

基于CO₂排放量检测的秸秆腐解动态监测系统研究

李奇辰^{1,2} 霍丽丽^{1,2} 姚宗路^{1,2} 赵立欣^{1,2} 杉原敏昭³

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

2. 农业农村部华北平原农业绿色低碳重点实验室, 北京 100081; 3. 明治大学农学部, 川崎 214-8571)

摘要: 针对秸秆腐解产物复杂, 导致在线监测困难的问题, 提出以秸秆腐解CO₂排放量作为反映秸秆腐解动态特性的指标。并针对市面CO₂传感器成本高、体积大, 在秸秆腐解监测中普及困难的问题, 基于小型、低成本非色散红外(Non-dispersive infrared, NDIR)CO₂传感器、环境传感器及Arduino板, 设计了秸秆腐解动态监测系统, 实现秸秆腐解过程环境参数、秸秆温度以及CO₂浓度多位点的监测, 并结合微生物群落数据, 分析了秸秆腐解规律。以市面TR-76Ui CO₂记录仪为基准, 对每个低成本NDIR CO₂传感器进行测试与校准, 1 829个数据点的线性回归模型决定系数 R^2 为0.97~0.99, RMSE为14.56~56.36 $\mu\text{L/L}$, 表明低成本NDIR CO₂传感器具有良好的检测精度和稳定性。秸秆堆体内部CO₂浓度具有周期性变化规律, 变化趋势与温度的变化趋势一致, 且振动幅度随秸秆干燥逐渐减弱, 该现象反映了微生物活动的生物节律, 揭示了秸秆堆体内部CO₂变化能够反映秸秆腐解的行为特征。分析表明, 秸秆腐解速率与温度和含水率呈正相关, 决定系数 R^2 分别为0.813 7与0.892。调节秸秆含水率大于40%后, 秸秆腐解速率迅速下降, 至第4天趋于平稳。添加微生物菌剂后秸秆腐解速率在第7天开始明显下降, 至第12天开始趋于平稳。监测周期内传感器未发生明显漂移, 有较好的稳定性, 检测精度可以满足秸秆腐解试验的分析需求, 小型、低成本硬件对于秸秆腐解动态监测具有很好的推广应用潜力。

关键词: 秸秆CO₂排放; 腐解动态监测系统; Arduino; 高时空分辨率监测

中图分类号: S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)10-0399-11

OSID:



Development and Application of Monitoring System for CO₂ Emission Dynamics during Straw Decomposition

LI Qichen^{1,2} HUO Lili^{1,2} YAO Zonglu^{1,2} ZHAO Lixin^{1,2} SUGIHARA Toshiaki³

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2. Key Laboratory of Agricultural Green and Low-carbon for North China Plain,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China

3. Department of Agriculture, Meiji University, Kawasaki 214-8571, Japan)

Abstract: Monitoring decomposition process of crop straw is essential for both soil improvement and carbon sequestration, but it is challenging due to the complexity of straw decomposition products. To address this issue, CO₂ emission was used as an indicator to reflect the dynamic characteristics of straw decomposition. In addition, considering the high cost of commercially available CO₂ sensors, a monitoring system was designed and developed based on small, low-cost non-dispersive infrared (NDIR) CO₂ sensors, environmental sensors, and Arduino. Using the commercial CO₂ recorder TR-76Ui as a reference, each low-cost NDIR CO₂ sensor was tested and calibrated. The linear regression model of 1 829 data points yielded coefficients of determination (R^2) between 0.97 and 0.99, and RMSE between 14.56 $\mu\text{L/L}$ and 56.36 $\mu\text{L/L}$, indicating good detection accuracy and stability of the low-cost NDIR CO₂ sensors. The CO₂ concentration inside the straw pile exhibited a periodic variation pattern, which was consistent with temperature variations, and the amplitude of vibration was gradually weakened as the straw

收稿日期: 2024-05-15 修回日期: 2024-07-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1701505)

作者简介: 李奇辰(1983—),男,助理研究员,博士,主要从事农业信息快速获取技术研究,E-mail: liqichen@caas.cn

通信作者: 赵立欣(1967—),女,研究员,博士,主要从事农业废弃物清洁利用技术研究,E-mail: zhaolixin@caas.cn

dried. This phenomenon reflected the biological rhythm of microbial activity, revealing that the CO₂ changes within the straw pile can indicate the decomposition behavior of the straw. The analysis showed that the rate of straw decomposition was positively correlated with temperature and moisture content, with *R*² values of 0.813 7 and 0.892, respectively. After adjusting the straw moisture content to over 40%, the decomposition rate rapidly declined and stabilized by the fourth day. When microbial inoculants were added, the decomposition rate was significantly decreased on the seventh day and stabilized by the twelfth day. Throughout the monitoring period, the sensors exhibited no significant drift and maintained good stability. The detection accuracy met the analytical needs of straw decomposition experiments, and the small, low-cost hardware showed great potential for widespread application in dynamic straw decomposition monitoring.

Key words: straw CO₂ emission; decomposition dynamic monitoring system; Arduino; high-resolution measurement

0 引言

中国秸秆年产生量约 9×10^8 t,综合利用率超过 88%,其中秸秆还田量约 4×10^8 t^[1]。秸秆还田可以提升土壤有机质、增加土壤碳汇、提升作物产量。但是,部分区域秸秆单位面积产量高,还田负荷重,存在秸秆腐解速率慢、还田效果差等问题^[2]。秸秆施入土壤后主要经历 2 个阶段:第 1 阶段有机质在微生物酶的作用下分解为简单的结构或分子单元,并释放 CO₂,即矿质化过程;第 2 阶段将简单的分子单元及微生物活动产物合成为腐殖质,即腐殖化过程^[3]。腐殖质是土壤有机质中最稳定的成分,因此,控制秸秆腐解进程可以主导土壤改良及减排固碳效果^[3]。现有研究主要集中在秸秆还田对温室气体排放和作物产量^[4-5]、土壤微生物群落^[6-7]、有机碳组分的影响^[8-11],以及秸秆在土壤中的腐解程度等^[12-14],秸秆腐解规律及影响因素尚未明晰。秸秆自然腐解过程监测主要采用抽样法,将秸秆装入网袋埋入土壤,取样测量秸秆干质量,分析秸秆腐解速率^[9,11,15],费时费力,难以实现动态监测。因此,有必要提出科学、易行的监测秸秆腐解动态的方法。

在有氧条件下,有机质分解会以 CO₂ 的形式损失,CO₂ 排放与微生物的活动相关^[16]。高 CO₂ 排放速率表示微生物活跃,分解有机质速度快。因此,通过监测 CO₂ 排放可表征秸秆中有机质的分解规律。在有机物料发酵管理中,CO₂ 排放量一般作为状态变量用以调控发酵进程,以及预测发酵产物等^[17-21]。但是,秸秆腐解处于开放环境,外部空气会影响对秸秆 CO₂ 排放的监测与分析。现有 CO₂ 分析方法主要包括使用便携式气体分析仪、气相色谱仪等设备进行分析的离散采样法,以及使用 CO₂ 传感器测量的原位分析法。但是离散采样法存在采样频率低、缺乏代表性等问题。常见的 CO₂ 原位测

量传感器包括芬兰 Vaisala 公司的 GMD20、GMM221 和 GMM222,美国 Li-Cor 公司的 LI-820 和 LI-830,德国 Eosense 公司的 eosGP 等,存在仪器成本高、体积大、存储空间和采样频率有限、传感器和数据采集器不兼容等问题^[22-24]。

