

激光与光电子学进展

基于红外气体分析的植物光合作用自动监测仪研制

沈春山, 夏银召, 肖宗涛, 张豪, 杨子龙, 李绍稳*

安徽农业大学信息与计算机学院智慧农业技术与装备安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230036

摘要 植物叶片生理参数的测定对植物生长发育的研究具有重要意义。为了实现植物光合作用等生理参数的低成本、高效率监测,设计了具有自动开合和手持式叶室的监测仪,通过接入节点和计算节点完成实验数据的采集和管理。接入节点完成 CO₂浓度、空气温湿度、大气压强等数据采集及光合生理参数的实时计算,计算节点负责人机交互界面和远程监测系统的数据存储和网络化传输。实验结果表明,该监测仪与国外同类型监测系统没有显著差异,能满足植物光合作用自动监测的要求。此外,该监测仪对植物生理参数的自动监测响应迅速、测量结果稳定可靠且成本低廉,对于监测作物生长发育状况、指导农作物施肥和病虫害防范具有重要的辅助作用。

关键词 测量与计量; 仪器研制; 光合速率; 植物生理; 远程监控

中图分类号 TP216+.1;S237

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2312001

Development of Plant Photosynthesis Automatic Monitor Based on Infrared Gas Analysis

Shen Chunshan, Xia Yinzhao, Xiao Zongtao, Zhang Hao, Yang Zilong, Li Shaowen*

Anhui Province Key Laboratory of Intelligent Agriculture Technology and Equipment, School of Information & Computer, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China

Abstract The determination of physiological parameters of plant leaves is of great importance to the study of plant growth and development. In order to realize the low-cost and high-efficiency monitoring of physiological parameters such as plant photosynthesis, a monitor with automatic opening and closing and handheld leaf chamber is designed in this paper, which can collect and manage experimental data by connecting nodes and computing nodes. The data collection such as CO₂ concentration, air temperature and humidity, atmospheric pressure and real-time calculation of photosynthetic physiological parameters are completed through the access node. The data storage and networked transmission of the human-computer interaction interface and remote monitoring system are realized through computing nodes. The results show that there is no significant difference between this instrument and similar monitoring systems abroad, and it can meet the requirements of automatic monitoring of plant photosynthesis. In addition, the monitor has fast response to automatic monitoring of plant physiological parameters, stable and reliable measurement results, and low cost. It plays an important assistant role in monitoring crop growth and development, guiding crop fertilization, and preventing plant diseases and insect pests.

Key words measurement and metrology; instrument development; photosynthetic rate; plant physiology; remote monitoring

1 引言

光合作用是维持植物生长的重要生理过程,光合速率则是衡量绿色植物光合能力的一个重要指标^[1-3],可通过测量 CO₂浓度的变化量估算植物光合能力的大小^[4-6]。

近年来,国内外学者在植物生理监测上做了大量探索并取得了诸多成果。国外代表性的仪器或方法有

LI-COR公司研发的LI-6800光合荧光测量系统、以色列PhyTech公司研发的可连续监测并记录完整植物光合作用与蒸腾速率的PTM-48a监测系统^[7]、美国PP Systems公司研发的CIRAS-光合测定系统^[8]等,这些设备普遍存在售价高或不易操作等问题,难以在国内推广。国内用于测量植物光合作用的代表性仪器较少。其中:便携式同位素光合作用测量系统^[9]同样存

收稿日期: 2021-09-16; 修回日期: 2021-11-06; 录用日期: 2021-11-12

基金项目: 安徽省科技计划(202104a06020012)、农业农村部农业国际合作项目(125A0607)

通信作者: *shwliahu.edu.cn

在价格高昂的问题;基于红外气体分析法的光合蒸腾仪^[10]成本有所降低,但存在叶室可操作性低、数据传输困难等问题。目前,研究人员也积极开展了相关自制仪器的研究工作,如:利用多光谱传感器研制的便携式作物生长监测诊断仪^[11-12],但该仪器只能监测冠层叶片氮含量、叶干重等,不能对光合参数、蒸腾参数进行综合监测;利用近红外波段光谱研制的植物叶片叶绿素监测仪^[13-14]通过叶绿素的变化判断植物生长状况,但通量较低,难以持续指示作物的生长发育情况。

针对国内外植物生理监测仪存在的短板技术和薄弱环节,本文以低成本、易操作、易传输为目标,在机械结构上设计了可适应多场景的叶室,基于红外气体分析法结合多种传感器技术研制了一款效率高、操作便捷、数据在线传输的低成本植物光合作用自动监测仪。

2 系统原理与组成

2.1 系统设计

红外气体分析法测量光合速率的基本原理:振动频率与气体分子振动频率相同的红外光在透过气体时均可形成共振被气体吸收,使透过的红外光能量减少。由异原子组成具有偶极矩的气体分子如 CO_2 、 CO 、 H_2O 、 SO_2 、 CH_3 、 NH_3 、 NO 在 $2.5\sim 25\ \mu\text{m}$ 的红外波段具有特别的吸收带。 CO_2 在中段红外区的吸收带有 4 处。其中, $4.26\ \mu\text{m}$ 的吸收带最强且不与 H_2O 相互干扰。 CO_2 吸收的 $4.26\ \mu\text{m}$ 红外光能与其吸收系数 (K)、气体的浓度 (C) 和测定的气室长度 (L) 有关,且服从比尔-朗伯定律,即 $E=E_0e^{-KCL}$ 。其中, E_0 为入射光的强度, e 为透过光的强度^[15-17]。红外线 CO_2 分析法就是通过检测 CO_2 对 $4.26\ \mu\text{m}$ 光谱的吸收测定光合作用过程

中 CO_2 的变化量。

随着 GaInAsSb 固溶物异质结生长在定量分析技术上的突破,基于窄带隙 III-V 族半导体在中红外光谱范围的高效发光二极管 (LED) 和光电二极管 (PD) 器件陆续出现^[18]。红外气体检测技术在工业生产以及代替传统气体检测技术方面都具有明显优势^[19],且具有准确度高、灵敏度高、反应速度快以及响应时间短等优点,可快速跟随 CO_2 浓度的变化,从而测量 CO_2 的瞬时变化^[20-21]。此外,红外气体检测技术的非接触测量原理不会破坏植株,易实现自动化、智能化等^[22-23],常用于工业部门中 CO_2 浓度的实时监测^[24-25]。

