

文章编号 1004-924X(2019)06-1397-08

种子呼吸 CO₂ 浓度检测系统

贾良权¹, 祁亨年¹, 胡文军¹, 赵光武², 阚瑞峰^{3*}

(1. 湖州师范学院, 浙江 湖州 313000;

2. 浙江农林大学, 浙江 杭州 311000;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对传统种子呼吸 CO₂ 浓度检测方法中检测精度低的问题, 为了满足测量需要, 提出一种采用可调谐二极管激光器吸收光谱技术的种子呼吸测量系统方案。该系统是由多次反射池结构的种子呼吸容器、分布反馈式激光器及其控制电路、光电转换及放大电路、数据采集电路、上位机软件等构成, 设计种子呼吸容器其空间体积为 1.5 L, 激光器光源采用 2 004 nm 波段, 多次反射池光程为 16 m。然后, 基于朗伯比尔定律, 通过波长调制吸收光谱技术, 利用二次谐波实时反演出种子呼吸过程中产生 CO₂ 气体的浓度。测试结果显示: 种子呼吸 CO₂ 浓度测量的稳定重复性为 0.033%, CO₂ 浓度的线性拟合度为 0.999 38, CO₂ 浓度检测极限为 1.7 ppm。通过实验对糯玉米种子进行检测, 获得 20 g 玉米种子呼吸的变化曲线, 其 12 h 内变化量为 2 750.5 ppm, 呼吸速率为 229.2 ppm/h, 实验结果表明该系统能解决种子呼吸 CO₂ 浓度无法连续性测量、浓度检测精度低等问题。

关键词:二氧化碳; 可调谐二极管激光器吸收光谱技术; 多次反射池; 种子呼吸

中图分类号: O433.1; O657.38 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192706.1397

CO₂ concentration detection system for seed respiration

JIA liang-quan¹, QI heng-nian¹, HU wen-jun¹, ZHAO guang-wu², KAN rui-feng^{3*}

(1. Huzhou University, Huzhou 313000, China;

2. Zhejiang A&F University, Hangzhou 311000, China;

3. State Key Laboratory of Applied optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: kanrui.feng@aiofm.ac.cn

Abstract: To address the problem of low detection accuracy in the traditional method of seed-breathing CO₂ concentration measurement, a seed-breathing measurement system based on tunable diode laser absorption spectroscopic technology was proposed to meet the needs of seed-breathing CO₂ concentration measurements. First, the system was designed to consist of a seed-breathing container, a distributed feedback laser and control circuit, photoelectric conversion and an amplification circuit, a data acquisition circuit, and upper computer software. The space volume of the seed breathing container was 1.5 L, the laser source was in the 2 004-nm band, and the light path of the multiple

收稿日期: 2019-02-25; **修订日期:** 2019-03-20.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 31701512); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61772198); 浙江省重点研发项目资助 (No. 2019C02013); 湖州市自然科学基金资助项目 (No. 2017YZ03)

reflection cell was 16 m. Then, based on Lambert's law and wavelength modulated absorption spectroscopy, the concentration of CO_2 produced during seed respiration could be retrieved in real time using second harmonics. The stable repeatability of the CO_2 concentration measurement in seed respiration is 0.033%, the linear fitting degree of CO_2 concentration is 0.999 38, and the detection limit of CO_2 concentration is 1.7×10^{-6} . The change curve of 20-g maize seed respiration is obtained by testing waxy maize seeds. The amount of change in waxy maize seed respiration after 12 h is $2\,750.5 \times 10^{-6}$, and the respiration rate is $229.2 \times 10^{-6}/\text{h}$. Experimental results show that the system can solve the inability for continuous measurement of CO_2 concentration in seed respiration and the low precision of concentration detection.

Key words: CO_2 ; Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS); multiple reflection cell; seed respiration

1 引言

种子的呼吸是其生命力的体现,种子呼吸强弱与其活力呈正相关性^[1-2],通过种子呼吸产生的 CO_2 浓度变化情况即可检测出种子活力,也可以了解种子生理变化情况,因此对种子呼吸的检测具有重要意义。目前对种子呼吸的检测方法主要采用小篮子法或者化学反应方法,后者利用 CO_2 与草酸等溶液反应生成沉淀物,通过称量沉淀物重量来计算 CO_2 排放量^[3],其实验方法简单,但是测量精度较低,无法实时记录种子呼吸变化情况。也有传感器技术进行种子呼吸测量,但检测时间也较长,如潘威^[4]采用氧传感器方法检测了烟草种子呼吸的耗氧速率,测量时间为 180 h,芮海云^[5]运用简易呼吸测定装置对种子呼吸速率进行了测量,研究了多种实验误差产生的因素,李海霞^[6]等对小篮子法测量种子呼吸进行了改进。