目前的主流 CO₂ 分析方法在秸秆腐解规律研究中难以普及。近年来,Arduino、Raspberry Pi 等低成本硬件系统的应用日益增加^[21,25-29]。低成本 NDIR CO₂ 传感器与微控制器组合已经被应用于多情况下的温室气体监测。文献[22]采用 Arduino 与 NDIR CO₂ 传感器开发了 CO₂ 记录仪,并应用于泥炭地的 CO₂ 排放速率监测。文献[24]应用 Raspberry Pi 测试了 NDIR CO₂ 传感器的检测精度,在经过任何校正的情况下,与参考值比较检测均方根误差(Root mean square error, RMSE)为 5~21 μL/L,通过回归系数校正后, RMSE 可以改善到 1.7~4.3 μL/L。文献[23]测试了 Arduino 与 NDIR CO₂ 传感器在潮湿空气、土壤和水域等恶劣环境中的检测能力,与市售 CO₂ 传感器检测结果进行比较,决定系数 *R*² 分别为 0.97、0.84 和 0.99。文献[30]设计了一种低成本温室气体排放自动监测系统,与传统红外气体分析仪比较,该系统仅高估 6% 的 CO₂ 排放量。以上研究表明低成本 NDIR CO₂ 传感器具有较好的检测精度和应用潜力。

监测秸秆腐解 CO₂ 排放的研究还鲜有报道。本文研究秸秆腐解动态监测方法,假设秸秆腐解过程微生物分解有机质释放 CO₂,在秸秆堆体内部孔隙形成一定累积,通过监测堆体内 CO₂ 浓度变化,分析由微生物活动引起的秸秆腐解动态;设计一种基于低成本非色散红外(Non-dispersive infrared, NDIR)CO₂ 传感器与 Arduino 结合的数据采集平台,以高时空分辨率监测秸秆周边 CO₂ 浓度变化,分析秸秆腐解行为,讨论 CO₂ 排放量作为表征秸秆腐解动态指标的可行性,以期开发秸秆腐解动态监测

方法提供理论及技术支持。

1 监测系统设计与数据分析方法

1.1 监测系统设计

假设秸秆腐解过程堆体内部产生 CO₂ 累积,通过监测该 CO₂ 浓度变化可以反映秸秆腐解的动态特征。本研究的目的一是构建基于低成本硬件的秸秆腐解动态监测系统,保证稳定、准确的 CO₂ 浓度监测;二是根据 CO₂ 的变化,分析秸秆的腐解规律。为此,需要精细把握秸秆腐解过程周边小环境的 CO₂ 分布,分析秸秆腐解对周边小环境 CO₂ 浓度产生的影响,提取与秸秆腐解相关的 CO₂ 动态特征。本研究提出使用多个 CO₂ 传感器和环境传感器,进行秸秆腐解过程堆体内部及周边多点、多目标的高分辨率测量方法。相比于传统采样分析方法,高分辨率测量方法提供时间、空间上分辨率更高的数据集,以更小的时间和空间间隔捕捉秸秆周边小环境 CO₂ 浓度变化差异,并结合环境因子、微生物群落结构数据,分析秸秆腐解的行为特征,提升检测精度及分析的可靠性。

为实现上述目标,针对秸秆堆体内部、周边小环境 CO₂ 浓度变化、空气温湿度以及秸秆堆体表面和堆体内部温度的测量设计监测系统。为减小电路设计的复杂性,选择模块化传感器套件构建监测系统,使用 Arduino 单片机完成数据的读取控制,实现集成多传感器套件的数据采集平台。系统框架如图 1 所示,包括 Arduino 开发板、传感器模块、时钟模块和数据存储模块。

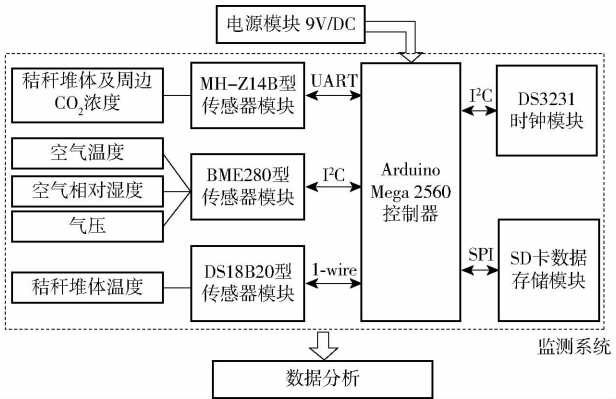


图 1 监测系统框架

Fig. 1 Block diagram of measuring system

1.1.1 系统硬件设计

数据采集设备选择 Arduino 开发板:它是一种低成本开源平台,编程简单,容易普及;与传统数据记录仪相比,它的扩展功能更丰富,可用于智能系统开发。为满足集成多个传感器组件的研究需求,选用具有更多引脚的 Arduino Mega 2560 R3 开发板,

采用 ATmega2560 微控制器芯片,具有 256 KB 闪存,能够编译更大的代码。同时,采用 Grove - Mega I/O 接口扩展板(图 2),将端口标准化为 4 引脚(信号 1、信号 2、VCC 和 GND)接口,并保留 3 引脚(PWM、VCC 和 GND)的舵机接口,可简化布线,使数据采集过程稳定。

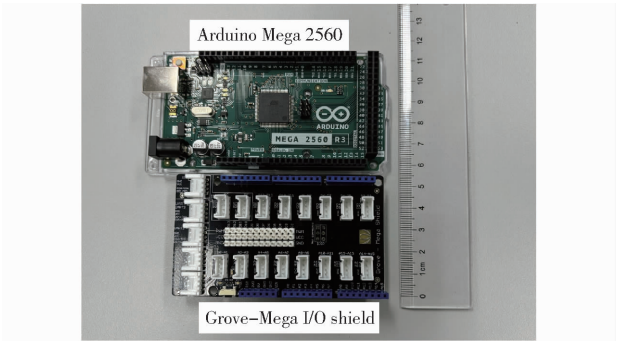


图 2 Arduino Mega 2560 微控制器与 Grove - Mega I/O 接口扩展板

Fig. 2 Photograph of Arduino Mega 2560 microcontroller and Grove - Mega I/O shield

CO₂ 浓度监测采用基于 NDIR 原理的 MH - Z14B 传感器模块(炜盛科技有限公司制造,图 3),因为该模块为小型模块(尺寸(长×宽)为 57 mm × 34 mm),具有固定光源及检测器,减小外界气体流入带来的测量偏差,实现高分辨率监测。气室采用镀金处理,可省去第 2 次封装。工作由单片机控制,集成信号放大、滤波、A/D 转换等处理单元,直接输出数字信号,省去后期转换,且内置温度补偿。可选多种量程,考虑秸秆堆体内部 CO₂ 浓度(体积比)较高,选择量程 400 ~ 10 000 μL/L,堆体外部传感器选择量程 400 ~ 2 000 μL/L,分辨率为 1 μL/L。

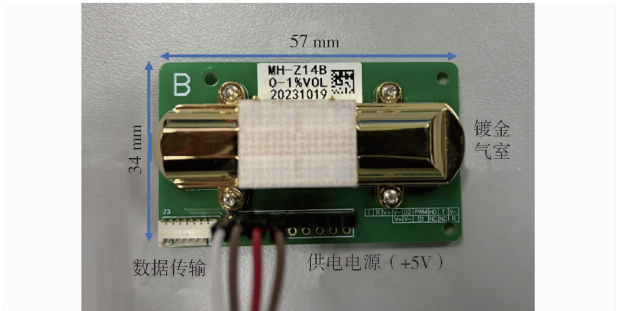


图 3 MH - Z14B 型 NDIR CO₂ 传感器模块

Fig. 3 Photograph of Winson MH - Z14B NDIR CO₂ sensor module

为分析秸秆腐解规律,需要监测环境因子变化。选用 BME280 型芯片模块(德国 Bosch Sensortec 公司制造),该模块集成了温度、相对湿度和压力传感元件,可同时测量空气温度、相对湿度及气压,并集成滤波器和 A/D 转换器,输出数字信号,通过 I²C 或 SPI 接口传输给主控设备,广泛应用于环境监测

领域。温度、相对湿度和气压的测量范围分别为 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$ 、 $0\sim 100\%$ 和 $300\sim 1\,100\text{ hPa}$,检测精度分别为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 3\%$ 和 $\pm 1\text{ hPa}$ 。

