

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.051

CO₂与氮肥交互作用的番茄光合速率预测模型

刘新英^{1,2} 殷 鉴¹ 李 寒^{3,4} 张 漫¹ 李民赞¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300; 3. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083;

4. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 为了实现 CO₂ 气肥和营养液氮肥含量的准确调控, 建立了作物整个生长周期的光合速率预测模型。以番茄为实验对象, 设置了 3 个 CO₂ 浓度和 3 个营养液含氮量的交互处理实验, 使用 LI-6400 型便携式光合速率仪采集叶室内的环境信息和单叶净光合速率。利用多元线性回归方法建立了番茄整个生长周期的光合速率预测模型, 模型的相关系数为 0.885, 调整后的决定系数为 0.782。实验结果表明, 该模型具有较高预测精度, 可为温室 CO₂ 气肥浓度和营养液氮肥含量的调控提供理论依据。

关键词: 番茄; 光合速率; 精确调控; 多元线性回归

中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)S0-0334-07

Photosynthetic Rate Prediction Model of Tomato with CO₂ and Nitrogen Fertilizer Interaction

LIU Xinying^{1,2} YIN Jian¹ LI Han^{3,4} ZHANG Man¹ LI Minzan¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Mechanical Electrification Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China

3. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: CO₂ is the plant's raw material for photosynthesis. In order to realize the precise regulation of CO₂ gas fertilizer under different nitrogen levels, a fitting model for the photosynthetic rate of tomato was establish throughout its growth cycle. In this paper, the experiments were conducted with 3 CO₂ concentrations and 3 nutrient liquid nitrogen treatments, and the environmental information and the net photosynthetic rate of the leaf were collected by the LI-6400 portable photosynthetic rate instrument. The prediction model of photosynthetic rate in the whole tomato growth stage was established by multiple linear regression. The correlation coefficient is 0.885 and the adjusted coefficient of determination was 0.782. The experimental results show that the model has high prediction accuracy, and can be used to guide the accurate regulation of CO₂ gas fertilizer under different nitrogen content.

Key words: tomato; photosynthetic rate; precise regulation; multiple linear regression

引言

光合速率是衡量植物光合作用能力的主要指标, 可有效代表植物干物质的积累速度^[1-3]。CO₂ 是植物进行光合作用的重要原料, 有研究表明, 适量

的 CO₂ 的增施不仅可以促进植物的光合作用, 提高叶片中的光合产物和蛋白质含量的积累^[4-5], 还可以提高蔬菜作物的抗冷性能, 延缓叶片衰老, 适应北方冬季日光低温弱光环境^[6-7]。氮肥是植物生长所必须的基本营养元素, 在植物生长发育和形态建成

收稿日期: 2017-07-20 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600-2016YFD0200602, 2016YFD0300600-2016YFD0300606)和北京市优秀人才培养项目(2015000020060G129)

作者简介: 刘新英(1980—), 女, 博士生, 塔里木大学副教授, 主要从事农业电气化与自动化技术研究, E-mail: lxycan@126.com

通信作者: 张漫(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事精细农业及其支持技术研究, E-mail: cauzm@cau.edu.cn

中发挥重要作用,直接影响蔬菜产量和品质。适宜的供氮水平不但可提高光合速率、增加作物干重,还可增加蔬菜中可溶性固形物、蛋白质等有益物质的含量^[8],减缓干旱对光合作用的抑制^[9]。

我国北方的日光温室在冬季由于环境封闭,常出现 CO₂ 不足的情况。另一方面,在农业生产中,普遍存在为了提高产量,盲目投入氮肥而使果实可溶性固形物减少、糖度降低、硝酸盐的积累增多等问题^[10]。CO₂ 和氮肥是影响作物生长和生物量积累的 2 个重要因子。在作物生长过程中,维持平衡、协调的 CO₂ 浓度和氮肥供应水平能发挥两者对作物生长最佳的互作效应^[11-12]。

近年,关于作物光合速率的预测模型已有大量的研究,但大都只研究 CO₂ 增施这一个因素,关于二者的交互作用研究较少^[13-15]。本文以日光温室番茄为研究对象,建立番茄整个生长期的光合速率预测模型,旨在探讨 CO₂ 和氮肥互作对番茄光合速率影响,为温室 CO₂ 和氮肥的调控提供理论依据^[16-17]。

