

灌溉施氮和种植密度对棉花叶面积指数与产量的影响

王全九 王 康 苏李君 张继红 韦 开

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 为构建便于实际应用的棉花叶面积指数和产量模型,综合考虑灌溉、施肥、种植密度及覆膜的影响,建立了基于相对有效积温的普适棉花相对叶面积指数的 Logistic 模型,并研究了棉花最大叶面积指数与全生育期灌水量、施氮量、种植密度及产量之间的关系。结果表明:覆膜棉花叶面积指数最大时的有效积温为 1 400℃ 左右,不覆膜棉花的叶面积指数最大时的有效积温为 1 600℃ 左右。棉花最大叶面积指数随耗水量、施氮量呈现出先增后减的变化趋势,而种植密度与最大叶面积指数之间表现出明显的正相关性。综合考虑灌水量、施氮量和种植密度的作用可以较为准确描述最大叶面积指数变化特征。棉花产量随着最大叶面积指数的变化呈现出明显的先增后减的变化趋势,当最大叶面积指数为 4.93 时籽棉产量最大达 6 066.2 kg/hm²。相对化分析结果表明,覆膜与不覆膜棉花相对叶面积指数的变化趋势基本一致,相应的模型参数也基本相同,从而建立了全国范围内覆膜与不覆膜棉花统一的相对叶面积指数的 Logistic 模型。该研究为棉花科学种植和精细化管理提供了方法,也为其他作物在不同管理措施和地域时进行建模提供了参考。

关键词: 灌溉; 施肥; 有效积温; 相对叶面积指数; 最大叶面积指数; 作物生长模型

中图分类号: S5-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)12-0300-13

OSID: 

Effect of Irrigation Amount, Nitrogen Application Rate and Planting Density on Cotton Leaf Area Index and Yield

WANG Quanjiu WANG Kang SU Lijun ZHANG Jihong WEI Kai

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northweat Arid Regions of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The effects of irrigation, fertilization, planting density and film-mulching were comprehensively analyzed in order to develop a universal Logistic model of cotton relative leaf area index based on the relative growing degree days as the independent variable. The relationship between the maximum leaf area index of cotton and irrigation amount, nitrogen application rate, planting density and yield during the whole growth period was studied. The results showed that the growing degree days of the maximum leaf area index of cotton with film-mulching was about 1 400℃, and growing degree days of the maximum leaf area index of cotton without film-mulching was about 1 600℃. The maximum leaf area index of cotton was increased first and then decreased with water consumption and nitrogen application, and there was a significant positive correlation between planting density and maximum leaf area index. The maximum leaf area index can be described accurately through considering the effects of irrigation amount, nitrogen application rate and planting density. When the maximum leaf area index was 4.93, the maximum seed cotton yield was 6 066.2 kg/hm². The results of relative analysis showed that the change trend of relative leaf area index of cotton with and without film-mulching was nearly the same, and the corresponding model parameters were also the same. A unified Logistic model of relative leaf area index of cotton with and without film-mulching was established. The research result can provide a method for scientific planting and fine management of cotton, and also can provide a reference for modeling other crops in different management and different regions.

Key words: irrigation; fertilization; growing degree days; relative leaf area index; maximum leaf area index; crop growth model

收稿日期: 2020-11-21 修回日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51679190,51979220)、国家自然科学基金重点项目(41830754)和新疆水专项(2020.D-001)

作者简介: 王全九(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与养分运移研究,E-mail: wquanjiu@163.com

0 引言

棉花不仅是全球种植最广泛的纤维作物,也是中国最重要的经济作物之一。世界各国的学者们利用统计方法,并结合作物模型和区域气候模型,对棉花的生长过程进行了广泛的探讨^[1]。张立桢等^[2]借鉴作物生理发育时间和生育进程的预测方法,量化了棉花热效应、光周期效应及地膜覆盖效应等因子,建立了棉花生育期模拟模型。谭艳梅等^[3]初步建立了新疆棉花主产区年累积温度预测模型。周娟等^[4-5]建立了基于有效积温的棉花形态虚拟生长模型。SU 等^[6]研究表明,改进的 Logistic 模型对棉花相对叶面积指数的模拟效果更好。上述研究表明,Logistic 模型可以用于同一地区不同处理下棉花生长特征的研究,但未给出对不同地区、不同环境下较为普适的棉花生长模型。

于强等^[7]以生育期和干物质积累量作为预报因子,建立了水稻叶面积指数的普适增长模型,涂修亮等^[8]提出小麦叶面积指数的分段模型。作为作物的主要生长指标之一,叶片是作物进行光合作用、蒸腾作用和有机物质合成的主要器官,叶面积决定着作物吸收太阳辐射能进行光合作用的强度。叶面积指数是决定冠层光合作用速率准确计算的重要参数之一,是反映作物群体质量的重要指标^[9],直接影响作物对光能的截获^[10],进而影响光合产物的形成,对作物高产有着十分重要的作用^[11]。因此,有必要建立一种快速准确反映棉花叶面积指数动态变化的普适模型,为我国棉花科学种植和精细化管理提供方法。

有效积温通常用于量化空气温度和代表温度对作物生长的综合影响,消除了对作物生长发育没有作用的无效积温,因此有效积温可以更客观、更准确地描述作物生长的热需求^[12]。空气温度是决定棉花生长速度和影响棉花产量的关键因素,作为一种喜温植物,棉花生长对温度的变化很敏感^[13]。一般而言,棉花全生育期均需要较高的温度,积温越高越有利于棉花生产^[14]。当前,已有学者基于有效积温建立了不同地区、不同环境下较为普适的水稻^[15]和马铃薯^[16]生长模型。然而灌溉^[17]、施肥^[18]、种植密度^[19-20]、作物品种^[21]和田间种植措施^[22]等因素对作物生长有很大的影响。但上述模型未对这些因素进行综合考虑,难以用于不同情形下作物生长过程的定量评估。因此,有必要综合考虑灌溉、施肥、种植密度及覆膜等对作物生长的影响,建立作物生长综合模型,以提高作物生长指标的预测精度,并更好地掌握作物的生长变化规律。刘战东等^[23]借助修

正的 Logistic 模型,利用相对有效积温建立了冬小麦返青至成熟阶段的相对叶面积指数变化模型,结果表明,该方法能够很好地描述叶面积的生长变化过程。王乐等^[24]利用相对有效积温分析了不同品种棉花相对株高的变化情况,结果表明,相对化处理可以消除不同品种间自然株高的遗传差异性,有助于建立适用于不同品种的株高动态模拟模型。

利用相对有效积温能够消除因各组数据来源的生育期时间的差别,提取出作物在不同处理下统一的生长规律,也可以减少覆膜对模型参数的影响。相对化的方法也可用于模型简化,也为其他作物在不同的管理措施和地域等进行建模提供了方法。因此,以相对有效积温为自变量建立作物叶面积指数的生长模型更具有现实意义。本文综合考虑灌溉、施肥、种植密度和覆膜对棉花生长的影响,利用修正的 Logistic 模型,以相对有效积温为自变量,建立不同的耗水量、施氮量、种植密度下的覆膜与不覆膜棉花叶面积指数的生长模型,分析不同措施下温度对棉花生长的影响,并建立全国范围内统一的棉花叶面积指数生长模型,分析水氮施用量和种植密度等对叶面积生长的影响,为冠层结构优化和增强作物光能利用率提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

收集了国内外 60 篇文献资料(1998—2018 年),涉及全国 24 个地点的棉花叶面积指数生长数据。利用中国气象数据网获取不同地区棉花生长发育阶段的气温数据,并通过计算得到不同地区各个生育阶段所对应的有效积温或相对有效积温。表 1 为不同耗水量、施氮量和种植密度下覆膜与不覆膜棉花的叶面积指数相关数据来源,表 2 为棉花相对叶面积指数模型的验证数据,全生育期灌水量、施氮量和种植密度三者与叶面积指数的耦合关系数据以及棉花籽棉产量模型的验证数据。

1.2 研究方法

有效积温是指日平均气温与作物活动所需要的最低温度之差,反映了作物能完成发育和生长所需总热量。由文献[84-85]可知,棉花生长发育的适宜温度为 25~30℃,上限温度为 40℃,下限温度为 10℃。有效积温(GDD)的表达式为

$$P_{GDD} = \sum (T_{avg} - T_{base}) \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} T_{avg} = \frac{T_x + T_n}{2} \\ T_{avg} = T_{base} \quad (T_{avg} \leq T_{base}) \\ T_{avg} = T_{upper} \quad (T_{avg} \geq T_{upper}) \end{cases}$$

