

竹废弃物热解碳足迹分析

郝彦璋, 杨长明

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 文章针对竹废弃物热解及热解产物资源化利用的场景, 基于生命周期评价和敏感性分析方法, 建立了详细的生命周期碳排放清单和核算方法, 确定了热解系统中碳排放和碳减排的主要贡献源, 分析了热解系统碳减排能力对多个参数的敏感性程度。结果表明: 1 t 竹废弃物热解的碳排放为-838.684 kg, 我国竹废弃物热解的年减排量为 3 830 万 t, 年发电量为 2.1×10^{10} kW·h; 整个系统中碳排放的主要贡献源为生物油和合成气的燃烧发电(34.8%), 碳减排最主要的贡献源为竹炭还田(34.0%); 热解系统的碳减排能力对竹废弃物占比、年采伐量和热解产物产量的敏感性程度较高, 敏感性系数分别为 1.297, 1.000 和 0.702; 竹炭还田带来的土壤碳汇效应具有巨大的减排潜力, 综合产率为 8.9%的竹炭可带来 1 300 万 t/a 的碳减排量。文章认为竹废弃物热解具有较强的碳减排能力, 可以为合理利用竹废弃物生产可再生能源、积极应对气候变化, 实现“双碳”目标提供一条新途径。

关键词: 竹废弃物; 热解; 碳减排; 生命周期评价; 敏感性分析

中图分类号: TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)05-0569-09

0 引言

农林废弃物热解是一种有效的生物质能源资源化利用方式, 是实现碳减排的有效手段^[1]。使用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法可以全面评估生物质能源生产过程中的碳足迹, 并量化分析每个阶段中的碳排放(碳排放以 CO₂ 当量计量, 单位为 kg)。

我国是世界上竹资源最丰富且竹材产量最大的国家之一, 竹林面积约为 641.16 万 hm², 竹林生物量约为 4.22 亿 t, 2020 年竹材产量高达 32.4 亿根, 约合 0.75 亿 t, 其中毛竹资源最为丰富, 约占总竹资源量的 80.52%^[2]。为了利用丰富的竹资源推动节能减排和减少环境污染, 中国和国际竹藤中心在 2022 年 11 月举办的第二届世界竹藤大会上共同发起了“以竹代塑”的倡议。同时, 据中国竹产业协会预测, 到 2035 年, 中国的竹产业规模将达到 1 万亿元。这不仅意味着竹资源在我国将会得到更广泛的使用和推广, 而且还将推动竹林培育、竹材砍伐加工以及竹制品加工销售等一系列相关产业的发展。然而, 随着竹产业的发展, 竹材砍伐加工废弃物的处理问题也随之而来。据相关数据显示, 我国的竹材平均利用率仅为 38%^[3], 产生

的废弃物大部分将会被直接焚烧, 导致严重的环境污染问题。因此, 在“双碳”目标和能源结构调整的背景下^[4], 有必要对竹废弃物资源化利用进行碳足迹分析, 以评价其对环境的影响。

碳足迹分析和核算方法主要有投入产出法(Input-Output, I-O)、生命周期评价法、《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》(简称为 IPCC-2006)核算方法、碳足迹核算器等。LCA 是一种自上而下的评价方法, 可以对产品、过程或服务的整个生命周期内的资源投入和产出的环境影响或潜在环境影响进行评价^[5]。相较于其他方法, LCA 更适用于微观层面的碳足迹分析, 因此, LCA 被广泛应用于产品或能源生产过程中的碳排放核算。

目前, 关于竹产业碳足迹的 LCA 研究主要集中在以下两个方面: 竹林的固碳能力和碳汇功能分析^[6]; 竹制品(墙、地板、自行车、牙刷等)的生命周期碳足迹^[7]。这些研究表明, 竹林有远胜于其他森林的固碳能力, 而且各类竹制品在降低全球变暖潜能值(Global Warming Potential, GWP)方面表现出了明显的优势。近年来, 关于竹废弃物热解的相关研究主要集中在热解过程的热重动力学分析^[8]、热解产物特性研究^[9]等方面。关于竹废弃物

收稿日期: 2023-05-08。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2020YPC1908703)。

通信作者: 杨长明(1973-), 男, 博士, 研究员, 主要从事农林废弃物高效资源化与土地利用研究。E-mail: cmyang@tongji.edu.cn

通过热解实现资源化处理的碳足迹分析, 还鲜有报道。

本文基于 LCA 研究方法, 建立了详细的碳排放清单和核算方法。对竹废弃物热解系统中每个环节的资源投入的碳排放强度及产物资源化利用的碳减排能力进行了分析, 并确定了主要的贡献源。最后, 使用敏感性分析方法, 分析了多个参数对竹废弃物热解系统的碳减排能力的影响程度。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文涉及 3 种类型的数据: 引用型、调研型和假设型。引用型数据包括竹材产量和各个阶段的竹材利用率等, 来源于相关文献、统计年鉴和碳排放数据库。调研型数据包括各类竹资源价格和电能的碳排放因子等, 来源于中国市场调研结果和企业官方公布的财务数据。假设型数据包括竹炭运输至田间的距离和竹炭运输过程中的损耗率等, 其取值范围基于实际情况划定。