1 材料与方法

1.1 系统整体设计

为了分析日光温室环境下,不同的 CO₂ 增施浓度和营养液氮肥含量对番茄光合速率的影响,使用 LI-6400 型便携式光合速率仪采集番茄整个生长期的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和叶室内小环境参数(温度、CO₂ 浓度、空气湿度和光强),剔除异常点后,使用多元线性回归的方法建立番茄整个生长期的光合速率预测模型,并对模型进行验证。系统总体结构如图 1 所示。

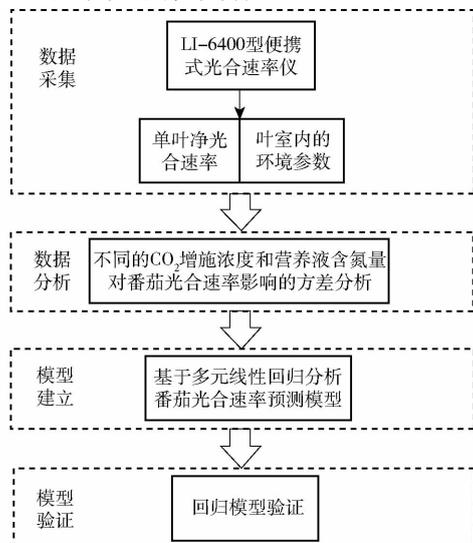


图 1 系统总体结构

Fig. 1 Overall structure of system

1.2 实验设计

实验于 2017 年 3—6 月在中国农业大学日光温室内进行,番茄实验品种为“欧官”。本次实验共 3 个栽培槽(2.5 m × 2.0 m × 0.6 m),每个栽培槽内设 15 个内径为 28 cm 的花盆。基质由珍珠岩和蛭石按 1:3 的体积比例混合而成,各盆的基质作统一处理。待播种于穴盘的番茄幼苗长至 6 叶 1 心时选取生长一致的幼苗,移栽定植。

实验以 CO₂ 气瓶为气源,设置了 2 个 CO₂ 增施组(1 000 ± 50)(C1)、(700 ± 50)(C2) μmol/mol 和对照组(C3)(自然环境,CO₂ 浓度约 450 μmol/mol)。待子叶完全展开后,在晴天的 08:00—11:00 进行 CO₂ 增施。为保证处理组中 CO₂ 浓度的稳定,防止气体外散,用 PEP 塑料薄膜包裹各槽并用胶带和凹凸条进行密封。每个 CO₂ 增施槽以山崎番茄配方营养液的含氮量(N)为基准,设置了 3 个氮水平(分别为 1/2N(N1)、1N(N2)、2N(N3),每 5 株为一个氮处理组。在番茄的整个生长期,使用配制的营养液按需浇灌。由于温室内光照强度较弱,各栽培槽内增加 3 层红白配比为 1:5 的补光灯,各层之间的距离为 30 cm,补光灯与番茄根部的距离根据番茄的高度适时调整。番茄的其他生长条件均作统一处理。

1.3 数据采集

实验时间分别为 2017 年 4 月 1—10 日、5 月 1—10 日和 6 月 5—15 日,各阶段数据的采集方式均保持一致。数据采集前,每株选取自上而下第 3 叶序上完全展开的功能叶为采集对象。实验时,为了扩展数据的范围、保证测量叶片所处环境的稳定,使用 LI-6400 型便携式光合速率仪的红蓝光源和 CO₂ 注入系统人工控制叶室内的 CO₂ 浓度和光照强度。

为获得不同的生长环境下番茄实际的饱和光强,进行了光响应曲线的测量,光强梯度设置为:1 700、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、150、0 μmol/(m²·s)。在饱和光强下,再进行番茄叶片 CO₂ 响应曲线的测量,以获得饱和 CO₂ 浓度。CO₂ 的浓度梯度设置为 0、200、400、550、700、900、1 100、1 300、1 500、1 700、1 800、2 000、2 200 μmol/mol。最后,每个栽培槽内的 3 个 N 处理组均选取 2 株进行光照和 CO₂ 交互响应曲线的测量,光合速率取每个 N 处理组 2 株测量结果的平均值。其中,光照强度设置为 1 200、900、600、300 μmol/(m²·s),CO₂ 浓度设置为 200、400、600、800、1 000、1 300、1 500、1 700、1 800 μmol/mol。每次实验进行前,均需对夹入叶室的叶片进行充分的诱导,以保证获得最大的光合速率,诱导时间约为 30 min。每改变一个测量

