

基于碳同化的群体光合速率测量系统设计与试验

张军华^{1,2} 陈丹艳^{1,2} 卢有琦^{1,3} 孙章彤^{1,2} 张海辉^{1,3} 胡瑾^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 不同植株叶位、叶龄和所处环境的导致单叶光合速率存在明显差异,使其在表征整株光合能力和物质积累效率等方面存在不足。本文以设施蔬菜为研究对象,基于透明同化箱设计基于碳同化过程的群体光合速率测量系统,系统通过高精度光辐射传感器和 SCD30 对同化箱内光照强度、CO₂ 浓度、温湿度进行采集,实现了同化箱光环境的精确控制、碳同化过程测量、温湿度控制等功能。试验与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统同步进行,采用线性拟合计算 CO₂ 浓度变化量进而获取群体光合速率,分析测量系统性能及不同光温条件和作物品种碳同化过程的检测精度。结果表明系统气密性和光调控精度良好,最大漏气速率为 0.047 3 μmol/(mol·min),单次测量(6 min)最大漏气量为 0.283 8 μmol/mol,光环境调控精度平均标准差为 2.71 μmol/(m²·s),能够满足植株碳同化过程的检测要求。通过线性相关性分析,生菜单株/多株 CO₂ 交换量拟合 R² 分别为 0.988、0.874,均方根误差分别为 5.82、5.80 μmol/mol,番茄线性拟合 R² 为 0.952,均方根误差为 3.39 μmol/mol,结果表明系统测量性能与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统性能接近,且在直立生长植株的检测性能更好;通过光响应曲线拟合计算,番茄和生菜在不同温度、光照条件下,系统与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统光响应曲线间平均绝对误差均值分别为 0.45、0.35 μmol/(m²·s),拟合 R² 均值不小于 0.95,证明系统能实现群体光响应曲线的高精度稳定测量。

关键词: 群体光合速率; 测量系统; 碳同化; 净 CO₂ 交换量; 同化箱

中图分类号: S24; S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0357-11 OSID: 

Carbon Assimilation-based Plant Population Photosynthetic Rate Measurement System

ZHANG Junhua^{1,2} CHEN Danyan^{1,2} LU Youqi^{1,3} SUN Zhangtong^{1,2} ZHANG Haihui^{1,3} HU Jin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory for Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Single-leaf photosynthetic rate significantly affected by leaf location, leaf aging, and environment is insufficient to characterize the photosynthetic capacity and material accumulation efficiency of the entire plant. A plant population photosynthetic rate measurement system (PPPMS) was developed based on the carbon assimilation process using a transparent assimilation box. The PPPMS collected the data on light intensity, CO₂ concentration, temperature and humidity in the assimilation box using a high-precision light radiation sensor and SCD30 to achieve the accurate control of the light environment, measurement of the carbon assimilation process, temperature and humidity control and so on. The synchronous experiment was carried out with the LI-6800 closed-circuit carbon assimilation measurement system, and the population photosynthetic rate was determined using linear fitting with the CO₂ changes. The performances of the PPPMS and the detection accuracy of carbon assimilation process were evaluated at various lights, temperatures and crop types. The findings revealed that the system's air tightness and light

收稿日期: 2021-12-20 修回日期: 2022-01-12
基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1100602)、陕西省重点研发计划项目(2021ZDLNY03-02)和中央高校基础研究基金项目(2452020292)
作者简介: 张军华(1991—),男,博士生,主要从事智慧农业和作物生理生境监测与调控研究,E-mail: zhangjunhua@nwsuaf.edu.cn
通信作者: 胡瑾(1980—),女,副教授,主要从事设施环境调控与智能信息处理研究,E-mail: hujin007@nwsuaf.edu.cn

regulation accuracy were satisfactory, with the maximum air leakage rate of $0.047\ 3\ \mu\text{mol}/(\text{mol}\cdot\text{min})$, the maximum single air leakage (6 min) of $0.283\ 8\ \mu\text{mol}/\text{mol}$. And the average standard deviation of light regulation accuracy was $2.71\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, which can meet the detection of plant carbon assimilation process. In the linear correlation analysis, the R^2 of CO_2 exchange capacity fitting of single and multiple lettuces were 0.988 and 0.874, respectively, with the root mean square error (RMSE) of $5.82\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ and $5.80\ \mu\text{mol}/\text{mol}$, while the fitting R^2 of tomato was 0.952, and the RMSE was $3.39\ \mu\text{mol}/\text{mol}$. The results showed that the system's measurement performance was comparable to that of LI-6800 system, and the detection performance in upright plants was superior to that of leafy vegetables. Under varied temperatures and lighting, the average mean absolute errors (MAEs) of tomato and lettuce computed by light response curves between the PPPMS and LI-6800 system were $0.45\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ and $0.35\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, respectively, and the mean value of fitting R^2 was not less than 0.95. It was demonstrated that the method can accurately and consistently measure the plant population's light response curve.

Key words: population photosynthetic rate; measurement system; carbon assimilation; net CO_2 exchange capacity; assimilation box

0 引言

植物光合作用是自然界最重要的物质转化积累过程,通常以净 CO_2 交换量(即光合速率)来衡量植物碳同化效率,而碳同化效率直接影响植株的生物量^[1-2]。目前光合速率测量主要以单叶为对象,通过测量固定面积内 CO_2 交换量来进行计算^[3],大量研究采用光合速率仪对植物单功能叶片光合速率等参数进行精确采集,来分析不同光照、温度、 CO_2 浓度等外界环境条件下光响应、 CO_2 响应等过程,进而分析不同环境因子耦合情况对光合速率的影响,单叶净光合速率也常用于温室环境因子对作物生长影响的分析和调控模型的建立,为设施农业中作物的提质增产提供了有效的途径,因此在设施农业中广泛应用^[4-9],但在实际的植株生长环境中,光强的时间平均分布和瞬时分布不均匀,不同光诱导下单叶与整株的光合能力存在差异^[10],同时在植株的生长过程中,不同叶位、不同时期、不同性状功能叶片光合场所、叶绿素含量、吸收光谱不尽相同,导致同一植株不同空间分布叶片的光合速率也不相同^[11-14],随着叶龄的增加叶片光合能力和气孔导度会逐渐下降^[15],采用单叶片光合速率来表征植株冠层光合能力和光合需求存在一定局限性^[16-19],而通过单叶光合速率建模或三维虚拟植物模拟模型来分析冠层光合能力在精度方面受很多外界环境因素影响,需进一步研究和改进^[20-22],因此,实现植物整株/群体光合速率的高精度测量,对优化设施农业中环境高效调控具有重要意义。

植物整株/群体光合的测量主要由密闭同化箱配合 CO_2 分析仪或光合速率仪进行,通常采用玻璃、透明亚克力等制成半封闭气室,以封闭/半封闭气路的方式与分析仪器相连,通过测量一定时长内 CO_2

浓度的变化量来计算植物的光合同化效率,能够更加准确反映植株物质积累效率^[5, 23-25]。目前光合速率测量主要集中于单叶测量,已有研究基本采用精密的仪器精确地测量整株/群体的碳同化过程,且一般直接在作物生长环境的条件下进行^[26-29],环境参数的调控无法像单叶光合速率测量那样由光合速率仪进行精确设置和调控,无法测量光响应曲线、温度响应曲线等数据,而这些数据的分析在设施农业环境的智能化调控中起着重要的作用。同时,由于设计原理的原因,测量的半封闭/封闭气路系统普遍存在漏气现象,漏气速率过大和不稳定严重影响 CO_2 浓度的检测结果^[23],而密闭的环境则会出现由于植物的光合、蒸腾作用导致同化箱内水汽浓度急剧升高的现象,已有测量系统在短时间碳同化过程测量后,需打开同化箱进行水汽疏散^[5]。因此,环境参数的精准可控,气密性优异是整株/群体光合碳同化检测过程中重要的要求。