传统的检测方法须对样品进行长时间收集以增加 CO_2 的浓度,从而造成检测、分析的工作量大,并且较难以对种子呼吸过程中 CO_2 变化量进行连续、动态地高时间分辨率的实时在线监测,从而导致种子呼吸的变化过程细节情况难以呈现,可调谐二极管激光器吸收光谱技术 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) 是近年来快速发展的一种痕量气体浓度监测技术,具有高灵敏度、高分辨率的特点。TDLAS 主要有直接吸收和波长调制两种技术,波长调制方法的检测极限比直接吸收方法检测极限往往高 1~2 个数量级,波长调制技术的信噪比主要受到系统电路噪声、激光器额外噪声、系统的标准具等噪声的限制,通过优化算法和采用多种抑制噪声

的方法,目前已经能够达到 ppb (part per billion) 级别甚至 ppt (part per trillion) 级别的检测限^[7-8]。国内外很多学者对采用 TDLAS 技术进行 CO_2 浓度检测进行了研究,陆恒^[9]等利用 TDLAS 技术在 38.4 m 光程 0.15 个标准大气压下同时对 CO_2 和水汽进行了检测,获得了 CO_2 气体浓度检测极限为 10^{-5} 。王雪梅^[10]对不同浓度的 CO_2 气体进行检测,得到气体浓度与二次谐波峰值的线性相关系数为 0.998,检测极限为 450 ppm。李萌^[11]利用微型多次反射腔的 TDLAS 系统对海洋界面 CO_2 气体进行检测。张可可^[12]对采用 TDLAS 进行 CO_2 浓度检测进行了压强补偿研究,补偿后误差范围在 2% 内。袁松^[13]利用 2 704 nm 波段激光器采用直接吸收方式,获得 CO_2 浓度检测极限达到 10^{-7} 量级。

本项目首先介绍了采用 TDLAS 技术进行种子呼吸检测的原理,基于怀特池结构的种子呼吸容器设计原理及方法,然后设计了一款基于多次反射池(怀特池)技术的种子呼吸检测系统,最后对检测系统进行了稳定性和重复性测量,验证了系统的稳定度,并进行种子呼吸实际测量实验,获得了糯玉米种子呼吸变化曲线。

2 实验原理

本系统的种子呼吸 CO_2 浓度的测量原理,采用朗伯比尔定律,利用波长调制技术,其原理可以简述为:当可调谐二极管激光器的注入电流为 $i(t)$,受到频率为 ω_m 的正弦波调制时^[14-16]:

$$i(t) = i_0 + i_a \cos(\omega_m t), \quad (1)$$

其中: i_0 为偏置电流、 i_a 为电流调制幅度。二极管激光器输出的瞬时频率为:

$v(t)=v_0+v_a\cos(\omega_mt)$, (2)

其中: v_a 为频率调制幅度, v_0 为偏置电流对应的二极管中心频率。二极管激光器输出的光通过吸收池后的强度 $I(v)$ 展开为傅里叶级数:

$$I(v_0,t)=\sum_{n=0}^{\infty}A_n(v_0)\cos(n\omega_mt),$$
 (3)

其中 A_n 为各次谐波分量。根据朗伯比尔定律:

$I(v)=I_0\exp(-\alpha(v)NL)$, (4)

其中: $\alpha(v)$ 为在频率 v 处气体的吸收截面, N 是吸收气体浓度, L 是吸收光程长度。

在理想条件下, I_0 不为 v 的函数,调制过程中不会出现其幅度调制充分。当吸收池中气体对光强吸收 $\alpha(v)NL\ll 1$ 时,各次谐波分量通过锁相放大器可以得到:

$$A_n(v_0)=\frac{2I_0NL}{\pi}\int_0^\pi-\alpha(v_0+v_a\cos\theta)\cos n\theta d\theta,$$
 (5)