状态,系统将自动进行一次匹配操作,以保证 LI-6400 型便携式光合速率仪样品室和参比室 CO₂ 浓度的一致,以减少系统误差。

本次实验光响应测得 190 组数据,CO₂ 响应测得 260 组数据,交互响应测得 432 组数据,整个实验周期共测得 882 组数据。由于 LI-6400 型便携式光合速率仪采集的数据可能存在异常点和多重共线性,且在测量过程中,由于人工操作误差、仪器误差和 CO₂ 浓度或环境光强的急剧波动,数据会产生误差。因此在建模之前需对数据进行预处理,发掘实验隐含的数据。

1.4 数据分析与建模

1.4.1 异常点数据剔除

异常值是指样本中的个别数值明显偏离所属样本的其余观测值,也称异常数据或离群值^[18]。在本实验中,由于外界干扰或仪器误差等原因造成实测数据值偏离正常结果,在数据预处理前先对所得数据进行了异常点检测,当样本残差超过 3 倍的标准差时,判定为异常值进行剔除。

1.4.2 多重共线性诊断

多重共线性是指线性回归模型中的解释变量之间由于存在精确相关关系或高度相关关系而使模型估计失真或难以准确估计。由于 LI-6400 型便携式光合速率仪所测得叶室内的小环境参数可能存在多重共线性,需要对采集到的数据进行多重共线性诊断。诊断的方法是基于对自变量的观察数据构成的矩阵进行分析,本研究采用的共线性诊断的统计量为方差膨胀因子 VIF。方差膨胀因子是指回归系数的估计量由于自变量的共线性使其方差增加的一个相对度量。对于第 i 个回归系数,其方差膨胀因子定义为

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (1)$$

式中 R_i^2 是自变量 X_i 对模型中其余自变量线性回归模型的相关系数 R 的平方。一般当 $VIF > 10$, 模型中有很强的共线性问题。

1.4.3 回归模型构建

多元线性回归是指用 2 个或 2 个以上的影响因素作为解释变量来解释被解释变量的变化^[19-20]。本文以 LI-6400 型便携式光合速率仪采集的番茄样品室 CO₂ 浓度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、样品室光强、样品室温度、样品室空气湿度和气孔导度为 7 个解释变量,以 LI-6400 型便携式光合速率仪采集到的番茄单叶净光合速率为被解释变量,采用多元线性回归的方法建立光合速率的拟合模型,并对该模型进行验证。多元线性回归模型可表示为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_7 X_7 + \mu \quad (2)$$

式中 X ——解释变量 Y ——被解释变量

β ——回归参数

μ ——服从均值为 0 的正态分布的随机误差项
多元线性回归方程的最小二乘估计原则要求 Y_i 和 \hat{Y}_i 的误差 e_j 的平方和达到最小值,即

$$Q = \min \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_{i1} - \dots - \beta_7 X_{i7})^2 \quad (3)$$

根据多元微积分的求极值原理,对 Q 求偏导数使其等于 0,即可求得各个回归参数的拟合值 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_7$ 。即可得多元线性回归方程

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{i1} + \hat{\beta}_2 X_{i2} + \dots + \hat{\beta}_7 X_{i7} \quad (4)$$

1.4.4 模型验证

决定系数 R^2 也称判定系数或者拟合优度,表征回归方程对观测值的拟合程度。在多元线性回归方程中,解释变量的增加会引起 R^2 的增加,但与回归方程拟合度无关。为了消除解释变量的个数对相关系数的影响,使用调整的 \bar{R}^2 来检验回归模型的拟合优度。 F 值是方差检验量,是对回归模型的整体检验。则

$$T_{ss} = R_{ss} + E_{ss} \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{R_{ss}}{T_{ss}} = 1 - \frac{E_{ss}}{T_{ss}} \quad (6)$$

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{R_{ss}/(n-k-1)}{T_{ss}/(n-1)} \quad (7)$$