表 1 耗水量、施氮量、种植密度对覆膜与不覆膜种植棉花叶面积指数影响的数据来源

Tab.1 Sources of data on effects of water consumption, nitrogen application, and planting density on leaf area index of cotton planted with and without film-mulching										
措施分类	覆膜					不覆膜				
	省/自治区	市/区/县	样本数	文献序号	备注	省/自治区	市/区/县	样本数	文献序号	备注
耗水量	新疆	乌鲁木齐	25	[25 – 26 ,17]	W246 ~ W674	河北	保定	6	[27]	W300 ~ W650
	河北	威县	6	[28]	W575 ~ W720	河南	新乡	4	[29]	W333、W366、W447、W506
	新疆	阿克苏	6	[30]	W373 ~ W555	河北	威县	6	[28]	W575 ~ W720
	新疆	阿拉尔	11	[31 – 32]	W331 ~ W662	新疆	石河子	8	[33]	W484 ~ W547
	新疆	昌吉	8	[34]	W343 ~ W601	新疆	阿拉尔	8	[35]	W334 ~ W639
	新疆	石河子	38	[36 – 39]	W267 ~ W670					
	新疆	玛纳斯	16	[40]	W350 ~ W520					
	新疆	库尔勒	5	[41]	W293 ~ W613					
施氮量	新疆	和田	8	[42]	W535 ~ W753					
	新疆	阿瓦提	8	[43]	N0、N150、N300、N450	河北	保定	3	[44]	N100、N200、N400
	新疆	库尔勒	22	[45 – 48]	N150 ~ N450	山东	东营	7	[49]	N0、N75、N150、N225
	新疆	石河子	40	[50 – 54]	N0 ~ N530	河南	安阳	6	[55]	N0、N90、N180、N270、N360、N450
	辽宁	辽阳	4	[56]	N150	湖南	岳阳	4	[57]	N168、N300
	新疆	阿拉尔	5	[31]	N540 ~ N570					
	新疆	克拉玛依	5	[58]	N450					
	新疆	图木舒克	3	[59]	N492					
种植密度	新疆	石河子	42	[38 – 39 ,60 – 63]	D9 ~ D36	河北	保定	4	[44 ,27]	D5. 33、D6
	新疆	农七师	6	[64]	D9 ~ D31. 5	山东	东营	2	[49]	D3. 33
	新疆	阿拉尔	6	[65]	D9 ~ D31. 5	河南	安阳	15	[21 ,55]	D5. 75、D9
	新疆	农六师	10	[66]	D7. 5 ~ D37. 5	江苏	南京	6	[67]	D1. 2、D2. 1、D3、D3. 9、D4. 8、D5. 7
	辽宁	辽阳	4	[56]	D10	湖南	岳阳	4	[57]	D2、D6
	河北	深州	12	[19]	D5. 2、D6. 75					

注:W 表示全生育期耗水量(mm),N 表示施氮量(kg/hm²),D 表示棉花种植密度(万株/hm²),W246 表示全生育期的耗水量为 246 mm,N150 表示全生育期的施氮量为 150 kg/hm²,D9 表示棉花种植密度为 9 万株/hm²,下同。

式中 P_{GDD} ——有效积温,℃
 T_{avg} ——日平均气温,℃
 T_{base} ——作物活动所需要的最低温度,℃
 T_{upper} ——作物活动所需要的最高温度,℃
 T_x ——日最高气温,℃
 T_n ——日最低气温,℃

为了分析气候对于覆膜与不覆膜棉花生长的影响,以有效积温为自变量,建立了棉花相对叶面积指数的 Logistic 模型,表达式为

$$R_{LAI} = \frac{LAI}{LAI_{max}} = \frac{1}{1 + e^{d + eP_{GDD} + fP_{GDD}^2}}$$

(2)

式中 R_{LAI} ——相对叶面积指数,各生育期叶面积指数与全生育期中最大叶面积指数的比值
 LAI ——叶面积指数
 LAI_{max} ——最大叶面积指数

$d、e、f$ ——拟合参数
为了统一分析不同地区、不同水肥等条件下温度对棉花生长的影响,有效积温相对化的相对叶面积指数 Logistic 模型表示为

$$R_{LAI} = \frac{1}{1 + e^{a + bR_{GDD} + cR_{GDD}^2}}$$

(3)

式中 R_{GDD} ——相对有效积温,各生育期对应的有效积温与其叶面积指数最大时有效积温的比值

$a、b、c$ ——拟合参数

1.3 数据处理

数据运用 Excel 进行处理,并用 Matlab 进行模型参数推求,采用决定系数 R^2 、相对误差(RE)和均方根误差(RMSE)3 种最常用的评价指标进行误差分析,检验相关性。

由于数据量大,试验设计也存在差异,为了便于

表 2 棉花相对叶面积指数模型的验证数据,全生育期灌水量、施氮量和种植密度三者与叶面积指数的耦合数据以及棉花籽棉产量的验证数据

Tab.2 Validation data of cotton relative leaf area index model, coupling data of leaf area index of irrigation, nitrogen and planting density throughout growth period, and validation data of cotton seed cotton yield

数据类型	省/自治区	市/区/县	样本数	文献序号	备注(在文献的处理)
叶面积指数 模型验证数据	新疆	石河子	7	[68 – 69]	种植密度、移栽
	新疆	阿克苏	9	[70 – 71]	3 g/L、5 g/L 和河水 3 个矿化度,棉花品种
	新疆	乌鲁木齐	2	[72]	
	新疆	沙湾	2	[73]	膜下滴灌和普通灌溉
	新疆	库尔勒	16	[74 – 75]	灌水量、聚谷氨酸施量
	河南	郑州	8	[76 – 77]	氮肥施量
	安徽	固镇	3	[78]	播种方式
	河北	石家庄	5	[79]	冀丰 1982、冀丰 1271、冀棉 958、中棉所 41、鲁棉研 21
耦合数据	河北	邢台	3	[80]	覆膜与不覆膜
	新疆	阿拉尔	6	[65]	I360N736. 5、D9、D13. 5、D18、D22. 5、D27、D31. 5
	新疆	石河子	37	[53、60、63、81]	I608、I730N601、N620D29. 2
	河南	新乡	14	[82]	I120、I90、I60N0、N60、N120、N180、N240D12
	新疆	第七师	6	[83]	I555N305、D10. 9、D21. 9
	新疆	阿瓦提	8	[43]	I380D24. 25、N0、N150、N300、N450
	新疆	库尔勒	3	[45]	N230D24. 25、I294、I322、I366、I376、I402、I420
	新疆	图木舒克	9	[59]	N492I320、I400、I480D12、D18、D24
产量验证数据	新疆	阿拉尔	5	[31]	I75、I187、I300、I412、I525D18N550
	新疆	石河子	31	[39、50、54、52]	I425、I350、I525、I700N260、N380、N500、N525 D12、D16. 5、D24、D24. 2、D36
	新疆	玛纳斯	16	[40]	I282 ~ I450、D21. 3、N400
	新疆	乌鲁木齐	8	[17]	I225 ~ I450、N231、D21、D25

注:I 表示全生育期灌水量(mm),I246 表示全生育期灌水量为 246 mm。

综合分析区域变化特征,将耗水量以 200 ~ 300 mm、300 ~ 400 mm、400 ~ 500 mm、500 ~ 600 mm、600 ~ 700 mm 划分为 5 个区间;施氮量以 0 ~ 100 kg/hm²、100 ~ 200 kg/hm²、200 ~ 300 kg/hm²、300 ~ 400 kg/hm²、400 ~ 500 kg/hm²、500 ~ 600 kg/hm²划分为 6 个区间;将种植密度按照当地的种植条件和相关文献划分为 0 ~ 5 万株/hm²、5 ~ 10 万株/hm²、10 ~ 15 万株/hm²、15 ~ 20 万株/hm²、20 ~ 25 万株/hm²、25 ~ 30 万株/hm²、30 ~ 35 万株/hm² 7 个区间进行分类。在此基础上,以相对有效积温为自变量分析相对叶面积指数的变化过程,并对每个区间的耗水量、施氮量、种植密度及对应的最大叶面积指数求取平均值,建立二者之间的函数关系。

2 结果与分析

2.1 棉花叶面积指数变化特征

2.1.1 叶面积指数随有效积温的变化特征

覆膜与不覆膜棉花叶面积指数随有效积温变化情况如图 1 所示。由图 1 可以看出,覆膜与不覆膜棉花叶面积指数总体变化过程基本相同,但相对最大叶面积指数对应的有效积温存在差异。覆膜棉花叶面积指数最大时的有效积温为 1 400℃左右,不覆

