

# 秸秆发电企业燃料运输成本核算及优化分析

许文秀, 吴金卓, 张珊珊

(东北林业大学工程技术学院, 黑龙江哈尔滨150040)

摘要：长期稳定的秸秆资源供应和较低的秸秆运输成本是秸秆发电企业得以盈利并保证长久运营的关键因素。借此以长春市两个备选秸秆发电厂为研究对象，结合草谷比系数、可利用系数、可能源化利用系数等因素估算出备选厂址30km范围内的可能源化利用秸秆资源量。在此基础上，构建秸秆运输成本优化模型，计算出两个备选厂址的秸秆最优运输成本，并对影响运输成本的因素进行敏感性分析。结果表明：两个备选厂址中万顺乡的秸秆最优运输成本较低，敏感性分析发现秸秆含水率和最低秸秆库存数量是影响秸秆到厂运输成本的主要因素。

随着我国经济的快速发展，能源需求量也在逐年上升，能源问题与环境问题已成为我国目前亟待解决的难题[1]。秸秆发电厂在我国已初具规模，很多省份已建厂并开始运营发电[2]。但是，受原材料收购成本、运输成本、电厂运营成本及政府政策等多种因素的影响，国内利用秸秆进行直燃发电的成本一直居高不下[3]。目前，有很多学者对秸秆发电厂原材料运输成本进行了研究和分析。例如，陈丽欢等[4]分析了秸秆发电厂的原材料收储运成本，论述了提高电厂收益、降低原材料收储运成本的方法，并提出秸秆发电厂与普通电厂的原材料成本具有相似性；曹溢等[5]针对目前国内不可再生能源的紧缺及日益严重的环境问题，对秸秆发电厂进行原材料供应成本分析，分别对农业剩余物、林业剩余物及城市垃圾作为原材料进行到厂成本对比分析，细化成本，提出了降低成本的对策。

本文以长春市八号镇和万顺乡两个备选秸秆发电厂址为研究对象，以秸秆资源从供应地到秸秆发电厂的运输成本最小化为目标，设计了秸秆到厂运输成本优化模型，并对结果进行敏感性分析。该模型和敏感性分析结果也可应用于其他秸秆发电厂，以降低秸秆到厂运输成本，提高电厂收益，从而促进秸秆发电产业的发展。

## 1 研究方法

### 1.1 秸秆可能源化利用资源量估算

根据长春市农作物的种植面积及秸秆资源分布及利用现状，对长春市2016年主要农作物秸秆资源的理论资源量、可收集资源量及可能源化利用资源量进行估算及分析，为秸秆运输成本的计算提供数据支持。

#### 1.1.1 理论资源量

理论资源量是指某个地区在某一年某类秸秆资源通过理论计算或分析得出的最大可能的总产量。理论资源量计算是研究资源评价的前提和基础。由于不同秸秆资源特性不同，其理论资源量的计算方法也会不同。一般来说，按照农作物产量和草谷比的乘积进行大致估算[6-7]，即：

$$P = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot G_i \quad (1)$$

式中： $P$  为某地区农作物秸秆的理论资源量(万  $t$ )； $G_i$  为某地区第  $i$  种农作物的年产量(万  $t$ )； $i$  为农作物秸秆的编号( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )； $\lambda_i$  为某地区第  $i$  种农作物秸秆的草谷比<sup>[7]</sup>。

#### 1.1.2 可收集资源量

农作物秸秆资源的收割和收集过程存在一定的浪费，从田间运输至目的地的过程中也会有部分秸秆滑落，产生资源的浪费。由于不同农作物的特性不同，所以不同农作物的收割方式也不同，但收割时很多采用留茬收割方式[8-9]。除去在收割和收集过程中损失的资源，剩余的为可收集资源量。可收集资源量受多方面因素影响，例如作物的收割时间、收割方法、气候因素、收集技术、收集半径及生产技术等[10]。所以，可收集资源量是在指定区域内根据实际采用的收割方法、收集方法和运输方法最终得到的最大秸秆资源量。一般计算方法是由理论资源量乘以可收集系数得出。本文根据此方法计算长春市2016年主要农作物的可收集资源量，计算式[11]如式（2）所示。

