

可持续发展目标下农作物秸秆收集运输的碳减排优化分析

刘城宇¹, 贺正楚^{1*}, 卢小龙²

(1. 长沙理工大学经济与管理学院, 长沙 410114; 2. 中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司, 长沙 410007)

摘 要: 在可持续发展目标下, 加强农作物秸秆的回收利用是解决农村地区资源浪费和环境污染问题的重要途径。该研究以在方形区域收集秸秆的生物质电厂收集运输系统为研究对象, 着重从碳减排视角构建秸秆收集运输模型, 优化求解运输排放外部成本最小的收储点个数与回收距离。通过与不同收集系统的对比分析, 综合评价所建系统在经济、环境、效率方面的优势以及可持续发展目标的联系, 提出推动秸秆资源低碳回收和高效利用的政策建议。基于河北省统计数据的研究结果显示: 河北省秸秆资源丰富, 绝大部分地区已具备良好的收集条件, 仅廊坊、沧州、唐山的资源供需匹配度较低; 所建系统在电厂外围安置 12 个收储点, 没有收集盲区, 避免了资源浪费, 收集效率提高 18.75%, 碳排放外部成本减少 83.98%, 环境问题得到有效控制; 此外, 该系统还为环境保护、减少贫困、公共卫生和资源利用相关的 10 个可持续发展目标提供了多维度支撑。该研究设计的高效收集运输系统, 提供了生物质能开发的低碳路径, 对进一步构建农村生物质循环供能的闭环供应链一体化系统工程、推动农村地区的农业现代化和可持续能源发展, 具有十分重要的理论和现实意义。

关键词: 农业; 生物质; 发电; 可持续发展目标; 农作物秸秆; 收集运输系统; 碳减排

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.029

中图分类号: TM619

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0239-10

刘城宇, 贺正楚, 卢小龙. 可持续发展目标下农作物秸秆收集运输的碳减排优化分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 239-248. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.029 <http://www.tcsae.org>

Liu Chengyu, He Zhengchu, Lu Xiaolong. Optimization analysis of carbon emission reduction from crop straw collection and transportation under the sustainable development goals[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 239-248. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.029 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

农作物秸秆是重要的生物质原料, 不仅可以压缩成高密度固体燃料用于电厂发电, 还能通过提炼加工制成生物乙醇、生物柴油和天然气, 替代交通运输行业的汽油消费^[1-6]。中国作为世界第一大农业生产国, 农作物资源丰富, 但由于分布分散、储运不便、收集成本高等原因导致农业资源的利用效果欠佳^[7-8]。所以生物质电厂通常基于“就近圆形辐射收集”原则划定资源收集区域, 以解决高成本、难储运等问题。可圆形收集区域是单点相交, 相邻区域之间的衔接处存在没有覆盖的收集盲区, 致使每年数 10 亿 t 的秸秆因未被回收而随意废弃或露天焚烧。大量的资源浪费与严重的空气污染对农村地区的生态文明建设构成了极大威胁, 是中国亟需解决的社会和环境问题^[9-10]。而如何消除秸秆废弃焚烧带来的不利影响、提高生物质能在经济发展和能源转型中的参与度, 同样是近年来全球关注的热点, 与联合国可持续发展目标 (Sustainable Development Goals, SDGs) 密切相关^[11]。

其中, 加强资源的回收利用是实现农业废弃物妥善管理的关键环节, 也是先进制造产业链发展的重点领域, 对健康生活、减贫、粮食和资源安全、气候变化、负担得起的清洁能源、合理的消费和生产等 SDGs 起到积极地促进作用^[12-16]。可见, 在能源短缺与生态保护的双重压力下, 形成高效、经济、低碳的废弃物收集运输管理和循环利用模式具有重要的科学意义与广阔的应用前景。

废弃物秸秆的循环利用涵盖固化、直燃发电、气化发电、液化等资源化处理方式。各种方式的技术特点与工艺流程已被学界重点研究与反复论证, 如何提高秸秆原料的收集运输效率是生物质产业进一步发展所面临的必要挑战。部分学者利用运筹学方法, 从距离、时间、成本等角度优化识别运输车辆行驶路线^[17-18], 建立了较为完备的收集路径规划体系。袁嘉晨等^[19]综合考虑原料收购、运输、存储以及人工等费用, 结合微元法构建收集成本模型, 测算收集运输范围。张得志等^[20]通过引入 Logit 模型和主从博弈模型, 研究秸秆收购价格与政府补贴价格对农户选择偏好和电厂收集成本的影响。除了上述成本分析, 效率评价同样涉及运输排放导致的环境影响。Yang 等^[21]使用生命周期法简化计算了直线运输生物质残渣所产生的温室气体排放。不足的是现有文献多以生物质需求量估算秸秆收集范围, 缺乏对电厂外围收储点回收区域的全面考虑, 未就圆形辐射收集模式的收集盲区问题展开深入探讨; 所用规划方法旨在提高收集效

收稿日期: 2022-01-04 修订日期: 2022-05-10

基金项目: 湖南省社会科学成果评审委员会课题 (XSP22ZDIO19); 国家社会科学基金项目 (19BGL170); 湖南省研究生科研创新项目 (CX2018B525)

作者简介: 刘城宇, 博士生, 研究方向为能源政策、生态经济、可持续发展。

Email: 173943100@qq.com

*通信作者: 贺正楚, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为产业经济。

Email: hezhengchu@163.com

率或减少运输成本, 鲜有从碳排放视角建立收集运输优化模型, 与 SDGs 的关联度也较低; 农作物秸秆虽然分布广泛, 但不同地区的资源潜力与电力需求匹配度存在差异, 忽略地域特征研究生物质发电项目, 其理论预估的盈利能力和供电稳定性往往与实际运行结果相违背。相比之下, 构建“资源无浪费”的高效收集运输系统, 并以碳减排为目标优化收储点数量, 是对现有理论体系的有力补充。特别在 SDGs 与“双碳”目标背景下, 研究成果将更具指导意义与实践价值。

鉴于此, 本文在充分考虑农作物分布特征、生物质开发潜力以及家庭电力消费需求的基础上, 评估秸秆资源的供需匹配度。为弥补圆形辐射收集模式的不足、避免资源未被回收导致的浪费, 构建立足于方形区域收集秸秆的生物质电厂收集运输系统, 并通过优化收储点个数与回收距离, 得到秸秆收集的最小碳排放与环境外部成本。针对不同的发电技术, 着重从收集范围与排放角度, 对比分析所建系统在经济、环境以及效率方面的优势。基于分析结果, 挖掘废弃物收集管理与 SDGs 的内在联系, 提出加强秸秆资源回收利用的政策建议, 以期全面推进乡村振兴、加快农业农村现代化、建设美丽中国提供普适、可推广的科学方法支撑。