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} (n - 2) \quad (8)$$

式中 T_{ss} ——总离差平方和

E_{ss} ——回归平方和

R_{ss} ——残差平方和

n ——第 n 次独立观察得到的样本数据

k ——解释变量的数目

2 结果与分析

2.1 异常点数据剔除

本次实验共测得 882 组数据。当样本残差超过 3 倍的标准差时,判定为异常值进行剔除。异常点诊断的结果如表 1 所示,共有 5 组数据被诊断为异常点进行了剔除,其余 877 组数据参与建模。

表 1 异常点剔除

Tab.1 Outlier elimination

剔除编号	标准偏差	残差
217	-3.173	-15.974
334	-3.252	-16.367
347	-3.900	-19.631
373	-3.985	-20.056
549	-3.026	-15.231

2.2 多重共线性诊断

LI-6400 型便携式光合速率仪所测得的 7 个解释变量的多重共线性诊断结果如表 2 所示,各解释变量的显著性 (sig. 值) 均小于 0.000 1, 小于显著性检验标志 0.05, 可显著拒绝总体回归系数为 0 的原假设, 说明解释变量和被解释变量之间存在显著的线性关系。由共线性统计的方差膨胀因子 VIF 可以看出, 7 个解释变量的方差膨胀因子均小于 10, 说明其基本不存在多重共线性。

表 2 样品室环境因子多重共线性诊断

Tab. 2 Multicollinearity diagnosis of sample room environmental factors

参数	sig. 值	方差膨胀因子 VIF
样品室 CO ₂ 浓度	< 0.000 1	1.376
胞间 CO ₂ 浓度	< 0.000 1	1.077
蒸腾速率	< 0.000 1	5.496
样品室光强	< 0.000 1	1.284
样品室温度	< 0.000 1	3.64
样品室空气湿度	< 0.000 1	2.082
气孔导度	< 0.000 1	8.046

2.3 CO₂ 与氮肥的胁迫效果对比

为研究 CO₂ 增施浓度和营养液氮肥含量对番茄生长表现的影响, 使用三因素方差分析法对 CO₂ 增施浓度和营养液氮肥含量进行分析, 分析结果如表 3 所示, 各 CO₂ 增施浓度对番茄光合速率影响的 sig. 值为 0.022, 小于 0.05, 营养液氮素含量以及 CO₂ 增施浓度与营养液氮素含量交互作用对番茄净光合速率影响的 sig. 值均小于 0.000 1, 影响显著。

表 3 番茄单叶净光合速率的三因素方差分析

Tab. 3 Three-factor variance analysis of net photosynthetic rate of tomato single leaf

参数	二氧化碳	氮含量	交互作用
F	24.577	41.980	21.592
sig. 值	0.022	< 0.000 1	< 0.000 1

不同 CO₂ 浓度和不同营养液氮肥含量下, 番茄光合速率的边际平均数估计如图 2、3 所示。当番茄叶片处于弱光状态下光强小于 100 μmol/(m²·s) 时, 会出现呼吸速率大于光合速率, 此时叶片净光合速率表现为负值。由图 2 可知, 各 CO₂ 处理组的光合速率边际平均数估计值均随着光照强度的增加而增加, 且变化趋势一致。C3 组在光强 900 μmol/(m²·s) 时, 光合速率接近饱和, 光强 1 200 μmol/(m²·s) 后呈明显的下降趋势。在光强为 1 000 μmol/(m²·s) 时 C1 组和 C2 达到饱和, 随后 C2 呈明显的下降趋势, C1 组的下降趋势不太明显。

可见合理地增施 CO₂ 可以缓解夏季温室光照最强的中午由于部分气孔关闭而导致的光和午休现象。但由于夏季温室温度较高, 在 C1 组和 C2 组进行 CO₂ 增施时用 PEP 膜进行了密封, 导致槽内的温度过高, 湿度过大, 光合速率降低。C1 组和 C2 组的整体光合速率较 C3 组增加不明显。这说明 CO₂ 浓度增加一定的比例能够促进植物的光合作用, 但长期高浓度 CO₂ 处理下, 这种促进作用反而会减弱或者消失, 这种现象称为光合适应现象, 与王春乙等^[21] 的研究结果相符。