测量系统主要由红外 CO_2 传感器、流量传感器、气泵、电磁阀和控制与监测系统等模块组成。图 1 为仪器的内部工作原理图。系统提供闭路测量和开路测量两种模式。闭路测量时,可控阀门关闭,进气口和出气口密闭连接,整个气路是封闭式系统。在 1 号气泵作用下,管路中的气体依次经过缓冲罐、流量传感器、四通电磁阀、叶室、三通电磁阀、二氧化碳传感器,最后通过出气口回到进气口。通过实时循环测量,根据闭路公式计算净光合速率。开路测量时,可控阀门打开,进气口和出气口与外界贯通。在 2 号气泵作用下,进气口吸入的气体经过三通电磁阀到达 CO_2 传感器,此刻 CO_2 传感器数值为参比室 CO_2 的浓度。随后 2 号气泵关闭,1 号气泵开启,1 号气泵工作过程与闭路测量相同,此刻 CO_2 传感器数值为样品室 CO_2 的浓度。通过实时循环测量,根据开路计算公式可以得到光合速率。

实验仪器的组成如图 2 所示。主要分为机械结构、接入节点和计算节点三部分:机械结构部分构建光合仪控制机箱和叶室;接入节点主要完成 CO_2 变化量

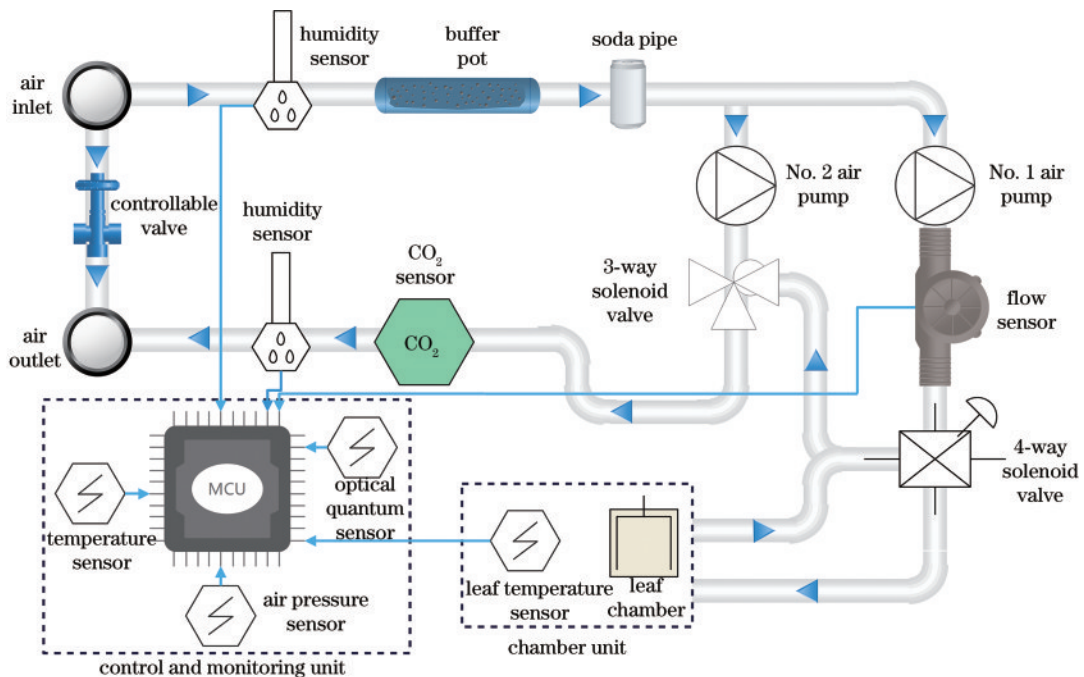


图 1 仪器内部的工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram inside the instrument

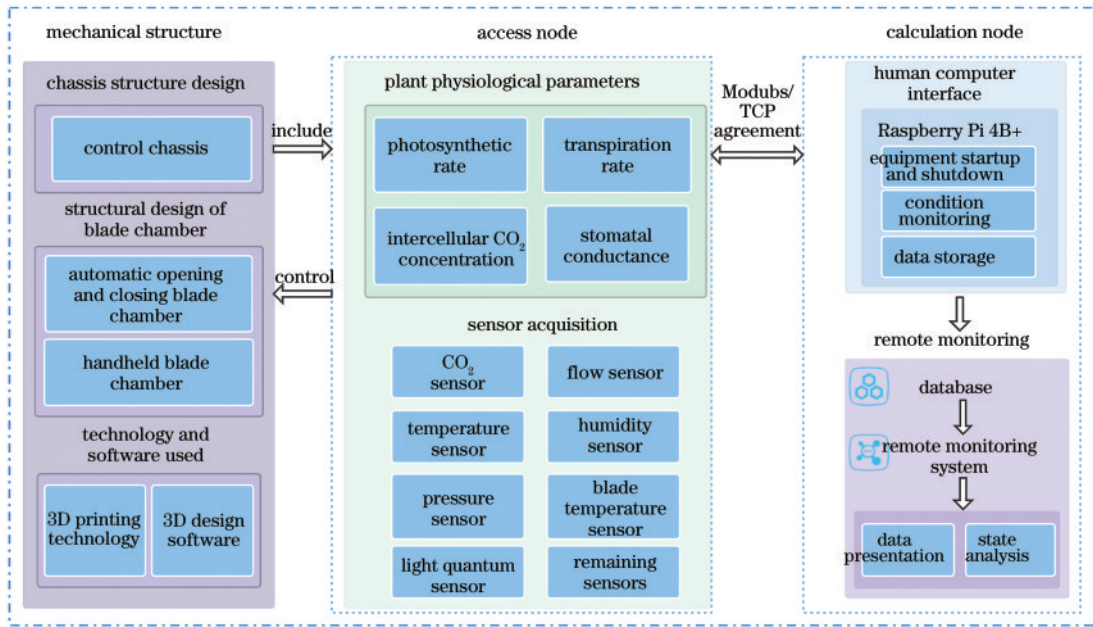


图 2 实验仪器的组成

Fig. 2 Composition of the experimental equipment

和环境数据的采集,实现光合速率、蒸腾速率等生理参数的转换;计算节点由人机交互界面和远程监测系统两部分组成,人机交互界面由树莓派 4B+ 和触控屏构成,可监测植物生理参数和仪器的工作状况,远程监测系统可以实时显示测量数据,通过 Modbus/TCP 与监控节点连接,完成历史和当前数据的查询及调控。

