

不同供热能源对烟草烤房烘烤环节的碳排放影响研究

杨超¹, 杨志仁², 徐航³, 陈天才⁴, 赵小飞², 尹福玉², 苏亚楠², 童飞⁵, 陈瑜欣¹

1. 重庆市烟草公司彭水分公司, 重庆 409600
2. 重庆交通大学 碳中和技术应用研究中心, 重庆 400074
3. 重庆市烟草公司奉节分公司, 重庆 404699
4. 重庆市烟草公司涪陵分公司, 重庆 408000
5. 控峰(重庆)碳中和研究院有限公司, 重庆 400060

摘要:目的 “双碳”目标背景下,烟草行业积极寻求替代传统燃煤化石能源的新型烤烟供热能源,以探索一条可持续发展的绿色低碳发展之路。然而,不同供热能源对烟草烤房烘烤环节的碳排放影响仍不清晰。方法 采用碳排放因子法和烟气实测法两种方法,对比分析了 4 种不同能源(燃煤、生物质、天然气和电能)烤房烘烤一炕腰部烟叶的 CO₂ 排放量。结果 燃煤烤房的 CO₂ 浓度明显大于生物质烤房和天然气烤房,天然气烤房的 CO₂ 浓度最低;单位产品(干烟叶)的 CO₂ 排放因子从大到小依次为:燃煤烤房>生物质烤房>天然气烤房>电烤房,分别为 3.31、1.80、1.34 和 0.85;采用生物质能源替代传统燃煤可减少 CO₂ 排放量 45.6%。结论 相比于传统燃煤,生物质能烟草烤房具有明显的碳减排效果;该成果能够促进我国烟草行业绿色低碳可持续发展,助推我国“双碳”目标按期实现。

关键词:烟草烤房;供热能源;生物质;碳排放;CO₂ 减排

中图分类号:X511 文献标识码:A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0005.005

Impact of Different Heating Energy Sources on Carbon Emissions in Tobacco Curing Barns

YANG Chao¹, YANG Zhiren², XU Hang³, CHEN Tiancai⁴, ZHAO Xiaofei², YIN Fuyu², SU Yanan², TONG Fei⁵, CHEN Yuxin¹

1. Pengshui Branch, Chongqing Tobacco Company, Chongqing 409600, China
2. Carbon Neutral Technology Application Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China
3. Fengjie Branch, Chongqing Tobacco Company, Chongqing 404699, China
4. Fuling Branch, Chongqing Tobacco Company, Chongqing 408000, China
5. Kongfeng (Chongqing) Carbon Neutralization Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400060, China

Abstract: Objective To find a sustainable path towards green and low-carbon development, the tobacco industry is actively searching for alternative heating energy sources to traditional coal and fossil fuels for curing tobacco leaves under the background of the “dual carbon” goals. However, it is still unclear how different heating energy sources affect carbon emissions during the curing process in tobacco barns. **Methods** Using the carbon emission factor method and flue gas

收稿日期:2023-11-13 修回日期:2024-02-23 文章编号:1672-058X(2025)05-0036-07

基金项目:重庆市烟草专卖局(公司)科技计划项目(B20222NY1306);中国博后面上基金(2022M720590);重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0670);大学生创新创业训练计划项目(S202310618015)。

作者简介:杨超(1976—),男,河南南阳人,高级农艺师,博士,从事烟叶生产研究。

通信作者:陈瑜欣(1985—),女,重庆合川区人,农艺师,硕士,从事烟草工艺研究。Email:363245492@qq.com。

引用格式:杨超,杨志仁,徐航,等.不同供热能源对烟草烤房烘烤环节的碳排放影响研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2025,42(5):36-42.

YANG Chao, YANG Zhiren, XU Hang, et al. Impact of different heating energy sources on carbon emissions in tobacco curing barns[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(5): 36-42.

measurement method, the study compares and analyzes the carbon dioxide (CO₂) emissions from four different energy sources (coal, biomass, natural gas, and electricity) used for curing one batch of waist-level tobacco leaves in a barn.

Results The carbon dioxide concentration in coal-fired barns is significantly higher than that in biomass-fired and natural gas-fired barns, with the lowest concentration observed in natural gas-fired barns. The carbon dioxide emission factors per unit of product (dry tobacco leaves) rank from highest to lowest are coal-fired barns>biomass-fired barns>natural gas-fired barns>electric heating barns, at 3.31, 1.80, 1.34, and 0.85, respectively. Replacing traditional coal with biomass energy can reduce carbon dioxide emissions by 45.6% per unit of product.

