doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.01.032

设施生菜光合和蒸腾速率影响因素分析与预测模型构建

张增林[1]　杨　杰[1]　郭常江[1]　韩文霆[1]　杨振超[2]
(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;
2.西北农林科技大学园艺学院,陕西杨凌 712100)

摘要:光合速率及蒸腾速率是植物的 2 个重要生理指标。在全人工环境下,选取意大利生菜作为对象,设计并开展多环境变量对生菜光合速率及蒸腾速率影响的嵌套实验,得到环境因子对生菜光合速率及蒸腾速率的影响规律,应用神经网络构建生菜幼苗期光合速率及蒸腾速率预测模型。针对幼苗期生菜,选择温度、相对湿度、光子通量密度(Photosynthetic photon flux density, PPFD)及 CO_2 浓度共 4 个环境影响因素,采用随机森林方法对数据进行相关性分析。结果表明,与蒸腾速率相关性由大到小的因素依次为 CO_2 浓度、温度、相对湿度、PPFD,与光合速率相关性由大到小的因素依次为 CO_2 浓度、PPFD、温度、相对湿度;采用枚举法确定隐藏层节点数和训练函数,通过遗传算法优化 BP 神经网络的初始权值和阈值,构建 GA-BP 神经网络生理指标预测模型。应用测试数据对模型进行验证,光合速率及蒸腾速率预测值与实测值的决定系数分别为 0.962 12、0.979 44,均方根误差(RMSE)分别为 2.983 2 μmol/(m^2·s)、0.001 435 8 mol/(m^2·s),表明 GA-BP 神经网络在模型精度和迭代次数方面性能显著提高。研究结果可为设施生菜生产环境调控提供有效依据。

关键词:设施生菜;光合速率;蒸腾速率;预测模型;相关性分析;GA-BP 神经网络
中图分类号:S126　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)01-0339-11　　**OSID**:

Analysis and Model Construction of Factors Affecting Photosynthesis and Transpiration Rates in Facility Lettuce

ZHANG Zenglin[1]　YANG Jie[1]　GUO Changjiang[1]　HAN Wenting[1]　YANG Zhenchao[2]
(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *College of Horticulture*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Photosynthesis rate and transpiration rate are crucial physiological indicators in plants. In a controlled artificial environment, Italian lettuce was chosen as the research subject. A nested experiment was conducted to investigate the multivariate impact on the photosynthesis rate and transpiration rate of lettuce. The study unveiled patterns of environmental factors affecting these rates, leading to the construction of a neural network prediction model for photosynthesis rate and transpiration rate during the seedling phase of lettuce. For lettuce seedlings, four factors were selected: temperature, relative humidity, photosynthetic photon flux density (PPFD), and environmental CO_2 concentration. Using the random forest method, a correlation analysis of the data was carried out. The results revealed that factors strongly correlated with the transpiration rate, in descending order, were CO_2 concentration, temperature, relative humidity, and PPFD. Meanwhile, for the photosynthesis rate, the factors were CO_2 concentration, PPFD, temperature, and relative humidity. A GA-BP neural network physiological indicator prediction model was developed, employing the enumeration method to determine the number of hidden layer nodes and training functions, and optimizing the initial weights and thresholds of the BP neural network through a genetic algorithm. Testing with actual data, the determination coefficients of predicted and actual values for photosynthesis rate and transpiration rate were 0.962 12 and 0.979 44, respectively, with root mean square errors (RMSE) of 2.983 2 μmol/(m^2·s) and 0.001 435 8 mol/(m^2·s). This demonstrated the significantly improved performance of the GA-BP neural network in terms of model accuracy and iteration times. In summary, the research result can provide a valuable basis for

收稿日期:2023-08-11　修回日期:2023-10-27
基金项目:科技部中央引导地方项目(XZ202202YD0002C)
作者简介:张增林(1976—),男,副教授,博士,主要从事智慧农业关键技术研究,E-mail:zzlin@nwafu.edu.cn

environmental regulation in facility lettuce production.

Key words: facility lettuce; photosynthetic rate; transpiration rate; prediction model; correlation analysis; GA - BP neural network

0 引言

光合速率及蒸腾速率对植物有机物积累、水分调节及营养物分配具有重要影响,是植物的重要生理指标。研究表明光合速率及蒸腾速率受多种环境因素的影响。冯海月等[1]发现大气温湿度会造成茎流速率变化,进而影响植株蒸腾速率;钟欣平等[2]认为蒸腾速率的变化受环境温度、光照强度和相对湿度的影响。不同作物对环境变化表现有明显的差异性。LAZA 等[3]发现花生在较高 CO_2 水平生长可提高蒸腾速率和光合速率;KANEMOTO 等[4]发现高 CO_2 则会抑制大豆蒸腾速率和光合速率;范金杰等[5]发现 CO_2 升高持续时间增加,作物蒸腾速率下降程度逐渐减小甚至消失,出现 CO_2 驯化现象;陈丹艳[6]发现 CO_2 倍增会导致生菜蒸腾速率、净光合速率等光合指标随倍增次数增加;杨沈斌等[7]认为植物光合作用对温度变化敏感,其敏感性因作物品种及生长环境不同而发生变化。以上研究揭示了温度、相对湿度、光照强度及 CO_2 浓度对作物光合及蒸腾速率的影响规律,但在构建光合及蒸腾模型研究方面有所欠缺。

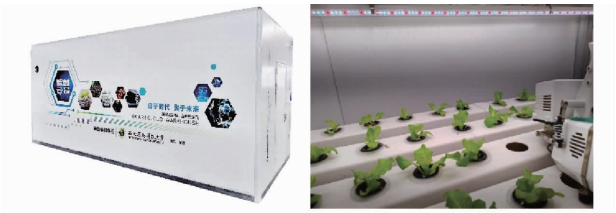
部分学者对光合及蒸腾模型进行了研究[8-10],蒸腾模型的构建大多基于 Penman - Monteith 机理模型,其已被广泛用于温室及大田蒸腾计算[11-13],但 Penman - Monteith 模型参数众多,需要考虑空气动力学阻力参数等,对于不同环境,参数值往往不同,在设施农业中推广应用具有一定的局限性。同时也有学者将非线性拟合、BP 神经网络用于光合速率模型构建[14-16],有效提高了模型拟合度。非线性拟合准确度受拟合最高次数影响较大,容易出现过拟合,传统 BP 神经网络容易陷入局部极小、出现过拟合现象,导致模型精度低、建模时间长[17]。结合遗传算法对 BP 神经网络进行参数寻优可有效解决以上问题。

综上所述,本研究针对温度、相对湿度、光子通量密度(Photosynthetic photon flux density, PPFD)及 CO_2 浓度 4 个环境因素设计嵌套实验,采用随机森林分析光合及蒸腾速率的环境影响因素相关性,运用遗传算法优化 BP 神经网络,构建基于 GA - BP神经网络的光合及蒸腾速率预测模型,以期为设施生菜生产环境调控提供模型支持和有效依据。

1 实验设计

1.1 实验环境与材料

实验于 2023 年 3—5 月在陕西省杨凌农业高新技术产业示范区实验基地(108° 07′ 8.84″ E, 34°14′41.67″N)进行。实验生菜品种为“意大利生菜”,在模块化植物工厂内栽培,实物如图 1 所示,箱体长约 7 m,宽 3 m,高 2.8 m,栽培架共有 5 层可种植,总栽培面积约 75 m^2。通过水培方式进行种植,幼苗长至 3 叶 1 心时定植至栽培架,当意大利生菜苗子叶完全展开且第 1 片功能叶叶片长度超过 5 cm 时,选择在人工光源下生长状况良好、长势均一的生菜苗进行实验测试。在整个实验周期内,模块化植物工厂的光周期、温度控制等日常管理工作按日常操作进行。在此过程中,除添加营养液外,不使用任何农药与激素类药物。