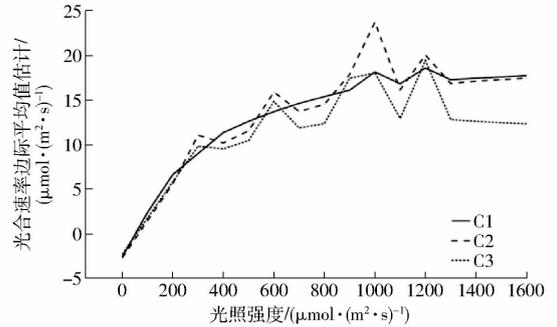


图 2 不同 CO₂ 增施浓度的三因素方差分析

Fig. 2 Three-factor variance analysis of different enrichment concentration of CO₂

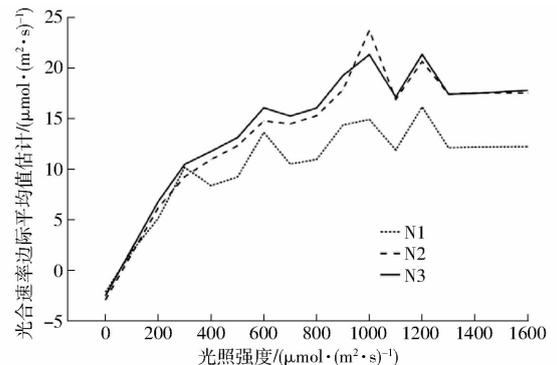


图 3 不同营养液含氮量的三因素方差分析

Fig. 3 Three-factor variance analysis of different nitrogen content in nutrient solution

由图 3 可知, 各营养液含氮量处理组的光合速率在光强 1 000 μmol/(m²·s) 以内, 均随光照强度的增加而增加。N1 组整体光合速率低于 N2 和 N3, 在光强 1 200 μmol/(m²·s) 处光合速率达到饱和, 随后呈明显的下降趋势。N2 和 N3 在 1 000 μmol/(m²·s) 光合速率达到饱和。N3 光合速率明显高于 N1, 但较 N2 增加不大, 且在光强为 1 400 μmol/(m²·s) 处与 N2 交于一点, 随后变化趋势基本一致, 说明 N2 和 N3 具有交互效应。可见在番茄的栽培过程中, 过量增加氮肥对番茄的生长并无太大的意义, 还会增加成本和番茄中硝酸盐的含量, 影响番茄的质量。因此需要对日光温室内的 CO₂ 浓度和氮肥施加量根据作物的需要和日光温室内的环境进行调节。

2.4 番茄光合速率回归模型建立与验证

2.4.1 变量选入方法的确定

使用 SPSS 22.0 对所得数据进行回归分析,自变量的选择采用逐步和输入两种方式。逐步是选择对解释变量贡献最大,并满足判断条件的解释变量进入回归方程,然后将模型中符合剔除数据的变量移出模型,重复进行直到没有变量被引入或者剔除,即可得到回归方程。输入是将解释变量列表中的解释变量全部选入回归模型。逐步和输入两种方法的模型参数如表 4 所示。

表 4 模型参数

Tab. 4 Model parameters

选入方式	R	调整后的 R ²	标准偏差
逐步	0.885	0.782	4.643
输入	0.870	0.755	4.916

由表 4 可知,逐步选择方法的相关系数 R 为 0.885,调整后的 R²为 0.782,均大于输入选择方式的相关系数(0.870)和调整后的 R²(0.755),且标准偏差较小。因此本文选择逐步选择解释变量的方法进行模型构建。

2.4.2 方差分析和回归诊断

多元线性回归拟合过程中方差分析结果如表 5 所示,回归平方和为 140 348.170,残差平方和为 21 117.438,总计为 161 465.608,回归平方和占了总平方和的 86.9%,说明线性模型解释了总平方的 86.9%,模型拟合的效果较好。多元线性回归要求回归模型的随机误差符合正态分布。图 4 为标准化残差的直方图。可以看出,回归模型的标准残差基本符合正态分布的要求,回归效果比较理想。

表 5 方差分析

Tab. 5 Variance analysis

回归模型	平方和	自由度	平均值平方
回归	140 348.170	7	20 049.739
残差	21 117.438	874	24.162
总计	161 465.608	881	

2.4.3 回归模型参数的确定

回归模型的统计系数如表 6 所示。由表 6 可知各解释变量的显著性概率均小于显著性检验标志 0.05,通过了显著性检验。由非标准化回归系数得出整个番茄生长期不同的 CO₂ 增施浓度和营养液氮肥含量下的光合速率的预测模型为

$$Y = 6.179 + 0.018X_1 + 18.256X_2 + 0.007X_3 - 1.95X_4 - 0.006X_5 + 0.477X_6 - 11.742X_7 \quad (9)$$

