

文章编号: 1671-6612 (2023) 06-768-08

农村地区秸秆固化成型利用 最佳收集半径研究——以成都市为例

章鹏鑫¹ 马荣江¹ 石宇² 吴聃³ 黄盛浩¹ 邓梦思¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院 成都 611756;

3. 西南交通大学建筑学院 成都 611756)

【摘要】 实现农村地区大量零碳秸秆资源能源化利用的第一步是需要解决秸秆原料收集半径难以确定等问题。为此, 基于“代加工”模式和成都市农村地区秸秆资源量等基础信息, 并根据农作物实际的种植时间, 建立了适合农村地区的秸秆收集半径计算模型, 确定了具有最佳经济性的秸秆最佳收集半径和相应半径下用秸秆颗粒替代煤炭的环境效益。结果表明, 成都市秸秆资源丰富, 2021年理论秸秆资源总量为389.48万t, 其中谷类秸秆和油菜秸秆的资源量最多, 分别占总量的51.09%和21.12%。成都市农村地区秸秆最佳收集半径为5.92km, 对应的秸秆颗粒生产成本约483.00元·t⁻¹, 明显低于购买商品化秸秆颗粒(约600元·t⁻¹)和燃煤(约950元·t⁻¹)的价格, 颗粒总产量为33750.17t。秸秆收集半径受单位面积秸秆资源量和运输车辆设计参数的影响最大, 而受其他参数的影响较小。若使用秸秆颗粒替代煤炭燃料, 将减少41.99%的CO₂, 85.76%的PM_{2.5}, 99.44%的SO₂排放以及51346t的CO₂排放, 具有显著的环境效益。

【关键词】 农村地区; 秸秆颗粒; 能源化应用; 收集半径; 减排效益

中图分类号 TK6 文献标识码 A

The Optimum Collection Radius of Densified Straw Utilization in Rural Areas: A Case Study of Chengdu

Zhang Pengxin¹ Ma Rongjiang¹ Shi Yu² Wu Dan³ Huang Shenghao¹ Deng Mengsi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756;

3. School of Architecture, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 611756)

【Abstract】 The first step to utilize rich straw resources as fuels in rural areas is to solve the problems including the difficulty in determining the collection radius. Therefore, this study built a straw collection radius model based on Original Equipment Manufacturing (OEM) model and the basic information on straw resources in rural areas of Chengdu. The optimum straw collection radius with the best economics was determined, and the environmental benefits after replacing coal with straw pellets under this radius were evaluated. The results revealed that the straw resources in Chengdu was abundant, and the theoretical straw resources in 2021 was 3.8948 million tons. Grain straw and rape straw were the dominant straw types, accounting for 51.33% and 21.12%,

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108095); 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0978/2022NSFSC0273)

作者简介: 章鹏鑫(1999.01-), 男, 硕士研究生, E-mail: pengxinzhang@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 邓梦思(1992.08-), 女, 博士, 讲师, E-mail: mengsideng@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-09-13

respectively. The optimum straw collection radius in rural areas of Chengdu was 5.92 km, the corresponded production cost was 483.00 CNY·t⁻¹, which was much lower than the purchased straw pellet and coal prices (600 CNY·t⁻¹ and 950 CNY·t⁻¹), and the production capacity was 33750.17 t. Straw resources per unit area and the design parameters of vehicle were the most sensitive parameters in determining the collection radius. After replacing coal with straw pellets, 41.99% of CO, 85.76% of PM_{2.5}, 99.44% of SO₂, and 51346 t of CO₂ emissions will be reduced, which indicated significant environmental benefits.

【Keywords】 rural area; straw pellet; energy application; collection radius; emission reduction effect

0 引言

我国是农业大国,每年会产生大量以农作物秸秆为主的生物质资源。据统计,2020年全国作物秸秆理论资源总量约 7.72×10^8 t^[1],其综合利用率已达87.6%,但仍有大量秸秆资源被遗弃或露天焚烧^[2]。随着秸秆禁烧政策的全面实施,秸秆的合理处置成为了农村的一大问题。目前全国范围内对秸秆资源的利用方式以还田为主,而农作物的产量随着还田量的增加先增加后减少,且还田会产生大量的温室气体和挥发性有机化合物^[3,4]。因此,秸秆过度还田,不仅会导致大量可再生资源浪费,还会恶化大气环境。所以当秸秆资源适度还田之后,剩余部分还需探索其他消纳途径。

秸秆作为一种零碳的可再生能源,相比于风能、太阳能等能源,它具有能够以固态形式储存的优点^[5],因此被认为是煤炭等固体燃料的优质替代品。但秸秆原料具有能源密度低,分布不集中等特点^[6]导致了秸秆原料的集中统一能源化利用受到限制。秸秆颗粒成型技术是将松散的秸秆原料固化成型成粒状的颗粒燃料,相比于秸秆原料具有易于运输和能量密度高等优点^[7],是目前适合在农村推广应用的新能源技术。此外,相比于秸秆在传统柴灶中的粗放燃烧方式,秸秆颗粒搭配专门的生物质清洁炉具可大幅提高炉具热效率并显著减少污染物排放^[8,9]。

实现高效经济收集秸秆原料进行加工是秸秆颗粒推广应用的一大难题。为此多位研究者对秸秆原料的收储运模式进行了研究。Wu^[10]等提出了四种秸秆收储运模式,对比了经济性后表示“农户—经纪人—集中储存—加工厂”是目前中国承包式农业最经济的模式。而单明^[11]等提出的“代加工”(OEM)模式,避免了秸秆原料价格过高的问题,是更适合农村地区农户自用秸秆燃料的模式。在收集半径的研究上,目前建立了圆形^[12]和方形^[13]两种计算模型,但是这些收集半径计算模型上均缺少了

一些关键环节,如运输环节中的设备与人工成本等,从而影响最终结果的准确性。此外,当前研究对于秸秆收集半径的计算均是假设所有秸秆一起收集,但是秸秆作为农作物的副产物,具有明显的季节性,而且同一块农田可能种植多茬作物,因此在下一茬作物开始种植前必须将前一茬的作物秸秆全部处理完成,所以秸秆原料的收集还需要考虑当地农作物的收种时间。秸秆原料收集半径难以确定等问题,严重阻碍了秸秆颗粒加工厂的规划和建设,极大限制了秸秆颗粒燃料的推广应用。

为此,本研究旨在确定农村地区秸秆最佳收集半径,首先以成都市为例进行了研究。成都市地处中国西南地区、四川盆地西部、成都平原腹地,属于亚热带季风性湿润气候,气候温和,降水充沛,适合农作物的生产,因此也会产生大量的秸秆资源。本研究统计了2021年成都市农村地区秸秆资源量等基础数据,基于一种适宜农村地区发展的“代加工”模式^[11,13],并考虑了不同农作物的播种和收获时间,建立了以经济性作为主要约束条件的适合实际生产情况的最佳收集半径模型,并计算了最佳半径值和此收集半径下的环境效益。研究结果可为秸秆颗粒燃料在农村地区的推广提供理论和数据支撑。

1 方法与模型

1.1 秸秆资源量计算

秸秆资源量主要基于成都市2022年年鉴^[14]中的粮食产量进行计算。本研究中计算的秸秆资源囊括了几乎所有农作物的剩余物,其中包括谷物、豆类、薯类、棉花、油料、麻类、甘蔗、甜菜、烟叶和瓜菜等作物的副产物。秸秆理论资源量是指在农作物收割后所产生的所有秸秆资源总量,主要通过草谷比法^[15]进行计算,即通过粮食产量反算秸秆理论资源量;秸秆可收集利用量是指能够通过人工或者机械收集,并且扣除由于运输等原因而得到的扣

除损失后的秸秆资源量，一般通过系数法^[16]计算获得；秸秆可能源化利用量是指可收集利用的秸秆资源中能够源化利用的部分。秸秆的消纳途径主要包括肥料化、能源化、饲料化、基料化和原料化五种，由于用于饲料化的秸秆可以用其他更合适的饲料代替，而秸秆的基料化和原料化所占的比重很小，因此本研究假设秸秆只用于肥料化和能源化，即秸秆可能源化利用量为秸秆可收集利用量减去用于肥料化的秸秆资源量，如公式（1）所示。

$$M_S = \sum_{i=1}^n M_{E,i} \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot (1 - \mu) \quad (1)$$

式中： M_S 为秸秆可能源化利用量， t ； i 为农作物种类； $M_{E,i}$ 为第*i*种农作物的产量， t ； β_i 为第*i*种农作物的草谷比系数^[17]； γ_i 为第*i*种农作物秸秆的可收集利用系数^[15]； μ 为可收集利用秸秆中用于肥料化的比重^[18]。

1.2 最佳收集半径模型

受农村地区经济水平限制，能源价格是影响农户能源使用的重要因素，因此尽可能低的秸秆颗粒燃料价格能提升农户选择秸秆颗粒燃料的主动性，并且较低的生产成本能够吸引企业的投资，从而促

进秸秆的能源化利用。在秸秆颗粒加工厂收集半径的确定上，若秸秆颗粒加工厂的收集半径较小，则处理一个地区全部秸秆资源需要建立多个加工厂，增加了设备等的投资成本，而若加工厂的收集半径较大，则会产生较高的运输成本，进而会增加生产颗粒燃料的成本，因此需要寻找一个最佳收集半径使得秸秆颗粒燃料的生产成本达到最低。

“代加工”模式被证明是适合农村地区秸秆颗粒燃料推广应用的可行方式^[11]。因此，本研究采用“代加工”模式生产秸秆颗粒，秸秆收储运各环节及流程如图 1 所示。由一个村或者多个村组成一个农业合作社，合作社雇佣人员进行天地间秸秆的收集和初步打捆，然后运输到一个统一的地点进行集中机械打捆储存，最后将打捆好的秸秆原料运输到秸秆颗粒加工厂加工后再运回农户家中。采用“代加工”模式与工厂加工模式相比，由于秸秆原料来自于农户自己，因此不存在较高的秸秆原料回收价格，避免了需要高价购买秸秆颗粒燃料的问题。除此之外，雇佣农户进行秸秆的收集、运输和储存管理，也提供了较多的就业岗位。

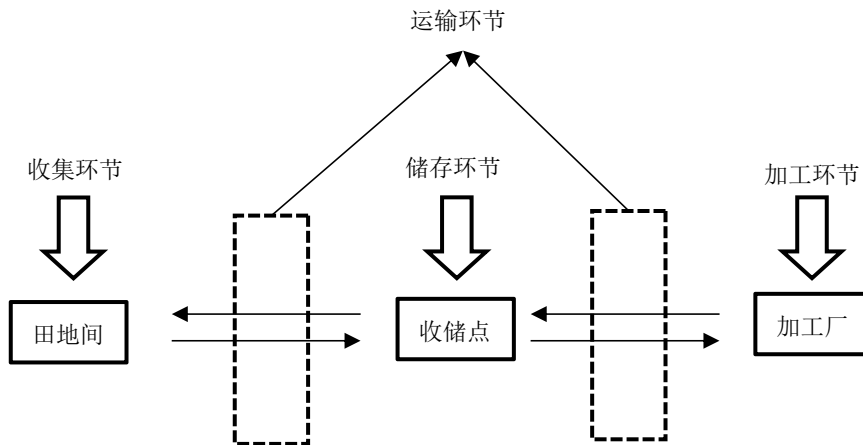


图 1 农村地区“代加工”模式下秸秆收储运环节与流程

Fig.1 Straw collection, storage and transportation chain and processes under the "OEM" mode in rural areas

秸秆颗粒燃料的生产过程主要包括四个环节，分别为收集环节、储存环节、运输环节和加工环节。

收集环节中合作社雇佣人员对分散田间的秸秆资源进行人工收集，因此收集成本（ C_C ）只包括人工成本（ $C_{C,p}$ ）：

$$C_C = C_{C,p} = \frac{2CR^2}{E} \cdot k \cdot \frac{1}{2aCR^2} = \frac{k}{Ea} \quad (2)$$

储存环节中合作社租用一块适合的地方用于储存秸秆原料，为了减少租用面积从而降低租赁成本并且方便之后的运输，利用秸秆打捆机将初步打捆好的秸秆原料进行机械打捆。在储存过程中需要考虑 20% 的通风间隙和 50% 的晾晒空间，秸秆原料经过这一环节的打捆储存之后默认已自然干燥。储存成本（ C_S ）包括场地成本（ $C_{S,f}$ ）、机械成本（打

捆机) ($C_{S,m}$)、能源成本 ($C_{S,e}$) 和人工成本 ($C_{S,p}$)。

$$C_{S,f} = S \cdot b = \frac{2CR^2}{(1-20\%)h\rho} \cdot b \cdot (1+50\%) \cdot \frac{1}{2aCR^2} = \frac{1.875b}{h\rho a} \quad (3)$$

$$C_{S,m} = \left[\frac{r \cdot (1+r)^{N_1}}{(1+r)^{N_1} - 1} \cdot Q_1 + \alpha \cdot Q_1 \right] \cdot \frac{4}{2aCR^2} \quad (4)$$

$$C_{S,e} = p_1 \cdot e \cdot \frac{2CR^2}{m_1} \cdot \frac{1}{2aCR^2} = \frac{p_1 e}{m_1 a} \quad (5)$$

$$C_{S,p} = n_1 \cdot k \cdot \frac{2CR^2}{m_1} \cdot \frac{1}{2aCR^2} = \frac{n_1 k}{m_1 a} \quad (6)$$

$$C_S = C_{S,f} + C_{S,m} + C_{S,e} + C_{S,p} \quad (7)$$

运输环节主要包括两部分, 第一部分是从收储点空载出发到田地装入秸秆后满载回到收储点, 第二部分是从收储点满载打捆好的秸秆原料运输至加工厂, 再将加工好的秸秆颗粒满载运输回收储点。在这一环节中, 平均运输距离的确定尤为重要。本研究采用方形收集半径模型 (见图 2), 定义收集最远端到加工厂的距离为收集半径 R , 农田到加工厂的平均运输距离计算方法见文献[13], 从田地到收储点的平均运输距离 \bar{R}_1 也采用相同的方法确定。输成本 (C_T) 主要包括机械成本 (运输车辆) ($C_{T,m}$)、能源成本 ($C_{T,e}$) 和人工成本 ($C_{T,p}$)。

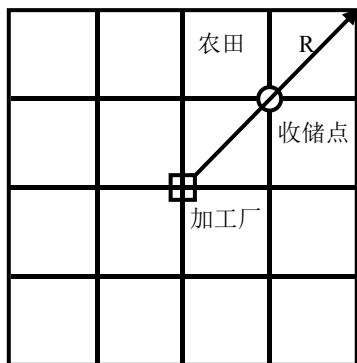


图 2 秸秆收集半径模型

Fig.2 Straw collection radius model

$$C_{T,m} = \left[\frac{r \cdot (1+r)^{N_2}}{(1+r)^{N_2} - 1} \cdot Q_2 + \alpha \cdot Q_2 \right] \cdot \frac{4}{2aCR^2} \quad (8)$$

$$C_{T,e} = \left[\frac{\left(\frac{g_e + g_0}{v_1} \cdot N_{en} \right) \cdot \frac{2R_1}{a} + \left(\frac{g_e + g_e}{v_1} \cdot N_{em} \right)}{2m_2} \cdot R \right] \cdot P \quad (9)$$

$$= \left[\left(\frac{g_e + g_0}{v_1} \cdot \frac{0.27 + g_e}{a} \right) \cdot \frac{N_{en}}{m_2} \cdot P \cdot R \right]$$

$$C_{T,p} = n_2 \cdot k \cdot \left(\frac{\bar{R}_1}{v_1} + \frac{\bar{R}_1}{v_0} + T \right) \cdot \frac{2CR^2}{m_2} \cdot \frac{1}{2aCR^2} + n_2 \cdot k \cdot \left(\frac{R}{v_1} + 2T \right) \cdot \frac{2aCR^2}{m_2} \cdot \frac{1}{2aCR^2} \quad (10)$$

$$= \frac{n_2 k}{am_2} \cdot \left(\frac{0.27}{v_1} + \frac{0.27}{v_0} + \frac{a}{v_1} \right) \cdot R + \frac{n_2 k T}{am_2} \cdot (1+2a)$$

$$C_T = C_{T,m} + C_{T,e} + C_{T,p} \quad (11)$$

加工环节是将打捆好的秸秆原料通过粉碎机粉碎后送入秸秆颗粒机加工成秸秆颗粒, 在这一环节中需要租赁厂房用于安放设备和进行生产活动, 并且在最后将成品包装, 因此加工成本 (C_P) 主要包括场地租赁成本 ($C_{P,f}$)、机械成本 (加工生产线) ($C_{P,m}$)、能源成本 ($C_{P,e}$), 人工成本 ($C_{P,p}$) 和其他成本 ($C_{P,o}$)。

$$C_{P,f} = \frac{E_z}{2aCR^2} \quad (12)$$

$$C_{P,m} = \left[\frac{r \cdot (1+r)^{N_3}}{(1+r)^{N_3} - 1} \cdot Q_3 + \alpha \cdot Q_3 \right] \cdot \frac{1}{2aCR^2} \quad (13)$$

$$C_{P,e} = p_2 \cdot e \cdot \frac{2aCR^2}{m_3} \cdot \frac{1}{2aCR^2} = \frac{p_2 e}{m_3} \quad (14)$$

$$C_{P,p} = n_3 \cdot k \cdot \frac{2aCR^2}{m_3} \cdot \frac{1}{2aCR^2} = \frac{n_3 k}{m_3} \quad (15)$$

$$C_P = C_{P,f} + C_{P,m} + C_{P,e} + C_{P,p} + C_{P,o} \quad (16)$$

所以秸秆颗粒整个生产环节的成本 (C):

$$C = C_C + C_S + C_T + C_P \quad (17)$$

利用导数计算使总成本 (C) 最低的收集半径 (R) 作为理论最佳收集半径, 再验证在此收集半径下打捆机、运输车辆和秸秆颗粒生产线的产能是否符合实际情况。若符合实际情况, 则计算所得的半径即为最佳收集半径, 若不符合实际情况, 则根据各设备的产能和实际工作时长反算获得最佳收集半径。以上各公式中符号的含义, 取值及来源见表 1。

表 1 模型中各符号含义与取值

Table 1 Meaning and value of symbols in the model

符号	含义	取值	来源
C	单位面积可能源化秸秆资源量		计算
R	收集半径		
E	秸秆人工收集效率	0.117t/h	[10,19-22]

续表 1 模型中各符号含义与取值

符号	含义	取值	来源
k	工人工资	21 元/h	调研
a	每吨秸秆原料可产出秸秆颗粒比例	0.62	计算 ^①
b	单位面积土地租赁价格	7.30 元/m ³	调研
S	需要租用土地面积		
ρ	打捆秸秆堆积密度	0.15kg/m ³	[21,23]
h	打捆秸秆堆积高度	6m	[10,21,22]
r	基准折现率	0.0064	计算 ^②
N_1	打捆机使用年限	10 年	调研
Q_1	打捆机价格	26000 元	调研
α	机械维修占比	0.02	调研
m_1	打捆机产能	6.50t/h	调研
n_1	一台打捆机所需操作人数	2 人	调研
p_1	打捆机电耗	15kW	调研
e	当地电价	0.49 元/kWh	调研
N_2	运输车辆使用年限	10 年	[23]
Q_2	运输车辆价格	55000 元	[23]
m_2	运输车辆额定载重量	3t	[23]
v_1	运输车辆满载运输速度	20km/h	[23]
v_0	运输车辆空载运输速度	25km/h	[23]
N_{en}/m	运输车辆攻载比	9.10kW/t	[23]
g^e	运输车辆满载运输时的耗油量	0.28kg/kWh	[23]
g^o	运输车辆空载运输时的耗油量	0.24kg/kWh	[23]
n_2	一辆运输车搭载人数	3 人	调研
P	运输车辆燃油价格	7.50 元/kg	调研
N_3	加工生产线使用年限	10 年	调研
Q_3	加工生产线设备价格	770000 元	调研
m_3	加工生产线产能	9t/h	调研
p_2	加工生产线额定功率	748kW	调研
w_1	包装费用	10 元/t	[13]
E_z	厂房初投资	40000 元	调研
n_3	一套加工生产线需要的操作人数	6 人	调研
T	装卸时长	0.80h	[22]

① a 是通过秸秆收割时的含水量^[24,25]和自然干燥后的含水量^[17]计算获得, 由于自然干燥后的秸秆含水量符合颗粒机的加工要求, 因此此处忽略干燥后的秸秆原料在颗粒机中的损失; ②基准折现率计算公式: $r = \frac{u - f}{1 + f}$, 其中 u 为银行年利率, f 为通货膨胀率。

1.3 敏感性分析

为探究各计算参数对于最佳收集半径的影响程度, 对最佳收集半径进行单因素敏感性分析。将通过调研或文献获得的数据作为基础值, 每次只变化一个参数, 变动范围为-90%到 100%, 并将最终结果作图, 获得敏感性分析图, 通过曲线变化趋势判断最佳收集半径对于各参数的敏感性。若曲线变化幅度大则表明该参数对于最佳收集半径的影响程度大, 反之则影响较小。

1.4 环境效益

固体燃料用于炊事和采暖是影响农村室内空气质量的重要因素, 其中煤炭等化石燃料的燃烧, 除了会释放大量的污染物之外, 还会释放出大量的二氧化碳等温室气体, 同时还存在着不可再生等缺点。随着“碳达峰”、“碳中和”进程推进, 煤炭在农村地区的应用将受到限制。由秸秆等可再生能源制成的秸秆颗粒除了零碳特性以外, 还会在燃烧中排放出比煤炭更少的污染物, 因此使用秸秆颗粒替代煤炭将成为未来农村地区能源结构转型的趋势。研究表明用特定的生物质炉具燃烧生物质的减排效果更加明显^[26]。因此本研究计算了用秸秆颗粒燃料来替代煤炭燃烧所带来的环境效益:

$$M_c = \frac{q_s M_{s,p}}{q_c} \quad (18)$$

$$M_{j,k} = M_j \cdot EF_{j,k} \quad (19)$$

式中: M_c 为通过热值转化后的煤炭质量, t; q_s 为秸秆颗粒燃料的热值, MJ/kg; $M_{s,p}$ 为秸秆颗粒燃料的质量, t; q_c 为煤炭的热值, MJ/kg; j 为燃料种类, 本研究中为煤炭或秸秆颗粒; k 为污染物种类, 本研究中计算的污染物包括 CO、PM_{2.5}、NO_x 和 SO₂; $M_{j,k}$ 为 j 燃料第 k 种污染物排放量, t; $EF_{j,k}$ 为 j 燃料第 k 种污染物的排放因子, g/kg。两种燃料的排放因子通过查阅文献^[27]获得。

2 结果与讨论

2.1 成都市秸秆资源

成都市 2021 年理论秸秆资源总量为 389.48 万 t, 其中谷类秸秆和油菜秸秆资源量最多, 分别为 198.98 万 t 和 82.26 万 t。2021 年可收集利用的秸秆资源量为 282.00 万 t。图 3 是本研究中考虑的农作物主要的收种时间, 其中生麻、甘蔗、烟叶、蔬菜、其他谷类和其他薯类的收种时间难以获取, 并

且这些农作物产生的秸秆量占比较小, 因此假设这些作物的秸秆在全年均有产生。可以明显看到, 农作物的收获时间可以分为两个阶段, 第一阶段为 6 月及以前收获, 主要包括小麦、玉米、马铃薯、花生和油菜, 这一阶段可收集利用的秸秆量为 157.75 万 t; 第二阶段为 11 月及以后收获, 主要包括水稻、豆类、马铃薯和甘薯, 这一阶段可收集利用的秸秆量为 124.15 万 t。因此对于研究地区的秸秆资源收集应该考虑以上两个阶段的秸秆资源量, 并分阶段收集。

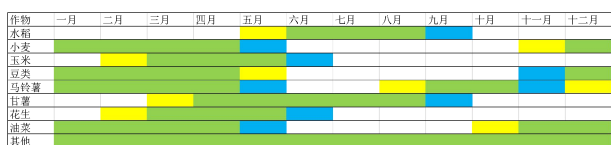


图 3 各农作物收种时间。黄色代表作物播种时间, 绿色代表作物生长阶段, 蓝色代表作物收获时间。

Fig.3 Harvest and sowing time of crops. The yellow, green and blue cells represent the sowing time, the growth stage and the harvest time of crops, respectively

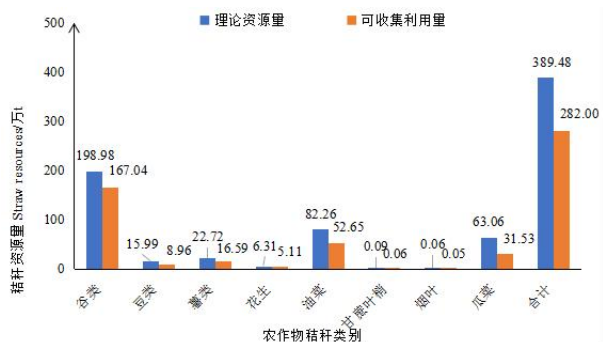


图 4 成都市 2021 年秸秆资源

Fig.4 Straw resources in Chengdu in 2021

2.2 秸秆资源全部资源化应用的最佳收集半径

将成都市农村地区 2021 年的基本数据带入建立好的收集半径计算模型中, 计算获得在第一阶段的理论最佳收集半径为 5.92km, 若将第一阶段所有秸秆资源加工成秸秆颗粒, 则在最佳收集半径下共需要 59 个颗粒加工厂; 第二阶段的理论最佳收集半径为 5.85km, 若将第二阶段所有秸秆资源加工成秸秆颗粒, 则在最佳收集半径下共需要 46 个颗粒加工厂。一个地区的加工厂应该是一个固定的数量, 因此在考虑将所有秸秆资源加工成颗粒的情况下, 选择 5.92km 为理论最佳收集半径。经验证此时所选择的打捆机、运输车辆和加工设备的型号

与数量符合实际情况, 因此计算获得的 5.92km 即是最佳收集半径。在此收集半径下, 秸秆原料的收集面积为 70.15km², 需要处理的秸秆原料总量为 54435.75t, 最终可获得 33750.17t 的秸秆颗粒, 每吨秸秆颗粒燃料的生产成本为 482.87 元 (第一阶段) 和 482.50 元 (第二阶段), 明显低于市场上秸秆颗粒的价格 (约 600 元/t)。

本研究在模型的设计上考虑可能会存在分散种植以及地形等情况, 所以在收集阶段假设采用的是人工收集, 因此具有大量的人工成本, 若根据当地情况选择适度的机械代替人工, 则总成本将会进一步降低。本研究中的最佳收集半径结果远大于已有文献中北方地区某城市的半径值^[11], 原因在于该文献是按照“一村一厂”来建立加工厂的, 所选择的加工厂设备产能较小, 适应于小范围的秸秆颗粒生产, 而本研究并不将收集的范围局限于一个村, 并且考虑了两个阶段来处理秸秆原料, 因此选择的加工厂产能较大, 并且对该文献中在各环节上的收集半径模型进行了补充完善, 使得计算的收集半径有较大差异。

2.3 敏感性分析

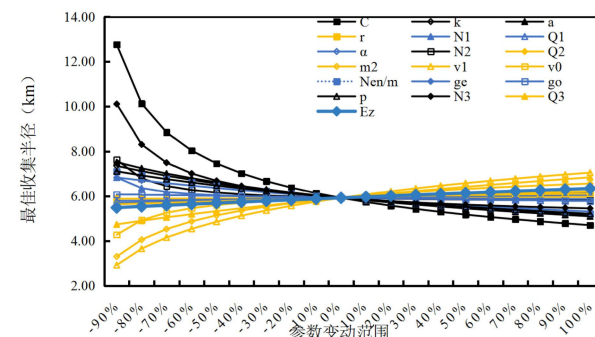


图 5 敏感性分析

Fig.5 Sensitivity analysis

图 5 是各计算参数对于最佳收集半径的敏感性分析。几乎所有参数都在低于基础值时对收集半径的影响较大, 而在高于基础值时对收集半径的影响较小。单位面积可能源化秸秆量、每吨秸秆原料可生产秸秆颗粒的比例、各机械设备的使用年限和运输车辆的燃油价格与收集半径呈负相关关系, 其中单位面积可能源化秸秆量和加工生产线的使用年限对收集半径的影响更加明显。各机械设备的初投资、运输车辆的额定载重量和行驶速度与收集半径呈正相关关系, 其中运输车辆的三个参数对于收

集半径的影响更加明显。敏感性分析表明研究区域的秸秆资源储量以及运输车辆的设计参数是决定收集半径的关键因素，而在选定了一个地区之后，地区秸秆资源量是恒定的，因此所选择的运输车辆是确定该地区最佳收集半径的最主要因素。

本研究在计算最佳收集半径时，考虑将所有的秸秆原料全部加工成秸秆颗粒，但是秸秆的还田应用能够替代部分的化肥用量，也是在实际应用中需要考虑的一个重要因素，因此实际秸秆可用于制成秸秆颗粒的数量要小于当前计算的数量。根据敏感性分析可知，用于能源化的秸秆原料量对于收集半径的影响很大，所以本研究考虑了文献中推荐的还田量和半量秸秆还田两种情况下的最佳收集半径。在假设其他计算参数保持不变的情况下，考虑了文献中推荐的 15% 还田量后的最佳收集半径为 6.25km，与此同时，考虑半量秸秆还田的情况下的最佳收集半径为 7.49km，明显大于全部用于能源化得出的最佳收集半径（5.92km），表明在秸秆资源的综合利用上要合理的根据当地的秸秆种类等现状，因地制宜的确定可用于能源化和肥料化秸秆

的比例，以便于最佳收集半径的确定。

2.4 环境效益

经计算，若将最佳收集半径下加工的全部秸秆颗粒用于生活能源，约可替代 22520.26t 的煤炭燃料。燃用两种燃料的污染物排放计算结果见于表 2。用秸秆颗粒燃料来替代煤炭燃料，将会减少 41.99% 的 CO，85.76% 的 PM_{2.5}，99.44% 的 SO₂ 排放，具有明显的减排效益，能够改善室内空气质量。燃用秸秆颗粒燃料的 NO_x 稍大于燃用煤炭燃料，这主要是因为秸秆生长过程中施肥等使得秸秆内有大量的 N 元素，而秸秆颗粒燃烧过程中最主要的 NO_x 来源是燃料型 NO_x，其产生量与燃料 N 元素含量息息相关，因此燃用秸秆颗粒燃料将会产生较高的 NO_x，如果搭配相应的 NO_x 处理装置，将会大量减少 NO_x 的释放。除此之外，由于生物质燃料属于零碳能源，因此其燃烧过程中释放的 CO₂ 可以默认为零，而经过计算，燃用煤炭的 CO₂ 排放约为 51346 t，可见使用秸秆颗粒燃料能够减少大量的碳排放。

表 2 燃用各燃料的污染物排放量

Table 2 Pollutant emissions by different fuels

燃料类型	热值 (MJ/kg)	数量 (t)	CO ₂ (t)	CO (t)	PM _{2.5} (t)	NO _x (t)	SO ₂ (t)
秸秆颗粒 Straw pellet	14.90	33750.17	0	931.50	13.50	57.04	0.34
煤炭 Coal	22.33	22520.26	51346	1605.70	94.81	20.58	60.13

3 结论

本研究基于成都市农村地区的基本数据，建立了最佳收集半径模型，并计算了适合农村推广秸秆颗粒燃料的秸秆最佳收集半径，得出了以下结论：

(1) “代加工”模式下成都市农村地区秸秆全部能源化利用的最佳收集半径为 5.92km，此半径下秸秆颗粒价格约 483.00 元/t，理论上每年可获得 33750.17t 秸秆颗粒燃料。

(2) 地区秸秆资源储量和运输机械的参数对最佳收集半径的影响最大，在确定地区之后，运输机械的相关参数是确定最佳收集半径的关键。

(3) 若将最佳收集半径内的所有可能源化利用的秸秆做成秸秆颗粒并用作生活能源，将减少 41.99% 的 CO，85.76% 的 PM_{2.5}，99.44% 的 SO₂ 排放以及 51346t 的 CO₂ 排放，具有明显的减排效益。

参考文献：

[1] 杨传文,邢帆,朱建春,等.中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力[J].环境科学研究,2023,44(2): 1149-1162.

[2] 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.

[3] ZHANG S Q, DENG M S, SHAN M, et al. Effect of straw incorporation on aldehyde emissions from a maize cropping system: A field experiment [J]. ATMOSPHERIC ENVIRONMENT, 2018,189(Sep.): 116-124.

[4] ZHANG S Q, DENG M S, SHAN M, et al. A field experimental study on non-methane hydrocarbon (NMHC) emissions from a straw-returned maize cropping system [J]. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, 2018,636:530-538.

- [5] 单明.生物质能开发利用现状及挑战[J].WTO 经济导刊,2022(4):48-49.
- [6] 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.
- [7] 章鹏鑫,邓梦思,马荣江,等.农村典型固体燃料燃烧热动力学特性研究[J].制冷与空调,2022,36(6):863-869.
- [8] DENG M S, ZHANG P X, NIE Y Z, et al. How to improve pollutant emission performances of household biomass cookstoves: A review. Energy and Buildings, 2023,295:113316.
- [9] DENG M S, ZHANG P X, YANG H Y, et al. Directions to improve the thermal efficiency of household biomass cookstoves: A review. Energy and Buildings, 2023,278: 112625.
- [10] WU J J, ZHANG J, YI W M, et al. Economic analysis of different straw supply modes in China[J]. ENERGY, 2021,237.
- [11] 单明,张双奇,邓梦思,等.生物质成型燃料用于北方村镇清洁取暖的技术与模式[J].区域供热,2018(1):6-10,43.
- [12] 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.
- [13] 李鹏超,单明,杨旭东.农村生物质成型燃料加工厂最佳收集半径计算模型[J].区域供热,2019(6):115-120,129.
- [14] 成都市统计局.国家统计局成都调查队.成都统计年鉴——2021[M].北京:中国统计出版社,2021:159-160
- [15] 谢光辉,王晓玉,任兰天.中国作物秸秆资源评估研究现状[J].生物工程学报,2010,26(7):855-863.
- [16] 崔蜜蜜,蒋琳莉,颜廷武.基于资源密度的作物秸秆资源化利用潜力测算与市场评估[J].中国农业大学学报, 2016,21(6):117-131.
- [17] 毕于运.秸秆资源评价与利用研究[D].北京:中国农业科学院,2010:88,128-129.
- [18] 蔡亚庆,仇焕广,徐志刚.中国各区域秸秆资源可能源化利用的潜力分析[J].自然资源学报,2011,26(10):1637-1646.
- [19] SUN Y F, WANG Y P, YANG B, et al. Emergy evaluation of straw collection, transportation and storage system for power generation in China [J]. ENERGY, 2021,231.
- [20] 史航.基于成本分析与能值评价的稻麦秸秆收储运模式研究[D].南京:南京农业大学,2019:20.
- [21] 王菲.黑龙江省秸秆收储运机械化系统构建与分析[D].哈尔滨:东北农业大学,2020:20-21.
- [22] 吕凤朝.秸秆在不同收储运模式下的经济分析[D].郑州:河南农业大学,2017:34-35.
- [23] SUN Y F, CAI W C, CHEN B, et al. Economic analysis of fuel collection, storage, and transportation in straw power generation in China [J]. ENERGY, 2017,132:194-203.
- [24] 袁玲莉,刘研萍,袁彧,等.存储时间对玉米秸秆理化性状及产甲烷潜力的影响[J].农业工程学报,2019,35(13): 210-217.
- [25] 梅自力,易文裕,李江,等.秸秆田间收集与储存期间干物质变化的试验研究[J].四川农业与农机,2018, (2):31-33.
- [26] 张文廷,李闯,叶堃,等.生物质炉具现场测试污染物排放特征及减排效果评估[J].农业工程学报,2020, 36(12):229-235.
- [27] 张双奇.秸秆还田和成型燃料替代农村散煤的能源环境影响研究[D].北京:清华大学,2019:127.