2.2 机械结构设计

机械结构包括控制机箱和叶室的设计,图 3 为本系统的实物图。



图 3 实验设备的实物图

Fig. 3 Physical diagram of the experimental equipment

控制机箱采用全铝合金材质,前后面板均有相应接口。图 4(a)、图 4(b)分别为机箱前后面板接口示意图。前面板中间开孔用于安装人机交互界面,后面板包含叶室接口、外接传感器接口、充电口和开关。其中:叶室接口用于连接被控叶室;外接传感器接口用于其他采集功能的扩展,如土壤湿度、氧气浓度;充电口和开关分别用于整个仪器的供电和启停。

叶室是光合仪的关键结构,传统光合仪叶室大多为手动开合,长时间手持式操作会造成极大的人力消

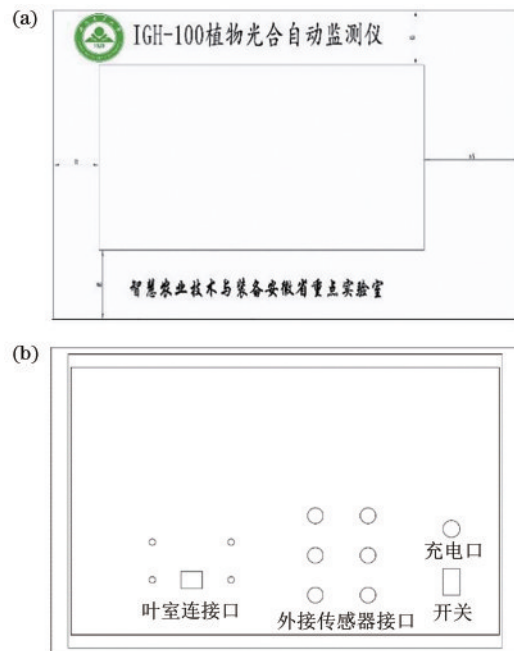


图 4 机箱前后面板示意图。(a)前面板;(b)后面板

Fig. 4 Schematic diagram of the front and rear panels of the chassis. (a) Front panel; (b) rear panel

耗。本监测仪系统共设计了两款应用于不同场景的叶室,包括自动可开合叶室和手持式叶室。叶室底座和支撑架使用聚乳酸(PLA)材料加工,PLA是一种可生物降解的热塑性塑料,具有良好的光泽性和抗拉强度。叶室的上下盖要保证足够的透光性,选用光敏树脂材料进行三维(3D)打印,抛光后能做到近似透明的艺术和实用效果^[26]。

第一种可自动开合叶室的结构如图 5 所示。该设

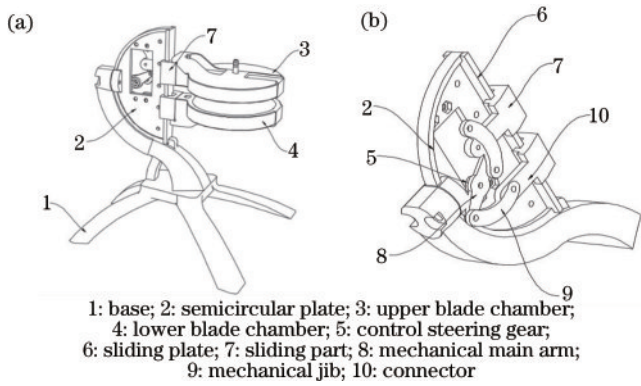


图 5 自动开合叶室的结构。(a)整体结构;(b)驱动组件的结构
Fig. 5 Structure of the automatic opening and closing leaf chamber. (a) Overall structure; (b) structure of the drive assembly

备通过连接线与光合监测仪连接,半圆板装配在底座上,上下叶室平行安装在滑动件上。具体操作特点有 4 个:1)测量时植物叶片放置在上下叶室之间,通过装有驱动组件的电动控制舵机驱使机械主臂进行跟随转动,在机械主臂的传动下两组机械副臂相互靠近,在连接件的传动下两组滑动件跟随控制舵机的正反转进行相互靠近、相互远离,从而实现上下叶室的自动开合、启闭工作;2)利用滑动板对滑动件进行滑动导向,保障后续叶室上下滑动中的平稳性,避免发生偏移;3)在上下叶室对应装配防护海绵,既能保证叶室的密闭性,也能对植物叶片的夹取起到缓冲作用,最大程度减少对被测叶片的伤害;4)使用的 ZX361D 舵机具有一定的耐堵转能力,可长时间进行精确的位置控制,且舵机之间可串联(最多可串联 255 个舵机),使用前只需修改 ID 使每个舵机 ID 号不一样就可以同时控制多个舵机运动,进而使光合仪实现多叶室测量,可同时监测多个叶片的光合速率,避免了单个叶片测量带来的误差。

第二种手持式叶室可适应人工便携式测量场景,且能与自动开合叶室灵活更换,其结构如图 6 所示。具体操作特点有 3 个:1)测量时电推杆伸缩带动驱动板下移,四组联动杆下移且对复位弹簧进行压缩,四组联动杆底端与底板连接,可同步驱使上下检测板分离,便于工作人员对样品进行放置;2)样品放置完全后电推杆复位,下检测板在复位弹簧的牵拉作用下与上检测板共同作用将样品夹住,整体限位均匀度较佳,样品受力均匀,既保证了样品放置的稳定性,又减小了样品的损伤,规避了传统叶室对样品夹持稳定性、均匀度较差的不足;3)检测完成后,通过设置有的两组导向组件,上下检测板分别对应顶板、底板滑动连接,在后续清理时可同步驱使上下检测板在对应顶板和底板上滑动,使上下检测板滑动延伸裸露出叶室本体,同时利用导向板、一二号导向腔对上下检测板滑动进行导向,有利于工作人员对上下检测板上的样品

