^[17]利用 DSSAT 模型模拟得到了两个不同品种的棉花最适宜的磷肥施用水平,模拟精确度较高。吴立峰等^[18]通过两种方法对 DSSAT – CROPGRO – Cotton 模型参数进行了敏感性分析,并对 3 种不同灌溉处理下,棉花初花天数、成熟天数、籽棉产量、地上干物质量、最大叶面积指数和蒸发蒸腾量等指标进行了模拟验证。杜江涛等^[19]通过模型得到了南疆膜下滴灌棉花灌水定额为 27 mm 及生育期内灌溉定额 297 mm 是能够兼顾产量和水分利用效率的最优灌溉制度。郑云龙^[20]利用 DSSAT 模型来模拟在不同氮肥施用量下棉花产量的变化,对 DSSAT 模型模拟氮素限制条件下棉花产量的准确性及适用性进行评价。

棉田春灌蓄墒是南疆地区保障棉花种植最主要的灌溉措施,初始土壤含水率会直接影响棉花出苗率,进而影响产量。但是,考虑棉花播期不同初始土壤含水率,以及利用模型对不同灌水处理的膜下滴灌棉花生长及产量模拟方面的研究相对较少。为了精确制定播前春灌蓄墒定额,提升灌溉水利用效率,本文利用 DSSAT – CROPGRO – Cotton 模型对不同初始土壤含水率及灌水定额条件下的棉花籽棉产量和生物量进行模拟,以期为南疆地区棉田春灌策略和棉花生育期灌溉管理提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验于 2017—2018 年在新疆生产建设兵团第一师阿拉尔市水利局十团灌溉试验站 ($81^{\circ}17'56.52''\text{E}$, $40^{\circ}32'36.90''\text{N}$, 海拔 1 100 m) 内进行。试验区属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,夏季高温,冬季寒冷少雪,年均气温 $1.4 \sim 8.4^{\circ}\text{C}$, 全年

大于等于 10℃ 积温 3 450 ~ 4 432℃ ,无霜期 180 ~ 221 d。试验区多年平均降水量 50 mm,年蒸发量 2 200 mm,干旱指数为 7 ~ 20,为典型的干旱区。土壤

质地为沙壤土,0 ~ 100 cm 土壤平均容重为 1.58 g/cm³,具体的土壤物理参数见表 1。地下水埋深在 3.5 m 以下。

表 1 试验区土壤物理性质

Tab.1 Soil properties of experimental plots

土层深度/ cm	黏粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	砂粒质量 分数/%	凋萎系数/ (cm ³ ·cm ⁻³)	田间持水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	容重/ (g·cm ⁻³)
0 ~ 20	2.43	41.49	56.08	0.10	0.21	0.24	1.60
20 ~ 40	2.56	41.40	56.05	0.10	0.24	0.30	1.55
40 ~ 60	2.88	42.82	54.29	0.12	0.25	0.33	1.58
60 ~ 80	2.60	41.40	56.00	0.13	0.25	0.32	1.59
80 ~ 100	2.60	41.40	56.00	0.12	0.24	0.31	1.60

1.2 田间管理和试验设计

供试棉花品种为“新陆中 46”。种植模式为膜下滴灌,宽窄行配置为 10 cm + 66 cm + 10 cm,滴灌带布置方式为一膜两带六行(图 1),膜宽 2 m,膜间距 33 cm。2017 年棉花播种时间为 4 月 3 日,0 ~ 20 cm 土层初始土壤含水率 18.5%,棉花播种密度为 2.4 × 10⁵ 株/hm²,出苗时间为 4 月 13 日,5 月 25 日进入蕾期,6 月 25 日进入花铃前期,7 月 18 日进入花铃后期,8 月 23 日进入吐絮期,至 10 月中下旬棉花全部收获。2018 年棉花播种时间为 4 月 15 日,0 ~ 20 cm 土层初始土壤含水率 19.3%,棉花播种密度为 2.4 × 10⁵ 株/hm²,出苗时间为 4 月 25 日,6 月 11 日进入蕾期,7 月 6 日进入花铃前期,7 月 20 日进入花铃后期,8 月 26 日进入吐絮期,至 10 月底棉花全部收获。

