

橡胶树光合与干物质积累模拟模型研究

谢贵水^{1,2}, 陈帮乾¹, 王纪坤¹, 吴志祥¹, 黄元仿²

(¹中国热带农业科学院橡胶研究所, 农业部儋州热带农业资源与生态环境重点野外科学观测试验站, 农业部橡胶树生物学重点开放实验室, 海南儋州 571737; ²中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要:作物生长模型是农业数字化技术的核心。橡胶树光合与干物质积累模拟模型的研究将为橡胶树数字化技术的研究与应用奠定基础。采用面向对象的C++为开发语言,以QT前台图形用户界面为开发平台,以SQL Server 2005为后台数据库,在气象资料数据库的支持下,按模块化的思想进行设计,构建了橡胶树光合与干物质积累模拟系统。基于单叶光合速率的光响应模型和冠层光的分布规律,通过积分形式,构建了橡胶树冠层光合作用模拟模型。模型充分量化了光通量密度、温度、叶面积指数、单叶最大光合速率、光合作用特征参数、消光系数、群体反射率等因子对橡胶树冠层光合速率的影响。在分别确定了叶片和木质器官与主要环境因子作用关系的基础上,构建了橡胶树的群体呼吸作用模型。在橡胶树冠层的光合作用模型和群体呼吸作用模型的基础上,整合成橡胶树干物质积累模拟模型。模型经初步检验,结果表明模拟值与观测值吻合度较好,模型不仅具有较强的机理性而且具有较高的预测性和实用性。

关键词:橡胶树;模拟模型;光合作用;干物质积累

中图分类号:s181

文献标志码:A

论文编号:2009-1981

Studies on the Simulation Model of Photosynthesis and Dry Matter Accumulation for Rubber Tree

Xie Guishui^{1,2}, Chen Bangqian¹, Wang Jikun¹, Wu Zhixiang¹, Huang Yuanfang²

(¹Rubber Research Institute; Danzhou Key Field Station of Observation and Research for Tropical Agricultural Resources and Environment, Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Rubber Biology, Ministry of Agriculture; Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Danzhou Hainan 571737;

²College of Resources and Environment, China Agriculture University, Beijing 100094)

Abstract: Crop growth model is the core of digital agriculture. The research of simulation models on rubber tree photosynthesis and dry matter accumulation would be the foundation for the research and application of digital rubber trees. By using object-oriented C++ for the development language, and QT prospects for the development of graphical user interface platform, applying SQL Server 2005 for back-end database supported by the meteorological data in the database, and according to the idea of modular design, the rubber tree photosynthesis and dry matter accumulation simulation system for material accumulation was built. Based on single leaf light response model and the canopy light distribution, rubber tree canopy photosynthesis model was constructed by integral form. In this model, factors that would affect rubber canopy photosynthetic rate were

基金项目:本研究得到科技支撑计划(2006BAD10A01-02)、海南省重点科技计划(070104)、海南省自然科学基金(0807045)、基本科研业务费(XJSYWFZX2008-23)资助。

第一作者简介:谢贵水,男,1967年出生,研究员,博士,从事热带农业生态研究。通信地址:571737 海南省儋州市宝岛新村中国热带农业科学院橡胶研究所, Tel: 0898-23301800, E-mail: xie23300459@sina.com。

通讯作者:黄元仿,男,1968年出生,教授,博导,从事土壤-作物系统模拟研究。

收稿日期:2009-09-25, **修回日期:**2009-11-18。

considered. These factors included the light flux density, temperature, leaf area index, the largest single-leaf photosynthetic rate, photosynthetic characteristic parameters, extinction coefficient, and group reflectivity. Based on the relationship of the respiration rate of leaves and wood organ interact with the environmental factors, the rubber tree respiration model was developed. Based on the canopy photosynthesis model and the respiration model, the dry material accumulation simulation model of rubber tree was constructed. The validation of model for dry matter accumulation with field experiments indicated good fit between the simulated and observed data. Therefore, this model is strong on both mechanism and practicability.