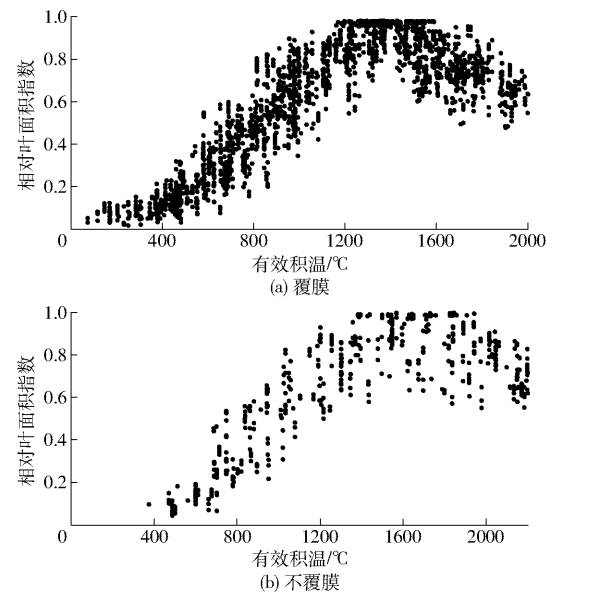


图 1 覆膜和不覆膜棉花有效积温与相对叶面积指数的关系

Fig.1 Relationship between GDD of cotton with and without film-mulching and relative leaf area index

膜棉花的为 1 600℃左右。说明覆膜增加了耕层土壤温度,促进了棉花生长。在这种状况下,单依据气温来分析覆膜条件棉花生长发育过程将存在差异,而且也无法用统一的模型来分析棉花生长的变化规律。

2.1.2 相对有效积温与相对叶面积指数的关系

为了便于统一分析覆膜不覆膜情况下棉花生长特征,对有效积温进行相对化处理。按照耗水量、施氮量、种植密度分别分析覆膜与不覆膜棉花叶面积指数变化情况,并利用相对化修正的 Logistic 模型进行拟合,结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,决定系数(R^2)均不小于 0.9,均方根误差(RMSE)均在 0.06 左右,拟合效果良好。表明有效积温相对化后

的 Logistic 模型可以较好拟合覆膜与不覆膜棉花叶面积指数的变化过程。对式(3)求一阶导函数,并令 $\frac{dR_{LAI}}{dR_{GDD}}=0$,可以得到最大相对叶面积指数对应的相对有效积温 R_{GDDi} ,即

$$R_{GDDi} = -\frac{b}{2c}$$

(4)

理论上相对叶面积指数最大时的相对有效积温

表 3 覆膜与不覆膜棉花在不同处理下叶面积指数修正 Logistic 模型参数拟合结果

Tab.3 Parameter fitting results of modified Logistic model for leaf area index of cotton with and without film-mulching under different treatments

处理		a	b	c	R^2	RMSE	叶面积指数最大时的有效积温/℃
耗水量	200 ~ 300 mm	10.05	-23.93	11.58	0.98	0.04	1 296.3
	300 ~ 400 mm	9.94	-23.99	11.75	0.96	0.06	1 451.6
	400 ~ 500 mm	9.09	-22.33	10.95	0.96	0.06	1 547.6
	500 ~ 600 mm	9.21	-22.56	11.00	0.96	0.06	1 470.5
	600 ~ 700 mm	9.06	-22.76	11.34	0.95	0.06	1 413.1
覆膜	0 ~ 100 kg/hm ²	9.45	-23.40	11.82	0.97	0.05	1 323.5
	100 ~ 200 kg/hm ²	9.13	-22.35	11.05	0.96	0.07	1 363.6
	200 ~ 300 kg/hm ²	9.27	-22.53	11.01	0.96	0.06	1 489.3
	300 ~ 400 kg/hm ²	9.18	-22.84	11.36	0.94	0.07	1 428.5
	400 ~ 500 kg/hm ²	9.18	-22.46	11.13	0.93	0.08	1 428.5
	500 ~ 600 kg/hm ²	9.05	-22.34	11.01	0.95	0.06	1 388.9
种植密度	5 ~ 10 万株/hm ²	9.23	-22.78	11.35	0.91	0.07	1 388.6
	10 ~ 15 万株/hm ²	9.41	-23.04	11.42	0.90	0.08	1 397.4
	15 ~ 20 万株/hm ²	9.42	-23.21	11.47	0.93	0.05	1 410.3
	20 ~ 25 万株/hm ²	9.60	-23.42	11.57	0.93	0.08	1 428.5
	25 ~ 30 万株/hm ²	9.36	-23.04	11.31	0.93	0.05	1 398.5
	30 ~ 35 万株/hm ²	9.43	-23.24	11.59	0.90	0.07	1 402.1
不覆膜	300 ~ 400 mm	9.99	-23.60	11.55	0.94	0.06	1 568.6
	400 ~ 500 mm	9.97	-23.30	11.25	0.94	0.07	1 610.5
	500 ~ 600 mm	10.03	-24.08	11.9	0.92	0.07	1 562.5
	600 ~ 700 mm	9.36	-22.86	11.39	0.94	0.06	1 496.3
	0 ~ 100 kg/hm ²	8.62	-21.77	11.02	0.97	0.06	1 568.6
	100 ~ 200 kg/hm ²	9.11	-23.18	11.83	0.97	0.06	1 627.9
	200 ~ 300 kg/hm ²	8.69	-22.36	11.44	0.96	0.06	1 547.6
	300 ~ 400 kg/hm ²	8.91	-22.01	10.98	0.94	0.07	1 621.6
	0 ~ 5 万株/hm ²	9.46	-23.04	11.42	0.95	0.06	1 692.2
	5 ~ 10 万株/hm ²	9.59	-23.17	11.35	0.96	0.06	1 657.3

为 1,式(4)可转换为

$$b = -2c$$

(5)

从式(5)可以看出,随着参数 c 的不断增大,参数 b 呈现出线性减小的变化趋势,减小速率与作物最大叶面积指数对应的相对有效积温有关。对比表 3 中覆膜与不覆膜棉花相应的模型参数可知,有效积温相对化处理后各参数差异性较小。对其中不覆膜棉花与覆膜棉花叶面积模型拟合参数求取均值,结果分别为 $a_m=9.36$ 、 $b_m=-22.95$ 、 $c_m=11.34$,

$a_i=9.37$ 、 $b_i=-22.94$ 、 $c_i=11.41$ (a_m 、 b_m 、 c_m 为覆膜下的模型拟合参数, a_i 、 b_i 、 c_i 为不覆膜情况下模型拟合参数),覆膜与不覆膜情况下模型参数相近,可以取其平均值进行统一处理,结果如图 2 所示。统一的棉花相对叶面积指数模型表示为

$$R_{LAI} = \frac{1}{1 + e^{9.31 - 22.9R_{GDD} + 11.36R_{GDD}^2}}$$

(6)

为了进一步评价统一模型描述棉花叶面积指数的准确性,采用表 2 所示的相对叶面积指数验证数

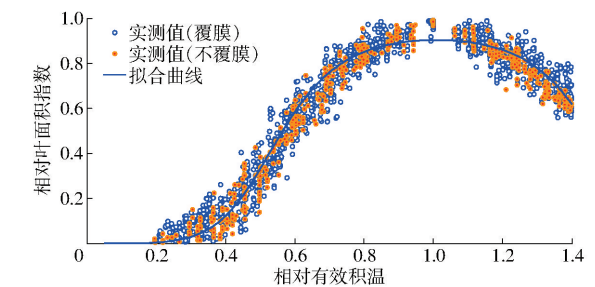


图2 棉花相对有效积温与相对叶面积指数的动态曲线

Fig.2 Dynamic curve of relative effective accumulated temperature and relative leaf area index

据对式(6)进行验证,验证结果如图3所示。由图3可以看出,相对叶面积指数的实测值与模拟值之间吻合较好,决定系数 $R^2 = 0.84$,相对误差(RE)为15.7%,说明建立统一模型可以体现我国棉花生长总体特征。

