

温室黄瓜叶片光合速率的类卡方模型

李萍萍¹, 李冬生^{1,2*}, 王纪章¹, 付为国¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室/江苏省重点实验室, 镇江 212013;

2. 南华大学经济管理学院, 衡阳 421001)

摘要:为了精确模拟不同光照下温室黄瓜光合作用的变化规律,提出了一种类卡方模型(QCSM)进行建模。使用 Li-6400 便携式光合测定系统测定了温度分别为 16℃、20℃、24℃、26℃、28℃、30℃和光量子流通量密度(PPFD)为 0~2000 μmol/(m²·s)动态条件下温室黄瓜叶片净光合速率(P_n),以 P_n测定值为基础对 QCSM 参数进行了模拟。结果表明:QCSM 拟合得到的黄瓜叶片净光合速率估计值 \bar{P}_n 与实测值 P_n 相符。经过前一年的数据验证,模型精度较高,拟合优度达 0.9908,残差标准误差(RSE)为 0.4537。与负指数模型(ME)相比,QCSM 净光合速率估计值与实测值较接近,同时,QCSM 能得到包括光饱和点、补偿点、最大光合速率、暗呼吸、表观量子效率等在内的五个光合作用参数值。与非直角模型(NRH)相比,由 QCSM 估计的光饱和点、补偿点、暗呼吸与实际较接近。

关键词:类卡方模型,温室,黄瓜,净光合速率

中图分类号:S625.5⁺1

文献标识码:A

文章编号:1002-6819(2009)-1-0171-05

李萍萍,李冬生,王纪章,等.温室黄瓜叶片光合速率的类卡方模型[J].农业工程学报,2009,25(1):171-175.

Li Pingping, Li Dongsheng, Wang Jizhang, et al. Quasi-chi-square model for photosynthetic rate of cucumber leaf in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 171-175. (in Chinese with English abstract)

0 引言

光是植物生长发育的基础,是光合作用的主导因子,研究光照度对光合作用的影响具有重要意义。国内外学者在这方面进行了大量研究^[1-4],建立了不少以光照度为基础的植物光合作用模型,主要分为机理模型和经验模型两大类。前者主要包括生化模型^[5]等,后者主要包括直角模型(RH)^[6]、非直角模型(NRH)^[7-9]及推广^[10]、负指数模型^[3,11]、二次多项式模型^[12]及其他^[13,14]。通常,机理模型是在诸假设基础上通过严密逻辑论证推导而来,因而具有坚实的理论基础,但是,运用起来极麻烦,需要通过繁琐程序确定大量的参数。经验模型往往是在大量试验基础上,通过分析试验数据而得出的经验总结,简单实用,有时也能很好地解释生物现象^[8]。

在温室蔬菜生产中,黄瓜占有相当大的比例,在建立黄瓜叶片光合速率模型时,大多采用负指数模型。虽然这种拟合方式的统计拟合效果较好(如 R² 达到 0.90 以上),并能计算部分相关参数,但是由于负指数模型本身的缺陷,即它是单调上升的,无法得到光饱和点和现实的最大净光合速率,因而无法完整反映黄瓜光合作用的特性。鉴于此,本文在进行温室黄瓜叶片光合速率试验研究的基础上,构造了类卡方模型(QCSM),并对模型进

行了验证。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验时间为 2007 年 9 月到 12 月,供试黄瓜品种为津研 4 号。植物先定植于江苏大学农业工程研究院实验温室内,试验采用土壤盆栽,盆高 60 cm,直径 40 cm,植株数量为 30 株,日温度保持在 18~33℃,相对湿度保持在(70±10)%,灌溉方式采用滴灌。待黄瓜第八叶充分展开后,即为黄瓜的抽蔓期,选 10 盆长势相当的黄瓜移入江苏大学农业工程研究院人工气候室 1 号室和 2 号室内,每室 5 盆进行变温实验,每 3 d 变换一次温度,1 号室的白天温度分别设定为 16℃、20℃、24℃,2 号室的白天温度分别设定为 26℃、28℃、30℃。1、2 号室 CO₂ 浓度均为(500±50) μL/L,相对湿度均保持在(70±10)%。在每个温度处理的最后一天进行光合速率的测定,每个温度下作 3 次重复。