标准化回归系数是所有的变量按统一方法标准

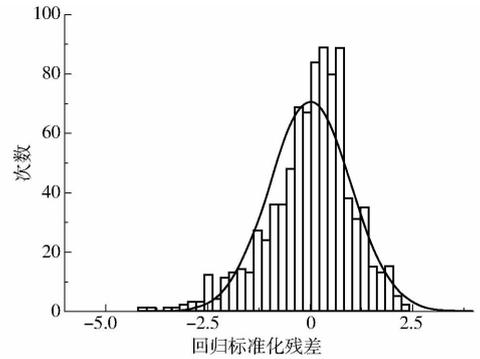


图 4 回归的标准化残差直方图

Fig. 4 Normalized residual histogram of regression

表 6 模型回归系数统计

Tab. 6 Regression coefficient statistics of model

模型	非标准化系数	标准化系数	sig. 值
常数	6.179		0.006
样品室 CO ₂ 浓度	0.018	1.066	<0.000 1
胞间 CO ₂ 浓度	-0.006	-0.242	<0.000 1
蒸腾速率	18.256	1.166	<0.000 1
样品室光强	0.007	0.243	<0.000 1
样品室温度	-1.950	-0.581	<0.000 1
样品室空气湿度	0.477	0.333	<0.000 1
气孔导度	-11.742	-0.953	<0.000 1

化后拟合的回归方程中各标准化变量的系数,具有可比性。从各个解释变量的标准化系数可以看出样品室 CO₂ 浓度、蒸腾速率、样品室光强和样品室空气湿度对番茄光合速率的影响为正,且蒸腾速率的影响最大。当植物长出叶片后采用蒸腾拉力来吸收水分,蒸腾作用所产生的蒸腾拉力为植物输送水分以及矿物质,也为植物进行光合作用提供营养源。水分、光照和 CO₂ 是植物进行光合作用的原料,当其在一定范围内增加时,光合速率也会随之增加。所以本实验中种蒸腾速率、水分、光照和叶室内的 CO₂ 浓度与光合速率的相关性为正。

胞间 CO₂ 浓度与光合速率呈负相关说明光合速率随光强增加而增高主要是叶肉细胞的光合活性增大的结果,而不是胞间 CO₂ 浓度降低的结果,与陈根云等^[22]的研究结果吻合。气孔导度表示的是气孔张开的程度。气孔导度越大,进入细胞的二氧化碳就越多,光合作用应该增加。这里气孔导度和光合速率呈负相关,可能是因为本次实验是在夏季的日光温室中进行的,由于温室内的温度过高,蒸腾速率上升,植物必须关闭一部分气孔来保持正常的生理活动。样品室的温度与光合速率呈负相关也是因为温室内的温度过高而导致的光合速率下降。由以上分析可知,模型的回归结果与温室内的实际情况相符,可对夏季温室番茄光合速率进行准确预测。

3 结论

(1) 以不同的 CO₂ 增施浓度和营养含氮量交互实验为基础,以光合速率仪器采集到的叶室内的环境因子为解释变量,以光合速率仪采集到的番茄的单叶净光合速率为被解释变量,建立了番茄整个生长周期的光合速率的预测模型,相关系数为