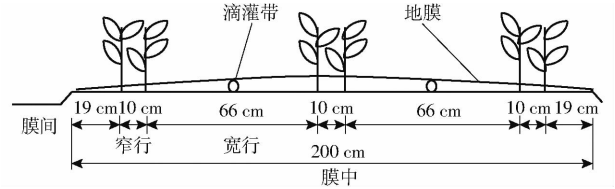


图 1 棉花种植及滴灌带布设示意图

Fig.1 Cotton planting and drip irrigation belt layout

根据前期研究结果,本试验设定的膜下滴灌棉花灌水定额为 30 mm。自棉花蕾期(2017 年 6 月 7 日、2018 年 6 月 16 日)开始进行灌溉,利用气象数据计算每日的水分亏缺量,当累计亏缺量达到 30 mm(即累计作物腾发量(ET_c)与降雨量(P)之差为 30 mm)时进行灌水。灌水定额设置 3 个水平,分别为参考灌水定额的 0.8、1.0、1.2 倍,即 T1:30 × 0.8 = 24 mm,T2:30 × 1.0 = 30 mm,T3:30 × 1.2 = 36 mm。每个处理设置 3 个重复,共 9 个小区,按照完全随机区组设计进行田间布置。2017 年和 2018 年棉花灌溉制度见表 2。滴灌带直径为 16 mm,滴头间距 30 cm,滴头流量 2.4 L/h,供水压力 0.1 MPa。每个试验小区规格为长 22 m,宽 7 m。各试验小区

表 2 2017 年和 2018 年棉花生育期灌溉制度

Tab.2 Irrigation regime during cotton growth period in 2017 and 2018

生育期 阶段	灌水日期		灌水定额/mm		
	2017 年	2018 年	T1	T2	T3
蕾期	6 月 7 日	6 月 16 日	24	30	36
	6 月 17 日	6 月 26 日	24	30	36
	6 月 23 日	7 月 6 日	24	30	36
花铃前期	7 月 3 日	7 月 13 日	24	30	36
	7 月 10 日	7 月 19 日	24	30	36
	7 月 14 日	7 月 26 日	24	30	36
花铃后期	7 月 25 日	8 月 3 日	24	30	36
	7 月 31 日	8 月 8 日	24	30	36
	8 月 6 日	8 月 14 日	24	30	36
	8 月 13 日	8 月 20 日	24	30	36
	8 月 20 日	8 月 26 日	24	30	36
			264	330	396
合计					

的灌水量由安装在支管上的水表量测控制。

棉花生育期施肥采用随水滴施的方式,第 1 次灌溉施肥量为尿素 150 kg/hm²,之后随水施用棉花滴灌专用肥 150 kg/hm²(总养分质量分数大于等于 43%),至 8 月底停止灌水,结束施肥。2017 年和 2018 年棉花施肥方案见表 3。

表 3 2017 年和 2018 年棉花生育期施肥方案

Tab.3 Fertilization schedule during cotton growth period in 2017 and 2018

生育期 阶段	施肥日期		施肥类型	施肥量/ (kg·hm ⁻²)
	2017 年	2018 年		
蕾期	6 月 23 日	6 月 26 日	尿素	150
花铃前期	7 月 3 日	7 月 6 日	滴灌专用肥(18-12-13)	150
	7 月 10 日	7 月 13 日	滴灌专用肥(18-12-13)	150
	7 月 14 日	7 月 19 日	滴灌专用肥(18-12-13)	150
花铃后期	7 月 25 日	7 月 26 日	滴灌专用肥(18-12-13)	150
	7 月 31 日	8 月 3 日	滴灌专用肥(18-12-13)	150
	8 月 6 日	8 月 8 日	滴灌专用肥(18-12-13)	150
	8 月 20 日	8 月 20 日	滴灌专用肥(15-20-20)	150

1.3 DSSAT – CROPGRO – Cotton 模型数据采集

本试验利用 DSSAT – CROPGRO – Cotton 对南疆膜下滴灌棉花生长及产量进行模拟。通过 2017 年的棉花试验数据对 DSSAT – CROPGRO – Cotton 模型参数进行率定,以 2018 年的实测数据进行验证,评价 DSSAT – CROPGRO – Cotton 模型在南疆地区棉花生长发育和产量模拟中的适用性。

1.3.1 气象数据

模型所需的气象数据主要包括逐日太阳辐射 (MJ/m^2)、逐日最高气温 ($^{\circ}\text{C}$)、逐日最低气温 ($^{\circ}\text{C}$) 和降雨量 (mm)。气象数据由试验站安装的 HOBO 小型气象站提供。

1.3.2 土壤数据

土壤数据通过模型提供的土壤数据操作模块 Sbuild 进行输入管理,模型运行时会自动调用。本试验所需土壤数据主要来自田间试验的实测数据,有效根系层为 0 ~ 100 cm,分为 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 共 5 层。土壤粒径采用 TopSizer 激光粒度分析仪测定;田间持水率采用田测法测定;凋萎系数采用高速离心法测定;土壤饱和含水率和土壤容重采用环刀法测定。其他输入参数如土壤名称、排水情况、反射率等由中国土壤数据库获得。