1 模型构建

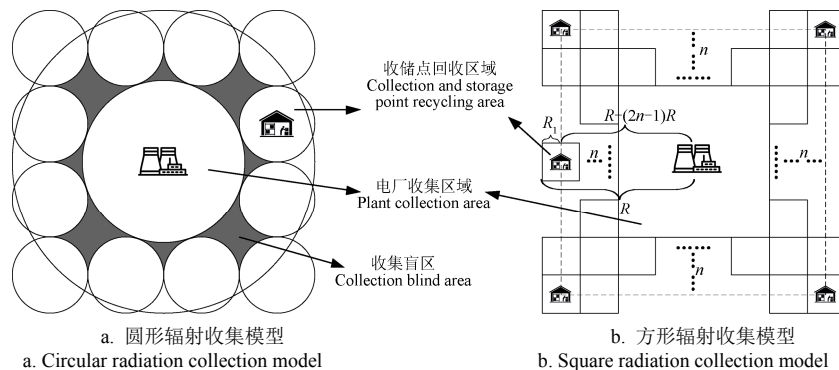
本文以农作物秸秆为研究对象, 以生物质发电为终端用途, 构建统一化的资源收集系统与标准化的运输排放模型。

1.1 秸秆资源量评估模型

秸秆作为农业生产的最大副产品, 其产量并未列入国家农业数据库的统计范畴。通常做法是用农作物产量与草谷比的乘积估算秸秆资源量, 其表达式^[22]为

$$C_b = \sum_{x=1}^X C_{a,x} \theta_x \quad (1)$$

式中 C_b 是秸秆总产量, kg; $C_{a,x}$ 是农作物 x 的产量, kg; θ_x 是农作物 x 的草谷比系数, %; X 指农作物种类。



注: R_1 为收储点到各自回收边界的垂直距离, 即单个回收区的边长和相邻收储点的间隔距离均为 $2R_1$; 如果共建立 n 环收储点, 则电厂收集秸秆区域的边长为 $2(R-2nR_1)$, R 为电厂到收集边界的垂直距离; 由外往内标记, 第 i 环上的收储点至电厂的最短距离为 $R-(2i-1)R_1$ 。
Note: R_1 is the vertical distance from the collection storage point to the recycling boundary, that is, the side length of a single recycling area and the spacing distance between adjacent collection storage points are $2R_1$. If n -ring collection storage point is established, the side length of the straw collection area of the power plant is $2(R-2nR_1)$, and R is the vertical distance from the power plant to the collection boundary. Marked from outside to inside, the shortest distance from the storage point on the i ring to the power plant is $R-(2i-1)R_1$.

图 1 秸秆收集范围简化图

Fig.1 Simplified diagram of straw collection ranges

1.2 生物质发电模型

生物质发电量的大小取决于发电效率和资源投入量, 其表达式^[23]为

$$G_j = \frac{B_j \cdot \text{LHV} \cdot \eta_j}{3600} \quad (2)$$

式中 G_j 是第 j 类技术的发电量, kW·h; B_j 是第 j 类技术发电所投入的秸秆资源量, kg; LHV 是秸秆的低位热值, kJ/kg; η_j 指第 j 类技术的发电效率, %。

1.3 秸秆资源收集运输的碳排放评估模型

为便于求解分析, 本文忽略地理位置、季节交替、天气变化对种植产量与交通出行的实际影响。假定农作物秸秆在收集区域均匀生长、均匀分布, 且产量与车辆运输能力满足电厂日常所需。由于收集路径的复杂性与不确定性, 无法准确获取运输车辆的行驶距离, 但可通过对收集区域的范围积分, 得到运输车辆的行驶油耗。而收集范围的大小是由秸秆资源的需求量与单位面积产量共同决定, 其表达式为

$$S = \frac{B_j}{\rho \cdot k} \quad (3)$$

式中 S 是秸秆收集区域的面积, km^2 ; ρ 是秸秆单位面积产量, kg/km^2 ; k 是回收系数, 即秸秆可用率, %。

秸秆收集以生物质电厂为中心, 周边均匀安置收储点。电厂附近秸秆由电厂收集, 远处秸秆通过收储点向农户回收, 再运送至电厂。为避免就近圆形辐射收集存在未收集区域导致的资源浪费, 规定电厂与收储点的收集范围近似方形, 收集区域互相接壤, 即实现了收集区域全覆盖, 没有收集盲区。且各收储点的规模大小、覆盖面积、回收车型号均相同, 如图 1 所示。因此, 秸秆收集区域的面积 S 又可由电厂到收集边界的垂直距离 R 表示。

$$S = 4R^2 \quad (4)$$

$$R = \sqrt{\frac{B_j}{4 \cdot \rho \cdot k}} \quad (5)$$

根据图 1 所示可计算第 i 环收储点的数量，即由连接 i 环所有收储点而成的正方形（图 1b 虚线围成）周长，除以收储点间隔距离得到，其表达式为

$$m_i = \frac{4 \times 2 [R - (2i - 1)R_1]}{2R_1} \tag{6}$$

式中 m_i 是第 i 环的收储点个数，其结果四舍五入取整数。

秸秆收集过程中的碳排放主要来自车辆运输时的柴油消耗，包括收储点回收秸秆产生的油耗 O_1 、秸秆从收储点运送至电厂产生的油耗 O_2 以及电厂收集秸秆产生的油耗 O_3 。参考并调整文献[24]中的运输费用模型，计算收集秸秆各阶段产生的油耗与碳排放 E ，其表达式为

$$E = (O_1 + O_2 + O_3) \delta_o \tag{7}$$

$$O_1 = 4 \int_0^{R_1} 2r \cdot k \cdot \rho \cdot r \cdot o_1 \, dr \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot T_1$$
$$= \frac{8}{3} k \cdot \rho \cdot o_1 \cdot R_1^3 \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot T_1 \tag{8}$$

$$O_2 = 4k \cdot \rho \cdot o_2 \cdot R_1^2 \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot T_2 [R - (2i - 1)R_1] \tag{9}$$

$$O_3 = 4 \int_0^{(R-2nR_1)} 2r \cdot k \cdot \rho \cdot r \cdot o_1 \, dr \cdot T_3$$
$$= \frac{8}{3} k \cdot \rho \cdot o_1 \cdot T_3 (R - 2nR_1)^3 \tag{10}$$

式中 r 为收储点回收范围，m； δ_o 是柴油消耗的碳排放系数，kg/L； o_1 与 o_2 是秸秆回收车与货运车的单位油耗，L/(t·km)。回收车与货运车不同的使用目的决定了这两类运输车在容量和油耗上的差异。由于从收储点至电厂的距离较远，选用货运车运输确保了更强的装载能力，其油耗是回收车的 a 倍。 T_1 、 T_2 、 T_3 是收储点回收秸秆、秸秆从收储点运至电厂以及电厂收集秸秆所需的车辆运输

次数，其表达式为

$$T_1 = \frac{R_1^2}{R^2} \cdot \frac{B_j}{t_1} \tag{11}$$

$$T_2 = \frac{R_1^2}{R^2} \cdot \frac{B_j}{t_2} \tag{12}$$

$$T_3 = \frac{(R - 2n \cdot R_1)^2}{R^2} \cdot \frac{B_j}{t_1} \tag{13}$$

式中 t_1 与 t_2 是回收车与货运车的容量，t。

生物质电厂选用重型运输车辆收集秸秆，排放了二氧化碳，对环境产生了负面影响，应由电厂支付费用进行修复，即是运输秸秆引起的外部成本，其表达式为

$$C_e = E \cdot P \tag{14}$$

式中 C_e 是秸秆运输外部成本，元； P 是排污费，元/kg。

通过优化收储点到回收边界的距离 R_1 ，调整收储点数量，最大程度地降低车辆运输油耗与碳排放外部成本。

2 数据来源

河北省作为传统农业大省，农作物资源丰富，以水稻、小麦、玉米、大豆为主的粮食作物占据了其中较大产量比重。因此，以河北省为例，在农村地区构建秸秆资源收集系统具有极强的复制性、推广性和操作性。参考来自《河北农村统计年鉴 2021》有关农作物产量、耕地面积以及家庭用能等相关统计数据，结合各市的资源禀赋条件与种植结构特点，重点研究水稻、小麦、玉米、谷子、其他谷类、豆类、薯类、花生、油菜、芝麻、向日葵、棉花共 12 种农作物的秸秆产量。各类农作物的草谷比系数参考文献[25-26]，详情见表 1。