(a) 模块化植物工厂 (b) 模块化植物工厂内部图

图 1 实验用模块化植物工厂

Fig. 1 Modular plant factory for experiments

1.2 实验方法

采用 Li - 6800 型便携式测量系统(LI - COR 公司,美国)测定生菜叶片净光合速率、蒸腾速率等生理指标。实验选择生菜幼苗功能叶中长势良好、无遮挡、受光条件好的叶片作为测试叶,测量前充分诱导夹入叶室的叶片。环境相对湿度约为 40%,意大利生菜适宜高湿环境,但 Li - 6800 型便携式测量系统叶室在高湿环境下会发生水汽凝结,损伤仪器,故设定实验相对湿度为 40%、50%、60%、70%。适合意大利生菜生长的温度范围为 18 ~ 38℃,温度过低,意大利生菜生长缓慢甚至出现冻伤,温度过高易造成热损伤。为使结果显著,温度间隔选取 5℃,故实验温度为 18、23、28、33、38℃。实验 CO_2 浓度为 0、100、300、600、1 000 μmol/mol,PPFD 为 0、100、300、600、1 000、1 500 μmol/(m^2·s),其中光源参数设置红光占比大于 90%,记录实验过程中意大利生菜叶片在不同环境下对应的净光合速率、蒸腾速率等生理指标。

测量 100(4×5×5)组相对湿度、温度与 CO_2 浓度嵌套组合条件下的 PPFD-光合速率曲线，其中每条 PPFD-光合速率曲线包含 6 个 PPFD 值。为减少数据偶然性，每组实验数据随机选择 3 株幼苗进行测量，获取 1 800 组(100×6×3)实验数据，剔除因环境变化引起的误差数据，对样本取均值，获取 600 组样本数据作为实验数据集。

2　实验结果与分析

应用实验数据集，绘制不同环境变量组合条件下光合速率、蒸腾速率变化曲面，结合意大利生菜生理机制，分析相对湿度、PPFD、温度及 CO_2 浓度对光合速率、蒸腾速率的影响。

2.1　不同温度下 PPFD 与 CO_2 浓度对光合速率的影响

在实验相对湿度范围内，不同相对湿度下 PPFD 与 CO_2 浓度对光合速率的影响规律相似，且意大利生菜适宜较高相对湿度下生长，故选用环境相对湿度为 60%、不同温度下实验数据绘制 PPFD-CO_2 浓度-光合速率响应曲面，如图 2 所示。

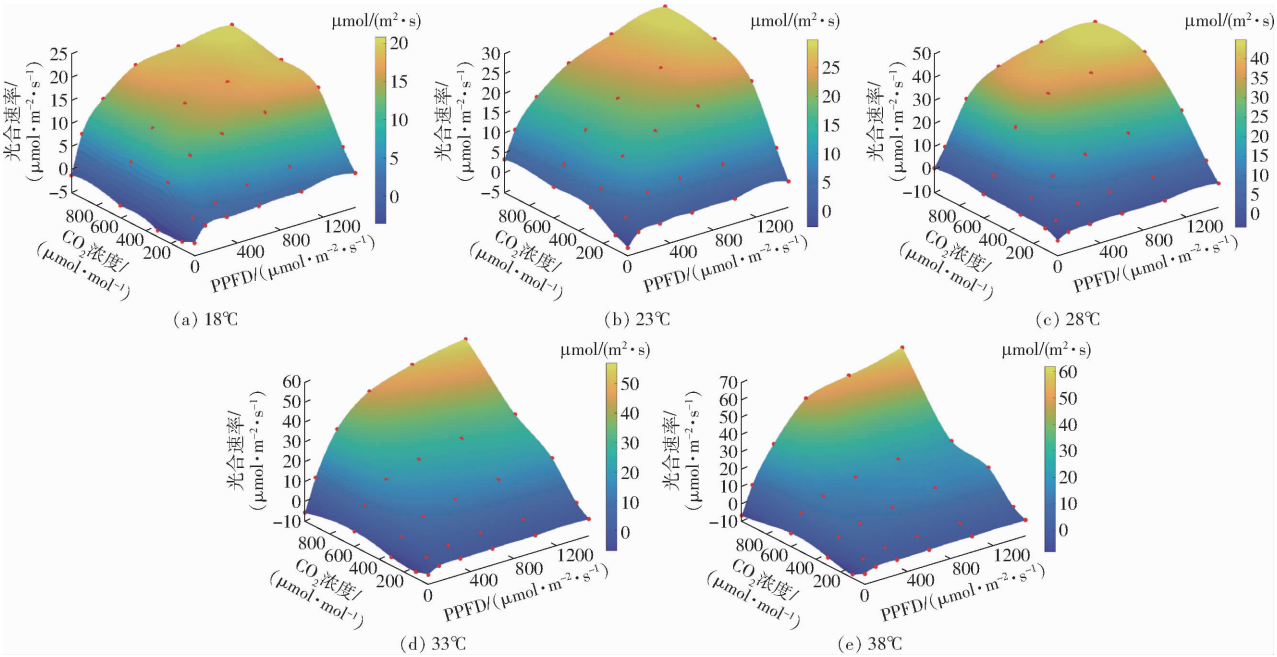


图 2　相对湿度 60% 时不同温度下 PPFD、CO_2 浓度对光合速率影响的响应曲面

Fig. 2　Effects of PPFD and CO_2 concentrations on photosynthetic rate at different temperatures with 60% relative humidity

图 2 中，X 轴与 Z 轴组合，获得 PPFD-光合速率响应曲线，Y 轴与 Z 轴组合，获得 CO_2 浓度-光合速率响应曲线。分析不同温度下的 PPFD-光合速率响应曲线，PPFD 增加，光合速率首先快速上升，PPFD 进一步增加，光合速率上升趋势逐渐缓慢。观察图 2a～2c 的 CO_2 浓度-光合速率响应曲线，CO_2 浓度增加，光合速率首先快速上升，进而趋势逐渐缓慢。这两者变化趋势与辛萍萍[18]的研究结果相同。分析图 2 发现，在 PPFD 较低或 CO_2 浓度较低的情况下，光合速率都处于负值。依据植物光合机理，在 PPFD 较低或 CO_2 浓度较低的情况下，植物缺乏进行光合过程所需的原料与能量。当温度范围为 18～28℃时，随着温度的升高，相同 CO_2 浓度与 PPFD 情况下，光合速率逐渐升高。光合速率上升的主要原因是温度从低温逐渐升高，提高了酶的活性，促进了光合作用，温度继续升高(>28℃)，光合速率逐渐降低(除 CO_2 浓度为 1 000 μmol/mol)，此时高温对植物造成损伤，如酶活性降低等，成为光合速率下降的主要原因[19]。当 CO_2 浓度为 1 000 μmol/mol 且 PPFD 一定时，在实验温度 18～38℃范围内，光合速率随着温度升高而升高。这表明，在较低 CO_2 浓度范围内，意大利生菜的最佳光合速率所在的温度处于 28～33℃范围内，但较高 CO_2 浓度时，意大利生菜最佳光合速率所在的温度则高于这一范围。说明 CO_2 浓度升高会改变生菜光合作用的最适温度。这与谢立勇等[20]研究 CO_2 对光合作用影响的结果相同。一种合理的推测为高温条件下，光合作用的光呼吸以及相应的碳损失加剧，而 CO_2 升高则会抑制光呼吸，导致总碳损失减少。因此，CO_2 浓度的升高将显著调整光合作用的适宜温度[21]。

2.2　不同 CO_2 浓度下温度与相对湿度对光合速率的影响

实验 PPFD 范围内，不同 PPFD 下温湿度对光合速率影响规律相似，故 PPFD 选取 600 μmol/(m²·s)，不同 CO_2 浓度下实验数据绘制温度-相对湿度-光合速率响应曲面，如图 3 所示。