1.2 分析方法

LCA 是一种适合分析、核算和评价竹废弃物热解过程中碳排放的方法。本文参考 LCA 的传统步骤^[9], 将竹废弃物热解过程中的碳排放核算分为 4 个步骤: ①确定功能单元与系统边界; ②建立生命周期数据清单; ③根据相关指标核算碳排放; ④核算结果分析。

敏感性分析(Sensitivity Analysis)是一种定量描述模型输入变量对输出变量重要性程度的方法。在竹废弃物热解生命周期评价模型中, 不同参数的变化方向和变化范围对最终核算结果的影响程度不同, 即废弃物收购价格、热解厂寿命和热解产物产率等多个参数的不同取值会导致系统的碳减排量有所不同。因此, 本文选取多个生命周期评价模型中的参数进行局部敏感性分析, 量化其对热解系统碳减排能力的影响。

2 基于 LCA 的竹废弃物热解系统碳排放核算

2.1 功能单元与分配原则

本文的功能单元为 1 t 竹废弃物。当核算竹废弃物在热解系统中各个阶段的物质、能源投入和碳排放时, 要将碳排放总量分配到各个产物中。对于多产物的系统, 选择适当的分配方法和分配权重能更好地反映其对碳排放的影响。本文采用经济价值分配法和能量值分配法进行分配, 在竹

子种植采伐和运输阶段, 使用经济价值分配法, 将竹废弃物的权重按原材料售卖价格进行分配; 在热解阶段, 采用物理分配法, 将三态热解产物的权重按所含的能量值进行分配^[11]。

2.2 系统边界

评估模型的系统边界如图 1 所示。模型共分为 5 个阶段: 种植和采伐阶段、运输阶段、热解阶段、燃烧发电阶段、还田阶段。

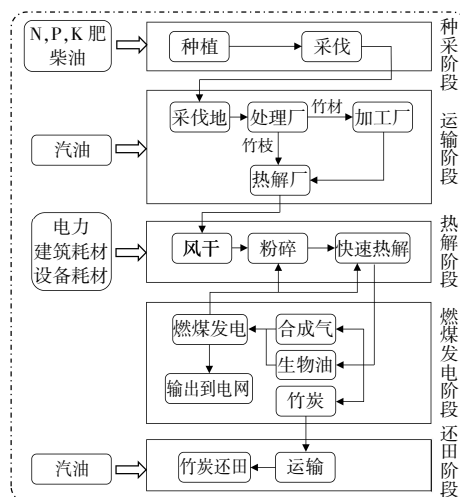


图 1 系统边界

Fig.1 System boundary

考虑到各个阶段的复杂性, 对系统边界做如下假设和简化: ①不考虑竹废弃物热解系统生命周期中人为活动的碳排放; ②不考虑各个阶段中竹废弃物包装和储存的碳排放; ③不考虑热解工厂日常运营与热解设备维修保养的碳排放; ④不考虑由于竹废弃物收集而导致竹林生产模式的改变; ⑤假设热解产物燃烧发电生产的电能可以直接输送到电网。

2.3 核算方法与参数清单

在核算的过程中, 碳排放取值为正表示向大气中排放温室气体(Greenhouse Gas, GHG), 碳排放取值为负表示减少温室气体排放, 即碳减排。

2.3.1 种植采伐阶段

由于不同竹林的资源投入有很大差异, 而且竹林种植和采伐的各项数据缺乏代表性、透明性和统一性, 经常被混在林业数据中进行计算。为便于核算, 本研究选取人力投入以抚育和采伐为主的人工毛竹林, 其产出以竹材为主。只考虑化肥施用量与采伐工具的柴油消耗, 且竹林平均生长周期在 3 a 及以上。此阶段涉及碳排放的项目有氮

肥、氮肥引起的 N₂O 排放、磷肥、钾肥、采伐工具消耗的柴油,涉及碳减排的项目有竹林固碳。碳排放核算公式为

$$GHG_{p-c} = -\frac{GHG_{bam} \gamma_3}{D} \cdot M_0 \lambda \alpha + \sum M_0 \alpha PC_i EF_i^{p-c} \quad (1)$$

式中:GHG_{p-c} 为种植采伐阶段的碳排放,kg;GHG_{bam} 为单位面积毛竹林的年固碳量,kg/hm²;γ₃ 为所采伐竹林的平均生长周期,a;D 为单位面积毛竹林的生物量,t/hm²;M₀ 为原竹生物量,t;λ 为毛竹林碳转移率,%;α 为在该阶段的分配原则下竹废弃物的权重,%;PC_i 为第 i 种投入资源的单位质量投入量,kg/t;EF_i^{p-c} 为第 i 种投入资源的碳排放因子。

2.3.2 运输阶段

尽管热解技术在我国已经逐渐成熟,使用热解技术实现生物质的资源化利用也能够获得显著的环境效益^[2],但我国热解工厂的规模都较大,数量较少,此外,中国南方各省份的毛竹林分布并不均衡。因此,当使用运输和收集模型来模拟竹材和竹废弃物的运输距离时,或者是将运输距离假设为使用频率最高的 100 km 时,通常会低估运输过程中资源和能源的投入。为了解决这个问题,Gan J^[7]通过协调实际调研数据,分析了竹制品生产过程中各个阶段的实际运输距离。在此基础上,本研究基于竹制品的生产过程,将运输分为 3 个阶段,第一阶段为竹材采伐地至竹材处理厂的距离,包含竹枝和竹材的运输;在第二阶段中,通过风干处理,竹枝和竹材的含水率降至 20% 左右,竹枝被直接送到热解工厂,竹材被送到加工厂进行处理;第三阶段为加工工厂至热解工厂的距离,包含竹屑、竹片和竹节等加工废弃物的运输。在从竹材砍伐地至热解工厂的整个运输过程中,卡车运输的连续性较强,假设卡车均为满载单程运输,此阶段涉及碳排放的项目有卡车消耗的汽油,碳排放核算公式为

$$GHG_{tra} = \sum \frac{M_0 \alpha_i}{m_{truck}} L_i m_{gasoline} \cdot EF_{gasoline} (1 - \theta_i) \quad (2)$$