1.3.3 棉花田间管理数据

棉花田间管理数据主要包括播种日期、种植密度及深度、灌溉日期及灌水量、施肥日期及施肥量等。本研究田间管理数据由 2017 年和 2018 年的棉花试验获得。

1.3.4 棉花生理生态指标及产量测定

用 DSSAT 模型里的试验数据模块 (Experiment data) 进行试验数据输入。试验观测数据主要分为两种类型:一是随时间变化的观测数据,如土壤含水率、叶面积指数和生物量等,这类观测数据作为 T 文件输入到模型中;另一种仅是最终结果的观测数据,如物候期、产量等,这类观测数据作为 A 文件输入到模型中。

棉花叶面积测定自棉花蕾期开始,在每个处理小区内选择具有代表性的 3 株棉花进行标记,每 15 d 测定 1 次,用直尺逐个量取标记棉株叶片的长度 l 和最大宽度 $W_{\max}$,计算各叶片的面积 ($0.75lW_{\max}$),然后将所有单叶面积累加,得到单株叶面积,最后结合棉花种植密度计算其叶面积指数 (Leaf area index, LAI)。棉花生物量测定自棉花蕾期开始,每个处理小区选择 3 株棉花,同时取地上部和根系,在室内分别称量棉株的根、茎、叶、蕾的鲜质量,然后放入 105°C 干燥箱内杀青 30 min, 75°C 干燥

至恒质量,每 15 d 测定 1 次。在棉花吐絮期,当吐絮量达到 90% 时进行测产,在每个小区内随机确定 3 个 $2.33\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的测产样方摘取棉花,并称量百铃质量、吐絮籽棉产量等指标。

1.3.5 土壤含水率测定

在每个处理小区内安装 EM50 型土壤水分自动监测设备,对土壤水盐动态进行实时监测,传感器埋设深度为 10、20、40、60、80 cm,数据采集间隔时间为 1 h。同时,在棉花的每个生育阶段内用取土干燥法测定土壤含水率,并对 EM50 型土壤水分自动监测设备进行校正。

1.4 模型参数率定评价

利用 DSSAT – CROPGRO – Cotton 模型自带的 GLUE (Generalized likelihood uncertainty estimation) 参数调试程序包进行遗传参数率定。选取 2017 年棉花试验数据进行参数校正,2018 年试验数据用于模型的验证和评估。选用多种统计方法作为验证和评价指标评价模型校正和验证结果的可靠性,包括决定系数 (Correlation coefficient, R^2)、均方根误差 (Root mean square error, RMSE)、相对均方根误差 (Normalized root mean square error, nRMSE) 和绝对相对误差 (Absolute relative error, ARE)。

2 结果与分析

2.1 模型品种参数校正

DSSAT – CROPGRO – Cotton 模型本地化应用首先要完成遗传参数的确定即作物品种参数的校正。利用 2017 年 3 个灌水定额处理的试验数据,以土壤含水率、棉花的物候期 (开花期和成熟期)、叶面积指数、最终生物量和籽棉产量作为模型输出变量进行参数校正,以开花期、成熟期、产量和收获期生物量的绝对相对误差 (ARE) 最小为最佳参数标准,最终确定作物品种参数,如表 4 所示。

2.2 模型验证及评价

将率定好的遗传参数输入模型后,对棉花物候期、土壤含水率、叶面积指数、产量和生物量进行验证。2017—2018 年土壤含水率的模拟值与实测值如图 2 所示,不同处理土壤含水率的相对均方根误差 (nRMSE) 均小于 20%,表明校正后的模型对土壤含水率模拟效果较好;2017—2018 年棉花叶面积指数的模拟值与实测值如图 3 所示,不同处理棉花叶面积指数 nRMSE 均小于 20%,而 R^2 均大于 0.8,表明模型对棉花叶面积指数模拟准确度较高。棉花物候期、产量和生物量的验证结果如表 5 所示,以 2017 年的实测数据对模型各项指标进行校正时发现,模型对于校正处理各项指标的模拟值与实测值