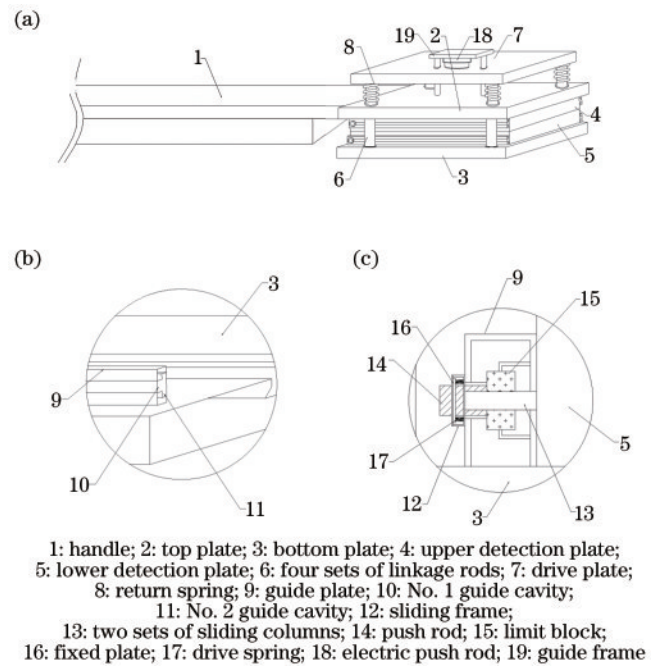


图 6 手持式叶室的结构。(a)整体结构;(b)导向组件的放大图;(c)驱动组件的放大图
Fig. 6 Structure of the hand-held leaf chamber. (a) Overall structure; (b) enlarged view of guide assembly; (c) enlarged view of drive assembly

残留进行清理。

2.3 接入节点的设计

接入节点能实现 CO₂ 浓度、空气温湿度、大气压强等数据的采集和光合速率等生理参数的计算。为了准确稳定地测量相关参数,选用的传感器均具有技术成熟、组网方便,高效能低功耗的特点,具体参数如表 1 所示。其中:DC 表示直流电压;RH% 表示相对湿度;FS 表示全量程的测量精度。

图 7 为接入节点的电路框图。接入节点使用的控制器是 STM32F407IGT6 单片机,包含串行外设接口、IIC、12 位的模数转换器(ADC)、SWD 接口等,同时预留了多组步进电机驱动专用接口。其中,程序存储区的容量为 1024 kB,数据存储区的容量为 192 kB。考虑到系统的稳定性,没有使用控制器内部的时钟源,而是为实时时钟(RTC)提供了 32.768 kHz 的时钟源。外部设有 2 个 USB 接口、1 个以太网接口和串口屏接口,可通过 RS-232 串口、RS-485、CAN、蓝牙等与其他模块的上位机进行通信。

光合速率 P_n 可表示为

$$P_n = -K_v \times \Delta C, \quad (1)$$

式中: ΔC 为 CO₂ 浓度的变化量; K_v 为光合测量系统中单位面积的质量流速,可表示为

$$K_v = 2035.5 \times \frac{V \times P}{A \times T_a}, \quad (2)$$

式中: P 为大气压强; T_a 为环境温度; V 为气体流速; A 为叶片面积。

表 1 传感器的参数
Table 1 Parameters of the sensor

Name	Model	Measurement range	Precision	Operating voltage /V
Infrared carbon dioxide sensor	JX-103	0–2000 mol/L	±5% (FS)	9–24 (DC)
Temperature and humidity sensor	SHT30	−40–85 °C, 0%RH–100%RH	±0.4 °C, ±3%	2.4–5.5 (DC)
Blade temperature sensor	LMT70	−55–155 °C	±0.05 °C	2–5 (DC)
Flow sensor	AWM3100V	200 cm/min	±0.5% (reading)	8–15
Atmospheric pressure sensors	BMP-280	300–1250 hPa	±1 hPa	1.7–3.6 (DC)
Optical quantum sensors	RY-GH	0–4000 μmol·m ⁻² ·s	0–50 μV/(μmol·m ⁻² ·s)	0–2.5 (DC)

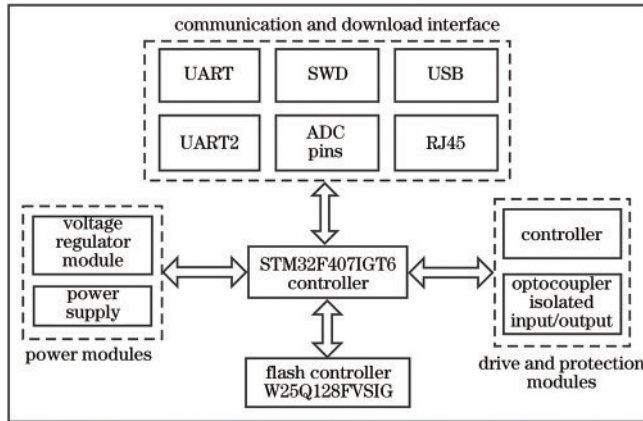


图 7 接入节点的电路框图

Fig. 7 Circuit block diagram of the access node

接入节点程序基于 Keil 开发平台使用 C 语言开发, 主要步骤如图 8 所示。自上而下分为准备工作、光合测量、数据上传三个过程: 准备工作时各传感器接入管脚初始化, 判断各传感器是否能正常工作, 若发生异常则排除故障, 若正常工作则相应传感器开始多路 AD 信号采集, 等待监测仪启动信号下发; 具备启动条件后进入光合测量阶段, 在气泵和舵机的作用下叶室闭合并实时采集环境参数, 记录所得参数后发送给上位机并计算实时光合速率, 多组实时光合速率的平均值即为该阶段的净光合速率, 完成多组净光合速率存储后进入数据上传阶段; 数据上传即批量获取数据后统一上传给上位机, 最终实现计算节点数据的入库。