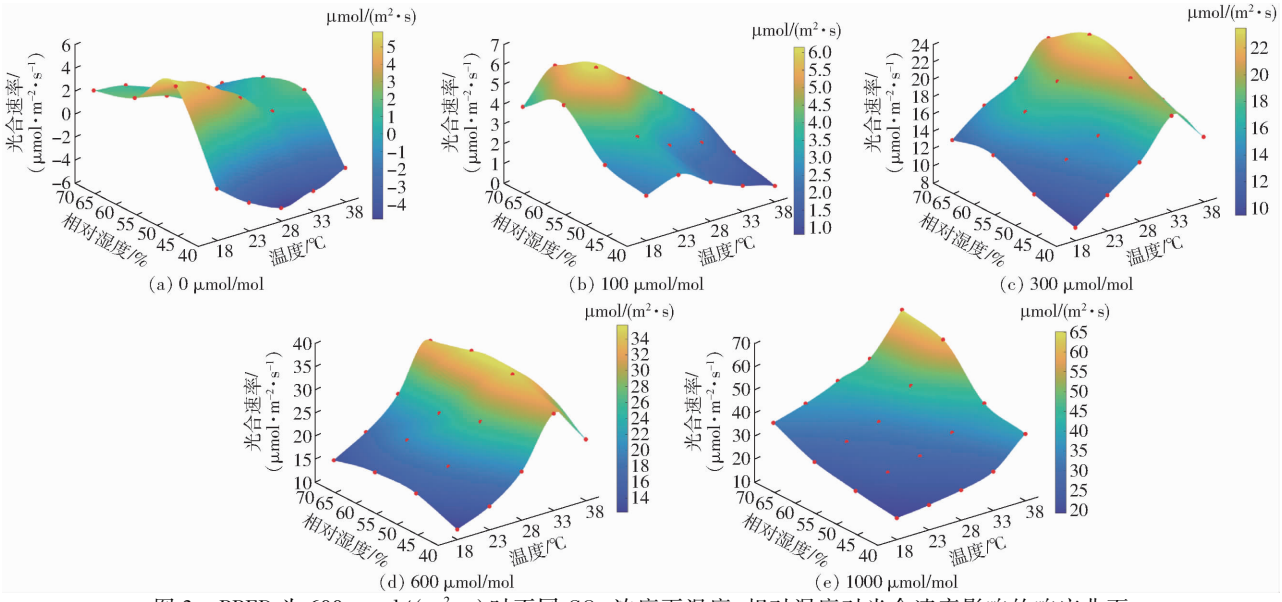


图 3 PPFD 为 600 μmol/(m²·s)时不同 CO_2 浓度下温度、相对湿度对光合速率影响的响应曲面

Fig. 3 Effect of temperature and relative humidity on photosynthetic rate at different CO_2 concentrations with PPFD of 600 μmol/(m²·s)

根据图 3b ~ 3d,不同温度条件下的温度-光合速率响应曲线显示光合速率随着温度的增加先上升后下降,随着 CO_2 浓度升高,光合作用的适宜温度也在发生变化,即 CO_2 浓度为 100 μmol/mol 时,最适宜温度在 18 ~ 28℃ 范围内。CO_2 浓度为 300 ~ 600 μmol/mol 时,最适宜温度在 28 ~ 38℃ 范围内,CO_2 浓度为 1 000 μmol/mol 时,在实验温度范围内,光合速率处于上升趋势。这说明 CO_2 浓度较高时,意大利生菜在较高温度下会生长较快,这与周宁[22]的研究结果相同。这样的变化趋势与光合作用生理机制有关,光合作用主要由光依赖阶段和光独立阶段组成。在光依赖阶段,光能被吸收并转化为化学能。在光独立阶段,这种化学能被用于将 CO_2 转化为有机物质(例如葡萄糖)。光独立阶段的主要反应被称为 Calvin 循环,其需要各种酶进行反应催化[19],温度升高,酶活性增强,此时光合速率增强,温度超过适宜温度,酶活性开始下降,导致光合速率下降。在 CO_2 浓度为 1 000 μmol/mol 时,光合速率随温度上升而增加,一种可能的解释为反应物 CO_2 充足减少了酶活性下降对光合速率的负面影响,但具体影响机制仍需要进一步探索。

CO_2 浓度为 0 μmol/mol 时,没有进行光合作用的必要反应物质。这种情况下,作物的呼吸和光呼吸过程对光合速率产生了较大影响。呼吸是一种细胞过程,有机化合物(如糖类)被分解以释放能量,用于细胞的代谢活动。它发生在所有生物细胞中,对生物的生存至关重要。光呼吸则是植物在光合作用过程中发生的一种生化过程,被认为是主要光合作用过程的一个低效的副反应。当 CO_2 与 O_2 浓度比值较低且温度较高时,会触发光呼吸[23]。此时环境更有利于植物进行加氧反应,导致毒性化合物2-磷酸乙醇酸(2-photorespiration)的产生和分解[24],这个过程降低了碳固定的效率。CO_2 浓度为 0 μmol/mol 时,温度升高,呼吸作用增强,净光合速率逐渐降低。当温度升高到一定程度时(>28℃),作物同时进行光呼吸,此时碳固定效率下降,损失的碳以 CO_2 形式放出,导致封闭叶室内有更多的 CO_2 气体,光合速率开始上升,所以该浓度下温度-光合速率响应曲线呈现先下降后上升的趋势。

CO_2 浓度为 0 μmol/mol 时,光合速率在相对湿度 40% ~ 50% 范围内上升,50% ~ 70% 范围内下降;CO_2 浓度为 100 ~ 300 μmol/mol 时,光合速率在相对湿度 40% ~ 60% 范围内上升,60% ~ 70% 范围内下降;CO_2 浓度继续升高,光合速率变化趋势逐渐改变,CO_2 浓度为 1 000 μmol/mol 时,在实验相对湿度范围内,光合速率随相对湿度增加而上升。空气相对湿度增加,饱和水汽压差(Vapor pressure difference,VPD)减小,气孔导度降低[25],作物体内的水分更多地被用于光合作用,相对湿度继续增加时,气孔导度降低导致 CO_2 摄入量的减少,此时 CO_2 成为光合作用的限制因素,光合速率降低。环境 CO_2 充足时,气孔导度较小时摄入的高浓度 CO_2 气体仍能继续供应光合作用,光合速率随相对湿度增加呈上升趋势。

2.3 不同温度下 PPFD 与 CO_2 浓度对蒸腾速率的影响

实验相对湿度范围内,不同相对湿度下 PPFD

与 CO_2 对蒸腾速率的影响规律相似，且意大利生菜适宜较高相对湿度下生长，故选用环境相对湿度为 60%、不同温度下实验数据绘制 PPFD－CO_2 浓度－蒸腾速率响应曲面，如图 4 所示。

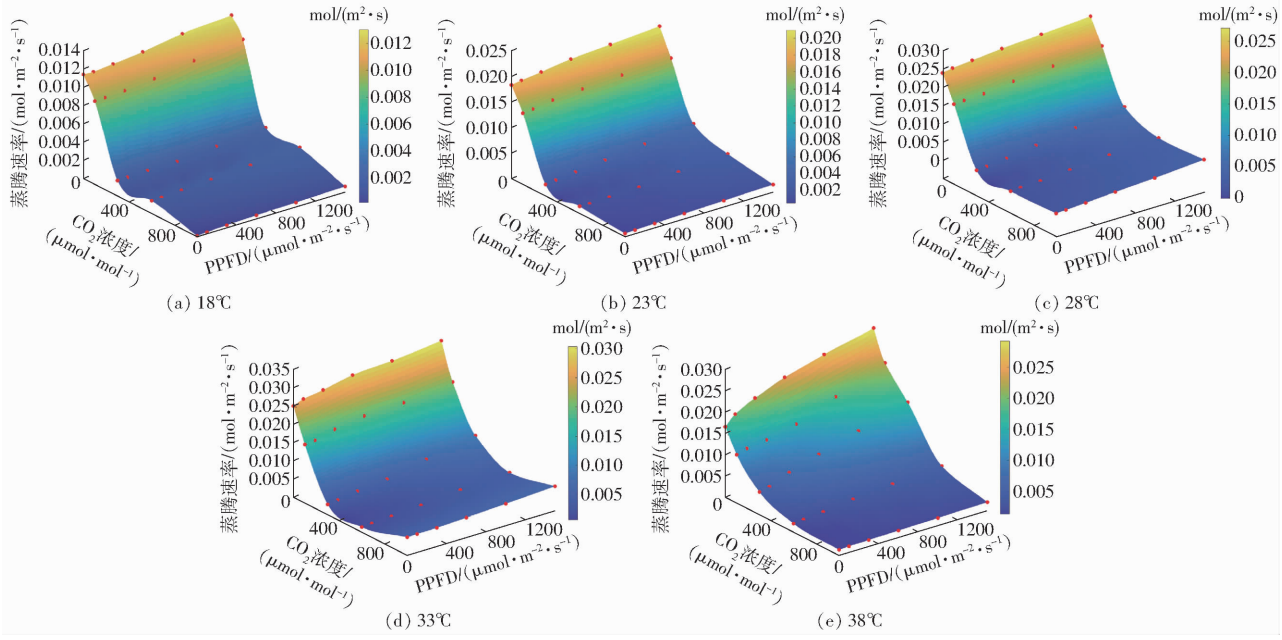


图 4　相对湿度 60% 时不同温度下 PPFD、CO_2 浓度对蒸腾速率影响的响应曲面

Fig. 4　Effects of PPFD and CO_2 concentrations on transpiration rate at different temperatures with 60% relative humidity