0.885,调整后的 R^2 为 0.782,模型的拟合效果较好,误差较小。

(2) 利用已建立的回归模型对不同的 CO₂ 浓度和营养液氮肥含量下的光合速率的进行预测,效果良好,可为温室 CO₂ 浓度和营养液氮肥含量的调节提供理论依据。

参 考 文 献

- 涂华玉. 作物产量形成中源和库的关系(综述)[J]. 新疆农业科学, 1985(4):14-16.
TU Yuhua. Relationship between source and sink in crop yield formation(review)[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 1985(4): 14-16. (in Chinese)
- 许大全. 光合速率、光合效率与作物产量[J]. 生物学通报, 1999(8):11-13.
XU Daquan. Photosynthetic rate, photosynthetic efficiency and crop yield [J]. Bulletin of Biology, 1999(8):11-13. (in Chinese)
- 李少昆. 关于光合速率与作物产量关系的讨论(综述)[J]. 石河子大学学报,1998(增刊):117-126.
LI Shaokun. A discussion on the relationship between leaf photosynthetic rate and crop yield(review)[J]. Journal of Shihezi University, 1998(Supp.):117-126. (in Chinese)
- 杨克彬, 孟凡志, 郭先锋. 日光温室冬季增施 CO₂ 对切花红掌光合作用及生长发育的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6):1941-1947.
YANG Kebin, MENG Fanzhi, GUO Xianfeng. Effects of CO₂ fertilization on photosynthesis and growth of cut Anthurium and raeanum in solar greenhouse in winter[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6):1941-1947. (in Chinese)
- 袁洪波. 日光温室封闭式栽培系统关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
YUAN Hongbo. Study on key techniques of enclosed cultivation system in solar greenhouse [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 杨志刚, 崔世茂, 胡栓红, 等. 长期 CO₂ 加富对日光温室秋冬茬甜椒光合生理及低温适应性的影响[J]. 北方园艺, 2017(13): 84-90.
YANG Zhigang, CUI Shimao, HU Shuanhong, et al. Effects of CO₂ enrichment on photosynthetic physiology and low temperature resistance of pepper in solar greenhouse at autumn-winter season[J]. Northern Horticulture, 2017(13):84-90. (in Chinese)
- 潘璐, 李志鑫, 崔世茂, 等. 高温、加富 CO₂ 耦合对温室黄瓜光合作用及叶片衰老的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(3): 168-173.
PAN Lu, LI Zhixin, CUI Shimao, et al. Effect of high temperature and elevated CO₂ coupling on photosynthesis and leaf senescence of cucumber in greenhouse[J]. Acta Agriculture Boreali-Sinica, 2017, 32(3):168-173. (in Chinese)
- 郝敏. 施肥对番茄功能特征与光合速率及果实产量关系的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
HAO Min. Effects of fertilization on the relationship between functional traits and photosynthetic rate, fruit yields of tomato[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. (in Chinese)
- 杨慧, 曹红霞, 刘世和, 等. 水氮耦合对温室番茄光合特性与产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4):58-62.
YANG Hui, CAO Hongxia, LIU Shihe, et al. Effects of water and nitrogen coupling on photosynthetic characteristics and yield of greenhouse tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(4):58-62. (in Chinese)
- 姜慧敏, 张建峰, 杨俊诚, 等. 不同施氮模式对日光温室番茄产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):158-165.
JIANG Huimin, ZHANG Jianfeng, YANG Juncheng, et al. Effects of different models of applying nitrogen fertilizer on yield and quality of tomato and soil fertility in greenhouse[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 158-165. (in Chinese)
- MATAMALA R, DRAKE B G. The influence of atmospheric CO₂ enrichment on plant-soil nitrogen interactions in a wetland plant community on the Chesapeake Bay[J]. Plant and Soil, 1999, 210(1):93-101.
- 吕宁, 尹飞虎, 高志建, 等. CO₂ 浓度升高与氮肥施用对棉田土壤氮素的影响[J]. 干旱地区研究, 2014, 31(6):1017-1023.
LÜ Ning, YIN Feihu, GAO Zhijian, et al. Impact of CO₂ density and nitrogen fertilizer application on soil nitrogen in drip irrigation cotton field[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(6):1017-1023. (in Chinese)
- 李建明, 张勇, 邹志荣, 等. 甜瓜苗期单叶光合模型建立, 参数估算和验证[J]. 上海交通大学学报, 2008, 26(5): 462-465.
LI Jianming, ZHANG Yong, ZOU Zhirong, et al. Photosynthesis model establishment, parameter estimation and validation for single leaves of musk melon seedling[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 26(5):462-465. (in Chinese)
- 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)
- 毕玉革, 麻硕士, 崔红梅, 等. 北方干寒地区日光温室 CO₂ 预测模型建立与冬季试验[J]. 农业机械学报, 2010,