Key words: rubber tree; simulation model; photosynthesis; dry matter accumulation

0 引言

作物的光合作用和干物质积累是作物生长模拟研究的重要组成部分^[1-2]。20世纪60年代以来,随着计算机技术的发展,掀起了作物生长模拟研究的高潮,并相继提出了一系列的光合生产模型。虽然作物生长模拟在许多作物上已经有了比较深入的研究,而且不少研究已进入到较成熟的应用阶段,但这些研究多以一年生作物为研究对象,尤其集中在水稻、小麦、棉花和玉米等几种作物上面^[3-6],而在橡胶树的生长模拟研究方面,目前基本上还是空白。笔者借鉴其它作物在生长模拟方面的研究成果,综合橡胶树光合作用、呼吸作用在不同环境条件下的响应特性,建立兼顾机理性和实用性平衡的橡胶树光合生产与干物质累积动态的模拟模型,进而为实现智能化栽培管理调控及生产潜力评价等奠定基础。

1 资料来源与建模方法

1.1 资料来源

2005—2007年在海南省儋州市中国热带农业科学院试验农场布置了橡胶树叶片光合速率对光强、温度、大气相对湿度的响应试验,橡胶树叶片呼吸速率对温度的响应试验;2005—2008年布置了不同树龄、不同品种、以及一年中不同月份的橡胶树叶面积指数变化试验,同时,以目前在海南省种植面积最大的品种PR107为对象,调查了海南省不同生态类型区的橡胶树叶面积指数。2008—2009年进行橡胶树生物量的测定试验,以PR107品种为材料,选取不同径级的植株,分根、茎、枝、叶实测其鲜重和干重。收集历年的橡胶生产资料,包括橡胶干胶产量、茎围生长等指标。

气象资料来源于中国热带农业科学院气象站,气象资料主要包括日照时数、平均气温、降水量等指标。

1.2 建模方法

1.2.1 系统设计及流程 采用面向对象的C++为开发语言,以QT前台图形用户界面开发平台,以SQL Server 2005为后台数据库,按模块化的思想进行设

计^[7-8],划分为日长模拟、辐射模拟、群体光合模拟、呼吸模拟几大模块,最后整合成橡胶树光合与干物质累积模拟模型(RubberModelSys)。模型不仅可以根据气象数据模拟橡胶干物质积累的实际值,在气象数据缺乏的情况下,也可以根据理论日长为基础数据模拟部分量的纯理论值。

橡胶树光合与干物质累积模拟流程如图1所示:

1.2.2 模型参数提取 橡胶树光合参数的提取,是基于2005—2008年试验数据拟合的单叶光合速率统计模型,提取不同品种、不同生长阶段的光合参数;叶面积指数参数从2005—2008年的试验数据中提取;消光系数参数从2008年测定的叶面积指数与光照强度的试验数据中提取;呼吸作用有关参数从2006年的试验数据拟合的方程中提取。

1.2.3 模型检验 应用中国热带农业科学院试验农场历年的橡胶生产资料对模型进行初步验证。利用0,1回归分析方法对模型的符合度进行统计检验^[1-2]。

2 模型的构建与描述

2.1 光合作用模型

2.1.1 单叶光合作用 目前,在作物光合作用的模拟研究中,采用得比较普遍的模型有负指数型模型^[2]和直角双曲线模型^[1]。橡胶树单叶光合作用模型采用直角双曲线型函数,函数的表述形式为:

$$P = \frac{\alpha \times I \times P_m}{\alpha \times I + P_m} \dots\dots\dots (1)$$

(1)式中, P 是光合速率; I 是光通量密度(即光强); α 是曲线的初始斜率; P_m 是饱和光强时的最大光合作用速率。 α 和 P_m 是单叶光合作用—光反应曲线中的两个重要特征参数。

为方便模型在计算机上的应用,将函数形式作适当转换,用 B/A 代替 P_m ,用 B 代替 α , (1)式就可以转变为:

$$P = \frac{B \times I}{1 + A \times i} \dots\dots\dots (2)$$

(2)式中, A 、 B 是作物光合特性的二个重要参

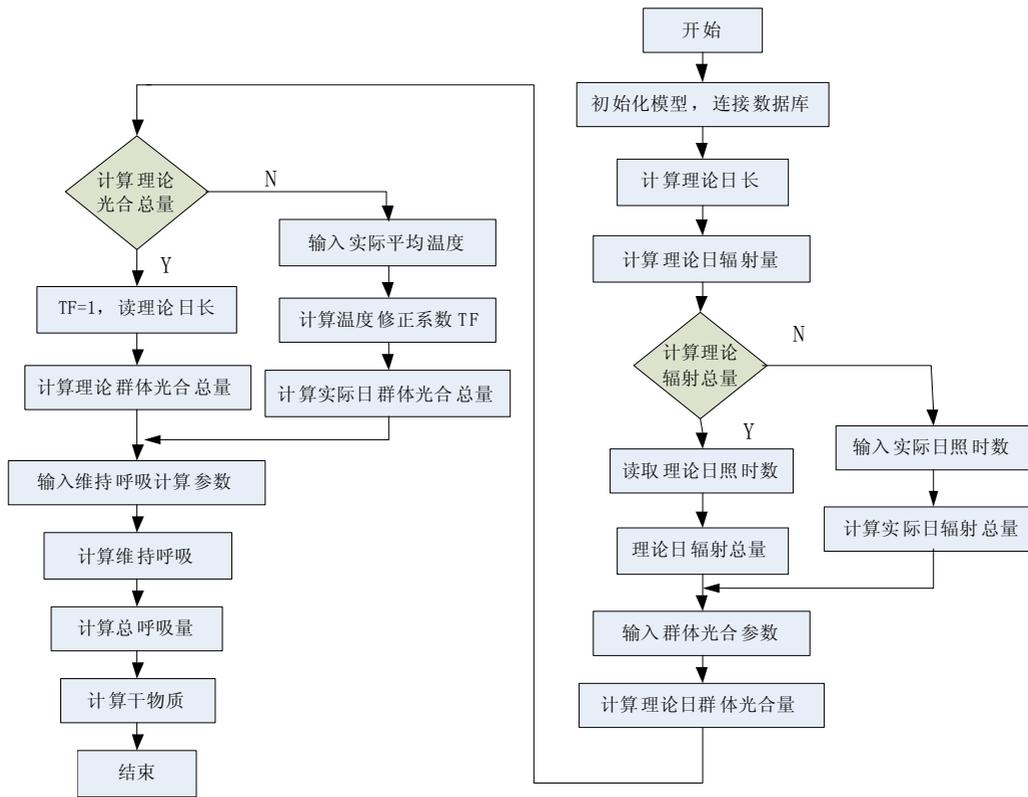


图1 RubberModelSys 流程结构

数。A表示作物光合对光强的敏感度,B表示在弱光条件下,叶片的光合速率随光强而变的斜率。当A不变时,B愈大,光合效率愈大。

2.1.2 冠层有效辐射 太阳辐射通过橡胶树冠层内随机分布的叶片,经过层层截留、吸收、反射,冠层内光的垂直分布是不均匀的。群体内光分布影响群体下层叶片的光合作用,直接影响到群体的光能利用率^[9]。

根据 Beer-Lambert 定律,植物群体中不同高度的光强分布符合以下规律:

$$PD_i = \int_0^{LAI} TF * \frac{B * PAR}{1 + A * PAR} d(LAI) * Di = Di * TF \int_0^{LAI} \frac{B * 0.47(1 - a * Qi * \exp(-K * LAI))}{1 + A * 0.47(1 - a) * Qi * \exp(-K * LAI)} d(LAI)$$

$$Di * TF * \frac{B}{K * A} * \ln \left[\frac{1 + A * 0.47 * (1 - a) * Qi}{1 + A * 0.47 * (1 - a) * Qi * \exp(-K * LAI)} \right] =$$

$$Di * TF * \frac{1.584 * P_m}{K} * \ln \left[\frac{1 + A * 0.47 * (1 - a) * Qi}{1 + A * 0.47 * (1 - a) * Qi * \exp(-K * LAI)} \right] \dots \dots \dots (4)$$

(kgCO₂/(hm²·d)); TF是温度订正系数,是平均温度的函数,自0~1,通过实测拟合; Qi是该日平均太阳辐射强度(μmol/(m²s)); α是群体反射率,取0.2; 0.47是太阳辐射与光合有效辐射的转换系数; LAI是该日群体叶面积指数,据测定,目前常见的几个品种成龄期的叶面积指数 LAI一般在4.1~5.2间,平均为4.5; Di是该日日长(h); 1.584是单位转换系数,1 μmol CO₂/(m²s)=

I = I₀ exp(-kLAI) (3)

(3)式中 I为冠层内辐射强度, I₀为冠层顶的太阳辐射强度, LAI为叶面积指数, k为消光系数,它是反映群体结构特征的重要参数。

2.1.3 群体光合作用 橡胶树冠层群体的光合作用一方面与单张叶片的光合作用有关,另一方面与群体中光垂直分布有关,结合(2)式和(3)式,从而得到完整的群体光合作用模型^[1]:

(4)式中, PD_i是某日(i)的群体光合作用量

1.584(kg CO₂/(hm²·d)); P_m是在饱和光强下的光合速率(μmolCO₂/(m²s)); A、B是光合作用参数; K是群体消光系数。A、B、K是随品种与生长期而定。通过实测,热研7-33-97品种光合作用参数A、B的值分别为0.0502和0.00442; K在0.74~0.95之间,平均为0.85。

2.1.4 温度订正系数 据大田试验实测拟合结果,橡胶树叶片光合速率对温度的响应呈一抛物线形状,橡胶

$$TF = \begin{cases} 0 & T \leq 11.5^\circ\text{C} \text{ 或 } T \geq 42.3^\circ\text{C} \\ (-0.0359567T^2 + 1.93567T - 17.4904) / 8.56 & 11.5^\circ\text{C} < T < 42.3^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

树叶片光合的最适温度为 26.9 °C, 当气温低于 11.5 °C 或高于 42.3 °C 时, 光合速率小于呼吸速率, 此时橡胶树叶片的净光合速率为负值。据实测结果的拟合方程确定出温度订正系数 TF:

(5) 式中, T 为日平均温度。

2.2 呼吸作用

光合作用使作物从太阳光中获取并固定能量, 活的有机体通过呼吸作用不断地利用能量, 以供应生命的需求。McCree 将呼吸作用分为生长呼吸和维持呼吸, 维持呼吸是生物体维持其生理生化状态所造成的消耗, 生长呼吸是光合产物转化为植株结构物质时造成的消耗^[1]。

根据 McCree 对呼吸作用的定义, 橡胶树群体的呼吸作用模型为:

$$R = RG + RM \quad (6)$$

(6) 式中, R 为单位面积上橡胶树群体一日的呼吸消耗量 ($\text{kg CO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$); 前一项是生长呼吸 (RG), 后一项是维持呼吸 (RM)。

2.2.1 生长呼吸 橡胶树叶片进行光合作用后, 光合产物有一部分转化为根、茎、叶、花、果等器官的结构物质, 同时产生次生代谢物质—胶乳, 用于生产这些物质

$$RMP = \sum RM_l(T_0) * Q_l^{\frac{T-T_0}{10}} = RM_l(T_0) * Q_l^{\frac{T-T_0}{10}} + RM_s(T_0) * Q_s^{\frac{T-T_0}{10}} + RM_r(T_0) * Q_r^{\frac{T-T_0}{10}} \\ = rl(T_0) * Al * Q_l^{\frac{T-T_0}{10}} + rs(T_0) * Ws * Q_s^{\frac{T-T_0}{10}} + rr(T_0) * Wr * Q_r^{\frac{T-T_0}{10}} \quad (9)$$

(9) 式中, RMP 含义同上; $RM_l(T_0)$ 为某器官在标准参照温度 T_0 时单位时间的维持呼吸消耗量 ($\text{mg CO}_2/\text{h}$); Q_l 为某器官呼吸作用的温度系数; T_0 为标准参照温度, 取 25 °C; T 为当日的平均温度 (°C); $RM_l(T_0)$ 、 $RM_s(T_0)$ 和 $RM_r(T_0)$ 分别表示叶片、茎枝和根在标准参照温度 T_0 时单位时间的维持呼吸消耗量 ($\text{mg CO}_2/\text{h}$); Q_l 、 Q_s 和 Q_r 分别表示叶片、茎枝和根呼吸作用的温度系数; $rl(T_0)$ 为温度 T_0 时叶片的呼吸速率 ($\text{mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), 参考值取 59.13 $\text{mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; Al 为单株的叶面积 (m^2); $rs(T_0)$ 为温度 T_0 时茎、枝的呼吸速率 ($\text{mg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{h})$); Ws 为单株的茎、枝干物质质量 (kg); $rr(T_0)$ 为温度 T_0 时根系的呼吸速率 ($\text{mg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{h})$); Wr 为单株的根系干物质质量 (kg)。根据实测拟合的结果, 各参数的参考值或经验方程可用下列各式表述:

$$rs(T_0) = 80.0624 + 344.9051 \times \text{EXP}(-0.587878 \times D) \quad (10)$$

$$rr(T_0) = 59.4253 + 384.2023 \times \text{EXP}(-0.242922 \times D) \quad (11)$$