本文采用半封闭碳同化过程测量方式,设计气密性良好的碳同化测量系统,基于高精度传感器采集同化箱内光合作用相关的环境参数,并通过反馈控制实现环境的精确调控,采用线性模型完成对采集 CO_2 浓度的拟合分析,以 LI-6800 型闭路碳同化检测系统为参照,分析在不同作物、不同温度、不同光照强度下系统检测的稳定性和准确性,为设施农业作物整株/群体光合检测建立更高效准确的调控模型提供实验基础。

1 系统设计

1.1 系统整体设计

传统光合速率测量方法主要依靠光合速率仪的小叶室对单叶进行检测获取,本文针对设施蔬菜设计群体光合测量系统,可满足叶菜类及果菜幼苗期整

株/多株碳同化过程的测量,整个系统主要包括:透明检测同化箱、LED 可控灯箱、同化箱环境因子测量控制系统、控制气路,系统整体示意图如图 1 所示。系统可实现检测同化箱内环境因子的实时监测、CO₂ 交换相关参数的计算、光照强度自动控制、气体干燥、同化箱内外气体交换、CO₂ 补给等功能,在植物群体光合过程中,CO₂ 浓度会随着植物光合作用急剧变化,同时同化箱内气体湿度也会由于蒸腾作用而升高,传统同化箱测量一段时间后需要进行开盖换气除湿。为控制同化箱内水汽浓度,同时使每次测量起始 CO₂ 浓度基本相同,系统设计 CO₂ 补给回路及空气干燥回路构成半封闭式调控系统;光辐射强度可通过光辐射传感器与 LED 可控灯箱配合形成闭环反馈控制,为群体光合营造可控光环境。

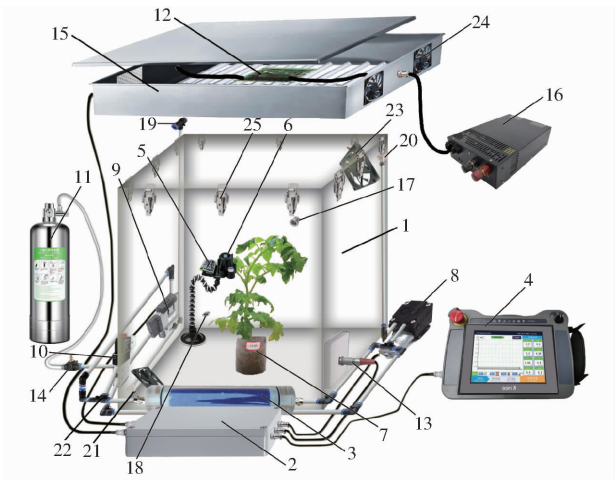


图 1 系统整体示意图

Fig. 1 Overall schematic of system

1. 亚克力箱 2. 主控盒 3. 干燥管 4. 工控屏 5. SCD30 型传感器 6. 光辐射传感器 7. 植株 8. 微型真空泵 9. 直动式二位五通气阀 10. 先导式二位五通气阀 11. CO₂ 钢瓶 12. LED 驱动板 13. 气密插头 14. 手动调节阀 15. LED 灯箱 16. 24V 开关电源 17. 外接进气口 (IN₁) 18. 外接出气口 (OUT₁) 19. 换气出气口 20. 气路进气口 21. 气路出气口 22. 气路 23. 内部循环扇 24. 散热扇 25. 不锈钢弹簧塔扣

1.2 透明检测同化箱

透明检测同化箱采用透明亚克力板制成,亚克力板厚 6 mm,内部尺寸为长 (300 mm) × 宽 (300 mm) × 高 (350 mm),各个面板间通过专用密封胶进行粘接,为方便测试,同化箱顶部面板可快速拆卸,采用不锈钢弹簧伸缩搭扣进行固定,同时上面板与箱体间使用三元乙丙硅胶发泡密封条进行密封,保证同化箱的气密性。

同化箱 4 个侧面各预留 1 个通气孔,每个通气孔安装穿板快拧直接接头,并通过密封硅胶垫圈及 AB 胶进行密封,2 个相对侧面通气孔沿箱体对角线方向分布,其中一组用于系统干燥气路与 CO₂ 补给

气路连接,另一组通气孔预留,可用于光合仪、CO₂ 红外分析仪等检测设备的连接,不使用时用堵头进行封闭;箱体内配置接线盒用于连接同化箱内环境因子检测模块及对流扇供电,接线盒通过 8 芯水密型插座与箱体外检测设备连接,防止漏气。对流扇沿箱体对角线方向安装,且位于干燥气路与 CO₂ 补给气路进出气口附近,这样能让干燥后气体及 CO₂ 快速对流,使箱体内气体相对均匀。

1.3 LED 可控光源

LED 可控光源采用正白光 (6500 K 色温) 全光谱灯珠进行设计,单颗灯珠最大功率 3 W,灯箱共布置 10 条灯板,每条灯板 10 颗 LED 灯珠,分为 2 路并联连接,每路 5 颗灯珠串联,整体最大发光功率 300 W。灯箱外形尺寸为 50 cm × 50 cm × 10 cm,发光面开孔 39 cm × 39 cm,10 条灯板分两组均匀布置,灯箱侧面安装 2 个散热扇,另一侧对称位置进行开孔,用于灯箱内灯条及 LED 驱动模块的快速散热,保证 LED 光源的稳定输出。

为保证 LED 发光的稳定性,灯条采用恒流方式驱动。整个灯箱采用明纬 24 V/500 W (RSP-500-24 型) 开关电源供电,LED 驱动模块采用 PT4123E 型降压恒流芯片,通过 PWM 调光方式进行设计,其转换效率为 97%,共设计 10 路 LED 驱动,每路电流驱动能力 1.3 A,由同化箱环境因子测量控制系统输出可控占空比 PWM 信号 (1 kHz) 进行光源亮度的精确反馈控制,设计控制精度 ± 5 μmol/(m² · s),以满足光合速率测量光源稳定性的需求。

1.4 控制气路

控制气路由同化箱内外换气气路、干燥气路与 CO₂ 补给气路组成,为简化气路布置,气路中采用 2 个二位五通电磁气阀,使部分气路可复用,整个气路通过小型真空抽气泵实现气流循环,整体气路设计如图 2 所示。其中同化箱内外换气与干燥 2 路低气压气路通过直动式二位五通气阀 (SMC 公司,VS4110-035U 型) 进行连接,由于 CO₂ 补给需使用 CO₂ 发生器或 CO₂ 钢瓶,其内部存在高压,因此 CO₂ 补给气路采用先导式二位五通气阀 (CHINT 4V210-08 DC24V 型) 并入干燥气路,在补给 CO₂ 的同时也能通过排气口实现箱内多余气体的排出,防止同化箱内气压过高。

1.5 同化箱环境因子测量控制系统

同化箱环境因子测量控制系统实现对同化箱内 CO₂ 浓度、光辐射强度、温度、相对湿度的实时监测,并可通过环境参数设置实现环境的精确调控,同时可根据测量数据进行光合相关数据的分析计算及数据的实时显示。系统整体示意图如图 3 所示,由 STC15 核心处理模块、传感器模块、工控屏、电源模块组成。