Conclusion Compared with traditional coal, biomass energy in tobacco curing barns demonstrates a significant carbon emission reduction. These findings can promote green and sustainable development in China's tobacco industry and contribute to achieving the "dual carbon" goals on schedule.

Keywords: tobacco curing barns; heating energy sources; biomass; carbon emissions; CO₂ emission reduction

1 引言

我国是世界烤烟生产第一大国,烤烟年产量维持在 1.5×10⁶ t 左右^[1]。燃煤型密集烤房是我国烤烟行业烟叶烘烤环节的主要设备^[2-3]。煤炭作为烤烟的传统供热能源,年消耗量达到 2.25×10⁶ t。煤炭燃烧后排放出大量的颗粒物、二氧化硫和氮氧化物等大气污染物,已经对环境产生严重危害^[4]。特别是在我国 2020 年“双碳”战略目标提出后^[5-8],燃煤型密集烤房除了排放出常规大气污染物外,还排放出大量的二氧化碳(Carbon Dioxide, CO₂)^[9],这与“双碳”目标是相悖的。

烟草行业为了实现绿色低碳发展,已有研究者开发出新型能源的密集型烤房^[10-14]。生物质能烤房和天然气烤房已经实现产业化应用,并表现出比燃煤供热更好的优势^[15]。如赵新帅等^[16]发现生物质颗粒燃料密集烤房烘烤成本更低,热能利用率更高,并且在提高烤后烟叶质量和经济性上优势明显;苟文涛等^[17]发现随着生物质燃料替代比例的增加,SO₂ 的排放量显著降低。当前研究者重点探究的是降低大气污染和节约能耗^[13, 18-19],对碳排放的研究较少。有少部分研究者,如肖志新等^[20]发现生物质烤房比燃煤烤房 CO₂ 排放降低 24.41%,但是其并非采用连续监测,CO₂ 排放浓度数据不连续,烟气排放量采用理论值推算,与实际碳排放量存在差距。除生物质烤房研究较多之外,天然气作为高效、清洁的优质能源,主要成分是甲烷 CH₄,

燃烧后主要产生水和 CO₂,几乎无颗粒尘埃物质的产生,有部分省市已开展天然气烤房试点探索。然而,其探索也仅处于评估天然气烤房的烘烤效果等方面^[21],对天然气燃烧后的主要产物 CO₂ 排放量的研究还未见报道。

因此,本研究以 4 种供热能源类型(燃煤、生物质、天然气、电能)为对象,采用碳排放因子法和烟气实测法两种方法分析了烟叶烤房采用不同生物质和天然气替代燃煤后的碳减排效果,并根据核算结果与监测结果的分析比较,探析出不同供热能源对烟草烤房烘烤环节的碳排放影响规律,以期从能源替代角度为烟草行业碳减排提供理论支撑,为我国实现 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和的“双碳”目标贡献力量。

2 材料与方法

2.1 试验设计

CO₂ 排放监测试验于 2022—2023 年选择两个烘烤季在彭水(KF-RM-PS、KF-D-PS)、奉节(KF-SWZ-FJ)和涪陵(KF-TRQ-FL)三地开展。供试烤房筛选标准为烤房新旧程度相同和烘烤工艺相同。依此标准确定选取彭水常规燃煤密集烤房、和电能烤房各 1 座,奉节常规生物质密集烤房 1 座。由于彭水县无天然气烤房,选取涪陵区天然气密集烤房 1 座。燃煤和生物质烤房依据三段五步式烘烤工艺定时投加燃料。试验烤房基本参数见表 1。

表 1 烤房的基本参数

Table 1 Relevant parameters of tobacco curing barns

烤房编号	烤房类型	能源类型	地理位置	装鲜烟叶量/kg	烟囱横截面积/m ²	烘烤工艺
KF-RM-PS	燃煤烤房	煤炭	重庆彭水	3 457	0.16	三段六步式
KF-SWZ-FJ	外置式生物质烤房	生物质	重庆奉节	5 178	0.02	三段六步式
KF-TRQ-FL	天然气烤房	天然气	重庆涪陵	4 275	0.07	三段六步式
KF-D-PS	电烤房	电能	重庆彭水	4 472	无烟囱	三段六步式