2.4 计算节点的设计

图 9 为典型的实验过程活动图。计算节点分为人机交互界面和远程监测系统。人机交互界面的上位机为 Raspberry Pi 4B+, Raspberry Pi 中运行基于 PyQt5 开发的图形界面, 开发平台综合使用 PyThon3.5+PyQt5+pycharm 技术。远程监测系统基于 .Net Framework 框架使用 C# 语言开发, 通过不同的 WebForm 窗体与数据库交互及 JavaScript 脚本实现登陆、注册、数据展示、数据处理等功能。

人机交互界面如图 10 所示。各个按钮对应相应的指令, 操作相应指令可以实时查看光合速率等生理参数。可通过切换手动/自动模式控制下位机工作, 手动模式下每次只测量一组数据, 自动模式下无需重复操作, 每隔 2 min 自动进行数据采集和传输。此外, 还

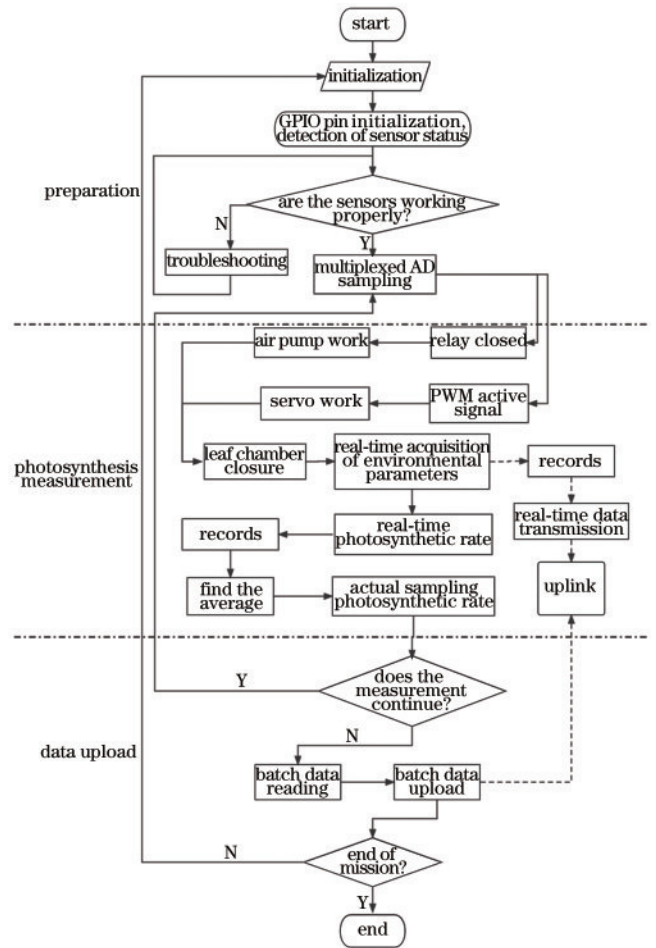


图 8 接入节点的工作流程

Fig. 8 Workflow of the access node

可以实时查看历史参数变化曲线图, 最终采集的数据会保存到 mariaDB 数据库中。

目前, 市场上的主流光合测量仪器均采取有线数据传输方式, 测量的数据如何在野外在线远程传输的问题越来越突出。该监测仪系统计算节点设计的远程监测系统能实现光合速率等植物生理参数的远程传输, 解决了市场上普遍存在的数据野外在线远程传输难题。远程监测系统的监控界面如图 11 所示。远程监测系统采用 Web 客户端模式开发, 各节点模块间采用标准的 Modbus/TCP 通讯协议, 用于实时传输嵌入式计算机端获取的数据。远程监测系统基于 SCADA 组态软件技术, 提供数据库及报表服务, 管理员可以调

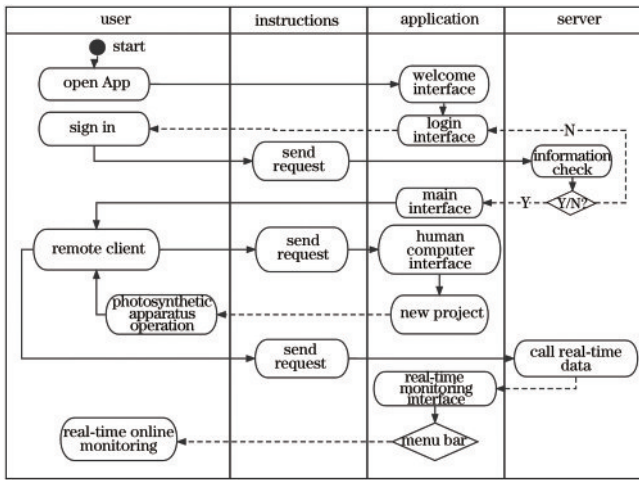


图 9 计算节点的活动图

Fig. 9 Activity diagram of compute nodes

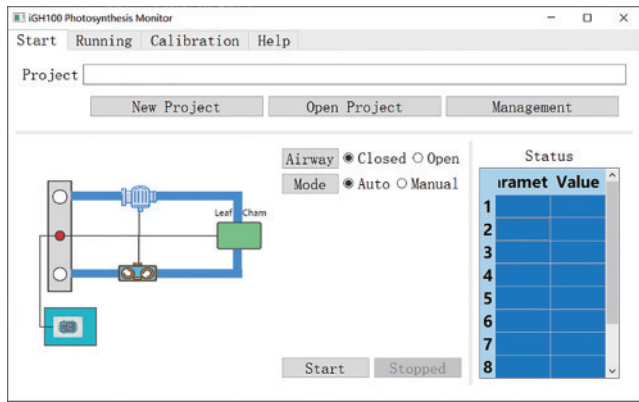


图 10 人机交互界面

Fig. 10 Human-computer interaction interface



图 11 远程监测界面

Fig. 11 Remote monitoring interface

整组态布局,通过 Web 客户端实现远程实验过程操控、光合速率等参数的图形化展示、实验数据导出等。实时监控系统的测量数据会接入植物生长调控系统中辅助生长环境调控。