相对湿度 60% 时，蒸腾速率与气孔导度相关性如图 5 所示。两种数据单位量纲不同，先对数据归一化，然后绘制相关性为 1 的虚线，坐标轴仍采用原来的单位。数据揭示了气孔导度变化趋势与蒸腾速率变化趋势的显著一致性，证明气孔导度是影响蒸腾速率的重要生理因素。

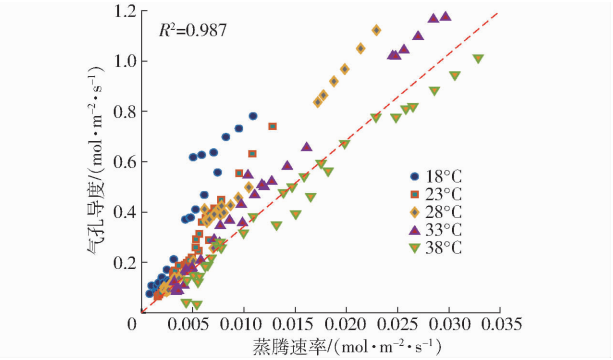


图 5　相对湿度 60% 时气孔导度与蒸腾速率的相关性

Fig. 5　Correlation between stomatal conductance and transpiration rate at 60% relative humidity

根据图 4，不同温度下 PPFD－蒸腾速率响应曲线显示蒸腾速率随着 PPFD 的增加逐渐上升，但上升趋势比较缓慢。结合图 5 与图 6，PPFD 增强导致气孔导度增加，蒸腾速率增加。同时，蒸腾速率上升趋势缓慢表明，PPFD 因素对蒸腾速率的影响较小。在低 PPFD 条件下，气孔导度并未表现出对光照的高敏感性，表明在 PPFD 较低时，PPFD 增加导致的光合速率急速增加并非通过迅速扩大气孔导度以增加 CO_2 摄取量来实现。孙小玲等[26]认为 PPFD 增加造成叶片内部色素含量增加以及色素含量改变，提升了作物对 CO_2 的转化效率，导致光合速率急速增加。在实验范围内，作物的蒸腾速率没有出现饱和区。由于作物叶片的气孔数量及气孔最大开度是有限的，因此蒸腾速率不会随着 PPFD 提高而无限制增加。

不同温度下的 CO_2 浓度－蒸腾速率响应曲线显示蒸腾速率随着 CO_2 增加逐渐下降，直至趋于稳定。CO_2 浓度较低（0～600 μmol/mol）时，蒸腾速率降低速度超过高 CO_2 浓度（600～1 000 μmol/mol）条件下蒸腾速率的降低速度。结合图 6，当 CO_2 浓度从 0 μmol/mol 逐步增加时，气孔导度逐渐减小，且 CO_2 对气孔导度的抑制在较低 CO_2 浓度（0～300 μmol/mol）时比较显著，CO_2 浓度升高，抑制效果减弱。故随着 CO_2 浓度增加，蒸腾速率的下降速率逐渐降低，但仍处于下降的趋势。

2.4　不同 PPFD 下温度与相对湿度对蒸腾速率的影响

实验 CO_2 浓度范围内，不同 CO_2 浓度下温湿度对蒸腾速率的影响规律相似，故选取 CO_2 浓度为 600 μmol/mol，不同 PPFD 的实验数据绘制相对湿度－温度－蒸腾速率响应曲面，如图 7 所示。

不同 PPFD 条件下的相对湿度－蒸腾速率响应曲线显示，随着相对湿度增加，蒸腾速率下降。空气相对湿度会影响到 VPD，这是影响蒸腾作用的关键因素，其计算公式为

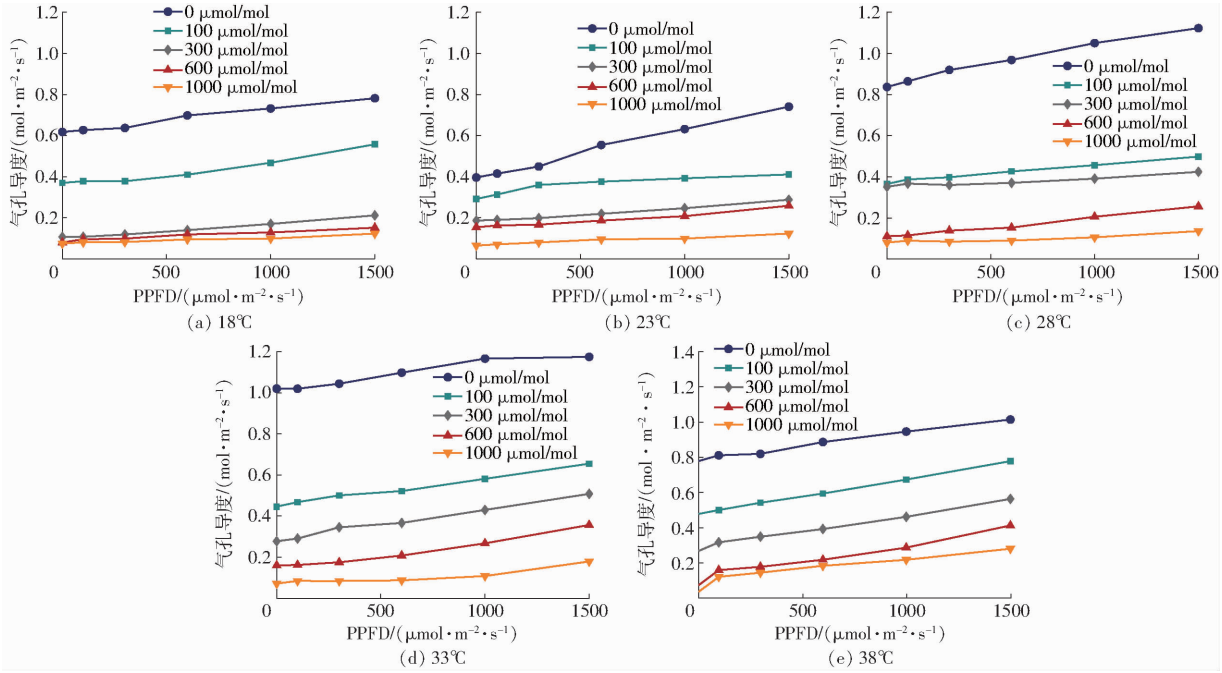


图 6 相对湿度 60% 时不同温度条件下 PPFD 对气孔导度的影响

Fig. 6 Effect of PPFD on stomatal conductance under different temperature conditions with 60% relative humidity