所需消耗的光合产物, 一方面与当日的光合量有关, 另一方面与转化的效率有关。生长呼吸可用以下通式描述:

$$RG = kR \times PDi \quad (7)$$

(7) 式中, RG 为单位面积上橡胶树群体一日的生长呼吸消耗量 ($\text{kg CO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{天})$); kR 是生长呼吸系数, 无量纲, $kR=0.25^{[1]}$; PDi 是当日光合量 ($\text{kg CO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{天})$)。

2.2.2 维持呼吸 作为一个活的有机体, 橡胶树的根、茎、叶、花、果等各器官无时不在进行着呼吸作用以维持其正常的生理生化状态, 这一部分的呼吸量一方面与环境的条件(主要是温度)有关, 另一方面与各器官的质量、呼吸特性等相关。橡胶树的维持呼吸可表述成:

$$RM = 4 \times RMP \times 500 \times 10^{-6} \quad (8)$$

(8) 式中, RM 为单位面积上橡胶树群体一日的呼吸消耗量 ($\text{kg CO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$); RMP 为单株橡胶树平均每小时的维持呼吸消耗 ($\text{mg CO}_2/\text{h}$); 24 为将维持呼吸消耗的单位从每小时转换成每天的系数; 500 为将维持呼吸消耗的单位从单株转换成公顷的系数; 10^{-6} 为将维持呼吸消耗的单位从 mg 转换成 kg 的系数。

橡胶树单株的维持呼吸消耗由下式求出:

$$Ws = 0.0028 \times S^2.6675 \quad (12)$$

$$Wr = 0.0067 \times S^2.0601 \quad (13)$$

以上各式中 D 为直径 (cm); S 为离地 1.5 m 处单株茎围 (cm), 其它含义同前。

2.3 干物质积累

冠层每日的干物质生产量等于冠层日同化量扣除呼吸消耗量, 用以下公式计算:

$$PN(D) = \beta \times [P(D) - R(D)] \quad (14)$$

式中, $PN(D)$ 是以干重表达的日净光合量 ($\text{kg CH}_2\text{O}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$); $P(D)$ 是日光合总量 ($\text{kg CO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$), $R(D)$ 是日呼吸量 ($\text{kg CO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$); β 是 CO_2 与碳水化合物的转换因子。

$$\beta = \frac{(\text{CH}_2\text{O})}{(\text{CO}_2)} = 0.68 \quad (15)$$

以上的干物质积累模型假设的前提是, 在水分和养分的供给, 以及杂草、病虫害和自然灾害的控制等能

影响到橡胶树干物质积累的所有因子都为最适宜状态。这是某一地区的土地所能达到的最高生产力水平,即自然生产潜力。

3 模型的初步检验与反演

3.1 模型的初步检验

用位于海南省儋州市境内的中国热带农业科学院试验农场的实际观测资料对模型进行初步检验,以水肥条件最好年份的橡胶树各月干物质积累消耗动态的

观测值与模拟值进行比较,1月和2月,橡胶树进入落叶期,大部分叶片失去光合作用功能,呼吸消耗大于光合积累,实测和预测值均为负值;从3月份到12月份,各月的实际干物质积累量为100~3000 kg/hm²,预测值为-158~3720 kg/hm²(图2)。从图中可看出模型的预测效果较好。利用0,1回归分析方法对模型符合度进行统计检验的结果表明,模型的模拟值与实测值有较好的吻合程度(图3), $R^2=0.9049$ 。