其中 $\theta=\omega_mt$,气体浓度与各谐波分量成正比。实际计算时,通常采用二次谐波进行计算。

3 实验系统设计

3.1 测量系统搭建

3.1.1 实验系统

基于可调谐激光二极管吸收光谱技术的种子呼吸 CO₂ 检测系统,主要由光学部分、电子学部分、上位机软件部分组成,具体的组成结构框图如图 1 所示,其电路部分主要包括:光电探测器、信号调理电路、数据采集卡;光学部分主要包括准直器、呼吸容器、高纯氧气等,呼吸容器两侧开进出气孔;上位机软件部分主要设置数据采集和数据处理、存储模块、波形显示模块等部分。系统工作原理为:信号发生器产生 50 Hz 的锯齿波扫描信号和 200 kHz 的正弦波调制信号,注入到 ITC102 型控制器,以此控制波长为 2 004 nm 的 DFB 激光器发光,激光器发出的激光束通过准直器进入种子呼吸容器中,种子呼吸容器采用上下两层结构,上层为种子呼吸腔,下层为怀特池,通过输出端连接光电探测器,探测器信号经由放大电路放大到 4~5 V 电压范围,送入数据采集卡,数据采集采用上位机方式,利用数据采集卡对放大器输出信号进行采集,数据采集后可以进入 PC 机进行后续数据预处理,上位机采用 LabVIEW

软件编写输出采集和预处理程序。实验中为了控制温度恒温将呼吸容器放入电热恒温炉中。

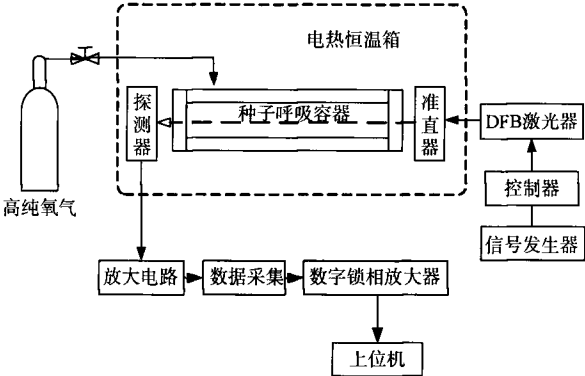


图 1 波长调制 TDLAS 实验系统

Fig. 1 Experimental system of wavelength modulation TDLAS

3.1.2 系统工作流程

在实验开始前,在上位机前面板,设置一个扫描周期的采样点数 N ,采样频率 F_s ,参考信号频率 F_{ref} 等初始化参数后,启动数据采集,数据采集后送入上位机中进行预处理,先进行滤波,滤除随机噪声,再进行累加、求和、滑动平均等处理,获取较为光滑的信号后再进行归一化处理,然后利用锁相放大算法进行二次谐波解调,获取二次谐波信号的峰值,通过与标定过的二次谐波信号进行比值计算得到 CO₂ 气体浓度,为防止环境变化产生误差,实验过程一般在常温常压情况下进行或不同实验条件下再进行修正,其系统工作流程如图 2 所示。

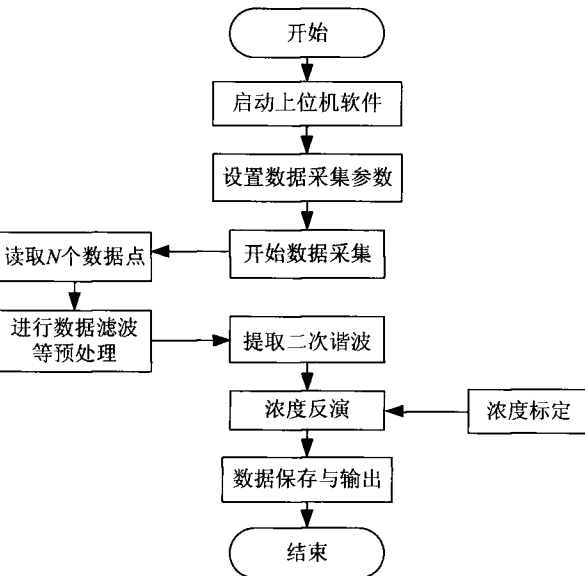


图 2 测量种子检测流程

Fig. 2 Flow chart of seed respiration detection system

3.2 种子呼吸检测容器设计

3.2.1 设计原理^[17-19]

种子呼吸容器设计为采用怀特池结构的多次反射池,怀特池主要由 3 块共焦的凹球面镜构成,其基本结构如图 3 所示。凹球面镜 B,C 和 A 具有相同的曲率半径,A 镜的曲率中心位于 B,C 中间 O 点,B,C 镜的曲率中心分别位于 A 镜中心附近,入射光从一侧入射到 B 后反射到 A 形成光点 1,再经过 C 反射形成光点 2,以此类推,最后从 A 镜另外一侧射出光线,光程长度 L 与 A 镜面上的光点数目 N 以及怀特池的基本长度 d 成正比。