1.2 黄瓜叶片净光合速率的测量

黄瓜叶片净光合速率采用 Li-COR 公司生产的 Li-6400 便携式光合测量系统进行测定,测定时采用系统自带 LED 人工红蓝光源,测量叶片为第五节位叶片。测定的程序如下:先随机选取 3 个代表株,在 1400 μmol/(m²·s)光照度下诱导 30 min;然后设定样本室的参数值:叶片温度为人工气候室相应的温度±0.5℃,相对湿度为(70±10)%,光照度由小到大,光量子流通量密度(PPFD)从 0~2000 μmol/(m²·s),非均匀地设置间隔点;最后进行测量,每一光照度下停留 180 s,并作 3 次重复。

1.3 模型的验证

以上试验所测量的数据用于确定模型参数。模型验证采用前一年在镇江市京口蔬菜研究所示范温室内的碧

收稿日期:2008-03-14 修订日期:2008-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30771259);高等学校博士学科点专项科研基金(20060299003);江苏省自然科学基金(BK2006076)

作者简介:李萍萍(1956-),女,浙江宁波人,博士,教授,博士生导师,主要从事农业生态工程方面的研究。镇江 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室,212013。Email:lipingping@ujs.edu.cn

*通讯作者:李冬生(1971-),男,湖南衡南人,博士研究生,副教授,主要从事温室生态经济系统方面的研究。镇江 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室,212013。Email:lds1010@sina.com.

玉黄瓜光合作用试验数据, 该试验采用基质槽栽培。测量时, 设定叶室温度为 26℃, 相对湿度为 (70±10)%, CO₂ 浓度为 500 μL/L 的条件下, 设置光源的光量子流通量密度 (PPFD) 分别为 0、20、50、80、100、150、200、400、800、1000、1200、1500、1700、1800、2000 μmol/(m²·s), 其他方法同上。

2 数据分析与类卡方模型的建立及验证

2.1 类卡方模型描述及拟合优劣判断标准

根据 P_n 随 PPFD 变化趋势, 构造一个新模型, 由于该模型与统计学中的卡方函数极为相似, 故称为类卡方模型, 表达式如下:

$$P_n = ae^{-bPPFD} PPFD^c - DRR \quad (1)$$

式中 P_n ——净光合速率, μmol/(m²·s); a 、 b 、 c ——三个系数; PPFD ——光量子流通量密度, μmol/(m²·s); DRR ——植物的暗呼吸速率, μmol/(m²·s)。

暗呼吸速率 DRR 可由 (1) 得出: 在式 (1) 中, 令 PPFD=0, 便得

$$DRR = -P_n(0) \quad (2)$$

光补偿点 LCP 也可由 (1) 式得出: 令 (1) 为零, 可推得 LCP 是下列方程 (3) 的解。

$$e^{bLCP} DRR = aLCP^c \quad (3)$$

对式 (1) 求一阶导数, 得

$$\bar{P}_n = ae^{-bPPFD} PPFD^{-c} (cPPFD^{-1} - b) \quad (4)$$

式 (4) 表示植物叶片在任意光照度下的量子效率。

表观量子效率 AQE 可由式 (4) 得出: 在式 (4) 中, 令 PPFD=LCP, 便得

$$\bar{P}_n(LCP) = DRR(cLCP^{-1} - b) \quad (5)$$

式 (5) 就是植物在光补偿点处的量子效率, 如果忽略 Kok 效应^①, 就是植物的表观量子效率 AQE。

此外, 光饱和点 LSP 也可由式 (5) 求得: 令式 (5) 为零, 便得 LSP 为:

$$LSP = \frac{c}{b} \quad (6)$$

最大的净光合速率 $P_{n,max}$ 可由式 (1) 和式 (6) 得出: 将式 (6) 代入式 (1), 便得

$$P_{n,max} = ae^{-c} \left(\frac{c}{b}\right)^c - DRR \quad (7)$$

估计值与实测值的拟合优劣可用下式求出

$$\bar{P}_n = \alpha + \beta P_n \quad (8)$$

式中 P_n 和 \bar{P}_n 分别代表净光合速率实测值和相应类卡方模型估计值。对式 (8) 进行线性回归, 求出 R^2 和残差标准误差 RSE, 就可以判断出拟合好坏程度。