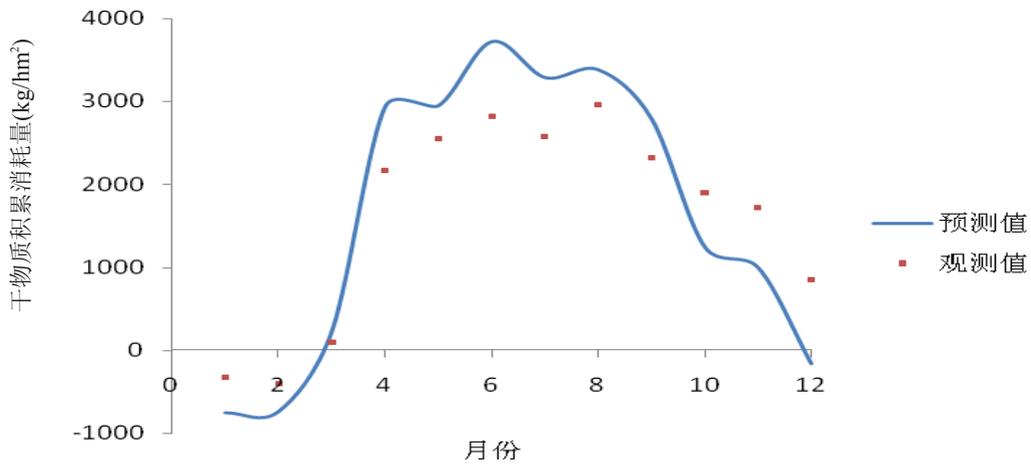


图2 橡胶树一年中各月的干物质积累消耗量预测值与观测值的比较

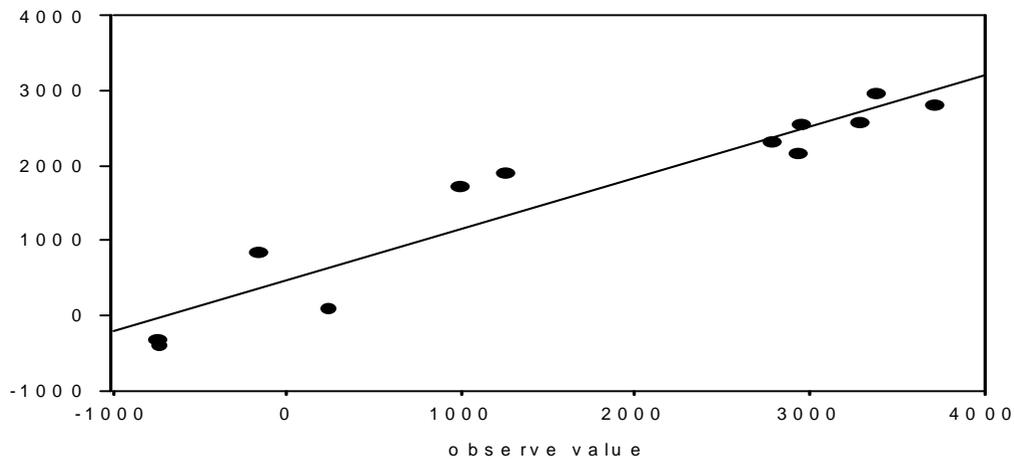


图3 模型预测与实测符合度统计检验

3.2 模型反演结果分析

3.2.1 干物质积累对日平均气温的响应 在不考虑水分和养分等因素的情况下,以实测的参数作为参考,以1天为单位,固定其它参数,调整日平均气温,检验干物质积累对气温参数的响应。光合的平均日照时数按12 h计,呼吸的时间按24 h计。结果表明,在其它条件不变的情况下(单株离地1.5 m处平均茎围 $S=60$ cm;叶面积指数 $LAI=4.5$;单叶片的最大光合速率 $P_m=10$ $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;消光系数 $K=0.8$;光合作用参数 $B=$

0.0045 ;群体反射率 $\alpha=0.2$;光量子通量密度为 3000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,日干物质积累与日均气温的关系呈抛物线形状,日均气温等于 23.5 $^{\circ}\text{C}$ 时,日干物质积累量达到最大值,每平方米土地面积可固定 15.68 g CO_2 。日均气温在低于 23.5 $^{\circ}\text{C}$ 时,日干物质积累随着日均气温的增大而增大。日均气温在高于 23.5 $^{\circ}\text{C}$ 时,日干物质积累随着日均气温的增大而减少。日均气温低于 13.2 $^{\circ}\text{C}$ 或高于 33.2 $^{\circ}\text{C}$ 时,当日光合作用制造的有机物小于呼吸作用的消耗,日干物质积累量小于0(图4)。

