

生物质成型燃料的产品碳足迹评估

谢娟¹, 罗欣蕾², 冯水仙², 张会³, 黄海燕⁴, 张丛光^{1,2}

(1.南昌职业大学 经济管理学院, 江西 南昌 330500; 2.深圳职业技术大学 碳中和技术研究院, 广东 深圳 518057; 3.南昌职业大学 信息学院, 江西 南昌 330500; 4.广东技术师范大学 创新创业学院, 广东 广州 510665)

摘要: 文章构建了生物质成型燃料从“摇篮到坟墓”的全生命周期模型,对生物质成型燃料碳足迹进行了评估。研究结果显示,在不同阶段,特别是在加工过程中,生物质成型燃料的碳排放存在显著差异,成为主要排放阶段。文章强调了碳足迹评估在政策和市场中的重要性,分析了降低碳排放的潜在策略。该研究对决策者、能源产业、政策制定者和研究者具有重要启示,有助于更好地理解生物质成型燃料产品的碳足迹,推动可持续的能源生产和使用。

关键词: 生物质成型燃料; 清单分析; 全生命周期; LCA; 碳足迹

中图分类号: TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)03-0292-08

0 引言

全球气候变暖正威胁着人类社会和生态系统的可持续发展。随着世界各国对控制二氧化碳排放和应对气候变暖的关注不断加强,作为全球最大的温室气体排放国之一,中国正面临着巨大的二氧化碳减排压力^[1]。目前,中国能源和工业部门的二氧化碳排放量约占总排放量的80%,化石燃料高消耗模式的不可持续性日益凸显。因此,实现能源结构的革新和发展可替代的低碳能源是中国实现可持续发展进程的关键。

在中国能源结构转型和发展可替代低碳能源的过程中,生物质成型燃料(Biomass Moulding Fuel, BMF)作为一种极具潜力的可再生能源,逐渐步入大众的视野。BMF是指将农林废弃物作为原材料,经过粉碎、混合、挤压、烘干等工艺,制成各种形状(如块状、颗粒状等)的可直接燃烧的新型清洁燃料。相较于传统的化石燃料, BMF的原料主要为农林废弃物等可再生资源,其生产过程可以持续进行^[2],并且, BMF在燃烧过程中释放的二氧化碳可以被植物重新吸收,形成一个可持续循环。这使得 BMF的使用对大气中二氧化碳浓度

增加的影响相对较小,从而有助于减少温室气体的排放。通过合理有效利用 BMF,可以降低对传统化石燃料的依赖性,增强能源结构的安全性^[3]。

尽管 BMF 具有很多优势,但其在在中国的发展也面临一些挑战。根据中国可再生能源地图,到2030年,生物质能将占中国可再生能源消费的25%左右^[4]。然而生物质有着分布分散、季节性强等特点,并且容易受到气候变化、种植结构调整、农业生产欠丰等因素的影响^[5]。生物质还存在氧含量高、能量密度低、储运不便等缺点。以上因素均制约了 BMF 的大规模应用与发展。虽然利用生物质燃料可以防止露天焚烧带来的环境污染,但这些燃料的运输、生产、使用等过程可能会带来额外的环境问题^[6]。目前,国内对 BMF 全生命周期的产品碳足迹计算和研究尚未充分,针对 BMF 产品的高效降碳措施的研究也较少。因此,本研究以农业秸秆为原料,评价了 BMF 产品“从摇篮到坟墓”整个生命周期中的碳排放情况,计算出各个阶段的碳排放数据,并针对高排放环节提出改良建议,为 BMF 行业制定针对性的减排策略和工艺优化提供参考,促进生物质能源行业的可持续发展。

收稿日期: 2024-01-16。

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(2017YFB0902100);广东省哲学社会科学规划2023年度学科共建项目(GD23XGL118);深圳职业技术大学校级启动项目(6023312045K, 6024271008K);广东省哲学社会科学规划项目(GD24CYJ45);深圳市科技创新委员会可持续发展科技专项(KCXST20221021111609022);江西省科技类软科学研究计划项目(GJJ2204513);江西省科技计划引导项目(GJJ2204510)。