2.2 测定项目及方法

烟气中 CO_2 浓度和烟气流量连续测试采用 M-2060 型固定污染源碳排放 CO_2 在线监测系统(上海麦越)测定。烟气成分和流场参数的测量按照《火电厂烟气排放连续监测技术规范》(DL/T 2376—2021)等规范与标准对烟气进行直接抽取式连续监测,监测位置位于尾部烟道出口处,在线监测系统每 5 min 记录 1 次烟气 CO_2 浓度和烟气流量的瞬时值,该瞬时值记为间隔 5 min 内的平均值。为确保连续监测数据的准确性,定期校准性监测采用便携式 CO_2 分析仪(PTM600-4i,深圳逸云天)测定。

直接监测的 CO_2 浓度为体积分数(%),而要计算 CO_2 排放量需换算为质量浓度。 CO_2 单位换算以《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》(DL/T2376—2021)^[22]为参考,标准状态下 CO_2 质量浓度按照式(1)折算为基准含氧量浓度:

$$C_{\text{sn}} = C_s \times \frac{44}{22.4} \times 10 \quad (1)$$

式(1)中, C_{sn} 为标准状态下二氧化碳质量浓度(g/m^3); C_s 为 CO_2 -CEMS(Continuous Emission Monitoring System)测得的 CO_2 体积浓度(%):

$$C_d = \frac{C_w}{1 - X_{\text{sw}}} \quad (2)$$

式(2)中, C_d 为标准状态下二氧化碳干基质量浓度(g/m^3); C_w 为标准状态下二氧化碳湿基质量浓度(g/m^3); X_{sw} 为烟气含湿量(%)。

标准状态下干烟气体积流量按照式(3)计算:

$$Q_{\text{sn}} = 3\,600 \times A \times K_v \times \bar{v}_p \times \frac{273}{273 + t_s} \times \frac{P_{\text{atm}} + P_s}{101\,325} \times (1 - X_{\text{sw}}) \quad (3)$$

式(3)中, A 为测定断面的面积(m^2)。 K_v 为速度场系数; $\bar{v}_p$ 为测定断面的湿烟气平均流速(m/s); t_s 为烟气温度($^{\circ}\text{C}$); P_{atm} 为大气压力(Pa); P_s 为烟气静压(表压)(Pa)。测定断面流速 CEMS 测得的湿烟气平均流速(m/s)。

CO_2 累积排放量按照式(4)计算:

$$G_d = \sum_{i=1}^{i=24} C_d \times Q_{\text{sn}} \times 10^{-3} \quad (4)$$

式(4)中, G_d 为二氧化碳天排放量(kg/d)。

2.3 数据采集及处理

本研究理论碳排放量计算采用碳排放因子法,计算按照式(5)计算:

$$G_t = k \times m_{\text{ad}} \quad (5)$$

式(5)中, m_{ad} 为燃料使用量(kg 或 m^3 或 $\text{kW} \cdot \text{h}$); k 为碳排放因子;对于排放因子法,可以遵循《IPCC 2006 国家温室气体清单指南》及其 2019 修订版^[23],煤炭碳排放因子取 2.70,生物质碳排放因子取 1.33,天然气碳排放因子取 2.17,电能碳排放因子取 0.58。其他所有数据采用 Excel 2016 和 SPSS 进行数据统计、处理、分析,Origin 2016 用于绘图。

3 结果与讨论

3.1 不同能源烟草烤房能耗比较

不同能源密集烤房烟叶烘烤能耗如表 2 所示。4 个烤房的鲜干比控制在 6~8 之间,保证了每炕烟叶的品质和风味几乎一致。4 个不同能源烤房在产品产量和品质相近的前提下,4 个不同能源烤房在燃料类型和消耗量上存在差异。其中,煤炭的消耗量为 920 $\text{kg}/\text{炕}$,生物质的消耗量为 1 095 $\text{kg}/\text{炕}$,天然气的消耗量为 348 $\text{m}^3/\text{炕}$,电能的消耗量为 946 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{炕}$ 。燃料消耗差异与鲜烟叶装烟量密切相关,因为装烟量越大,所需的热值就越高,烘烤时间也会相应延长。

表 2 不同能源密集烤房烟叶烘烤能耗

Table 2 Energy consumption for tobacco leaf baking in different bulk curing barns

烤房 编号	鲜烟量 $\text{kg}/\text{炕}$	干烟量 $\text{kg}/\text{炕}$	烘烤时间 $\text{h}/\text{炕}$	鲜干比	每炕燃料 消耗量
KF-RM-PS	3 457	531	166	6.51	920 kg
KF-SWZ-FJ	5 178	800	196	6.47	1 095 kg
KF-TRQ-FL	4 275	534	236	8.01	348 m^3
KF-D-PS	4 472	643	230	6.95	946 $\text{kW} \cdot \text{h}$