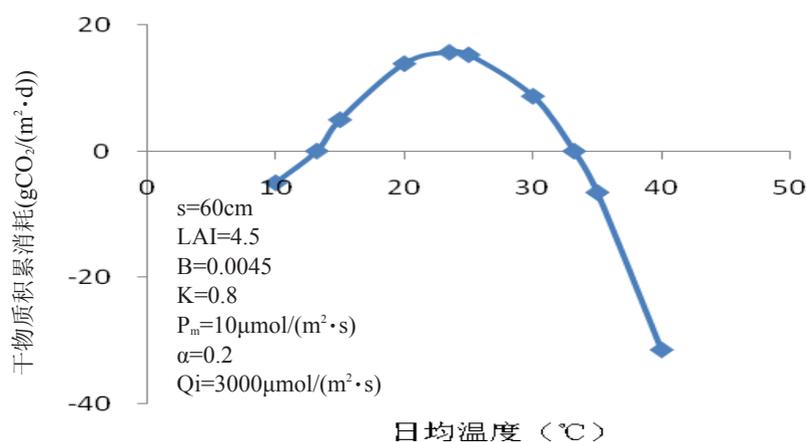


图4 日干物质积累消耗量对日均温度的响应

3.2.2 干物质积累对叶面积指数的响应 在不考虑水分和养分等因素的情况下,以实测的参数作为参考,以1日为单位,固定其它参数,调整叶面积指数(LAI),检验干物质积累对LAI参数的响应。光合的平均日照时数按12 h计,呼吸的时间按24 h计。结果表明,在其它条件不变的情况下(单株离地1.5 m处平均茎围S=60 cm;日平均气温T=25 °C;单叶片的最大光合速率P_m=

10 μmolCO₂/(m²·s);消光系数K=0.8;光合作用参数B=0.0045;群体反射率α=0.2;光量子通量密度为3 000 μmol/(m²·s),日干物质积累与叶面积指数的关系呈抛物线形状,叶面积指数等于4.75时,日干物质积累量达到最大值,每平方米土地面积可固定15.33 gCO₂。LAI在低于4.75时,日干物质积累随着LAI的增大而增大。LAI在高于4.75时,日干物质积累随着LAI的增

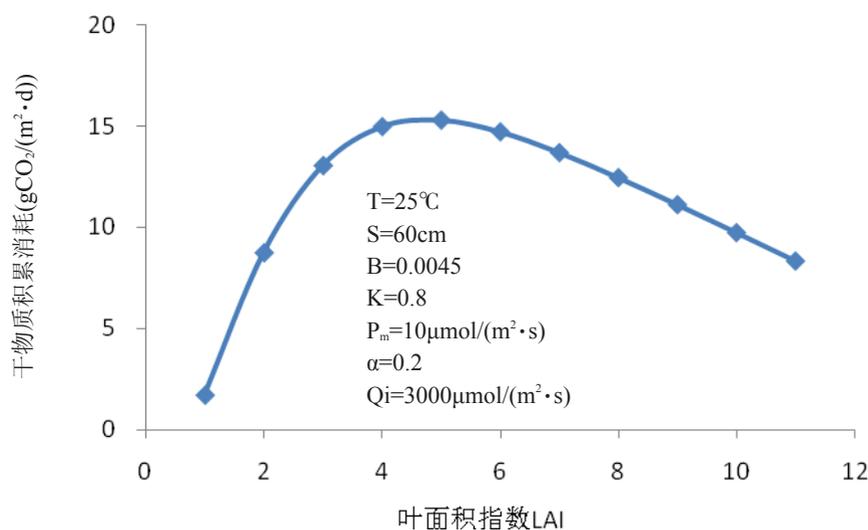


图5 日干物质积累消耗量对叶面积指数LAI的响应

大而减少(图5)。

4 小结与讨论

4.1 模型具有较好的预测效果

笔者参考其它作物光合作用和干物质积累模型的优点,注重模型机理性与实用性的结合,充分考虑了光通量密度、气温、叶面积指数、单叶最大光合速率、光合特性参数、消光系数、群体反射率等因子,同时,考虑了生长呼吸与维持呼吸,建立了基于生态生理过程的橡