考虑秸秆堆体温度相比于空气温度变化会有时滞,为更精细分析秸秆腐解规律,选择 DS18B20 型芯片模块(美国 Maxim Integrated 公司制造)测量秸秆堆体温度。该模块集成温度传感元件,测量结果以数字形式储存在内置 EEPROM 中,以单总线协议进行读取,温度 $-10\sim 85^{\circ}\text{C}$ 内检测精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。具有多种封装,应用于不同场景,选用防水型号,同时监测秸秆堆体内部及表层温度变化。

另外,采用 DS3231 型芯片模块(Maxim Integrated 公司制造)进行时间计数,集成 32 kHz 晶体振荡器和温度补偿,工作温度 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$,支持 I²C 通信协议。为进行长期数据分析,采用 SD 卡模块储存数据,支持 SPI 通信协议。以上除 MH-Z14B 型传感器工作电压为 5 V 以外,所有模块均支持 3.3 V 和 5 V 的电源输入。

1.1.2 系统程序设计

采用 Arduino IDE 2.3.2 版本编写程序,根据该开发环境特点,首先初始化程序,然后进入主循环,流程如图 4 所示。初始化阶段包括引入库、定义变量、初始化串口通信、初始化 RTC 和 SD 卡等。然后执行主循环,包括从 RTC 获取当前时间,计算时间是否经过指定的间隔,然后依次读取 2 个 DS18B20、BME280 型,以及 6 个 MH-Z14B 型传感器数值,将所有传感器数据写入 SD 卡中。该研究需要采集多个传感器数据,为避免程序阻塞,获取稳定的传感器读数,设置数据采集间隔为 5 min。

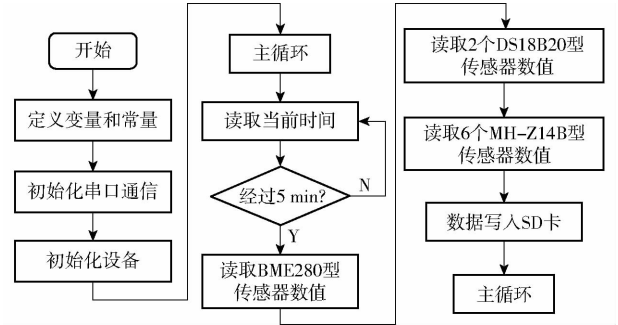


图 4 监测系统数据流程图

Fig.4 Programming algorithm flowchart for monitoring system

1.2 传感器测试与校准

采用多点测量方法测试秸秆腐解周边小环境 CO₂ 浓度差异,传感器模块之间的相对误差比绝对误差对试验结果分析影响更大。为此,在试验前,对 6 个 CO₂ 传感器进行零点校准。零点校准按照炜盛科技有限公司提供技术资料中的方法执行,首先将

MH-Z14B 型传感器置于室外通风好的环境下运行 20 min 以上,然后通过 Arduino 给 MH-Z14B 型传感器发送校准指令,重置传感器输出数值为 400 $\mu\text{L/L}$ ^[31]。

零点校准后,对 6 个 CO₂ 传感器(对应编号 CO2_1~CO2_6)进行老化测试。设置 Arduino 数据采集间隔为 5 min,将所有传感器置于试验环境中,连续采集 14 d,共采集 3 633 个数据点。对每个数据点的 6 个传感器测量结果取平均值,计算传感器检测结果偏移平均值最大值和最小值,结果如表 1 所示。测试期间 6 个传感器最大正偏差为 101.83 $\mu\text{L/L}$,最小负偏差为 $-94.16\text{ }\mu\text{L/L}$ 。技术指标指出该传感器模块检测精度为 $\pm(50\text{ }\mu\text{L/L}\pm 5\%\text{ 读数})$,校准后基本在精度范围内,且测试期间未发生明显漂移。

表 1 CO₂ 传感器的测量误差测试结果
Tab.1 Maximum relative error of CO₂ sensors

$\mu\text{L/L}$		
传感器	最大正偏差	最小负偏差
CO2_1	20.00	-57.50
CO2_2	93.17	-47.00
CO2_3	5.17	-94.16
CO2_4	101.83	-11.50
CO2_5	52.17	-45.33
CO2_6	35.50	-60.17

为进一步减小各传感器基线差异导致的相对误差,在实验室环境下以市面上常用 CO₂ 记录仪 TR-76Ui(日本 T&D 公司制造)为基准,对 6 个 MH-Z14B 型传感器模块的检测精度进行了测试和校准,连续采集数据 7 d,采样间隔 5 min,共采集 1 829 个对应的数据点,使用线性回归分析创建 6 个 MH-Z14B 型传感器的校准模型,结果如图 5 所示。模型决定系数 R^2 为 0.97~0.99,均方根误差(RMSE)为 14.56~56.36 $\mu\text{L/L}$ 。试验室环境日常 CO₂ 浓度在 400~1 200 $\mu\text{L/L}$ 范围内波动,气体波动会导致测量点出现偏差。使用定标模型对每个传感器进行校准,校准后各传感器最大测量正偏差为 70.5 $\mu\text{L/L}$,最小负偏差为 $-52.52\text{ }\mu\text{L/L}$ 。

另外,针对秸秆堆体内部的 CO₂ 传感器,使用静态箱法单独对其进行了校准与测试,如图 6 所示。首先,将 Arduino 与 MH-Z14B 传感器模块 UART 接口连接,置于装有试验秸秆的封闭箱内(试验秸秆描述见 1.3 节)运行 20 min 以上,然后开始采集数据,并记录开始时间。

同时,使用注射器采集静态箱内的气体样本,每次采气时记录当前时间,与 Arduino 采集数据对照

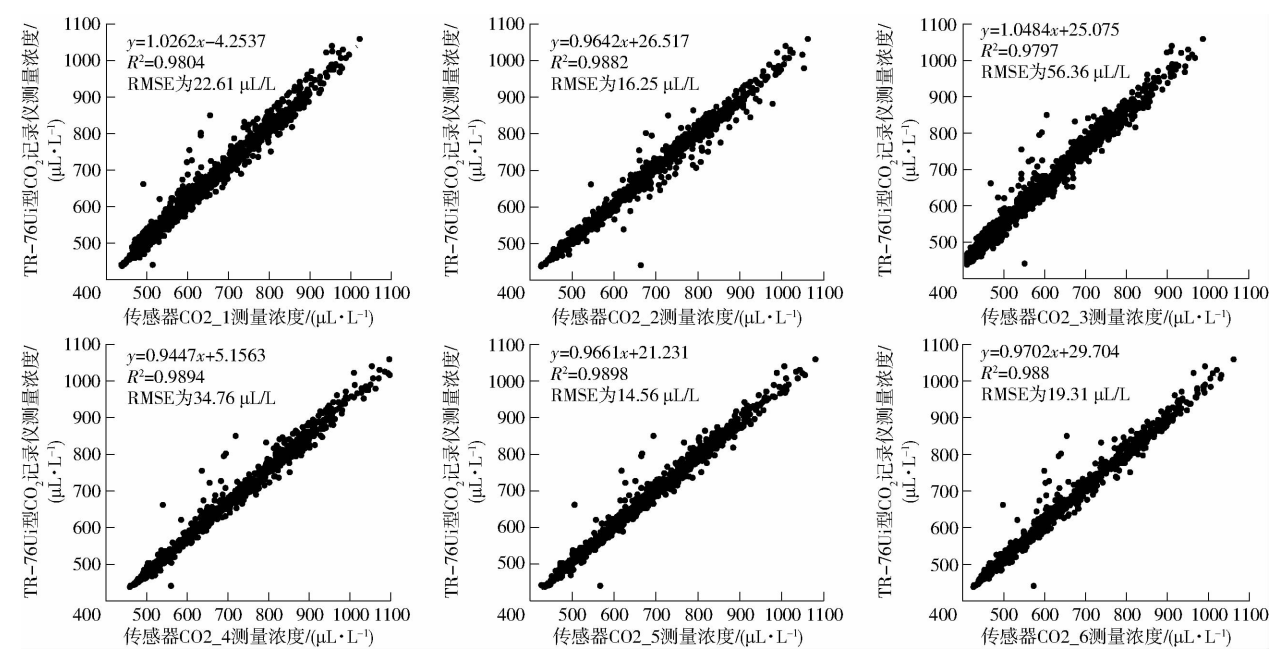


图 5 基于 TR-76Ui 型 CO₂ 记录仪检测浓度的 MH-Z14B 型传感器模块定标模型

Fig. 5 Calibration models for MH-Z14B sensors used based on measured concentration by TR-76Ui