式中:GHG_{tra} 为运输阶段的碳排放,kg;α_i 为在该阶段分配原则下第 i 个运输阶段目标竹资源的权重,%;m_{truck} 为卡车载重量,t;L_i 为第 i 个运输阶段的运输距离,km;m_{gasoline} 为卡车的单位里程耗油

量,kg/km;EF_{gasoline} 为汽油的碳排放因子;θ_i 为第 i 个运输阶段竹废弃物的失水率,%。

2.3.3 热解阶段

在热解过程中,为了使热解反应更充分地进行和便于颗粒状竹炭还田,粉碎后的竹废弃物将不进行压缩或其他处理,会被直接置于热解工厂的移动床进行快速热解,最终产生合成气、生物油和竹炭。由于不同的热解工艺和热解温度会对 3 种产物的产率和热值等因素产生影响^[13]。本研究选用移动床热解工艺,热解温度为 650 °C,产品为合成气和竹炭^[14]。此阶段涉及碳排放的项目有工厂设备材料、竹废弃物粉碎和热解消耗的电能。碳排放核算公式^[12]为

$$GHG_{pyr} = \left(\sum M_0 \beta E_{pyr} + \sum M_i H_i E_{pyr} \right) EF_e + \frac{GHG_{bml}}{Y_p} M_0 \quad (3)$$

式中:GHG_{pyr} 为热解阶段的碳排放,kg;β 为除去水和杂质后竹废弃物的比重,%;E_{pyr} 为粉碎单位质量竹废弃物的耗电量,kW·h/t;M_i 为第 i 种热解产物的产量,t;H_i 为第 i 种产物的热值,MJ/t;E_{pyr} 为热解单位质量竹废弃物的耗电量,kW·h/t;EF_e 为电能的碳排放因子;GHG_{bml} 为热解工厂建设的碳排放量,kg;Y 为热解工厂的寿命,a;p 为热解工厂的生物质年处理量,t/a。

2.3.4 燃烧发电阶段

合成气主要成分为氢气、甲烷、一氧化碳、二氧化碳^[15],具有较高的热值,其直接燃烧可以用来发电。生物油的组成成分非常复杂,主要包括酸类、醛类、环戊烯和芳香族化合物等,经过油水分离、静置、滤膜和减压蒸馏等工艺,可得到价值较高的竹醋液,竹醋液在农业和环境保护等领域都有潜在的商业价值。然而,由于竹醋液产量较低,且产业和工业体系不成熟,其价值未能得到有效利用。本研究基于生物油的热值,使用直接燃烧发电的方法实现其碳减排价值。此阶段涉及碳排放的项目有合成气和生物油的燃烧,涉及碳减排的项目有燃烧发电。碳排放核算公式为

$$GHG_{com} = -\sum M_i H_i \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 EF_e + \sum M_i EF_i^{com} \quad (4)$$

式中:GHG_{com} 为燃烧发电阶段的碳排放,kg;γ₁ 为燃烧效率,%;γ₂ 为发电效率,%;γ₃ 为热能和电能的转化系数,γ₃=3.6;EF_i^{com} 为第 i 种产物燃烧的碳

排放因子。

2.3.5 还田阶段

毛竹林多分布于我国南方各省，而南方的粮食作物以水稻为主。因此，竹炭将由热解厂直接运输到 100 km 范围内的水稻田，与肥料混合后播撒。竹炭最直观和主要的减排能力来源于碳封存，此外，使农作物增产^[16-18]和减少土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 矿化^[18]也可带来较为可观的减排量。竹炭中也含有微量的 N, P, K 元素，还田后将在一定程度上替代部分化肥。然而，目前竹炭中微量元素对作物的影响尚未全部明确，也缺乏量化分析的相关文献，故本文不涉及这种影响。此阶段涉及碳排放的项目有竹炭的运输、竹炭播撒的能耗，涉及到碳减排的项目有碳封存、

水稻增产、土壤表层 SOC 矿化减少。碳排放核算公式为

$$GHG_{ret} = - \sum M_{biochar} F_i EF_i^{ret} + \frac{M_{biochar}}{m_{truck}} L_{100} m_{gasoline} EF_{gasoline} (1 - \theta_{ret}) \quad (5)$$

式中： GHG_{ret} 为还田阶段的碳排放，kg； $M_{biochar}$ 为竹炭的还田量，t； F_i 为竹炭还田对第 i 个碳减排项目影响的量化值，kg； EF_i^{ret} 为第 i 个碳减排项目的碳排放因子； L_{100} 为竹炭运输距离，km； θ_{ret} 为竹炭运输前装卸搬运过程中的损耗率，%。