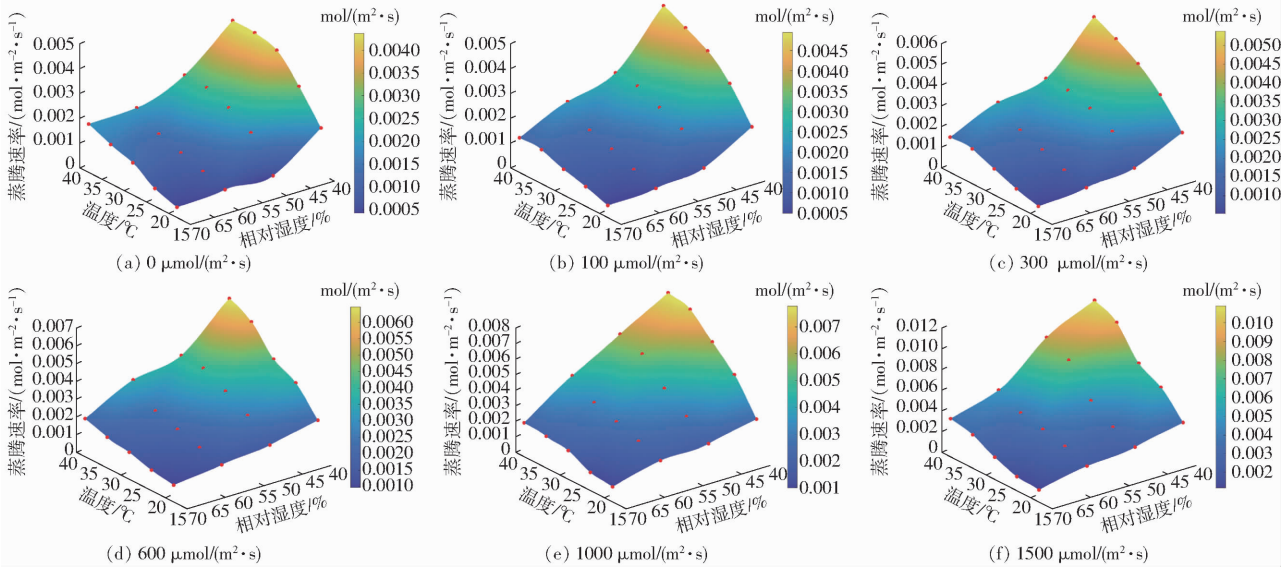


图 7 CO_2 浓度为 600 μmol/mol 时不同 PPFD 下温度与相对湿度对蒸腾速率影响的响应曲面

Fig. 7 Effects of temperature and relative humidity on transpiration rate at different PPFD with CO_2 concentration of 600 μmol/mol

$$VPD = 0.610\,78 e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}(1 - R_H) \quad (1)$$

式中 T——温度,℃ R_H——相对湿度,%

温度一定时,提高空气相对湿度,VPD 降低,导致蒸腾速率逐渐下降。随着相对湿度的持续增加,这一趋势将持续,直至蒸腾速率最终稳定。这与 AMITRANO 等[27]的研究结果相同,对室内栽培生菜进行 VPD 的不同处理,发现高 VPD 组的生菜蒸腾速率高于对照组。分析实验数据,相对湿度对蒸腾作用的影响在不同范围内呈现出的差异没有 CO_2 显著。

在不同的 PPFD 下,温度升高,蒸腾速率呈现上升趋势。从式(1)可得,相对湿度不变的情况下,温度上升,VPD 增大,蒸腾速率上升,符合数据变化趋势,说明数据具有有效性。蒸腾对植物的温度调节和养分输送起着关键作用。当环境温度升高时,蒸腾作用增强可以提高水的汽化热,减少热量积累,对防止叶片过热进而造成热破坏起到了至关重要的作用[28]。

3 光合与蒸腾速率预测模型构建

3.1 数据预处理

参数量纲及数量级会对模型精度产生一定的影响,因此,将 PPFD、CO_2 浓度、温度、相对湿度、光合速率及蒸腾速率各参数的数据进行归一化处理,通

过最小-最大缩放方法(Min－max scaling)将其归一化到区间[0,1],归一化公式为

$$x_{scaled} = (x - x_{\min})/(x_{\max} - x_{\min}) \tag{2}$$

式中　$x_{\max}$、$x_{\min}$——归一化前数据最大值、最小值

x——归一化前数据

x_{scaled}——归一化后数据

以上数据处理方法对样本中的各类因子进行了归一化处理,得到一个建模样本集 $\boldsymbol{P}' = (X'_{PPFD}, X'_{CO_2}, X'_T, X'_H, Y'_{P_n}, Y'_{T_r})$,其输入包括 PPFD($X'_{PPFD}$)、$CO_2$浓度($X'_{CO_2}$)、温度($X'_T$)和相对湿度($X'_H$),输出为光合速率($Y'_{P_n}$)和蒸腾速率($Y'_{T_r}$)。

3.2　因素相关性分析

随机森林(Random forest,RF)是一种集成学习方法,通过计算特征在各决策树上的 Gini 不纯度降低量并求平均得到特征重要性评分。假设随机森林中有 t 棵决策树,特征 j 在第 t 棵决策树上的 Gini 不纯度降低量为 $Imp(j,t)$,则特征 j 的总体重要性得分计算式为

$$\text{Importance}(j) = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} Imp(j,t) \tag{3}$$

其中,$Imp(j,t)$通过计算每个节点在特征 j 上的 Gini 不纯度降低量得出特征 j 在第 t 棵决策树上的 Gini 不纯度降低量,计算公式为

$$Imp(j,t) = \sum_{i \in I_t} p(i)\left(Gini_{\text{total}} - \frac{|C_{i,\text{left}}|}{|C_i|}Gini_{\text{left}} - \frac{|C_{i,\text{right}}|}{|C_i|}Gini_{\text{right}}\right) \tag{4}$$

式中　C_i——样本集合 C 在节点 i 上被划分为左右两个子集的结果

$C_{i,\text{left}}$、$C_{i,\text{right}}$——样本集合 C_i 中被划分到左、右子集的样本索引集合

$p(i)$——样本集合中被划分到节点的样本占比

$Gini_{\text{total}}$——初始节点的 Gini 不纯度

$Gini_{\text{left}}$、$Gini_{\text{right}}$——左、右子节点的 Gini 不纯度

本研究分别以光合速率、蒸腾速率为输出,构建 2 个数据集,每个数据集的输入由 PPFD、CO_2 浓度、温度和相对湿度 4 个因素构成。采用随机森林法计算各个特征的重要性得分,并绘制柱状图,结果如图 8 所示。

通过图 8 可知,影响光合速率的因素相关性由大到小依次为 CO_2 浓度(7.017)、PPFD(5.769)、温度(2.790)、相对湿度(0.319),影响蒸腾速率的因素相关性由大到小依次为 CO_2 浓度(4.200)、温度(4.078)、相对湿度(2.568)、PPFD(0.248)。

3.3　GA－BP 神经网络模型构建

选取温度、相对湿度、CO_2 浓度及 PPFD 作为模型输入,分别以光合速率及蒸腾速率作为模型输出构成数据样本集,通过 GA－BP 神经网络构建光合及蒸腾速率预测模型。

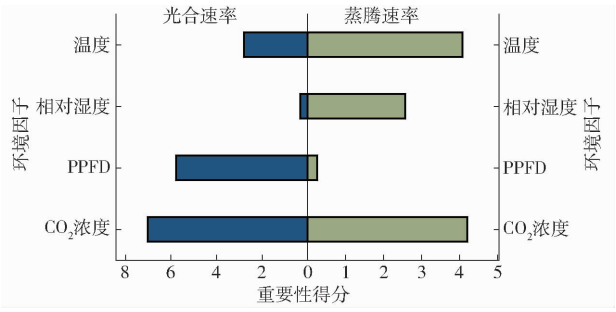


图 8　因素对生理指标的重要性得分

Fig. 8　Importance score of factors on physiological indicators

3.3.1　BP 网络设计与优化

BP 神经网络是基于误差反向传播算法的前向人工神经网络,具有处理非线性信息的能力,其网络结构的不同对网络训练和模型预测有影响,例如隐藏层节点数、训练函数、初始权值与阈值等。本研究中初始权值与阈值采用遗传算法优化,隐藏层节点数、训练函数采用枚举法确定。