表 4 棉花品种遗传参数
Tab.4 Genetic parameters of cotton

参数	参数取值范围	取值
临界光周期(CSDL)/h		23
光周期敏感系数(PPSEN)		0.01
出苗到初花期的光热时间(EM-FL)/d	29~45	42.63
初花期到第一个棉铃产生的光热时间(FL-SH)/d	10~30	15.36
初花期到第一个籽粒产生的光热时间(FL-SD)/d	12~18	17.89
第一个籽粒产生到生理成熟的光热时间(SD-PM)/d	40~54	41.64
初花期到叶片停止扩展的光热时间(FL-LF)/d	70~80	79.42
最适条件下叶片最大光合速率(LFMAX)/(mg·m ⁻² ·s ⁻¹)	0.95~1.15	1.136
比叶面积(SLAVR)/(cm ² ·g ⁻¹)	170~250	171.8
单叶面积(SIZIF)/cm ²	170~230	187.9
每日分配给棉铃的干物质量的最大比例(XFRT)/%	0.5~0.9	0.87
籽粒最大质量(WTPSD)/g		0.18
种子填充棉铃仓的持续时间(SFDUR)/d	30~40	33.36
正常条件下单个棉铃平均籽粒数(SDPDV)/个	20~27	26.46
最优条件下最终棉铃负载所需时间(PODUR)/d	5~15	6.019
籽棉质量与棉铃质量百分比(THRSH)/%	70~80	72.08
籽粒中蛋白质含量(SDPRO)/(g·g ⁻¹)		0.153
籽粒中油脂含量(SDLIP)/(g·g ⁻¹)		0.12

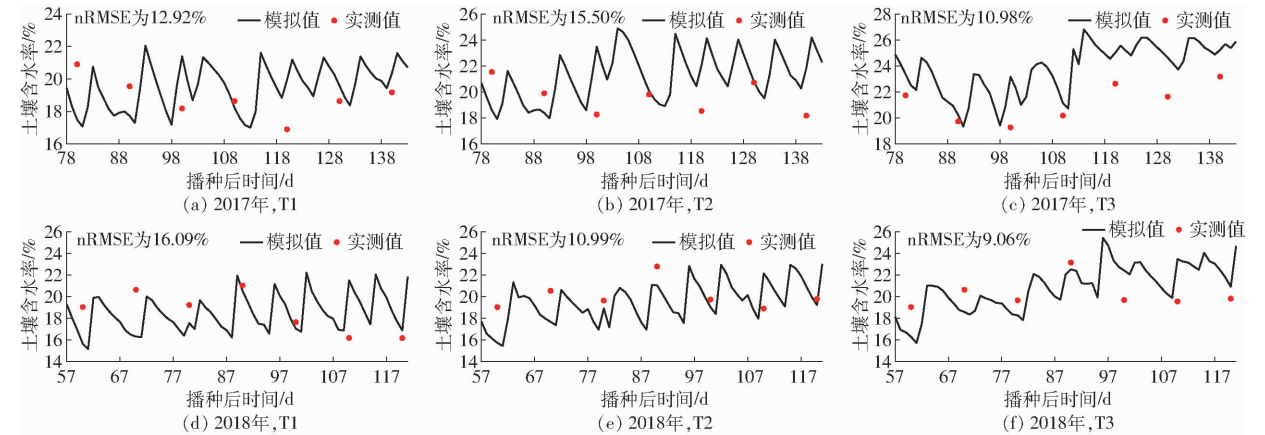


图 2 2017 年和 2018 年土壤含水率模拟值与实测值的关系

Fig.2 Relationships of simulated and actual soil moisture contents in 2017 and 2018

2.3 DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型模拟应用

2.3.1 试验条件设置

初始土壤含水率是影响棉花出苗率、生长及产量的重要因素,而制定适宜的播前灌水策略对于保证棉花发芽具备足够的土壤墒情至关重要。因此,本研究利用校正的 DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型对不同初始土壤含水率和灌水定额条件下的棉花生物量及籽棉产量进行模拟,通过模拟确定棉花播种适宜的初始土壤含水率,为棉田春灌策略的制定

吻合度较好,其中开花期、成熟期、生物量和籽棉产量模拟值与实测值的绝对相对误差(ARE)均值分别为 2.74%、10.97% 和 9.02%,说明模型对校正处理开花期、成熟期和籽棉产量的模拟效果较好,而生物量的模拟结果与实测值偏差较大。而以 2018 年实测值对校正模型进行验证表明,在棉花生育期,当灌水定额大于等于 30 mm,验证处理开花期、成熟期和籽棉产量的模拟值与实测值较为吻合,其 ARE 均小于 10%,能够较为准确反映出不同水分处理对棉花物候期和籽棉产量的影响。相比物候期和籽棉产量,模型对生物量的模拟结果偏差较大。

