

氮素对膜下滴灌棉花叶面积指数的影响*

贾彪¹ 钱瑾¹ 马富裕²

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 石河子大学农学院, 石河子 832002)

摘要: 选用北疆2个棉花主栽品种(石杂-2、新陆早-43),通过4个氮(N)素水平的小区试验数据,对全生育期叶面积指数(LAI)和辐热积(TEP)动态变化进行定量分析,并通过归一化处理,利用Curve Expert对其相对叶面积指数(RLAI)和相对辐热积(RTEP)进行动态模拟,得到7个模拟效果较好的模型,其中有理函数模型能够较准确地对棉花LAI的动态变化进行描述,决定系数为0.895。利用5个N素水平的田间试验和3个不同生态点独立的高产田试验对模型进行检验,其置信度为0.169、0.077、0.171,决定系数为0.948、0.964、0.971,一致性系数为0.987、0.991、0.989,相对误差为6.493%、4.371%、7.540%,均方根误差为0.188、0.143、0.227 m²/m²;说明基于RTEP的RLAI动态模型能够准确地反映棉花群体动态变化。不同N素处理下棉花群体LAI特征参数施氮效应的研究结果表明,N施用量对棉花LAI动态具有调控作用,尤其是平均叶面积指数、最大叶面积指数及其二者的比值等重要特征参数对N素反应较为敏感,可作为改善棉花群体叶片光合特性和提高产量的重要指标。

关键词: 棉花 叶面积指数 辐热积 归一化 有理函数模型 氮素调控

中图分类号: S127; S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0079-09

Simulating Effects of Nitrogen on Leaf Area Index of Cotton under Mulched Drip Irrigation

Jia Biao¹ Qian Jin¹ Ma Fuyu²

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832002, China)

Abstract: In order to investigate the dynamic relationship of cotton between leaf area index (LAI) and accumulated total production of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation (TEP), plot experiments were conducted with Shiza2 cultivar and Xinluzao43 cultivar and four nitrogen levels were imposed. The dynamic changes of LAI and TEP of the whole growth period in four nitrogen levels were quantitatively analyzed according to normalization process, and relative LAI (RLAI) and relative TEP (RTEP) were dynamically simulated using the Curve Expert. The results indicated that eight analog models showed a better fitting effect and the rational function model which had strong biological significance and a high determination coefficient ($R^2 = 0.895$) can be more accurate to describe the cotton LAI dynamic correlation than others. The model was checked out with five nitrogen levels from field tests and three different ecological points separated with the high-yield field trials, the verification results showed that the confidence α were 0.169, 0.077, 0.171; determination coefficient R^2 were 0.948, 0.964, 0.971; consistency coefficient CC were 0.987, 0.991, 0.989; relative error RE were 6.493%, 4.371%, 7.540%; root mean square error R_{MSE} were 0.188, 0.143 and 0.227 m²/m². The results indicated that the RLAI dynamic model based RTEP description can accurately reflect the dynamic changes in the cotton groups. Further analysis of the effect of regulation and control of cotton groups LAI

收稿日期: 2013-12-07 修回日期: 2014-01-16

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD41B02)和国家星火计划资助项目(2012GA8910032)

作者简介: 贾彪, 讲师, 主要从事作物水肥管理与精准农业信息化研究, E-mail: jiaobao2008@163.com

通讯作者: 马富裕, 教授, 博士生导师, 主要从事作物水分生理与精准农业信息化研究, E-mail: mfy_agr@shzu.edu.cn

characteristics parameters of different nitrogen levels showed that the nitrogen usage amount affected the whole groups LAI dynamic regulation, especially the mean LAI; maximum LAI and ratio of the two characteristic parameters. It could be important indicators of improving the cotton leaf blade photosynthetic characteristics and the production.

Key words: Cotton Leaf area index Product thermal effectiveness and photosynthetically active radiation Normalized Rational function model Effects of nitrogen

引言

作物生长模拟模型根据作物生长发育的内在规律对作物生长发育、光合生产、器官建成和产量形成等过程的定量化描述,以及对环境和高产栽培技术体系的关系进行动态概括,是辅助设施作物生产环境优化调控和实现作物栽培管理优化与标准化的有力工具^[1]。建立作物生长数学模型,应用信息技术进行定量化的分析和模拟研究,是获取作物生长发育状况的重要手段。

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,叶面积大小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(Leaf area index, LAI)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^[2],直接影响作物对光能的截获^[3],进而影响光合产物的形成^[4-5]。在作物栽培中,常用 LAI 来衡量作物群体的生长状况,并以此作为确定栽培措施的参考指标。理想的 LAI 是培养作物高产合理群体结构的基础^[6],作物生长发育过程中, LAI 动态变化模型是揭示作物产量形成和掌握高产群体调控指标的重要内容^[7]。在已有的作物 LAI 动态变化模型中,利用 Logistic 修正模型、Richards 模型和 Rational Function 模型^[2,5,7-11]等,分别对玉米、水稻等多种粮食作物建立了 LAI 动态变化规律^[2,5,7,11]模拟。上述作物 LAI 模型模拟效果较好,各具特色,有一定的应用与参考价值,但这些模型常采用 LAI 与作物生长发育天数^[5,7]和有效积温^[2,11]等之间的关系建立模型,并未综合运用温、光互作效应的光温指标辐热积(Product of thermal effectiveness and PAR, TEP)来预测作物叶面积的动态变化。研究表明,作物叶片的出生、伸展及 LAI 的变化均受温度和辐射等因子的显著影响^[12],因此,建立辐热积与 LAI 直接的动态模型,可为掌握作物群体发育动态提供理论依据和决策支持。

充足的温、光条件是棉花高产的必要条件,基于棉花生长发育的源库关系,模拟 LAI 动态对定量分析棉花整个生长过程至关重要^[6,12-13]。为进一步探讨温度和辐射对棉花 LAI 的影响,本文借鉴其他