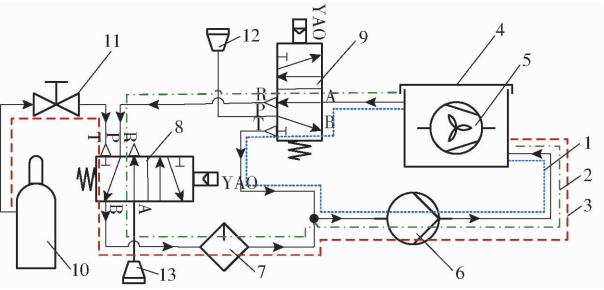


图2 系统气路设计

Fig.2 System gas path design

1. 内外换气气路 2. 干燥气路 3. CO₂ 补给气路 4. 密闭同化箱
5. 循环扇 6. 小型真空泵 7. 干燥管 8. 先导式二位五通气阀
9. 直动式二位五通气阀 10. CO₂ 气瓶 11. 手动阀 12. 换气出口
13. CO₂ 补给出口

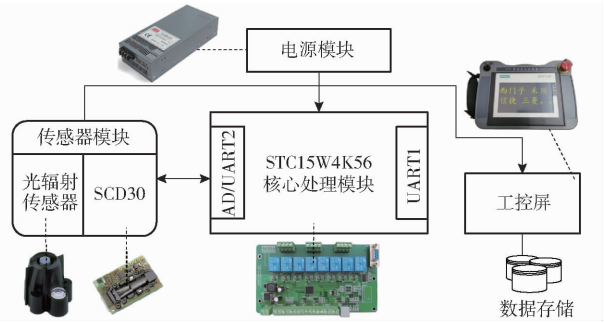


图3 同化箱环境因子测量控制系统框图

Fig.3 Block diagram of environmental factor measurement and control system for assimilation box

其中核心处理模块采用 STC15W4K56 单片机设计开发,通过单片机自带 10 位 AD 采样引脚实现对光辐射传感器数据的采集,串口 1 用于核心处理模块与工控屏之间的数据通信,串口 2 用于 CO₂ 浓度、温湿度数据的采集,除数据采集与通信功能,模块设计开发了可控 PWM 信号输出与继电器控制功能,实现对 LED 灯箱光源的精确输出与控制气路电磁阀的控制。

传感器模块集成光辐射强度、CO₂ 浓度、空气温湿度 4 类环境因子的同时监测,其中光辐射传感器采用 DAVIS 6450 光辐射传感器,光辐射检测范围为 0 ~ 1 800 W/m²,精度 ± 5% FS,由于传感器检测为光辐射通量密度,需对传感器进行单位转换和校准。将传感器与 LI-6800 型光合速率仪自带的光量子通量密度传感器在相同光环境下进行对比试验,采用线性拟合对传感器数据进行转换,拟合模型的 R² 为 0.999 9,均方根误差为 3.065 1 μmol/(m²·s),其计算公式为

$$P = 5.549\,3E_{SR} + 3.657\,0 \tag{1}$$

式中 P ——光量子通量密度,μmol/(m²·s)

E_{SR} ——光辐射通量密度强度,W/m²

采用 Sensirion SCD30 型传感器模块检测 CO₂ 浓

度、空气温湿度,CO₂ 浓度检测范围为 0 ~ 40 000 μmol/mol,检测精度 ± 30 μmol/mol;温度检测范围为 - 40 ~ 70℃,精度 ± (0.4 + 0.023 (T - 25))℃;空气相对湿度检测范围为 0 ~ 100%,精度 ± 3%。该传感器各项指标性能优异,均满足本设备的设计需求。

采用步科 MT4404T 型工控屏,用于光合相关参数的显示、计算与记录存储,同时根据实测数据向核心处理模块发送环境参数配置指令与控制指令。

1.6 系统软件设计

为实现碳同化过程 CO₂ 交换量检测和群体光合速率计算,基于上述硬件平台设计了系统软件,主要包括数据采集、参数设置、环境调控、数据计算等功能,软件流程图如图 4 所示。系统碳同化过程数据采集流程如下:首先设置参数,系统根据工控屏设置的光环境参数,对同化箱内光环境进行闭环调控,同时,根据 CO₂ 浓度设置值开启补给气路,使同化箱内 CO₂ 浓度达到设置水平,待工控屏 CO₂ 浓度变化曲线变化稳定后,开始测量并记录碳同化过程数据,单次测量时长 6 min,待测量结束后,系统自动开启同化箱干燥功能以降低同化箱内水汽浓度,同时通过工控屏对采集存储的 CO₂ 浓度数据进行线性拟合,计算 CO₂ 浓度变化率,进而计算试验区间内 CO₂ 交换量,最终将 CO₂ 交换量与环境参数代入光合速率公式计算植株群体光合速率并存储。试验过程所有数据均可通过 U 盘导出用于后续的数据分析。

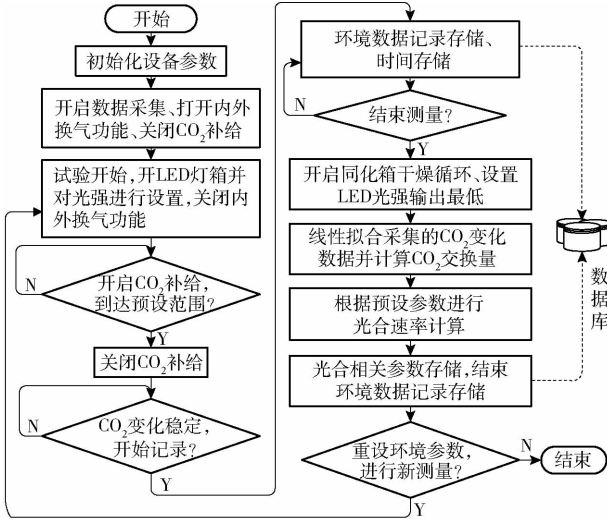


图4 碳同化过程测量流程图

Fig.4 Measurement flow chart of carbon assimilation process

系统界面可用于试验过程中同化箱内环境监测数据和光合参数的显示,同化箱内光照强度、CO₂ 浓度、相对湿度、叶面积、采样周期等环境参数和预设参数的设置,以及试验历史数据、系统操作日志的查询与导出。其部分界面设计如图 5 所示。