网络层数增加虽能提高预测精度,但训练时间呈现几何增长态势,对训练算法的要求也更为严苛,故 BP 神经网络选用单隐藏层设置神经网络结构。采用调节隐藏层节点数解决精度问题。

隐藏层节点数经验公式为

$$q = \sqrt{m+n} + a \tag{5}$$

式中　a——[1,10]区间内的任意整数

n——输出层节点数

q——隐藏层节点数

m——输入层节点数

本文中 $q = \text{sqrt}(4+1) + a$,故在[4,12]个节点数中选择。选取均方根误差(RMSE)评价模型,以光合速率数据集为例,计算出的隐藏层节点数与 RMSE 的关系如图 9 所示。

BP 神经网络 RMSE 随着隐藏层节点数的增加,呈现先降低后升高的规律,在设置 11 个隐藏层节点时,RMSE 最小且 R^2 最高,故本研究选择 11 个隐藏层节点数。

隐藏层节点数确定后,最为重要的是训练函数的选择。除了最早提出的梯度下降训练法,近年来出现了一些改进的训练算法,如 Trainlm(Levenberg－Marquardt 算法,LM)、Traingdx(自适应学习率动量梯度下降法)、Traingdm(动量梯度下降法)、Traingda(自适应梯度下降法)、Trainrp(弹性梯度下降法)、Trainscg(量化共轭梯度法)、Trainoss(一步正割算法)、Trainbr(贝叶斯正则化法)。不同的算法对于

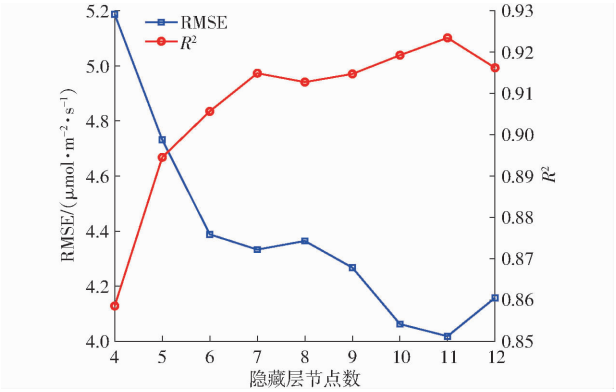


图 9 隐藏层节点数对应数据集 RMSE 及决定系数 R^2

Fig. 9 RMSE and R^2 of dataset corresponding to number of nodes in hidden layer

网络训练的时间和精度差异比较大,为了选择适合模型构建的训练方法,本研究测试各种训练函数迭代次数与所能达到的模型精度,以光合速率数据集为例,测试结果如表 1 所示。

表 1 不同训练函数时 BP 神经网络预测性能参数

Tab. 1 Predictive performance parameters of BP neural network under different training functions

网络训练函数	训练步数	R^2	RMSE/(μmol·m^{-2}·s^{-1})
Trainlm	17	0.923 46	4.077 8
Traingdx	133	0.715 59	7.508 7
Traingdm	1 000	0.207 69	12.808 6
Traingda	134	0.698 89	7.997 1
Trainrp	154	0.893 11	4.622 1
Trainscg	21	0.739 38	7.437 2
Trainoss	27	0.667 31	8.537 4
Trainbr	390	0.915 91	4.284 8

从表 1 中发现,LM 训练法的训练步数为 17 步、R^2 为 0.923 46、RMSE 为 4.077 8 μmol/(m^2·s),均为最优结果,因此本研究采用 LM 训练法作为神经网络建模的训练方法。

3.3.2 GA - BP 神经网络模型建立

将确定的隐藏层节点数及训练函数用于 BP 神经网络构建,通过遗传算法对初始权值及阈值寻优,采用最优权值及阈值对 BP 神经网络进行模型重建,构建 GA - BP 神经网络预测模型。算法流程如图 10 所示。

算法步骤为:①确定 BP 神经网络结构,包括 BP 神经网络层数、各层相应节点数。②确定遗传算法的相关参数,包括确定染色体编码方法、适应度函数、确定选择操作实现算法、设置交叉及变异操作参数。③对初始种群进行编码。根据 BP 神经网络的结构,随机生成原始种群,并对原始种群中的个体进行实数编码,个体编码包括网络的权重和阈值信息。④计算个体适应度,评估群体中每个个体的适应性。

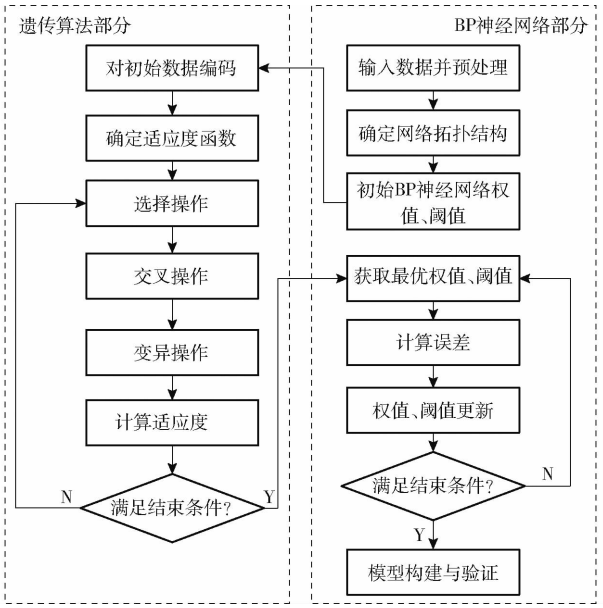


图 10 GA - BP 神经网络流程图

Fig. 10 GA - BP neural network flowchart

适应度高的个体遗传到下一代群体中,进行交叉和变异。经过多次迭代,遗传算法最终输出最优个体。⑤对最优个体进行解码,将最优初始权值和阈值分配给 BP 神经网络,并根据最优权值和阈值对网络进行训练和预测。

为验证 GA - BP 神经网络模型应用于意大利生菜光合速率、蒸腾速率预测的可行性,采用实验得到的 600 组数据用于模型训练及验证。其中,420 组数据用于网络训练,60 组数据用于网络验证,120 组数据测试网络性能。BP 及 GA - BP 神经网络的均方误差(MSE)和网络迭代次数之间的关系曲线如图 11 所示。

训练神经网络时,不仅要考虑训练误差,还要防止过拟合。相较于 BP 神经网络,GA - BP 神经网络达到最优训练性能时的迭代次数更少,且均方误差更低,说明 GA - BP 神经网络性能高于 BP 神经网络,训练过程未出现振荡和局部平坦区,表明 GA - BP 神经网络具有很好的收敛性。

3.4 模型验证

应用 120 组测试样本数据对 GA - BP 神经网络预测及优化效果进行验证,结果如图 12 所示。

由图 12 可知,GA - BP 神经网络对光合速率、蒸腾速率预测的 RMSE 分别为 2.983 2 μmol/(m^2·s)、0.001 435 8 mol/(m^2·s),相较于 BP 神经网络,分别减小 33.17%、37.96%。GA - BP 神经网络对光合速率及蒸腾速率的预测准确性高于 BP 神经网络。