作物 LAI 动态模拟模型的优点,采用辐热积法^[14-15]建立棉花 LAI 模拟模型,量化棉花生长与温、光互作因子间的关系,阐明不同 N 素水平对棉花叶片温、光特性的调控效应,并证明平均叶面积指数以及最大叶面积指数等特征参数对棉花群体发育及产量形成的重要性,明确适宜的 LAI 是棉花产量形成的保障。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验 1 于 2010 和 2011 年在石河子国家农业高新示范园区(44°27'N, 86°01'E)进行。供试品种为石杂-2(SZ-2)和新陆早-43(XLZ-43)。播前以 P₂O₅ 150 kg/hm² 和 K₂O 75 kg/hm² 作为基肥一次性施入,2010 年 4 月 20 日播种,4 月 30 日灌出苗水;2011 年 4 月 16 日播种,4 月 21 日灌出苗水,留苗密度均为 26 万株/hm² 左右;采用膜下滴灌。小区面积 66 m²(20 m × 3.3 m),株距 10 cm,行距为宽窄行配置(10 cm + 66 cm + 10 cm),是适宜机采的种植模式。设置 4 个 N 素处理,即: N0(0 kg/hm², 对照)、N1(150 kg/hm²)、N2(300 kg/hm²)和 N3(450 kg/hm²),氮肥为尿素(含 N 质量分数 46%),完全随机排列各处理重复 3 次,各 N 处理作为追肥随水施入,各小区间用防渗带隔开,独立滴灌,全生育期灌水 11 次,总灌水量 5 400 m³/hm²,其它管理措施与当地高产棉田模式相同。

试验 2 于 2012 年在石河子大学农学院田间试验站(44°20'N, 86°03'E)进行。供试品种为新陆早-43(XLZ-43)与新陆早-48(XLZ-48)。设置了 5 个 N 素处理,即: N0(0 kg/hm², 对照)、N1(120 kg/hm²)、N2(240 kg/hm²)、N3(360 kg/hm²)和 N4(480 kg/hm²),氮肥为尿素(含 N 质量分数 46%),采用膜下滴灌,于 4 月 16 日进行膜上点播,4 月 21 日灌出苗水。小区面积 57 m²(10 m × 5.7 m),其他管理措施同试验 1。

试验 3 于 2012 年进行,在北疆高产棉区选择有代表性的 3 块田地,分别为新疆生产建设兵团农业建设第六师 105 团 2 连 9 号地、第八师 149 团 5 连 3 号地和 150 团 19 连 6 号地。供试品种分别为新陆早-48、标杂-A₁(BZ-A₁)和中垦-71(ZK-71),采

用膜下滴灌, 株行距配置同试验 1, 留苗密度均为 24 万株/hm², 全生育期灌水 5 400 m³/hm², 施 N 肥 375 kg/hm², P₂O₅ 150 kg/hm² 和 K₂O 75 kg/hm²。氮肥为尿素(含 N 质量分数 46%)、磷肥为重过磷酸钙(含 P₂O₅ 质量分数 46%)、钾肥为氯化钾(含 K₂O 质

量分数 50%)。其他管理措施同试验 1、2。

本研究利用试验 1 的数据建立模型, 利用试验 2 和试验 3 的数据对模型进行检验。各试验地土壤质地为壤质灰漠土, 土壤地力中等。各试验地土壤营养状况如表 1 所示。

表 1 各试验地土壤养分状况
Tab.1 Soil nutrient at experimental fields

| 项目 | 试验地点 | 年份 | 有机质质量比 /(mg·kg ⁻¹) | 速效氮质量比 /(mg·kg ⁻¹) | 速效磷质量比 /(mg·kg ⁻¹) | 速效钾质量比 /(mg·kg ⁻¹) | 容重/(g·cm ⁻³) | pH 值 |
|------|-------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------|
| 试验 1 | 示范园区 | 2010 | 29.63 ± 1.02 | 37.91 ± 1.07 | 19.83 ± 3.24 | 518.25 ± 50.31 | 1.28 ± 0.12 | 7.6 ± 0.19 |
| | | 2011 | 25.46 ± 0.82 | 39.72 ± 1.32 | 21.16 ± 3.20 | 533.01 ± 42.58 | 1.28 ± 0.12 | 7.8 ± 0.27 |
| 试验 2 | 试验站 | 2012 | 16.29 ± 0.97 | 42.35 ± 1.49 | 35.80 ± 1.26 | 219.02 ± 34.25 | 1.22 ± 0.09 | 7.1 ± 0.21 |
| | | 105 团 | 26.35 ± 1.04 | 38.72 ± 1.13 | 22.13 ± 2.05 | 313.42 ± 41.22 | 1.27 ± 0.11 | 7.7 ± 0.19 |
| 试验 3 | 149 团 | 2012 | 16.62 ± 1.33 | 42.75 ± 1.45 | 20.98 ± 2.40 | 232.54 ± 14.20 | 1.30 ± 0.07 | 7.5 ± 0.14 |
| | | 150 团 | 15.27 ± 1.21 | 44.68 ± 1.16 | 19.67 ± 2.19 | 219.42 ± 32.44 | 1.34 ± 0.13 | 7.5 ± 0.24 |

1.2 测定项目与方法

1.2.1 叶面积测量

试验 1 于苗期每小区选取生长一致的棉株 60 株作为标准株, 挂牌标记, 作为采样参照。2010 年取样分别在蕾期(06-15)、花铃期(07-18、08-01、08-13)、吐絮期(08-28、09-11)进行。2011 年取样分别在蕾期(06-14)、花铃期(07-19、08-03、08-15)、吐絮期(08-25、09-07)进行, 各处理取样 9 株。试验 2 于苗期每小区选取生长一致的棉株 80 株作为标准株, 挂牌标记。取样分别在蕾期(06-17、07-01)、花铃期(07-12、07-25、08-06、08-17)、吐絮期(08-28、09-08)进行, 各处理取样 9 株。试验 3 在各高产棉田选 3 个样点取生长一致的棉株 30 株, 较试验 2 推后 1 d 采样。采用 LI-3100C 数字叶面积仪(LI-Cor, USA)测定单株棉花叶面积(LA), 然后计算叶面积指数(LAI)。

1.2.2 气象数据采集

试验 1 和试验 2 气象数据由石河子气象局气象观测站提供, 该站与石河子大学农学院田间试验站的直线距离为 500 m, 自动监测棉花整个生育期内每日太阳总辐射(Q)和温度(T), 测定时间步长为 1 h; 试验 3 高产田气象数据由各团场当地气象局提供。

1.2.3 辐热积计算

本研究采用辐热积法^[14-15]模拟和量化棉花群体叶面积指数的动态关系。首先计算每 1 h 的相对热效应(RTE), 然后将每 1 h 相对热效应乘以相应 1 h 内的总光合有效辐射(PAR)即可得到每 1 h 辐热积 HTEP(Hourly production of thermal effectiveness and PAR)。将 1 d 内各时段辐热累积即为日总辐热积 DTEP(Daily total production of thermal

effectiveness and PAR)。某生育阶段的累计辐热积 TEP(Accumulated total production of thermal effectiveness and PAR)为该阶段日总辐热积之和。辐热积定义为在日长、光合有效辐射和温度均最适的条件下, 棉花完成某发育阶段所需的累积辐热积。可按式(1)~(5)计算

$$RTE = \begin{cases} 0 & (T \leq T_b) \\ (T - T_b)/(T_o - T_b) & (T_b < T < T_o) \\ 1 & (T = T_o) \\ (T_m - T)/(T_m - T_o) & (T_o < T < T_m) \\ 0 & (T \geq T_m) \end{cases} \quad (1)$$

$$PAR = Q\eta_Q \quad (2)$$

$$HTEP = \begin{cases} RTE \cdot PAR \times 10^{-6} & (PAR > 0) \\ RTE & (PAR = 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$DTEP = \sum_{j=1}^{24} HTEP \quad (4)$$

$$TEP_{i+1} = TEP_i + DTEP_{i+1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中 T_o ——生长最适温度, °C

T_b ——生长下限温度, °C

T_m ——生长上限温度, °C

T ——每 1 h 的平均温度, °C

Q ——1 h 内太阳总辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

η_Q ——PAR 占 Q 的比例, 取值 0.5^[16-17]

PAR——1 h 内总光合有效辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

HTEP——1 h 的辐热积, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

DTEP——1 d 的辐热积, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

TEP_{i+1} —— $i+1$ 天的累积辐热积, mol/m^2

TEP_i —— i 天的累积辐热积, mol/m^2

$DTEP_{i+1}$ ——第 $i+1$ 天的日辐热积, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

棉花各生育时期的生长三基点温度^[18]为: 播种

到出苗 $T_b = 12^\circ\text{C}$, $T_o = 30^\circ\text{C}$, $T_m = 45^\circ\text{C}$; 从出苗后到现蕾、开花、结铃直至吐絮 $T_b = 12^\circ\text{C}$, $T_o = 30^\circ\text{C}$, $T_m = 35^\circ\text{C}$ 。

1.2.4 数据归一化

对 LAI 和 TEP 均采用归一化方法^[2,5,7]处理, 得到从出苗到吐絮期相对叶面积指数和相对辐热积, 其计算式为

$$RLAI_i = LAI_i / LAI_{\max} \quad (0 \leq RLAI_i \leq 1) \quad (6)$$

$$RTEP_i = TEP_i / TEP_{\max} \quad (0 \leq RTEP_i \leq 1) \quad (7)$$

式中 $RLAI_i$ ——棉花不同生育期相对叶面积指数

LAI_i ——棉花不同生育期的叶面积指数

LAI_{\max} ——棉花盛花期至盛铃期出现的最大叶面积指数

$RTEP_i$ ——相对辐热积

TEP_{\max} ——棉花整个生育期内累积辐热积

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2010 进行 TEP、LAI 数据计算和归一化处理; 用 SPSS 17.0 进行方差分析、LSD 法做多重比较; 用 Origin Pro 8.5 和 Sigma Plot 10.0 作图。

1.4 模型建立与检验

采用试验 2 和试验 3 获得的棉花 LAI 观测值进行模型检验, 主要采用均方根误差 (R_{MSE}) 对模拟值与实测值之间的符合度进行分析。同时, 本研究还采用相对误差 (RE)、一致性系数 (CC) 和置信度 (α) 对模型进行评价, 并通过 1:1 直线及其回归方

程决定系数 (R^2) 直观展示模拟值与实测值的精确度。 R_{MSE} 值越小模拟结果越好。 CC 和 R^2 值越接近 1, 表示模拟值与观测值的符合度越高, RE 和 α 值越小时, 精确度越高。其模型检验的计算式为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$RE = R_{MSE} / \bar{O}_i \times 100\% \quad (9)$$

$$CC = 1 -$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (10)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 / \bar{O}_i^2 \quad (11)$$

式中 O_i ——实测值

\bar{O}_i ——实测值的平均值

S_i ——模拟值 i ——样本号

n ——样本容量

2 结果与分析

2.1 LAI 动态特征

LAI 动态曲线 (图 1) 表明, N 素显著地影响棉花的生长。2 年测定 LAI 变化结果遵循一个普遍规律, 在整个生育期内随辐热积累量的增大各 N 素处理 LAI 均呈单峰曲线变化, 即前期缓慢增长、中期

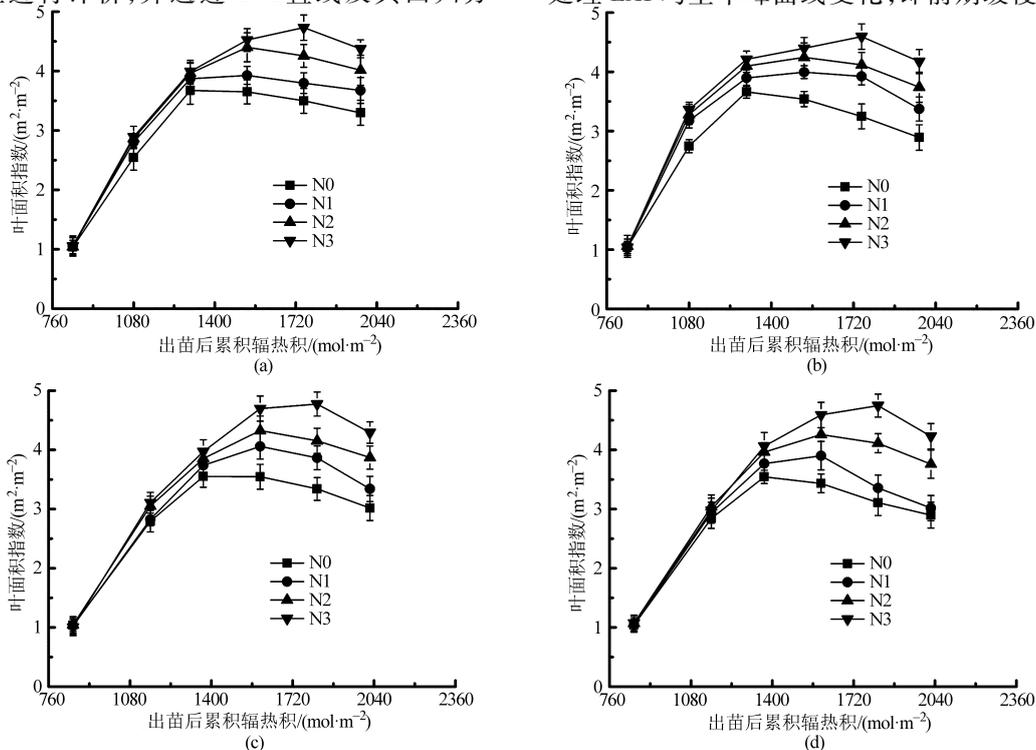


图 1 2010 和 2011 年不同 N 素处理 LAI 随出苗后辐热积的变化

Fig.1 Changes of LAI with accumulated TEP after emergence for two cotton varieties with different nitrogen treatments in 2010 and 2011

(a) 2010 年石杂-2 (b) 2010 年新陆早-43 (c) 2011 年石杂-2 (d) 2011 年新陆早-43

快速增长、后期缓慢下降的偏峰曲线,且各处理间随施氮量的增加,LAI呈逐渐增加趋势。试验结果还表明,N0处理由于氮肥不足,LAI一直处于相对低值,这会在很大程度上影响光合产物的累积;N4处理,因氮肥充足,在生长前期LAI一直处于各处理的极大值,但由于氮肥施用量偏高,导致该处理营养生长期偏长,光合产物传输会受到一定影响;另外,2个品种在不同N素处理下的最大叶面积指数(LAI_{max})及其到达时间不同,基本上在出苗后86~113 d左右,即盛花期至盛铃期达到最大值。这段时

间辐射积达到1464~1926 mol/m²左右,施N量较低相对LAI_{max}出现时间较早,施N量较高LAI_{max}出现时间滞后,但并不一定是施N量越大叶面积指数的峰值就越靠后。

将棉花LAI和出苗后辐射积TEP分别进行归一化处理(图2),得到各N素处理归一后相对叶面积指数(RLAI)与相对辐射积(RTEP)。归一化处理可简化模拟计算过程,能方便快捷地模拟棉花LAI动态。

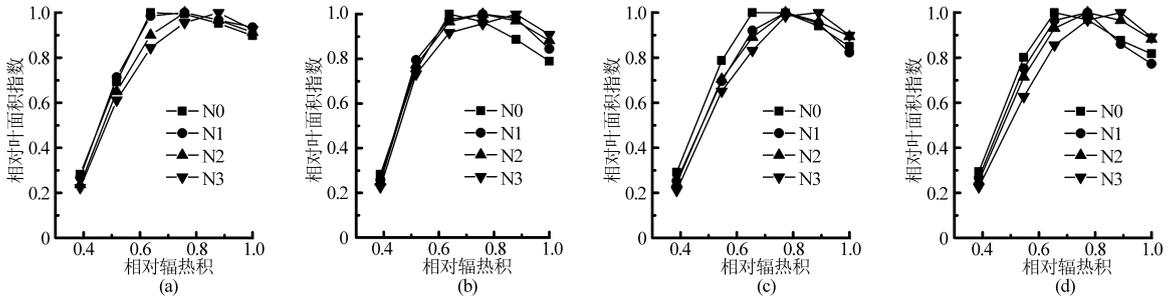


图2 不同氮素处理棉花群体相对LAI随出苗后相对TEP的变化

Fig. 2 Changes of relative LAI in different nitrogen levels for cotton populations with relative TEP after emergence

(a) 2010年石杂-2 (b) 2010年新陆早-43 (c) 2011年石杂-2 (d) 2011年新陆早-43

2.2 棉花RLAI动态优化

将2010年和2011年试验中棉花LAI归一化处理数据利用Curve Expert 1.4软件进行模拟,建立基于RLAI与RTEP的统计模型,得到包括有理方程、余弦函数、二次函数、Richards和Logistic等模拟

效果较好的7个模型(表2)。利用求极限值^[4,7]分析筛选方法,即:当 $x \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow 0$;结果表明,模型2、3、6和7中RTEP值均不能合理解释棉花RLAI动态变化过程;而其余3个模型方程式1、4和5中,当 $x = RTEP = 0$ 时,模型4和5的RLAI不存在。

表2 棉花归一化相对叶面积指数动态共性模型

Tab. 2 Dynamic models of normalized relative LAI in cotton

| 序号 | 模拟方程 | 参数 | | | | 决定系数 R^2 | y值 | | |
|----|----------------------------------|-----------|-------------|----------|---------|---------------|------------------------|----------|---------|
| | | a | b | c | d | | $x \rightarrow \infty$ | $x = 0$ | $x = 1$ |
| 1 | $y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$ | -0.029 7 | 0.446 5 | -2.198 3 | 1.697 8 | 0.895 ** | 0 | a | 0.864 5 |
| 2 | $y = a + b \cos(cx + d)$ | 0.478 5 | 0.511 8 | 4.160 6 | 2.887 9 | 0.863 ** | ∞ | -0.016 9 | 0.847 6 |
| 3 | $y = a + bx + cx^2$ | -2.328 9 | 8.170 9 | -5.007 2 | | 0.844 ** | ∞ | a | 0.909 8 |
| 4 | $y = \exp(a + b/x + c \ln x)$ | 4.592 3 | -4.765 1 | -6.089 7 | | 0.817 ** | 0 | — | 0.888 6 |
| 5 | $y = ab^{1/2} x^c$ | 327.570 1 | 0.002 6 | 4.768 3 | | 0.815 ** | 0 | — | 0.861 7 |
| 6 | $y = a/[1 + \exp(b - cx)]^{1/d}$ | 0.935 4 | 5.355 2 | 12.270 3 | 1.023 8 | 0.787 ** | a | 0.004 9 | 0.934 4 |
| 7 | $y = a/[1 + b \exp(-cx)]$ | 0.931 9 | 6.455.596 5 | 17.887 7 | | 0.783 ** | a | 0.004 7 | 0.934 6 |

注:模型中x和y分别表示相对辐射积RTEP和相对叶面积指数RLAI,**表示0.01显著水平。

在模型1中,当 $x = 0$ 时, $y = a$,即为棉花播种时RLAI值;当 $x = 1$ 时, $y = (a + b)/(1 + c + d)$,即为棉花吐絮时RLAI值,且方程仅有一个峰值。该模型符合棉花的生长规律,因此,选择有理方程作为棉花RLAI动态模拟的优化方程,其模型曲线如图3所示。对应的模型曲线通式为

$$y = (-0.0297 + 0.4465x)/(1 - 2.1983x + 1.6978x^2) \quad (12)$$

通过该方程,利用全生育期的TEP_{max}和LAI_{max}可较好还原出任意RTEP对应的RLAI,及时掌握

LAI的动态变化情况。

2.3 棉花RLAI动态模型关键参数分析

根据图3的结果分析,将试验1各处理RTEP和RLAI分别建立归一化模拟方程(表3)。结果表明,决定系数 $R^2 > 0.783$,说明RLAI动态方程能够对不同棉花品种当季土壤供氮量(施氮肥量+定植时土壤速效氮量)下群体LAI进行动态模拟;将各模拟方程相应系数a、b、c、d值进行比较,结果表明品种间变幅不大,但不同的当季土壤供氮量间,a、b值变幅较小,c、d值变幅较大。由此可见,不同的当

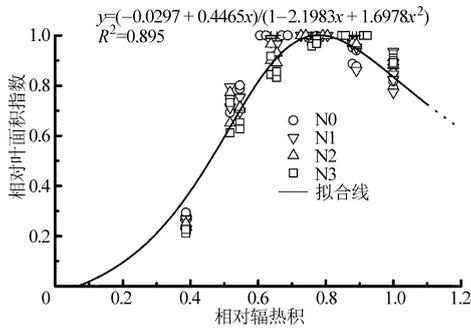


图3 基于有理函数的棉花相对叶面积指数与相对辐射积动态曲线

Fig. 3 Dynamic curve of RLAI and RTEP for cotton based on rational function model

表3 当季土壤供氮量下相对叶面积指数动态优化模型参数

Tab. 3 Parameters of optimal model for relative LAI under available nitrogen in soil during experimental seasons

| 年份 | 品种 | 各处理 | 施氮肥量/ (kg·hm ⁻²) | 定植时土壤速效 氮量/(kg·hm ⁻²) | 当季土壤供氮 量/(kg·hm ⁻²) | 参数 | | | | 决定系数 R ² |
|------|--------|-----|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------|---------|----------|---------|------------------------|
| | | | | | | a | b | c | d | |
| 2010 | SZ-2 | N0 | 0 | 97.04 | 97.04 | -0.098 0 | 0.701 0 | -2.260 2 | 2.007 9 | 0.960 ** |
| | | N1 | 150 | 97.04 | 247.04 | -0.120 3 | 0.778 9 | -1.967 4 | 1.665 7 | 0.957 ** |
| | | N2 | 300 | 97.04 | 397.04 | -0.121 4 | 0.779 4 | -1.974 7 | 1.679 4 | 0.977 ** |
| | | N3 | 450 | 97.04 | 547.04 | -0.076 6 | 0.538 5 | -2.377 6 | 1.986 2 | 0.941 ** |
| | XLZ-43 | N0 | 0 | 97.04 | 97.04 | -0.094 9 | 0.682 4 | -2.192 4 | 1.897 1 | 0.939 ** |
| | | N1 | 150 | 97.04 | 247.04 | -0.095 8 | 0.712 6 | -2.008 4 | 1.680 0 | 0.893 ** |
| | | N2 | 300 | 97.04 | 397.04 | -0.074 2 | 0.590 5 | -1.836 9 | 1.390 2 | 0.944 ** |
| | | N3 | 450 | 97.04 | 547.04 | -0.073 0 | 0.574 6 | -2.042 9 | 1.603 1 | 0.971 ** |
| 2011 | SZ-2 | N0 | 0 | 101.68 | 101.68 | -0.118 7 | 0.798 3 | -2.143 5 | 1.931 6 | 0.951 ** |
| | | N1 | 150 | 101.68 | 251.68 | -0.057 9 | 0.502 4 | -2.168 2 | 1.726 6 | 0.933 ** |
| | | N2 | 300 | 101.68 | 401.68 | -0.098 3 | 0.704 2 | -1.824 2 | 1.477 2 | 0.955 ** |
| | | N3 | 450 | 101.68 | 551.68 | -0.051 8 | 0.478 9 | -2.175 4 | 1.704 3 | 0.973 ** |
| | XLZ-43 | N0 | 0 | 101.68 | 101.68 | -0.113 9 | 0.802 4 | -2.161 1 | 2.000 9 | 0.944 ** |
| | | N1 | 150 | 101.68 | 251.68 | -0.060 0 | 0.521 6 | -2.218 5 | 1.793 4 | 0.950 ** |
| | | N2 | 300 | 101.68 | 401.68 | -0.092 8 | 0.677 4 | -1.927 3 | 1.577 4 | 0.965 ** |
| | | N3 | 450 | 101.68 | 551.68 | -0.077 8 | 0.624 8 | -2.107 9 | 1.737 7 | 0.978 ** |

0.971;一致性系数为0.987、0.999、0.989;相对误差为6.493%、4.371%、7.540%。这些数据充分说

明基于RTEP的RLAI动态模型能够准确地反映棉花群体动态变化。

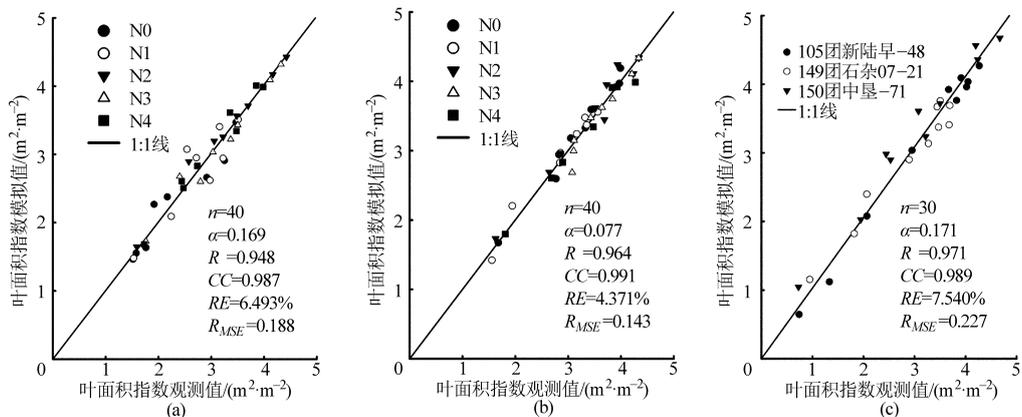


图4 棉花叶面积指数观测值与模拟值的比较

Fig. 4 Comparison of LAI between simulated and observed values of cotton

(a) 2012年新陆早-43 (b) 2012年石杂-2 (c) 2012年3个团场(105团新陆早-48、149团石杂07-21、150团中垦-71)

2.5 相对化 LAI 动态变化特征分析与模型的应用

2.5.1 不同施 N 量与 LAI_{max} 关系

LAI_{max} 是作物群体最大同化能力的标志性指标^[5]。2 个棉花品种 LAI_{max} 与施 N 量水平呈二次正相关回归函数关系, 施 N 量较大的群体 LAI_{max} 相对

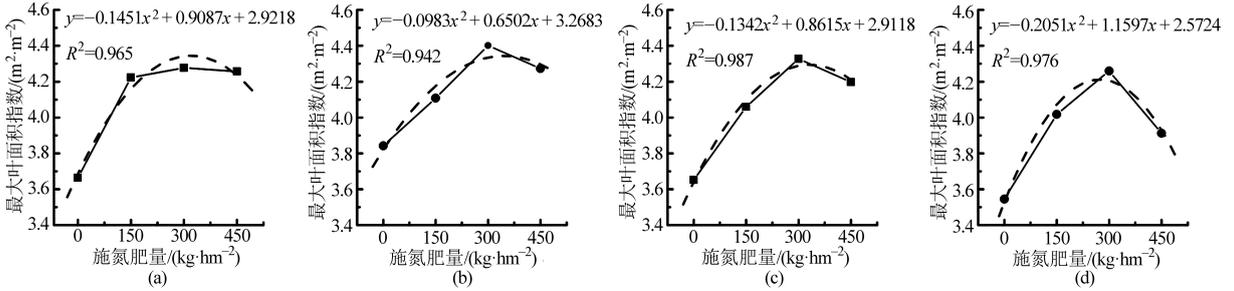


图5 2010 和 2011 年不同 N 素处理棉花群体 LAI_{max} 变化趋势

Fig. 5 Changing trend of maximum LAI under different nitrogen levels for cotton in 2010 and 2011

(a) 2010 年石杂-2 (b) 2010 年新陆早-43 (c) 2011 年石杂-2 (d) 2011 年新陆早-43

2.5.2 不同施 N 量与群体平均 LAI 及其与 LAI_{max} 比值的关系

在不考虑品种间差异的情况下, 将 2010 和 2011 试验中 4 个 N 素处理数据取平均值, 通过棉花群体 RLAI, 参照张宾等的计算方法^[7], 计算不同施 N 量棉花群体平均 LAI (Mean LAI, MLAI)。

由图 6 可以看出, 棉花全生育期 MLAI 及其与 LAI_{max} 的比值均随施 N 量增加变化明显, 其中 MLAI 随施 N 量增加呈二次函数递增趋势 (图 6a); MLAI 与 LAI_{max} 的比值则随施 N 量的增加呈递减趋势 (图 6b)。由此可见, 不同施 N 量对 MLAI 及其与 LAI_{max} 比值的影响相反。这充分说明施 N 量的增加促进了棉花群体全生育期 MLAI 增大, 有利于提高棉花群体生产潜力和产量, 但是与此同时限制了 MLAI 与 LAI_{max} 的比值, 从而限制了对棉花群体最大物质生产潜力的实现, 尤其是过量施 N 肥, 棉株后期营养生长过旺, 田间郁蔽, 通风透光不良, 会加速下部叶片的衰老, 影响叶片的光合作用, 从而影响棉花产量与品质。