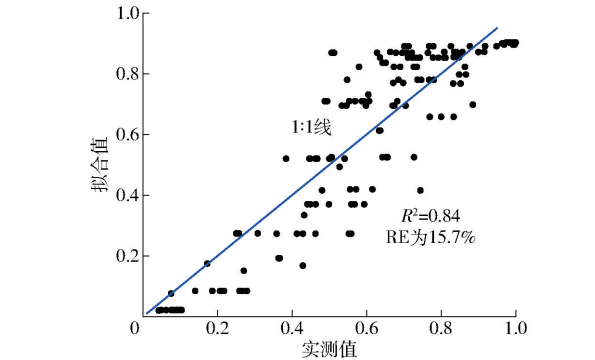


图3 相对叶面积指数验证数据与模型计算结果比较

Fig.3 Comparison of validation data and model calculation results of relative leaf area index

2.2 耗水量、施氮量和种植密度与棉花最大叶面积指数的定量关系

棉花在生长中受到土壤中水分和养分以及棉花种植密度等条件的影响,为了确定棉花耗水量和施肥量相对最优时的最大叶面积指数,提高棉花光合效应,使得棉花在相对最优的水肥条件下达到最大的生产效率。将表1中全国24个地点118组棉花全生育期总耗水量和对应的最大叶面积指数的数据,165组棉花全生育期总施氮量和对应的最大叶

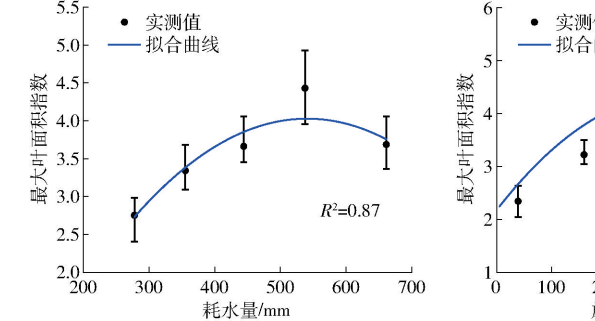


图4 棉花全生育期的耗水量、施氮量、种植密度与最大叶面积指数的拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of water consumption, nitrogen application, planting density and maximum leaf area index in whole growth period of cotton

面积指数的数据,102组棉花种植密度和对应的最大叶面积指数的数据,按照分段区间求取平均值,结果如图4所示。从图4可以看出,随着棉花全生育期的耗水量和施氮量的增大,叶面积指数表现出先增后减的变化趋势,而棉花的叶面指数与种植密度表现出明显的正相关性。

大量研究表明棉花的产量随着生育期灌水量和施氮量的不断增加而呈现先增加后减小的变化趋势,水氮施用量过多或过少均会造成棉花产量的降低^[25,86-87]。罗宏海等^[63]研究认为,较高的种植密度会导致棉花个体生长发育的环境与空间变差,叶片衰老加快,光合能力减弱。较低的种植密度,会导致棉花整个生育时期的叶面积指数一直处于较低水平,群体光合速率低下,干物质积累量减少,产量也相应减少。因此,在植花种植过程中,合理的种植密度以及水氮施用量会形成合理的棉花叶面积指数和优良的冠层结构,增加作物光能利用率,并收获相对较高的产量。

利用曲线拟合棉花全生育期耗水量、施氮量以及种植密度与棉花最大叶面积指数间关系为

$$\begin{cases} LAI_{\max} = -2 \times 10^{-5} W^2 + 0.023 W - 2.019 \\ LAI_{\max} = -2 \times 10^{-5} N^2 + 0.014 N - 1.765 \\ LAI_{\max} = 0.046 D + 2.738 \end{cases} \quad (7)$$

式中 W ——棉花全生育期耗水量,mm
 N ——棉花全生育期施氮量,kg/hm²
 D ——棉花种植密度,万株/hm²

3个函数关系拟合效果较好,决定系数均不小于0.87。对式(7)棉花全生育期耗水量、施氮量与最大叶面积指数的关系式分别求一阶导函数,并令该导函数等于0。结果表明,当耗水量为568mm时,最大叶面积指数最大值为4.42;当施氮量为350kg/hm²时,最大叶面积指数最大值为4.22。

2.3 灌水量、施肥量和种植密度与最大叶面积指数综合定量关系

从收集数据中可以看出,棉花种植主要集中在

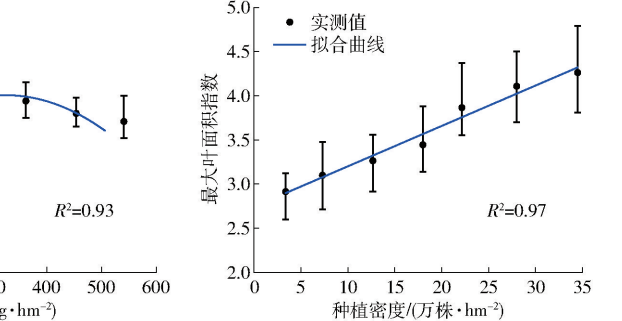


图4 棉花全生育期的耗水量、施氮量、种植密度与最大叶面积指数的拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of water consumption, nitrogen application, planting density and maximum leaf area index in whole growth period of cotton

年平均降雨量不足 200 mm 的西北地区,而且棉花的生长受到水肥和种植密度等多种因素的共同作用。因次,用单一因子难以量化棉花的生长特性。为了综合考虑灌溉、施肥和种植密度对棉花生长的影响,选取全生育期灌水量、施氮量和种植密度 3 种主要数据综合分析棉花的最大叶面积指数,拟合结果为

$$LAI_{\max} = -0.004\,48I + 0.002\,87N + 0.249\,7D - 0.078\,6\left(\frac{I}{100}\right)^2 - 0.019\,4\left(\frac{N}{100}\right)^2 + 0.004\,3D^2 + 0.209$$

(8)

式中 I ——棉花全生育期灌水量,mm

为了对式(8)的准确性进行评价,选取部分未建模数据,与式(8)计算值进行对比,结果如图 5 所示。决定系数 R^2 为 0.79,相对误差 RE 为 9.9%,说明综合考虑灌水量、施氮量和种植密度的作用可以较为准确描述最大叶面积指数变化特征。

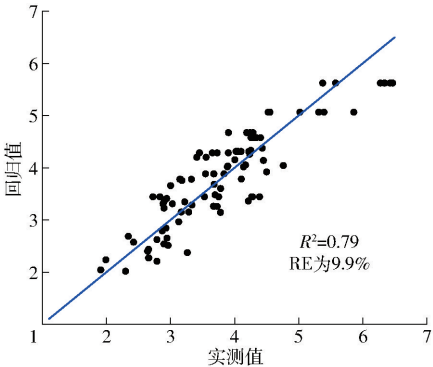


图5 最大叶面积指数实测值与回归值比较
Fig.5 Comparison of measured and calculated results of maximum leaf area index

2.4 棉花最大叶面积指数与籽棉产量的关系

适宜的叶面积指数或者在一定范围内适当增大作物叶面积指数是作物获得较高产量的重要方式^[88],而且叶面积指数与作物生物量和产量存在显著的线性相关。较高的产量需要叶片保持持久的光合活性^[89]。适当的增加叶片数和叶面积,加速光反应,从而促进干物质的形成和积累,增加产量。利用收集的全国各地区 201 组棉花的最大叶面积指数与其籽棉产量的数据,将最大叶面积指数以 1~2、2~3、3~4、4~5、5~6、6~7 共 6 个区间进行划分,并对每个区间最大叶面积指数及对应的籽棉产量求取平均值,建立二者之间的函数关系,结果如图 6 所示。从图中可以看出,棉花的叶面积指数与产量呈现明显的二次回归函数关系,叶面积指数的增大并不会使棉花产量呈现连续增加,因此合理控制棉花叶片生长,优化棉花植株营养生长与生殖生长,对于促使棉花高产具有重要意义。棉花最大叶面积指数

与籽棉产量的函数关系为

$$Y = -378.81LAI_{\max}^2 + 3\,738.9LAI_{\max} - 3\,159.6$$

(9)

式中 Y ——棉花籽棉产量,kg/hm²

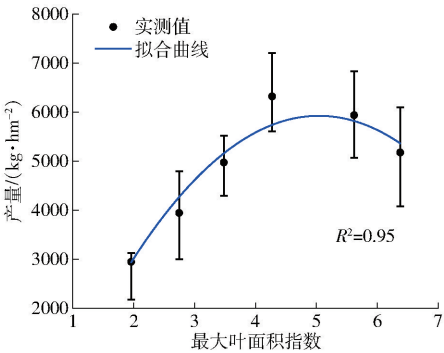


图6 棉花最大叶面积指数与籽棉产量的拟合曲线
Fig.6 Fitting curve of cotton maximum leaf area index and seed cotton yield