利用多种统计参数,对 DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型模拟棉花生长和产量的精度开展进一步评价(表 6)。2017、2018 年物候期的 nRMSE 均小于 10%,模拟精度较高。对于籽棉产量,2017、2018 年 nRMSE 均小于 15%,但 R²分别为 0.58 和 0.90,说明模型对籽棉产量的模拟效果较好。但是,2017 年棉花地上部生物量 nRMSE 较低,而 R²为 0.45,2018 年棉花地上部生物量 R²接近 1,而 nRMSE 为 30.89%,说明模型对于棉花生物量的模拟结果较差,主要是棉花整枝和打顶的田间管理措施影响所致。综上所述,DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型能够较好地模拟棉花的物候期和籽棉产量,可以利用该模型指导南疆地区的棉花生产和灌溉。

提供理论依据。模拟情景共设置 8 个初始土壤含水率,即 1.2θ_{FC}、1.1θ_{FC}、θ_{FC}、0.9θ_{FC}、0.8θ_{FC}、0.7θ_{FC}、0.6θ_{FC}、和 0.5θ_{FC}(θ_{FC}为田间持水率),每个模拟情景在棉花生育期设置 3 个灌水定额,即灌水定额为 24、30、36 mm,生育期灌水时间是基于 2017、2018 年两年的棉花试验确定(表 2)。

2.3.2 不同初始土壤含水率及灌水定额的棉花产量及生物量预测

利用修正的 DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型

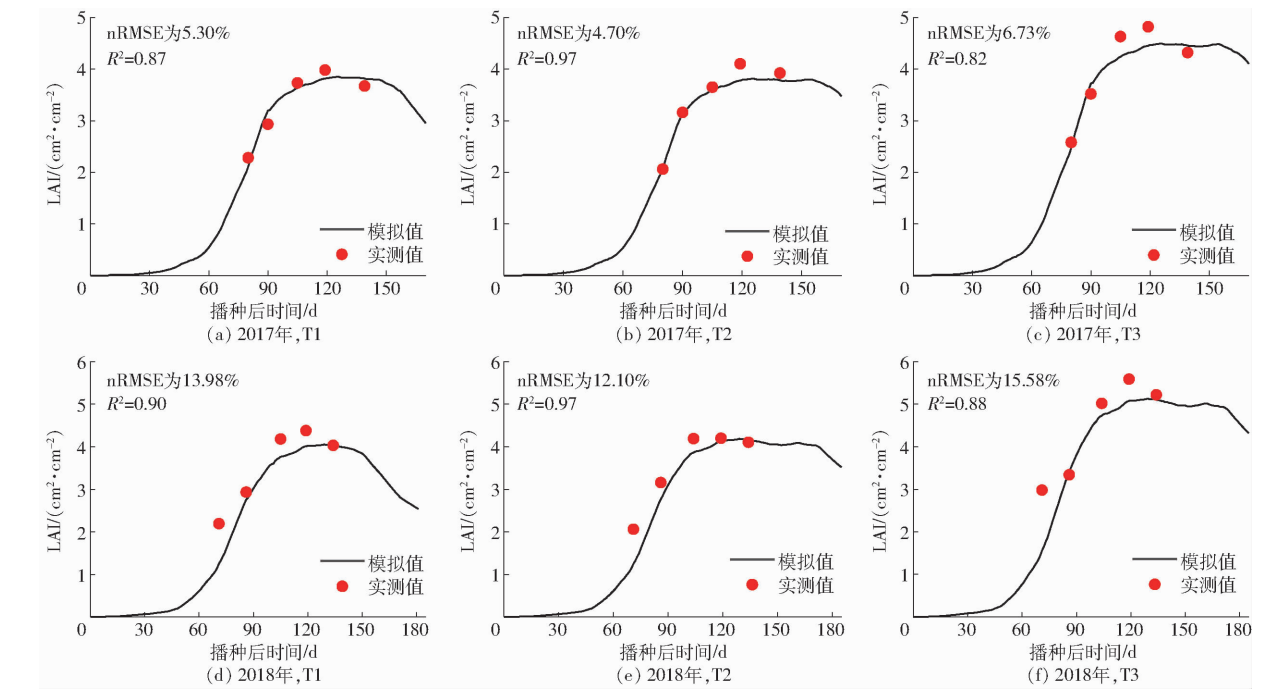


图3 2017年和2018年不同处理叶面积指数模拟值与实测值

Fig.3 Simulated and measured values of LAI under different treatments in 2017 and 2018