表 1 河北省主要农作物草谷比系数

Table 1 Straw coefficient of primary crops in Hebei Province

农作物 Crops	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize	谷子 Millet	其他谷类 Other grain	豆类 Beans	薯类 Tubers	花生 Peanut	油菜 Rape	芝麻 Sesame	向日葵 Sunflower	棉花 Cotton
草谷比 Straw coefficient	0.95	1.17	1.15	1.73	2.32	1.36	0.42	0.85	2.57	1.78	2.63	2.62

直燃与气化技术是当前两类主流的生物质发电方式，也是工艺最为基础、技术最为成熟的废弃物利用手段，已在绝大多数电厂或地区普及应用和推广示范^[27-28]。因此，对比分析直燃与气化技术的

基础特性和固有属性，其研究成果极具代表性与普适性。两类技术的发电效率、运输车辆的装载能力与行驶油耗等数据参考文献[11,25-27,29]，具体参数见表 2。

表 2 秸秆发电与收集运输的相关参数

Table 2 Relevant parameters of straw power generation, collection and transportation

参数符号 Parameters	含义 Meaning	值 Value	参数符号 Parameters	含义 Meaning	值 Value
O_1	回收车单位油耗/(L·km ⁻¹ ·t ⁻¹)	0.67	η_1	直燃发电效率/%	15
δ_o	柴油消耗的碳排放系数/(kg·L ⁻¹)	2.67	η_2	气化发电效率/%	30
k	回收系数	0.8	t_1	回收车容量/t	20
LHV	秸秆低位热值/(kJ·kg ⁻¹)	15 222.98	t_2	货运车容量/t	50

3 结果与分析

3.1 河北省秸秆资源与电力消费的分布特征

依据河北省农村地区的农作物产量、耕地面积以及

用电量等数据，评估各市的秸秆产出水平与电力消费需求，结果见表 3、表 4 与图 2。

表 3 显示，河北省秸秆资源总产量 4 475.50 万 t，折合标煤 2 237.6 万 t。其中，邯郸产量最高，约 633.89 万 t。邢

台、保定、石家庄、沧州、衡水的秸秆年产量也都超过 500 万 t。上述 6 市产量占全省总产量的 77.29%，耕地面积为全省总面积的 73.27%。而秦皇岛、廊坊、承德、唐山、张家口 5 市的秸秆产量则未到 320 万 t。从地理位置上看，高产量地区主要集中在河北省中南部、太行山东侧、子牙

河下游。该区域以平原为主，河运发达、交通便利，有利于农作物生长与秸秆回收。低产量地区位于坝上高原与燕山山脉交汇处，平均海拔 1 200 m。此处山地、林地、丘陵居多，耕地较少，且通达性差。复杂的地理环境影响了北部地区的种植产量，增加了秸秆资源的利用难度。

表 3 河北省各市秸秆产出水平
Table 3 Straw yield of each city in Hebei Province

城市 City	耕地面积 Cultivated land area/km ²	耕地占比 Ratio of cultivated land/%	秸秆总产量 Total straw yield/万 t	秸秆产量占比 Ratio of straw yield/%	秸秆单位面积产量 Straw yield per unit area/(t·km ⁻²)
石家庄 Shijiazhuang	7 945.34	11.47	583.22	13.03	734.04
唐山 Tangshan	5 675.17	8.19	245.18	5.48	432.02
秦皇岛 Qinhuangdao	1 511.94	2.18	57.92	1.29	383.10
邯郸 Handan	8 646.64	12.48	633.89	14.16	733.10
邢台 Xingtai	8 927.13	12.88	601.28	13.43	673.54
保定 Baoding	8 215.87	11.86	586.87	13.11	714.31
张家口 Zhangjiakou	5 447.21	7.86	316.35	7.07	580.75
承德 Chengde	2 957.75	4.27	217.17	4.85	734.25
沧州 Cangzhou	9 230.64	13.32	534.37	11.94	578.90
廊坊 Langfang	2 925.18	4.22	179.06	4.00	612.12
衡水 Hengshui	7 800.69	11.26	520.20	11.62	666.87
合计 Total	6 9283.56	100	4 475.50	100	645.97

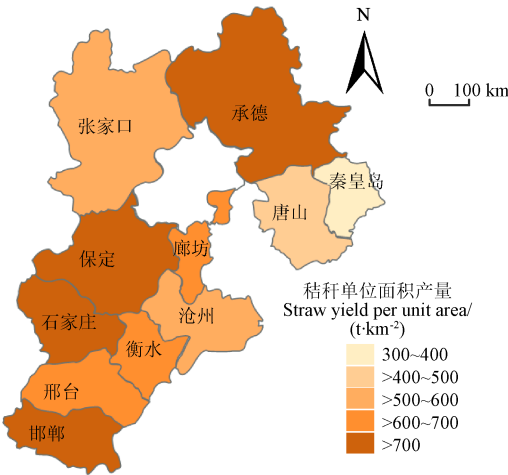


图 2 河北省秸秆资源单位面积产量的区域分布特征
Fig.2 Distribution characteristics of straw resource yield per unit area in Hebei Province

上述秸秆资源产量代表了河北省农业废弃物的可用规模与开发潜力，而单位面积产量则决定了各市秸秆收

集的区域范围与碳排放量。图 2 显示，承德、石家庄、邯郸、保定属于资源高密度区，单位面积秸秆产量超过 700 t/km²。其中，承德虽然地处冀北山区，耕地面积仅占全省的 4.27%，但秸秆年产量却有 217.17 万 t，致使其资源密度达到全省最高的 734.25 t/km²。单位面积产量在 500~700 t/km²之间的中密度区覆盖了邢台、衡水、廊坊、张家口与沧州。而东部的唐山与秦皇岛则是资源低密度区，单位面积秸秆产量不足 500 t/km²。总体而言，河北绝大部分地区已具备良好的秸秆收集条件，全省单位面积产量达到 645.97 t/km²。

由表 4 可知，河北省中部地区的家庭用电需求较大。沧州、保定、廊坊、石家庄 4 市的电力消费量均超过 60 亿 kW·h，平均每户家庭年用电 2 651.77 kW·h。此外，唐山与衡水的单户家庭用电量也超过了 2 000 kW·h。电力消费最少的地区是秦皇岛与张家口，平均每户家庭仅用电 706.18 与 711.58 kW·h。对应各市的资源密度，张家口与秦皇岛的秸秆供应充足，生物质发电可基本满足家庭日常所需。廊坊、沧州与唐山的秸秆供应相对紧张，较弱的资源供需匹配度限制了生物质产业在这些地区的发展。