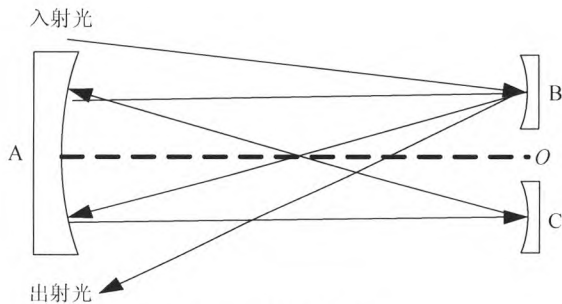


图 3 怀特池原理

Fig. 3 White pool principle

本系统设计时,根据种子呼吸 CO_2 浓度检测的精度需求,以及加工成本等综合考虑(光路尽量长,空间尽量小),采用怀特池结构,来回反射 40 次,有效光程为 16 m,其光路图如图 4 所示。

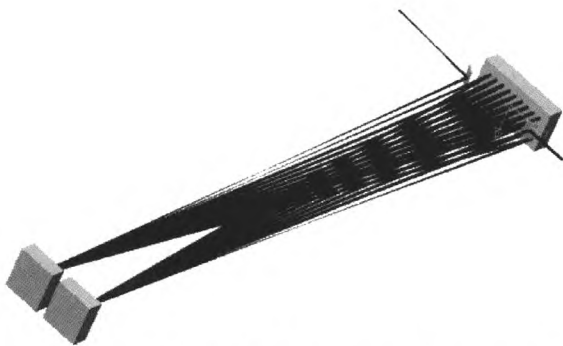


图 4 采用怀特池结构制作种子呼吸测量光路示意图

Fig. 4 Light path diagram of seed respiration measurement using white pool structure

3.2.2 呼吸容器结构设计

结合多次反射池的原理和种子呼吸特点,设计体积总量 1 500 mL。种子呼吸时释放 CO_2 分子量为 44,空气分子量约为 29,故一般情况下

CO_2 分子会扩散至容器下端,因此结合种子呼吸气体特点,设计一个种子呼吸腔和怀特池结合的结构,种子呼吸腔位于光路上方,怀特池位于下方,如图 5 所示,为了让气体快速充分扩散,呼吸腔与气体池的交换面积需要尽可能大,同时,为了防止种子中的杂质灰尘等落入池中,在设计呼吸腔和气体池之间设置一层过滤网,过滤网采用钢结构,孔间距为 0.3 mm,孔直径为 0.01 mm,基本上能够阻挡绝大部分杂质,另外为了方便操作,呼吸腔上方设置了两个直径为 5 cm 的圆盖如图 6 所示,为了能够有效地密封,两侧各放置一个进气孔和一个出气孔,进气孔、出气孔增设防水透气膜,在一定程度上减少气室污染,有效延长了使用寿命。

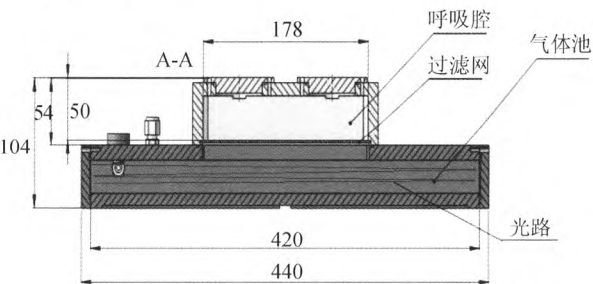


图 5 采用怀特池结构的种子呼吸容器结构图

Fig. 5 Structural chart of seed respiratory container with white pool structure

种子呼吸测量装置的光机结构主要由多次反射池池体、防震底座、玻璃窗片、反射镜和气体进出孔组成,设计要求尽量具有光程长、体积小、高温范围宽、耐腐蚀、易于安装操作等特点,本系统中整机外形结构装置图如图 6 所示,种子呼吸区域空间较大并设置空气滤网(以防灰尘进入,导致镀膜镜片污染),因此可以忽略 CO_2 和 O_2 浓度变化对种子呼吸的抑制。

