

棉花群体光合生产动态模拟

董尚力¹, 申双和¹, 李秉柏², 徐立华², 张京红¹

(1. 南京气象学院环境科学系, 南京 210044; 2. 江苏省农业科学研究所, 南京 210014)

摘要:以棉花的生物学特性为基础, 充分考虑棉花株型特征, 将棉株分成三层(层距为 1.5 个叶面积指数), 逐层进行光合作用模拟, 并加以综合, 得出棉花群体光合产量。资料验证结果表明, 在水肥等条件适宜的情况下, 本模型能较好地反映棉花光合生产特性, 模拟预测棉花总生物量精度较高, 可用于辅助指导大田生产管理。

关键词:棉花, 光合生产, 动态模拟

中图分类号: S165.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2001)02-0194-05

棉花是重要的经济作物, 其干物质生产 90% 以上来自光合作用; 棉花群体光合生产的状态、光能利用率的高低, 直接决定着棉花生物产量, 而干物质的积累与分配规律, 又影响棉花的经济产量^[1]。目前采用的光合生产机理性模型, 大多是把整个棉株当作一个均匀介质进行模拟^[2, 3], 精度受到一定程度的限制。因此, 有必要进一步分析棉花光合生产模型。本文拟在总结前人经验基础上, 以棉花的生物学特性和株型特征为依据, 扩充棉花的光合生产动态模型, 并用试验资料加以验证, 供讨论参考。

1 资料来源和处理

本研究所用作物数据资料主要来源于田间试验、文献资料和专家咨询。田间试验于 1999 年在江苏省农业科学院内进行, 供试品种为泗棉 3 号, 种植密度为 4.02×10^4 株/hm²; 江苏省农科院李秉柏研究员和经济作物研究所还提供了南京地区 1996、1997 年泗棉 3 号的资料; 同时, 李秉柏研究员提供郑州地区 1989、1994、1995 年中棉 12 号的试验资料。

与作物资料相对应的南京地区全年气象资料(1996, 1997, 1999 年)由江苏省农科院气象站提供; 河南郑州地区全年气象资料(1989, 1994, 1995 年)由李秉柏研究员提供, 包括日平均气温和日照时数。日长和逐日太阳辐射资料, 采用数学模型^[4]的模拟值。

2 模型的建立

2.1 棉花群体冠层光分布

光合作用的过程非常复杂, 它通过一系列光反应和酶促化学反应来完成。到达作物冠层的太阳辐射, 一部分被反射掉, 一部分透过群体漏射到地面, 其余部分被作物吸收(其中一部分用

于光合作用)。

假定群体内叶片分布为一均匀介质(如稻、麦等密植群体基本符合),则透过多层叶片的水平光强服从 Beer-Lambert 定律,即

$$I = I_0 e^{-k I_{LA}} \quad (1)$$

式中, I 表示叶面积指数 I_{LA} 深度处的平均水平光强($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); I_0 表示冠层上方的水平自然光强($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); k 为群体消光系数; I_{LA} 为叶面积指数(m^2/m^2)。

在冠层结构与光合作用的关系中,光分布是一个主要因素。棉花群体不同于稻麦等密植作物,棉花植株高大,群体内叶片分布不均匀,因此,作者认为应分层研究棉花群体内的光分布状况,在每一分层内可以假定叶片分布均匀,从而建立棉花群体内光分布模型如下

$$I_i = I_{i-1} e^{-k_i I_{LA}} \quad (2)$$

式中, I_i 表示第 i 层底部水平光强; k_i 表示第 i 层内叶面积指数为 I_{LA} 深度处的消光系数。

一般情况下,模拟精度随分层数增加而提高;考虑到模型的实际应用,本系统将棉花冠层最多分为3层,即当 $I_{LA} < 1.5$ 时,把植株整体仍当作均匀的1层;当 $1.5 < I_{LA} < 3.0$ 之间时,分为2层;当 $I_{LA} > 3.0$ 时,分为3层。(自上而下 I_{LA} 取值 $0 \sim 1.5$ 为第一层; $1.5 \sim 3.0$ 为第二层; $3.0 \sim I_{LA}$ 为第三层。)