图 5 系统界面设计
Fig.5 System interface design

2 数据分析方法与测试

2.1 碳同化过程 CO₂ 浓度拟合方法

系统采用抽气测量方式进行 LI-6800 型闭路碳同化测量,获取的 CO₂ 浓度变化数据受箱体内存气流扰动影响小,测量的数据稳定,而自制群体光合测量系统传感器模块布置于靠近植株冠层位置,由于植株受对流扇气流扰动的影响使 CO₂ 浓度存在波动,其次在暗环境、低光照及植株叶面积较小时,植株的呼吸速率与光合速率均很小,而 CO₂ 气体扩散至整个同化箱时浓度变化不明显,同时也局限于传感器模块中 CO₂ 浓度的检测精度,使设备在检测 CO₂ 浓度时存在一定偏差,因此需通过数据拟合的方法进行修正。植物在相对稳定的环境中进行光合作用时,当辐射的光照强度一定,其光合速率基本稳定,CO₂ 同化速率也趋于稳定,在同化箱无 CO₂ 补给的情况下,短时间内 CO₂ 浓度的变化量与时间基本呈线性关系^[30],因此本文采用线性方程对自制群体光合测量系统测量的 CO₂ 变化数据进行拟合,用于修正系统的测量误差。CO₂ 浓度随时间变化的线性拟合公式为

$$F_{CO_2}(t) = kt + I_{CO_2} \tag{2}$$

式中 t ——试验的相对时间,初始时间为 0 s
 k ——线性拟合计算的斜率
 I_{CO_2} ——初始截距

通过式(2)拟合 CO₂ 浓度测量数据,计算获取斜率 k ,进而计算光合试验测量时间内同化箱中 CO₂ 浓度变化量 ΔC 为

$$\Delta C = k\Delta t + \Delta C' \tag{3}$$

式中 Δt ——时间间隔,s
 $\Delta C'$ —— Δt 时间内的 CO₂ 漏气量, $\mu\text{mol}/\text{mol}$

2.2 群体光合速率计算

群体光合速率是指同化箱内所有植株的所有功能叶片光合速率的总和,它与植株光合叶面积、温度、CO₂ 浓度、大气压等因子密切相关,本文结合从

LI-6800 型闭路碳同化测量系统中导出的检测数据,基于 LI-6800 型闭路碳同化测量系统提供的净 CO₂ 交换量 F_c ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 计算式

$$F_c = \frac{10Vp_0 \left(1 - \frac{W}{1000}\right) \Delta C}{RS_{\text{leaf}}(T_0 + 273.15) \Delta t} \tag{4}$$

式中 V ——同化箱的体积, cm^3
 p_0 ——箱体内初始大气压, kPa
 W ——箱体内水汽浓度, mmol/mol
 R ——理想气体常数,取 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
 S_{leaf} ——植株叶面积, cm^2
 T_0 ——箱体内初始空气温度, $^{\circ}\text{C}$
完成对两组试验数据光合速率的计算。

为分析设备与 LI-6800 型测量系统测量结果的相关程度,通过线性相关分析进行对比,同时利用叶子飘光响应曲线拟合工具中双曲线修正模型进行拟合,分别分析生菜与番茄光响应建模结果。

2.3 叶面积测量

在完成植株碳同化检测试验后,摘下所有功能叶片与 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 标准色块进行拍照,通过图像处理软件 ImageJ 对图像分析测算获取叶面积。

2.4 测试试验方案

为满足设施作物光合相关参数的测量需求,整个同化箱系统需保证良好的气密性和 CO₂ 交换量检测的准确性,设计气密性、光环境控制精度、植株碳同化过程测试试验方案,并选取合适拟合算法对系统检测进行修正。

2.4.1 气密性测试

使用 LI-6800 型闭路碳同化测量系统进行气密性测试,光合速率仪分析器更换自制叶室适配器,根据碳同化检测方法对光合速率仪进行规范连接,分析器出气口接于同化箱进气口(图 1 中 IN_1),主机进气口通过软管与同化箱出气口(图 1 中 OUT_1)相连,将空同化箱盖顶面板密封后,开启系统进行测试。利用气体浓度差扩散原理,同化箱内外 CO₂ 浓度差异越大,在漏气情况下会扩散越快。基于该原

理试验共设置 3 个不同初始 CO₂ 浓度梯度进行气密性测试,每个梯度测试 30 min,每 5 s 采集一次同化箱 CO₂ 浓度,绘制 CO₂ 浓度变化曲线并计算 CO₂ 漏气速率,为群体光合测量系统光合相关参数计算进行修正。试验梯度设置如表 1 所示,表中每个梯度 CO₂ 浓度为测试前 10 个检测数据均值,测试过程中外界环境 CO₂ 浓度为 (650 ± 50) μmol/mol。

表 1 气密性试验初始 CO₂ 浓度设置
Tab.1 Initial CO₂ setting of air tightness experiment

参数	梯度		
	C1	C2	C3
CO ₂ 浓度/(μmol·mol ⁻¹)	223.05	435.97	1 232.96
温度/℃	24.69	22.99	23.01

2.4.2 植株碳同化检测方案

为验证自制群体光合测量系统检测准确性及适用性,在同化箱预留接口接入 LI-6800 型闭路碳同化检测系统,与自制测量系统同步试验并记录监测数据,对比分析两者 CO₂ 变化趋势及变化速率,其中 LI-6800 型闭路碳同化检测系统设置为闭路 CO₂ 同化量检测模式,通过自动测量程序进行记录,每 2 s 检测记录一次数据;自制群体光合测量系统每 1 s 记录一次数据并保存于 USB 存储器中。试验材料为番茄(普罗旺斯)和玻璃生菜两种典型设施作物,其中番茄选用幼苗期(6 叶 1 心)植株,玻璃生菜选用 4 叶期幼苗和 9 叶期植株分别进行测试。测试设置多个温度和光照梯度,番茄主要测试低温条件下(8 ~ 20℃)光响应碳同化过程,生菜测试中高温(16 ~ 28℃)条件下光响应碳同化过程,试验参数设置梯度如表 2 所示,其中番茄采用单株苗进行试验,共设置 4 个温度梯度和 8 个光照梯度;9 叶期生菜采用单株进行试验,共设置 4 个温度梯度和 9 个光照梯度,4 叶期生菜用于群体光合测试,单次试验放置 4 株生菜于同化箱中,设置 1 个温度梯度和 5 个光照梯度进行试验。

表 2 碳同化检测试验梯度设置
Tab.2 Gradient settings of carbon assimilation measurement experiment

作物	参数	数值
番茄 (普罗旺斯)	光强/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	0、30、60、120、200、 300、400、500
	温度/℃	8、12、16、20
玻璃生菜 (9 叶期)	光强/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	0、30、60、120、200、 300、400、600、800
	温度/℃	16、20、24、28
玻璃生菜 (4 叶期)	光强/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	50、100、150、 200、300
	温度/℃	22

整个试验于人工培养箱中进行,培养箱主要用于对同化箱内部温度的控制,试验开始后,系统开启持续内外换气模式,待同化箱内部温度达到预设梯度时关闭内外换气,静置 3 min 左右待内部 CO₂ 浓度充分扰动均匀,且仪器 CO₂ 浓度变化曲线斜率基本稳定后两套系统同时开始测量记录,LI-6800 型闭路碳同化测量系统每次测量时长 2 min,每个光照梯度连续测量 3 次,本文设计系统连续测量 6 min。

3 试验结果分析

3.1 设备性能结果分析

3.1.1 PAR 控制精度分析

对 LED 灯箱不同光强设置条件下的输出进行检测,其检测结果如图 6 所示。其中图 6a 为各个光照梯度下连续 60 个实测值分布及其均值,图 6b 为误差占对应光强梯度的百分比及所有梯度下误差的标准差,表 3 为每个梯度实测光照强度及标准差。由图 6a 可知,每个梯度下实测光照强度均值与设置值相差较小,实测点数据在设置值附近波动,且较为集中;通过图 6b 可看出,最大标准差百分比为光强梯度 30 μmol/(m²·s) 时的 7.99%,随着光照梯度增加,误差占比逐渐降低,同时由标准差箱图可看出,标准差范围为 2.13 ~ 3.46 μmol/(m²·s),均值为 2.71 μmol/(m²·s),说明系统光照强度的精确反馈控制误差较小,且不随 LED 发光强度的增加而增大,经分析该部分误差主要是由于 LED 实时反馈控制中 PWM 占空比的控制步长与光辐射传感器的自身检测灵敏度导致的,综上结果表明系统光强控制较为精确,能为光响应碳同化测量过程中植株光合提供稳定的光能。

3.1.2 气密性测试结果分析

对同化箱密闭性在不同内外 CO₂ 浓度差情况下进行测试,3 个浓度梯度下漏气结果如图 7a 所示,测试过程中同化箱外环境 CO₂ 浓度为 (700 ± 50) μmol/mol,图中 C1、C2、C3 浓度依次升高,低于环境浓度的 2 个梯度(C1、C2)呈现上升趋势,高于环境浓度的梯度呈波动下降的趋势,在整个测试过程中 3 个梯度 CO₂ 浓度变化幅度均较小。分别对 3 个梯度进行线性拟合分析,结果如图 7b ~ 7d 所示,C1、C2、C3 拟合 R² 分别为 0.988 7、0.974 4、0.902 2,斜率表示 1 min 内同化箱漏气的速率,浓度差 500 μmol/mol 左右时(C1、C3)漏气速率分别为 0.047 3、0.046 2 μmol/(mol·min),C2 浓度时漏气速率为 0.034 3 μmol/(mol·min),与浓度差越大漏气速率越大规律相符,从漏气结果可以看出同化箱的气密性较好,能满足光合碳同化过程

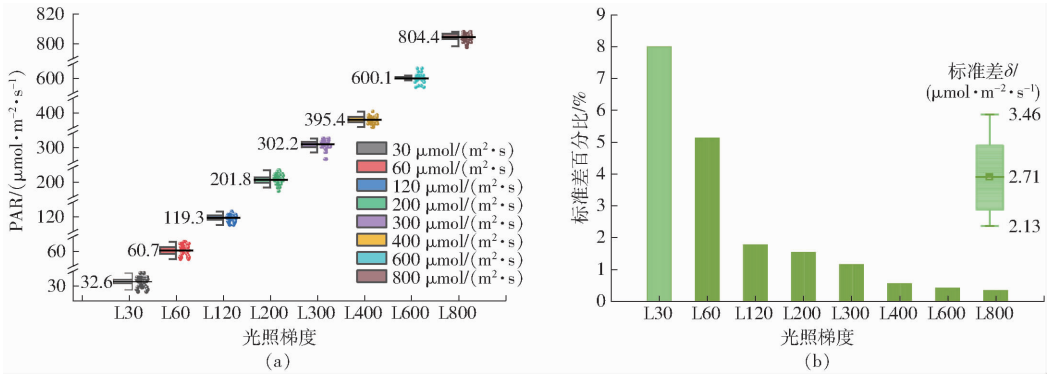


图 6 光照强度控制效果

Fig. 6 Analysis of control effect of light intensity

		光辐射梯度							
项目		L30	L60	L120	L200	L300	L400	L600	L800
设置值		30	60	120	200	300	400	600	800
实测值		32.6 ± 2.40	60.7 ± 3.08	119.3 ± 2.13	201.8 ± 3.09	302.2 ± 3.46	395.4 ± 2.25	600.1 ± 2.52	804.4 ± 2.78

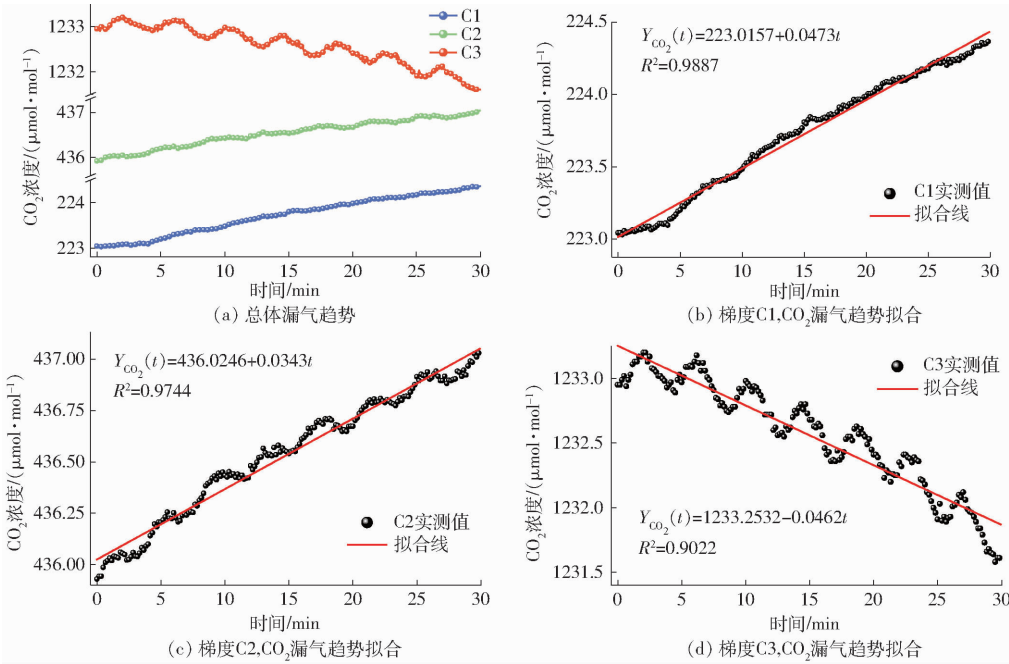


图 7 系统气密性分析

Fig. 7 Air tightness results

的测量。由于系统每次在测量碳同化过程的时间为 6 min，试验过程中浓度差最大时漏气量仅为 0.283 8 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ，因此在测试过程中漏气可以忽略不计。

3.2 碳同化过程检测结果分析

3.2.1 单/多株生菜碳同化过程检测结果分析

通过本文设计系统与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统试验，采用线性相关性分析，生菜在不同温度与光照梯度下碳同化过程的 CO2 变化量结果如图 8 所示。

单株 9 叶期生菜与 4 株 4 叶期生菜不同光温

条件下的 CO2 变化量具有良好的线性趋势(图 8a、8c)，且与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统测量结果基本吻合。由图 8a 可知，生菜 CO2 变化量线性拟合的绝对系数 R^2 为 0.988，RMSE 为 5.82 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ，与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统测量真值线接近，说明设备检测性能与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统检测性能接近。通过计算不同光强梯度下设备检测值与 LI-6800 测量值的绝对偏差(图 8b)，并分析绝对偏差边际直方图及曲线分布(图 8c)，结果表明，其整体偏差较

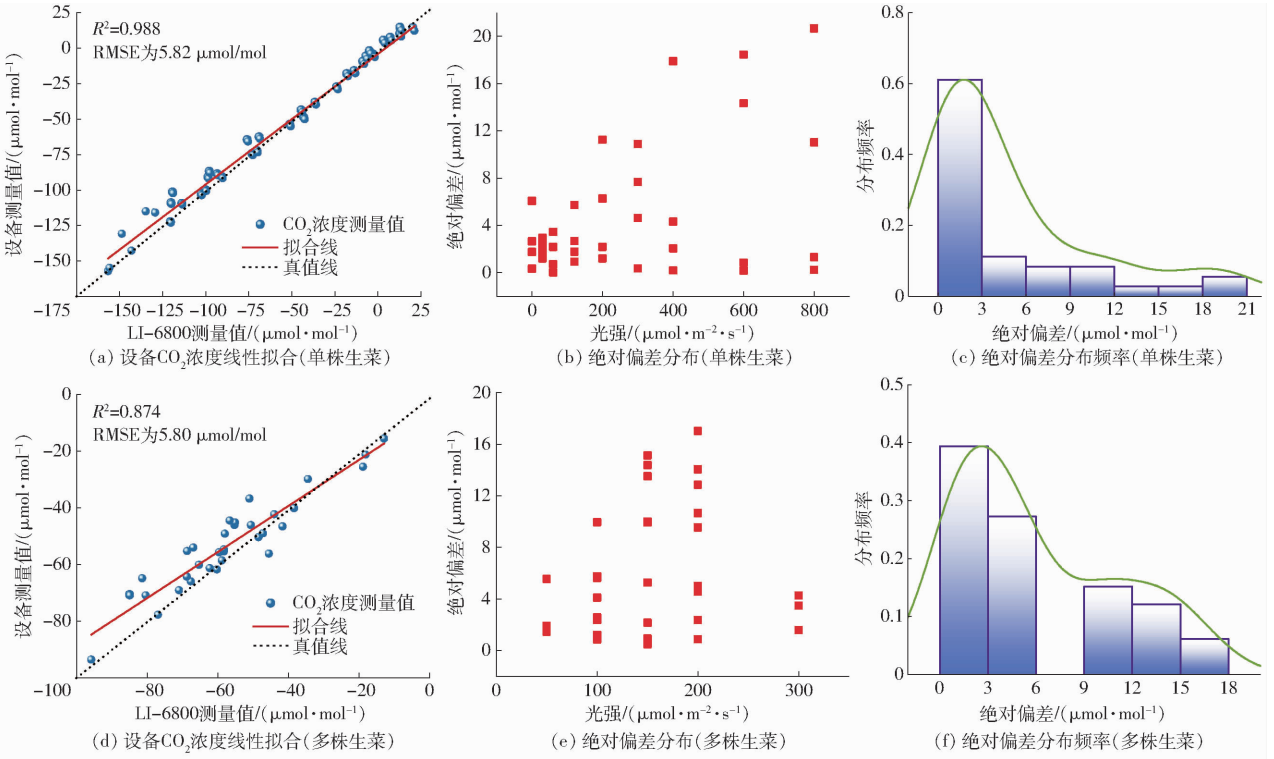


图 8 生菜碳同化过程检测结果

Fig. 8 Analysis results of carbon assimilation in lettuce

小,大偏差情况较少,证明设备在碳同化过程中检测 CO_2 浓度的性能较稳定,随着光强的增加,其绝对偏差逐渐增大,这是由于光强较大时,植株光合速率及蒸腾速率较大,使同化箱内 CO_2 气体不均匀程度增大,而传感器摆放位置位于同化箱中间及植株冠层附近,其 CO_2 浓度检测存在一定滞后性,因此设备检测结果偏小。同样,多株生菜碳同化过程 CO_2 变化量如图 8d 所示,其线性拟合决定系数为 0.874, RMSE 为 $5.80 \mu\text{mol}/\text{mol}$,较单株大苗偏离真值的误差波动大,其主要原因也是由于同化箱内部气体循环欠佳,使气体扩散不均匀导致,由图 8e、8f 中不同光照梯度下绝对偏差及边际分布概率结果可知,大部分测量值偏差较小,能够基本满足植株光合作用过程中 CO_2 变化量的测量要求。

3.2.2 番茄幼苗碳同化过程检测结果分析

番茄幼苗期不同温度、光照梯度碳同化过程 CO_2 浓度变化量检测结果如图 9 所示,由图 9a 可以看出,线性分析决定系数 R^2 为 0.952, RMSE 为 $3.39 \mu\text{mol}/\text{mol}$,且斜率接近于 1,说明在不同光温条件下设备在碳同化过程中 CO_2 浓度检测结果与 LI-6800 测量结果误差很小,由图 9b、9c 可知,在所有光照梯度下,设备整体偏差主要集中分布在小于 $5 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 范围内,仅少数点存在较大偏差,与生菜分析结果相比,番茄的 CO_2 变化量整体偏差更小,更接近于 LI-6800 型闭路碳同化测量系统检测结果。主要原因是生菜为叶菜类植物,光合功能叶片主要集中于一个横向空间,而番茄属于直立生长作物,光合功能叶片为垂直空间分布, CO_2 气体吸收的空间范围更大,同时番茄叶片间间隙较大,气体经循环扇

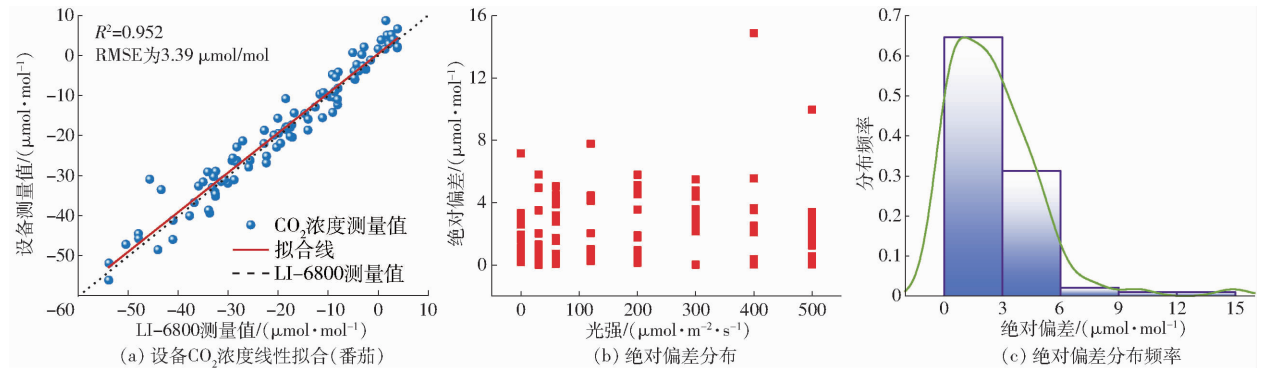


图 9 番茄碳同化过程检测结果

Fig. 9 Analysis results of carbon assimilation in tomato

搅动后扩散更快,使同化箱内整体浓度能快速均匀,因此本系统更加适用于直立生长植株的碳同化过程的测量。

3.3 群体光合速率建模结果分析

基于净 CO₂交换量计算公式,分别计算本文设计系统与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统测量的不同温度下光响应各点光合速率,通过叶子飘双曲线修正模型对光响应光合数据进行拟合,番茄不同温度下的光响应曲线如图 10 所示。随着温度的增高,番茄光合速率逐渐增加,达到光饱和平稳拐点的光照强度后移,与单叶光合速率测量结果一致。由图 10 可得出,本文设计系统所计算的光合速率与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统结果基本吻合,说明系统虽在碳同化过程中 CO₂浓度检测结果存在一定偏差,但经过拟合后能减小与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统结果的差异,通过对 2 条光响应曲线

拟合结果间平均绝对误差 (Mean absolute error, MAE) 进行计算,不同温度梯度下 MAE 分别为 0.79、0.28、0.36、0.38 μmol/(m²·s),平均 MAE 为 0.45 μmol/(m²·s),证明 4 个温度梯度下两者之间光响应曲线偏差较小且能达到基本吻合的效果。图 10a 中拟合曲线弱光条件下的差异较大,主要是由于低温弱光时,番茄光合能力受到抑制,其整体光合速率较小,导致 CO₂吸收量较小,而传感器自身也存在检测波动,使最终光合速率计算结果存在偏差,由图中 R²结果也可得出低温弱光光合速率拟合的 R²波动较大,这与采用 LI-6800 型闭路碳同化系统低温弱光条件下测量单叶的现象相同。本文系统光响应拟合决定系数 R²整体低于 LI-6800 型闭路碳同化测量系统,但其平均决定系数 R²不小于 0.95,表明本文设计系统能够满足光响应曲线中光合速率的测量要求。

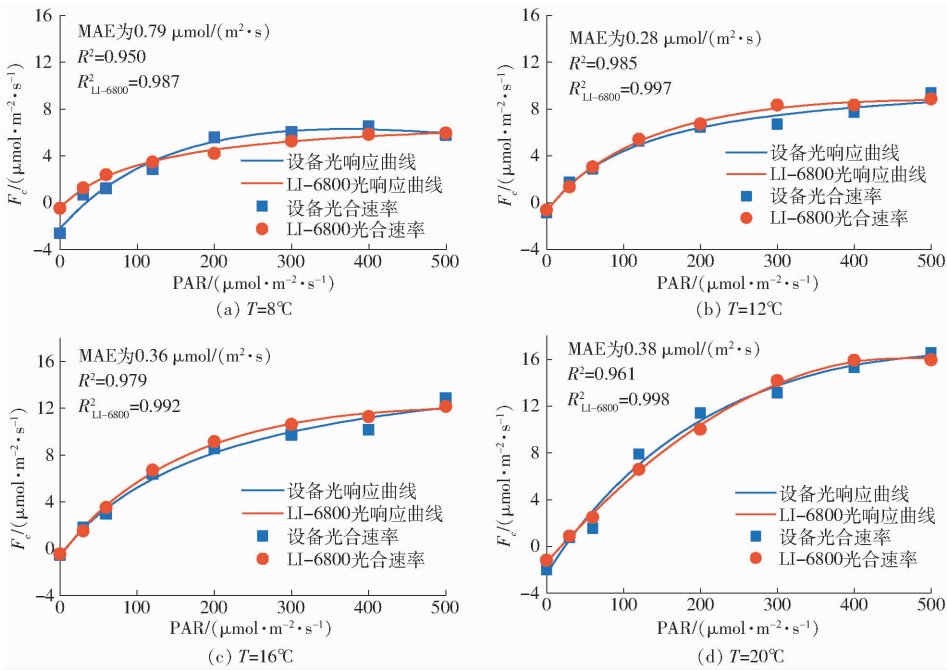


图 10 不同温度下番茄幼苗光响应曲线拟合结果

Fig. 10 Fitting results of light response of tomato seedlings at different temperatures

为分析系统对不同生长形态植株测量的适用性,采用与番茄碳同化率处理相同的方法,拟合不同温度下生菜光响应曲线,结果如图 11 所示,各温度梯度下 MAE 为 0.24、0.45、0.33、0.39 μmol/(m²·s),平均 MAE 仅为 0.35 μmol/(m²·s),说明本文设计系统与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统检测结果趋势及数值基本吻合,特别是 0 ~ 400 μmol/(m²·s)光照区间内,拟合结果基本一致,由图 11 可以看出,温度 16℃时光合速率最低,24℃生菜光合速率最高,该结果与单叶光合速率检测结果一致。随着光照的增强,本文设计系统拟合曲线略低于 LI-6800 型闭

路碳同化测量系统结果,这是由于强光条件下,生菜 CO₂吸收速率加快,内部循环扇扰动均匀需要一定时间,而本文系统传感器部署位置位于同化箱中部植株冠层平面,相比较于 LI-6800 型闭路碳同化测量系统从底部抽气方式气体的均匀程度和稳定性略差,因此检测结果偏小。通过分析拟合的决定系数可知,系统决定系数均不小于 0.985,能够满足生菜光响应曲线的测量。相比较于番茄拟合结果,系统在高光时,生菜光合速率偏小,证明本文设计系统在测量直立生长植株的群体光合时效果更好,与碳同化过程 CO₂浓度变化结果分析结论一致。

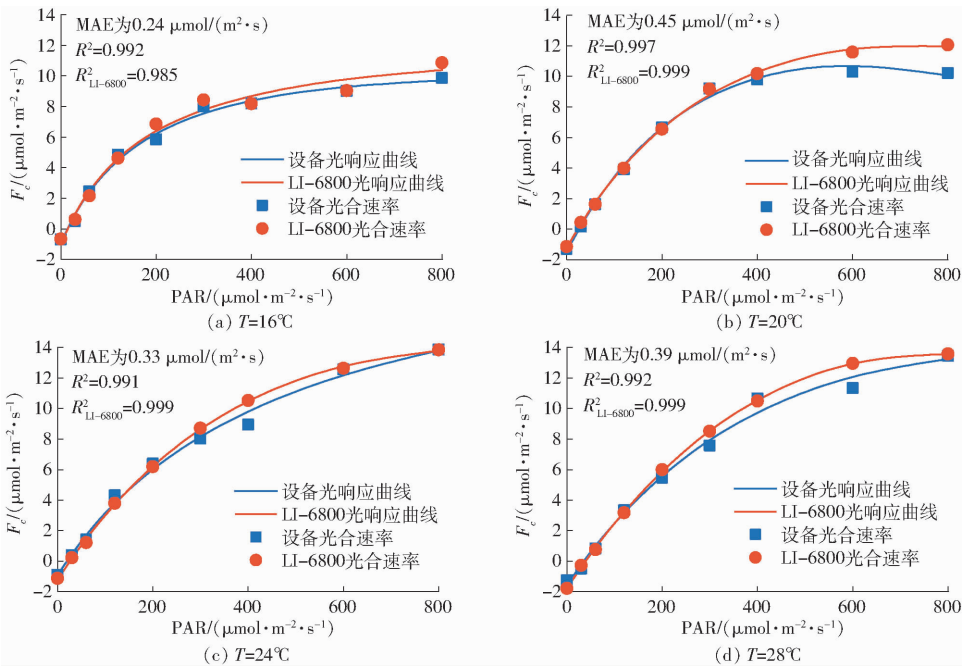


图 11 不同温度下生菜光响应曲线拟合结果

Fig. 11 Fitting results of light response of lettuce at different temperatures

4 结论

(1) 基于碳同化的光合速率测量系统中光调控平均误差为 $2.71\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 控制精度的误差小、稳定性高, 为碳同化过程 CO_2 浓度变化的测量提供了基础, 同时系统整体气密性好, 测试中最高漏气速率仅为 $0.047\text{ }\mu\text{mol}/(\text{mol}\cdot\text{min})$, 完全满足碳同化过程的检测要求。

(2) 本文设计的系统对叶菜与直立生长植株碳同化过程中 CO_2 变化量检测精度良好, 生菜与番茄在不同温度、光照梯度下检测均方根误差分别小于

$5.82\text{ }\mu\text{mol}/\text{mol}$ 和 $3.39\text{ }\mu\text{mol}/\text{mol}$, 能够满足不同作物的碳同化过程检测需求。

(3) 采用双曲线修正模型对本文测量系统与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统群体光合速率进行拟合, 通过计算两条光响应曲线间光合速率的 MAE, 得出番茄与生菜平均 MAE 分别为 0.45 、 $0.35\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 证明本文系统群体光合光响应曲线与 LI-6800 型闭路碳同化测量系统测量结果趋势基本吻合, 且偏差较小; 番茄与生菜光响应曲线拟合决定系数均不小于 0.95 , 能满足不同类型作物的检测需求, 且该系统在直立生长作物群体光合速率检测的效果更优。

参 考 文 献

[1] HERNANDEZ-SANTANA V, PEREZ-ARCOIZA A, GOMEZ-JIMENEZ M C, et al. Disentangling the link between leaf photosynthesis and turgor in fruit growth[J]. Plant Journal, 2021, 107(6): 1788 – 1801.