2.3.6 相关参数假设

根据各个阶段中涉及到的碳排放项目，建立如表 1 所示的竹废弃物热解参数清单。

表 1 竹废弃物热解参数清单

Table 1 Inventory of parameters for bamboo waste pyrolysis

| 参数 | 数值 | 来源 |
|----------------------------------|-----------------------|------------|
| 竹材采伐量/万根 | 324 265 | 统计年鉴 |
| 毛竹林平均生物量/t·hm ⁻² | 70.53 | 文献[2] |
| 毛竹林年碳减排量/t·hm ⁻² | 6.71 | 文献[3] |
| 竹材/枝叶生物量占比/% | 73.58/15.61/10.81 | 文献[3] |
| 竹材/枝/加工废弃物价格/元·t ⁻¹ | 800/140/200 | 市场价格 |
| N/P/K 肥施用量/kg·t ⁻¹ | 3.06/1.2/1.41 | 文献[7] |
| N/P/K 肥碳排放因子/kg·kg ⁻¹ | 5.7453/0.587/0.811 | 文献[3] |
| 采伐阶段柴油消耗量/L·t ⁻¹ | 2.35 | 文献[7] |
| 柴油碳排放因子/L·kg ⁻¹ | 3.1591 | IPCC2006 |
| 第一/二/三阶段运输距离/km | 80.51/199.58/413.02 | 文献[7] |
| 卡车载重/t | 10 | 假设 |
| 卡车油耗/kg·km ⁻¹ | 0.226 | 文献[19] |
| 92 号汽油碳排放因子/L·kg ⁻¹ | 2.7 | IPCC2006 |
| 竹材/枝含水率/% | 50.3/40.7 | 文献[20] |
| 热解前物质含水率/% | 5.035 | 文献[21] |
| 竹炭/生物油/合成气产率/% | 19.07/45/35.93 | 文献[14] |
| 不参与热解反应的物质含量/% | 10.51 | 文献[15] |
| 热解耗电量/kW·h·t ⁻¹ | 0.017 | 文献[11] |
| 竹炭/生物油/合成气热值/MJ·kg ⁻¹ | 28/22.1/9.28 | 文献[15] |
| 电能碳排放因子/kW·h·kg ⁻¹ | 0.581 | 官方数据 |
| 粉碎耗电量/(kW·h)·t ⁻¹ | 71.2 | 文献[7] |
| 工厂设备材料/kg | 4.792×10 ⁶ | 文献[22, 23] |
| 热解厂年处理量/t·a ⁻¹ | 2 000 | 文献[22] |
| 燃烧/发电效率/% | 85/35 | 文献[20, 24] |
| 生物油、合成气碳排放因子/kg·kg ⁻¹ | 0.44/0.19 | 文献[24] |
| 还田距离/km | 100 | 假设 |
| 竹炭播撒耗能的碳排放/kg·t ⁻¹ | 45.32 | 文献[1] |
| 运输损失/% | 2 | 假设 |
| 水稻田施碳量/t·hm ⁻² | 20 | 文献[15] |
| 竹炭中固定碳含量/% | 68.51 | 文献[25] |

续表 1

| 参数 | 数值 | 来源 |
|--------------------|----------------|-----------|
| 还田引起水稻增产率/% | 17.17(10~26.5) | 文献[16-18] |
| 还田引起土壤 SOC 矿化减少率/% | 7.5(5~10) | 文献[18] |

2.4 核算结果

1 t 竹废弃物的生命周期清单如表 2 所示。

表 2 1 t 竹废弃物热解碳足迹生命周期清单

Table 2 Life cycle inventory of carbon footprint for 1 t bamboo waste pyrolysis

| 阶段 | 输入 | | 碳排放 输出/kg |
|--------|------------|---------|--------------|
| | 项目 | 数值 | |
| 种植采伐阶段 | 氮肥/kg | 1.486 | 10.619 |
| | 磷肥/kg | 0.583 | 0.342 |
| | 钾肥/kg | 0.685 | 0.555 |
| | 柴油/kg | 0.959 | 4.946 |
| | 竹林固碳 | - | -285.411 |
| 运输阶段 | 第一阶段运输/km | 3.910 | 2.386 |
| | 第二阶段运输/km | 14.775 | 9.016 |
| | 第三阶段运输/km | 23.101 | 14.096 |
| 热解阶段 | 粉碎耗电量/kW·h | 37.124 | 21.569 |
| | 热解耗电量/kW·h | 138.052 | 80.208 |
| | 工厂设备材料 | - | 62.473 |
| 燃烧发电阶段 | 油气燃烧/MJ | 4805 | 112.568 |
| | 油气发电 | - | -268.811 |
| 还田阶段 | 竹炭运输/km | 0.009 | 0.543 |
| | 竹炭播撒能耗 | - | 4.033 |
| | 实际还田竹炭/t | 0.089 | -284.462 |

竹废弃物热解系统在各个阶段的碳排放量和碳减排量如图 2 所示。在本文所设想情景下,1 t 竹废弃物的总碳减排量为 838.684 kg, 净碳减排量为 515.33 kg。