表5 DSSAT – CROPGRO – Cotton模型的校正和验证结果

年份	灌水定额/mm	开花期/DOY			成熟期/DOY			生物量/(kg·hm ⁻²)			籽棉产量/(kg·hm ⁻²)		
		模拟值	观测值	ARE/%	模拟值	观测值	ARE/%	模拟值	观测值	ARE/%	模拟值	观测值	ARE/%
2017(模型校正)	24	83	83	0	187	195	4.10	12 866	12 528	2.70	4 770	5 645	15.50
	30	83	83	0	197	195	1.03	13 266	16 371	18.97	6 462	6 637	2.64
	36	83	83	0	201	195	3.08	14 025	15 803	11.25	6 564	6 026	8.93
	均值			0			2.74			10.97			9.02
2018(模型验证)	24	78	82	4.88	185	188	1.60	10 028	15 878	36.84	3 448	4 690	26.48
	30	78	82	4.88	192	188	2.13	12 415	17 122	27.49	5 374	5 124	4.88
	36	78	82	4.88	194	188	3.19	13 471	18 876	28.63	6 067	5 655	7.29
	均值			4.88			2.30			30.99			12.88

表6 DSSAT – CROPGRO – Cotton模型模拟棉花物候期、生物量和籽棉产量评估结果

Tab.6 Performance of DSSAT – CROPGRO – Cotton model for simulating phenology, grain yield, aboveground biomass and grain yield of cotton in 2017 and 2018

年份	统计指标	开花期	成熟期	生物量	籽棉产量
2017	R ²			0.45	0.58
	RMSE	0	5.89	2075	601.60
	nRMSE/%	0	3.02	13.93	9.86
2018	R ²			0.90	0.90
	RMSE	4.00	4.51	5341	769.20
	nRMSE/%	4.88	2.40	30.89	14.92

注:开花期、成熟期 RMSE 单位为 DOY,生物量和产量 RMSE 单位为 kg/hm²。

模拟了不同灌水定额及初始土壤含水率条件下的棉花籽棉产量和生物量(图4、5)。模拟结果表明,当灌水定额为24 mm时,土壤含水率为田间持水率 θ_{FC}

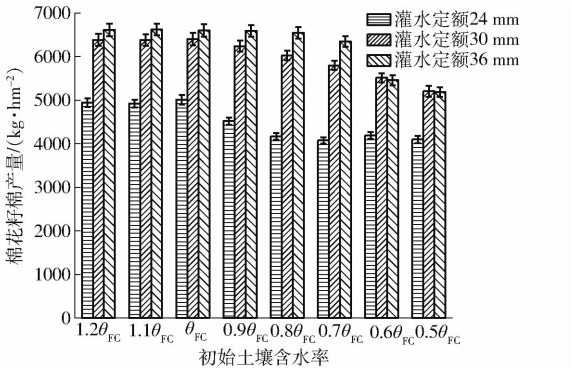


图4 不同灌水定额及初始土壤含水率的棉花籽棉产量模拟值

Fig.4 Simulation of seed cotton yield with different irrigation quota and pre-planting soil moisture content

情景下的棉花籽棉产量最高,而高于田间持水率模拟情景的棉花籽棉产量没有明显的增加。随着初始土壤含水率的降低,棉花籽棉产量降低明显。棉花

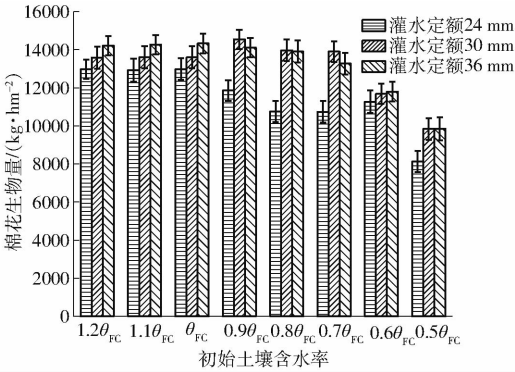


图 5 不同灌水定额及初始土壤含水率的棉花生物量模拟值

Fig. 5 Simulation of aboveground biomass with different irrigation quota and pre-planting soil moisture content