作者简介: 谢娟(1978-),女,硕士,副教授,主要从事生物质产品供应链碳足迹管理学的研究。E-mail: juanxiwork@163.com

通信作者: 张丛光(1992-),男,博士,副研究员,主要从事产品碳足迹与环境可持续转型的研究。E-mail: qaulxj@hotmail.com

1 国内外研究现状分析和发展趋势

1.1 生物质成型燃料国内外发展现状

国外的生物质固体燃料技术始于 20 世纪初,德国、丹麦、芬兰等欧盟国家高度重视森林生物质能源的转化和利用^[7],其中德国、瑞典、芬兰、丹麦、加拿大和美国的 BMF 年产量可达 2 000 万 t 以上^[8]。欧美国家在林木生物质能源的转化利用方面投入了大量的研究,其 BMF 技术处于领先水平,标准体系比较完善,覆盖了从原料采集、储存、预处理、BMF 生产、配送和应用的全产业链^[8]。其具体流程为①针对原料的收集与贮存,进行了详细设计与控制;②对原料进行预处理,提高生物质的可燃性和稳定性;③采用最先进的制造设备和工艺技术,使经预处理的生物质转变为最优质的颗粒燃料;④通过专用的运输车,将生成的颗粒燃料定时提供给发电和供热企业,以减少运输消耗和提升资源效率。生产的颗粒燃料除了定时供给发电和供热企业以外,还以袋装的形式在市场上售卖,现已成为不少家庭的日常生活用能源。

我国 BMF 的发展起源于 20 世纪末,但其规模迅猛增长。据统计,我国 2010 年的 BMF 产量约为 300 万 t,截至 2018 年,该数字已达 1 800 万 t,占全球总产量的 45%^[8]。2021 年发布的《3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书》预测,我国秸秆生产量将显著增长,从 2021 年的约 8.29 亿 t 增加至 2030 年的约 9.16 亿 t,再增加至 2060 年的约 12.34 亿 t。秸秆可收集资源量也相应增加,从约 6.94 亿 t 增加至 7.67 亿 t,最终达到 10 亿 t。这些数据表明,作为农业大国,我国的 BMF 行业具有巨大的开发潜力^[9]。同时,由于政府对可再生能源发展的扶持以及 BMF 技术的不断进步,我国农村能够更加充分地使用秸秆等废弃物,制备出高效的生物质成型燃料。这不仅有助于减少化石燃料的使用,减少二氧化碳排放量,还能带动乡村区域经济发展,为实现中国农村的振兴贡献力量。

1.2 生物质成型燃料的加工相关技术发展

早在 20 世纪 30 年代初,美国成功研发了螺旋挤压机,随后又研制了环模成型机。在 20 世纪 70 年代,瑞典、西欧等发达国家也相继成功研发了冲压式成型机和模棍挤压式成型机。目前,欧洲

各国的 BMF 生产技术和设备都已经十分成熟,大多是企业集中生产,具有规范的管理体制,自动化程度高,且燃料颗粒已有相关国家标准要求,严格规范了 BMF 的生产^[7]。欧洲是 BMF 的最大消费市场,瑞典的 BMF 消费约占其供热能源消费总量的 70%^[10]。这体现了打造完整和全面产业链的重要性,以及生物质能在清洁供暖领域的巨大潜力。

20 世纪 80 年代,中国研制出了螺旋挤压式成型机。经过多年的发展,我国现有的压缩工艺分为常温湿压成型工艺、热压成型工艺、冷压成型工艺和炭化成型工艺^[11]。目前,我国的加工工艺更加多元、技术上也更加成熟、成型设备更加多样,但是与国外相比依旧有着不小的差距。

1.3 生物质成型燃料的可持续发展现状与趋势

由化石能源转向可再生能源确实可以减少温室气体的排放,前提是可再生能源的产业链可以带来更好的整体环境绩效。有研究表明,可再生能源系统的温室气体排放范围很广^[12,13]。随着 BMF 研究的开展,研究者逐渐认识到,尽管生物质燃料可以防止露天焚烧导致的温室气体排放,但是生物质燃料的运输、生产和使用可能导致额外的温室气体排放。在某些情况下,较低的温室气体排放并未伴随其他与环境有关的排放的减少,如导致富营养化、酸化和人类/生态系统毒性的排放。近年来,研究人员已经开始评估生物质利用的环境影响^[12],包括处理技术以及与之相关的收集和运输过程。其中,许多研究者利用生命周期评价法(Life Cycle Assessment, LCA)对生物质处理技术进行了评价。Rousset P 通过 LCA 方法对木炭颗粒进行了环境影响评估,发现 90% 以上的二氧化碳由木炭形成过程产生,其余与淀粉生物质生产有关^[14]。Benetto E 分析了葡萄渣颗粒的生产链,使用 LCA 方法评估了其热能生产的整体环境绩效,揭示了颗粒的燃烧和干燥阶段是排放温室气体的主要阶段^[15]。Cen K 采用 LCA 方法研究了玉米秸秆颗粒燃烧加热系统的资源、能耗和环境影响^[16]。Murphy F 以芒草颗粒为原料,同时使用 LCA 方法评估了全球变暖潜能值、酸化潜能值和能源需求等关键变量,以揭示这些变量的整体环境影响^[17]。总体而言,目前针对 BMF 的研究有很多,但大多较为分散,对农业秸秆资源 LCA 的研究尚未得到充分阐述。