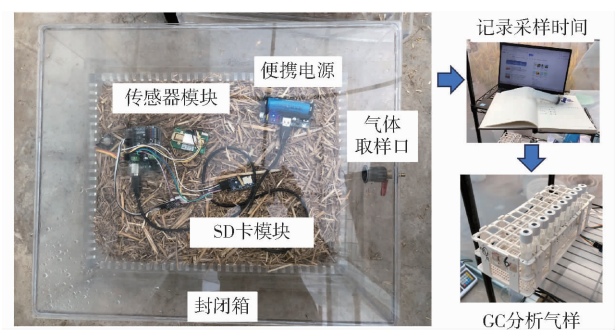


图 6 NDIR CO₂ 传感器模块测试

Fig. 6 Test of NDIR CO₂ sensor module by static chamber method

以确保采样时间与 Arduino 记录数据时间对应。共采集 12 个气体样本,使用 Agilent7890A 型气相色谱仪(GC)对气体 CO₂ 浓度进行分析。图 7 为 Arduino 采集数据与 GC 分析数据对比,由于箱内放置试验秸秆,CO₂ 浓度迅速上升,测试期间 CO₂ 浓度覆盖 900 ~ 3 000 μL/L 范围,线性回归模型决定系数 R^2 接近 1,说明该传感器在该试验条件下具有较好的线性输出能力。

1.3 监测环境设计

为相对稳定地获取秸秆腐解过程 CO₂ 的排放动态,选择在温室内建立小型半封闭观测室(尺寸(长×宽×高)2 m×1.5 m×2 m,图 8)。观测室外部温室的通风扇日常开放,确保温室与外界空气的流通,观测室与外部温室保持轻微的空气流动。环境内没有温度控制设备,观测室内的温度波动可以模拟室外环境,并降低外界气流影响。

试验样品为小麦秸秆,品种为郑麦 136,粉碎长

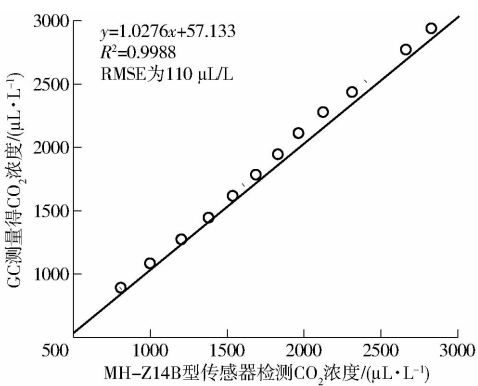


图 7 NDIR CO₂ 传感器检测结果与 GC 分析结果比较

Fig. 7 Comparison of CO₂ results measured by NDIR sensor and gas chromatography

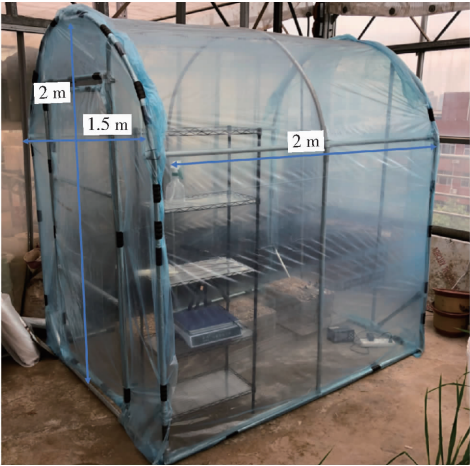


图 8 秸秆腐解动态观测室

Fig. 8 Experimental chamber for monitoring straw decomposition

度小于 5 cm。使用元素分析仪(Elementar 公司,德国)测试 C、N、H、S 元素含量,分别为 41.63%、

0.41%、5.21%、0.02%。秸秆碳氮比为 102。为表征不同处理状态下秸秆腐解过程,观测期间采用两种处理:将秸秆样本含水率调制 40% 以上;添加微生物菌剂,选择市售有机物料腐熟剂(南华千牧生物科技有限公司),以质量比 1:25 与水混合,均匀喷洒于秸秆样本,之后充分混匀,调节后秸秆含水率在 40% 以上。

将处理后的秸秆均匀放入定制的矩形聚乙烯容器(尺寸(长×宽×高)40 cm×30 cm×20 cm),该容器 4 个侧面为网架结构,确保空气流通,容器设有底座(尺寸(长×宽×高)54 cm×44 cm×5 cm),底座四周设有水槽,此设计可以通过密封箱法采集气体样本。秸秆装满容器后轻轻压实,压实后秸秆密度为 0.07 g/cm³。

为分析秸秆腐解过程 CO₂ 排放规律,以厘米级分辨率监测 CO₂ 浓度变化,传感器布置如图 9 所示。将 NDIR CO₂ 传感器模块垂直布置于秸秆堆体内部(表面下方 5 cm)、秸秆堆体表面以及表面上方 10、25、50、100 cm 处,监测与秸秆表面垂直方向 CO₂ 浓度变化。BME280 型传感器模块放置于秸秆堆体表面上方 30 cm 高度,监测秸秆放置环境的空气温度、相对湿度和气压变化。设计垂直、水平传感器支柱来固定传感器模块。DS18B20 型传感器模块埋于秸秆堆体表面和表面下方 10 cm 处,用于监测秸秆堆体表面及内部温度变化。作为对照,采用 MH-Z14B 型传感器模块与温湿度传感器模块同时监测观测室外的 CO₂ 浓度及空气温湿度变化。

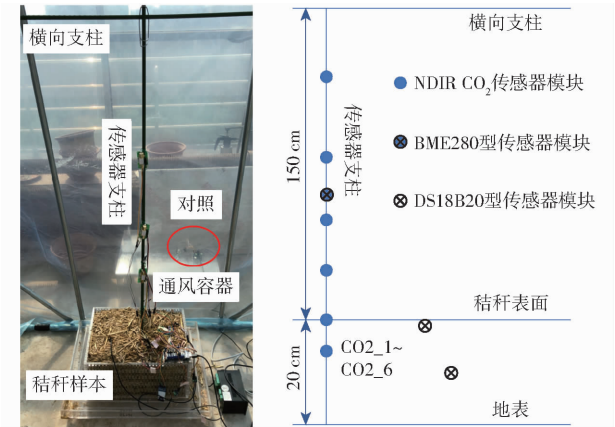


图 9 传感器模块布置

Fig. 9 Sensor module placement with subject straw sample

1.4 监测数据分析方法

试验结束后,根据 CO₂ 通量计算秸秆腐解度,并与传统方法进行了比较,计算公式为

F = \frac{dC}{dt} \frac{M_{CO_2}}{V_s} \frac{273}{273 + T} \frac{P}{P_o} V \tag{1}

D_{CO_2} = \int_0^t F dt \tag{2}

D_{c_p} = D_{CO_2} \frac{M_c}{M_{CO_2}} \tag{3}

D_c = m_0 C_0 - m_1 C_1 \tag{4}

W_x = \frac{D_o - D_c}{D_o} \times 100\% \tag{5}

- 式中 F——CO₂ 排放通量,mg/min
C——CO₂ 浓度,μL/L
 $\frac{dC}{dt}$ ——CO₂ 变化速率,μL/(L·min)
M_{CO₂}——CO₂ 分子量
V_s——1 mol 气体在标准大气压下所占体积,L
T——环境温度,℃ P——大气压强,kPa
P_o——标准大气压,kPa
V——CO₂ 排放空间体积,m³
D_{CO₂}——累积 CO₂ 通量,mg
D_{c_p}——基于 NDIR CO₂ 传感器测量估算秸秆碳损失质量,mg
M_c——碳分子量
D_c——基于称重法算得秸秆碳损失质量,g
m₀——试验开始时秸秆干质量,g
m₁——试验结束时秸秆干质量,g
C₀——试验初始秸秆含碳率,%
C₁——试验结束时秸秆含碳率,%
W_x——秸秆腐解度,%
D_o——秸秆初始含碳量,g
D_c——计算时间点含碳量,g