生物量的模拟值也表现出了较为相似的变化趋势。当灌水定额为 30 mm 时,初始土壤含水率为 $1.2\theta_{FC}$ 、 $1.1\theta_{FC}$ 与 θ_{FC} 模拟情景下的棉花籽棉产量相差较小,而初始土壤含水率为 $0.9\theta_{FC}$ 、 $0.8\theta_{FC}$ 的棉花籽棉产量较 θ_{FC} 降低了 3.25% 和 7.56%,更低的初始土壤含水率模拟情景的籽棉产量降低明显。对于棉花生物量的模拟结果,土壤初始含水率为 $0.9\theta_{FC}$ 、 $0.8\theta_{FC}$ 的生物量模拟值高于 $1.2\theta_{FC}$ 、 $1.1\theta_{FC}$ 和 θ_{FC} ,而 $0.6\theta_{FC}$ 、 $0.5\theta_{FC}$ 模拟情景的生物量模拟值低于其他处理。当灌水定额为 36 mm 时,初始土壤含水率为 $1.2\theta_{FC}$ 、 $1.1\theta_{FC}$ 模拟情景下的籽棉产量模拟值较 θ_{FC} 提高 0.21% 和 0.33%, $0.9\theta_{FC}$ 、 $0.8\theta_{FC}$ 和 $0.7\theta_{FC}$ 的籽棉产量较 θ_{FC} 仅降低了 0.09%、0.85%、3.83%,而 $0.6\theta_{FC}$ 、 $0.5\theta_{FC}$ 情景的籽棉产量模拟值较其他处理降低明显。棉花生物量的模拟值与产量模拟值表现出了较为相似的变化趋势。

3 讨论

本文在南疆地区通过 2017、2018 年两季的棉花试验,利用土壤含水率、棉花开花期、成熟期的叶面积指数、生物量和籽棉产量数据对 DSSAT - CROPGRO - Cotton 进行了校正和验证。结果表明,模型对于校正处理各项指标的模拟值与实测值吻合度较好,对生物量的模拟值与实测值偏差较大。通过 2018 年的实测数据对校正模型进行验证表明,当棉花生育期灌水定额大于 30 mm 时,模型对开花期、成熟期和籽棉产量的模拟值与实测值较为吻合。

为了进一步检验模型对籽棉产量和物候期的模拟精度,引入了相对均方根误差和决定系数对验证结果进行统计分析,分析结果表明,模型经过参数校正和验证后能够对南疆棉花的物候期、土壤含水率、叶面积指数和籽棉产量进行较为准确的模拟,WAJID 等^[14]的研究也表明 DSSAT 模型对于棉花总干物质和籽棉产量模拟结果相当准确。但是,由于棉花整枝和打顶的田间管理措施影响,本文中模型对棉花生物量的模拟效果较差,这与 WAJID 等^[14]的研究结果不一致。而 DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型也缺乏相应的参数模块对这方面进行考虑,因此,后续对模型开展进一步修正时需要考虑田间管理措施的影响。

南疆地区由于农田土壤次生盐渍化问题,形成了较为传统的冬春灌压盐提墒的灌溉淋洗措施,一般情况下,冬春灌定额为 $3\,750 \sim 4\,500\text{ m}^3/\text{hm}^2$,耗水量较大,易产生大量的农田排水,水资源浪费严重。春灌定额的确定与播前土壤墒情关系密切,而制定合理的播前灌溉定额则需要确定适宜棉花萌芽的初始土壤含水率。因此,本文基于验证的 DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型对不同初始土壤含水率及灌水定额条件下的棉花籽棉产量和生物量进行了模拟。根据模拟结果可知,棉花籽棉产量和生物量模拟值达到最大值的初始土壤含水率为 $0.8\theta_{FC} \sim \theta_{FC}$,但同时要保证棉花生育期灌溉定额在 $330 \sim 396\text{ mm}$ 之间,这一模拟结果在南疆地区的棉花灌溉中可供借鉴使用,但还需在后续的大田试验中进一步验证。

4 结束语

通过对 DSSAT - CROPGRO - Cotton 模型的校正和验证表明,模型对于棉花物候期、土壤含水率、叶面积指数和籽棉产量的模拟结果较为准确,精度相对较高,而对棉花生育期生物量的模拟误差较大,主要是棉花整枝和打顶的田间管理措施影响所致,而模型也缺乏相应的参数设定。根据模拟结果可知,棉花籽棉产量和生物量模拟值达到最大值的初始土壤含水率为 $0.8\theta_{FC} \sim \theta_{FC}$,但同时要保证棉花生育期灌溉定额在 $330 \sim 396\text{ mm}$ 之间,这一模拟结果在南疆地区的棉花生产中可供借鉴使用,但还需在后续的大田试验中进一步验证。

参 考 文 献

[1] 王全九,王康,苏李君,等.灌溉施氮和种植密度对棉花叶面积指数与产量的影响[J].农业机械学报,2021,52(12):300-312.
WANG Quanjiu, WANG Kang, SU Lijun, et al. Effect of irrigation amount, nitrogen application rate and planting density on cotton leaf area index and yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 300-312. (in Chinese)

[2] 王兴鹏,蒋富昌,王洪博,等.基于 AquaCrop 模型的南疆无膜滴灌棉花灌溉制度优化[J].农业机械学报,2021,52(4):