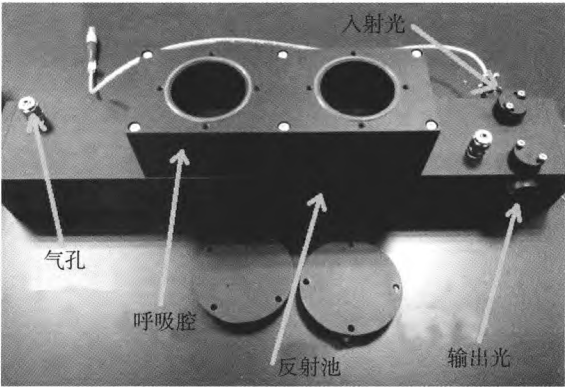


图 6 种子呼吸容器实物装置图

Fig. 6 Seed respiratory container physical device

4 系统测试

4.1 呼吸容器稳定性检测

采用激光光强的波动情况来测试种子呼吸容器的光机稳定性,光源采用 650 nm 的激光,设置温度控制器出光后(假设激光光源光强恒定),在长时间测量下,实验室内利用恒温炉温度从 10 ℃ 逐渐升温至 32 ℃(间隔 2 ℃),图 7 为约 125 min 连续测试经过吸收池多次反射后的光强变化。采用 850 nm 波段光功率计进行测量,检测功率会有衰减,但是不影响稳定性评判。由图 7 可以看出多次反射池的出射光强起伏很小,无干涉影响,吸收池的光机稳定性较好。光强波动在 0.1% 范围内,不影响吸收池工作,基于多次反射池结构的种子呼吸容器基本上满足了种子呼吸测量系统的要求。

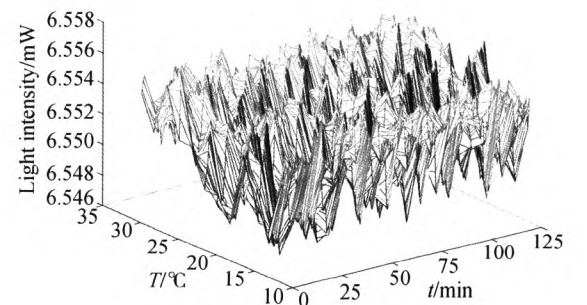


图 7 种子呼吸容器的稳定性测试
Fig. 7 Stability test of seed respiratory container

4.2 重复性测量及检测极限

系统重复性 δ 按照如式(6)计算:

$$\delta = \frac{\sigma}{x} \times 100\%, \tag{6}$$

其中: σ 是标准差, x 是测量均值。为了测试系统的重复性,将 0.5% 浓度的 CO₂ 气体冲入呼吸容器中,密封,在相同的实验条件下,进行 30 次不定时地测量,每次测量连续采集 100 个数据点后取平均值,其浓度稳定重复性为 0.033%,如图 8 所示,其标准差为 0.56 ppm。按照 3 倍标准差为检测极限^[20],计算得检测极限约为 1.7 ppm。

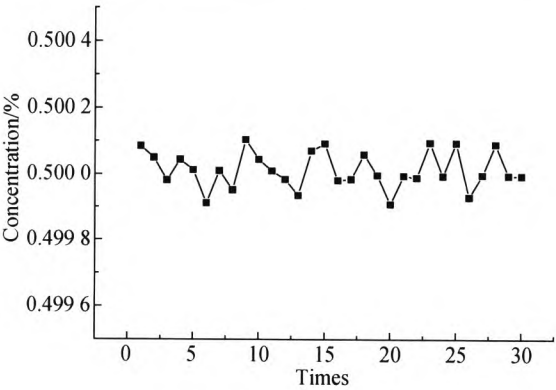


图 8 系统重复性测试
Fig. 8 System repeatability test

4.3 系统线性度测量

为了验证系统 CO₂ 浓度检测的线性度,设定温度为 20 ℃、1 atm 的实验室条件下,控制调制度和调制频率等参数不变,对呼吸容器分别冲入不同浓度的气体进行测试。首先将吸收池充入高纯氧气作为背景,充入氧气 5 min,排干容器中空气,然后分别配置 CO₂ 百分比浓度为 0.05%~0.5% 的 CO₂ 气体进行测量,获得的二次谐波信号如图 9 所示。