表 4 河北省各市电力消费水平
Table 4 Electricity consumption of each city in Hebei Province

城市 City	家庭用电量 Household electricity consumption/(×10 ⁴ kW·h)	家庭用电量占比 Ratio of household electricity consumption/%	家庭户数 Number of households/×10 ⁴	家庭户数占比 Ratio of household number/%	每户家庭用电量 Electricity consumption per household/(kW·h)
石家庄 Shijiazhuang	646 378	12.89	311.49	12.57	2 075.12
唐山 Tangshan	514 708	10.26	230.83	9.31	2 229.81
秦皇岛 Qinhuangdao	83 513	1.67	118.26	4.77	706.18
邯郸 Handan	426 433	8.50	274.41	11.07	1 554.00
邢台 Xingtai	336 401	6.71	249.89	10.08	1 346.20
保定 Baoding	735 103	14.66	417.19	16.83	1 762.03
张家口 Zhangjiakou	138 971	2.77	195.3	7.88	711.58
承德 Chengde	242 468	4.83	141.98	5.73	1 707.76
沧州 Cangzhou	860 695	17.16	227.18	9.16	3 788.60
廊坊 Langfang	695 035	13.86	151.78	6.12	4 579.23
衡水 Hengshui	335 979	6.70	160.53	6.48	2 092.94
合计 Total	5 015 684	100	2 478.84	100	2 023.4

3.2 河北省秸秆资源收集运输的碳减排效益分析

结合农作物秸秆在河北省的分布特征，通过家庭电力消费需求与单位面积秸秆产量确定各市秸秆资源的收集范围。假定农村生物质电厂每月按照 20 000 户家庭的用电量

划定秸秆收集区域，并且电厂外围仅安置 1 环收储点。运用拉格朗日求极值的方法对式 (12) 求导，令一阶导等于 0，得到车辆运输油耗最少的收储点个数与回收范围。各市在直燃与气化两类发电方式下的计算结果，见表 5。

表 5 不同发电方式下河北省各市秸秆资源收集范围
Table 5 Straw resource collection range of each city in Hebei Province under different power generation modes

城市 City	电力消费量 Electricity consumption/(kW·h)	秸秆消耗量 Straw consumption/t		秸秆收集区域边长 Side length of straw collection area/m		收储点到回收边界的垂直距离 Vertical distance from storage point to boundary/m	
		直燃	气化	直燃	气化	直燃	气化
		Direct combustion	Gasification	Direct combustion	Gasification	Direct combustion	Gasification
石家庄 Shijiazhuang	3 458 527	5 452.59	2 726.30	3 047.17	2 154.67	761.79	538.67
唐山 Tangshan	3 716 357	5 859.07	2 929.54	4 117.36	2 911.41	1 029.34	727.85
秦皇岛 Qinhuangdao	1 176 969	1 855.57	927.78	2 460.58	1 739.89	615.14	434.97
邯郸 Handan	2 589 999	4 083.30	2 041.65	2 638.63	1 865.79	659.66	466.45
邢台 Xingtai	2 243 661	3 537.27	1 768.68	2 562.16	1 811.72	640.54	452.93
保定 Baoding	2 936 723	4 629.93	2 314.97	2 846.42	2 012.72	711.60	503.18
张家口 Zhangjiakou	1 185 962	1 869.74	934.87	2 006.09	1 418.52	501.52	354.63
承德 Chengde	2 846 269	4 487.33	2 243.66	2 763.93	1 954.40	690.98	488.60
沧州 Cangzhou	6 314 340	9 954.96	4 977.48	4 636.30	3 278.36	1 159.08	819.59
廊坊 Langfang	7 632 044	12 032.40	6 016.20	4 956.95	3 505.09	1 239.24	876.27
衡水 Hengshui	3 488 226	5 499.41	2 749.71	3 210.66	2 270.28	802.66	567.57

对式 (7) 运用拉格朗日求极值发现，当只安置 1 环收储点时，收储点最优数量为 12。每个收储点距离回收边界的垂直距离为 $R_1=0.25R$ 。表 5 显示，相比与气化发电，直燃发电由于效率较低，导致发同等电量所需的秸秆资源更多，收集范围更大。从地理位置上看，电力消费基本决定了秸秆收集区域的范围大小。

除张家口与秦皇岛外，电力需求大的地区，收集区域也更广。虽然张家口的电力消费量高于秦皇岛，但因具有单位面积产量优势，致使张家口的秸秆收集范围反而更小。安置 12 个收储点后，秸秆收集产生的二氧化碳排放量，以及与不安置收储点相比的减排量，见表 6。

表 6 安置 12 个收储点的系统收集运输秸秆所产生的碳排放量
Table 6 CO₂ emissions from collecting and transporting straw in a system with 12 collection and storage points

城市 City	秸秆收集最小碳排放 Minimum CO ₂ emission from straw collection/t		秸秆收集外部成本 External cost of straw collection/×10 ⁴ 元		单位电量碳排放 CO ₂ emission per unit electricity/ (kg·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)		单位秸秆运输碳排放 CO ₂ emission per unit transport straw/ (kg·kg ⁻¹)		碳排放减少量 CO ₂ emission reduction/t		外部成本节约量 External cost reduction/×10 ⁴ 元	
	直燃 Direct combustion	气化 Gasification	直燃 Direct combustion	气化 Gasification	直燃 Direct combustion	气化 Gasification	直燃 Direct combustion	气化 Gasification	直燃 Direct combustion	气化 Gasification	直燃 Direct combustion	气化 Gasification
	combustion	Gasification	combustion	Gasification	combustion	Gasification	combustion	Gasification	combustion	Gasification	combustion	Gasification
石家庄 Shijiazhuang	173.04	30.59	10.15	1.79	0.050	0.009	0.032	0.011	907.39	160.41	53.24	9.41
唐山 Tangshan	269.97	47.72	15.84	2.80	0.073	0.013	0.046	0.016	1 415.70	250.26	83.06	14.68
秦皇岛 Qinhuangdao	16.18	2.86	0.95	0.17	0.014	0.002	0.009	0.003	84.86	15.00	4.98	0.88
邯郸 Handan	84.03	14.85	4.93	0.87	0.032	0.006	0.021	0.007	440.65	77.90	25.85	4.57
邢台 Xingtai	61.23	10.82	3.59	0.63	0.027	0.005	0.017	0.006	321.10	56.76	18.84	3.33
保定 Baoding	116.54	20.60	6.84	1.21	0.040	0.007	0.025	0.009	611.14	108.04	35.86	6.34
张家口 Zhangjiakou	13.40	2.37	0.79	0.14	0.011	0.002	0.007	0.003	70.24	12.42	4.12	0.73
承德 Chengde	106.30	18.79	6.24	1.10	0.037	0.007	0.024	0.008	557.44	98.54	32.71	5.78
沧州 Cangzhou	877.59	155.14	51.49	9.10	0.140	0.025	0.088	0.031	4 601.97	813.52	270.00	47.73
廊坊 Langfang	1 370.75	242.32	80.42	14.22	0.180	0.032	0.110	0.040	7 188.07	1 270.68	421.72	74.55
衡水 Hengshui	185.47	32.79	10.88	1.92	0.053	0.009	0.034	0.012	972.57	171.92	57.06	10.09

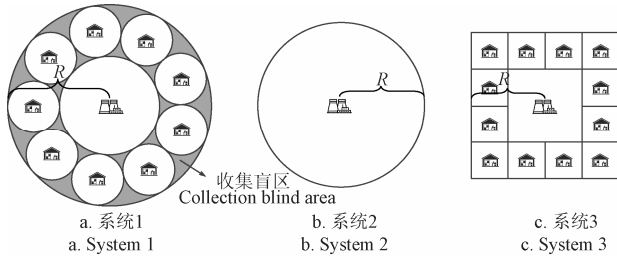
从表 6 可以看出，收集秸秆产生的碳排放与发电效率成反比。发电效率高的技术，所需秸秆少、收集范围小，因此车辆运输产生的碳排放和外部成本更少。综合来看，直燃发电的单位秸秆运输排放比气化发电高出近 2 倍。而同等发电量下，气化发电的运输排放仅是直燃发电的 17.67%。与电厂单独在方形区域收集秸秆相比，安置最优数量的收储点后，收集过程中的碳排放和外部成

本显著减少，减排率高达 83.98%。

3.3 不同收集运输系统的对比分析与综合评价

为进一步检验本文所提模式在环境、经济、效率方面的优势，对比 3 种不同收集系统的秸秆收集范围与运输排放。系统 1：电厂与收储点按照“就近圆形辐射收集”原则收集所需秸秆，式 (4)～式 (6)、式 (8)～式 (10) 中的 4 改为 π 。经求导计算可知，当系统 1 也只安置 1 环

收储点时, 收储点最优数量为 9, 且每个收储点的 $R_1=0.25R$ 。系统 2: 不安置收储点, 电厂用货运车就近圆形辐射收集秸秆, 式 (4)~式 (6)、式 (10) 中的 4 改为 π 。系统 3: 本文构建的秸秆收集运输系统。3 种收集运输系统的示意图, 见图 3。



注: 3 个系统收集范围的空白区域面积相等。
Note: The blank areas of the collection range of three systems are equal.

图 3 3 种秸秆收集运输系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of 3 straw collection and transportation systems

在同类技术发同等电量的情况下, 系统收集秸秆需覆盖的范围越小, 效率越高。同时, 车辆运输碳排放小的系统, 油耗少、经济性强。所以收集成本与运输排放正相关。为此, 基于河北省各市 20 000 户家庭的月度电

力消费情况, 测算 3 种收集运输系统内生物质电厂至收集边界的最短距离以及收集秸秆产生的碳排放量, 结果见图 4、图 5。

由图 4 得出, 系统 1 的收集范围最大, 系统 3 的收集范围最小, 可见系统 3 的收集效率最优。图 5 显示, 系统 3 收集秸秆产生的碳排放最少, 系统 1 次之, 系统 2 排放最大。因此, 从油耗角度分析, 系统 3 的燃油费用与碳排放外部成本同样低于系统 1 与系统 2。综上可知, 本文所建系统的效益优势明显, 特别在张家口与秦皇岛展现了较高的效率以及较强的低碳性和经济性。相比之下, 3 个系统在廊坊与沧州的应用效果不甚理想。结合秸秆资源的供需匹配度会发现, 廊坊和沧州是河北省单位家庭用电量最多的地区, 但该区域的单位耕地秸秆产量适中, 导致为满足家庭用电需要更大范围的收集秸秆, 从而引起运输油耗和排放处于高位。表 6 显示, 廊坊与沧州选用直燃发电的秸秆运输外部成本高达 80.42 万元和 51.49 万元, 选用气化发电的秸秆运输外部成本也达到 14.22 万元和 9.1 万元。即使选用单位发电量下收集秸秆产生的碳排放或收集单位秸秆产生的碳排放进行表示, 廊坊和沧州仍是碳排放最大的地区。可见, 廊坊与沧州 2 市需利用水、风、光等可再生能源配合秸秆发电, 方可降低资源收集过程中的二氧化碳排放。

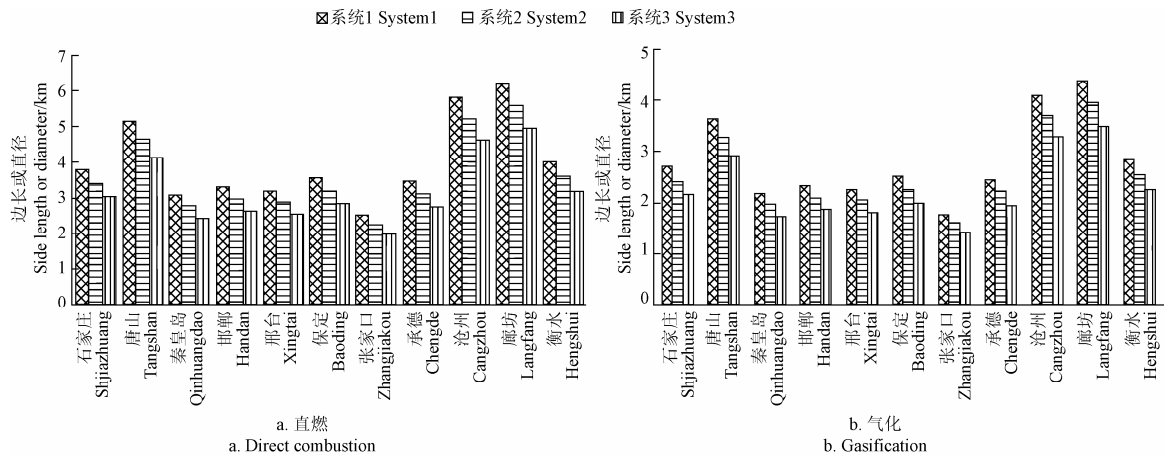
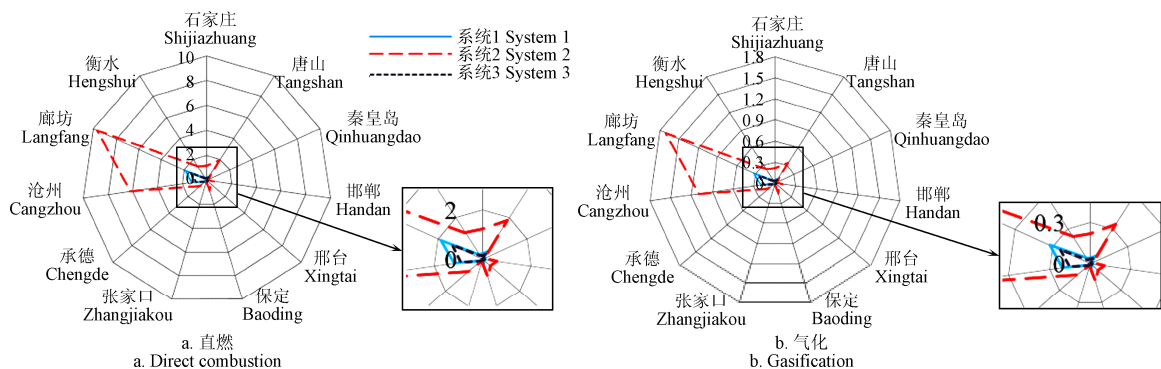


图 4 3 种收集运输系统的收集边长或直径

Fig.4 Collection side length or diameter of 3 collection and transportation systems



注: 图中单位为 10^3 t。
Note: The unit in the figure is 10^3 t.

图 5 3 种系统收集秸秆产生的碳排放

Fig.5 CO_2 emission from straw collection of 3 systems

比较以上结果可清晰发现，就近圆形辐射收集秸秆的系统在安置收储点后，经济性与低碳性得到显著加强。这是因为收储点分担了电厂收集远处秸秆的运输压力，货运车往返次数与行驶距离大幅减少。通过计算可知，系统 1 相较系统 2 的减排率达到 80.93%。但由于存在未收集区域的资源浪费，系统 1 的实际收集效率相比系统 2 低了 18.75%。而方形辐射收集系统的优势在于各收储点回收区域接壤，没有收集盲区，避免了资源浪费。同时系统还具有更强的低碳性，有利于减缓地区温室效应。结果显示，系统 3 收集秸秆产生的碳排放仅是系统 2 的 14.19%，系统 1 的 74.44%。因此，方形辐射收集模式在现实场景中应被更广泛采用。从可持续发展角度看，在技术层面提高发电效率是生物质产业链进一步实现增效、降费、减排的重要途径。与直燃技术相比，气化技术 2 倍的效率优势决定了发同等电量只需一半的秸秆资源，因此其收集范围与回收费用相对更小，碳排放外部成本更是仅有直燃技术的 1/6。由此可见，随着发电效率的逐步提升，生物质技术的市场竞争力将不断增强。

4 讨 论

4.1 资源收集运输系统模型适用性

生物质能是仅次于煤炭、石油、天然气的世界第 4 大能源，主要包括林业废弃物、农作物秸秆、生活污水和工业有机废水、城市固体废物和畜禽粪便等 6 大类。除了直燃发电以外，上述废弃物还可通过气化、液化、厌氧发酵、垃圾填埋等资源化处理技术生成沼气、燃气、乙醇、柴油等生物质燃料，为社会生产活动提供能源支持。所以，提出代表性评价方法对生物质资源的低碳回收开展科学研究尤为必要，可广泛运用于现代先进制造产业链的上游活动中。本文以农作物秸秆为研究对象，以生物质发电为终端用途，针对资源的收集运输，从碳排放角度，构建标量化的秸秆收集系统和运输排放模型。该模型假设条件适用于收集农村地区的各类资源，而研

究结论强调了效率对生物质产业链低碳发展的重要性，同样具有普适性的指导意义。如果将模型中的农作物秸秆替换成上游其他地区的其他资源，发电效率替换成下游其他工艺的技术效率，即可实现不同地区、多类资源、多种技术在所建模型上的统一转换，同时也印证了该模型标准化特点。由此可见，本文所提方法具有在不同区域间的可复制性、可推广性和可操作性，有利于不同资源处理模式在不同地区间的比较评估与优化匹配。

4.2 秸秆收集管理在实现 SDGs 中的作用

2015 年 9 月 25 日，联合国 193 个成员国在可持续发展峰会正式通过 17 个 2030-SDGs^[30]，旨在以科学方式解决社会、经济和环境三个维度的发展问题，推动世界各国转向可持续发展道路。农业废弃物的收集管理与全球 20 亿人的生产生活息息相关，直接或间接影响 10 个 SDGs 进程^[31]。其中，低碳、高效、经济的废弃物收集管理模式有助于环境保护、公共卫生、减少贫困以及资源利用等相关领域的 SDGs 实现。图 6 与表 7 列举了两者之间的内在联系，着重分析了本文构建的秸秆收集运输系统对 SDGs 的促进作用。



图 6 与废弃物秸秆收集管理相关联的联合国可持续发展目标^[11]
Fig.6 United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) related to waste straw collection and management

表 7 有助于 SDGs 实现的废弃物收集管理路径

Table 7 Waste collection and management towards achieving SDGs			
领域 Domain	可持续发展目标 SDGs	子目标 General goal	具体路径 Specific path
环境保护 Environment protection	SDG6: 清洁饮水和卫生设施	6.5: 建立相应机制让社区参与到水资源管理中	通过消除废弃秸秆的露天焚烧和随意丢弃，提高水质
	SDG7: 负担得起的清洁能源	7.2: 对可再生能源结构进行量化分析	收集常规发电厂产生的固体废物，研发循环利用技术，增加可再生能源在全球能源结构中的份额
	SDG12: 负责任的消费和生产	12.4: 减少化学废弃物对环境和人类健康造成的不利后果	环境无害的废弃物收集系统确保对所有废弃物进行合理处置，尤其是危险的化学品或生物制品，以减少其对环境和人类健康的不利影响
	SDG15: 陆地生物	15.1: 加强对农业生态系统和河流系统的关注	通过无害的废弃物收集系统保护水和土壤免受生物或化学有毒废弃物的污染
公共卫生 Public health	SDG3: 良好健康与福祉	3.1: 减少因卫生条件恶劣等因素导致的传染病	减少由危险化学品导致水、空气和土壤污染而引起的疾病
		3.2: 遏制疟疾，与水传播疾病做斗争	高效、低碳、无害的废弃物收集管理系统可降低水污染传播甲型、乙型和丙型肝炎以及艾滋病和疟疾的风险，预防 5 岁以下儿童因感染上述疾病而死亡
	SDG11: 可持续城市和社区	11.1: 确保每个人都能获得基本服务以及适当、安全和负担得起的住房	为应对农村发展挑战，通过安全拆除、有效回收和管理农村垃圾与废弃物来升级居住环境及生活条件，同时减少污染并改善资源利用
	SDG13: 气候行动	13.1: 应对气候变化的不利影响	使用适当的废弃物收集和管理方法减少温室气体排放
减少贫困 Poverty reduction	SDG14: 水下生物	14.1: 减少 30%来自陆地的塑料和碎片，防止出现新的海洋污染	将废弃物收集范围扩大到海洋生物，防止陆上活动产生的秸秆与塑料进入海洋，预防各种海洋污染
	SDG1: 消除贫困	1.4: 确保所有男性和女性，尤其是不幸和弱势群体平等获得金融服务和经济资源	通过支持个人与小微企业从事关于废弃物回收利用的活动，促进可持续和包容性的经济发展，为个人提供体面的工作和就业机会
资源价值 Resource value	SDG8: 体面工作和经济增长	8.2: 整合资源利用效率，实现环境与经济的可持续发展	在农村地区开展废弃物收集管理，通过回收再利用农作物秸秆，减少资源利用成本和农业粮食浪费，创造巨大的“绿色”就业机会
	SDG12: 负责任的消费和生产	12.3: 减少供应链中的粮食损失	通过 3R（减少、再利用和回收）最大限度地减少秸秆和粮食浪费，防止农业废弃物产生

本文构建的秸秆收集运输系统,立足于方形辐射收集模式,实现了收集高效、运输低碳和成本节约,为农村地区的可持续发展提供了多维度支撑,具体表现为:

1) 相比于圆形辐射收集模式,在方形区域收集秸秆,杜绝了资源浪费现象,提高了 18.75% 的收集效率。而高效的收集运输系统不仅能减少废弃物携带病菌传播的风险,增加农业资源循环利用的频率,还可避免未收集区域秸秆丢弃对土壤的破坏,直接有助于 SDG3 (良好健康与福祉)、SDG11 (可持续社区) 和 SDG15 (陆地生物) 的实现。此外,提高收集效率也间接有利于 SDG14 (水下生物)、SDG7 (负担得起的清洁能源) 和 SDG6 (清洁饮水和卫生设施)。

2) 所建系统碳减排效益显著,与 SDG13 (气候行动)、SDG11 (可持续社区) 和 SDG3 (良好健康与福祉) 直接有关。众所周知,秸秆收集过程中的温室气体排放主要来源于车辆运输。通过在收集区域合理规划电厂与收储点覆盖范围,缓解运输压力,减排率可达 83.98%。这在应对气候变化、增强农村社区可持续性以及保持人类身体健康等方面均有积极作用。同时,减少运输排放还与 SDG14 (水下生物) 和 SDG6 (清洁饮水和卫生设施) 间接相关。

3) 所建系统通过优化收储点数量,大幅减少了运输车辆油耗成本与环境外部成本。随着发电效率提高,秸秆资源的需求量与回收费用将进一步降低,经济效益更为可观,有助于实现 SDG8 (体面的工作和经济增长)。因为成本的合理控制容易形成规模经济,刺激电厂加强设施建设、技术研发与服务增值,通过扩大产能提供更多的就业机会,从而带动其他部门及整个地区的经济增长。另一方面,控制收集成本也与 SDG1 (消除贫困) 和 SDG12 (负责任的消费和生产) 间接相关。

综上所述,本文优化构建的秸秆收集运输系统,通过在收集过程中增效、减排、降费,为环境保护、减少贫困、公共卫生和资源利用相关的 SDGs 提供了多维可行性帮助。

5 结 论

在联合国 SDGs 背景下,本文就秸秆资源的浪费与污染问题,提出基于方形辐射收集模式的秸秆收集运输模型,并以碳减排为目标优化求解收储点个数与回收距离,构建低碳、高效、经济的生物质电厂收集运输系统。通过与不同收集系统的对比分析,综合评价所建系统的效益优势以及与 SDGs 的内在联系。以河北省为例的研究结果显示:

1) 河北省秸秆资源丰富,年产量 4 475.5 万 t,且绝大部分地区具备良好的收集条件,单位面积秸秆产量达 645.97 t/km²。相比之下,廊坊、沧州、唐山 3 市的电力需求较大,秸秆供应紧张,资源供需匹配度低。

2) 收集运输过程碳排放最小的系统,是在电厂外围安置 12 个收储点,且每个收储点距离回收边界的垂直距离为 0.25R (R 为电厂到收集边界的垂直距离)。与不安置收储点相比,该系统减少了 83.98% 的运输排放与外部

成本,地区温室效应得到有效控制。

3) 本文所建系统具有良好的经济性与低碳性,并且没有收集盲区,弥补了圆形辐射收集模式的不足,杜绝了资源浪费现象,收集效率提高 18.75%。从地理位置上看,系统在张家口和秦皇岛展现了经济、效率、环境方面的比较优势,但在廊坊和沧州的应用效果不佳。

4) 从可持续发展角度看,发电效率是决定生物质技术市场竞争力的关键因素。而构建低碳、高效、经济的秸秆收集运输系统将对环境保护、减少贫困、公共卫生和资源利用相关的 10 个 SDGs 起到促进作用。

为彻底解决资源浪费与空气污染问题,缓解能源转型与环境保护压力,相关职能部门可采取如下措施,推动农村地区的秸秆低碳回收与资源高效利用: 1) 加强普法宣传,提高民众的能源危机与废物利用意识,培养农户的秸秆收集与资源管理习惯; 2) 制定处罚条例,严惩将农作物秸秆露天焚烧的污染行为,抵制将废弃物资源随意扔弃的浪费行径; 3) 发放财政补贴,提高农民收集秸秆积极性的同时,减轻电厂安置收储点与回收秸秆的经济负担; 4) 增加研发投入,提高秸秆发电的综合利用效率与经济社会效益,引导生物质产业可持续发展。

[参 考 文 献]

- [1] Moustakas K, Loizidou M, Rehan M, et al. A review of recent developments in renewable and sustainable energy systems: Key challenges and future perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109418.
- [2] Kashif M, Awan M B, Nawaz S, et al. Untapped renewable energy potential of crop residues in Pakistan: Challenges and future directions[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 256(15): 109924.
- [3] Ma Y Q, Shen Y Q, Liu Y. State of the art of straw treatment technology: Challenges and solutions forward[J]. Bioresource Technology, 2020, 313: 123656.
- [4] Wang C B, Malik A, Wang Y F, et al. Understanding the resource-use and environmental impacts of bioethanol production in China based on a MRIO-based hybrid LCA model[J]. Energy, 2020, 203: 117877.
- [5] Yang Y, Ni J Q, Zhou S K, et al. Comparison of energy performance and environmental impacts of three corn stover-based bioenergy pathways[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 272(1): 122631.
- [6] 崔思远, 朱新开, 张宸茜, 等. 水稻秸秆还田年限对稻麦轮作田土壤碳氮固存的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 115-121.
Cui Siyuan, Zhu Xinkai, Zhang Chenxi, et al. Effects of years of rice straw retention on soil carbon and nitrogen sequestration in rice-wheat system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(7): 115-121. (in Chinese with English abstract)
- [7] Fang Y R, Wu Y, Xie G H. Crop residue utilizations and potential for bioethanol production in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 113: 1-15.
- [8] 孙宁, 王亚静, 高春雨, 等. 秸秆收储运成本分析: 以河

- 南省为例[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(5): 91-96, 230.
- Sun Ning, Wang Yajing, Gao Chunyu, et al. Analysis on the cost of straw collection, storage and transportation: A case study of Henan Province[J]. *Agricultural Resources and Regionalization in China*, 2018, 39(5): 91-96, 230. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王久臣, 戴林, 田宜水, 等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 276-282.
- Wang Jiuchen, Dai Lin, Tian Yishui, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(9): 276-282. (in Chinese with English abstract)
- [10] 方放, 李想, 石祖梁, 等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 228-234.
- Fang Fang, Li Xiang, Shi Zuliang, et al. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(2): 228-234. (in Chinese with English abstract)
- [11] Hannan M A, Begum R A, Al-Shetwi A Q, et al. Waste collection route optimisation model for linking cost saving and emission reduction to achieve sustainable development goals[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 62: 102393.
- [12] Yan P, Xiao C W, Xu L, et al. Biomass energy in China's terrestrial ecosystems: Insights into the nation's sustainable energy supply[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 127: 109857.
- [13] Premakumara D G J, Menikpura N, Singh R K, et al. Reduction of greenhouse gases (GHGs) and short-lived climate pollutants (SLCPs) from municipal solid waste management (MSWM) in the Philippines: Rapid review and assessment[J]. *Waste Management*, 2018, 80: 397-405.
- [14] Kang J N, Wei Y M, Liu L C, et al. Energy systems for climate change mitigation: A systematic review[J]. *Applied Energy*, 2020, 263: 114602.
- [15] 钱玉婷, 张应鹏, 杜静, 等. 江苏省秸秆综合利用途径利弊分析及收储运对策研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 154-160.
- Qian Yuting, Zhang Yingpeng, Du Jing, et al. Advantages and disadvantages analysis of comprehensive utilization of straw in Jiangsu Province and countermeasure suggestions for collection-storage-transportation system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(22): 154-160. (in Chinese with English abstract)
- [16] 谢伟, 李旭, 方志超, 等. 水稻秸秆收集与连续打捆复式作业机设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 19-25.
- Xie Wei, Li Xu, Fang Zhichao, et al. Design of compound machine for rice straw collecting and continuous baling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(11): 19-25. (in Chinese with English abstract)
- [17] Ağaçasapan B, Çabuk S N. Determination of suitable waste transfer station areas for sustainable territories: Eskisehir case[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 52: 101829.
- [18] Lella J, Mandla V R, Zhu X. Solid waste collection/transport optimization and vegetation land cover estimation using Geographic Information System (GIS): A case study of a proposed smart-city[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 35: 336-349.
- [19] 袁嘉晨, 曹红亮, 李明来, 等. 秸秆资源回收发电的经济可行性测算: 以湖北为例[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 2012-2019.
- Yuan Jiachen, Cao Hongliang, Li Minglai, et al. Economic evaluation of straw resource used for power generation: Taking Hubei as an example[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2017, 38(7): 2012-2019. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张得志, 郭瑶微, 张卓. 基于 Logit 模型的生物质供应链集成优化[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(9): 2706-2710, 2717.
- Zhang Dezhi, Guo Yaowei, Zhang Zhuo. Integration optimization of biomass supply based on Logit model[J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37(9): 2706-2710, 2717. (in Chinese with English abstract)
- [21] Yang Y, Liang S, Yang Y, et al. Spatial disparity of life-cycle greenhouse gas emissions from corn straw-based bioenergy production in China[J]. *Applied Energy*, 2022, 305: 117854.
- [22] 毛爱涵, 李发祥, 杨思源, 等. 青海省清洁能源发电潜力及价值分析[J]. 资源科学, 2021, 43(1): 104-121.
- Mao Aihan, Li Faxiang, Yang Siyuan, et al. Clean energy power generation potential and value in Qinghai Province[J]. *Resources Science*, 2021, 43(1): 104-121. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李守强, 刘宗歧, 王静, 等. 计及热网损耗的乡镇生物质能综合能源系统两阶段优化运行[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 24-32.
- Li Shouqiang, Liu Zongqi, Wang Jing, et al. Two-stage operation optimization of rural biomass energy integrated energy system considering heat network loss[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(4): 24-32. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵浩亮, 张旭, 翟明岭. 生物质电厂秸秆燃料收集范围优化分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(4): 997-1001.
- Zhao Haoliang, Zhang Xu, Zhai Mingling. Optimization and analysis of collection scale of straw fuel for biomass power plant[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2016, 37(4): 997-1001. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李胜男, 纪雄辉, 邓凯, 等. 区域秸秆资源分布及全量化利用潜力分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 221-228.
- Li Shengnan, Ji Xionghui, Deng Kai, et al. Analysis of regional distribution patterns and full utilization potential of crop straw resources[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(12): 221-228. (in Chinese with English abstract)
- [26] 冯雪, 吴国春, 曹玉昆, 等. 生物质能源可利用潜力评价: 以黑龙江省重点国有林区为例[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(6): 55-62.
- Feng Xue, Wu Guochun, Cao Yukun, et al. Evaluation on the utilization potential of biomass energy: A case from key

- state-owned forest areas in Heilongjiang Province[J]. *Agricultural Resources and Regionalization in China*, 2019, 40(6): 55-62. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘城宇, 杨洪明. 废弃物到能源的闭环供应链: 循环供能、协同运作与可持续性[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 182-191.
- Liu Chengyu, Yang Hongming. Waste to energy closed-loop supply chain: Recycling energy supply, collaborative operation and sustainability[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(10): 182-191. (in Chinese with English abstract)
- [28] Prasad S, Singh A, Korres N E, et al. Sustainable utilization of crop residues for energy generation: A Life Cycle Assessment (LCA) perspective[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 303: 122964.
- [29] 云慧敏, 代建军, 李辉, 等. 生物质耦合燃煤发电经济环境效益评估[J]. *化工学报*, 2021, 72(12): 6311-6327.
- Yun Huimin, Dai Jianjun, Li Hui, et al. Economic and environmental assessment of biomass coupled coal-fired power generation[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(12): 6311-6327. (in Chinese with English abstract)
- [30] 联合国可持续发展目标[EB/OL]. 联合国可持续发展峰会, 2015-09-25[2022-03-15]. <https://www.globalgoals.org/goals/>.
- [31] Rodic-Wiersma L, Wilson D C. Resolving governance issues to achieve priority sustainable development goals related to solid waste management in developing countries[J]. *Sustainability*, 2017, 9(3): 404.

Optimization analysis of carbon emission reduction from crop straw collection and transportation under the sustainable development goals

Liu Chengyu¹, He Zhengchu^{1*}, Lu Xiaolong²

(1. School of Economics and Management, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Energy Engineering Group Hunan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: Recycling and utilization of crop straw have been one of the most important ways to treat the resource waste and environmental pollution in rural areas in the context of the United Nations Sustainable Development Goals. In this study, a collection and transportation model was established to optimize the number and the recovery distance of storage points with the carbon emission reduction from the straw collection. A research object was taken as the collection and transportation system with a square area in the biomass power plant in Hebei Province of China. A systematic investigation was made on the resource distribution, biomass potential and household power consumption demand, further to evaluate the matching degree of straw resources supply and demand in various cities. Different collection systems were compared under the direct combustion and gasification power generation from the perspective of collection range and emission. The constructed system was then comprehensively evaluated in terms of economy, environment, and efficiency. According to the sustainable development goals, some recommendations were proposed to promote the low-carbon recovery and efficient utilization of straw resources. The research results show that there were excellent collection conditions in most areas rich in straw resources, with an annual output of 44.755 million tons. The straw output per unit area was 645.97 t/km² in the study area. There were high power demands in Langfang, Cangzhou, and Tangshan Cities, but the supply of straw was tight, indicating the low matching degree of resource supply and demand. The straw collection and transportation system with the best emission reduction benefits was set as 12 collection storage points around the power plant, where the vertical distance between each collection storage point and the recycling boundary was 0.25R (R is the vertical distance from the power plant to the collection boundary). The transportation emissions were reduced by 83.98%, and the regional greenhouse effect was effectively controlled in the system, compared with no storage points. The collection efficiency increased by 18.75% than before, indicating cost-saving, low carbon, and free of collection blind area. The constructed system was greatly contributed to the circular radiation collection mode for the better utilization of waste resources. The high efficiency, low-carbon, and economic properties were found in Zhangjiakou and Qinhuangdao Cities, but less in Langfang and Cangzhou Cities. In addition, the multiple dimensional support 10 sustainable development goals were related to environmental protection, poverty reduction, public health, and resource utilization. The power generation efficiency can also determine the market competitiveness of biomass technology in sustainable agriculture. A closed-loop supply chain of biomass circular energy can be constructed to promote the low-carbon path for agricultural modernization and sustainable energy in rural areas.

Keywords: agriculture; biomass; power generation; sustainable development goal; crop straw; collection and transportation system; carbon emission reduction