监测试验周期为 71 d(2023 年 9 月 20 日—11 月30 日)。为分析 CO₂ 变化与微生物活性关系,添加微生物菌后第 3 天,于 11:00 和 18:00 采集秸秆样品用于微生物多样性分析。采集样本后立即放入超低温冰箱(−80℃)内保存,然后进行真菌、细菌微生物多样性测序。每组样本做 3 次重复。试验期间,采集秸秆样品测量含水率及含碳率,计算添加腐解剂后试验整个周期内的碳损失及腐解度。含水率采用干燥箱法(100℃,48 h)测量,含碳率采用元素分析仪(Elementar 公司,德国)进行测量。

试验期间设计 3 组同样处理的秸秆样品容器,第 1 组用于设置传感器进行动态测量,第 2 组用于称量质量变化,第 3 组试验期间采集秸秆样品,测量含水率及含碳率变化。

2 数据采集与分析

2.1 秸秆含水率与 CO₂ 排放动态规律

图 10 为观测室内与观测室外空气温湿度比较。观测室外与观测室内的空气温湿度变化趋势一致,整体上观测室内温度比观测室外高,湿度略低。空

气温度随日出开始上升,到中午达到峰值,观测室内每日峰值达 40℃ 以上,比室外高约 10℃。空气相对湿度变化与空气温度趋势相反,观测室内空气相对湿度峰值比室外低 10 个百分点左右。结果说明观测室内可以模拟室外温湿度变化,并保持较高温度。

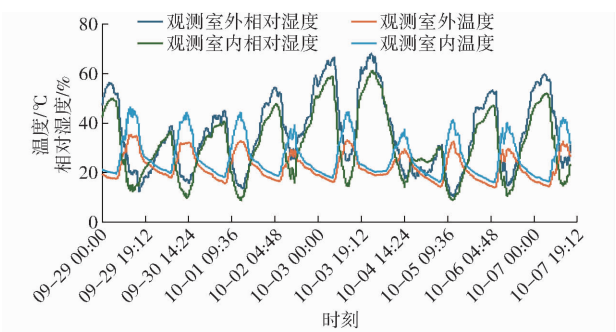


图 10 观测室内与观测室外空气温湿度变化
Fig. 10 Air temperature and humidity variations inside and outside observation chamber

为观测秸秆堆体内部 CO₂ 浓度变化是否具有秸秆腐解的行为特征,首先在调节秸秆含水率条件下进行了监测。图 11 为监测周期 13 d 的 CO₂ 排放

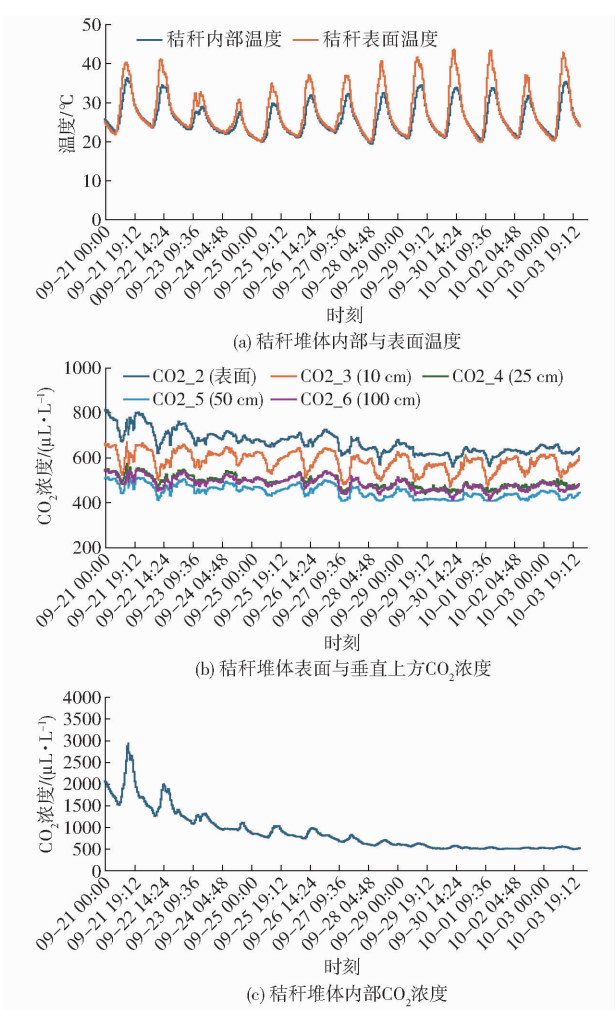


图 11 调节秸秆含水率后 CO₂ 浓度及秸秆温度变化
Fig. 11 Variation of CO₂ concentration and straw temperature after moisture adjustment

规律。图 11a 为秸秆堆体内部和堆体表面的温度变化。秸秆堆体表面、内部温度呈周期性变化,随空气温度变化趋势一致。秸秆堆体内部温度变化比表面温度变化存在时间滞后。

图 11b 为秸秆堆体表面以及远离秸秆垂直方向不同高度的 NDIR CO₂ 传感器响应,秸秆表面对应传感器编号为 CO₂_2,位置由下至上依次类推对应图中传感器编号(CO₂_2 ~ CO₂_6),总体来看,秸秆堆体表面 CO₂ 浓度最高,且随着远离秸秆方向而降低,秸秆表面垂直方向 25 cm 以上 CO₂ 浓度梯度无明显变化。可推知秸秆堆体表面 CO₂ 浓度变化受到秸秆腐解的影响,呈周期性变化趋势,并且距离秸秆越近,CO₂ 浓度越高,变化越明显。

图 11c 为秸秆堆体内部 CO₂ 浓度变化。该处 CO₂ 浓度变化展现了秸秆腐解的行为特征。曲线呈明显周期性变化,且变化趋势与温度一致。随着时间推移,CO₂ 曲线的波动幅度逐渐减小。可推知,随着时间推移,秸秆水分逐渐流失,腐解速度变慢,波动幅度逐渐减小。

2.2 微生物菌剂添加与 CO₂ 排放动态规律

为进一步观测秸秆腐解特性和秸秆堆体内部 CO₂ 浓度的动态变化规律,添加微生物菌剂加速秸秆腐解。图 12a 为添加微生物菌剂后秸秆堆体内部 CO₂ 浓度与空气温度、秸秆堆体内部与表面温度随时间的变化曲线。与只调节含水率情况相同,秸秆堆体内部 CO₂ 呈明显周期性变化趋势,且变化趋势与秸秆堆体内部温度一致。与图 11c 相比,添加微生物菌剂后 CO₂ 变化幅度持续几个周期后才开始衰减,比只调节秸秆含水率情况持续时间更长。

另一方面,在试验第 7 天和第 8 天 00:00 附近分别出现异常峰值。将该数据与同期间观测室外部参考 CO₂ 浓度进行对照,结果如图 12b 所示,观测室外的 CO₂ 浓度未出现明显周期性变化。在第 7 天和第 8 天 00:00 附近出现 CO₂ 浓度上升情况,与图 12a 中秸秆堆体内部 CO₂ 浓度异常值对应,可推知为来自外部环境干扰。