对式(9)求一阶导函数并令该导函数等于 0,得到棉花整个生育期的最大叶面积指数为 4.93 时,最大产量为 6 066.24 kg/hm²。将表 2 中的产量验证数据,代入式(8)计算得到棉花最大叶面积指数,然后利用式(9)计算棉花籽棉产量,并与实测值进行比较,结果如图 7 所示。其中 R^2 为 0.62,相对误差 (RE) 为 5.3%,说明综合考虑灌水量、施肥量和种植密度可以用来分析棉花最大叶面积指数和产量变化特征。

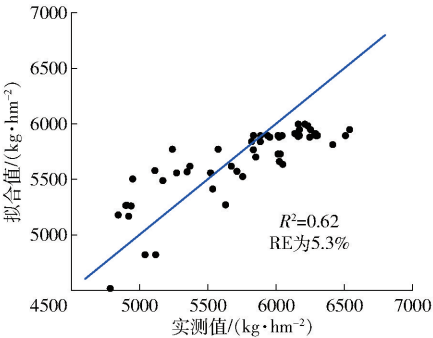


图7 棉花籽棉产量实测值与模拟结果比较
Fig.7 Comparison of actual measured and simulated results of seed cotton yield

3 讨论

叶片作为作物进行光合作用的主要器官,对作物产量与品质的形成有着密不可分的关系,在一定范围内,作物产量随叶面积指数增大而提高。当叶面积增加到一定程度后,叶片相互遮蔽,光照不足,光合效率减弱,产量反而下降,因此对作物叶面积变化情况的模拟分析对预测作物产量有着重要作用^[90]。对于叶面积指数可利用多种模型进行分析,其中王信理^[91]提出的修正 Logistic 模型应

用最为广泛。有效积温消除了对作物生长和发育没有影响的无效温度,将有效积温作为自变量对作物叶面积指数的变化过程进行分析,可以更客观、更准确地反映温度对于作物生长变化的影响。但不同地区棉花的生长受到不同水肥施用量、种植品种、种植时间和覆膜等因素影响,有必要采用特定的方法来消除这些因素的影响,进而建立全国棉花更易于推广和普及的统一的棉花叶面积指数生长模型。

目前国际上应用较为广泛的作物模型在作物生长模拟过程中需要较多的参数,而且不同地区、气候条件下需要确定不同的参数值,使得模型的使用变得复杂。现有研究中也有不少的学者通过有效积温或积温来建立作物生长的 Logistic 模型,其中孔德胤等^[92]利用试验数据分别将积温和标准化积温作为自变量构建了玉米相对叶面积指数动态普适模型;王全九等^[15-16]通过有效积温,建立了马铃薯和水稻的生长模型;李书钦等^[93]、王贺垒等^[94]、王贺等^[95]也分别利用有效积温为自变量建立了冬小麦、茄子和夏玉米的作物生长模型。申孝军等^[96]根据历史气象资料和两年的大田膜下滴灌试验数据建立了基于积温的作物系数计算模型。郭仁松等^[97]确立了深松条件下灌溉频次对棉花总干物质的 Logistic 模型及特征值的影响。但这些研究中有关 Logistic 模型的建立大多都具有气候条件和土壤条件的局限性,而且没有考虑灌溉、施肥、田间管理措施以及作物品种等因素对作物生长特征的影响。本研究综合考虑了耗水量、施氮量和种植密度的影响,基于相对有效积温建立了统一的棉花相对叶面积指数的 Logistic 模型。在建模时考虑到不同品种和不同种植措施下棉花生长发育过程相似,对叶面积指数采用归一化处理,即收集的每组试验数据都化作相对值,以此来消除不同品种、种植措施和土壤因素等的影响,从而统一分析棉花生长特征的变化规律。但从图 1 可以看出,未能完全消除品种和种植措施等对作物生长特征的影响,仍存在相对值偏高或偏低的情况。

而采用相对化的方法可以大幅度弱化不同地区、品种、种植时间和覆膜等对作物生长指标的影响,进而建立一个全国范围内统一的棉花生长模型。利用耗水量、施氮量和种植密度与最大叶面积指数建立初步的定量关系,又考虑到实际应用和精度问题,量化了全生育期灌水量、施氮量和种植密度 3 个主要影响因素,以此来预测棉花最大叶面积指数和产量。由于作物品种、田间管理措施、气候和土壤条件等不同,导致用全生育期灌水量、施氮量和种植密度三者耦合来预测棉花最大叶面积指数和产量时误差相对较大。今后应进一步扩大数据量,扩展数据收集地区,注重田间管理措施、气候和土壤条件等对于作物生长的影响,以提高作物产量的预测精度,为农业生产效率提供有效预测分析方法。

4 结论

- (1)覆膜棉花叶面积指数最大时的有效积温为 1 400℃左右,不覆膜棉花的叶面积指数最大时的有效积温为 1 600℃左右。
- (2)在相对化修正 Logistic 模型中,不同的耗水量、施氮量和种植密度下覆膜与不覆膜棉花的相对叶面积指数模型拟合后相应的参数基本相近。
- (3)建立了全国范围内覆膜与不覆膜棉花统一的相对叶面积指数的 Logistic 模型。
- (4)棉花最大叶面积指数随耗水量、施氮量均呈现出先增后减变化趋势,而棉花种植密度与棉花最大叶面积指数之间表现出明显的正相关性。当耗水量为 568 mm 时,相应的最大叶面积指数最大值为 4.42;施氮量为 350 kg/hm²时,相应的最大叶面积指数最大值为 4.22。
- (5)通过全生育期灌水量、施氮量和种植密度可以综合分析棉花的最大叶面积指数,并以此来预测棉花籽棉产量。棉花的籽棉产量随着最大叶面积指数的变化呈现出明显的先增后减的变化趋势。当最大叶面积指数为 4.93 时,籽棉产量最大可达 6 066.2 kg/hm²。

参 考 文 献

[1] LI N, LIN H, WANG T, et al. Impact of climate change on cotton growth and yields in Xinjiang, China[J]. Field Crops Research, 2020, 247: 107590.

[2] 张立祯,曹卫星,张思平,等. 基于生理发育时间的棉花生育期模拟模型[J]. 棉花学报, 2003,15(2): 97-103.

ZHANG Lizhen, CAO Weixing, ZHANG Siping, et al. Simulation model for cotton development stages based on physiological development time[J]. Cotton Science, 2003,15(2): 97-103. (in Chinese)

[3] 谭艳梅,毛炜峰,李新建,等. 新疆主要棉花产区年积温预测模型研究[J]. 干旱区研究, 2005(2): 259-263.

[4] 周娟,姜爽,陈兵林,等. 棉花茎枝叶形态模型研究[J]. 棉花学报, 2009, 21(3): 206-211,217.

ZHOU Juan, JIANG Shuang, CHEN Binglin, et al. Study of morphologic model of stem, branch and leaf in cotton[J]. Cotton Science, 2009, 21(3): 206-211,217. (in Chinese)