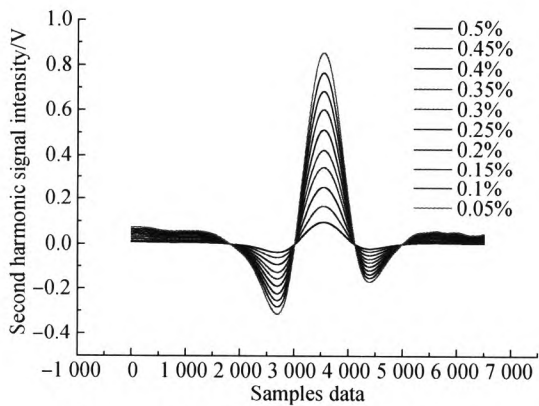


图 9 不同百分比浓度的二次谐波信号
Fig. 9 Second harmonic signals with different percentage concentrations

当系统采用高纯氧气冲洗后,密封,分别冲洗 5 min,10 min,15 min 和 20 min 后,并密闭 12 h 后进行检测发现,均存在一定光强的 CO₂ 吸收信号,其变化规律为密封后 2 h 左右达到稳定,稳定后 CO₂ 浓度范围约为 3.27 ppm,多次测试后取平均值作为系统误差。选取二次谐波信号的峰值进行浓度反演,并按照二次谐波信号的峰值进行

数据拟合,扣除系统误差后,得到拟合结果如图 10 所示,其线性拟合优度为 0.999 38。从图中可见二次谐波峰值与浓度的线性度良好,系统满足 CO₂ 浓度测量要求。

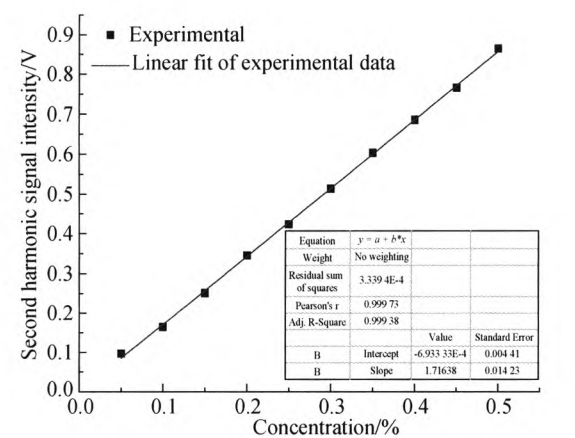


图 10 信号强度和 CO₂ 浓度的线性拟合关系
Fig. 10 Linear fitting relation between signal intensity and CO₂ concentration

5 实验与数据分析

将 2017 年夏季收获的 20 g 糯玉米种子浸泡 4 h(增加呼吸强度,无损)后放入呼吸容器中,再向容器中充入高纯氧气冲洗后保持密封,进行数据采集,并解调后获取其二次谐波信号。本系统设计中,在浓度反演之前,需要先进行浓度标定,依据朗伯比尔定律,本实验标定过程中使用 10 cm 长直通型吸收池作为标定池,将高纯度 CO₂ 气体(99.999%)充入标定池,再依据标定信号利用气体比值法计算出待测量气体浓度值。利用二次谐波信号反演出玉米种子呼吸浓度变化曲线如图 11 所示,从图中可以得出呼吸强度变化趋势,12 h 内种子呼吸浓度变化范围为 2 750.5 ppm,可以看出,平