为验证秸秆堆体内部 CO₂ 浓度变化与微生物活性的关系,取同一天中 CO₂ 排放速率高点(11:00)与低点(18:00)进行微生物多样性测序。图 13 为 11:00(A1_1 ~ A1_3)与 18:00(A2_1 ~ A2_3)属水平真菌(图 13a)与细菌(图 13b)群落结构。在属水平真菌上,秸秆样品中的优势菌门以曲霉属为主。在属水平细菌上,秸秆样品中的优势菌门以芽孢杆菌属、橄榄型菌属、微杆菌属、拟诺卡氏菌属为主。

曲霉属是发酵工业和食品加工业的重要真菌菌种,一般具有较高的降解能力,能够有效分解秸

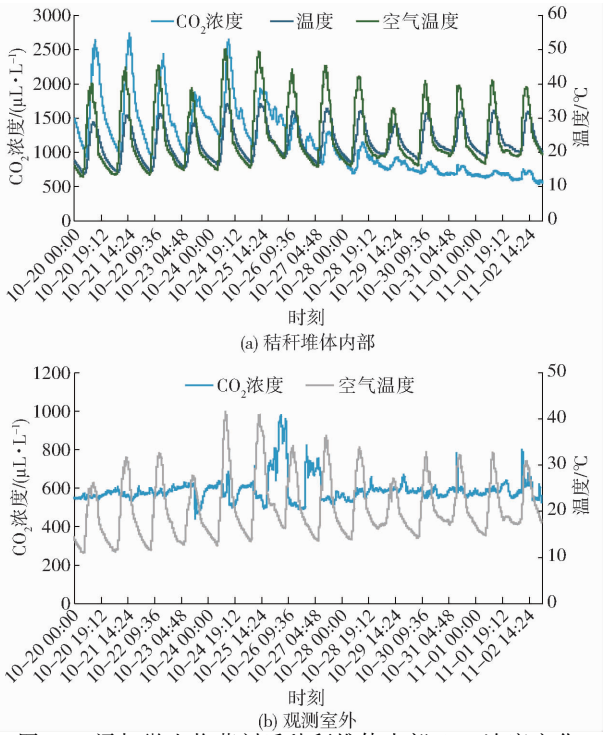
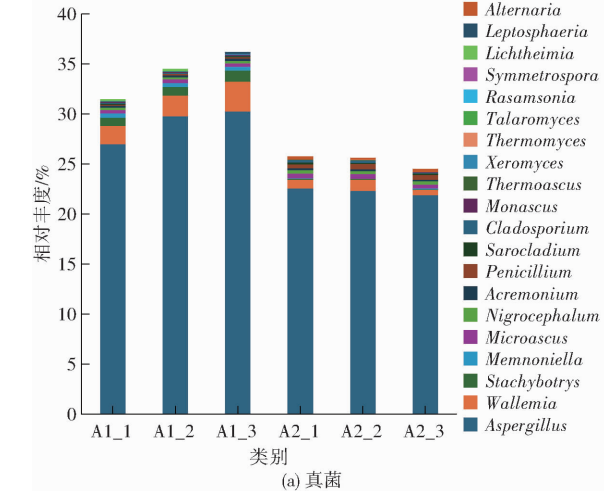


图 12 添加微生物菌剂后秸秆堆体内部 CO₂ 浓度变化与观测室外 CO₂ 浓度变化

Fig. 12 CO₂ concentration at interior of straw after adding microbial agent and CO₂ concentration at the same period

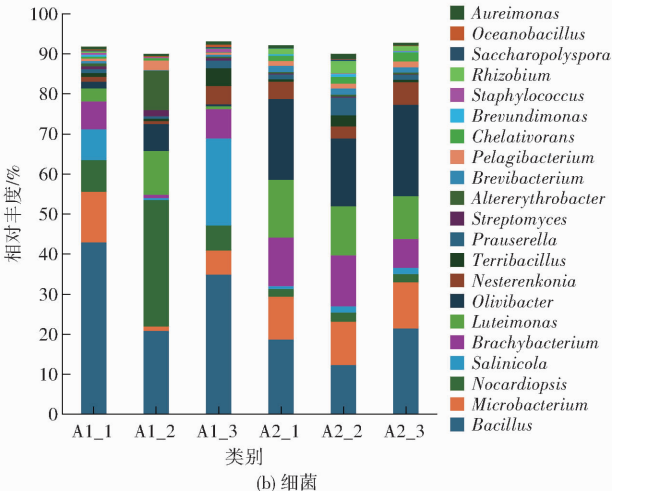


(a) 真菌

秆中的纤维素和半纤维素,并产生多种降解酶。芽孢杆菌属是一类常见的秸秆降解细菌,具有环境适应能力强、能够在较宽的温度和 pH 值范围下存活等特点,在农业、畜牧业及环境保护等领域有着广泛的应用^[32]。

如图 13 所示,相比于 11:00 (A1),18:00 (A2) 属水平真菌曲霉属相对丰度显著降低,属水平细菌芽孢杆菌属相对丰度显著降低。这两种菌属在秸秆分解中发挥主要作用,并促进 CO₂ 释放。相对丰度降低表明该菌属的相对活性下降,因此可以推知图 11c 与图 12a 中秸秆堆体内部 CO₂ 周期性波动与微生物活性相关。

由于秸秆腐解过程中 CO₂ 在秸秆堆体内部孔隙中形成积累,导致孔隙中的 CO₂ 浓度升高,随着秸秆腐解速度变慢,孔隙中的 CO₂ 沿着孔隙通道逐渐释放到外部空气中,导致秸秆堆体内部的 CO₂ 浓度降低。CO₂ 周期性变化特征体现了微生物活动的生物节律。同时,微生物活性与水分相关,当多孔介质中的含水率降低,较大孔隙逐渐失去水分,导致部分微生物呼吸速率降低,活性下降,秸秆的腐解速率变慢,CO₂ 排放速率也会降低,CO₂ 排放量逐渐减



(b) 细菌

图 13 属水平真菌、细菌相对丰度的日变化

Fig. 13 Diurnal variation in relative abundance of fungi and bacteria at genus level

小,日间的波动幅度也逐渐减小^[33-34]。以上结果说明秸秆堆体内部 CO₂ 变化反映秸秆腐解的行为特征。并且说明通过高分辨率测量,有助于解析微生物活动规律,揭示秸秆腐解的行为特征,进而筛选高效的秸秆腐解菌剂。

2.3 秸秆腐解速率与环境参数关系

为了解秸秆腐解速率与空气温度关系,取添加微生物菌剂后腐解速率较快的前 3 d 数据,对秸秆堆体内部 CO₂ 变化曲线进行微分处理,获取 CO₂ 浓度变化速率的日变化曲线,结果如图 14 所示。秸秆

堆体内部 CO₂ 浓度变化速率曲线反映了秸秆腐解的动态特征,该曲线在温度上升时开始升高,在中午出现峰值,随后立即下降,在 18 h 附近出现低谷,意味着此时秸秆腐解缓慢,CO₂ 浓度逐渐恢复到与周边环境平衡状态。

空气温度曲线波峰附近出现了小幅度波动,在前两个波峰处表现明显,且该波动与 CO₂ 浓度变化速率的升降相对应,该现象可能是秸秆腐解与周围环境相互作用的结果:一方面,温度的升降影响秸秆腐解速率;另一方面,秸秆腐解过程微生物分解有机

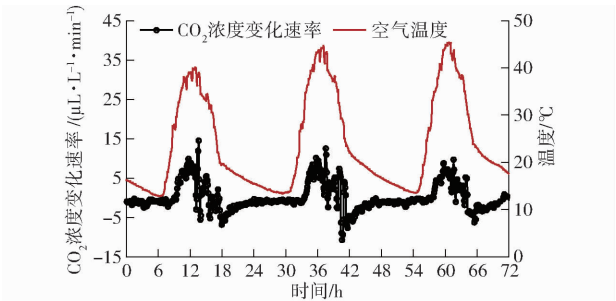


图 14 秸秆堆体内部 CO₂ 浓度变化速率与空气温度的日变化曲线

Fig. 14 Daily variation of CO₂ change rate inside straw pile and air temperature

质会释放热量,对环境温度造成影响,导致温度出现小幅度波动。

为进一步分析秸秆腐解速率与温度关系,选择图 14 所示期间的数据(共 865 个数据点),建立秸秆堆体内部累积 CO₂ 浓度变化量与秸秆堆体内部温度关系的散点图,结果如图 15 所示。秸秆堆体内部累积 CO₂ 浓度变化量通过对 CO₂ 浓度变化速率进行积分获取,表达了秸秆堆体内部测量点的 CO₂ 流入和流出总量的变化动态,反映了秸秆腐解动态。结果表明,秸秆堆体内部累积 CO₂ 浓度变化量与秸秆堆体内部温度呈显著正相关($P < 0.01$),决定系数 R^2 为 0.813 7,可以推知秸秆腐解速率受空气温度影响。