$$P_c = \sum_{i=1}^n \eta_{i,1} \cdot (\lambda_i \cdot G_i). \quad (2)$$

式中： $P_c$  为可收集资源量（万 t）， $\eta_{i,1}$  为第  $i$  种农作物秸秆的可收集系数<sup>[12]</sup>。

### 1.1.3 可能源化利用资源量

秸秆资源有多种利用途径和处理方式，这就决定了可收集的秸秆资源量不可能完全被能源化利用。秸秆利用途径和使用方式可总结为：秸秆还田、工业原料、食用菌培养、禽畜饲养、秸秆能源化利用[13-14]。秸秆可能源化利用量可以通过可收集资源量与可能源化利用系数的乘积获得[15-16]，如式（3）所示。

$$P_e = \sum_{i=1}^n \eta_{i,2} \cdot \eta_{i,1} \cdot (\lambda_i \cdot G_i). \quad (3)$$

式中： $P_e$  为可能源化利用资源量（万 t）； $\eta_{i,2}$  为第  $i$  种农作物秸秆的可能源化利用系数。

### 1.2 秸秆运输成本优化模型

### 1.2.1 目标函数

秸秆运输成本优化模型的目标函数为全年总运输成本最小化,即:

$$\min Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \tau_{ij} \cdot xt_{ijm}. \quad (4)$$

式中: $\tau_{ij}$ 为单位重量秸秆从秸秆供应地*i*运输到秸秆发电厂*j*的运输成本(元·t<sup>-1</sup>), $xt_{ijm}$ 为第*m*( $m=1,2,\dots,12$ )个月从秸秆供应地*i*运输到秸秆发电厂*j*的秸秆量(t)。

单位重量秸秆的运输成本 $\tau_{ij}$ <sup>[18]</sup>可以按照式(5)进行计算:

$$\tau_{ij} = \frac{t_{ij}}{Q}. \quad (5)$$

式中: $t_{ij}$ 为平均每辆车从秸秆供应地*i*到秸秆发电厂*j*之间往返运输的车辆总成本(元), $Q$ 为平均每辆车的运载能力(t)。在计算单位重量秸秆的运输成本 $\tau_{ij}$ 过程中使用的参数及其说明如表1所示。

表1 参数说明表

参数	说明
$d_{ij}$	供应地 <i>i</i> 地到秸秆发电厂 <i>j</i> 地的距离(km)
$kpl$	每升柴油可供运行距离(km/l)
$fpl$	柴油价格(元/l)
$dwh$	劳动力费用(元/h)
$kph$	车辆每小时行驶距离(km/h)
$n$	车辆使用年限(年)
$smh$	每年车辆规定使用时间(h)
$ut$	车辆利用率(%)
$P$	每台车辆购置价格(元)
$S$	每台车辆报废后残值(元)
$iitr$	利息、保险、税费占年平均投资成本的比例(%)
$mr$	维修、维护率(%)

平均每辆车从秸秆供应地  $i$  到秸秆发电厂  $j$  之间往返运输的车辆总成本  $t_{ij}$  包括：从  $i$  地到  $j$  地的燃料费  $M$ 、人工费用  $R$ 、车辆的固定成本折旧费  $G$ 、利息、保险、税等费用  $V$  以及车辆的维修费用  $W$ ，即有式(6)：

$$t_{ij} = M + R + G + V + W. \quad (6)$$

1) 燃料费用  $M$ 。平均每辆车运送秸秆的燃料费用等于平均每辆车从农作物秸秆供应地  $i$  到秸秆发电厂  $j$  运送秸秆的耗油量  $L$  与燃油价格  $f_{pl}$  的乘积，如式(7)所示。

$$M = L \cdot f_{pl} = \frac{2d_{ij}}{k_{pl}} \cdot f_{pl}. \quad (7)$$

在式(7)中， $L = \frac{2d_{ij}}{k_{pl}}$  表示平均每辆车从  $i$  地到秸秆发电厂  $j$  地运送秸秆的耗油量，等于农作物秸秆供应  $i$  地到秸秆发电厂  $j$  地的往返距离与每升柴油可供运行距离的商。