2 基于生命周期评价的生物质成型燃料碳足迹核算体系

2.1 生命周期评价的概念

生命周期评价法是一种系统性方法,用于全面评估产品、过程或活动在其整个生命周期内的环境影响。这包括对从原材料采集、生产、使用到废弃处理的各个阶段的资源利用和排放进行综合分析。生命周期评价是一个客观评估环境压力的过程,通过分析能量和物质的利用情况以及废物排放对环境造成的影响,评估研究对象在整个生命周期中对社会和环境的影响程度。生物质成型燃料碳足迹的评价包括绘制过程图、确定系统边界、收集数据、计算碳足迹、检查不确定性等步骤。

2.2 系统目标

本研究选取的是生物质成型燃料从原料种植、到加工运输、到最终使用的过程,如图 1 所示。

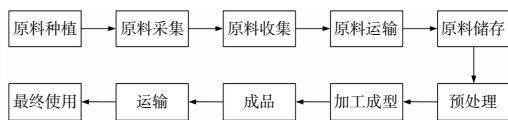


图 1 生物质成型燃料生产简易流程图

Fig.1 Simple flow chart of biomass moulding fuel production

生物质成型燃料的生命周期始于原料的种植阶段,其中合适的生物质原料,如木材或农作物废弃物,经过种植和养护,在成熟时进行收获;随后,采收的原料被运输到生物质成型燃料加工厂,经历原料准备、成型加工和质量控制等步骤,以生成符合标准的生物质成型燃料;在加工完成后,成型燃料通过运输网络,包括公路、铁路或船运,最终到达使用地点;在最终使用阶段,生物质成型燃料被应用于能源生产,如发电或供热,通过监测和控制确保高效燃烧和减少排放。本研究建立的全生命周期评价模型主要考虑原料种植阶段、原料运输阶段、BMF 加工阶段、BMF 运输阶段以及燃烧使用阶段,基于评估结果,了解生物质成型燃料在各个环节对环境的影响,并提供决策支持和优化建议,以促进生物质成型燃料产业的可持续发展。

2.3 系统边界

本研究将生物质成型燃料的功能单位确定为 1 t,即核算 1 t 生物质成型燃料的碳足迹。由于数据的可获得性和质量存在限制,为了实现研究目标,需要对系统边界进行适当的定义,排除那些对研究目标影响不大的过程,例如土地占用和废物

处理等。针对生物质成型燃料的全生命周期进行“从摇篮到坟墓”的边界划分,共划分为 5 个主要阶段:原料种植阶段、原料运输阶段、BMF 加工阶段、BMF 运输阶段、燃烧使用阶段。这 5 个阶段包括了生物质成型燃料从种植到转化为可利用能源的全过程,如图 2 所示。通过这种划分构建了符合 BMF 产业现状的全过程生命周期清单,以确保对整个生命周期的全面考虑和细致记录。在确定系统边界时应将所有实质性贡献(指某一活动、某一耗能的碳排放量预期占产品碳足迹的 1%以上)纳入核算范围,非实质性贡献(碳排放量预期占产品碳足迹 1%以下的排放源)不须要纳入核算范围。