3.2 不同能源烟草烤房 CO_2 日均浓度比较

图 1 为燃煤、生物质和天然气烤房随烘烤工艺进程烟囱 CO_2 排放浓度情况。由于电烤房无废气排放,因此不纳入 CO_2 日平均浓度的比较范围。从图 1 可以看出,燃煤烤房总计烘烤 7 d, CO_2 体积浓度呈现出先增加后降低的趋势,分别为 2.87%,5.80%,6.68%,7.53%,7.81%,7.46%和 6.36%。生物质烤房 CO_2 体积浓度在 1~3 d 出现快速增加,达到该炕烘烤期内的最大峰值,最大体积浓度为 6.43%,从第 4 d 开始逐渐降低,最低降低至 0.12%。天然气烤房在整个烘烤周期内, CO_2 体积浓度曲线波动最小,基本维持在 0.8%左右,每日 CO_2 体积浓度之间并无显著差异($p < 0.5$)。相较于环境 CO_2 背景值 0.03%,燃煤烤房的 CO_2 浓度为其 96~260 倍,而生物质烤房则为 34~214 倍。由此可见,生物质烤房的 CO_2 排放浓度相较燃煤烤房较低。

总体来看,燃煤烤房的 CO₂ 浓度在整个烘烤期内明显大于生物质烤房和天然气烤房,天然气烤房的 CO₂ 浓度最低。

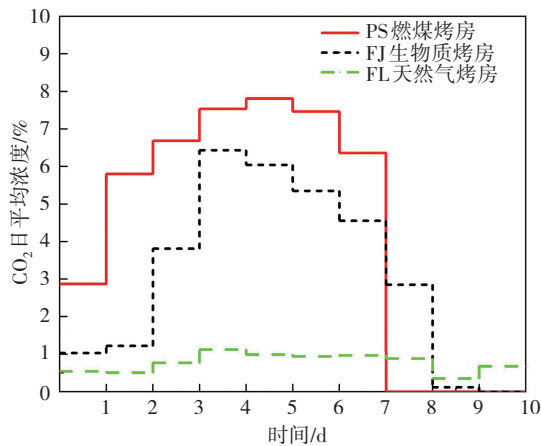


图 1 燃煤、生物质和天然气烤房日平均排放浓度

Fig. 1 Daily average emission concentration of coal-fired, biomass-fired and natural gas-fired curing barns

3.3 不同能源烟草烤房 CO₂ 日排放量比较

图 2 为燃煤、生物质、天然气和电烤房随烘烤工艺进程烟囱 CO₂ 的日排放量情况。电烤房记录了每日的用电量,根据碳排放因子法,计算得到每日的 CO₂ 排放当量。从图 2 可以看出,所有烤房的 CO₂ 日排放量都呈现先增加后降低的趋势,表明烘烤前期需要持续供热,烘烤后期供热量逐步下降。这种趋势与三段六步式的烘烤工艺是一致的。具体来看,燃煤烤房的 CO₂ 日排放量远高于其他三种烤房,在第 5 天达到最大值。第 5 天的燃煤烤房碳排放量为 332.13 kg,而生物质烤房、天然气烤房和电烤房的排放量依次仅为 285.81 kg/d, 98.85 kg/d 和 61.54 kg/d,燃煤烤房 CO₂ 日排放量为其他三种燃料烤房的 1.2~5.4 倍。通过对生物质、天然气和电烤房的比较,发现烘烤中期生物质的碳排放量显著高于天然气和电烤房。在烘烤前期(1~2 d)和末期(7~10 d),生物质烤房与天然气烤房和电烤房的碳排放量差距较小,这表明生物质烤房的碳排放主要集中在烘烤中期(3~6 d)。天然气烤房和电烤房的日排放量差异不大,均在 50 kg/d~100 kg/d 之间,说明二者具有相近的碳排放趋势。此外,在烘烤持续时间方面,电烤房和天然气烤房的最后关火时间均较燃煤烤房和生物质烤房延长 1~2 d。这是由于在关闭燃煤烤房和生物质烤房后,仍有一定余热可供利用,从而实现烟叶的最后烘干。然而,在关闭天然气和电烤房后,由于无外部热量补充,需要在烘烤末期频繁点火,供给适量热量以完成烘烤过程。

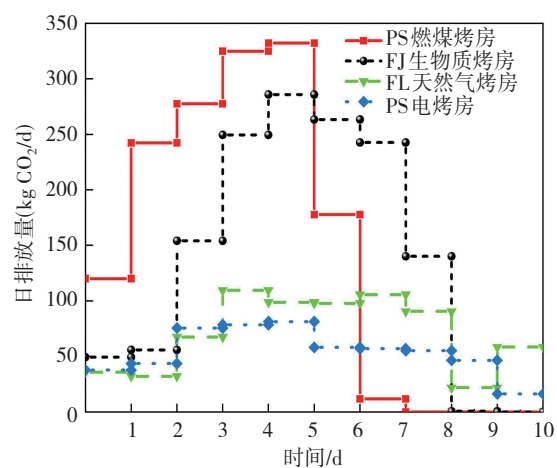
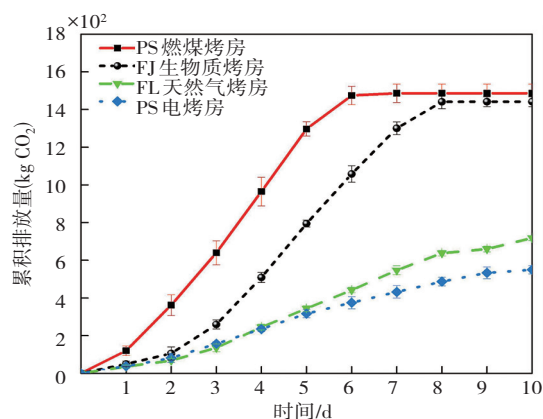


图 2 燃煤、生物质、天然气和电烤房的 CO₂ 日排放量

Fig. 2 CO₂ daily emissions of coal-fired, biomass-fired, natural gas-fired and electric heating barns

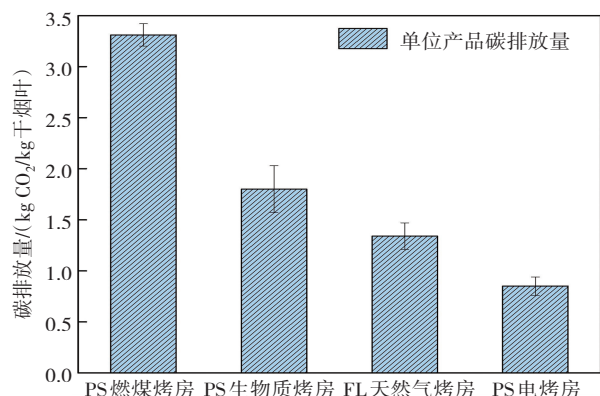
3.4 不同能源烟草烤房 CO₂ 累积排放量比较

为了比较不同燃料烤房在烘烤一炕烟叶周期内的碳排放量,图 3 展示了燃煤、生物质、天然气和电烤房在烘烤过程中逐天累积的 CO₂ 排放量。最后 1 d 的数据代表了整个烘烤周期内各烤房的 CO₂ 总排放量。总体来看,烘烤一炕相同部位的烟叶,4 个烤房的碳排放总量大小顺序为:燃煤烤房>生物质烤房>电烤房>天然气烤房。燃煤烤房的碳排放总量最大,达到 1 486.27 kg,生物质碳排放量为 1 441.06 kg。电烤房和天然气烤房碳排放量为 717.96 kg 和 549.63 kg,低于燃煤烤房和生物质烤房,减排差异较为明显。具体来看,自烘烤启动以来,燃煤烤房的累积排放量呈现出快速上升的趋势,其次是生物质烤房,然后是天然气烤房和电烤房。累积排放曲线的斜率反映了排放速率,曲线越陡,表示排放速率越快。根据燃煤烤房和生物质烤房的累积排放曲线斜率,其 CO₂ 排放速率呈现出先慢后快再慢直至为零的趋势。排放速率最快的阶段出现在 3~6 d 之间,这正是烘烤中期供热需求最大的时期。相较之下,其他两种燃料烤房在烘烤启动 2 d 后的斜率几乎保持恒定,表明天然气烤房和电烤房的 CO₂ 日排放量在这段时间内基本保持不变,呈现出匀速排放的特点,这可能是由于电能和天然气供热容易控制,而传统人工加煤难以准确控制燃料的需求量,热损失严重^[19]。观察烘烤一炕烟叶的 CO₂ 累积排放量,实际上,燃煤烤房与生物质烤房的 CO₂ 排放量差距并不显著。然而,在烘烤过程中,燃煤烤房所使用的鲜烟叶重量为 3 457 kg,而生物质烤房则为 5 178 kg。因此,有必要从单位产品 CO₂ 排放量的角度进行更深入的剖析。