2) 人工费用  $R$ 。平均每辆车运送秸秆的人工费用等于平均每辆车从秸秆供应地  $i$  到秸秆发电厂  $j$  地之间运送秸秆的时间  $t$  与平均每一小时间的人工费用  $d_{wh}$  的乘积，如式(8)所示。

$$R = t \cdot d_{wh} = \frac{2d_{ij}}{k_{ph}} \cdot d_{wh}. \quad (8)$$

在式(8)中， $t = \frac{2d_{ij}}{k_{ph}}$  表示平均每辆车从  $i$  地到  $j$  地之间运送秸秆的往返时间。

3) 固定成本折旧费  $G$ 。平均每辆车运送一次秸秆的固定成本折旧费等于单位时间车辆的固定成本折旧费和平均每辆车从农作物秸秆供应地  $i$  地到秸秆发电厂  $j$  地之间运送一次秸秆的时间  $t$  的乘积，如式(9)所示。

$$G = \frac{P-S}{T} \cdot t = \frac{P-S}{n \cdot smh \cdot ut} \cdot \frac{2d_{ij}}{k_{ph}}. \quad (9)$$

4) 利息、保险、税等费用  $V$ 。平均每辆车运送一次秸秆的利息、保险、税等费用等于单位时间车辆的利息、保险、税等费用和平均每辆车从  $i$  地到秸秆发电厂  $j$  地之间运送一次秸秆的时间  $t$  的乘积，如式(10)所示。

$$V = \left[ \frac{(P-S)(n+1)}{2n} + S \right] \cdot iitr \cdot \frac{2d_{ij}}{k_{ph}}. \quad (10)$$

5) 车辆的维修费用  $W$ 。平均每辆车运送一次秸秆的维修费用等于单位使用时间的维修费用与平均每辆车从农作物秸秆供应地  $i$  地到秸秆发电厂  $j$  地之间运送一次秸秆的时间  $t$  的乘积，如式(11)。

$$W = \frac{(P-S) \cdot mr}{n \cdot smh \cdot ut} \cdot \frac{2d_{ij}}{k_{ph}}. \quad (11)$$

综上所述,将式(7)一式(11)分别代入式(6)中,得出平均每辆车从秸秆供应地*i*到秸秆发电厂*j*地之间往返运输的车辆总成本 $t_{ij}$ 。

$$t_{ij} = M + R + G + V + W = \frac{2d_{ij}}{kpl} \cdot fpl + \frac{2d_{ij}}{kph} \cdot dwh + \frac{(P-S)}{n} + \left[ \frac{(P-S)(n+1)}{2n} + S \right] \cdot iitr \cdot \frac{1}{smh \cdot ut} \quad (12)$$

$$\frac{2d_{ij}}{kph} + \frac{(P-S) \cdot mr}{n \cdot smh \cdot ut} \cdot \frac{2d_{ij}}{kph}$$

### 1.2.2 约束条件

秸秆运输成本优化模型的约束条件包括可能源化利用资源量、秸秆发电厂的储存平衡约束、秸秆每月需求量约束以及秸秆发电厂的库存相关约束等。

1)可能源化利用资源量约束。从秸秆供应地运输到秸秆发电厂的秸秆资源总量应小于该地区可能源化利用秸秆资源量,如式(13)所示,其中 $b_i$ 为秸秆供应地*i*秸秆资源可能源化利用量。

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M xt_{ijm} - b_i \leq 0. \quad (13)$$

2)秸秆发电厂的秸秆储存平衡约束。该约束条件要求当月运输到电厂的秸秆量与上月储存的可用秸秆量之和与本月秸秆储存量和使用量( $xpp_{jm}$ )存在平衡关系,如式(14)所示。其中, $\delta$ 为运输过程中的损耗(%), $mc$ 为秸秆燃料的平均含水率(%), $\varphi$ 为秸秆电厂的秸秆燃料可利用系数(%), $xss_{jm}$ 为第*m*个月在电厂的秸秆储存数量。

$$\sum_{i=1}^I (1-\delta)(1-mc)xt_{ijm} + \varphi \cdot xss_{j(m-1)} - xss_{jm} - xpp_{jm} = 0. \quad (14)$$