均每小时呼吸强度变化率为 229.2 ppm/h,可以较为清晰地反映出种子呼吸的变化趋势等特点。

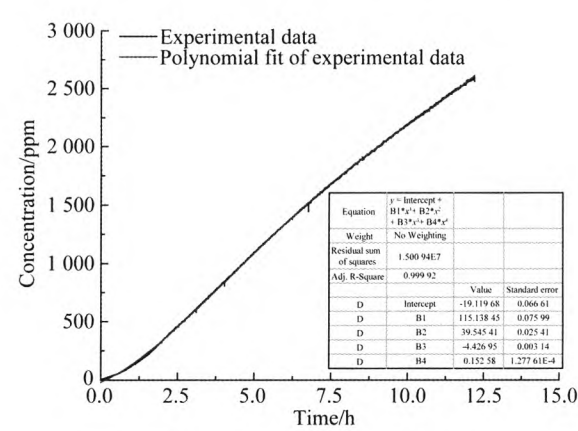


图 11 种子呼吸变化曲线
Fig. 11 Seed respiration curve

6 结 论

本文通过对多次反射池进行改造,设计出一款适宜对种子呼吸 CO₂ 浓度变化进行测量的呼吸容器,介绍了种子呼吸容器的设计原则和思路,对种子呼吸容器进行了光机稳定性和系统重复性测试,测试结果稳定在 0.033%,系统检测极限为 1.7 ppm,通过对呼吸容器进行 CO₂ 浓度线性拟合,浓度与二次谐波峰值线性度达到 0.999 38。对 20 g 糯玉米种子呼吸释放 CO₂ 浓度变化进行了连续测试,获得了其浓度变化曲线,12 h 内 CO₂ 浓度变化量为 2 750.5 ppm,呼吸强度变化率为 229.2 ppm/h。采用 TDLAS 技术的种子呼吸测量系统为种子呼吸测量提供了一种新的测量手段,其时间分辨率、检测精度较高,能够较为清晰的反映出种子呼吸的细节变化,具有重要的实用价值。

参考文献:

[1] PERRY D A. Report of the vigour test committee, 1974—1977 [J]. *Seed Science and Technology*, 1978,6(1):159-181.

[2] 黄真池,黄上志. 不破坏种子活力测定方法研究Ⅱ种子活力与呼吸速率的关系 [J]. *种子*,1998,98(5):3-5.
HUANG ZH CH, HUANG SH ZH. Study on the method for determining seed vigor without destroying seed vigor Ⅱ. The relationship between seed vigor and respiration rate [J]. *Seeds*, 1998, 98(5): 3-5. (in Chinese)

[3] 潘威,杜景诚,乔雨,等. 基于氧传感技术测定烟草种子活力的初步研究[J]. *种子*,2018,37(6):72-75.
PAN W, DU J CH, QIAO Y, et al.. Preliminary Study on Measuring Tobacco Seed Vigor Based on Oxygen Sensing Technology [J]. *Seeds*, 2018, 37(6):72-75. (in Chinese)

[4] 芮海云,卢全,丁敏,等. 运用简易呼吸测定装置测定植物种子呼吸强度的探究[J]. *黑龙江生态工程*

- 业学院学报,2009,22(6):52-53.
- RUI H Y, LU T, DING M, *et al.*. A study on the measurement of respiration intensity of plant seeds by simple respiration measuring device [J]. *Journal of Heilongjiang Vocational College of Ecological Engineering*, 2009,22(6): 52-53. (in Chinese)
- [5] 李海霞,徐久玮,蔡明历,等.小篮子法测定植物种子呼吸速率的方法改进[J].生物学杂志,2015,32(1):100-102,106.
- LI H X, XU J W, CAI M L, *et al.*. Improvement of the method for determining the respiratory rate of plant seeds by small basket method [J]. *Journal of Biology*, 2015,32(1): 100-102,106. (in Chinese)
- [6] 李春辉.化学剂浸种对油松种子呼吸速率和发芽率的影响[J].现代农业科技,2017(6):155,157.
- LI CH H. Effects of chemical soaking on respiration rate and germination rate of pinus tabulaeformis seeds [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017 (6): 155,157. (in Chinese)
- [7] 季文海,吕晓翠,胡文泽,等. TDLAS 技术在烯烃生产过程中的多组分检测应用[J]. 光学精密工程, 2018,26(8):1837-1845.
- JI W H, LV X C, HU W Z, *et al.*. Application of TDLAS technology in multi-component detection in olefin production process[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018,26(8): 1837-1845. (in Chinese)
- [8] 姜琛昱,孙美秀,李迎新,等.激光光谱技术在呼吸气体分析中的发展与未来[J].中国激光,2018,45(2):197-205.
- JIANG C Y, SUN M X, LI Y X, *et al.*. Development and future of laser spectroscopy in respiratory gas analysis [J]. *China Laser*, 2018, 45 (2): 197-205. (in Chinese)
- [9] 陆恒,张刚,张国贤,等.基于 TDLAS 的二氧化碳和水汽同时检测技术研究[J].江苏科技信息,2018,35(5):41-43.
- LU H, ZHANG G, ZHANG G X, *et al.*. Research on simultaneous detection technology of carbon dioxide and water vapor based on TDLAS[J]. *Jiangsu Science and Technology Information*, 2018,35(5): 41-43. (in Chinese)
- [10] 王雪梅,刘石.基于波长调制光谱技术的二氧化碳浓度测量[J].大气与环境光学学报,2017,12(5): 356-361.
- WANG X M, LIU SH. Carbon dioxide concentration measurement based on wavelength modulation spectroscopy [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2017, 12 (5): 356-361. (in Chinese)
- [11] 李萌,郭金家,叶旺全,等.基于微型多次反射腔的 TDLAS 二氧化碳测量系统[J].光谱学与光谱分析,2018,38(3):697-701,707.
- LI M, GUO J J, YE W Q, *et al.*. TDLAS carbon dioxide measurement system based on micro multiple reflector cavity [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 697-701,707. (in Chinese)
- [12] 张可可,刘世萱,陈世哲,等.基于 TDLAS 的二氧化碳浓度检测系统及压强补偿研究[J].仪表技术与传感器,2016(1):53-55,69.
- ZHANG K K, LIU SH X, CHEN SH ZH, *et al.*. Carbon dioxide concentration detection system and pressure compensation based on TDLAS [J]. *Instrument technology and sensors*, 2016(1): 53-55, 69. (in Chinese)
- [13] 袁松,阙瑞峰,何亚柏,等.基于可调谐半导体激光光谱大气 CO₂ 监测仪[J].中国激光,2014,41(12):176-181.
- YU S, KAN R F, HE Y B, *et al.*. Atmospheric CO₂ monitor based on tunable semiconductor laser spectrum [J]. *China Laser*, 2014, 41 (12): 176-181. (in Chinese)
- [14] 杨玉新,刘海波,张英,等.基于可调谐激光吸收光谱的痕量 CO 定量检测技术[J].工业安全与环保, 2019,45(1):74-78.
- YANG Y X, LIU H B, ZHANG Y, *et al.*. Quantitative detection of trace CO based on tunable laser absorption spectroscopy [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2019, 45(1): 74-78. (in Chinese)
- [15] 卢伟业,朱晓睿,李越胜,等. TDLAS 直接吸收法和波长调制法在线测量 CO₂ 的比较[J].红外与激光工程,2018,47(7):155-160.
- LU W Y, ZHU X R, LI Y SH, *et al.*. Comparison of on-line CO₂ measurement by TDLAS direct absorption method and wavelength modulation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018,47 (7): 155-160. (in Chinese)
- [16] 张志荣,孙鹏帅,庞涛,等.激光吸收光谱技术在工业生产过程及安全预警标识性气体监测中的应用[J].光学精密工程,2018,26(8):1925-1937.
- ZHANG ZH R, SUN P SH, PANG T, *et al.*. Application of laser absorption spectroscopy in industrial production process and safety early warning marking gas monitoring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018,26(8): 1925-1937. (in Chinese)