图3 燃煤、生物质、天然气和电烤房 CO₂ 累积排放量Fig.3 Cumulative CO₂ emissions of coal-fired, biomass-fired, natural gas-fired and electric heating barns

3.5 不同能源烟草烤房单位产品 CO₂ 排放量比较

为了准确比较不同烤房类型单位产品的碳排放量,本文团队对每个烤房的干烟叶进行了称重。根据称重结果,燃煤、生物质、天然气烤房和电烤房的干烟叶重量分别为 531 kg、800 kg、534 kg 和 643 kg。图 4 展示了不同烤房类型单位产品碳排放量的情况。从图 4 中可以看出,电烤房的单位产品碳排放量最低,仅为 0.85 ± 0.09 kg/kg,而燃煤烤房的碳排放量最高,为 3.31 ± 0.11 kg/kg。这表明在使用不同的燃料进行烘烤时,每单位产品的碳排放量存在显著差异。从能源替代的角度来看,采用生物质、电能和天然气替代燃煤可以显著降低烤房烘烤环节的碳排放量。具体而言,生物质烤房的单位产品碳排放量为 1.80 ± 0.23 kg/kg,生物质替代燃煤可以减少 45.6% 的碳排放量,天然气替代燃煤可以减少 59.4% 的碳排放量,而电能替代燃煤则可以减排 74.2% 的碳排放量。然而,天然气和电能烤房的普及受到设备成本和地理位置的限制,因此要实现大面积推广需要克服一定的阻力。相比之下,生物质燃料具有来源广泛、价格便宜、运输安全方便等优点。综合考虑上述因素,生物质替代燃煤是一种可行的碳减排方案。

图4 燃煤、生物质、电烤房和天然气单位产品的 CO₂ 排放量Fig.4 CO₂ emissions per unit of product from coal-fired, biomass-fired, electric heating and natural gas-fired barns

3.6 理论排放量与实际排放量差异分析

理论排放量与实际排放量差异分析如图 5 所示,理论碳排放量是通过碳排放因子法计算得到的燃料完全燃烧后产生的 CO₂ 排放总量。假设所有产生的 CO₂ 都通过烟囱排放,则实测的 CO₂ 排放量应接近理论计算值。然而,由于烤房烘烤炉膛密闭效果差,烟气散排可能导致实测值与理论值存在差异。总体来看,燃煤烤房、生物质烤房和天然气烤房都存在热量损失,从大到小依次为:燃煤>生物质>天然气。其中,天然气的热量损失最小。进一步分析发现,在燃煤烤房中,实测的 CO₂ 排放量远低于理论值,仅占理论值的 85.58%,而其他环节的 CO₂ 排放量占到了 15.42%。这进一步验证了燃煤烤房热量损失大的推断。相比之下,生物质烤房的 CO₂ 散排量较低,仅为 7.30%。这可能与生物质采用机械进料和精准控制燃烧速度有关。生物质烤房采用机械传送带进料,其热值利用率和进料控制的精确性均高于燃煤密集烤房。天然气烤房的散排量更小,仅为 4.71%。这可能是由于天然气燃烧控制器已经非常成熟,点火和关火的控制更加精确所致。电烤房不存在烟囱问题,实际碳排放量是通过其消耗的电计算得到。因此,电烤房的理论值等于实际值。综上所述,本研究的结果表明不同类型烤房的燃料进料方式会影响 CO₂ 的散排量,燃煤烤房和生物质烤房需要进一步改进燃料进料方式以降低热量损失,从而间接减少燃料消耗量,达到减少 CO₂ 排放的目的。

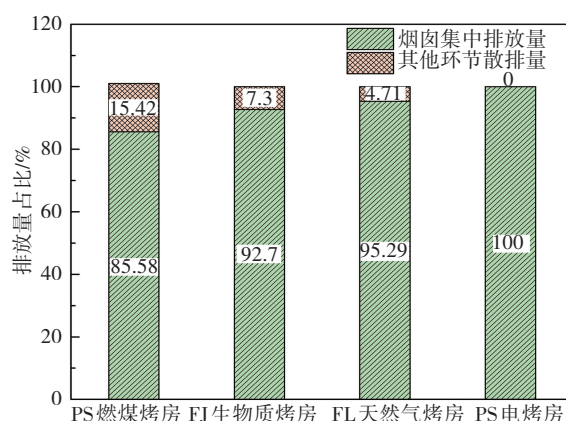


图5 各试点烤房理论碳排放量与实测碳排放量对比

Fig.5 Comparison of theoretical carbon emissions and measured carbon emissions in each bulk curing barn