3)秸秆发电厂每月秸秆需求量约束。根据秸秆发电厂的装机容量可知每天的秸秆需求量 $\rho$ ,结合电厂每月的工作天数*Q*,可以得到秸秆发电厂每月秸秆需求量约束,如式(15)所示。

$$xpp_{jm} - \rho \cdot Q = 0, \quad \forall j, m. \quad (15)$$

4)电厂每个月的最小秸秆库存量约束。为了保证秸秆发电企业的正常运行,需要在电厂储存一定量的秸秆资源,如式(16)所示,其中, $MIN$ 表示秸秆发电厂的最小秸秆库存数量(t)。

$$xss_{jm} - MIN \geq 0 \quad \forall j, m. \quad (16)$$

5)电厂每个月的最大秸秆库存量约束。由于受到电厂厂区面积的限制以及安全管理要求,秸秆电厂的最大库存量应满足式(17),其中, $MAX$ 表示秸秆发电厂的最大秸秆库存数量(t)。

$$xss_{jm} - MAX \leq 0 \quad \forall j, m. \quad (17)$$

## 6) 变量非负约束。

$$xt_{ijm}, xss_{jm}, xp_{jm} \geq 0. \quad (18)$$

### 2结果与分析

#### 2.1 备选厂址30km内可能源化利用秸秆资源量

根据已有的草谷比取值选择方法及八号镇和万顺乡农作物的地理分布情况，选用适合长春市的草谷比取值。结合八号镇和万顺乡2016年稻谷、小麦、玉米、大豆及其它作物的产量，按照式(1)至(3)以及可收集系数0.8、0.65、0.90、0.88、0.80和可能源化利用系数0.4进行计算，得到八号镇和万顺乡30km范围内秸秆资源的理论资源总量分别为171.97万t和343.95万t，可收集资源量分别为152.22万t和304.44万t，可能源化利用资源量分别为60.89万t和121.78万t。

从八号镇和万顺乡的农作物秸秆理论资源量、可收集资源量及可利用资源量的计算结果可知，八号镇和万顺乡未来发展秸秆资源前景十分广阔。本文可能源化利用资源量比可收集资源量少约了274万t秸秆资源，说明长春市被能源化利用的秸秆资源只是一部分资源，综合利用效率不高，不仅造成资源浪费，而且污染环境，秸秆能源化有待进一步的提高，以减小对不可再生能源的依赖。未来发展的方向重点应放在秸秆资源发电以期缓解能源紧缺问题的同时改善生态环境。

#### 2.2 秸秆运输成本核算及优化分析

采用通用代数建模系统 (General Algebraic Modeling System, GAMS) 对模型进行求解。GAMS是一个数学规划和优化高层次的建模系统。它是由一种语言的编译器和一个集成的高性能求解方法。GAMS是一种复杂的，可以很快适应新形势的大规模建模应用程序，并且允许用户建立大型的维护模式。

在备选厂址拟建1套高温高压振动130t炉排锅炉配25MW发电供热机组，平均每天消耗农作物秸秆量约为800t，要求电厂库存秸秆量最低满足1个月的燃料需求，最多不能超过3个月的库存量。

运输车辆采用东风7.2m长卡车，满载运量为13.5t。备选电厂的秸秆主要来自于周边的6个乡镇的秸秆资源，秸秆综合利用率为40%。运输有关参数为：车辆购置费120000元，车辆使用年限8年，不考虑残值。每年车辆使用时间为1920h，车辆利用率80%，保险、利息等占年平均投资成本50%，维护率90%，满载车辆行驶速度为50km/h，满载时百公里油耗约为20l，柴油价格为7元/L，劳动力费用为7.5元/h。将这些基础数据代入运输成本优化模型，并在GAMS环境下运行该模型，得到八号镇厂址全年最低运输成本为186.01万元/a，万顺乡厂址的最低运输成本是146.45万元/a。