2.2 光合作用模型

在植物生长的适宜温度、水分和正常的 CO_2 浓度条件下,单叶光合作用强度受光强的影响,一般表达式为

$$P = \frac{b P_{\max} Q_{PAR}}{b Q_{PAR} + P_{\max}} \quad (3)$$

式中, $P(CO_2)$ 为叶片光合速率($g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); Q_{PAR} 为光合有效辐射($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), (假设 Q 为总辐射,则 $Q_{PAR} = 0.47Q$); 实验参数 b 表示光强为0时的光合效率; P_{\max} 为叶片最大光合速率。

由于(1)式中 I 为水平光强,而(3)式中 Q_{PAR} 为叶表面光强,所以应该对(1)式进行转换,以导出叶面积深度 I_{LA} 处的平均叶表面光强 $I^{[3]}$,

$$I = k \frac{1-r}{1-m} I_0 e^{-k I_{LA}} \quad (4)$$

式中, r 为叶片反射率; m 为叶片透射率。

用 I 代替 Q , 由(3)式和(4)式得叶面积指数为 I_{LA} 处的光合强度 P 为

$$P = \frac{0.47 k b (1-r) P_{\max} I_0 e^{-k I_{LA}}}{0.47 k b (1-r) I_0 e^{-k I_{LA}} + P_{\max} (1-m)} \quad (5)$$

棉花群体光合总量是单位叶面积光合作用对叶面积指数和日长的二重积分。为了计算群体每天的光合日总量,需用单位时间的辐射量 S (S 等于总辐射量 Q 除以日长 D_L) 代替 I_0 , 经二重积分即可得到群体光合生产日总量 $P_{CD}(CO_2)$ ($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$),

$$P_{CD} = \int_0^{D_L} \int_0^{I_{LA}} P \, dI_{LA} \, dD_L =$$

$$\frac{P_{\max} D_L}{k} \ln \left[\frac{(1-m) P_{\max} + 0.47 k b (1-r) S}{(1-m) P_{\max} + 0.47 k b (1-r) S e^{-k I_{LA}}} \right] \quad (6)$$

考虑到分层影响,具体有如下模拟公式。

(1) 当 $I_{LA} < 1.5$ 时,

$$P_{CD} = \frac{P_{\max} D_L}{k_1} \ln \left[\frac{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_1 b (1-r) I_0}{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_1 b (1-r) I_0 e^{-k_1 I_{LA}}} \right]. \quad (7)$$

(2) 当 $1.5 < I_{LA} < 3$ 时,

$$P_{CD} = \frac{P_{\max} D_L}{k_1} \ln \left[\frac{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_1 b (1-r) I_0}{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_1 b (1-r) I_0 e^{-k_1 I_{LA}^{1.5}}} \right] + \frac{P_{\max} D_L}{k_2} \ln \left[\frac{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_2 b (1-r) I_1}{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_2 b (1-r) I_1 e^{-k_2 (I_{LA} - 1.5)}} \right]. \quad (8)$$

(3) 当 $I_{LA} > 3$ 时,

$$P_{CD} = \frac{P_{\max} D_L}{k_1} \ln \left[\frac{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_1 b (1-r) I_0}{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_1 b (1-r) I_0 e^{-k_1 I_{LA}^{1.5}}} \right] + \frac{P_{\max} D_L}{k_2} \ln \left[\frac{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_2 b (1-r) I_1}{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_2 b (1-r) I_1 e^{-k_2 I_{LA}^{1.5}}} \right] + \frac{P_{\max} D_L}{k_3} \ln \left[\frac{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_3 b (1-r) I_2}{(1-m) P_{\max} + 0.47 k_3 b (1-r) I_2 e^{-k_3 (I_{LA} - 3)}} \right]. \quad (9)$$

式中 k_1, k_2, k_3 分别为第 1 层、第 2 层、第 3 层的消光系数, 它们都是随时、空变化的。据测定^[3], 苗期 k 值在 0.17 ~ 0.19 之间, 从现蕾到吐絮, k 值在 0.5 ~ 0.8 之间变化; 参数 b 为光照强度等于 0 时的光合效率, 本模型取值^[3] 为 $10.56(\text{CO}_2)(\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1})$; 参数 P_{\max} 为光饱和条件下的最大光合速率, 取值^[3] 为 $5(\text{CO}_2)(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$; 透射率 m 取值^[3] 为 0.05; 反射率 r 取值^[3] 为 0.09; 太阳辐射 Q 和日长 D_L 用相关气象资料; 水平光强取^[3] 为 $I_0 = S = Q/D_L, I_1 = I_0 \cdot \exp(-k_1 \cdot 1.5), I_2 = I_1 \cdot \exp(-k_2 \cdot 1.5)$ 。

(7)、(8)、(9) 式即为棉花群体光合作用模型。

2.3 干物质积累

呼吸作用是光合作用的逆过程, 包括光呼吸和暗呼吸。光呼吸是伴随光合作用而产生的一种物理现象, 随温度而变化, 且光呼吸与光合强度的比值是一比较稳定的常数; 暗呼吸又包括两部分, 即生长呼吸和维持呼吸, 其中生长呼吸不受温度影响, 它与棉株增长量成正比, 而维持呼吸与棉株干重成正比, 同时还受温度的影响。

综上所述, 得到棉花干物质的日增长量等于日总光合量减去日呼吸消耗量, 即

$$\frac{dW}{dt} = P_{CD} (1 - R_1) - \frac{dW}{dt} R_2 - W R_3. \quad (10)$$

式中 $\frac{dW}{dt}$ 为棉株干重增量; R_1 为光呼吸系数; R_2 为生长呼吸系数; R_3 为维持呼吸系数; W 为某一时期棉株总干重。

由于棉花群体干物重的 95% 来自光合作用, 另有 5% 来自根系对矿物质的吸收; 考虑到 CO_2 、温度订正因子的影响(假定肥水条件适宜), 且对维持呼吸系数 R_3 进行温度订正; 同时考虑到光合作用物质由 CO_2 向葡萄糖和由葡萄糖向各结构物质的转化, 由此得出群体干物质日增量 ΔW 为

$$\Delta W = \frac{\lambda \beta}{1 - \epsilon} \frac{F_C F_T P_{CD} (1 - R_1) - W [R_3(T_0) Q_{10}^{(T_i - T_0)/10}]}{1 + R_2}. \quad (11)$$

式中 λ 为 CO_2 向葡萄糖的转换系数; β 为葡萄糖向棉株其他各结构物质的转换系数; ϵ 为矿物质等的含量; F_C, F_T 分别为 CO_2 和温度订正因子; $R_3(T_0)$ 为最适温度下的维持呼吸系数; Q_{10} 为维持呼吸的温度系数, T_i 为逐日平均温度; T_0 为光合生产最适温度。

由此而得第 N 天(N 为从出苗到模拟日的时间间隔) 棉花群体干物质积累总量为

$$W(N) = W(0) + \int_1^N \Delta W \quad dN。 \quad (12)$$

式中, $W(0)$ 为出苗时棉株干重。实际计算时, 取^[3] $\lambda = 30/44 = 0.682$; $\beta = 0.675$; $\epsilon = 0.05$; $F_c = 1.21^{[5]}$; $F_T = 1 - 0.003 \cdot (T_i - 30)^2$; $R_1 = 0.285$; $R_3(T_0) = 0.0032$; $Q_{10} = 2.2$; $T_0 = 25$; $R_2 = 0.375$; P_{cd} 为棉花群体冠层日光合产量(CO_2) ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

3 结果分析

利用南京地区 1996 年和 1999 年泗棉 3 号的试验资料, 可分别求得其生育期参数和叶面积指数的相关参数^[6]; 再利用南京地区 1997 年泗棉 3 号的试验资料对本光合作用模型进行验证, 其结果如图 1 所示。群体总干物重实测值与模拟值的相关系数为 0.959, 估计标准误差为 $181.43 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 变异系数为 0.074; 通过了信度 $\alpha = 0.005$ 的基于成对数据的 t 检验, 模拟效果比较理想。

同理, 由郑州地区 1994、1995 年中棉 12 号的试验资料, 可求得其品种参数^[6]; 再用 1989 年资料对本光合作用模型进行验证, 结果如图 2 所示。群体总干物重实测值与模拟值的相关系数为 0.905, 估计标准误差为 $265.8 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 变异系数为 0.105; 通过了信度 $\alpha = 0.005$ 的基于成对数据的 t 检验, 模拟效果尚可。