- 41(12):183-189.
 BI Yuge, MA Shuoshi, CUI Hongmei, et al. Establishment of CO₂ prediction model and winter experiment in solar greenhouse in drought cold area of North China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):183-189. (in Chinese)
- 16 季宇寒, 李婷, 张漫, 等. 基于 WSN 的温室 CO₂ 气肥优化调控系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 201-207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S033&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.033.
 JI Yuhan, LI Ting, ZHANG Man, et al. Design of CO₂ fertilizer optimizing control system on WSN[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.):201-207. (in Chinese)
- 17 王建林, 温学发, 赵风华, 等. CO₂ 浓度倍增对 8 种作物叶片光合作用、蒸腾作用和水分利用效率的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(5): 438-446.
 WANG Jianlin, WEN Xuefa, ZHAO Fenghua, et al. Effects of doubled CO₂ concentration on leaf photosynthesis, transpiration and water use efficiency of eight crop species[J]. Journal of Plant Ecology, 2012, 36(5):438-446. (in Chinese)
- 18 王艳. 异常点检测后的偏最小二乘回归模型[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(19): 4556-4558.
 WANG Yan. Partial least squares regression model after outlier detection[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(19):4556-4558. (in Chinese)
- 19 王惠文, 孟洁. 多元线性回归的预测建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4):500-504.
 WANG Huiwen, MENG Jie. Predictive modeling method based on multiple linear regression[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(4):500-504. (in Chinese)
- 20 朱苹. 多元线性回归模型在北京市用水量预测中的应用[J]. 科教导刊, 2015(34):167-168.
 ZHU Ping. Application of multivariate linear regression model in predict the amount of water in Beijing [J]. Science Journal, 2015(34):167-168. (in Chinese)
- 21 王春乙, 郭建平, 王修兰, 等. CO₂ 浓度增加对 C3、C4 作物生理特性影响的实验研究[J]. 作物学报, 2000, 26(6):813-817.
 WANG Chunyi, GUO Jianping, WANG Xiulan, et al. The experimental study of the effects of CO₂ concentration enrichment on physiological feature of C3 and C4 crops[J]. Acta Agronomica Sinica, 2000, 26(6):813-817. (in Chinese)
- 22 陈根云, 陈娟, 许大全, 等. 关于净光合速率和胞间 CO₂ 浓度关系的思考[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(1):64-66.
 CHEN Genyun, CHEN Juan, XU Daquan, et al. Thinking about the relationship between net photosynthetic rate and intercellular CO₂ concentration[J]. Plant Physiology Communication, 2010, 46(1):64-66. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 159 页)

- 24 王爱玉, 张春庆, 吴承来, 等. 玉米叶绿素含量快速测定方法研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(2):97-100.  
 WANG Aiyu, ZHANG Chunqing, WU Chenglai, et al. Study on a fast method of testing chlorophyll content in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(2):97-100. (in Chinese)
- 25 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 等. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12):1543-1548.  
 JIANG Lifen, SHI Fuchen, WANG Huatian, et al. Application tryout of chlorophyll meter SPAD-502 in forestry[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12):1543-1548. (in Chinese)
- 26 郝勇, 孙旭东, 潘圆媛, 等. 蒙特卡罗无信息变量消除方法用于近红外光谱预测果品硬度和表面色泽的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5):1225-1229.  
 HAO Yong, SUN Xudong, PAN Yuanyuan, et al. Detection of firmness and surface color of pear by near infrared spectroscopy based on Monte Carlo uninformative variables elimination method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(5):1225-1229. (in Chinese)
- 27 MOROS J, KULIGOWSKI J, QUINTAS G, et al. New cut-off criterion for uninformative variable elimination in multivariate calibration of near-infrared spectra for the determination of heroin in illicit street drugs [J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 630(2):150.
- 28 张晓羽, 李庆波, 张广军. 基于稳定竞争自适应重加权采样的光谱分析无标模型传递方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5):1429-1433.  
 ZHANG Xiaoyu, LI Qingbo, ZHANG Guangjun. Calibration transfer without standards for spectral analysis based on stability competitive adaptive reweighted sampling[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(5):1429-1433. (in Chinese)
- 29 MOREIRA S A, SARRAGUCA J, SARAIVA D F, et al. Optimization of NIR spectroscopy based PLSR models for critical properties of vegetable oils used in biodiesel production[J]. Fuel, 2015, 150:697-704.
- 30 岳学军, 全东平, 洪添胜, 等. 柑橘叶片叶绿素含量高光谱无损检测模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1):294-302.  
 YUE Xuejun, QUAN Dongping, HONG Tiansheng, et al. Non-destructive hyperspectral measurement model of chlorophyll content for citrus leaves[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1):294-302. (in Chinese)