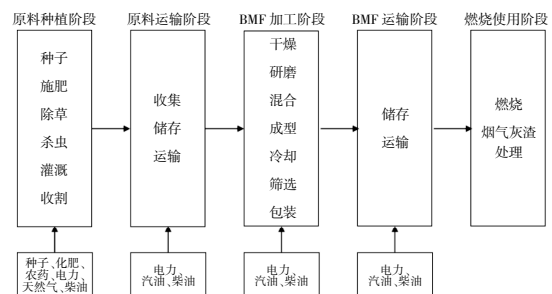


图 2 生物质成型燃料全生命周期流程图

Fig.2 Flow chart of the whole life cycle of biomass moulding fuels

2.4 清单分析

①原料种植阶段

生物质成型燃料主要以农作物秸秆为原材料,涉及的秸秆主要包括水稻、小麦和玉米等农作物。其他秸秆,如杂粮、麻类、糖料、烟叶和香蕉等,并未考虑在原料来源中。原料种植过程的碳排放包括种子获取、肥料施用、灌溉、杀虫剂和除草剂施用以及收割等活动。这些排放的来源包括原料种子、化肥、农药、电力、天然气和柴油。

②原料运输阶段

在原料运输阶段(包括储存环节的电力消耗),主要运输方式为公路运输,碳排放来源主要为电力和柴油。该阶段的电能消耗为 3.6 kW·h/t,原料的运输距离采用收集半径模型进行计算,计算式为

$$R = \sqrt{\frac{Q_y}{\theta(1-\mu)}} \quad (1)$$

式中:R 为秸秆收集半径,km;Q_y 为年消耗秸秆量,t/a;θ 为单位耕地面积秸秆产量,t/(km²·a);μ

为秸秆减量系数,实际用于成型的秸秆资源必须剔除其他用途和消耗的部分,将其在当地秸秆资源总量中所占百分比表示为减量系数,我国每年用于能源和废弃的秸秆量占秸秆总量的43%,即减量系数 μ 为0.43。

根据已有数据计算可知,每吨秸秆原料的收集半径约为10 km。为了评估碳排放,碳排放因子以单位质量的CO₂计,采用电力的碳排放因子为0.570 3 kg/(kW·h),该因子来源于生态环境部《关于做好2023-2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》。采用公路运输(柴油)的碳排放因子为0.89 kg/(t·km),该因子来源于中国生命周期基础数据库 CLCD 0.7。

③BMF加工阶段

在BMF加工阶段,主要采用活塞冲压式成型机、压辊式成型机和螺旋挤压式成型机等压缩设备。BMF的加工可分为压块和制粒两个主要生产工艺,整体工艺路线包括原料粉碎、细粉、输送、除尘、成型、冷却、包装。在这一阶段,电能消耗占主导地位。生物质燃料成型机组在成型工序中的运行电耗包括粉碎机的运行电耗(32 kW·h/t)、制粒机的运行电耗(62.8 kW·h/t)、冷却剂使用过程的电耗(3.5 kW·h/t);在其他工序中,生物质燃料的电耗为3 kW·h/t。因此,BMF加工阶段的总电耗为101.33 kW·h/t。

④BMF运输阶段

在我国,生物质成型燃料的运输主要依赖四轮柴油货车,其主要碳排放源是柴油的消耗。在这一阶段,每吨BMF通过公路运输的平均距离为30 km^[18]。

⑤燃烧使用阶段

生物质成型燃料的原料为农作物秸秆,在其生长过程中由于光合作用会吸收并储存二氧化碳,所以生物质成型燃料燃烧阶段的碳排放为零,即原料农作物通过光合作用吸收的二氧化碳量等于燃烧所排放的二氧化碳量^[18]。

2.5 计算碳足迹

生物质成型燃料的碳排放量计算式为

$$E_i = A_i \times F_i \quad (2)$$

式中: E_i 为第*i*种活动的碳排放量,t; A_i 为第*i*种活动的活动水平; F_i 为第*i*种活动的排放因子。

碳排放总量的计算式为

$$E = \sum_i A_i \times F_i \quad (3)$$

2.6 不确定性检查

尽管生物质成型燃料全生命周期各个阶段的活动水平数据都是通过直接调研或参考文献获取的,但并未对所有环节进行统一的能源消耗监测。同时,可能存在个体情况差异,这使得获取的初级数据存在一定误差。因此,在最终核算结果中可能存在一定的偏差。在测算生物质成型燃料不同阶段的碳排放时,难以避免由活动数据收集、排放因子数据库、数据处理等导致的计算结果不确定性。根据对不确定性因素的分析,在对生物质成型燃料的环境影响贡献进行排序后,本研究选择了氮肥、用电量、公路运输柴油用量、杀虫剂和除草剂5个输入变量进行敏感性分析。在进行敏感性分析时,每个研究变量保持在±10%的变动范围,以比较研究变量变动前、后的环境影响变化情况,来判断生物质成型燃料生命周期对研究变量变化的敏感性。