2.2 类卡方模型参数确定

使用非线性最小二乘法求类卡方模型的参数 a 、 b 、 c 、DRR, 把一组净光合速率实测值 P_n 代入式 (1) 进行拟合

就会得到一组参数。由于用此方法得到的参数与初始值设定有关, 为了获得较好的一组参数, 可采取如下步骤: 首先将各组参数代入式 (1), 计算出净光合速率估计值 \bar{P}_n ; 然后, 将 P_n 和 \bar{P}_n 代入式 (8), 作 \bar{P}_n 对 P_n 的线性回归; 最后判断各回归的残差标准误差 RSE, 选择 RSE 较小且符合生理意义的那一组参数。运用非线性最小二乘算法对类卡方模型进行拟合时, 不能包含自变量为 0 的值, 故在具体操作时, 用 0.001 代替 0, 这样处理对结果影响很小, 又不至于减少自由度。

利用 Matlab(Matlab7.0.267, he MathWorks, nc. U.S.A.) 编程, 采用上述方法求出各光量子流通量密度 PPFD 与对应的估计值 \bar{P}_n 和实测值 P_n 绘制图形见图 1, \bar{P}_n 对 P_n 的线性回归结果见图 2, 黄瓜叶片在不同温度下类卡方模型参数值见表 1。

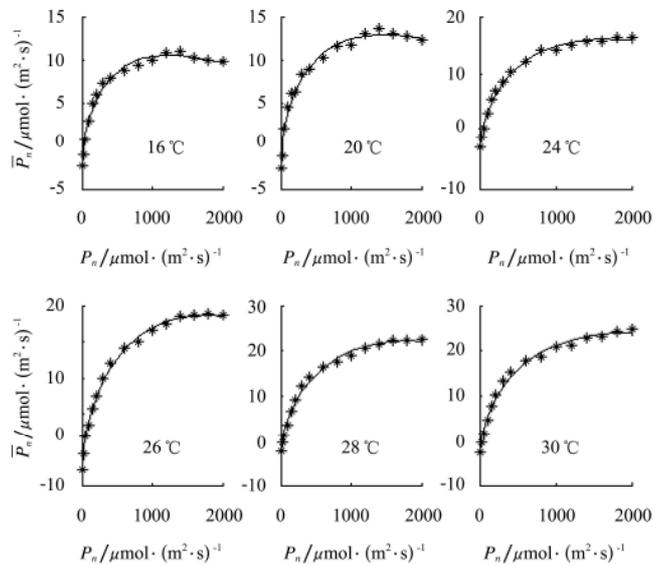


图 1 不同温度下的 \bar{P}_n (*所示) 与 P_n (-所示)
Fig.1 Values of \bar{P}_n and P_n under different temperatures

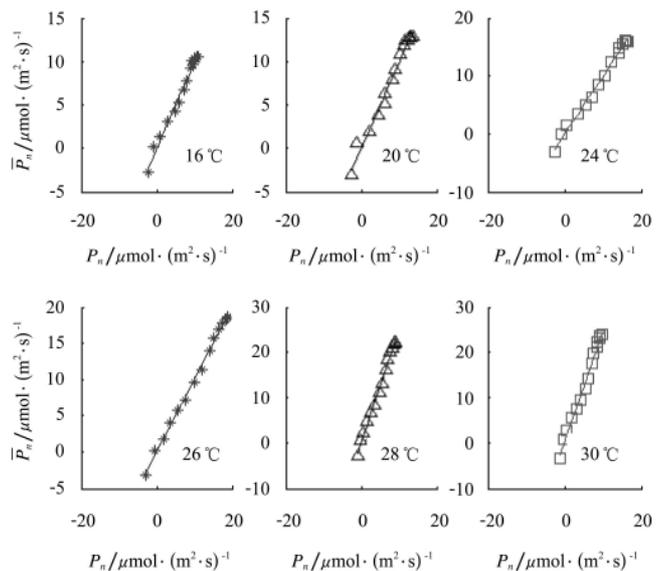


图 2 不同温度下的 \bar{P}_n 与 P_n 线性回归
Fig.2 Linear regressions between \bar{P}_n and P_n under different temperatures

①在弱光范围内, 光合速率随光强度增加而增加, 此速率之增加的比率在越过光补偿点后就变小, 似乎光合作用的量子产量在光补偿点附近发生变化。这个现象是 B. Kok (1948) 发现的, 因此称为 Kok 效应。此乃由于呼吸因光而促进的原因 (参加光呼吸), 光合作用的量子产量并无变化。