4 结论

本研究通过对比分析不同供热能源烟草烤房的碳排放情况,发现燃煤烤房的碳排放量最高,而生物质烤

房、天然气烤房和电烤房具有明显的碳减排效果。烘烤一炕中部烟叶,单位产品(干烟叶)的 CO_2 排放因子从大到小依次为:燃煤烤房>生物质烤房>天然气烤房>电烤房,分别为3.31,1.80,1.34和0.85。采用生物质能源替代传统燃煤可减少 CO_2 排放量45.6%。天然气烤房和电烤房虽然碳排放量较低,受限于设备成本和地理位置等因素难以大规模推广。

研究还发现,燃料进料方式对烤房的碳排放量有显著影响。燃煤烤房由于人工进料,热量损失大,实测的 CO_2 排放量远低于理论值,散排量达到15.42%;而生物质烤房的 CO_2 散排量为燃煤的一半,这可能与生物质采用机械进料和精准控制燃烧速度有关;天然气烤房的散排量最小,仅为4.71%,可能是由于天然气燃烧控制器技术已经非常成熟。

参考文献(References):

- [1] 陈振国, 孙光伟, 陈祥, 等. 燃煤型密集烤房污染物排放及脱硫除尘研究[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(4): 28-35.
CHEN Zhen-guo, SUN Guang-wei, CHEN Xiang, et al. Study on pollutant emission and desulphurization and dust removal of coal-burning bulk curing barn[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2021, 27(4): 28-35.
- [2] SONG Z, WEI F, SU X, et al. Application of automatic control furnace for combustion of biomass briquette fuel for tobacco curing[J]. Thermal Science, 2021, 25(4 Part A): 2425-2435.
- [3] HE F, WEI F, MA C, et al. Performance of an intelligent biomass fuel burner as an alternative to coal-fired heating for tobacco curing[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2021, 30(1): 131-140.
- [4] 许跃奇, 杨楠, 王晓强, 等. 不同能源类型烤房对烟叶品质、经济效益及能耗情况的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(9): 49-53.
XU Yue-qi, YANG Nan, WANG Xiao-qiang, et al. Effects of different energy types of curing barn on tobacco leaf quality, economic benefit and energy consumption[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(9): 49-53.
- [5] 王东阳, 李芳, 施可可. 碳交易下考虑产品替代性的供应链减排决策研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(5): 55-63.
WANG Dong-yang, LI Fang, SHI Ke-ke. Influence of supply chain emission reduction strategy considering product substitution under carbon cap-and-trade[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(5): 55-63.
- [6] 戴道明, 王忆都. “双碳”目标下多周期供应链碳减排协调决策研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(3): 1-8.
DAI Dao-ming, WANG Yi-du. Research on coordinated decision-making of carbon emission reduction in multi-cycle supply chain under double carbon goals[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(3): 1-8.
- [7] 陈欢, 牟瑛. “双碳”目标下重庆市碳排放影响因素及其预测研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(2): 7-14.
CHEN Huan, MU Ying. Research on the influencing factors and forecasting of carbon emissions in Chongqing under the “double carbon” target[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(2): 7-14.
- [8] SI F, DU E, ZHANG N, et al. China's urban energy system transition towards carbon neutrality: Challenges and experience of Beijing and Suzhou[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 183: 113468.
- [9] 潘博. “双碳”目标下烟草物流碳排放管理机制研究与探索[J]. 物流技术与应用, 2022, 27(8): 140-144.
PAN Bo. Research and exploration on carbon emission management mechanism of tobacco logistics under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Logistics & Material Handling, 2022, 27(8): 140-144.
- [10] 李志国, 罗会龙, 邹聪明, 等. 闭式热风循环密集烤房热泵烘烤节能性与经济性分析研究[J]. 西南农业学报, 2021, 34(4): 842-846.
LI Zhi-guo, LUO Hui-long, ZOU Cong-ming, et al. Analysis and study on energy-saving and economy of heat pump baking in closed hot air circulating bulk curing barn[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(4): 842-846.
- [11] 杨楠, 顾建国, 马文辉, 等. 不同类型清洁能源烤房对烤后烟叶香气成分的影响[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(8): 119-123.
YANG Nan, GU Jian-guo, MA Wen-hui, et al. Effects of curing barns with different types of clean energies on aroma components of cured tobacco leaves[J]. Guizhou Agricultural