3 实验环境与系统功能验证

3.1 实验对象和方法

2021年7月在智慧农业技术与装备安徽省重点实

验室进行了多次测试,监测系统的设置如图 12(a)、图 12(b)所示。选取的测试对象分别为草莓植株和天竺葵植株。考虑到早晚光照强度不够,光合作用强度低的问题,2次实验在 9:30—17:30 进行,每组植株选取 2 片大小相似的叶片。对比仪器选用以色列 PhyTech 公司的 PTM-48a 监测系统,用两台仪器先后测量同一叶片的相同部位,同一部位用两台仪器测量 3 次,测量后做好相关数据记录,包括测量时间、实验序号等。2 次实验分别测量 5 天,共获得 800 组有效数据。



图 12 监测实验。(a)草莓植株;(b)天竺葵植株

Fig. 12 Monitoring experiments. (a) Strawberry plants;

(b) geranium plants

3.2 测量准确度分析

图 13 为 2 种植株的对比实验结果。其中:横坐标为本监测仪测量的光合速率;纵坐标为 PTM-48a 测量的光合速率。可以发现,两者的时间分辨率相近,测量的草莓和天竺葵植株决定系数分别为 0.86 和 0.84。此外,绘制 9:30—17:30 范围内每隔 15 min 测量数据的平均值,生成的多线图也可以反映仪器的准确性,2 种植株的多线图如图 14(a)、图 14(b)所示。

由测量结果可知,两台仪器测量的草莓和天竺葵植株光合速率决定系数可靠。在 9:30—17:30 范围内,两台仪器获得的全天光合速率曲线趋势基本一致,呈现良好的同步性。这表明在不同环境、不同植株的监测实验中,本监测仪具有可靠的测量准确性和稳定性。

3.3 响应时间和系统稳定性测试

将仪器的气路连接到 CO₂ 发生器上,设置 CO₂ 发生器的气体浓度并通入 3 种不同浓度的 CO₂ 气体,从发生器与仪器接通开始计时,系统的稳定时间就是监

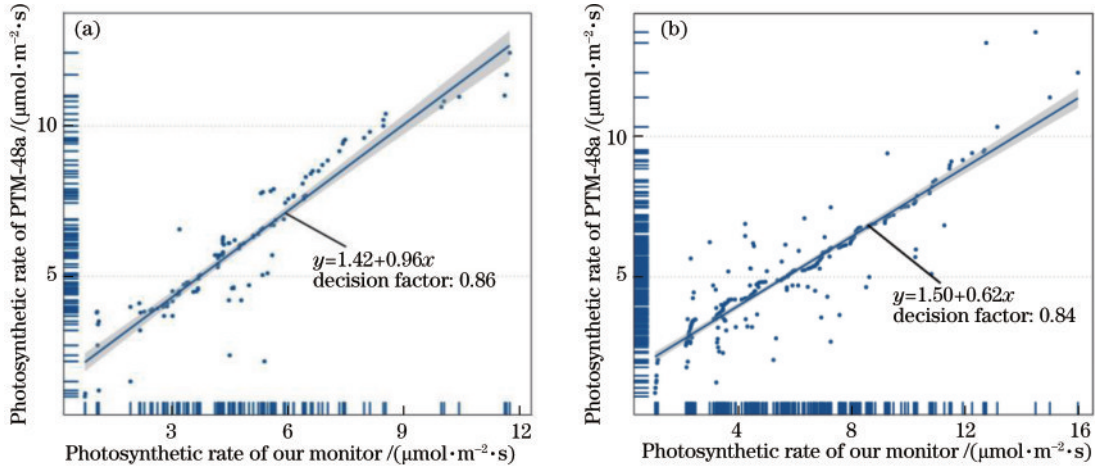


图 13 不同植株的光合速率线性回归图。(a)草莓植株;(b)天竺葵植株

Fig. 13 Linear regression graph of photosynthetic rate of different plants. (a) Strawberry plant; (b) geranium plants

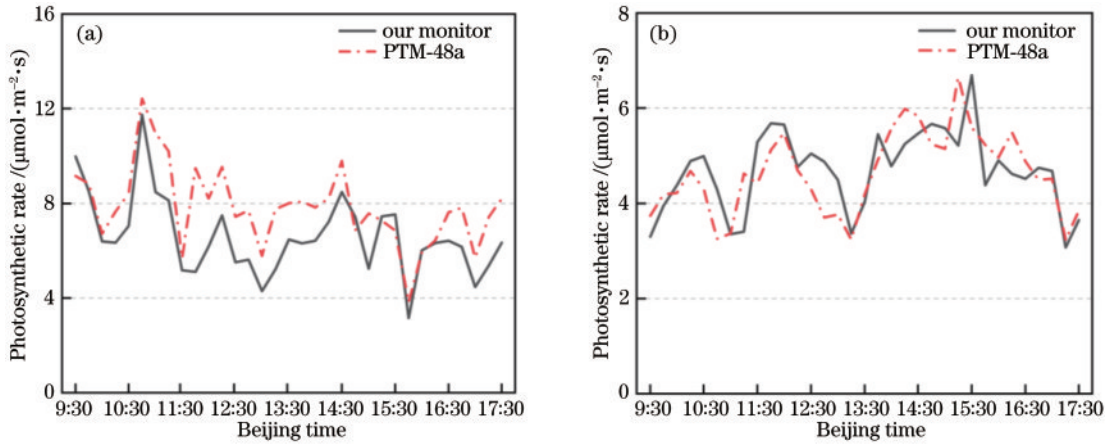


图 14 不同植株的光合速率多线图。(a)草莓植株;(b)天竺葵植株

Fig. 14 Multi-line graph of photosynthetic rate of different plants. (a) Strawberry plant; (b) geranium plant