图 1 反映了黄瓜叶片净光合速率随光照度的变化趋势,类卡方模型拟合效果很理想,图2进一步反映 P_n 与 \bar{P}_n 几乎在一条直线上。计算可知,各温度下 \bar{P}_n 对 P_n 线性回归方程的拟合优度 R^2 均在 0.98 以上,残差标准误差 RSE 很小。以 28℃ 为例: $\alpha=0.1341$, $\beta=0.9900$, $R^2=0.99$, $RSE=0.898 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, β 预测值的置信区间为 0.9900 ± 0.1183 , 说明 \bar{P}_n 与 P_n 线性关系明显,类卡方模型估计值与实测值非常相符。

RSE 几乎成正态分布,既不与式(8)中的自变量相关,也不与其估计值相关,进一步说明了类卡方模型的可行性。

从表 1 发现,黄瓜叶片最大光合速率 $P_n\text{max}$ 随温度增加而增大,在 16℃ 时最小,为 $10.6015 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在 30℃ 时最大,为 $23.6999 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,体现了在不同

温度下黄瓜叶片光合作用的最大程度;表观量子效率 AQE 在 0.06~0.112 之间,体现了黄瓜叶片光合作用的 AQE 随着温度增加呈现增大的趋势,在 16℃ 时最小,为 0.0626,在 30℃ 时最大,为 0.1113。光补偿点 LCP 在 16~30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间,反映了为补偿暗呼吸所需要的最低的光照度。光饱和点 LSP 也随着温度的增加而增大,从 16℃ 时的 $1219.8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 提高到 30℃ 时的 $1953.0 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;这些结果与以往他人研究得到的结果基本一致^[4,15]。但是黄瓜叶片光饱和点超过 $1600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,此结果比自然条件得到的光饱和点要高^[16]。其原因可能是人工气候室设定的 CO_2 浓度为 $500 \mu\text{L}/\text{L}$ 左右,比自然条件下的 $370 \mu\text{L}/\text{L}$ 左右高得多,这与作者以往在其它蔬菜上的在 CO_2 浓度提高时,光合作用的光饱和点会随之提高的试验结果也是一致的。

表 1 不同温度下的类卡方模型及其参数
Table 1 Quasi-chi-square model(QCSM) and its parameters under different temperatures

温度/℃	光合速率方程	AQE	$P_n\text{max}/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	$LSP/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	$LCP/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$
16	$0.5421e^{-0.0004304PPFD} PPF D^{0.525} - 2.776$	0.0626	10.6015	1219.8	22.8563
20	$0.762e^{-0.000335PPFD} PPF D^{0.4842} - 3$	0.0837	12.9123	1445.4	17.1452
24	$0.5076e^{-0.0003444PPFD} PPF D^{0.5676} - 3.204$	0.0685	16.0701	1648.1	26.1102
26	$0.5387e^{-0.0003204PPFD} PPF D^{0.571} - 3.187$	0.0789	17.3761	1782.1	22.7837
28	$0.5123e^{-0.0003223PPFD} PPF D^{0.597} - 3.001$	0.0908	22.1802	1852.3	19.5297
30	$0.7468e^{-0.0002806PPFD} PPF D^{0.548} - 3.544$	0.1113	23.6999	1953.0	17.2963

2.3 类卡方模型参数有效性验证

为了进一步验证所建立的类卡方模型的有效性,采用基质槽栽培方式下黄瓜叶片净光合速率数据进行了验证。首先运用非线性最小二乘法对式(1)进行拟合,求出基质槽栽培方式下黄瓜叶片净光合速率估计值 \bar{P}_n ; 然后作 \bar{P}_n 对 P_n 的线性回归,回归方程的 α 、 β 、 R^2 、 RSE 和 β 估计值的 95% 置信区间分别为 0.0471、0.9908、0.9908、0.4537、 0.9908 ± 0.1608 , 相应的 \bar{P}_n 对 P_n 的线性回归图和残差分布图见图 3。

从结果看出,基质槽栽培方式表征拟合优度的决定系数 R^2 在 0.99 以上,且残差标准误差 RSE 很小,为 0.4537,由于 R^2 和 RSE 是反映线性拟合程度高低的重要判断标准,极高的 R^2 和很小的 RSE 说明线性关系非常明显,因此,叶片净光合速率实测值 P_n 与类卡方估计值 \bar{P}_n 线性关系极强。另外, β 值为 0.9908, α 远小于 β , 表明 P_n 和 \bar{P}_n 几乎相等。图 3 的残差分布图表明残差 RSE 几乎成正态分布,既不与式(8)中的自变量相关,也不与其估计值相关,进一步说明了类卡方模型的可行性。