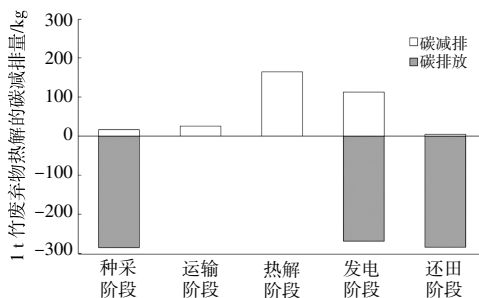


图 2 竹废弃物热解生命周期碳足迹

Fig.2 Life cycle carbon footprint of bamboo waste pyrolysis

2021 年竹废弃物热解系统的总碳排放量(碳排放输出值为正)、总碳减排量(碳排放输出值为负)、净碳减排量和总发电量的核算结果如表 3 所示。由表 3 可知,竹废弃物热解的总碳减排量约为 3 830 万 t,总碳排放量约为 1 465 万 t,年发电量

表 3 竹废弃物热解系统的总碳排放量、总碳减排量、净碳减排量和总发电量

Table 3 Total carbon emissions, total carbon reduction, net carbon emissions and total electricity generation of bamboo waste pyrolysis system

| 参数 | 数值 |
|-----------|------------------|
| 总碳排放量/kg | 14 652 849 314.2 |
| 总碳减排量/kg | 38 301 142 316.5 |
| 净碳减排量/kg | 23 648 293 002.3 |
| 总发电量/kW·h | 21 393 889 473.9 |

约为 2.1×10^{10} kW·h。

结合表 2 中的数据,计算每个阶段中碳封存产生碳减排的占比以及各种资源投入产生碳排放的占比,结果如图 3,4 所示。

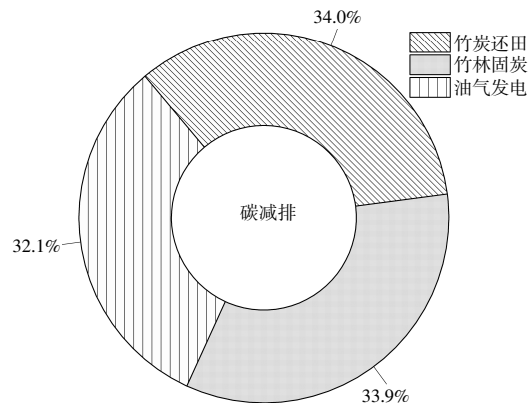


图 3 竹废弃物热解各个阶段的碳减排量占比

Fig.3 Percentage of carbon emission reduction in each stage of bamboo waste pyrolysis

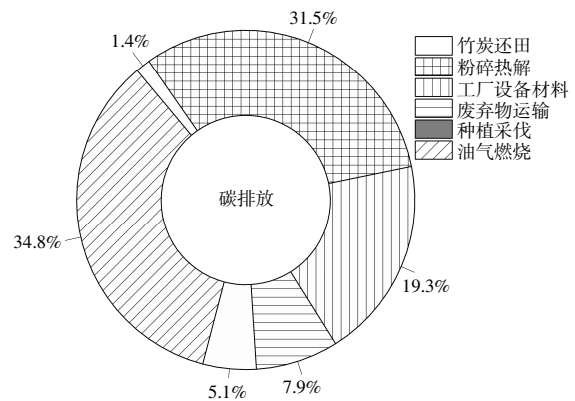


图 4 竹废弃物热解各个阶段的碳排放量占比

Fig.4 Percentage of carbon emission in each stage of bamboo waste pyrolysis

由图 3 可以看出,竹炭还田、竹林固碳和油气发电产生的碳减排分别占总碳减排量的 34.0%, 33.9%, 32.1%。由图 4 可以看出,油气燃烧、粉碎热解(粉碎耗电量和热解耗电量)、工厂设备材料、废弃物运输(第一、二、三阶段运输总和)、种植采伐(氮、磷、钾肥投入和柴油投入)、竹炭还田(竹炭运输和竹炭播撒能耗)产生的碳排放分别占总碳排放量的 34.8%, 31.5%, 19.3%, 7.9%, 5.1%, 1.4%。

3 敏感性分析

3.1 敏感性系数

本文选取基于非参数统计方法的局部敏感性分析,用来分析单一参数对竹废弃物热解系统碳减排能力的影响。在进行敏感性分析时,须要先对数据建立多元回归模型,然后选择进行敏感性分析的参数,再根据前文的 LCA 模型核算热解系统的碳减排量,最后算出每个参数的敏感性系数。敏感性系数的计算式^[26]为

$$SRC(x_i) = \frac{b_i \sigma_i}{\sigma_y} \quad (6)$$

式中: $SRC(x_i)$ 为第 i 个参数的敏感性系数; b_i 为 y 关于 x_i 的回归系数; σ_i 为 x_i 的标准方差; σ_y 为 y 的标准方差。

在本文中,由于自变量 x_i (参数)与 y (碳排放核算结果)之间有确定的关系[式(1)~(5)],参数的取值有基准值(表 1),且根据参数计算得到的

每个阶段的碳排放也有基准值(表 2)。为了直观体现热解系统碳减排量对参数的敏感性程度,将计算过程简化为

$$\varepsilon = \frac{\Delta I / I}{\Delta G / G} b_i \quad (7)$$

式中: ε 为敏感性系数; ΔI 为参数的变化量; I 为参数的基准值; ΔG 为热解系统碳减排量的变化量; G 为热解系统碳减排量的基准值,即本文中 LCA 的核算结果。