3 生物质成型燃料碳足迹结果与分析

3.1 生物质成型燃料各阶段碳排放测算

经计算得出1 t生物质成型燃料的碳足迹为217.76 kg,其中,原料种植阶段的碳排放量为122.34 kg/t,原料运输阶段的碳排放量为10.95 kg/t,BMF加工阶段的碳排放量为57.77 kg/t,BMF运输阶段的碳排放量为26.7 kg/t,燃烧使用阶段的碳排放量为0。

在生物质成型燃料的全生命周期碳足迹中,根据计算结果,各个阶段的排放源产生的碳排放占比见图3。

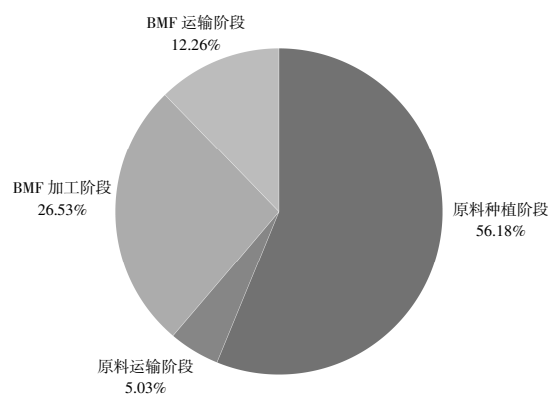


图3 生物质成型燃料生命周期各阶段的碳排放量占总排放量的比值

Fig.3 The ratio of carbon emissions at each stage of the life cycle of biomass moulding fuels to total emissions

由图 3 可知, 各阶段的碳排放总量贡献顺序为原料种植阶段>BMF 加工阶段>BMF 运输阶段>原料运输阶段>燃烧使用阶段, 其中原料种植阶段的碳排放量占总排放量的 56.18%。

原料种植阶段各项目的碳排放量占比如图 4 所示。

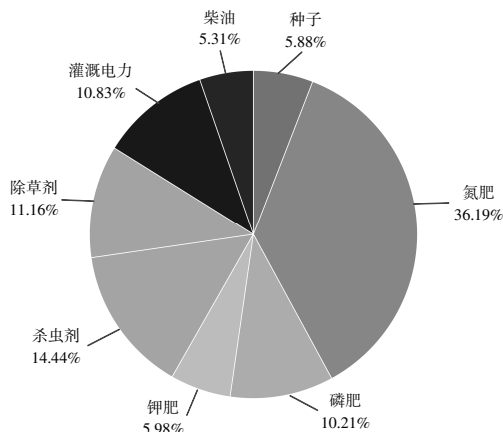


图 4 各项目碳排放量占原料种植阶段总排放量的比值
Fig.4 The ratio of carbon emissions from each project to the total emissions during the raw material planting stage

由图 4 可知, 氮肥投入的碳排放量占比为 36.19%, 氮肥投入占肥料总量的 60.47%。因此, 在减少氮肥的碳排放量方面, 除了减少氮肥的使用量, 还应采用低碳排放的种植技术。例如, 在种植过程中, 可以使用有机肥代替氮肥, 结合先进的耕作技术来松土与除草^[19]。另外, 与原料种植阶段相比, BMF 加工和运输阶段的碳排放量略低, 分别占总排放量的 26.53% 和 12.26%。在 BMF 加工阶段, 原料的干燥、成型和烘烤导致耗电量大, 电能消耗是主要的碳排放源之一。通过提高能源效率、采用清洁能源或者实施碳捕获和储存技术, 可以减少 BMF 加工阶段的碳排放量。原料运输阶段与燃烧使用阶段的碳排放量相对较低, 占比较小。原料运输阶段的碳排放量可以通过优化运输路线、提高运输效率等方式降低。由于生物质成型燃料的原料是植物生物质, 如木材、秸秆等, 这些原料在生长过程中吸收了大量的二氧化碳。因此, 燃烧生物质成型燃料时释放的二氧化碳可以视为被“抵消”了。

总体而言, 生物质成型燃料的碳足迹相对较低, 表明其在全生命周期中产生的碳排放较少, 相较于传统的化石燃料具有更低的温室气体排放, 更为环保。研究表明, 原料种植阶段和 BMF