3 非直角双曲线模型、负指数曲线模型与类卡方模型比较

26℃ 时,光合作用模拟常用的模型负指数模型 ME 和非直角模型 NRH 的形式分别为:

$$P_n = 20.09(1 - e^{-0.05678PPFD/20.09}) - 1.66 \quad (9)$$

$$P_n = \frac{0.02104PPFD + 13.32 - \sqrt{(0.02104PPFD + 13.32)^2 - 1.121PPFD}}{1.5064} - 1.575 \times 10^{-7} \quad (10)$$

以 26℃ 时为例,应用三种模型分别计算最大净光合速率,表观量子效率,光补偿点和光饱和点(负指数模型除外)等参数,其结果列于表 2,并作三类模型比较图如图 4 所示。

从表 2 中看出,三类模型的拟合优度都很高,均达 0.9 以上,而类卡方模型的拟合优度为 0.9954,高于其他两个模型,同时它的最大绝对误差和残差标准误差都是最低

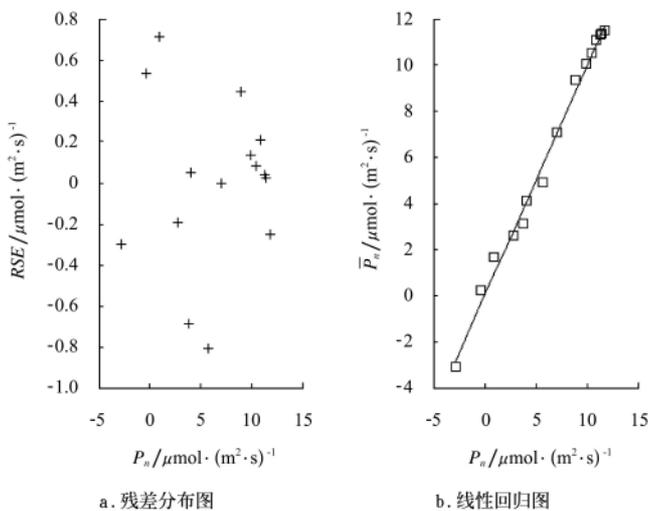


图 3 基质槽栽培方式下 \bar{P}_n 与 P_n 线性回归及残差分布
Fig.3 Linear regressions between \bar{P}_n and P_n and residual distribution

的,相比之下,类卡方模型的拟合效果最好。同时,负指数模型的曲线一直上升而不下降,因此无法获得光饱和点和最大净光合速率;非直角模型在光饱和点之前是直线上升,超过光饱和点净光合速率保持不变,这与黄瓜的光响应规律不符,而且非直角模型估计的饱和点、补偿点、暗呼吸明显偏低。从图4可以更加直观的看出,类卡方模型模拟的曲线与实测值较接近,能更好体现净光合速率随光通量密度变化的规律。

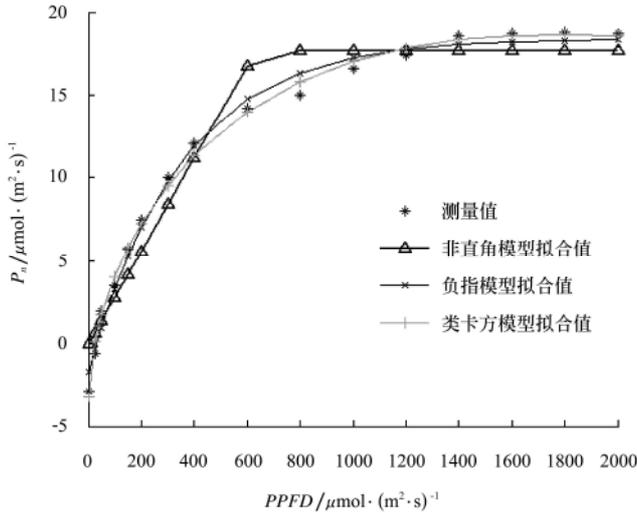


图4 类卡方模型与非直角模型、负指数模型拟合比较
Fig. 4 Comparisons of QCSM fitting with non-rectangular model and minus exponential model