- [5] 周娟,周治国,陈兵林,等. 基于形态模型的棉花(*Gossypium hirsutum* L.)虚拟生长系统研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3843–3851.
ZHOU Juan, ZHOU Zhiguo, CHEN Binglin, et al. Morphogenesis model-based virtual growth system of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(11): 3843–3851. (in Chinese)
- [6] SU L, WANG Q, WANG C, et al. Simulation models of leaf area index and yield for cotton grown with different soil conditioners[J]. PLoS One, 2015, 10(11): e0141835.
- [7] 于强,傅抱璞,姚克敏. 水稻叶面积指数的普适增长模型[J]. 中国农业气象, 1995(2): 6–8.
- [8] 涂修亮,胡秉民,程功煌,等. 小麦叶面积指数变化的模拟[J]. 作物研究, 1999(1): 14–15.
- [9] 李向岭,赵明,李从锋,等. 玉米叶面积系数动态特征及其积温模型的建立[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 321–330.
LI Xiangling, ZHAO Ming, LI Congfeng, et al. Dynamic characteristics of leaf area index in maize and its model establishment based on accumulated temperature[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(2): 321–330. (in Chinese)
- [10] KALTORRES W, KERR P S, USUDA H, et al. Diurnal changes in maize leaf photosynthesis I. Carbon exchange rate, assimilate export rate, and enzyme activities[J]. Plant Physiology, 1987, 83(2): 283–288.
- [11] MADDONNI G A, OTEGUI M E, CIRILO A G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation[J]. Field Crops Research, 2001, 71(3): 183–193.
- [12] MCMASTER G S, WILHELM W. Growing degree-days: one equation, two interpretations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87(4): 291–300.
- [13] 吴启侠,朱建强,杨威,等. 花铃期高温受涝对棉花的交互效应及排水指标确定[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 98–104.
WU Qixia, ZHU Jianqiang, YANG Wei, et al. Response of cotton to interaction of waterlogging and high temperature during flowering and boll-forming stage and determination of drainage index[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 98–104. (in Chinese)
- [14] 顾雅文. 新疆棉花生长的气候条件分析[J]. 现代农业科技, 2016(2): 255.
- [15] 苏李君,刘云鹤,王全九. 基于有效积温的中国水稻生长模型的构建[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 162–174.
SU Lijun, LIU Yunhe, WANG Quanjiu. Rice growth model in China based on growing degree days[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 162–174. (in Chinese)
- [16] 王全九,蔺树栋,苏李君. 马铃薯主要生长指标对有效积温响应的定量分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 306–316.
WANG Quanjiu, LIN Shudong, SU Lijun. Quantitative analysis of response of potato main growth index to growing degree days [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 306–316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200335&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.035. (in Chinese)
- [17] 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.
SHEN Xiaojun, ZHANG Jiyang, LIU Zugui, et al. Effects of different water treatments on yield and water use efficiency of cotton with drip irrigation under film mulch[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 118–124. (in Chinese)
- [18] 李雨,孟亚利,宋为超,等. 氮素对棉花果枝、果节及蕾铃发生与脱落影响的模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(增刊1): 73–81.
LI Yu, MENG Yali, SONG Weichao, et al. Simulating nitrogen effects on fruit branch, fruit site, square and boll formation and abscission in cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(Supp.1): 73–81. (in Chinese)
- [19] 戴茂华,吴振良,刘丽英,等. 种植密度对棉花生育动态、产量和品质的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(增刊1): 146–154.
DAI Maohua, WU Zhenliang, LIU Liying, et al. Influence of planting density on development, yield and quality of upland cotton[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(Supp.1): 146–154. (in Chinese)
- [20] 李鹏程,董合林,刘爱忠,等. 种植密度氮肥互作对棉花产量及氮素利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 122–130.
LI Pengcheng, DONG Helin, LIU Aizhong, et al. Effects of planting density and nitrogen fertilizer interaction on yield and nitrogen use efficiency of cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 122–130. (in Chinese)
- [21] 雷亚平,韩迎春,杨北方,等. 利用无人机数字图像监测不同棉花品种叶面积指数[J]. 中国棉花, 2018, 45(12): 9–15.
LEI Yaping, HAN Yingchun, YANG Beifang, et al. Monitoring of leaf area index of different cotton varieties using UAV-acquired digital images[J]. China Cotton, 2018, 45(12): 9–15. (in Chinese)
- [22] 周桂生,封超年,周青,等. 不同栽培方式对高品质棉花生长发育·产量和纤维品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2006(1): 62–64.
ZHOU Guisheng, FENG Chaonian, ZHOU Qing, et al. Effects of different cultivation methods on cotton growth, lint yield and fiber quality[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006(1): 62–64. (in Chinese)
- [23] 刘战东,段爱旺,高阳,等. 河南新乡地区冬小麦叶面积指数的动态模型研究[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(4): 680–685.
LIU Zhandong, DUAN Aiwang, GAO Yang, et al. Study on dynamic model of leaf area index (LAI) for winter wheat in Xinxiang area[J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(4): 680–685. (in Chinese)
- [24] 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.
WANG Le, WU Yanghuan, LI Jie, et al. Dynamic changes and simulation model of plant height of cotton[J]. Xinjiang

- Agricultural Sciences, 2017, 54(3): 393–402. (in Chinese)
- [25] 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.
WANG Jun, LI Jiusheng, GUAN Hongjie. Modeling response of cotton yield and water productivity to irrigation amount under mulched drip irrigation in North Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 62–68. (in Chinese)
- [26] 申孝军. 棉花滴灌节水机理与优质高效灌溉模式[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
SHEN Xiaojun. Water-saving mechanism and optimal irrigation pattern for effective water use and high-quality of cotton under drip irrigation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese)
- [27] 李冬旺, 张永江, 刘连涛, 等. 干旱胁迫对棉花冠层光合、光谱和荧光的影响[J]. 棉花学报, 2018, 30(3): 242–251.
LI Dongwang, ZHANG Yongjiang, LIU Liantao, et al. Responses of canopy photosynthesis, spectral indices and solar-induced chlorophyll fluorescence in cotton under drought stress[J]. Cotton Science, 2018, 30(3): 242–251. (in Chinese)
- [28] 徐瑞博, 孙红春, 刘连涛, 等. 灌溉模式对冀南植棉区棉花干物质积累分配、产量和水分利用效率的影响[J]. 棉花学报, 2018, 30(5): 386–394.
XU Ruibo, SUN Hongchun, LIU Liantao, et al. Effect of irrigation patterns on accumulation and distribution of dry matter, yield and water use efficiency of cotton in Southern Hebei[J]. Cotton Science, 2018, 30(5): 386–394. (in Chinese)
- [29] 肖俊夫, 刘祖贵, 俞希根, 等. 滴灌条件下不同供水模式对棉花产量及品质的影响[J]. 棉花学报, 2000, 12(4): 194–197.
XIAO Junfu, LIU Zugui, YU Xigen, et al. Effects of different water application on lint yield and fiber quality of cotton under drip irrigation[J]. Cotton Science, 2000, 12(4): 194–197. (in Chinese)
- [30] 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.
WANG Feng, SUN Jingsheng, LIU Zugui, et al. Effects of irrigation scheduling on growth, yield and fiber quality of cotton under mechanical harvest cropping mode[J]. Cotton Science, 2014, 26(1): 41–48. (in Chinese)
- [31] 王冀川, 高山, 徐雅丽, 等. 滴灌水量对杂交棉“兆丰 1 号”光合性能及产量结构的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 7–12, 17.
WANG Jichuan, GAO Shan, XU Yali, et al. Effects of irrigation schedule on photosynthetic characteristic and yield components in hybrid cotton Zhaofeng 1[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(3): 7–12, 17. (in Chinese)
- [32] 姚宝林. 南疆免冬春灌棉田土壤水热盐时空迁移规律与调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
YAO Baolin. Study on rules and regulation of soil water-heat-salt spatiotemporal transfer under no winter and spring irrigation cotton field in Southern Xinjiang[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [33] 雷成霞, 申孝军, 郭银. 地下滴灌条件下水分胁迫对棉花生理性状及水分利用率的影响[J]. 节水灌溉, 2020(4): 57–61.
LEI Chengxia, SHEN Xiaojun, GUO Yin. Effects of water stress on physiological characteristics and water use efficiency of cotton under subsurface drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2020(4): 57–61. (in Chinese)
- [34] 翟超, 周和平, 谢富明, 等. 膜下滴灌条件下棉花年际需水量变化试验分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 32–38.
ZHAI Chao, ZHOU Heping, XIE Fuming, et al. Experimental analysis of annual water requirements change of cotton by drip irrigation under film[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(6): 32–38. (in Chinese)
- [35] 王洪博. 南疆无膜滴灌棉田土壤水热盐特征及灌溉模式研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2020.
WANG Hongbo. Study on soil water heat and salt characteristics and irrigation pattern of membrane drip irrigation in Southern Xinjiang[D]. Aral: Tarim University, 2020. (in Chinese)
- [36] 李东伟, 李明思, 周新国, 等. 土壤带状湿润均匀性对膜下滴灌棉花生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 130–137.
LI Dongwei, LI Mingsi, ZHOU Xinguo, et al. Influence of soil banding moisture uniformity on growth and water use efficiency of drip irrigated cotton under mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 130–137. (in Chinese)
- [37] 李莎. 咸水膜下滴灌对土壤水盐运移及棉花生长产量影响的试验研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2011.
LI Sha. Experimental study on the effect of drip irrigation under salt water film on soil water and salt transport and cotton growth and yield[D]. Shihezi: Shihezi University, 2011. (in Chinese)
- [38] 牛玉萍. 有限滴灌下种植密度对棉花产量形成及水分利用效率的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
NIU Yuping. Effect of planting densities on cotton yield formation and water use efficiency under limited drip irrigation[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016. (in Chinese)
- [39] CHEN Z, NIU Y, ZHAO R, et al. The combination of limited irrigation and high plant density optimizes canopy structure and improves the water use efficiency of cotton[J]. Agricultural Water Management, 2019, 218: 139–148.
- [40] 海兴岩. 水分亏缺对滴灌棉花生长及水氮利用的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
HAI Xingyan. Study on effect of water deficit on growth, water and nitrogen utilization of drip irrigation cotton[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018. (in Chinese)
- [41] 丁倩. 磁化微咸水膜下滴灌土壤水盐分布及棉花生长特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
DING Qian. Study on soil water and salt distribution and cotton growth characteristics of drip irrigation under magnetized brackish water[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [42] SHAREEF M, GUI D, ZENG F, et al. Water productivity, growth, and physiological assessment of deficit irrigated cotton on hyperarid desert-oases in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 206(3–4): 1–10.
- [43] 石洪亮, 张巨松, 严青青, 等. 非充分滴灌下施氮量对棉花生长特性、产量及水氮利用率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 129–136.