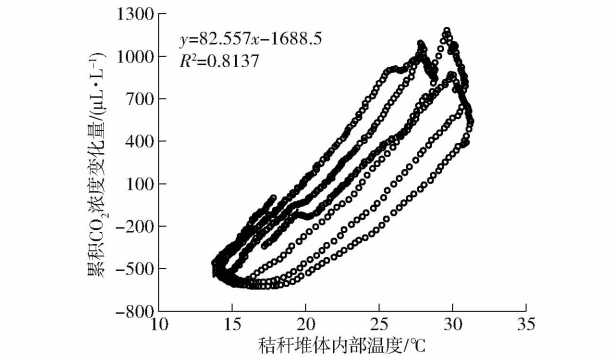


图 15 秸秆堆体内部累积 CO₂ 浓度变化量与秸秆堆体内部温度的关系

Fig. 15 Scatter plots of cumulative CO₂ change and internal temperature of straw pile

由于秸秆堆体内部传感器监测数据为累积通量,因此 CO₂ 浓度变化速率存在负值,假设秸秆腐解时排放 CO₂,秸秆堆体内部 CO₂ 浓度变化速率为正,采用式(1)、(2)、(3)、(5)计算秸秆腐解度,并对腐解度进行微分处理,计算腐解速率。图 16 为调节含水率与添加微生物菌剂两种处理后 18 d 的秸秆腐解度及腐解速率变化。调节含水率大于 40% 后秸秆腐解速率迅速下降,腐解度上升,第 4 天后趋于平稳。与之相比,添加腐解菌剂后秸秆

腐解度和腐解速率均高于只调节含水率的情况,腐解速率在第 7 天开始明显下降,到第 12 天后趋于平稳。原因是秸秆失去水分导致微生物逐渐失去活性,腐解速率变慢。

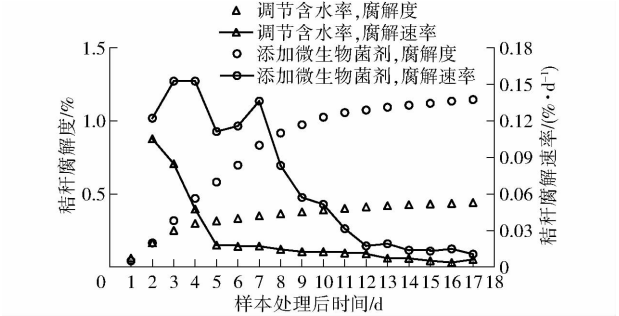


图 16 两种处理后秸秆腐解度及腐解速率随时间变化

Fig. 16 Changes in straw decomposition degree over time after two treatments

为比较秸秆腐解度的估算精度,计算了添加微生物菌剂后 45 d 周期的秸秆碳损失量。试验初始含碳 41.6%,试验结束时测得含碳 42.8%,计算该试验周期内秸秆炭损失质量为 10.38 g,炭损失率为 1.86%。同时,通过式(1)、(2)估算该周期 CO₂ 累积排放量为 36.59 g,根据式(3)估算碳损失质量为 9.98 g,估算腐解度为 1.79%。估算误差为 0.07%。与传统抽样测量方法相比,以秸秆腐解 CO₂ 排放量为指标来表征秸秆腐解,有助于节省劳力,获取更小时间间隔的秸秆腐解度及秸秆腐解速率变化动态,更细致地分析腐解规律,并采取有效的调控措施。

为描述秸秆腐解度与秸秆含水率的关系,取添加微生物菌剂后秸秆含水率为自变量,构建秸秆腐解速率的一元线性回归模型,结果如图 17 所示。由于试验前期秸秆含水率减少速率快,然后趋于稳定,该试验测量了前 14 d 及第 18 天秸秆的含水率。结果表明,试验前 10 d 秸秆含水率减少幅度较大(42% ~ 10%),第 11 天至第 18 天秸秆含水率减少幅度较小(10% ~ 6.7%),这点与图 16 中所示添加微生物菌剂情况的秸秆腐解度变化趋势一致。由于

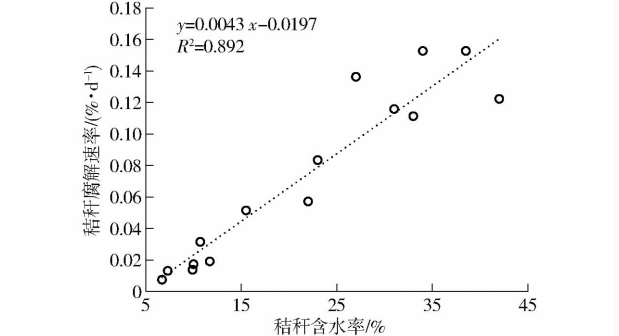


图 17 秸秆腐解速率与秸秆含水率的关系模型

Fig. 17 Relationship between straw decomposition rate and straw water content

秸秆容器内存在空间差异,取样测量含水率存在误差,导致数据点偏离。尽管如此,测量结果表明秸秆腐解度与秸秆含水率具有较强的线性关系,一元线性回归方程决定系数 R^2 为 0.892。这说明在该试验条件下,秸秆腐解程度主要取决于秸秆含水率,秸秆含水率越高,腐解度越好。

3 结 论

(1) 基于小型、低成本传感器套件与 Arduino 板,设计了秸秆腐解动态监测系统,系统由 NDIR CO₂ 传感器模块、环境传感器模块、秸秆温度传感器模块、时钟模块以及数据存储模块构成。该系统可以实现秸秆腐解过程环境参数、秸秆温度以及 CO₂ 浓度多位点的监测,提升分析可靠性和稳定性。以市面 TR-76Ui 型 CO₂ 记录仪为基准对传感器模块进行测试和校准,线性回归模型决定系数 R^2 为

0.97~0.99, RMSE 为 14.56~56.36 μL/L,表明低成本 NDIR CO₂ 传感器模块具有良好的检测精度和稳定性。

(2) 系统监测到秸秆堆体内部 CO₂ 浓度具有周期性变化规律,该规律与温度的日变化呈正相关,表现了微生物活动的生物节律。这样的周期性规律说明秸秆堆体内部 CO₂ 浓度变化可以反映秸秆的腐解动态行为,揭示了作为指标反映秸秆腐解动态的可行性。秸秆腐解速率与温度和含水率呈正相关,决定系数 R^2 分别为 0.813 7 与 0.892。调节秸秆含水率大于 40% 后,秸秆腐解速率迅速下降,至第 4 天趋于平稳。添加微生物菌剂后秸秆腐解速率在第 7 天开始明显下降,至第 12 天开始趋于平稳。

(3) 外界空气流入会影响 CO₂ 排放的定量分析,秸秆堆密度、孔隙分布、秸秆含水率等物理因素均对秸秆堆体内部 CO₂ 变化动态产生影响。

参 考 文 献

[1] 《全国农作物秸秆综合利用情况报告》发布 2021 年我国农作物秸秆综合利用率达 88.1% [EB/OL]. https://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010_6412962.htm.

[2] 赵立欣,姚宗路,霍丽丽. 秸秆综合利用减排固碳技术[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2023.

[3] SCHNITZER M, MONREAL C M. Quo vadis soil organic matter research, a biological link to the chemistry of humification[J]. *Advances in Agronomy*, 2011,113:145-146.