测仪的响应时间。响应时间取决于气室结构、气体扩散速度以及处理器处理数据的时间^[27]。记录 CO₂ 气体浓度为 300 mol/L 时监测仪稳定所需的时间 *T*, 再依次记录通入浓度为 500 mol/L 和 700 mol/L 的 CO₂ 气体后系统稳定所需的时间, 结果如图 15 所示。固定光照强度为 500 μmol·m⁻²·s 时, 记录 CO₂ 气体浓度为 300、500、700 mol/L 下连续 20 组天竺葵植株光合速率的大

小, 结果如图 16 所示。设相同 CO₂ 气体浓度下连续 20 组数据的中位数为 *x*, 单个数据值为 *x_i*, 计算不同 CO₂ 气体浓度下的偏差 (*X_{BIAS}*)、相对偏差 (*X_{relBIAS}*)、均方根误差 (*R_{MSE}*) 和相对均方根误差 (*R_{relMSE}*), 可表示为

$$X_{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)}{n}, \quad (3)$$

$$X_{relBIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i/x - 1)}{n} \times 100\%, \quad (4)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n}}, \quad (5)$$

$$R_{relMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i/x - 1)^2}{n}} \times 100\%。 \quad (6)$$

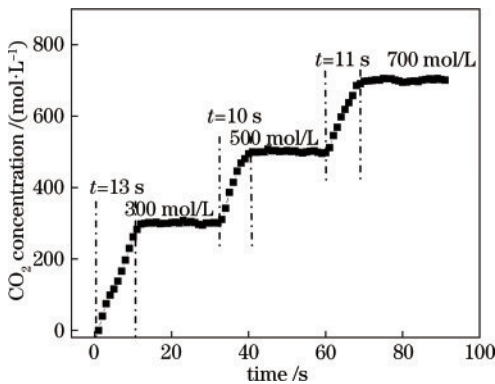


图 15 系统的响应时间与稳定性测试曲线

Fig. 15 Response time and stability test curve of the system

不同 CO₂ 气体浓度下检测仪的误差指标如表 2 所示。可以发现, 监测仪的响应稳定时间为 10~15 s, 响应时间越短, 表明监测仪的反应速度越快, 灵敏度越高。检测仪的 *X_{BIAS}* 和 *X_{relBIAS}* 分别为 0.064 μmol·m⁻²·s

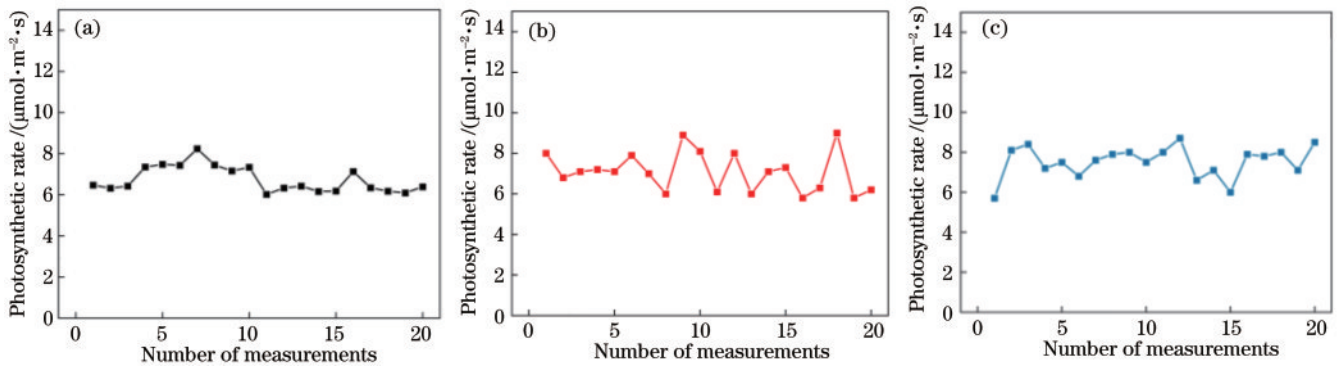


图 16 不同 CO₂ 浓度下系统的稳定性测试曲线。(a) 300 mol/L; (b) 500 mol/L; (c) 700 mol/L

Fig. 16 Stability test curve of the system under different CO₂ concentrations. (a) 300 mol/L; (b) 500 mol/L; (c) 700 mol/L.

表 2 不同气体浓度下检测仪的误差

Table 2 Errors of detectors under different gas concentrations

CO ₂ concentration / (mol·L ⁻¹)	X _{BIAS} / (μmol·m ⁻² ·s)	X _{relBIAS} / %	R _{MSE} / (μmol·m ⁻² ·s)	R _{relMSE} / %
300	0.345	0.054	0.708	1.185
500	-0.023	-0.003	0.764	0.484
700	-0.129	0.984	0.791	0.989
Overall	0.064	0.345	0.754	0.886

和 0.345%，R_{MSE} 和 R_{relMSE} 分别为 0.754 μmol·m⁻²·s 和 0.886%，光合速率的偏差和均方根误差指标越接近 0，表明系统越稳定。综上所述，该监测仪具有一定的灵敏度和稳定性。

4 结 论

基于红外气体分析法研制了一种在线式植物光合作用自动监测仪，通过合理的机械结构设计、技术成熟的传感器、便携的人机界面和配套的远程监控系统，实现了光合速率等植物生理参数的自动采集和监控。其中，叶室通过电机驱动可自动开闭合，主控机箱可以连接多个叶室，实现高效率、自动化测量。该仪器与 PTM-48a 测量的草莓植株光合速率相关系数为 0.86，测量的天竺葵植株光合速率的相关系数为 0.84。在不同 CO₂ 浓度下，系统稳定所需时间为 10~15 s 且测量结果稳定。这表明本监测仪对植物生理参数的自动监控响应迅速、测量结果稳定可靠且成本低廉，对于监测作物生长发育状况、指导农作物施肥和病虫害防范具有重要的辅助作用，在植物表型监测领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] 李明军. 植物与植物生理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2015.
Li M J. Plants and plant physiology[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2015.

[2] 吴晓龙, 吴毅, 张斌, 等. 7 种北美橡树的光合生理特性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(3): 34-39.
Wu X L, Wu Y, Zhang B, et al. Comparative analysis on photosynthesis characteristics of seven North American

oaks[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(3): 34-39.