分析不同输入因子对模型预测精度的影响,结果如表 2 所示。由表 2 可知,融合全影响因素构建的生理指标预测模型在 R^2 和 RMSE 评价指标表现

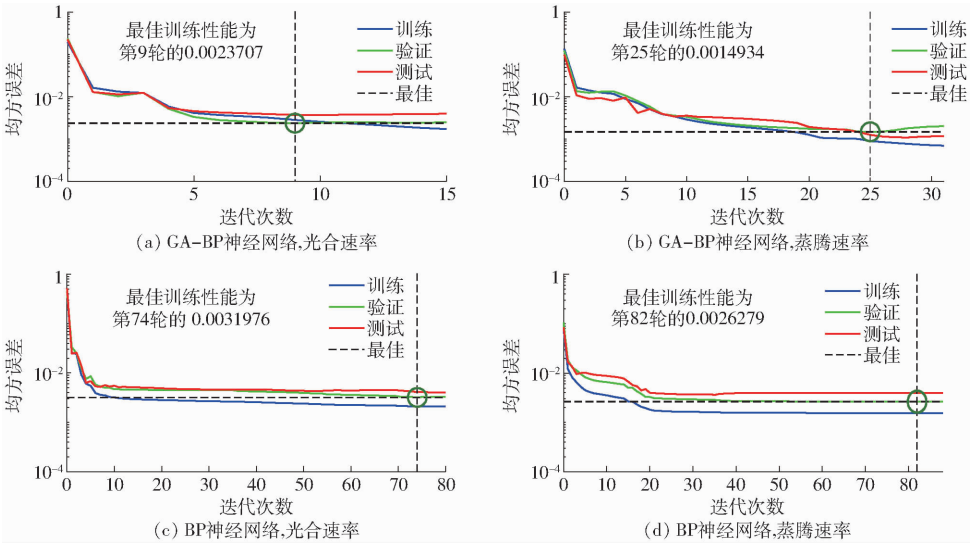


图 11　训练误差曲线

Fig. 11　Training error curves

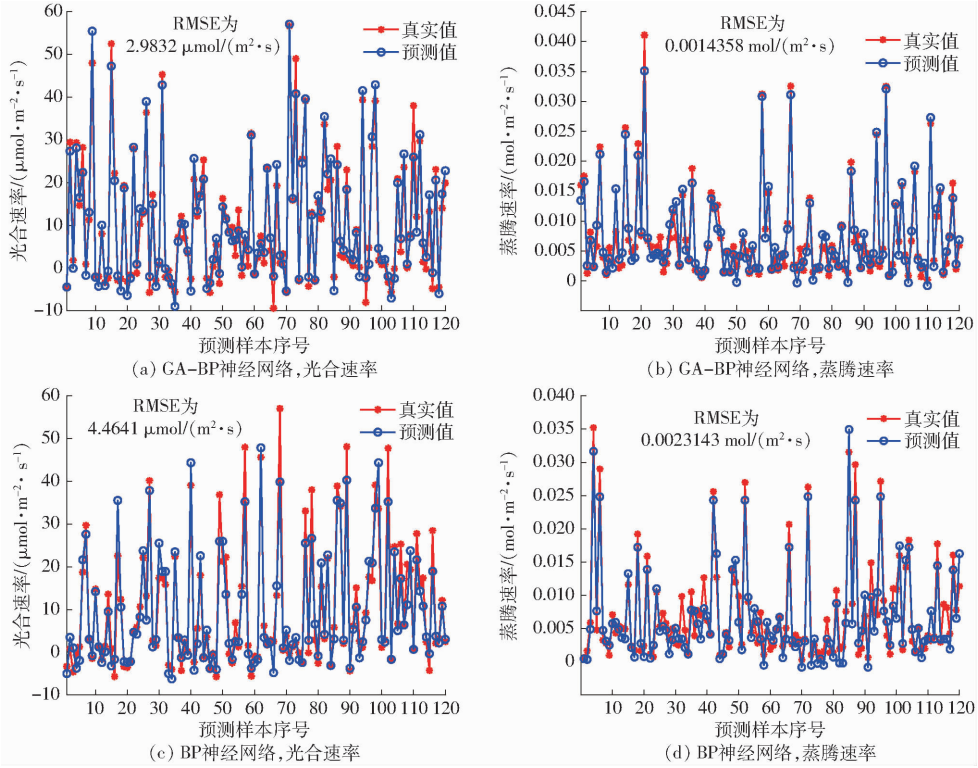


图 12　测试数据误差曲线

Fig. 12　Test data error curves

表 2　不同输入因子时模型预测精度对比

Tab. 2　Comparison of input factors on model prediction accuracy

生理指标	评价指标	4 个影响因素	排除 CO_2 浓度	排除 PPFD	排除温度	排除相对湿度
光合速率	R^2	0. 962 12	0. 841 87	0. 900 03	0. 939 12	0. 955 77
	RMSE/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	2. 983 2	8. 386 3	4. 870 6	4. 019 9	3. 429 2
蒸腾速率	R^2	0. 979 44	0. 614 71	0. 969 91	0. 635 51	0. 860 69
	RMSE/(mol·m^{-2}·s^{-1})	0. 001 435 8	0. 005 444 5	0. 001 882 2	0. 004 673 9	0. 003 409 1

最优，逐一排除特定因素进行模型训练时，预测效果呈现出明显的差异性。以蒸腾速率为例，排除 CO_2 浓度构建预测模型的评价指标表现最差，得出 CO_2 浓度对蒸腾速率的影响最大，排除温度、相对湿度及 PPFD 构建的蒸腾速率预测模型拟合度依次增大，表明对蒸腾速率的影响程度依次减弱。根据影响程

度的结果可知,各因素对光合及蒸腾速率的影响与图 8 所示的因素相关性分析结果基本一致。

4 结论

(1)CO_2 浓度对生菜光合作用的最适温度产生影响,在 0 ~ 1 000 μmol/mol 范围内,CO_2 浓度增加,生菜光合作用最适温度升高;环境相对湿度不变,气孔导度与蒸腾速率具有显著一致性,CO_2 浓度升高,气孔导度降低,导致蒸腾速率降低,在较低 CO_2 浓度范围(0 ~ 300 μmol/mol)内,蒸腾速率对 CO_2 变化的敏感性更为显著;PPFD 增强会促使气孔导度增大,蒸腾速率升高,但影响并不显著。

(2)进行因素相关性分析,与蒸腾速率强相关的因素依次为 CO_2 浓度、温度、相对湿度、PPFD,与光合速率强相关的因素依次为 CO_2 浓度、PPFD、温度、相对湿度。分别以全因素及逐一排除特定因素实验数据集作为模型输入,结果表明,以全因素构建模型预测精度更高,逐一排除特定因素进行模型训练,预测效果具有明显差异性。排除 CO_2 浓度构建蒸腾及光合速率预测模型的拟合度最低,说明 CO_2 对蒸腾及光合速率的影响最大,与因素相关性分析一致。

(3)提出一种融合遗传算法的 BP 神经网络光合及蒸腾速率预测模型,模型预测值与实测值高度吻合,其中蒸腾速率预测值与实测值 R^2 为 0.979 44,RMSE为 0.001 435 8 mol/(m^2·s),光合速率预测值与实测值 R^2 为 0.962 12,RMSE 为 2.983 2 μmol/(m^2·s)。预测精度能够满足设施环境生菜生产的实际需要,对于制定生菜生长期间的环境管理措施,提高生菜生产效率具有指导意义及参考价值。

参 考 文 献

[1] 冯海月,张冬梅,张敬丽,等. 断根处理及环境因子对白玉兰全冠树木移植茎流速率的影响研究[J]. 园林,2021,38(10):94 - 100.
FENG Haiyue, ZHANG Dongmei, ZHANG Jingli, et al. Effects of root cutting treatment and environmental factors on the stem flow rate of *Magnolia denudata* full-crown tree transplantation[J]. Landscape Architecture, 2021, 38(10): 94 - 100. (in Chinese)

[2] 钟欣平,喻阳华,侯堂春. 干热河谷石漠化区顶坛花椒叶片蒸腾速率及其与环境因子的关系[J]. 西南农业学报,2021,34(7):1548 - 1555.
ZHONG Xinping, YU Yanghua, HOU Tangchun. Correlation between leaf transpiration rate of *Zanthoxylum planispinum* var. dingtanensis and environmental factors in dry-hot valley rocky desertification region[J]. Southwest China Journal of Agriculture Sciences, 2021, 34(7): 1548 - 1555. (in Chinese)

[3] LAZA H E, BAKER J T, YATES C, et al. Effect of elevated CO_2 on peanut performance in a semi-arid production region[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 308: 108599.

[4] KANEMOTO K, YAMASHITA Y, OZAWA T, et al. Photosynthetic acclimation to elevated CO_2 is dependent on N partitioning and transpiration in soybean[J]. Plant Science, 2009, 177(5): 398 - 403.