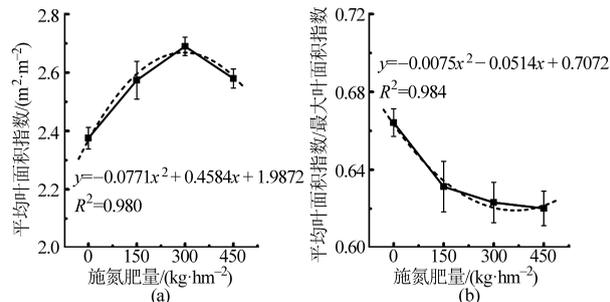


图6 不同 N 素处理棉花群体 MLAI 及其与 LAI_{max} 比率的变化

Fig. 6 Changes of mean LAI (MLAI) and ratio between MLAI and maximum LAI in different nitrogen treatments

较高 (图 5), 说明不同施 N 量对棉花群体最大叶面积指数 LAI_{max} 影响较大。可见 LAI_{max} 是构建棉花群体最大光合潜力的重要措施。但在 TEP 值一定的情况下, 施 N 量不足或过量均会对棉花群体 LAI_{max} 产生较明显的影响。

3 讨论

3.1 棉花 LAI 动态模型特征分析

本研究从不同施 N 量的栽培调控措施与辐热积生态因子的调控这 2 个方面探讨棉花群体 LAI 动态变化及其相互促进与制约关系, 并建立了动态模拟模型。结果表明不同 N 素处理棉花 LAI 随 TEP 的增加而增加, RLAI 符合有理方程通式 $y = (a + bx) / (1 + cx + dx^2)$ 的变化规律, 这充分说明有理方程能很好地解释棉花相对叶面积指数动态变化^[7]。同时, 该模型还具有参数少、计算简便等优点, 模型的建立与应用过程不需要花费较多的人力与财力, 只需知道棉花整个生育期内任一时段的群体叶面积, 便可较为准确地模拟 LAI 的变化动态, 为棉花优质高效高产提供理论依据。

3.2 归一化法和辐热积法在棉花群体 LAI 模型中的应用

在建立模型的过程中, 利用“归一化”^[2,5,7] 方法对棉花群体 LAI 和 TEP 进行归一化处理, 建立 RLAI 动态模型, 消除了量纲, 简化了计算; 在构建棉花 LAI 动态关系时, 考虑 LAI 与 PAR 和 RTE 乘积之间的关系, 即将 TEP 应用于棉花大田试验较传统方法有了新的突破。TEP 和棉花生长过程具有同步性, 考虑温度和太阳辐射对棉花生长的影响, 将 TEP 作为自变量建立棉花 LAI 动态模型能够较准确地计算棉花任一生长阶段的 MLAI 等与光合相关的参数, 能很好地反映叶面积增长过程以及环境条件对模型的影响。

3.3 不同 N 素处理对棉花群体 LAI、MLAI 及其 LAI_{max} 调控效应

LAI 是棉花群体质量的重要量化指标, 直接影

响着棉花群体光合能力和经济产量的形成^[19-21],其动态变化与特征值对于确定棉花高产群体结构具有参考价值。有研究表明,利用 RLAI 动态模型不仅可实现 LAI 的动态模拟,还能估算作物群体光合势和 MLAI 等重要参数;而 MLAI 的增大,可提高平均作物生长率^[7,22],能在一定程度上反映作物群体整个生育期的物质生产状况^[2,22]。本研究表明,不同的施 N 量对棉花整个生育期 LAI 具有明显的调控效应,LAI 随施 N 量增加而增大;但不施 N 和过多施 N 时,LAI 在生育后期下降速度相对较快;全生育期 MLAI 和 LAI_{max} 随施 N 量的增加而增大,而 MLAI/LAI_{max} 则随施 N 量增加而减小。这说明施 N 量提高了棉花群体物质生产水平,但限制了对最大生产潜力的实现。因此,适量施 N 肥,可改善叶片光合能力,延长光能高效利用时间,提高棉花群体光合性能,为棉花高产奠定物质基础,从而保证棉花生育后期形成较多的光合产物。

本研究仅在不同 N 素处理条件下对棉花群体 LAI 与 TEP 之间的关系模型进行初步验证,但棉花叶片生长还受水、肥、密度和播期等栽培措施的影响,以及温度、光合和辐射等生态因子的制约,这种综合因子驱动的信息化生长模型还需要进一步研究与探讨。另外,通过多年试验发现,目前新疆北疆棉

花生产过程存在一个普遍的问题,苗期叶面积过小,棉花长势相对较差;到吐絮期后期为保证收获,必须喷施落叶素对 LAI 进行化学调控,致使 LAI 下降过快,所以应该注重棉花生育进程前期和后期叶面积的调控,苗期以“促”为主,吐絮期以“保”为主^[22],实现棉花生产的高产、优质和高效。

4 结论

(1) 采用 TEP 作为自变量,利用归一化方法建立了棉花群体 RLAI 与 RTEP 的动态模拟模型,并利用试验数据对模型进行检验,结果表明,基于辐热积的棉花叶面积指数模拟模型能很好地预测棉花叶面积的变化过程。

(2) 采用 TEP 不仅改善了棉花叶面积指数的预测指标,而且克服了比叶面积法稳定性差,参数不易获取的缺点和局限性,提高了叶面积指数预测精度。

(3) 探讨不同 N 素处理下棉花群体 LAI 特征参数施氮效应的研究表明,N 施用量对棉花 LAI 动态具有调控作用,尤其 MLAI、LAI_{max} 及其二者的比值等重要特征参数对 N 素反应较为敏感。因此 N 施用量可作为改善棉花群体叶片光合特性和提高产量的重要指标。