- SHI Hongliang, ZHANG Jusong, YAN Qingqing, et al. Effects of different nitrogen fertilizer levels on growth, yield, water and nitrogen use efficiency of cotton under non-sufficient drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(4): 129–136. (in Chinese)
- [44] 刘连涛, 孙红春, 张永江, 等. 氮素对棉花群体生理指标的影响[J]. 中国棉花, 2013, 40(4): 9–12.
LIU Liantao, SUN Hongchun, ZHANG Yongjiang, et al. Effects of nitrogen to cotton population physiological indices[J]. China Cotton, 2013, 40(4): 9–12. (in Chinese)
- [45] 王在敏, 汪丙国, 靳孟贵. 棉花膜下滴灌水盐胁迫研究[J]. 地质科技情报, 2013, 32(3): 166–170.
WANG Zaimin, WANG Bingguo, JIN Menggui. Water and salt stress to cotton in the condition of drip irrigation under mulch[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2013, 32(3): 166–170. (in Chinese)
- [46] 姚青青, 杨涛, 马兴旺, 等. 水肥调控策略对膜下滴灌棉花冠层结构和产量的影响[J]. 棉花学报, 2013, 25(1): 73–80.
YAO Qingqing, YANG Tao, MA Xingwang, et al. Effects of water and fertilizer regulation strategies on cotton canopy structure and yield under mulch drip irrigation[J]. Cotton Science, 2013, 25(1): 73–80. (in Chinese)
- [47] 陈勇. 活化微咸水膜下滴灌下施氮量对棉花生长影响的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
CHEN Yong. Experimental study on the effect of nitrogen application rate on cotton growth under drip irrigation under film with activated brackish water[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [48] 唐湘伟. 去电子微咸水膜下滴灌土壤水氮对棉花生长耦合作用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
TANG Xiangwei. Study on cotton growth coupling of water nitrogen in drip irrigation soil under deelectron microbrackish water film [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [49] 李成亮, 黄波, 孙强生, 等. 控释肥用量对棉花生长特性和土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 295–305.
LI Chengliang, HUANG Bo, SUN Qiangsheng, et al. Effects of application rates of controlled release fertilizers on cotton growth and soil fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 295–305. (in Chinese)
- [50] 李景慧, 韩焕勇, 王方永, 等. 膜下滴灌毛管配置对棉花冠层特性及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27(1): 65–70.
LI Jinghui, HAN Huanyong, WANG Fangyong, et al. Effect of capillary configuration on canopy characteristics and cotton yield[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(1): 65–70. (in Chinese)
- [51] YANG C, LUO Y, SUN L, et al. Effect of deficit irrigation on the growth, water use characteristics and yield of cotton in arid Northwest China[J]. Pedosphere, 2015, 25(6): 910–924.
- [52] FENG G, LUO H, ZHANG Y, et al. Relationship between plant canopy characteristics and photosynthetic productivity in diverse cultivars of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. Crop Journal, 2016, 4(6): 499–508.
- [53] 贾彪, 钱瑾, 马富裕. 氮素对膜下滴灌棉花叶面积指数的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 79–87.
JIA Biao, QIAN Jin, MA Fuyu. Simulating effects of nitrogen on leaf area index of cotton under mulched drip irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 79–87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150213&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.013. (in Chinese)
- [54] 徐守振, 杨延龙, 陈民志, 等. 北疆棉区滴水量对化学打顶棉花冠层结构及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(6): 988–997.
XU Shouzheng, YANG Yanlong, CHEN Minzhi, et al. Effect of drip irrigation amount on canopy structure and yield of chemical topping cotton in Northern Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(6): 988–997. (in Chinese)
- [55] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 施氮量对棉花功能叶片生理特性、氮素利用效率及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 81–91.
LI Pengcheng, DONG Helin, LIU Aizhong, et al. Effects of nitrogen application rates on physiological characteristics of functional leaves, nitrogen use efficiency and yield of cotton[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(1): 81–91. (in Chinese)
- [56] 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.
YAN Min, WANG Honghao, WANG Zisheng, et al. Effect of different intercropping patterns on the growth and development of cotton and peanut[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2014(6): 15–18. (in Chinese)
- [57] 谢陈灵, 李瑞莲, 刘爱玉, 等. 栽培模式对棉花干物质生产和产量形成的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(3): 240–243.
XIE Chenling, LI Ruilian, LIU Aiyu, et al. Effects of cultivation patterns on cotton dry matter production and yield formation [J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2018, 44(3): 240–243. (in Chinese)
- [58] WANG R, WAN S, SUN J, et al. Soil salinity, sodicity and cotton yield parameters under different drip irrigation regimes during saline wasteland reclamation[J]. Agricultural Water Management, 2018, 209(9): 20–31.
- [59] ZHANG D, LUO Z, LIU S, et al. Effects of deficit irrigation and plant density on the growth, yield and fiber quality of irrigated cotton[J]. Field Crops Research, 2016, 197: 1–9.
- [60] 张东升, 韩硕, 王旗, 等. 枣棉间作条件下棉花密度对棉花光合特性及产量影响[J]. 棉花学报, 2014, 26(4): 334–341.
ZHANG Dongsheng, HAN Shuo, WANG Qi, et al. Effect of plant density on photosynthesis characters and yield of cotton in the jujube-cotton intercropping systems[J]. Cotton Science, 2014, 26(4): 334–341. (in Chinese)
- [61] 曲海峰, 龚江. 不同种植密度对新陆早51号叶面积指数与透光率的影响研究[J]. 新疆农垦科技, 2016, 39(5): 12–14.
QU Haifeng, GONG Jiang. Effect of different planting densities on area index and transmittance of the 51 [J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2016, 39(5): 12–14. (in Chinese)
- [62] 邓福军, 林海, 宿俊吉, 等. 棉花种植密度与产量形成的关系[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(12): 2191–2196.
DENG Fujun, LIN Hai, SU Junji, et al. Relation of yield forming and planting density in cotton[J]. Xinjiang Agricultural