胶树光合作用与干物质积累动态模拟模型。经用实测资料对模型进行初步检验,结果表明,该模型具有较好的预测效果。

然而,此模型只是考虑水分、养分等环境条件都在最适情况下的生产潜力,而且,模型未考虑光合产物在器官间的分配动态,这有待于今后研究的进一步完善。

4.2 关于光合与干物质积累的最适温度

此研究中,在相同的条件下,橡胶树光合作用的最

适温度为 26.9 °C, 而干物质积累的最适温度为 23.5 °C。也就是说, 干物质积累的最适温度要小于光合作用的最适温度。这是因为光合作用对温度的响应是二次曲线函数, 而呼吸作用对温度的响应则是指数函数形式。在气温较低时, 虽然温度对橡胶树光合的影响与对呼吸的影响作用相同, 橡胶树的光合速率与呼吸速率均随气温的升高而增大; 但在一定的范围内(此研究的结果为小于 23.5 °C), 光合速率随温度增加的速率大于呼吸速率增加的速率, 因而此时干物质积累也是随着气温的升高而增加。当气温超过 23.5 °C 时, 光合速率虽然还是随温度升高而增加, 但其增加的速率已小于呼吸速率增加的速率, 因此干物质积累随温度升高而减少。当气温继续升高, 超过光合作用的最适温度时, 此时不仅呼吸速率随气温的升高继续增大, 而且橡胶树的光合速率随气温的升高而降低, 此时干物质积累随温度升高而减少的速度加快。

4.3 关于橡胶树叶面积指数

叶片是作物进行光合作用的器官, 一种作物生产的总干物质, 可因叶量的多少不同而异。在现有的农业制度条件下, 干物质产量的提高主要依靠增加叶面积指数。然而, 叶面积指数的增加并不是没有限度的。因为叶片不仅具有光合作用的能力, 它同时也在进行着呼吸作用。当叶面积指数增加到一定程度时, 由于叶片的相互遮荫, 会使部分叶的光合作用能力降低, 当这些叶片的光合积累量等于或低于呼吸消耗时, 就不再对整个群体的干物质积累有任何贡献。因此, 叶面积指数存在着一个最适值。

此研究的结果表明, 橡胶树的叶面积指数最适值在 4.75 左右(模型运行条件: 单株离地 1.5 m 处平均茎围 $S=60$ cm; 日平均气温 $T=25$ °C; 单叶片的最大光合速率 $P_m=10$ $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 消光系数 $K=0.8$; 光合作

用参数 $B=0.0045$; 群体反射率 $\alpha=0.2$; 光量子通量密度为 3000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)。这一运行条件基本能代表海南省成龄橡胶园的平均水平。

而根据对目前常见的几个品种的实测结果, 不同品种成龄期的叶面积指数一般在 4.1~5.2 间, 平均为 4.5, 很接近这一数值。根据热研 7-33-97 品系不同树龄(种植形式为 3 m×7 m)的叶面积指数变化情况, 5 龄以后叶面积指数基本稳定保持在 4.7 左右。这一结果与一般落叶阔叶树林(4~6)基本一致^[10]。这些结果相互印证, 一方面说明橡胶树群体自身具有自动调节能力, 使叶面积指数保持在一个比较合理的水平; 另一方面也说明本模型及其参数的合理性。

参考文献

- [1] 高亮之. 农业模型学基础. 香港: 天马图书有限公司, 2004: 110-126.
- [2] 刘铁梅. Simulation on Photosynthetic Production and Dry Matter Partitioning in Wheat: [博士学位论文]. 南京农业大学, 2000.
- [3] 张立桢, 曹卫星, 张思平, 等. 棉花光合生产与干物质积累过程的模拟. 棉花学报, 2003, (03): 138-145.
- [4] 孟亚利, 曹卫星, 柳新伟, 等. 水稻光合生产与干物质积累的动态模拟. 生物数学学报, 2004, (02): 205-212.
- [5] 冯定原, 邱新法, 戴小笠. 水稻植株光合产物分配、转移规律和生长动态模拟. 南京气象学院学报, 1996, (01): 50-56.
- [6] 张军, 王一鸣, 董乔雪, 等. 棉花动态模拟模型研究进展(英文). 农业工程学报, 2007, (03): 257-266.
- [7] JasminBlanchetteMsAnd 闫锋欣等译. C++ GUI Qt4 编程. 北京: 电子工业出版社, 2008: 492: 185-236.
- [8] pressman R S. 软件工程: 实践者的研究方法. 北京: 机械工业出版社, 2002: 618: 128-160.
- [9] 孟陈, 徐明策, 李俊祥, 等. 栲树冠层光合生理特性的空间异质性. 应用生态学报, 2007, (09): 1932-1936.
- [10] 胡耀华, 伍业纲, 王钊, 等. 关于巴西橡胶树林叶面积指数的研究. 热带作物学报, 1981, (02): 35-43.