[3] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2902-2909.
Yu W Y, Ji R P, Feng R, et al. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2902-2909.

[4] 叶子飘. 光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 727-740.
Ye Z P. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO₂[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(6): 727-740.

[5] Liu Y X, Mo X, Xu M L. Effect of low temperature on the photosynthesis in Hainan wild rice (*Oryza Rufipogon Griff.*)[J]. Hans Journal of Agricultural Sciences, 2019, 9 (10): 963-970.

[6] Walker B J, Orr D J, Carmo-Silva E, et al. Uncertainty in measurements of the photorespiratory CO₂ compensation point and its impact on models of leaf photosynthesis[J]. Photosynthesis Research, 2017, 132(3): 245-255.

[7] Balaur N S, Vorontsov V A, Kleiman E I, et al. Novel technique for component monitoring of CO₂ exchange in plants[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2009, 56 (3): 423-427.

[8] 颜卫东, 杨显贺, 史作安, 等. Ciras-2, Ciras-1 光合测定系统原理与常见问题分析[J]. 实验室科学, 2013, 16(6): 29-32.
Yan W D, Yang X H, Shi Z A, et al. Determination of principle and the common problems of Ciras-2, Ciras-1 photosynthesis system[J]. Laboratory Science, 2013, 16 (6): 29-32.

[9] Ma W T, Tcherkez G, Wang X M, et al. Accounting

- for mesophyll conductance substantially improves ^{13}C -based estimates of intrinsic water-use efficiency[J]. *New Phytologist*, 2021, 229(3): 1326-1338.
- [10] 殷春渊, 王玉玉, 刘贺梅, 等. 水稻食味品质性状间相关性分析及其与叶片光合作用的关系[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(4): 119-127.
- Yin C Y, Wang S Y, Liu H M, et al. Correlation analysis of rice taste quality characteristics and their relationship with leaf photosynthesis[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(4): 119-127.
- [11] 杨建宁, 张井超, 朱艳, 等. 便携式作物生长监测诊断仪性能试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(4): 208-212, 201.
- Yang J N, Zhang J C, Zhu Y, et al. Experiments on performance of portable plant growth monitoring diagnostic instrument[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4): 208-212, 201.
- [12] 倪军, 姚霞, 田永超, 等. 便携式作物生长监测诊断仪的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 150-156.
- Ni J, Yao X, Tian Y C, et al. Design and experiments of portable apparatus for plant growth monitoring and diagnosis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(6): 150-156.
- [13] 张智勇, 马旭颖, 龙耀威, 等. 作物叶片叶绿素动态监测系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(S1): 115-121, 166.
- Zhang Z Y, Ma X Y, Long Y W, et al. Design and development of crop chlorophyll dynamic monitoring system based on internet of things[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(S1): 115-121, 166.
- [14] 杨彪, 杜荣宇, 杨玉, 等. 便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 180-186.
- Yang B, Du R Y, Yang Y, et al. Design of portable nondestructive detector for chlorophyll content of plant leaves[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 180-186.
- [15] 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 B X. Some questions and error analysis about measurement of gas exchange in leaf photosynthetic rate [D]. Beijing: China Agricultural University, 2003.
- [16] 张军, 王国林, 马昊军, 等. 高温二氧化碳气体红外辐射实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(12): 3169-3173.
- Zhang J, Wang G L, Ma H J, et al. Infrared radiation experimental measurement and analyse of carbon dioxide at high temperature[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(12): 3169-3173.
- [17] 张振超, 王金牛, 孙建, 等. 土壤温室气体测定方法研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(5): 1228-1243.
- Zhang Z C, Wang J N, Sun J, et al. A review of methods for measuring soil greenhouse gases[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(5): 1228-1243.
- [18] 赵庆川. 中红外甲烷二氧化碳双气体传感系统的研制[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2330001.
- Zhao Q C. Development of a mid-infrared methane and carbon dioxide dual-gas sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2330001.
- [19] 李亚飞, 刘志伟, 张天羽, 等. 近红外激光二氧化碳传感系统的研制及应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0514003.
- Li Y F, Liu Z W, Zhang T Y, et al. Development and application of near-infrared laser carbon dioxide gas sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0514003.
- [20] Gibson D, MacGregor C. A novel solid state non-dispersive infrared CO_2 gas sensor compatible with wireless and portable deployment[J]. *Sensors*, 2013, 13(6): 7079-7103.
- [21] Lim Y A, Chong M N, Foo S C, et al. Analysis of direct and indirect quantification methods of CO_2 fixation via microalgae cultivation in photobioreactors: a critical review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110579.
- [22] 李少昆. 作物光合作用研究方法[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2000, 18(4): 321-330.
- Li S K. Survey on research method of crop photosynthesis [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2000, 18(4): 321-330.
- [23] 袁小雪, 刘滔, 谢碧俊, 等. 工作场所空气中挥发性有机物的分析方法研究进展[J]. *理化检验-化学分册*, 2018, 54(7): 851-862.
- Yuan X X, Liu T, Xie B J, et al. Recent progress of analytical methods for volatile organic compounds in workplace air[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2018, 54(7): 851-862.
- [24] Azhand N, Sadeghizadeh A, Rahimi R. Effect of superficial gas velocity on CO_2 capture from air by *Chlorella vulgaris* microalgae in an Airlift photobioreactor with external sparger[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(4): 104022.
- [25] Pereira H, Páramo J, Silva J, et al. Scale-up and large-scale production of *Tetraselmis* sp. CTP4 (Chlorophyta) for CO_2 mitigation: from an agar plate to 100- m^3 industrial photobioreactors[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 5112.
- [26] 邓兴泓. 多材料光固化 3D 打印装置及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- Deng X H. Research on device and process of multi-material stereolithography[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [27] 隋越, 董明, 郑传涛, 等. 差分式中红外一氧化碳检测仪的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(10): 2282-2289.
- Sui Y, Dong M, Zheng C T, et al. Development of a differential mid-infrared carbon monoxide detection device [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(10): 2282-2289.