3.2 参数选择

依据 LCA 模型的实际运行结果,选定的参数为竹制品价格、竹材价格、竹材废弃物价格、单位面积毛竹林的固碳量、毛竹年采伐量、运输距离、卡车载重、粉碎单位质量竹废弃物的耗电量、热解单位质量竹废弃物的耗电量、竹炭热值、生物油热值、合成气热值、热解厂年热解量、热解厂寿命、工厂设备材料碳排放量、热解产物产量、燃烧效率、发电效率、还田运输距离、竹炭中固定碳含量、单位面积稻田的施碳量、肥料施用减少率、水稻增产率、减少 SOC 矿化率。其基准值参考表 1,变化量设置为-25%。

3.3 计算结果

参数变化而导致热解系统碳减排量发生的改变如图 5 所示 (ΔG 为正表示热解系统的总碳减排量减少, ΔG 为负表示热解系统的总碳减排量

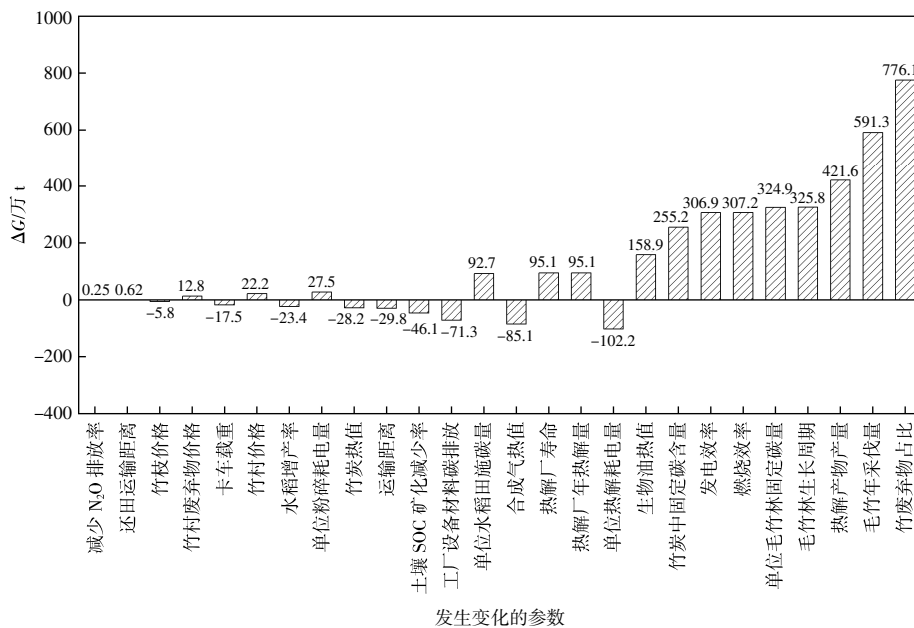


图 5 热解系统碳减排量变化量

Fig.5 Variation of carbon emission reduction in pyrolysis system

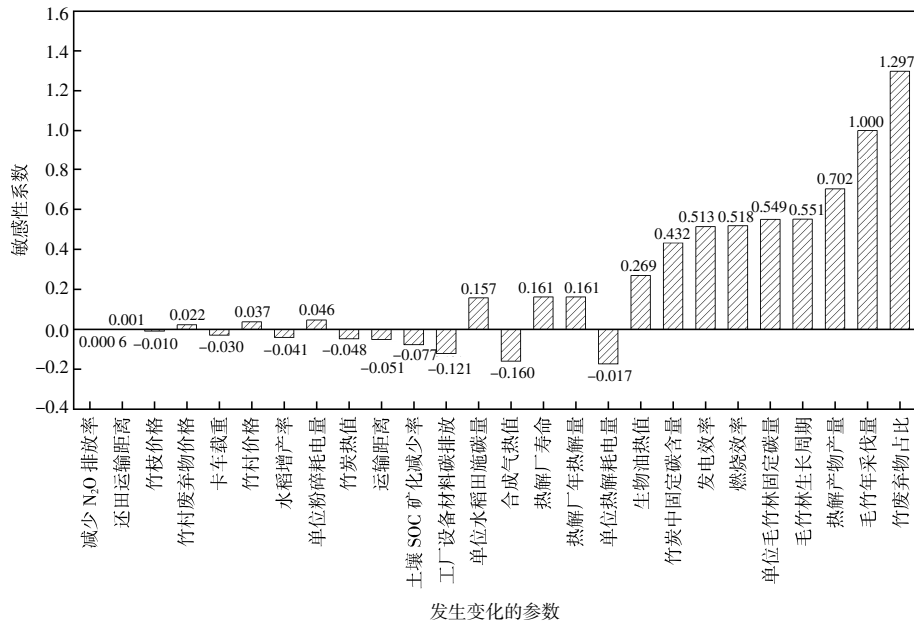


图6 参数的敏感性系数

Fig.6 Sensitivity coefficient of parameters

增加)。参数的敏感性系数如图6所示(ϵ 为正表示 ΔI 与 ΔG 的变化方向相同, ϵ 为负表示 ΔI 与 ΔG 的变化方向相反)。 ϵ 的绝对值越大,说明热解系统的碳减排能力对参数的变化越敏感,即参数对热解系统碳减排量的影响能力越大。从图6可以看出,热解系统碳减排量对竹材废弃物占比最为敏感,其次是热解产物产量、毛竹林生长周期、单位毛竹林固碳量、发电效率和燃烧效率,对由于竹炭还田而减少 N₂O 排放率最不敏感。