- [17] 魏文,张振华,胡晓光. 非激光在怀特池中的传播特性[J]. 光学仪器,2013,35(5):66-70.
WEI W,ZHANG ZH H,HU X G. Propagation characteristics of non-laser in white pool [J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(5): 66-70. (in Chinese)
- [18] 穆永吉,陈远,余俊,等. 一种多次反射怀特池的研究与设计[J]. 光学技术,2014,40(4):345-348.
MU Y J,CHEN Y,YU J,*et al.*. Research and design of a multiple reflection white pool [J]. *Optical Technology*, 2014, 40(4): 345-348. (in Chinese)
- [19] 夏滑,董凤忠,涂郭结,等. 基于新型长光程多次反射池的 CO 高灵敏度检测[J]. 光学学报,2010,30(9):2596-2601.
XIA H,DONG F ZH,TU G J,*et al.*. High sensitivity detection of CO based on new long optical path multiple reflector cell [J]. *Journal of Optics*, 2010, 30(9): 2596-2601. (in Chinese)
- [20] 李晗,刘建国,阚瑞峰,等. 波长调制光谱测量系统中的数字化相敏检测实现[J]. 中国激光,2013,40(11):259-264.
LI H,LIU J G,KAN R F,*et al.*. Implementation of digital phase-sensitive detection wavelength modulation spectroscopy measurement system [J]. *China Laser*, 2013,40(11):259-264. (in Chinese)

作者简介:



贾良权(1984—)男,安徽合肥人,博士后,硕士生导师,2006 年获得安徽工程大学学士学位,2015 年获得中国科学院大学博士学位,主要从事种子活力检测与农业光谱技术的研究。E-mail: 02426@zjhu.edu.cn

通讯作者:



阚瑞峰(1977—),男,辽宁锦州人,研究员,博士生导师,2000 年于中科院长春光学精密机械学院获得学士学位,2003 年于中科院安徽光学精密机械研究所获得硕士学位,2006 年于中科院合肥物质科学研究院获得博士学位,主要从事激光光谱高灵敏检测方法与应用技术的研究。E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn