



河南农业大学学报
Journal of Henan Agricultural University
ISSN 1000-2340, CN 41-1112/S

《河南农业大学学报》网络首发论文

题目: 基于生命周期评价的秸秆发电供应链模式研究
作者: 张红阳, 高小涵, 王振锋, 王恒, 王占武, 曲青青, 徐广印
DOI: 10.16445/j.cnki.1000-2340.20240429.002
收稿日期: 2024-01-24
网络首发日期: 2024-04-30
引用格式: 张红阳, 高小涵, 王振锋, 王恒, 王占武, 曲青青, 徐广印. 基于生命周期评价的秸秆发电供应链模式研究[J/OL]. 河南农业大学学报.
<https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20240429.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于生命周期评价的秸秆发电供应链模式研究

张红阳¹, 高小涵¹, 王振锋^{1,2}, 王恒^{1,2}, 王占武^{1,2}, 曲青青¹, 徐广印^{1,3},
(1. 河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 农产品冷链物流信息与装备技术河南省工程实验室, 河南 郑州 450002; 3. 黄河科技学院农业工程研究院, 河南 郑州 450006)

摘要:【目的】评估不同秸秆发电供应链模式的碳减排潜力, 探究影响碳减排能力的因素。【方法】采用生命周期评价方法, 对秸秆发电不同阶段的污染物排放进行分析, 并建立秸秆发电供应链系统的碳减排评估模型, 计算不同模式下污染物的排放量和碳减排量。【结果】秸秆发电供应链的运输和发电利用阶段是污染物的主要排放源, 其中污染物 PM10、SO₂、CH₄、CO 主要来源于发电阶段, 所占比例分别为 97%、93%、98%和 76%; CO₂ 主要来源于运输阶段, 所占比例为 80%。4 种秸秆发电供应链模式的碳减排量分别为 5 995.16、6 076.57、6 121.73 和 6 125.68 kg。【结论】秸秆发电供应链模式的选择对系统碳减排能力有较大影响, 在不同背景下选择合适的供应链模式可以减少碳排放。通过对秸秆发电供应链碳排放结果的灵敏度分析可以发现秸秆收集半径、运输工具油耗、化肥农药使用量和除尘技术等因素对碳排放有显著的影响, 并提出相关应对措施。

关键词: 秸秆发电; 生命周期评价; 供应链; 碳减排

中图分类号: F323.2; F274 **文献标志码:** A

Optimization of supply chain model of straw power generation based on life cycle evaluation

ZHANG Hongyang¹, GAO Xiaohan¹, WANG Zhenfeng^{1,2}, WANG Heng^{1,2},
WANG Zhanwu^{1,2}, QU Qingqing¹, XU Guangyin^{1,3}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hennan Agricultural University, Zhengzhou, 450002, China; 2. Henan Provincial Cold Chain Information and Equipment Laboratory for Logistics of Agricultural Products, Zhengzhou, 450002, China; 3. Institute of Agricultural Engineering, Huanghe S &T University, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: 【Objective】To evaluate the carbon emission reduction potential of different straw power supply chain models and explore the factors that affect the carbon emission reduction ability. 【Method】Pollutant emissions at different stages of straw power generation were analyzed using life cycle assessment method, and carbon emission reduction assessment models of straw power supply chain system were established to calculate pollutant emission and carbon emission reduction under different modes. 【Result】The transport and power generation utilization stages of straw power supply chain are the main emission sources of pollutants, among which the pollutants PM10, SO₂, CH₄ and CO mainly come from the power generation stage, accounting for 97%, 93%, 98% and 76% respectively. The CO₂ mainly comes from the transport stage, accounting for 80%. The carbon emission reduction of four straw power supply chain models are 5 995.16, 6 076.57, 6 121.73 and 6 125.68 kg, respectively. 【Conclusion】The selection of supply chain mode of straw power generation has a great impact on the carbon emission reduction ability of the system. The

selection of appropriate supply chain mode in different backgrounds can reduce carbon emission. Through the sensitivity analysis of the carbon emission results of the straw power supply chain, it can be found that the straw collection radius, the fuel consumption of transport vehicles, the amount of fertilizer and pesticides and the dust removal technology have significant effects on carbon emission, and the relevant countermeasures are proposed.

Key words: straw power generation; life cycle assessment; supply chain; carbon emission reduction

收稿日期: 2024-01-24

基金项目: 河南省科技攻关项目 (232102110300); 河南省自然科学基金 (232300420075)

作者简介: 张红阳(1972—), 男, 河南商丘人, 副教授, 博士, 主要从事农产品物流技术与系统工程的研究。

通信作者: 王占武(1993—), 男, 河南南阳人, 讲师, 博士, 硕士生导师。



随着环境污染和能源短缺问题的日益严重,越来越多国家关注可再生能源的利用。秸秆作为一种可再生资源,具有产量大、清洁和低碳特点^[1-3]。利用秸秆发电不仅可以有效应对能源短缺问题,而且可以减少碳排放^[4-5]。目前,秸秆发电行业发展缓慢,主要是因为秸秆具有分布分散、体积大质量小和运输困难的特征,这影响秸秆发电供应链的协同发展。同时,由于秸秆供应方式的不同造成秸秆发电供应链模式的多样性。因此,研究秸秆发电供应链模式有助于秸秆发电产业的可持续发展^[6-8]。

秸秆发电的效益问题是行业发展关注的重要方面。较高的利用成本,限制了秸秆的资源化利用。为了降低利用成本,很多学者对秸秆的经济性能开展研究,结果表明多数生物质发电企业处于亏损状态^[9]。为了降低秸秆发电成本,GUO 等^[10]考虑成本效益问题,建立不同的收储运系统并对比分析其运输模式。李锦^[11]构建智能决策模型,对秸秆收储中心选址和车辆路径优化问题进行研究,以降低秸秆利用的成本。Wang 等^[12]构建秸秆发电效益分配模型,研究供应链利润再分配对秸秆发电的促进作用。秸秆发电供应链模式对秸秆发电成本有较大影响,供应链模式中不同运输方式的选择也影响秸秆发电的经济效益^[13-15]。王占武^[16]利用生命周期成本方法建立不同秸秆发电供应链模式的成本模型,对系统的经济指标进行研究,并评估了秸秆发电的可持续发展潜力。张晓东等^[17]对秸秆供应链系统进行研究,并提出建立配送中心等降低秸秆利用成本。秸秆发电的经济性能影响秸秆发电技术的推广,因此需要选用合适的秸秆发电供应链模式增加秸秆发电的效益。

秸秆发电是重要的可再生能源利用技术,可以替代化石能源减少温室气体排放。为了评估秸秆发电的环境效益,霍丽丽等^[18-19]构建秸秆利用减排固碳评价模型,研究秸秆利用对碳减排的贡献,并分析秸秆减排潜力。马国杰等^[20]利用全生命周期评价方法,研究燃煤发电、秸秆发电的经济环境效益。朱金陵等^[21]建立生命周期能源消耗和环境排放评估模型,对秸秆生长、运输和利用过程进行分析,评价其生命周期能耗和环境排放。生命周期边界选择也影响减排潜力的评估结果,王伟^[22]对生物质发电系统进行生命周期评价,并对生物质的种植部分是否纳入系统边界进行讨论,研究不同系统边界场景的发电系统环境效益。Shafie 等^[23]采用生命周期方法对秸秆发电和燃煤发电进行温室气体减排量对比,结果表明秸秆发电具有显著的减排效益。这些研究结果都表明秸秆发电可以减少环境污染物的排放,改善生态环境。

目前,很多学者对秸秆发电供应链的环境和经济效益进行研究,但是对多种秸秆发电供应链模式的对比研究较少。因此,本文以秸秆发电供应链为研究对象,采用全生命周期评价方法(LCA),分析秸秆发电不同阶段污染物的排放情况,构建秸秆发电供应链的碳减排评估模型,并对4种秸秆发电供应链模式开展研究,旨在明确秸秆发电供应链模式选择对生态环境的影响,为秸秆发电供应链模式选择和可持续发展策略制定提供科学依据。

1.方法

1.1 系统边界

秸秆发电供应链模式对秸秆发电系统的环境效益有较大影响。因此,为了识别不同秸秆发电供应链的污染物排放情况,本研究建立4种秸秆发电供应链模式,并利用生命周期评价的方法计算不同模式污染物的排放量,进一步评估碳减排量。通过对比选择合适的秸秆发电供应链模式。

秸秆的生命周期包含种植、运输、储存和燃烧发电4个阶段。因此,根据生命周期评价的方法选择从秸秆种植到最终的利用为系统边界。鉴于运输过程包含收集、预处理、存储和运送等活动,可以设置不同的秸秆发电供应链模式。秸秆发电供应链的系统边界如图1所示。

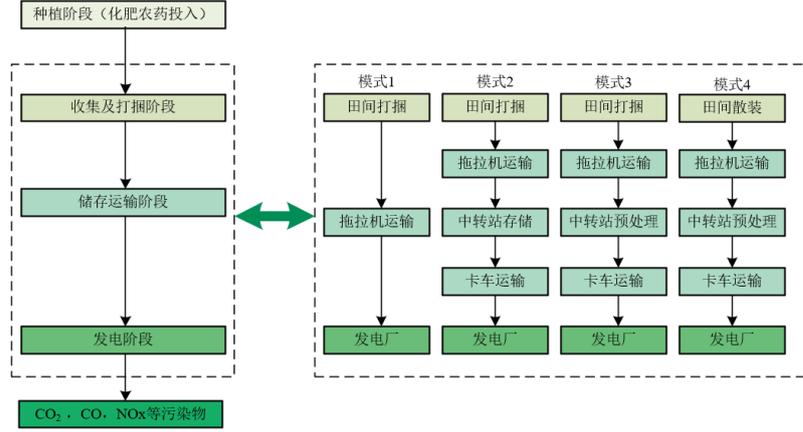


图 1 秸秆发电供应链的系统边界

Fig.1 The system boundary of straw power generation supply chain

1.2 污染物排放清单

1.2.1 种植阶段 农作物在生长阶段中需要使用农药（杀虫剂、除草剂等）、化肥（氮肥、磷肥和钾肥等）以及电力灌溉等，这造成污染物排放。该阶段污染物排放量计算如下所示：

$$F_i^P = F_{ip}^P + F_{if}^P + F_{ii}^P \quad (1)$$

$$F_{ip}^P = \varepsilon * A_p * \omega_i \quad (2)$$

$$F_{if}^P = \varepsilon * A_f * \alpha_i \quad (3)$$

$$F_{ii}^P = \varepsilon * A_i * \beta_i \quad (4)$$

式中： F_i^P 为种植阶段污染物排放量； F_{ip}^P 为种植阶段每公顷农药使用第 i 种污染物排放量； A_p 为农药使用量； ω_i 为农药利用第 i 种污染物排放系数； F_{if}^P 为种植阶段每公顷化肥使用第 i 种污染物排放量； α_i 为化肥使用第 i 种污染物排放系数； A_f 为每公顷农田化肥使用量； F_{ii}^P 为种植阶段灌溉时第 i 种污染物排放量； β_i 为灌溉时第 i 种污染物排放系数； A_i 为电机功率； ε 为秸秆副产物在种植阶段所占排放量的比例，根据秸秆和谷物的价值比，这里取 10%。秸秆种植阶段电力利用污染物排放系数参照参考文献[24]。

1.2.2 运输阶段 秸秆发电供应链的运输阶段可以划分为初级运输和次级运输。初级运输指用农用拖拉机将秸秆运输到储存点，次级运输指用大货车将秸秆运输至发电厂。该阶段中运输工具的运行需要消耗柴油。因此，运输阶段污染物的排放量计算如下。

$$F_i^T = F_i^d + F_i^y \quad (5)$$

$$F_i^d = D_y * \theta_i \quad (6)$$

$$F_i^y = D_i * \gamma_i \quad (7)$$

$$D_y = c_y * s \quad (8)$$

$$D_i = l * c * Q \quad (9)$$

式中： F_i^T 为运输阶段污染物排放量； F_i^d 为打捆时污染物排放量； D_y 为打捆机柴油消耗量； θ_i 为打捆机第 i 种污染物排放因子； F_i^y 为运输过程第 i 种污染物排放； D_i 为运输车辆柴油消耗量； γ_i 为运输工具第 i 种污染物排放因子； c_y 是打捆机油耗系数； s 为秸秆收集面积； D_i 为运输阶段柴油消耗量； l 为运输距离； c 为运输工具油耗系数， Q 为秸秆量。不同运输工具污染物排放系数参照参考文献[16]。

1.2.3 储存阶段 秸秆运输到储存点后为了防止秸秆变质，需要对秸秆进行堆垛存储管理。这一阶段主要的物流活动是装卸搬运，在该过程中需要用到装卸叉车，假设在储存点内每吨秸秆的平均运输距离为 0.5 km，油耗系数为 0.04 L·km⁻¹。储存阶段叉车搬运秸秆污染物排放系数参照参考文献[25]。储存阶段污染物的排放量可以用下式计算。

$$F_i^{St} = D^{St} * \mu_i \quad (10)$$

$$D^{st} = l^{st} * c^{st} \quad (11)$$

式中： F_i^{st} 为储存阶段第 i 种污染物排放量； D^{st} 为叉车柴油消耗量； μ_i 为叉车搬运过程第 i 种污染物排放因子； l^{st} 为储存点叉车行驶距离； c^{st} 为叉车油耗系数。

1.2.4 发电阶段 秸秆在运输至发电厂后需要经过进一步的处理才可以完成能源转化。这一阶段的主要活动有秸秆场内运输、场内粉碎、传送和燃烧。场内单位秸秆运输距离假设为 1 km，油耗系数为 $0.04 \text{ L}\cdot\text{km}^{-1}$ 。发电阶段污染物排放系数参照参考文献[16][25]。发电阶段污染物排放量计算如下。

$$F_i^e = F_i^{et} + F_i^{eh} + F_i^{ei} \quad (12)$$

$$F_i^{et} = q * \mu_i \quad (13)$$

$$F_i^{eh} = Q * e * \sigma_i \quad (14)$$

$$F_i^{ei} = Q * \rho_i \quad (15)$$

$$q = l^{et} * c^{st} \quad (16)$$

式中： F_i^e 为发电阶段污染物排放量； F_i^{et} 为发电阶段场内叉车运输时第 i 种污染物排放量； q 为叉车燃油消耗量； μ_i 为叉车运输过程第 i 种污染物排放系数； F_i^{eh} 为场内粉碎和传送过程第 i 种污染物排放量； e 为单位秸秆粉碎和传送的能耗系数； σ_i 为能源消耗第 i 种污染物排放系数； F_i^{ei} 为发电阶段秸秆燃烧过程第 i 种污染物排放； Q 为秸秆量； ρ_i 为秸秆燃烧第 i 种污染物排放系数； l^{et} 为发电厂内叉车行驶距离。

1.3 燃煤发电污染物排放评估模型

燃煤发电生命周期包括煤炭的开采、运输和发电 3 个部分。1 kg 标准煤的热值为 7 000 千卡[26]。燃煤发电污染物的排放系数参照参考文献[25][27]。燃煤发电污染物排放计算公式如下。

$$F_{ic} = \sum_j^3 \sum_i^6 M * \varphi_{ij} \quad (17)$$

式中： F_{ic} 为燃煤发电污染物排放量； M 为燃煤替代量； φ_{ij} 为第 j 阶段第 i 种污染物排放系数。

1.4 秸秆发电供应链生命周期评价模型

秸秆是清洁可再生能源，利用秸秆替代燃煤发电可以减少污染物的排放。秸秆发电供应链污染物减排量计算公式如下。

$$F_m = F_{ic} - F^i \quad (18)$$

$$F^i = F_i^p + F_i^t + F_i^{st} + F_i^e \quad (19)$$

式中： F_m 为秸秆发电供应链污染物减排量； F_{ic} 为燃煤发电污染物排放量； F^i 为秸秆发电供应链系统污染物排放总量。

1.5 碳减排评估模型

通过对秸秆发电供应链生命周期污染物排放的计算，进一步计算秸秆发电供应链的碳排放量。同时计算燃煤发电生命周期的碳排放量，最后计算秸秆发电供应链替代燃煤发电的碳减排潜力。计算公式如下。

$$C_{CO2} = C_{ic} - C \quad (20)$$

$$C_{ic} = b * \sum_{i=1}^6 F_{ic} * \tau_i \quad (21)$$

$$C = b * \sum_{i=1}^7 F^i * \tau_i \quad (22)$$

式中： C_{CO2} 为秸秆发电供应链碳减排量； C_{ic} 为燃煤发电碳排放量； C 为秸秆发电供应链碳排放量； b 为二氧化碳减碳系数； τ_i 为第 i 种污染物的二氧化碳当量系数，二氧化碳当量系数参照参考文献[28]。

2.案例分析

本研究以 Y 秸秆发电厂为案例开展研究。根据调研可知电厂的收集半径为 35 km，从田间到存储点的运输距离为 10 km。以生产 1 万 kWh 的电量为单元进行环境性能评估。以秸

秆发电厂效率为生产 1 kWh 的电力需要消耗 1.4 kg 的秸秆，1 万 kWh 的电量需要 14 000 kg 的秸秆。生产 1 kWh 的电力需要消耗 0.123 kg 的标煤。秸秆发电供应链系统其他参数如表 1 所示。

表 1 秸秆发电供应链系统参数

Table 1 Straw power supply chain system parameters

参数 Argument	取值 Value	单位 Unit	数据来源 Data source
农药二氧化碳排放系数 CO ₂ emission coefficient of pesticides	4.93	t·t ⁻¹	参考文献[29]
化肥二氧化碳排放系数 CO ₂ emission coefficient of fertilizer	0.895 6	t·t ⁻¹	参考文献[29]
农药使用量 Pesticide use	24.2	kg·hm ⁻²	调研数据
化肥使用量 Fertilizer use	298.82	kg·hm ⁻²	参考文献[30]
电力灌溉功率 Electric irrigation power	2	kW	调研数据
拖拉机散装运输油耗 Fuel consumption of tractors transported in bulk	0.136	L·t ⁻¹ ·km ⁻¹	参考文献[16]
拖拉机打捆运输油耗 Fuel consumption for tractor bundling transport	0.101	L·t ⁻¹ ·km ⁻¹	参考文献[16]
大货车秸秆运输油耗 Fuel consumption of straw transport in large trucks	0.053	L·t ⁻¹ ·km ⁻¹	参考文献[16]
打捆机运输油耗 Baler transport fuel consumption	7.5	L·hm ⁻²	参考文献[25]
产生秸秆量 Yield of straw	15	t·hm ⁻²	调研数据
厂内粉碎传送能耗系数 Energy consumption coefficient of in-plant pulverization transfer	0.021	kWh·kg ⁻¹	参考文献[25]
二氧化碳减碳系数 Carbon dioxide reduction coefficient	0.272	/	参考文献[28]

3.结果与讨论

3.1 排放结果

3.1.1 不同秸秆发电供应链模式排放结果 通过对秸秆生命周期系统不同阶段污染物排放的分析，并利用生命周期评价的方法评估污染物的排放量，不同秸秆发电供应链模式的排放结果如表 2 所示。

表 2 不同秸秆发电供应链模式排放结果

Table 2 Emission results of different straw power supply chain models

CO ₂	CO	N ₂ O	CH ₄	SO ₂	PM10	NOx	碳排放量/ kg Carbon emission
-----------------	----	------------------	-----------------	-----------------	------	-----	-----------------------------

模式 1 Mode 1	225.00	3.97	0.005	0.47	0.52	2.89	6.13	583.84
模式 2 Mode 2	193.14	3.70	0.004	0.47	0.51	2.83	5.27	502.43
模式 3 Mode 3	161.09	3.51	0.003	0.47	0.51	2.82	4.84	457.27
模式 4 Mode 4	155.89	3.49	0.003	0.47	0.50	2.80	4.81	453.32

3.1.2 燃煤发电排放结果 根据生命周期评价方法，燃煤发电在不同阶段的排放结果如表 3 所示。

表 3 燃煤发电排放结果

Table 3 Emissions from coal-fired power generation

	CO ₂	CO	N ₂ O	SO ₂	PM10	NO _x	碳排放量/ kg Carbon emission
开采 Mine	615	0.41	/	0.03	6.15	0.46	/
运输 Transport	3 218.46	18.44	0.08	0.72	0.24	43.04	/
燃烧 Burning	3 787.35	0.43	0.01	117.09	0.43	9.73	/
总排放 Total emission	7 620.81	19.28	0.09	117.84	6.82	53.23	6 579.0

3.1.3 不同秸秆发电供应链模式减排结果 秸秆是清洁的生物质燃料，利用秸秆替代燃煤发电可以减少污染物排放。通过对秸秆发电和燃煤发电的生命周期评价结果分析，4 种秸秆发电供应链模式的污染物和碳减排结果如表 4 所示。

表 4 不同秸秆发电供应链模式的减排结果

Table 4 Emission reduction results of different straw power supply chain models

	CO ₂	CO	N ₂ O	SO ₂	PM10	NO _x	碳减排量/ kg Carbon reduction
模式 1 Mode 1	7 395.81	15.31	0.009	117.32	3.93	47.1	5 995.16
模式 2 Mode 2	7 427.67	15.58	0.009	117.33	3.99	47.96	6 076.57
模式 3 Mode 3	7 459.72	15.77	0.009	117.33	4	48.39	6 121.73
模式 4 Mode 4	7 464.92	15.79	0.009	117.34	4.02	48.42	6 125.68

3.2 结果分析

3.2.1 不同阶段污染物排放结果分析 污染物排放在不同阶段占比不同，通过生命周期评价结果可以分析不同阶段的污染物排放量。不同阶段污染物排放比例如图 2 所示（污染物排放量取 4 种模式的平均值）。从图中可以看出污染物 PM10、SO₂、CH₄、CO 主要来源于秸秆发电阶段，所占比例分别为 97%、93%、98%和 76%。CO₂ 主要来源于运输阶段，所占比例为 80%。氮氧化物也来自运输和发电阶段。这说明秸秆发电供应链的运输和燃烧发电阶段是主要的污染物排放源。

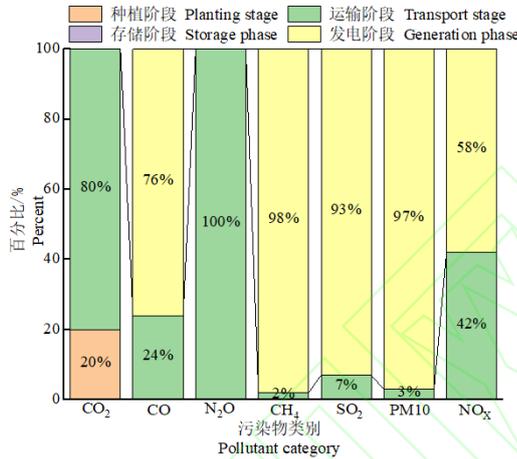


图 2 不同污染物在不同阶段所占比例

Fig.2 The proportion of different pollutants in different stages

3.2.2 运输阶段污染物排放结果分析 通过对 4 种秸秆发电供应链模式运输阶段的排放结果分析，可以明确运输模式选择对污染物排放结果的影响。不同模式下秸秆发电供应链运输阶段污染物排放结果如图 3 所示。

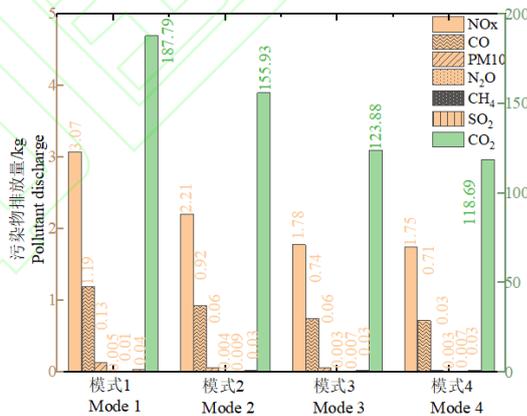


图 3 运输阶段不同模式污染物排放

Fig.3 Pollutant emissions during the transport phase under different modes

通过图 3 可以发现模式 1 的排放量最高，模式 4 的排放量最小。对比模式 1 和模式 2，模式 2 中增加中转站并使用大货车运输，污染物排放量显著降低，这说明秸秆发电供应链采用中转站方式可以减少污染物排放。对比模式 2 和模式 3，模式 3 增加中转站预处理过程，对秸秆进行致密化处理，可以提高运输效率减少污染物排放。对比模式 3 和模式 4，模式 4 采用人工收集秸秆的方式，这减少打捆机械的使用从而减少污染物的排放。通过对 4 种秸秆发电供应链模式的对比分析，可以知道减少农用机械的使用、增加秸秆的密度、提高运输效率可以有效降低污染物的排放。

3.2.3 燃煤发电与秸秆发电对比分析 对燃煤发电和秸秆发电进行碳排放量对比,燃煤发电和秸秆发电的生命周期碳排放对比如图 4 所示。

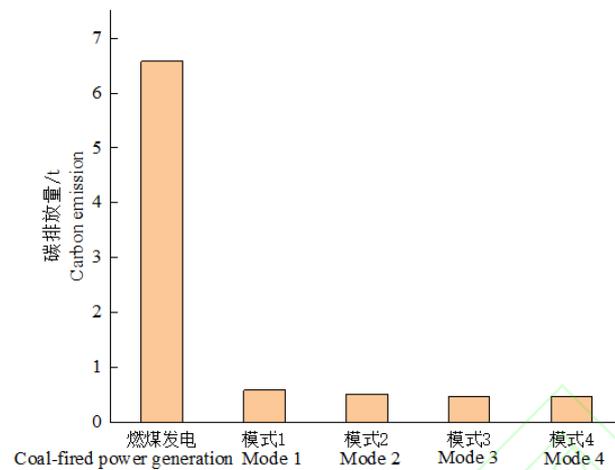


图 4 燃煤发电和不同供应链模式碳排放量

Fig.4 Carbon emissions from coal-fired power generation and different supply chain models

由图 4 可知秸秆发电的碳排放量较燃煤发电显著降低,这表明秸秆替代燃煤发电可以减少碳排放、提高环境效益。秸秆作为可再生能源,通过生物质发电技术将生物质能转化为电能,不仅实现了废弃物的循环利用,而且可以替代燃煤发电减少碳排放。因此,建议相关部门加大支持力度,加强保障政策的落实和监管,全面推广秸秆发电技术。

3.3 结果讨论

秸秆发电供应链是一个复杂的系统,物流过程复杂、生产环节多样,很多因素影响系统的减排结果,如农药使用量、秸秆收集量、秸秆收集半径、运输工具的类别和除尘技术等。因此,这里以碳排放量为评判指标,讨论不同因素对碳排放结果的影响。

3.3.1 秸秆收集半径对碳排放结果的影响 为了探讨收集半径对秸秆发电供应链系统碳排放结果的影响,这里设置了秸秆收集半径增加 10 km、20 km 和 30 km 的场景。排放结果如图 5 所示。

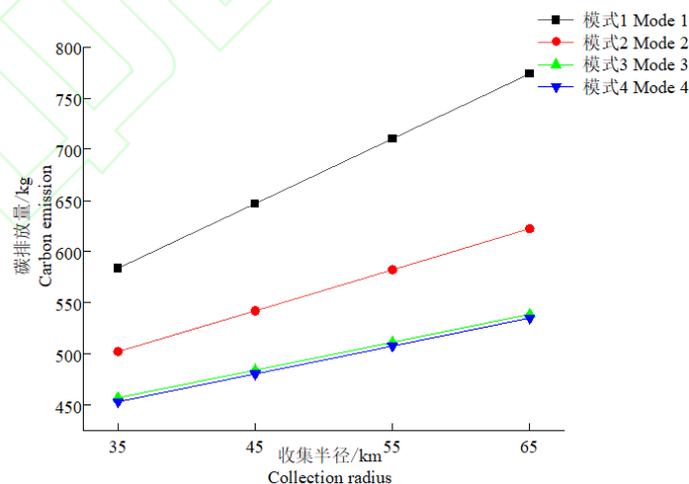


图 5 秸秆收集半径对运输阶段碳排放的影响

Fig.5 Influence of straw collection radius on carbon emission in transport stage

从图 5 可以看出随着秸秆收集半径的递增,秸秆发电供应链运输阶段碳排放量也不断增加。原因在于秸秆运输半径增大,造成运输距离增加,消耗更多的燃油。对比这 4 种秸秆发电供应链模式,可以发现模式 1 的碳排放量变化最明显,是由于该模式运输效率低、油耗大。

模式 3 的碳排放量变化幅度小,是因为该模式中秸秆的运输效率最高。因此建议秸秆发电企业整合秸秆资源以减小秸秆的收集半径,并采用高效的秸秆发电供应链模式。

3.3.2 运输工具油耗对碳排放结果的影响 在秸秆初级运输阶段使用耗油大、装载量小的拖拉机,造成较高的污染物排放。为了研究油耗变化对秸秆发电供应链生命周期评价结果的影响。这里假设在运输过程使用先进高效的运输工具。设定运输阶段拖拉机油耗降低 2%,4%,6%,8% 4 种场景分析碳排放变化情况。结果如图 6 所示。

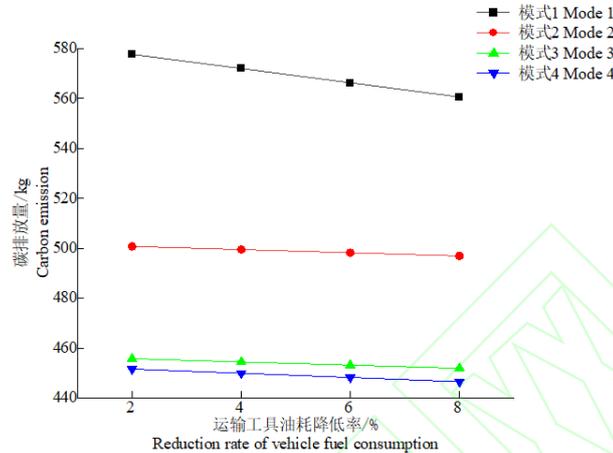


图 6 运输工具油耗变化对碳排放结果的影响

Fig.6 Effects of changes in fuel consumption of transport vehicles on carbon emissions

由图 6 可以看出,随着运输工具油耗系数的降低,秸秆发电供应链系统碳排放量也随之减少。这是因为油耗系数降低,在秸秆运输过程中消耗柴油变少。因此建议秸秆发电企业选用运输效率高、油耗低的运输工具。

3.3.3 化肥农药使用对碳排放结果的影响 通过秸秆发电供应链的生命周期评价可知,在种植阶段中使用化肥农药会造成大量的碳排放。为了明确化肥农药使用对排放结果的影响,这里设置化肥农药使用量减少 2%、4%、6%和 8%等场景。结果如图 7 所示。

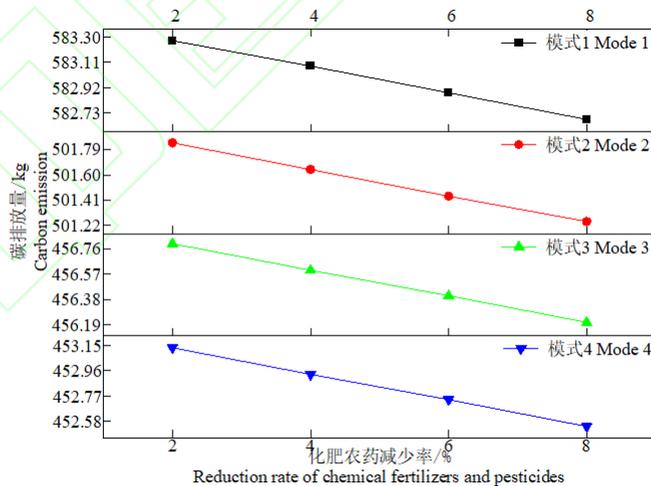


图 7 农药化肥使用量减少对碳排放结果的影响

Fig.7 The effect of pesticide and fertilizer use reduction on carbon emission results

由图 7 可以看出,随着化肥农药使用量的减少,不同秸秆发电供应链模式碳排放量逐渐降低。原因在于化肥农药在生产和使用过程中会排放污染物。因此建议农业生产减少化肥农药的使用,增加有机肥的利用可以有效的减少碳排放。

3.3.4 除尘技术对碳排放结果的影响 秸秆燃烧发电排放大量的污染物,如 CO₂、PM10、NO_x等,这些污染物直接排入大气中会造成环境污染,加剧温室效应。污染物经过除尘技术后排入大气可以减少对环境的影响。为了明确除尘技术对排放结果的影响,本文构建不同除尘效率场景研究除尘效率增加对碳排放结果的影响。结果如图 8 所示。可以发现在除尘技术效率提高后,秸秆发电供应链系统的碳排放逐渐降低。因此,建议秸秆发电企业开发高效的除尘技术,提高系统的碳减排能力。

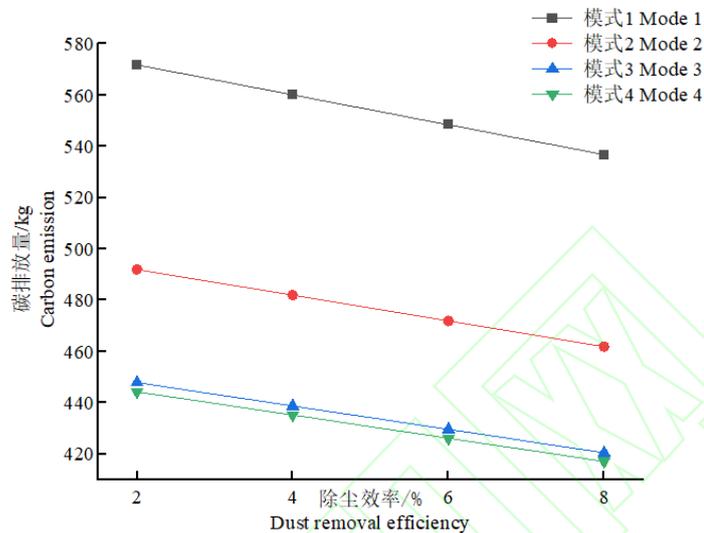


图 8 除尘技术对碳排放结果的影响

Fig.8 Effect of dust removal technology on carbon emission results

3.4 秸秆发电供应链模式选择

对 4 种秸秆发电供应链模式的研究,发现打捆技术、运输工具、预处理技术和除尘技术的选择对生命周期评价结果具有较大影响。通过对不同模式减排结果的比对,发现模式 4 的碳排放最少,模式 1 的碳排放最多。对模式应用场景的分析,建议在不考虑收集效率的情况下,采用模式 4 的秸秆发电供应链具有最大的环境效益。在考虑秸秆收集效率的情况下,模式 3 的秸秆发电供应链是发电企业的最佳选择。当秸秆的运输距离较短时,模式 3 中秸秆的预处理会增加碳排放,模式 2 的秸秆发电供应链是最优的选择。秸秆发电供应链模式的选择需要综合考虑经济、环境、技术和社会方面,根据实际生产情况选择最佳的秸秆发电供应链模式。

4.结论与讨论

秸秆发电供应链是秸秆发电产业的重要组成部分,秸秆发电供应链的经济性、环境性和可持续发展能力是研究的重点。王培刚^[25]构建秸秆直燃发电供应链的生命周期评价模型,对供应链系统的污染物排放量进行评价和测算,并与露天燃烧和燃煤发电场景进行对比,结果表明秸秆发电供应链具有较好的减排能力。陈博^[31]利用投入产出法研究不同秸秆发电供应链模式的经济性能,通过对构建的 2 种秸秆发电供应链模式进行成本分析效益计算,结果表明机械收集模式具有较高的收益。吴军^[32]等分析秸秆发电供应链中农户、中间商、发电厂的关系,构建供应链集成化合作模式,并采购合作契约增加供应链的可持续发展。借鉴已有研究成果,这项研究构建了 4 种秸秆发电供应链模式,并增加了秸秆致密加工过程,细化了秸秆发电供应链的作业活动,通过分析不同阶段污染物的排放量,选取碳减排量为评价指标开展生命周期评价。很多研究多采用生命周期评价方法对秸秆发电供应链污染物排放量进行计算,但是缺少对种植阶段农药化肥使用和电力灌溉产生污染物排放的分析,这项研究增加了对化肥农药和电力灌溉产生污染物的计算。秸秆发电具有较强的碳减排能力。在双碳背

景下关于碳减排的研究较多。刘子仟等^[33]建立燃油汽车与电动汽车在多种因素影响下的汽车减碳模型,并通过算例分析验证模型的适用性。王彦林^[34]基于30个省份的数据,实证分析绿色金融对区域碳排放量的影响,研究表明绿色金融对区域碳排放量具有明显的抑制作用。在果蔬运输领域庞舒华^[35]采用系统动力学理论构建冷链动力模型,设置不同情景,探究果蔬冷链物流系统的碳减排潜力。但是在农业废弃物资源化利用领域关于碳减排的研究较少,因此这里以秸秆发电供应链系统为对象开展生命周期评价,探究不同秸秆发电供应链模式的碳减排能力。

这项研究以秸秆发电供应链的碳减排能力为目标,利用生命周期评价方法对4种秸秆发电供应链模式开展研究,评估不同供应链模式下秸秆替代燃煤发电的碳减排结果。结果表明秸秆发电具有较大的减排潜力,4种秸秆发电供应链模式下碳减排量分别减少5995.16、6076.57、6121.73和6125.68 kg。研究结果表明秸秆运输和燃烧发电阶段是污染物的主要排放源,需要重点治理。通过讨论不同因素对秸秆发电供应链碳排放结果影响,发现秸秆收集半径、运输工具油耗、化肥农药和除尘技术等因素对碳排放结果有明显的影响,并给出相关建议提高秸秆发电供应链的碳减排能力。最后对4种秸秆发电供应链模式进行对比分析,给出不同生产场景下秸秆发电供应链模式的选择方案。研究结果可以推动秸秆发电行业的可持续发展。

参考文献 References:

- [1] 曹磊. 秸秆转化为生物质能源的利用策略研究[J]. 农业技术与装备, 2020(11): 91-92.
CAO L. Study on utilization strategy of straw transforming into biomass energy[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2020(11): 91-92.
- [2] 李伟, 刘新萍, 潘鹏飞, 等. 玉米秸秆气化集中供气集成模式的研究[J]. 河南农业大学学报, 2015, 49(2): 213-218.
LI W, LIU X P, PAN P F, et al. Research of the mode of corn stover gasification and gas centralized supply[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2015, 49(2): 213-218.
- [3] 张全国, 焦有宙, 刘虹, 等. 秸秆类生物质厌氧发酵补氢强化技术研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(3): 397-403.
ZHANG Q G, JIAO Y Z, LIU H, et al. Research progress of hydrogen supplement enhancement technology for anaerobic fermentation of straw biomass[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(3): 397-403.
- [4] 陈林. 兴义市秸秆综合利用现状及对策分析[J]. 种子科技, 2023, 41(22): 139-141.
CHEN L. Present situation and countermeasure analysis of comprehensive utilization of straw in Xingyi city[J]. Seed Science & Technology, 2023, 41(22): 139-141.
- [5] 左伟锋. 濮阳市农作物秸秆高效利用现状问题及建议[J]. 南方农业, 2023, 17(12): 221-223, 251.
ZUO W F. Current situation, problems and suggestions on efficient utilization of crop straw in Puyang City[J]. South China Agriculture, 2023, 17(12): 221-223, 251.
- [6] 王颖洁, 张朋, 宋晨愿, 等. 秸秆生物质综合利用的现状分析[J]. 现代农业, 2023, 48(4): 108-112.
WANG Y J, ZHANG P, SONG C Y, et al. Analysis on the current situation of comprehensive utilization of straw biomass[J]. Modern Agriculture, 2023, 48(4): 108-112.
- [7] 张国平, 王永豪. 我国生物质转化技术应用现状及展望[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(17): 1-5, 10.
ZHANG G P, WANG Y H. Application status and prospect of biomass conversion technology in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(17): 1-5, 10.

- [8] 王潇. 广安市农作物秸秆资源综合利用现状及对策分析[J]. 南方农业, 2022, 16(2): 182-184.
WANG X. Analysis on the present situation and countermeasures of comprehensive utilization of crop straw resources in Guang'an City[J]. South China Agriculture, 2022, 16(2): 182-184.
- [9] 潘昕昕. 生物质发电供应链系统异质利益主体协同研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
PAN X X. Synergetic research on heterogeneous stakeholders of biomass electricity generation supply chain[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [10] GUO X Z, VOOGT J, ANNEVELINK B, et al. Optimizing resource utilization in biomass supply chains by creating integrated biomass logistics centers[J]. Energies, 2020, 13(22): 6153.
- [11] 李锦. 秸秆收储中心选址及收集路径优化研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
LI J. Study on location and collection path optimization of straw collection and storage center[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.
- [12] WANG Z F, HOU T J, WANG Z W. Revenue Coordination of Straw Power Generation Supply Chain Under Carbon Trading Environment[J]. Waste and Biomass Valorization, 2022, 14(5): 1769-1785.
- [13] BILGILI F, ÖZTÜRK İ, KOÇAK E, et al. The influence of biomass energy consumption on CO₂ emissions: A wavelet coherence approach[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, 23(23): 1-19.
- [14] BOTELHO A, LOURENÇO-GOMES L, PINTO L, et al. Using stated preference methods to assess environmental impacts of forest biomass power plants in Portugal[J]. Environment Development & Sustainability, 2016, 18(5): 1323-1337.
- [15] ROSSI S, TUBIELLO F N, PROSPERI P, et al. FAOSTAT estimates of greenhouse gas emissions from biomass and peat fires[J]. Climatic Change, 2016, 135(34): 1-13.
- [16] 王占武. 秸秆发电供应链评价及政策设计研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.
WANG Z W. Research on evaluation and policy design of straw power generation supply chain[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022.
- [17] 张晓东, 盛国成. 甘肃省农作物秸秆收集处理现状及发展对策[J]. 中国农机化, 2012, 33(3): 20-22.
ZHANG X D, SHENG G C. Situation and development countermeasure of collecting and dealing with crop straw in Gansu Province[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012, 33(3): 20-22.
- [18] 霍丽丽, 赵立欣, 姚宗路, 等. 农业生物质能温室气体减排潜力[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 179-187.
HUO L L, ZHAO L X, YAO Z L, et al. Potentiality of agricultural biomass energy for greenhouse gas emission reduction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(22): 179-187.
- [19] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 349-359.
HUO L L, YAO Z L, ZHAO L X, et al. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 349-359.
- [20] 马国杰, 朱琳影, 张苗苗, 等. 秸秆沼气发电技术生命周期评估及经济分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 162-168.
MA G J, ZHU L Y, ZHANG M M, et al. Life cycle assessment and economic analysis of straw biogasification power generation technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(24): 162-168.
- [21] 朱金陵, 王志伟, 师新广, 等. 玉米秸秆成型燃料生命周期评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 262-266.
ZHU J L, WANG Z W, SHI X G, et al. Life cycle assessment of corn straw pellet fuel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 262-266.

- [22]王伟, 赵黛青, 杨浩林, 等. 生物质气化发电系统的生命周期分析和评价方法探讨[J]. 太阳能学报, 2005, 26(6): 752-759.
- WANG W, ZHAO D Q, YANG H L, et al. Discussion on life cycle analysis and evaluation method of biomass gasification power generation system[J]. Journal of Solar energy, 2005, 26(6): 752-759.
- [23] SHAFIE S M, MASJUKI H H, MAHLIA T M I. Life cycle assessment of rice straw-based power generation in Malaysia[J]. Energy, 2014, 70: 401-410.
- [24] 李佳仑, 苑翔. 北方地区生物质颗粒燃料全生命周期碳排放评价[J]. 山西建筑, 2023, 49(15): 22-24, 38.
- LI J L, YUAN X. Assessment of carbon emissions from biomass particulate fuel throughout its lifecycle in the northern region[J]. Shanxi Architecture, 2023, 49(15): 22-24, 38.
- [25] 王培刚. 秸秆直燃发电供应链气体及颗粒污染物排放的生命周期评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 229-237.
- WANG P G. Emission analysis of air and PM pollution on straw power plant supply chain based on life cycle assessment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 229-237.
- [26] 孙传伯. 生物质能源工程[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2015: 13-13.
- SUN C B. Biomass energy engineering[M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2015: 13-13.
- [27] 国家环保总局. 工业污染物产生与排放系数手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- State Environmental Protection Administration. Manual of production and emission factors of industrial pollutants[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.
- [28] WANG Z W, HUANG W F, WANG H, et al. Research on the improvement of carbon neutrality by utilizing agricultural waste: Based on a life cycle assessment of biomass briquette fuel heating system[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 140365.
- [29] 陈舜. 中国农田化肥农药生产的温室气体排放估算[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- CHEN S. Estimation of greenhouse gas emissions from farmland chemical fertilizer and pesticide production in china[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [30] 陈晓芳. 安徽省不同作物化肥施用能耗和碳排放分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- CHEN X F. Energy consumption and CO₂ emission analysis from fertilizer application on different crops in Anhui Province[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [31] 陈博. 秸秆发电燃料收储运物流体系研究: 以河南社旗县来发秸秆回收利用公司为例[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- CHEN B. Study on logistics system of straw power generation fuel collection, storage and transportation[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2015.
- [32] 吴军, 张敏玉, 尹文琦, 等. 秸秆发电供应链上游收集与采购合作契约设计[J]. 供应链管理, 2020, 1(7): 78-87.
- WU J, ZHANG M Y, YIN W Q, et al. Upstream collection contract design in straw power supply chain[J]. Supply Chain Management, 2020, 1(7): 78-87.
- [33] 刘子仟, 黄莉, 陆斌泉, 等. 计及驾驶习惯影响的电动汽车碳减排量计算方法[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(02): 62-69.
- LIU Z Q, HUANG L, LU X Q, et al. Calculation method of carbon emission reduction of electric vehicles taking into account the influence of driving habits.[J]. Power demand side management, 2024, 26(02): 62-69.
- [34] 王彦林, 张子璇, 刘艳华. 绿色金融对区域碳减排的影响及作用机制研究[J]. 会计之友, 2024(5): 79-86.
- WANG Y L, ZHANG Z X, LIU Y H. Study on the impact and mechanism of green finance on regional carbon emission reduction[J]. Friends of Accounting, 2024(5): 79-86.

[35] 庞舒华. 果蔬冷链物流系统碳排放测算及减排路径[J]. 物流技术, 2023, 42(1): 55-59.

PANG S H. Carbon emission measurement and reduction path of fruit and vegetable cold chain logistics system[J]. Logistics Technology, 2023, 42(1): 55-59.