4 结果与讨论

1 t 竹废弃物热解的全生命周期碳排放量为 -838.684 kg,即每吨竹废弃物约可实现碳减排 0.84 t,与农业废弃物(水稻、小麦和玉米秸秆等)热解的生命周期核算结果 (0.7~1.3)^[27,28] 基本一致。

在碳排放方面,与农产品在种植和收获阶段的碳排放占比(14.1%)^[4]相比,竹子在这一阶段只占到了总碳排放的 5.1%。这是由于竹子有生长速度快、一次造林便可永续利用等优势,且肥料、杀虫剂等资源投入较小,无需投入农用地膜、农用大棚等资源。

在热解阶段,建设热解工厂和使用热解设备的碳排放来源组成比较复杂,且不同的热解工艺使用的不同设备、不同热解厂的规模等因素,会造成不同程度的碳排放,导致这一阶段的碳排放具

有很大的不确定性。很多研究将这一阶段的碳排放划分在系统边界之外,而在本文中,这一过程选取了具有一定参考意义的碳排放值。通过核算结果可以看出,热解工厂建设和热解设备的碳排放对总碳排放贡献较大(19.3%)。同时热解厂的相关参数(热解厂寿命、热解厂年热解量)对热解系统碳减排能力的影响较大(敏感性系数分别为 0.161,0.161),忽略这一环节将会低估整个热解系统的碳排放。

在碳减排方面,尽管本文在热解阶段和竹炭还田阶段选择了相对保守的参数,每吨竹废弃物只可生产 0.089 t 的竹炭,但是竹炭仍表现出了可观的减排能力,竹炭还田的碳减排量占到了总碳减排量的 34.0%,这与文献[27]的结论基本一致。在本文设计的情境下,竹炭表现出了巨大的碳减排潜力,一方面,在移动床和 650 °C 的热解温度下,竹炭产率较低,仅为 19.07%,通过优化热解工艺和选择适合的热解温度,将能显著提高竹废弃物热解的碳减排能力;另一方面,当下的竹炭生产和应用技术还处于起步阶段,竹炭还田对于土壤带来的影响尚未全部明确,这也是本文中竹炭还田引起的水稻增产率和减少 N₂O 排放率对热解系统碳减排能力影响较小(敏感性系数分别为 0.041,0.0006)的原因。

此外,竹林固碳对碳减排的贡献(33.9%)也

非常可观,但是在许多关于农林废弃物热解的研究中,并未将生物质生长过程中从大气中吸收的碳的总量划分到生命周期碳足迹当中,因为吸收的碳会在燃烧阶段重新释放出来。然而,不同于其他生物质,竹林生长处于动态平衡中,可在采伐后实现自我更新,持续吸收固定碳、积累碳储存,持续提升竹林碳汇作用^[3]。敏感性分析的结果表明,竹废弃物热解系统的碳减排能力对竹废弃物占比和毛竹年采伐量的敏感性程度较大(敏感性系数分别为1.297,1.000)。因此,推动竹产业发展,拓展竹产品的使用场景,将能大幅提高竹废弃物热解系统的碳减排能力。

5 结论

①1 t 竹废弃物热解的碳排放量为-838.684 kg。在本文设计的情景下,我国2021年全年竹废弃物热解系统的总减排量将达到3 830万t,全年发电量为 2.1×10^{10} kW·h。这一新的竹废弃物资源化利用的途径,可以在减少碳排放的同时生产可再生资源。

②竹废弃物热解系统碳排放最主要的贡献来自燃烧发电阶段(34.8%),竹废弃物热解系统碳减排最主要的贡献来自竹炭还田阶段(34.0%)。其中热解系统的碳减排量对竹废弃物占比、毛竹年采伐量的敏感性处于较高水平。增加采伐量、提高竹废弃物的回收率和利用率是提升竹废弃物热解系统碳减排能力的有效途径。

③竹炭还田对竹废弃物热解系统碳减排能力有较大的影响,仅8.9%的竹炭产率可带来1 300万t的减排量,占总减排量的33.9%。其中热解系统碳减排量对竹炭产量、固定碳含量较为敏感。选取适合的热解温度提高竹炭的产率、适合的热解工艺提升竹炭品质,将会对竹废弃物热解系统的碳减排能力有较大影响。

尽管本研究对竹废弃物热解系统的生命周期碳足迹分析有一定的不确定性和局限性,但在一定程度上可以反映出其在碳减排方面有巨大的潜力。在未来,提高竹产业各个阶段数据的透明度、一致性和全面性,是竹产业LCA研究的重要基础。

参考文献:

[1] Yang Q, Zhou H, Bartocci P, et al. Prospective

contributions of biomass pyrolysis to China's 2050 carbon reduction and renewable energy goals[J].*Nature Communications*, 2021, 12(1): 1698.