- Sciences, 2011, 48(12): 2191–2196. (in Chinese)
- [63] 罗宏海, 张旺锋, 赵瑞海, 等. 种植密度对新疆膜下滴灌棉花群体光合速率、冠层结构及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 112–114.
LUO Honghai, ZHANG Wangfeng, ZHAO Ruihai, et al. Effects of planting densities on canopy apparent photosynthesis, canopy structure and yield of cotton drip-irrigated under the mulch in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 112–114. (in Chinese)
- [64] 韩焕勇, 邓福军, 李保成, 等. 种植密度对新疆高产棉花产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2009(4): 98–100.
- [65] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 南疆膜下滴灌棉花不同密度群体初步研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 61–64.
LI Pengcheng, DONG Helin, LIU Aizhong, et al. Preliminary research on various colony densities of cotton with drip irrigation under mulch in South Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(1): 61–64. (in Chinese)
- [66] 吕新, 张伟, 曹连莆. 不同密度对新疆高产棉花冠层结构光合特性和产量形成的影响[J]. 西北农业学报, 2005, 14(1): 142–148.
LÜ Xin, ZHANG Wei, CAO Lianpu. Effect of different density on cotton canopy structure, photosynthesis and yield formation in high-yield cotton of Xinjiang[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2005, 14(1): 142–148. (in Chinese)
- [67] 史伟. 种植密度对棉花干物质累积与分配及产量品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
SHI Wei. Effects of plant densities on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) dry matter accumulation and distribution, yield and fiber quality[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [68] 韩焕勇, 王方永, 陈兵, 等. 不同种植密度下棉花叶面积指数与群体透光率的关系研究[J]. 中国棉花, 2014, 41(7): 14–16.
HAN Huanyong, WANG Fangyong, CHEN Bing, et al. Study on cotton leaf area index and transmittance application of different planting density[J]. China Cotton, 2014, 41(7): 14–16. (in Chinese)
- [69] 安俊波, 王振华, 温新明, 等. 无膜移栽对地下滴灌棉花生理性状及产量影响的试验研究[J]. 节水灌溉, 2008(9): 4–7, 9.
- [70] 马君, 师维军, 郭仁松, 等. 微咸水对滴灌棉花冠层光合特征及产量品质的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(24): 52–56.
MA Jun, SHI Weijun, GUO Rensong, et al. Saline water: effects on canopy photosynthetic characteristics, yield and quality of cotton under drip irrigation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(24): 52–56. (in Chinese)
- [71] 刘姣娣, 曹卫彬, 马蓉. 棉花叶面积指数的遥感估算模型研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4301–4306.
LIU Jiaodi, CAO Weibin, MA Rong. Study on remote sensing estimation models about LAI of cotton [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(12): 4301–4306. (in Chinese)
- [72] 王军, 关红杰, 李久生. 棉花膜下滴灌二维土壤水与作物生长耦合模拟模型率定与验证[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(增刊1): 343–347.
WANG Jun, GUAN Hongjie, LI Jiusheng. Calibration and validation of two-dimensional soil water transport and crop growth coupling model under mulched drip irrigation for cotton[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(Supp. 1): 343–347. (in Chinese)
- [73] 李富先, 季枫, 杨举芳, 等. 北疆棉花膜下滴灌田间小气候特征性研究[J]. 新疆农业大学学报, 2002, 25(3): 16–19.
LI Fuxian, JI Feng, YANG Jufang, et al. Study on field microclimate characteristics of cotton with drip irrigation under membranes in North Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2002, 25(3): 16–19. (in Chinese)
- [74] LI M, DU Y, ZHANG F, et al. Simulation of cotton growth and soil water content under film-mulched drip irrigation using modified CSM-CROPGRO-cotton model[J]. Agricultural Water Management, 2019, 218(24): 124–138.
- [75] LIANG J, SHI W, HE Z, et al. Effects of poly- γ -glutamic acid on water use efficiency, cotton yield, and fiber quality in the sandy soil of southern Xinjiang, China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 218(4): 48–59.
- [76] 马宗斌, 严根土, 刘桂珍, 等. 氮肥分施比例对黄河滩地棉花叶片生理特性、干物质积累及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1092–1101.
MA Zongbin, YAN Gentu, LIU Guizhen, et al. Effects of split nitrogen fertilization on physiological characteristics of leaves, dry matter accumulation and yield of cotton cultivated in the Yellow River bottomland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(5): 1092–1101. (in Chinese)
- [77] 马宗斌, 严根土, 刘桂珍, 等. 施氮量对黄河滩区棉花叶片生理特性、干物质积累及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 849–857.
MA Zongbin, YAN Gentu, LIU Guizhen, et al. Effects of nitrogen application rates on main physiological characteristics of leaves, dry matter accumulation and yield of cotton cultivated in the Yellow River bottomlands[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(4): 849–857. (in Chinese)
- [78] 焦平金. 淮北平原农田地表径流氮磷流失规律及其模拟研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
JIAO Pingjin. Evaluation of nitrogen and phosphorus losses by surface runoff with experiment and simulation in Huaibei Plain [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese)
- [79] 贾晓昀, 朱继杰, 赵红霞, 等. 棉花新品种冀丰 1982 的高产机理[J]. 河北农业科学, 2019, 23(5): 22–27.
JIA Xiaoyun, ZHU Jijie, ZHAO Hongxia, et al. High yield mechanism of new cotton variety Jifeng 1982[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2019, 23(5): 22–27. (in Chinese)
- [80] 陈四龙, 裴冬, 王振华, 等. 华北平原膜下滴灌棉花水分利用效率及产量对供水方式响应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 30–35.
CHEN Silong, PEI Dong, WANG Zhenhua, et al. Influence of irrigation modes on water consumption and yield of cotton with drip irrigation under plastic mulch in North China Plain [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(6): 30–35.

(in Chinese)

- [81] 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.
YANG Chengxun, ZHANG Wangfeng, XU Shouzheng, et al. Effects of spraying chemical topping agents on canopy structure and canopy photosynthetic production in cotton[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(9): 1672–1684. (in Chinese)
- [82] 司转运, 高阳, 刘浩, 等. 水氮对滴灌夏棉生长特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(6): 19–25.
SI Zhuanyun, GAO Yang, LIU Hao, et al. Effects of water and nitrogen fertilizer on growth characteristics and yield of fertigated-summer cotton[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(6): 19–25. (in Chinese)
- [83] 李建峰, 王聪, 梁福斌, 等. 新疆机采模式下棉花株行距配置对冠层结构指标及产量的影响[J]. 棉花学报, 2017, 29(2): 157–165.
LI Jianfeng, WANG Cong, LIANG Fubin, et al. Row spacing and planting density affect canopy structure and yield in machine-picked cotton in Xinjiang[J]. Cotton Science, 2017, 29(2): 157–165. (in Chinese)
- [84] 刘青春, 千怀遂, 任玉玉, 等. 河南省棉花的温度适宜性及其变化趋势分析[J]. 资源科学, 2004(4): 51–56.
LIU Qingchun, QIAN Huaisui, REN Yuyu, et al. Temperature suitability of cotton and its changes in Henan Province [J]. Resources Science, 2004(4): 51–56. (in Chinese)
- [85] 刘文, 王恩利, 韩湘玲. 棉花生长发育的计算机模拟模型研究初探[J]. 中国农业气象, 1992, 13(6): 10–16.
- [86] 邓忠, 白丹, 翟国亮, 等. 膜下滴灌水氮调控对南疆棉花产量及水氮利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2525–2532.
DENG Zhong, BAI Dan, ZHAI Guoliang, et al. Effects of water and nitrogen regulation on the yield and water and nitrogen use efficiency of cotton in South Xinjiang, Northwest China under plastic mulched drip irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2525–2532. (in Chinese)
- [87] 聂新山, 白云岗, 孟杰. 新疆干旱区覆膜棉花耗水量与产量规律初步研究[J]. 新疆水利, 2009(3): 1–4, 39.
- [88] BOARD J E. Soybean cultivar differences on light interception and leaf area index during seed filling[J]. American Society of Agronomy, 2004, 96(1): 305–310.
- [89] 王玉雯, 郭九信, 孔亚丽, 等. 氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1157–1166.
WANG Yuwen, GUO Jiuxin, KONG Yali, et al. Nitrogen optimize management achieves high grain yield and enhances nitrogen use efficiency of rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1157–1166. (in Chinese)
- [90] HUANG J, TIAN L, LIANG S, et al. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 204: 106–121.
- [91] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程[J]. 农业气象, 1986(1): 14–19.
- [92] 孔德胤, 杨松, 黄淑琴, 等. 河套地区玉米叶面积指数的动态模拟[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3): 281–286.
KONG Deyin, YANG Song, HUANG Shuqin, et al. Dynamic simulation of maize leaf area index in Hetao region[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(3): 281–286. (in Chinese)
- [93] 李书钦, 诸叶平, 刘海龙, 等. 基于有效积温的冬小麦返青后植株三维形态模拟[J]. 中国农业科学, 2017, 50(9): 1594–1605.
LI Shuqin, ZHU Yeping, LIU Hailong, et al. 3D shape simulation of winter wheat after turning green stage based on effective accumulated temperature[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(9): 1594–1605. (in Chinese)
- [94] 王贺全, 韩宪忠, 范凤翠, 等. 基于有效积温的设施茄子营养生长期蒸散量模拟系统[J]. 节水灌溉, 2019(2): 11–17.
WANG Helei, HAN Xianzhong, FAN Fengcui, et al. Dynamic simulation system of eggplant evapotranspiration at vegetative growth stage based on effective accumulated temperature[J]. Water Saving Irrigation, 2019(2): 11–17. (in Chinese)
- [95] 王贺, 自由路, 杨俐苹, 等. 利用有效积温建立夏玉米追肥时期决策模型[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 408–413.
WANG He, BAI Youlu, YANG Liping, et al. A summer maize dressing decision-making model based on effective accumulated temperature[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 408–413. (in Chinese)
- [96] 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.
SHEN Xiaojun, SUN Jingsheng, LI Mingsi, et al. Real-time irrigation forecast of cotton mulched with plastic film under drip irrigation based on meteorological data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2): 443–449. (in Chinese)
- [97] 郭仁松, 陈平, 程强, 等. 深松条件下灌溉频次对棉花水分利用效率及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 17–22.
GUO Rensong, CHEN Ping, CHENG Qiang, et al. Effect of irrigation frequency on water use efficiency and yield of cotton after loosening the deep soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 17–22. (in Chinese)