[2] USUDA H. Effects of elevated CO_2 on the capacity for photosynthesis of a single leaf and a whole plant, and on growth in a radish[J]. Plant Cell Physiol, 2006, 47(2): 262 – 269.

[3] 许大全. 光合速率、光合效率与作物产量[J]. 生物学通报, 1999, 34(8): 11 – 13.

XU Daquan. Photosynthetic rate, photosynthetic efficiency and crop yields[J]. Bulletin of Biology, 1999, 34(8): 11 – 13. (in Chinese)

[4] 李天来, 颜阿丹, 罗新兰, 等. 日光温室番茄单叶净光合速率模型的温度修正[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 274 – 279.

LI Tianlai, YAN Adan, LUO Xinlan, et al. Temperature modified model for single-leaf net photosynthetic rate of greenhouse tomato[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 274 – 279. (in Chinese)

[5] YIN J, LIU X Y, ZHANG M, et al. Photosynthetic rate prediction of tomato plant population based on PSO and GA[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 61 – 66.

[6] 胡瑾, 隆星月, 邓一飞, 等. 基于水分利用率与光合速率的温室作物需水模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 362 – 370.

HU Jin, LONG Xingyue, DENG Yifei, et al. Water demand model for greenhouse crops considering water use efficiency and photosynthetic rate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 362 – 370. (in Chinese)

[7] 张海辉, 张盼, 胡瑾, 等. 融合叶位光合差异的设施黄瓜立体光环境优化调控模型[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 266 – 272, 314.

ZHANG Haihui, ZHANG Pan, HU Jin, et al. Optimization regulation model of stereo light environment for facility cucumbers with leaf position photosynthetic differences[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2):

- 266–272, 314. (in Chinese)
- [8] 曹晏飞, 石苗, 刘鑫, 等. 保温被投影对塑料大棚室内光环境及番茄生长性能的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 190–196.
CAO Yanfei, SHI Miao, LIU Xin, et al. Effects of thermal insulation projection on indoor light environment and tomato growth performance in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6): 190–196. (in Chinese)
- [9] 陈晓丽, 杨其长, 王利春, 等. 红蓝光交替照射下生菜能量利用与光合性能分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 344–350.
CHEN Xiaoli, YANG Qichang, WANG Lichun, et al. Analysis of energy use efficiency and photosynthesis of lettuce under alternating red and blue irradiation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 344–350. (in Chinese)
- [10] SHIMADZU S, SEO M, TERASHIMA I, et al. Whole irradiated plant leaves showed faster photosynthetic induction than individually irradiated leaves via improved stomatal opening[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1512.
- [11] PARADISO R, MEINEN E, SNEL J F H, et al. Spectral dependence of photosynthesis and light absorptance in single leaves and canopy in rose[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 127(4): 548–554.
- [12] KEENAN T F, NIINEMETS U. Global leaf trait estimates biased due to plasticity in the shade[J]. Nature Plants, 2016, 3(1): 16201.
- [13] PETTERSEN R I, TORRE S, GISLERØD H R. Effects of leaf aging and light duration on photosynthetic characteristics in a cucumber canopy[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 125(2): 82–87.
- [14] TROUWBORST G, SANDER W H, HARBINSON J, et al. The influence of light intensity and leaf age on the photosynthetic capacity of leaves within a tomato canopy[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2015, 86(4): 403–407.
- [15] VOS J, OYARZÚN P J. Photosynthesis and stomatal conductance of potato leaves-effects of leaf age, irradiance, and leaf water potential[J]. Photosynthesis Research, 1987, 11(3): 253–264.
- [16] ZHU X G, SONG Q, ORT D R. Elements of a dynamic systems model of canopy photosynthesis[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2012, 15(3): 237–244.
- [17] 吴锴, 张静, 郝称意. 温室番茄群体光合作用模拟模型的研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2013, 33(3): 225–229.
WU Kai, ZHANG Jing, HAO Chengyi. Simulation of the canopy photosynthesis model of greenhouse tomato[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2013, 33(3): 225–229. (in Chinese)
- [18] 黄彬香. 红外气体分析法测定单叶光合速率常见问题及误差分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
HUANG Binxiang. Some questions and error analysis about measurement of gas exchange in leaf photosynthetic rate[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [19] CABRERA-BOSQUET L, ALBRIZIO R, ARAUS J L, et al. Photosynthetic capacity of field-grown durum wheat under different N availabilities: a comparative study from leaf to canopy[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1): 145–152.
- [20] 陈刚, 陈斌, 林郁欣, 等. 基于 L-系统的 3D 虚拟植物冠层光合作用模拟模型[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 275–283.
CHEN Gang, CHEN Bin, LIN Yuxin, et al. 3D virtual plant photosynthesis simulation model based on L-system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 275–283. (in Chinese)
- [21] HIKOSAKA K, KUMAGAI T, ITO A. Modeling canopy photosynthesis[J]. Springer Netherlands, 2016, 42: 239–268.
- [22] FERRAZ T N, RODRIGUES W P, NETTO A T, et al. Comparison between single-leaf and whole-canopy gas exchange measurements in papaya(*Carica papaya* L.) plants[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 209: 73–78.
- [23] 王修兰, 徐师华, 李佑祥. 植物群体光合速率测定装置与方法[J]. 农业工程学报, 1993, 9(4): 62–66.
WANG Xiulan, XU Shihua, LI Youxiang. An installation and method for measuring photosynthetic rate of plant population[J]. Transactions of the CSAE, 1993, 9(4): 62–66. (in Chinese)
- [24] SAKOWSKA K, ALBERTI G, GENESIO L, et al. Leaf and canopy photosynthesis of a chlorophyll deficient soybean mutant[J]. Plant Cell Environ., 2018, 41(6): 1427–1437.
- [25] COOMBS J, HALL D O, LANG S P, et al. Techniques in bioproductivity and photosynthesis[M]. Oxford: Pergamon Press, 1985.
- [26] 李守娟, 马杰, 唐立松, 等. 梭梭群落碳交换的尺度转换研究: 从叶片到群落[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 362–370.
LI Shoujuan, MA Jie, TANG Lisong, et al. Scale transformation of carbon exchange over *Haloxylon ammodendron* community: from leaf to community[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 362–370. (in Chinese)
- [27] YIN Jian, LIU Xinying, MIAO Yanlong, et al. Measurement and prediction of tomato canopy apparent photosynthetic rate[J]. IJABE, 2019, 12(5): 156–161.
- [28] GAO S, SU P, YAN Q, et al. Canopy and leaf gas exchange of *Haloxylon ammodendron* under different soil moisture regimes[J]. Science China Life Sciences, 2010, 53(6): 718–728.
- [29] 苏培玺, 周紫鹃, 张海娜, 等. 荒漠植物沙拐枣群体光合作用及土壤呼吸研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(3): 56–64.
SU Peixi, ZHOU Zijuan, ZHANG Haina, et al. Canopy photosynthesis and soil respiration of desert plant *Calligonum potanini* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(3): 56–64. (in Chinese)
- [30] 武强. 扩散式红外 CO₂ 分析器在植物群体光合测量中的应用研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
WU Qiang. The study on dispersive infrared CO₂ analyzer in measuring photosynthetic rate of plant population[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016. (in Chinese)