- [2] 费世民.竹产品全生命周期碳足迹研究进展及其测定框架[J].*四川林业科技*, 2021, 42(6): 1-10.
- [3] 王红彦,左旭,王道龙,等.中国林木剩余物数量估算[J].*中南林业科技大学学报*, 2017, 37(2): 29-38, 43.
- [4] 李风雷,尹璐,赵吉,等.以能源转型推进“碳中和”的北欧经验借鉴与中国方案初探[J].*可再生能源*, 2021, 39(10): 1308-1313.
- [5] 党乐,佟敏,崔亚茹,等.12 MW 生物质直燃发电系统能耗和温室气体排放分析[J].*可再生能源*, 2022, 40(5): 586-592.
- [6] 徐林.生物质炭和硅肥对毛竹林土壤温室气体排放及生态系统碳汇能力影响研究[D].杭州:浙江农林大学, 2019.
- [7] Gan J, Chen M, Semple K, et al. Life cycle assessment of bamboo products: Review and harmonization [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 849 (25): 157937.
- [8] Jagnade P, Panwar N L, Agarwal C. Experimental investigation of kinetic parameters of bamboo and bamboo biochar using thermogravimetric analysis under non-isothermal conditions [J]. *BioEnergy Research*, 2022, 16(2): 1143-1155.
- [9] 张嘉鸣.竹材热解特性与竹炭电化学特性研究[D].唐山:华北理工大学, 2021.6.
- [10] Xie M H, Bai L, Ruan J L, et al. Exploratory research on industrial life cycle assessment illustrated by case study of crystalline silicon photovoltaic cell industry[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30 (12): 1970-1978.
- [11] 龚晓宇.基于LCA的水稻秸秆热解经济与环境效益分析[D].南昌:江西财经大学, 2021.
- [12] 杨秋爽.基于生命周期评价的生物炭固碳潜势与环境影响[D].上海:上海交通大学, 2020.
- [13] 刘壮,田宜水,马大朝,等.生物质热解的典型影响因素及技术研究进展 [J]. *可再生能源*, 2021, 39(10): 1279-1286.
- [14] 陈伟,杨海平,刘标,等.温度对竹屑热解多联产产物特性的影响[J].*农业工程学报*, 2014, 30(22): 245-252.
- [15] 刘锐佳.废弃生物质热解过程的化学行为与机理及环境效益研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2022.
- [16] Mahmood R, Parshetti G K, Balasubramanian R. Energy, exergy and techno-economic analyses of hydrothermal oxidation of food waste to produce hydro-char and bio-oil[J]. *Energy*, 2016, 102: 187-198.

- [17] Munoz E, Curaqueo G, Cea M, et al. Environmental hotspots in the life cycle of a biochar-soil system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 158: 1-7.
- [18] Bora R R, Lei M, Tester J W, et al. Life cycle assessment and technoeconomic analysis of thermochemical conversion technologies applied to poultry litter with energy and nutrient recovery [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(22): 8436-8447.
- [19] 曾勇, 聂斌. 城市交通环境下货运车辆燃油消耗与排放测算及模型构建 [J]. *军事交通学院学报*, 2016, 18(11): 44-481.
- [20] 汪夜印. 闽北山地不同森林可燃物的含水率及持水性能比较[J]. *防护林科技*, 2017(8): 70-72, 84.
- [21] 马培勇, 施苏薇, 邢献军, 等. 毛竹颗粒燃料成型工艺研究[J]. *可再生能源*, 2016, 34(11): 1714-1719.
- [22] 韩菲. 生物质热解多联产系统生态热力学评价研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [23] Yang Q, Han F, Chen Y, et al. Greenhouse gas emissions of a biomass-based pyrolysis plant in China [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1580-1590.
- [24] 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 等. 生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估[J]. *环境科学*, 2013, 34(6): 2486-2492.
- [25] 李开志. 竹材热解多联产产物特性的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [26] Saltelli A, Marivoet J. Non-parametric statistics in sensitivity analysis for model output: A comparison of selected techniques[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1990, 28(2): 229-253.
- [27] Roberts K G, Gloy B A, Joseph S, et al. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic and climate change potential [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(2): 827-833.
- [28] Hammond J, Shackley S, Sohi S, et al. Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK [J]. *Energy Policy*, 2011, 39(5): 2646-2655.

Carbon footprint analysis of bamboo waste pyrolysis

Hao Yanzhang, Yang Changming

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This study addresses the scenario of bamboo waste pyrolysis and the resource utilization of its pyrolysis products, employing a methodology grounded in life cycle assessment and sensitivity analysis. It establishes a comprehensive life cycle carbon emission inventory and calculation approach. The primary sources of carbon emissions and reductions within the pyrolysis system are identified, and the sensitivity of carbon reduction capacity to various parameters is assessed. Results indicate that the carbon emissions from pyrolyzing 1 ton of bamboo waste amount to -838.684 kg, resulting in an annual reduction of 38.3 million t of carbon emissions and an annual electricity generation of 2.1×10^{10} kW·h in China. The predominant contributors to carbon emissions in the system are the combustion for power generation of bio-oil and syngas (34.8%), while carbon reduction is primarily driven by the application of bamboo charcoal to soil (34.0%). The system's carbon reduction capacity exhibits high sensitivity to bamboo waste proportion, annual harvest volume, and pyrolysis product yield, with sensitivity coefficients of 1.297, 1.000, and 0.702. Notably, the soil carbon sequestration effect resulting from bamboo charcoal application presents significant carbon reduction potential, estimated at 13 million t annually for an 8.9% bamboo charcoal application rate. This study concludes that bamboo waste pyrolysis holds substantial carbon reduction potential, providing a novel avenue for China to leverage bamboo waste for renewable energy production and effectively mitigate climate change towards achieving "dual-carbon goals".

Keywords: bamboo waste; pyrolysis; carbon reduction; life cycle evaluation; sensitivity analysis