- Sciences, 2018, 46(8): 119–123.
- [12] 王军伟, 郑志云, 赵文军, 等. 清洁能源替代燃煤在密集烤房烘烤中的应用研究进展[J]. 价值工程, 2019, 38(3): 188–190.
- WANG Jun-wei, ZHENG Zhi-yun, ZHAO Wen-jun, et al. Research progress on the application of clean energy instead of coal in the bulk curing barn for flue-cured tobacco[J]. Value Engineering, 2019, 38(3): 188–190.
- [13] 王攀, 朱云, 郎冲冲, 等. 新能源热泵烤房与燃煤烤房、生物质烤房烘烤效果对比研究[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(17): 240–244.
- WANG Pan, ZHU Yun, LANG Chong-chong, et al. Comparative study on baking effects of new energy heat pump barn, coal-fired barn and biomass barn[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(17): 240–244.
- [14] 孔永平, 陈荣霞, 张环平. 醇基燃料密集烤房烟叶烘烤研究[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(8): 163–165, 201.
- KONG Yong-ping, CHEN Rong-xia, ZHANG Huan-ping. Study on curing of tobacco in alcohol-based fuel intensive curing barn[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(8): 163–165, 201.
- [15] 周桂林, 艾鑫. CO₂ 加氢逆水煤气变换(RWGS)催化剂研究进展[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 8–14.
- ZHOU Gui-lin, AI Xin. Research progress of catalysts for CO₂ hydrogenation reverse water gas shift (RWGS) reaction[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(1): 8–14.
- [16] 赵新帅, 罗会龙, 祁志敏. 生物质颗粒燃料密集烤房与燃煤型密集烤房性能对比研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(2): 69–74.
- ZHAO Xin-shuai, LUO Hui-long, QI Zhi-min. A comparative study on performance of biomass pellet fuel dense barn and coal-fired dense barn[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 44(2): 69–74.
- [17] 苟文涛, 王晓剑, 钟俊周, 等. 生物质燃料替代煤炭在烟叶烘烤中的应用[J]. 华北农学报, 2017, 32(S1): 239–244.
- GOU Wen-tao, WANG Xiao-jian, ZHONG Jun-zhou, et al. The application of biomass fuel substituting coal in tobacco curing[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(S1): 239–244.
- [18] 杨飞, 张霞, 刘芮, 等. 生物质颗粒燃料燃烧机的烟草烘烤试验研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(5): 912–919.
- YANG Fei, ZHANG Xia, LIU Rui, et al. Experimental study on tobacco flue-cured by biomass pellet fuel burner[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2017, 32(5): 912–919.
- [19] 罗贞宝, 李德仑, 黄宁, 等. 新型内置一体式生物质密集烤房烘烤效果研究[J]. 中国烟草科学, 2021, 42(5): 75–80.
- LUO Zhen-bao, LI De-lun, HUANG Ning, et al. Study on curing effects of new built-in type integrated biomass curing barn[J]. Chinese Tobacco Science, 2021, 42(5): 75–80.
- [20] 肖志新, 刘芮, 彭坚强, 等. 生物质颗粒燃料密集烤房节能减排效果研究[J]. 现代农业科技, 2016(24): 177–179, 187.
- XIAO Zhi-xin, LIU Rui, PENG Jian-qiang, et al. Energy savings and emission reduction effect of biomass pellet fuel curing barn[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(24): 177–179, 187.
- [21] 赵浩宾, 胡永涛, 李芳芳, 等. 不同供热能源烤烟经济效益对比分析[J]. 农学学报, 2021, 11(11): 61–65.
- ZHAO Hao-bin, HU Yong-tao, LI Fang-fang, et al. Economic benefits of different heating sources for tobacco curing: A comparative analysis[J]. Journal of Agriculture, 2021, 11(11): 61–65.
- [22] DL/T 2376—2021, 火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- DL/T 2376—2021, Technical specification for continuous monitoring of carbon dioxide emissions from flue gas in thermal power plants[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.
- [23] 徐沁颖. 基于排放因子法的蒸汽锅炉碳排放核算[J]. 工业锅炉, 2023(4): 12–15, 35.
- XU Qin-ying. Discussion on carbon accounting of steam boilers based on emission factor method[J]. Industrial Boilers, 2023(4): 12–15, 35.

责任编辑:陈 芳