表2 类卡方模型与二次多项式模型拟合光合作用参数比较
Table 2 Comparison of parameters of photosynthesis gained from QCSM with quadratic polynomial model(QMM)

参 数	模型类型		
	类卡方模型	负指数模型	非直角模型
饱和点/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	1782.1	—	633.08
最大光合速率/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	17.3761	20.09	13.32
补偿点/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	22.7837	29.2815	5.6383×10^{-6}
暗呼吸/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	3.187	1.66	1.575×10^{-7}
表观量子效率	0.0789	0.05678	0.02104
光响应曲线曲角/rad	—	—	0.7532
拟合优度	0.9954	0.9912	0.9536
最大绝对误差/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	0.7815	1.3661	2.8791
最大相对误差	1.2100	0.5339	1.4749
残差标准误差	0.4679	0.6776	1.6696

4 结论和讨论

类卡方模型能很好反映黄瓜叶片净光合速率的光响应特性,叶片净光合速率实测值 P_n 与类卡方估计值 \bar{P}_n 线性关系极强,所以模型的可靠性较好。与其它模拟光合作用的主要模型负指数模型相比,类卡方模型不但精度高,而且还能模拟光饱和点这一重要参数;与非直角模型相比,类卡方模型的模拟的最大光合速率、光饱和点、补偿点、暗呼吸等值与实测值之间的吻合度高得多。因此,类卡方模型可以用于黄瓜叶片光响应的模拟。

由类卡方模型公式(1)、(5)、(6)可以得出:

$$a = (P_n(1) + DRR) * e^b \tag{11}$$

$$b = \frac{AQE * LCP}{DRR * (LSP - LCP)} \tag{12}$$

$$c = \frac{AQE * LCP * LSP}{DRR * (LSP - LCP)} \tag{13}$$

可见,参数 a 、 b 、 c 受植物的表观量子效率 AQE 、暗呼吸速率 DRR 、光饱和点 LSP 和光补偿点 LCP 影响,已知不同植物品种环境因子组合下的 AQE 、 DRR 、 LSP 和 LCP 便可得到 a 、 b 、 c 的数值。根据式(11),由于 b 几乎为零,因此,可认为 a 为 $PPFD=1$ 时的光合速率。根据式(13),可认为 c 是经 LCP 和 LSP 调和的表观量子效率倍数,根据(6)知 c/b 为光饱和点 LSP 。

[参 考 文 献]

- [1] 孔云,王绍辉,马承伟,等. 轻度遮光对温室油桃结果枝光合碳同化物积累和分配的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 27(3): 169—173.
Kong Yun, Wang Shaofei, Ma Chengwei, et al. Effect of slight shading on accumulation and partitioning of carbon assimilation in fruit-bearing limb of greenhouse-grown nectarine[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 27(3): 169—173. (in Chinese with English abstract)
- [2] Habermann G, Machado E C, Rodrigues J D, et al. CO₂ assimilation, photosynthetic light response curves, and water relations of 'Pera' sweet orange plants infected with Xylella fastidiosa[J]. Braz J Plant Physiol, 2003, 15(2): 79—87.
- [3] Peri P L, Moote D J, McNeil D L. Modelling photo-synthetic efficiency (α) for the light-response curve of cocksfoot leaves grown under temperate field conditions[J]. Eur J Agron, 2005, 22(3): 277—292.
- [4] 艾希珍,张振贤,何启伟,等. 日光温室主要生态因子变化规律及其对黄瓜光合作用的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 41—46.
Ai Xizhen, Zhang Zhenxian, He Qiwei, et al. Changes in ecological factors and their effects on photosynthesis of cucumber leaves (*Cucumis Sattvus* L.) in heliogreenhouse[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002, 8(1): 41—46. (in Chinese with English abstract)
- [5] Farquhar G D, Caemmerer S V, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ Assimilation in leaves of C₃ species[J]. Planta, 1980, 149(1): 78—90.
- [6] Krauss K W, Allen J A. Influences of salinity and shade on seedling photosynthesis and growth of two mangrove species, Rhizophora mangle and Bruguiera sexangula, introduced to Hawaii[J]. Aquat Bot, 2003, 77(4): 311—324.
- [7] Thornley J H M. Dynamic model of photosynthesis with acclimation to light and nitrogen[J]. Annals of Botany, 1998, 81(3): 421—430.
- [8] Gomes F P, Oliva M A, Mielke M S, et al. Photo-synthetic irradiance-response in leaves of dwarf coconut palm (*Cocos nucifera* L. 'nana', Arecaceae): Comparison of three models [J]. Scientia Horticulturae, 2006, 109(1): 101—105.
- [9] 刘宇锋,萧浪涛,童建华,等. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用[J]. 中国农学通报, 2005, 12(8): 76—79.