参 考 文 献

- 1 王新,刁明,马富裕,等. 滴灌加工番茄叶面积、干物质生产与积累模拟模型[J]. 农业机械学报,2014, 45(2): 137-144.
Wang Xin, Diao Ming, Ma Fuyu, et al. Simulation of leaf area, dry matter production and accumulation of processing tomato with drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 137-144. (in Chinese)
- 2 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)
- 3 Kalt-Torres 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.
- 4 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.
- 5 孙锐,朱平,王志敏,等. 春玉米叶面积系数动态特征的密度效应[J]. 作物学报,2009, 35(6): 1097-1105.
Sun Rui, Zhu Ping, Wang Zhimin, et al. Effect of plant density on dynamic characteristics of leaf area index in development of spring maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(6): 1097-1105. (in Chinese)
- 6 张怀志,曹卫星,周治国,等. 棉花适宜叶面积指数的动态知识模型[J]. 棉花学报,2003, 15(3): 151-154.
Zhang Huaizhi, Cao Weixing, Zhou Zhiguo, et al. A dynamic knowledge model for optimal LAI in cotton[J]. Cotton Science, 2003, 15(3): 151-154. (in Chinese)
- 7 张宾,赵明,董志强,等. 作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验[J]. 作物学报,2007, 33(4): 612-619.
Zhang Bin, Zhao Ming, Dong Zhiqiang, et al. Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population [J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(4): 612-619. (in Chinese)
- 8 Versteeg M N, van Keulen H. Potential crop production prediction by some simple calculation methods as compared with computer simulations[J]. Agricultural Systems, 1986, 19(4): 249-272.
- 9 Marcelis L F M, Gijzen H. A model for prediction of yield and quality of cucumber fruits[J]. Acta Horticulturae, 1998, 476: 237-242.
- 10 Marcelis L F M, Heuvelink E, Goudriaan J. Modeling biomass production and yield of horticultural crops: a review[J]. Scientia Horticulturae, 1998, 74(1-2): 83-111.

- 11 侯玉虹,陈传永,郭志强,等. 春玉米不同产量群体叶面积指数动态特征与生态因子资源量的分配特点[J]. 应用生态学报,2009, 20(1):135-142.
Hou Yuhong, Chen Chuanyong, Guo Zhiqiang, et al. Dynamic characteristics of leaf area index and allocation characteristics of ecological resources for different yielding spring maize populations[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(1):135-142. (in Chinese)
- 12 刁明,戴剑锋,罗卫红,等. 温室甜椒叶面积指数形成模拟模型[J]. 应用生态学报,2008, 19(10):2277-2283.
Diao Ming, Dai Jianfeng, Luo Weihong, et al. Simulation model on the formation of greenhouse sweet pepper leaf area index[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10):2277-2283. (in Chinese)
- 13 张立桢,曹卫星,张思平,等. 棉花形态发生和叶面积指数的模拟模型[J]. 棉花学报,2004,16(2):77-83.
Zhang Lizhen, Cao Weixing, Zhang Siping, et al. A simulation model for morphogenesis and LAI in cotton[J]. Cotton Science, 2004, 16(2):77-83. (in Chinese)
- 14 李永秀,罗卫红,倪纪恒,等. 用辐射积法模拟温室黄瓜个体、光合速率与干物质产量[J]. 农业工程学报,2005, 21(12):131-136.
Li Yongxiu, Luo Weihong, Ni Jiheng, et al. Simulation of leaf area, photosynthetic rate and dry matter production in greenhouse cucumber based on product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12):131-136. (in Chinese)
- 15 倪纪恒,陈学好,陈春宏,等. 用辐射积法模拟温室黄瓜果实生长[J]. 农业工程学报,2009, 25(5):192-196.
Ni Jiheng, Chen Xuehao, Chen Chunhong, et al. Simulation of cucumber fruit growth in greenhouse based on production of thermal effectiveness and photosynthesis active radiation[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5):192-196. (in Chinese)
- 16 Wang Lunche, Gong Wei, Ma Yingying, et al. Photosynthetically active radiation and its relationship with global solar radiation in Central China[J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(6):1265-1277.
- 17 Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1977, 281(980): 277-294.
- 18 马富裕,曹卫星,张立桢,等. 棉花生育时期及蕾铃发生发育模拟模型研究[J]. 应用生态学报,2005,16(4):626-630.
Ma Fuyu, Cao Weixing, Zhang Lizhen, et al. A physiological development time-based simulation model for cotton development stages and square-and boll formation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4):626-630. (in Chinese)
- 19 余渝,陈冠文,林海,等. 北疆棉田叶面积系数变化动态的研究[J]. 棉花学报,2001,13(5):300-303.
Yu Yu, Chen Guanwen, Lin Hai, et al. Research on the change of leaf area index (LAI) in north Xinjiang [J]. Cotton Science, 2001, 13(5):300-303. (in Chinese)
- 20 杨再强,罗卫红,陈发棣,等. 温室标准切花菊叶面积预测模型研究[J]. 中国农业科学,2007, 40(11):2569-2574.
Yang Zaiqiang, Luo Weihong, Chen Fadi, et al. Predicting the leaf area of standard cut chrysanthemum in greenhouse[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11):2569-2574. (in Chinese)
- 21 罗新宁,陈冰,张巨松,等. 南疆地区不同施氮量棉花叶片光合特性及产量表现[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(2):40-44.
Luo Xinning, Chen Bing, Zhang Jusong, et al. Experimental study on water saving technology of pepper under furrow irrigation in ridge culture with full film-covering combined with water-holding agent in arid area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2):40-44. (in Chinese)
- 22 张宾,赵明,董志强,等. 作物产量“三合结构”定量表达及高产分析[J]. 作物学报,2007, 33(10):1674-1681.
Zhang Bin, Zhao Ming, Dong Zhiqiang, et al. “Three combination structure” quantitative expression and high yield analysis in crops[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(10):1674-1681. (in Chinese)