加工阶段是生物质成型燃料全生命周期中最主要的碳排放来源。因此, 针对原料种植和 BMF 加工阶段的碳排放源, 采取有针对性的改进措施, 如减少氮肥使用量、引入低碳种植技术、提高能源效率以及采用清洁能源等, 可以进一步提升生物质成型燃料的环境友好性, 并促使其更广泛地应用于能源生产领域。

3.2 敏感性分析

敏感性分析用于评估由某种变化引起的结果变化的敏感性。在本研究中, 使用单因素敏感性分析, 一次选择一个因素在指定范围内变化, 而其他因素则固定^[20]。在对生物质成型燃料的环境影响贡献进行排序后, 选择氮肥、用电量、公路运输柴油用量、杀虫剂和除草剂 5 个输入变量进行敏感性分析。在进行敏感性分析时, 每个研究变量保持在 ±10% 的变动范围, 以比较研究变量变动前、后的环境影响变化情况, 由此判断生物质成型燃料生命周期对研究变量变化的敏感性, 结果如图 5 所示。

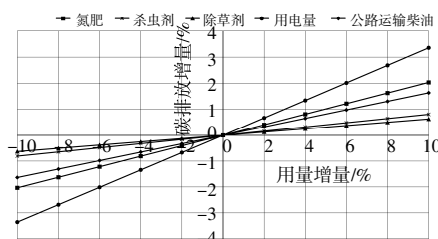


图 5 敏感性分析结果
Fig.5 Results of sensitivity analysis

由图 5 可知: 当氮肥用量增加 10% 时, 原料种植阶段的碳排放量增加约 3.62%, 生物质成型燃料的碳排放量增加约 2.03%; 当用电量增加 10% 时, 生物质成型燃料的碳排放量增加约为 3.36%; 当公路运输柴油用量、杀虫剂、除草剂增加 10% 时, 生物质成型燃料的碳排放量分别增加约 1.63%, 0.81%, 0.63%。综合分析表明, 氮肥用量对生物质成型燃料的碳排放量影响最为显著。因此, 敏感性分析提供了降低生物质成型燃料碳排放量的有力指导。从整体上看, 在原料种植阶段和生物质成型燃料加工阶段, 减少氮肥用量以及采用节能用电技术等手段, 是降低生物质成型燃料碳排放量的有效策略。

3.3 不确定性分析

尽管生物质成型燃料全生命周期各个阶段的

活动水平数据都是通过直接调研或参考文献获取的,但并未对所有环节进行统一的能源消耗监测。因此,采用蒙特卡洛模拟分析法对其进行不确定性分析,假设模型中生物质成型燃料全生命周期排放清单所输入的数据均为正态分布,并确定选取其有效值作为平均值。通过对模型进行 10^5 次运行,得到生物质成型燃料全生命周期碳排放量的预测结果及其概率分布,如图6所示。根据模型的预测,生物质成型燃料全生命周期的碳排放量平均值为 217.73 kg/t ,碳足迹90%置信区间为 $184.31\sim 251.16 \text{ kg/t}$ 。

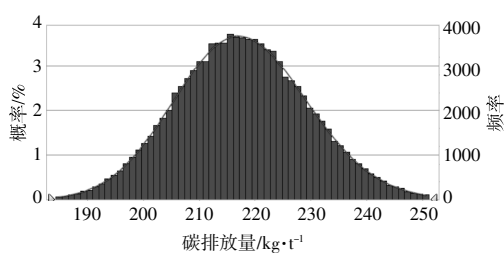


图6 不确定分析结果

Fig.6 Results of the uncertainty analysis

4 讨论

4.1 生物质成型燃料生命周期各阶段的低碳策略

为实现“双碳”目标,我国各产业都在加紧研讨降低温室气体排放的策略。在能源方面,生物质成型燃料作为主要的可再生能源,须要调整现行生产方式,以降低碳足迹,减少全球气候变暖的趋势。在生物质成型燃料原料种植和加工过程中会产生一定的温室气体排放,以下是针对这两个高碳排放阶段的减排建议。

①增加有机肥的施用比例,在种植过程中减少氮肥施用。在生物质成型燃料的全生命周期碳足迹中,原料种植阶段的碳排放占比达到56.18%,其中氮肥的碳排放占比为36.19%,是影响生物质成型燃料碳足迹的重要元素,所以控制氮肥在整个生命周期中的碳排放是非常必要的。由于有机肥料释放氮的速度慢,所以使用生活中易获得的有机肥料,如堆肥、畜禽粪便和植物秸秆等,来替代化学合成的氮肥,可以减少氮的流失,降低对化肥的依赖,从而减少碳排放,提高生态循环可持续性。另外,在经济许可的条件下,可以考虑使用精确施肥技术,如GPS和养分监测系统,根据土壤测试结果精确施用氮肥于植物需要的地