- Liu Yufeng, Xiao Langtao, Tong Jianhua, et al. Primary application on the non-rectangular hyperbola model for photosynthetic light-response curve[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 12(8): 76-79. (in Chinese with English abstract)
- [10] 史为民, 陈青云, 乔晓军. 日光温室黄瓜叶片光合速率模型及其参数确定的初步研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 113-118.
Shi Weimin, Chen Qingyun, Qiao Xiaojun. Preliminary study on the model for the photosynthesis rate of cucumber leaves at different ages and determination of parameters in sunlight greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 113-118. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李娟, 郭世荣, 罗卫红. 温室黄瓜光合生产与干物质积累模拟模型[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 241-244.
Li Juan, Guo Shirong, Luo Weihong. Simulation model for photosynthesis and dry matter accumulation in greenhouse cucumber[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 241-244. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李萍萍, 胡永光, 赵玉国, 等. 增施 CO₂ 气肥对温室结球莴苣光合作用影响的综合模型研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 75-79.
Li Pingping, Hu Yongguang, Zhao Yuguang, et al. Comprehensive model on the effect of CO₂ Enrichment on lettuce photosynthesis in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(3): 75-79. (in Chinese with English abstract)
- [13] Jassby A D, Platt T. Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton[J]. Limnology and Oceanography, 1976, (21): 540-547.
- [14] 叶子飘. 光响应模型在超级杂交稻组合-II 优明 86 中的应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1323-1326.
Ye Zipiao. Application of light-response model in estimating the photosynthesis of super-hybrid rice combination-II Youming 86[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(8): 1323-1326. (in Chinese with English abstract)
- [15] 艾民, 刘振奎, 杨延杰, 等. 温度、光照强度和 CO₂ 浓度对黄瓜叶片净光合速率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(4): 414-418.
Ai Min, Liu Zhenkui, Yang Yanjie, et al. Effects of temperature, light intensity and CO₂ concentration on cucumber net photosynthesis[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36(4): 414-418. (in Chinese with English abstract)
- [16] 卢育华, 申玉梅, 陈莉平. 黄瓜单个叶片光合特性研究[J]. 园艺学报, 1994, 21(1): 54-58.
Lu Yuhua, Shen Yumei, Chen Liping. Studies on photosynthetic characteristic of a single leaf of cucumber[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 1994, 21(1): 54-58. (in Chinese with English abstract)

Quasi-chi-square model for photosynthetic rate of cucumber leaf in greenhouse

Li Pingping¹, Li Dongsheng^{1,2*}, Wang Jizhang¹, Fu Weiguo¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Economics and Management, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to exactly simulate the rule of greenhouse cucumber Photosynthesis under different photosynthetic photo flux density (PPFD), a model named quasi-chi-square model (QCSM), was established. Net photosynthetic rate (P_n) data of cucumber leaf were measured by Li-6400 Portable Photosynthesis System under dynamic conditions of temperature being 16, 20, 24, 26, 28, 30°C, respectively, and PPFD being 0~2000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, and based on the measured values of P_n , parameters of QCSM were fitted. The results showed that the estimated net photosynthetic rate data of \bar{P}_n by the model were coincided with the measured data of P_n . Validation by yesteryear data indicated that model precision was very high with goodness of simulation of 0.9908 and residual standard error (RSE) of 0.4447. The estimated values of P_n by QCSM were closer to measured values compared with that of minus exponential model (ME), and five parameter values of photosynthesis, including light saturation point (LSP), light compensation point (LCP), maximum net photosynthetic rate ($P_n \text{ max}$), dark respiration rate (DDR), apparent quanta effect (AQE), were obtained. Compared with those by non-rectangular model (NRH), the estimated values of LSP, LCP and DDR by QCSM are closer to measured values.

Key words: quasi-chi-square models, greenhouses, cucumber, net photosynthetic rate,