[5] 范金杰,俞杨浏,左强,等. 大气 CO_2 浓度升高对小麦蒸腾耗水与根系吸水的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(3):92 - 98.
FAN Jinjie, YU Yangliu, ZUO Qiang, et al. Effects of elevated CO_2 concentration on transpiration and root-water-uptake of wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3): 92 - 98. (in Chinese)

[6] 陈丹艳. 植物工厂中光强、CO_2、营养液调控对生菜和番茄生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
CHEN Danyan. The effects of light intensity, CO_2, and nutrient solution regulation on the growth of lettuce and tomatoes in plant factories[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[7] 杨沈斌,徐莎莎,江晓东,等. 作物模型中单叶最大光合作用速率的温度响应修订[J]. 作物学报,2018,44(5):750 - 761.
YANG Shenbin, XU Shasha, JIANG Xiaodong, et al. Correcting the response of maximum leaf photosynthetic rate to temperatures in crop models[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(5): 750 - 761. (in Chinese)

[8] 张漫,李婷,季宇寒,等. 基于 BP 神经网络算法的温室番茄 CO_2 增施策略优化[J]. 农业机械学报,2015,46(8):239 - 245.
ZHANG Man, LI Ting, JI Yuhuan, et al. Optimization of CO_2 enrichment strategy based on BPNN for tomato plants in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 239 - 245. (in Chinese)

[9] 张海辉,陶彦蓉,胡瑾. 融合叶绿素含量的黄瓜幼苗光合速率预测模型[J]. 农业机械学报,2015,46(8):259 - 263,307.
ZHANG Haihui, TAO Yanrong, HU Jin. Photosynthetic rate prediction model of cucumber seedlings fused chlorophyll content [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 259 - 263,307. (in Chinese)

[10] WHITLEY R, MEDLYN B, ZEPPEL M, et al. Comparing the Penman - Monteith equation and a modified Jarvis - Stewart model with an artificial neural network to estimate stand-scale transpiration and canopy conductance[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(1 - 2): 256 - 266.

[11] ABID N, BARGAOUI Z, MANNAERTS C M. Remote-sensing estimation of the water stress coefficient and comparison with drought evidence[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(14): 4616 - 4639.

[12] VALIPOUR M, RAEINI-SARJAZ M, SEFIDKOUHI M A G. Optimisation of cropping pattern considering stomatal response to elevated CO_2 emission and climate change[J]. International Journal of Global Warming, 2018, 15(2): 227 - 255.

[13] 赵宝山. 大田及温室条件下作物蒸发蒸腾模型及参数的研究[D]. 镇江:江苏大学,2019.
ZHAO Baoshan. Parametrization of resistances for modeling crop evapotranspiration in the open field and greenhouse environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)

[14] 殷鉴,刘新英,张漫,等. 春秋茬温室番茄光合速率预测模型通用性研究[J]. 农业机械学报,2017,48(增刊):327 - 333.
YIN Jian, LIU Xinying, ZHANG Man, et al. Photosynthetic rate prediction of tomato under greenhouse conditions in spring and

autumn growth period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 327 – 333. (in Chinese)
[15] 赵建贵. 温室作物表型组和环境参数监控系统与番茄生长发育模型研究[D]. 太原:山西农业大学,2021.
ZHAO Jiangui. Research on phenotype group of greenhouse crops and monitoring system of environmental parameters and tomato growth and development model[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[16] LI T, ZHANG M, JI Y, et al. Management of CO_2 in a tomato greenhouse using WSN and BPNN techniques[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4): 43 – 51.
[17] 张海辉,张珍,张斯威,等. 黄瓜初花期光合速率主要影响因素分析与模型构建[J]. 农业机械学报,2017,48(6):242 – 248.
ZHANG Haihui, ZHANG Zhen, ZHANG Siwei, et al. Analysis of main influencing factors and modeling of photosynthetic rate for cucumber at initial flowering stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 242 – 248. (in Chinese)
[18] 辛萍萍. 效益优先的温室环境多因子协同调控模型与方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
XIN Pingping. Multi-factor coordination control model and method of greenhouse environment for benefit-priority[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
[19] CAITLIN E M, KATHERINE M H, PAULINE L, et al. The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: from enzymes to ecosystems[J]. Journal of Experimental Botany, 2021, 72(8): 2822 – 2844.
[20] 谢立勇,姜乐,冯永祥,等. FACE 条件下 CO_2 浓度和温度增高对北方水稻光合作用与产量的影响研究[J]. 中国农业大学学报,2014,19(3):101 – 107.
XIE Liyong, JIANG Le, FENG Yongxiang, et al. Impacts of elevated CO_2 and increasing temperature on rice photosynthesis and yield in North China under FACE system[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(3): 101 – 107. (in Chinese)
[21] WAY D A, OREN R. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data[J]. Tree Physiology, 2010, 30(6): 669 – 688.
[22] 周宁. 开放式空气中 CO_2 浓度和温度升高对粳稻生长和光合的影响[D]. 扬州:扬州大学,2020.
ZHOU Ning. Effect of elevated CO_2 temperature on japonica rice growth development and photosynthetic[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020. (in Chinese)
[23] 张智胜,朱国辉,彭新湘. 优化碳同化实现作物高光效研究进展[J]. 华南农业大学学报,2022,43(6):69 – 77.
ZHANG Zhisheng, ZHU Guohui, PENG Xinxiang. Advances in improvement of crop photosynthetic efficiency by optimizing the photosyntheticcarbon assimilation[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(6): 69 – 77. (in Chinese)
[24] 钟孝芬,李波娣,李敏姬,等. 光呼吸研究进展[J]. 热带亚热带植物学报,2022,30(6):782 – 790.
ZHONG Xiaofen, LI Bodi, LI Minji, et al. Research advances in photorespiration[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2022, 30(6): 782 – 790. (in Chinese)
[25] 张中典,张大龙,李建明,等. 黄瓜气孔导度、水力导度的环境响应及其调控蒸腾效应[J]. 农业机械学报,2016,47(6):139 – 147.
ZHANG Zhongdian, ZHANG Dalong, LI Jianming, et al. Environmental response of stomatal and hydraulic conductances and their effects on regulating transpiration of cucumber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 139 – 147. (in Chinese)
[26] 孙小玲,许岳飞,马鲁沂,等. 植株叶片的光合色素构成对遮阴的响应[J]. 植物生态学报,2010,34(8):989 – 999.
SUN Xiaoling, XU Yuefei, MA Luyi, et al. A review of acclimation of photosynthetic pigment composition in plant leaves to shade environment[J]. Journal of Plant Ecology, 2010, 34(8): 989 – 999. (in Chinese)
[27] AMITRANO C, ROUPHAEL Y, PANNICO A, et al. Reducing the evaporative demand improves photosynthesis and water use efficiency of indoor cultivated lettuce[J]. Agronomy, 2021, 11(7): 1396.
[28] VICENTE-SERRANO S M, MIRALLES D G, MCDOWELL N, et al. The uncertain role of rising atmospheric CO_2 on global plant transpiration[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 230: 104055.

(上接第 338 页)

[33] AGUILAR-RODRIGUEZ C E, FLORES-VELAZQUEZ J, ROJANO F, et al. Simulation of water vapor and near infrared radiation to predict vapor pressure deficit in a greenhouse using CFD[J]. Processes, 2021, 9(9):158.
[34] 杨天一, 王军, 张红梅, 等. 基于单作物系数法的华北平原典型农业生态系统蒸散规律研究[J]. 中国生态农业学报, 2022,30(3):356 – 366.
YANG Tianyi, WANG Jun, ZHANG Hongmei, et al. Study on evapotranspiration of typical agroecosystems in North China Plain based on single crop coefficient method[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2022,30(3): 356 – 366. (in Chinese)
[35] 刘浩. 温室番茄需水规律与优质高效灌溉指标研究[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
LIU Hao. Study on water requirement law and high quality and efficient irrigation index of greenhouse tomato[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010. (in Chinese)
[36] 王淼. 北方冬季日光温室气象要素分析及番茄蒸腾量模拟研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2019.
WANG Miao. Analysis of meteorological elements and simulation of tomato transpiration in solar greenhouse in northern winter[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019. (in Chinese)