- 293 – 301,335.
- WANG Xingpeng, JIANG Fuchang, WANG Hongbo, et al. Irrigation scheduling optimization of drip-irrigated without plastic film cotton in South Xinjiang based on AquaCrop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(4):293 – 301,335. (in Chinese)
- [3] 司转运. 水氮对冬小麦-夏棉花产量和水氮利用的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2017.
- SI Zhuanyun. Effects of water and nitrogen on yield and water and nitrogen utilization of winter wheat summer cotton[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. (in Chinese)
- [4] 罗群英,林而达. 农业技术转移决策支持系统(DSSAT)新进展[J]. 气象,1996(12):10 – 13.
- LUO Qunying, LIN Erda. New progress of agricultural technology transfer decision support system (DSSAT)[J]. Meteorology, 1996(12): 10 – 13. (in Chinese)
- [5] GIJSMAN A J, HOOGENBOOM G, PARTON W J, et al. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter-residue module from century[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(3):462 – 474.
- [6] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal Agronomy, 2003, 18(3): 235 – 265.
- [7] SINGANDHUPE R B, RAO G, PATIL N G, et al. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2):327 – 340.
- [8] RINALDI M. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with the CERES – Wheat model[J]. Field Crops Research, 2004, 89(1):27 – 37.
- [9] ORTIZ B V, HOOGENBOOM G, VELLIDIS G, et al. Adapting the CROPGRO – Cotton model to simulate cotton biomass and yield under southern root-knot nematode parasitism[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(6):2129 – 2140.
- [10] THORP K R, BARNES E M, HUNSAKER D J, et al. Evaluation of CSM – CROPGRO – Cotton for simulating effects of management and climate change on cotton growth and evapotranspiration in an arid environment[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(6):1627 – 1642.
- [11] MODALA N R, ALE S, RAJAN N, et al. Evaluation of the CSM – CROPGRO – Cotton model for the Texas Rolling Plains region and simulation of deficit irrigation strategies for increasing water use efficiency[J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58(3):685 – 696.
- [12] SOLER C T, AFTAB G. Simulating cotton growth and development under different irrigation scheduling regimes[C] // 2006 Annual Meetings Abstracts. ASA – CSSA – SSSAMadison, WI. 2006.
- [13] RAHMAN M, AHMAD A, WAJID A, et al. Application of CSM – CROPGRO – Cotton model for cultivars and optimum planting dates: evaluation in changing semi-arid climate[J]. Field Crops Research,2017,7(7):1 – 15.
- [14] WAJID A, AHMAD A, HUSSAIN M. Modeling growth, development and seed-cotton yield for varying nitrogen increments and planting dates using DSSAT[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2014, 51(3):641 – 649.
- [15] ADHIKARI P, GOWDA P H, MAREK G W, et al. Calibration and validation of CSM – CROPGRO – Cotton model using lysimeter data in the texas high plains[J]. Universities Council on Water Resources,2017, 162(1):61 – 78.
- [16] CAMMARANO D, PAYERO J, BASSO B, et al. Agronomic and economic evaluation of irrigation strategies on cotton lint yield in Australia[J]. Crop & Pasture Science, 2012, 63(7):647 – 655.
- [17] AMIN A, NASIM W, MUBEEN M. Optimizing the phosphorus use in cotton by using CSM – CROPGRO – Cotton model for semi-arid climate of Vehari-Punjab, Pakistan[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017,24(6):5811 – 5823.
- [18] 吴立峰,张富仓,范军亮,等. 不同灌水水平下 CROPGRO 棉花模型敏感性和不确定性分析[J]. 农业工程学报,2015, 31(15):55 – 64.
- WU Lifeng, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Sensitivity and uncertainty analysis of CROPGRO cotton model under different irrigation levels[J]. Transations of the CSAE, 2015, 31(15): 55 – 64. (in Chinese)
- [19] 杜江涛,张楠,龚珂宁,等. 基于 DSSAT 模型的南疆膜下滴灌棉花灌溉制度优化[J]. 生态学杂志,2021,40(11):3760 – 3768.
- DU Jiangtao, ZHANG Nan, GONG Kening, et al. Optimization of cotton irrigation schedule under film drip irrigation in southern Xinjiang based on DSSAT model[J]. Journal of Ecology, 2021,40(11): 3760 – 3768. (in Chinese)
- [20] 郑云龙. DSSAT 模型对河北省不同施氮水平棉花生长的适用性评价[D]. 保定:河北农业大学,2018.
- ZHENG Yunlong. Evaluation of applicability of DSSAT model to cotton growth at different nitrogen application levels in Hebei Province[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018. (in Chinese)