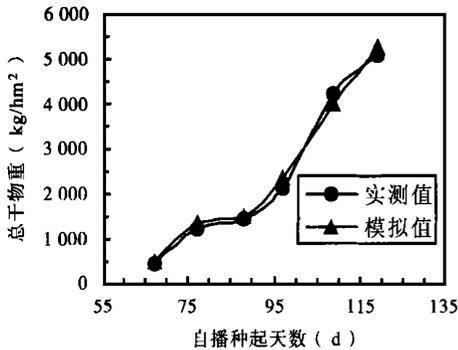


图 1 泗棉 3 号实测总干物重与模拟值的比较

Fig. 1 Comparison between measured total dry matter and simulated for Simian No. 3

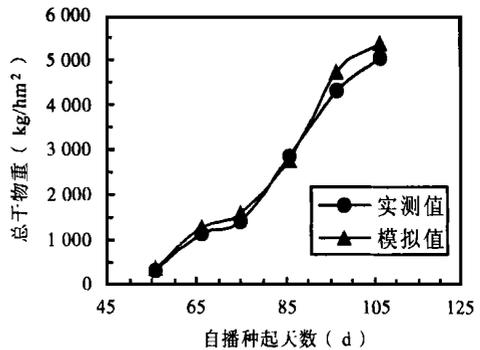


图 2 中棉 12 号实测总干物重与模拟值的比较

Fig. 2 Comparison between measured total dry matter and simulated for Zhongmian No. 12

上述实测资料对模型的验证效果, 表明了本模型在模拟棉花群体光合生产动态方面是可行的。

4 结束语

本文以棉花生物学特性为依据, 按照光合生产的有关理论, 扩充了棉花群体光合生产动态模拟模型, 并通过了田间试验资料的检验, 证明是可行的。模型充分考虑了棉花的株型特征, 具有明确的生物学意义。

用模型模拟的棉花不同生长阶段的总干物重与实测值误差为 $16.2 \sim 436.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 具有较高的精度。

受试验资料和其他条件的限制, 以下两个方面有待今后进一步探讨。1) 本模型假设水肥条件适宜, 倘若将水肥胁迫因素加以考虑, 将会更加完整; 2) 扩大模拟品种的类型, 在更广泛的基础上进行验证, 并可以与干物质分配模型、产量模型等结合起来, 辅助预测棉花最终的籽棉、皮

棉产量,以便更好地指导大田生产实践管理。

参考文献:

- [1] 潘学标, 邓绍华, 蒋国柱, 等. 高产棉花太阳辐射能利用率及干物质分配规律研究[J]. 棉花学报, 1992, 4(增刊): 53 ~ 62
- [2] 吴国伟. 棉花生长发育模拟模型的研究[J]. 生态学报, 1988, 8(3): 201 ~ 210
- [3] 马新明. 棉花蕾铃发育及产量形成的模拟模型(COTMOD): [学位论文][D]. 南京: 南京农业大学, 1996
- [4] 高亮之, 金之庆, 黄 耀, 等. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统(RCSODS)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992
- [5] 金之庆, 葛道阔. 全球气候变化影响我国大豆生产的利弊分析[J]. 大豆科学, 1994, 13(4): 302 ~ 311
- [6] 董尚力. 棉花群体光合生产动态模拟系统: [学位论文][D]. 南京: 南京气象学院环境科学系, 2000

Model modelling for photosynthesis of cotton community

DONG Shangli¹, SHEN Shuanghe¹

LI Bingbai², XU Lihua², ZHANG Jinghong¹

(1. Department of Environmental Science, NIM, Nanjing 210044;

2. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014)

Abstract: Based on biological and plant-shape characteristics of cotton, a model of photosynthetic production of cotton community was modified by dividing the plant into three layers with distance between two neighbouring layers being 1.5 in leaf area index. Photosynthesis was modelled layer by layer and summed up to be total yields. Model test indicates that water and fertilizer being appropriate, it can achieve good results and be useful for field management.

Key words: cotton, photosynthesis, model modelling