[4] 齐智娟,徐敬文,张忠学,等. 秸秆还田配施氮肥对黑土玉米田土壤 CO₂ 排放与碳平衡的影响[J]. *农业机械学报*,2024,55(6):284-293.

QI Zhijuan, XU Jingwen, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on soil CO₂ emission and carbon balance in black soil maize field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2024,55(6):284-293. (in Chinese)

[5] ZHANG J, HANG X, LAMINE S M, et al. Interactive effects of straw incorporation and tillage on crop yield and greenhouse gas emissions in double rice cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017,250(1):37-43.

[6] ZHAO S, QIU S, XU X, et al. Change in straw decomposition rate and soil microbial community composition after straw addition in different long-term fertilization soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019,138:123-133.

[7] LIU X, LIU H, ZHANG Y, et al. Straw return drives soil microbial community assemblage to change metabolic processes for soil quality amendment in a rice-wheat rotation system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023,185:109131.

[8] 赵宇航,殷浩凯,胡雪纯,等. 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力[J]. *环境科学*, 2023,45(4):1-16.

ZHAO Yuhang, YIN Haokai, HU Xuechun, et al. Characteristics and driving forces of organic carbon mineralization in brown soil with long-term straw returning[J]. *Environmental Science*, 2023,45(4):1-16. (in Chinese)

[9] 张志毅,何剑,范先鹏,等. 稻麦轮作制还田秸秆腐解和养分释放特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(8):221-230.

ZHANG Zhiyi, HE Jian, FAN Xianpeng, et al. Characteristics of straw decomposition and nutrient release in rice and wheat rotation system[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(8):221-230. (in Chinese)

[10] 田慎重,张玉凤,边文范,等. 深松和秸秆还田对旋耕农田土壤有机碳活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2020,36(2):185-192.

TIAN Shenzhong, ZHANG Yufeng, BIAN Wenfan, et al. Effects of subsoiling and straw return on soil labile organic carbon fractions in continuous rotary tillage cropland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020,36(2):185-192. (in Chinese)

[11] LI T, ZHANG J, ZHANG H, et al. Fractionation of soil organic carbon in a calcareous soil after long term tillage and straw residue management[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022,21(12):3611-3625.

[12] LIU J, ZHONG Y, JIA X, et al. Wheat straw decomposition patterns and control factors under nitrogen fertilization[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021,21(4):3110-3121.

[13] DEVEVRE O C, HORWATH W R. Decomposition of rice straw and microbial carbon use efficiency under different soil temperatures and moistures[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000,32(11-12):1773-1785.

[14] LATIFMANESH H, DENG A, LI L, et al. How incorporation depth of corn straw affects straw decomposition rate and C&N release in the wheat-corn cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020,300:107000.

[15] NYT 2722—2015 秸秆腐熟菌剂腐解效果评价技术规程[S]. 2015.

[16] RAZA T, QADIR M F, KHAN K S, et al. Unrevealing the potential of microbes in decomposition of organic matter and release

of carbon in the ecosystem[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023,334(15):118529.

[17] GORD N, SHARIFI A, SEYEDABADI M, et al. Development of two devices for high-throughput screening of ethanol-producing microorganisms by real-time CO₂ production monitoring[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2023,46(8):1209 – 1220.

[18] ANDREA T, HAAKON E H, CAROLINE S M N, et al. Bioprocess monitoring: a moving horizon estimation experimental application[J]. *IFAC – PapersOnLine*, 2022,55(7):222 – 227.

[19] TUVERI A, PÉREZ-GARCÍA F, LIRA-PARADA P A, et al. Sensor fusion based on extended and unscented Kalman filter for bioprocess monitoring[J]. *Journal of Process Control*, 2021,106:195 – 207.

[20] MAROSE S, LINDEMANN C, ULBER R, et al. Sensor systems for bioprocess monitoring[J]. *Trends in Biotechnology*, 2015,17(1):30 – 34.

[21] WANG X, RASHID I, ZHAO Z, et al. Machine learning algorithm integrated with real-time in situ sensors and physiochemical principle-driven soft sensors toward an anaerobic digestion-data fusion framework[J]. *ACS ES&T Water*,2023,4(3):1061 – 1072.

[22] BROWN S L, GOULSBRA C S, EVANS M G, et al. Low cost CO₂ sensing: a simple microcontroller approach with calibration and field use[J]. *HardwareX*, 2020,8:e00136.

[23] BLACKSTOCK J M, COVINGTON M D, PERNE M, et al. Monitoring atmospheric, soil, and dissolved CO₂ using a low-cost, Arduino monitoring platform (CO₂ – LAMP): theory, fabrication, and operation[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019,7:313.

[24] MARTIN C R, ZENG N, KARION A, et al. Evaluation and environmental correction of ambient CO₂ measurements from a low-cost NDIR sensor[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017,10(7):2383 – 2395.

[25] TATSUMI K, YAMAZAKI T, ISHIKAWA H. An open-source, low-cost measurement system for collecting hydrometeorological data in the open field[J]. *Technologies*, 2021,9(4):78.

[26] FURST L, FELICIANO M, FRARE L, et al. A portable device for methane measurement using a low-cost semiconductor sensor: development, calibration and environmental applications[J]. *Sensors*, 2021,21(22):7456.

[27] OH P, KANG S. Integrating artificial intelligence to chemistry experiment: carbon dioxide fountain[J]. *Journal of Chemical Education*, 2021,98(7):2376 – 2380.

[28] SUPARTA W, WARSITA A, IRCHAM I. A low-cost development of automatic weather station based on Arduino for monitoring precipitable water vapor[J]. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2021,24(2):744 – 753.

[29] DURSO P R, ARCIDIACONO C, CASCON E. Assessment of a low-cost portable device for gas concentration monitoring in livestock housing[J]. *Agronomy*, 2023,13(1):5.

[30] GAGNON S, L'HÉRAULT E, LEMAY M, et al. New low-cost automated system of closed chambers to measure greenhouse gas emissions from the tundra[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016,228 – 229:29 – 41.

[31] Infrared carbon dioxide module (model: MH – Z14B) user's manual V1.1[EB/OL]. [https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z14b-co2-manual\(ver1_1\).pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z14b-co2-manual(ver1_1).pdf).

[32] 才金玲, 胡秦博, 郑薇琳, 等. 低温秸秆降解菌研究进展[J]. *微生物学通报*, 2024, 51(7): 2312 – 2325.

CAI Jinling, HU Qinbo, ZHENG Weilin, et al. Research progress in straw-degrading psychrotrophic microorganisms[J]. *Microbiology China*, 2024, 51(7): 2312 – 2325. (in Chinese)

[33] NZWEIG J M G, HEMMING D, MASEYK K, et al. Water limitation to soil CO₂ efflux in a pine forest at the semiarid “timberline”[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008,114(G3):1 – 14.

[34] SHI W, DU S, MORINA J C, et al. Physical and biogeochemical controls on soil respiration along a topographical gradient in a semiarid forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017,247:1 – 11.

(上接第 398 页)

[19] DOSOVITSKIY A,BEYER L,KOLESNIKOV A,et al. An image is worth 16x16 words: transformers for image recognition at scale[C]//9th International Conference on Learning Representations, 2021.

[20] ZHOU H Y,ZHANG S,PENG J,et al. Informer: beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting[C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence,2021.

[21] NG W, MINASNY B, MALONE B P, et al. Optimizing wavelength selection by using informative vectors for parsimonious infrared spectra modelling[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2019,158:201 – 210.

[22] XU X,MA F,ZHOU J,et al. Applying convolutional neural networks (CNN) for end-to-end soil analysis based on laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) with less spectral preprocessing[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2022,199:107171.

[23] ZHANG X,LIN T,XU J,et al. DeepSpectra: an end-to-end deep learning approach for quantitative spectral analysis[J]. *Analytica Chimica Acta*,2019,1058:48 – 57.

[24] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1998:860 – 934.

[25] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京:中国农业出版社,1998:351 – 382.