区,避免过量使用化肥,减少氮肥的碳排放。

②优化原材料配比,改进加工工艺。使用多种生物质原料,包括废弃农作物、林业残渣、木屑、秸秆等,以提高资源的可持续性;使用适当的预处理加工技术,如粉碎、干燥、颗粒化或压缩,以提高生物质原料的密度和可流动性,降低储存和运输成本;优化反应条件,包括温度、压力、催化剂和反应时间,提高反应效率,提高产率和质量,并降低能源消耗,提升燃烧效率。

③余热回收和碳捕集与储存技术的应用。设计和安装余热回收系统,以捕获和再利用生物质成型燃料生产燃烧过程中产生的热量,有效处理和利用产生的烟气和灰渣,提高能源效率;引入碳捕集和碳存储技术,以捕获并储存生物质成型燃料燃烧过程中产生的二氧化碳。

4.2 政策启发

生物质能源产业在全球范围内备受关注,其发展日益成为各国战略规划的重点。站在确保国家能源安全和推动低碳经济发展的战略高度,生物质能源被视为应对国民经济高速、持续增长的有效工具。为实现全面能源转型,我国迫切需要加速生物质能源的发展,使其成为替代传统化石能源的关键新兴能源。

在政策层面,应建立更为全面的政策框架,包括财政和金融方面的支持措施,以促进生物质能源产业链的全面发展。同时,应制定生物质成型燃料生产的行业标准,明确碳排放计算方法和限制,标准化有助于确保生产过程的环境友好性,推动产业向更为低碳、清洁和高效的方向发展。

在经济层面,可以开展并且推行“碳中和”项目,如植树造林、生态恢复、碳普及和储存等活动,鼓励各行各业积极投入到这些活动中,以抵消企业的碳排放。并且推行循环经济理念,通过废物资源化、产品再利用等方式减少原材料的消耗和废弃物排放,降低碳排放成本。

最后,政府需要建立健全低碳管理机制,加强对碳排放的检测和执法力度,确保企业减少不必要的碳成本支出,以有效降低低碳成本,推动社会各界更好地参与到低碳转型中来,实现可持续发展目标。

5 结论

生物质成型燃料作为一种可再生的能源资

源,在减少碳排放和缓解气候变化方面具有潜力。本研究对生物质成型燃料的碳足迹进行了全生命周期评估,以全面了解其各个阶段对环境的影响,以此采取针对性的减排措施。通过综合分析得出以下结论。

①原料种植阶段的氮肥施用是生物质成型燃料生命周期中主要的碳排放来源。

②生物质成型燃料的碳足迹在很大程度上受到原材料的选择和加工工艺的影响。选择可持续的生物质来源,如农作物秸秆和林业废料,以及采用高效能源生产工艺,对于减少碳排放至关重要;加工过程中的电能消耗也是产生碳排放的重要来源之一。

③研究提出了降低生物质成型燃料碳足迹的相关建议:减少种植过程的氮肥施用,增加有机肥的施用比例或使用精确施肥技术;优化原材料配比,改进加工工艺,提升燃烧效率;在燃烧和生产过程中应用余热回收和碳捕集与储存技术。

总之,生物质成型燃料的碳足迹评估是一个复杂而关键的领域,须要在整个生产和供应链中采取多种措施。通过选择可持续原材料、改进生产工艺、优化运输和采取环保政策,可以显著降低生物质成型燃料的碳足迹,实现清洁能源的可持续发展,减少气候变化的影响。随着技术的不断进步和经验的积累,生物质成型燃料的生产效率和环境性能将得到进一步提升,可以预见生物质成型燃料在能源领域的广泛应用。同时,应重视多样化的生物质原料利用,包括农业废弃物、林业残渣、城市固废等,以减少资源的浪费和环境的负荷。此外,还应加强生物质成型燃料与其他能源形式(如风能、太阳能)的整合,以实现能源系统的多元化和可持续发展。

参考文献:

- [1] Lin B, Xu B. How does fossil energy abundance affect China's economic growth and CO₂ emissions? [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719: 137503.
- [2] Bajwa D S, Peterson T, Sharma N, et al. A review of densified solid biomass for energy production [J]. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2018, 96: 296–305.
- [3] He Z, Lou C, Fu J, et al. Experimental investigation on temporal release of potassium from biomass pellet combustion by flame emission spectroscopy [J]. *Fuel*, 2019, 253: 1378–1384.
- [4] Wang Z, Lei T, Yang M, et al. Life cycle environmental impacts of cornstalk briquette fuel in China [J]. *Applied Energy*, 2017, 192: 83–94.
- [5] Xu J, Huang M, Hu Z, et al. Prediction and modeling of the basic properties of biomass after torrefaction pretreatment [J]. *Journal of Analytical Applied Pyrolysis*, 2021, 159: 105287.
- [6] Su X, Shao X, Tian S, et al. Life cycle assessment comparison of three typical energy utilization ways for corn stover in China [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2021, 152(1): 106199.
- [7] Guan Y, Tai L, Cheng Z, et al. Biomass molded fuel in China: Current status, policies and suggestions [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138345.
- [8] 马隆龙, 唐志华, 汪丛伟, 等. 生物质能研究现状及未来发展策略 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(4): 434–442.
- [9] Du W, Wang J, Feng Y, et al. Biomass as residential energy in China: Current status and future perspectives [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 186: 113657.
- [10] 郭明辉, 李嘉兴, 唐宽勇. 生物质固体成型燃料研究进展 [J]. *林产工业*, 2023, 60(10): 40–44.
- [11] 陈俊松. 基于生命周期评价理论的人工林作业资源—环境—经济影响研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [12] 李彦军. 生物质燃料成型技术发展现状研究 [J]. *现代商贸工业*, 2021, 42(28): 162–163.
- [13] 周媛, 郑丽凤, 周新年. 基于采伐剩余物的生物质固体燃料生态效益分析 [J]. *森林工程*, 2018, 1(1): 1–1.
- [14] Rousset P, Caldeira-Pires A, Sablowski A, et al. LCA of eucalyptus wood charcoal briquettes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(14): 1647–1653.
- [15] Benetto E, Jury C, Kneip G, et al. Life cycle assessment of heat production from grape marc pellets [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 149–158.
- [16] Cen K, Chen F, Chen D, et al. Life cycle assessment of torrefied cornstalk pellets combustion heating system [J]. *Fuel*, 2022, 320: 123968.
- [17] Murphy F, Devlin G, McDonnell K. Miscanthus production and processing in Ireland: An analysis of energy requirements and environmental impacts [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 23: 412–420.
- [18] 霍丽丽, 田宜水, 孟海波. 生物质固体成型燃料全生命周期评价 [J]. *太阳能学报*, 2011, 32(12): 1875–1880.

- [19] Huang B,Zhang X,Zhang J. Carbon reduction effect and application drivers of low-carbon planting technologies [J].Journal of Ecology Rural Environment, 2018,34(12):1082-1090.
- [20] Igos E,Benetto E,Meyer R,et al. How to treat uncertainties in life cycle assessment studies? [J].The International Journal of Life Cycle Assessment,2019, 24:794-807.

Product carbon footprint assessment of biomass moulding fuels

Xie Juan¹, Luo Xinlei², Feng Shuixian², Zhang Hui³, Huang Haiyan⁴, Zhang Congguang^{1,2}

(1.College of Economics and Management, Nanchang Vocational University, Nanchang 330500, China; 2.Institute of Carbon-Neutral Technology, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518057, China; 3.College of Information Technology, Nanchang Vocational University, Nanchang 330500; 4.Innovation and Entrepreneurship College, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

Abstract: This study constructs a full life-cycle model for BMF, spanning from cradle to grave, and assesses the carbon footprint throughout its life cycle. The research findings reveal significant variations in carbon emissions at different stages, notably during the processing phase, making it a key emission stage. The carbon footprint is influenced by various factors such as raw material types, composition ratios, processing technology differences, and transportation mode choices. In the discussion, the study emphasizes the importance of carbon footprint assessment in policy and market contexts, and analyzes potential strategies for reducing carbon emissions. This research provides crucial insights for decision-makers, the energy industry, policymakers, and researchers, contributing to a better understanding of the carbon footprint of biomass molding fuel products and promoting sustainable energy production and utilization.

Keywords: biomass moulding fuels; inventory analysis; full life cycle; LCA; carbon footprints