#### 2.3 运输成本敏感性分析

由于运输成本核算模型中的参数会受到外界因素的影响，所以，针对不同条件下的秸秆运输成本进行了敏感性分析(图1~图4)，这样可以增加结果的可靠性。

1) 综合可利用系数。秸秆资源到厂的运输成本与秸秆资源综合可利用系数的关系如图1所示。

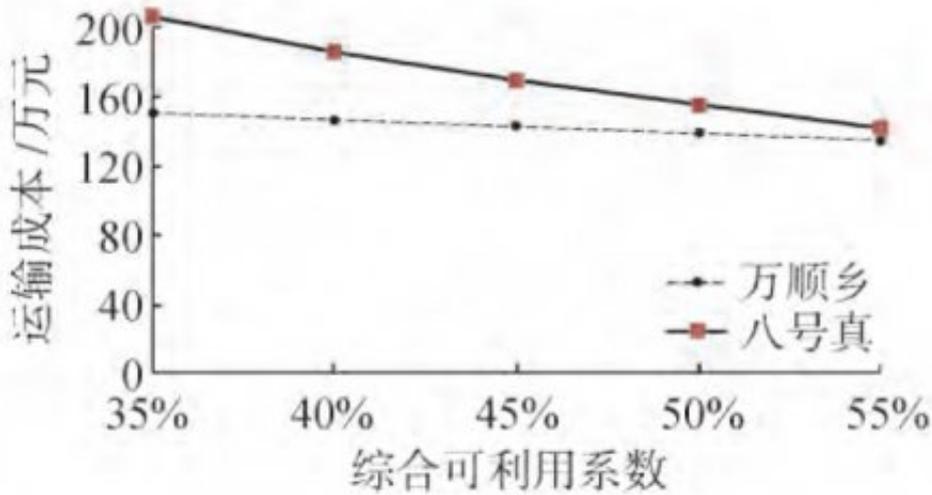


图 1 综合可利用系数与运输成本的关系

由图1可知，随着秸秆的综合可利用系数的增加，运输成本逐渐减小。一般地，综合可利用系数增加20%，八号镇和万顺乡的秸秆年运输成本将分别降低63.35万元和14.54万元。相反地，当综合可利用系数逐渐变小时，运输成本会不断地增加，但是，当综合可利用系数小到一定值时，秸秆资源的可利用量将不能满足电厂的秸秆需求。

2) 燃油价格。秸秆资源到厂的运输成本与燃油的价格关系如图2所示。

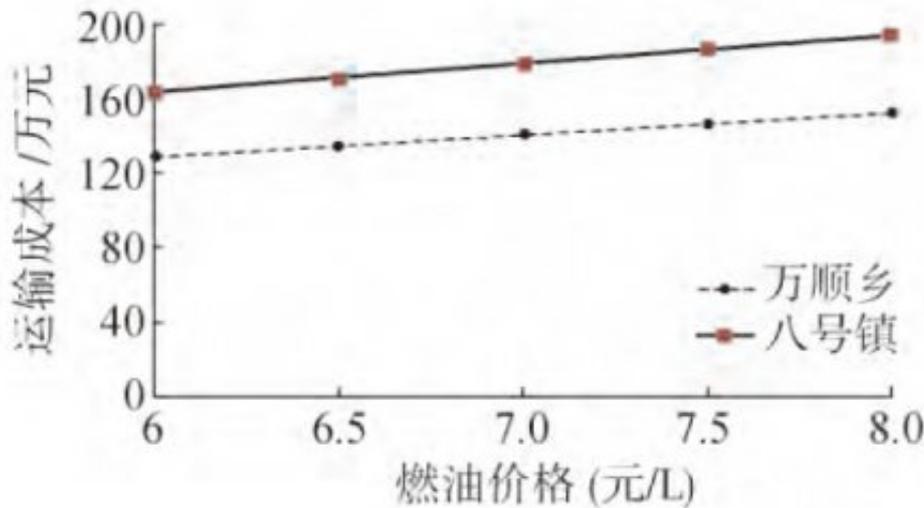


图 2 燃油价格与运输成本的关系

在秸秆资源的运输过程中，会消耗一定量的燃油（柴油），所以燃油价格的变化，必然会引起运输成本的相应改变。由图2可知，秸秆到厂的运输成本随着燃油价格的上升而增加。燃油价格每增加0.5元/l，八号镇和万顺乡的年运输成本将分别增加7.56万元和5.95万元。

3) 秸秆含水率。秸秆资源到厂运输成本与秸秆资源含水率的关系如图3所示。

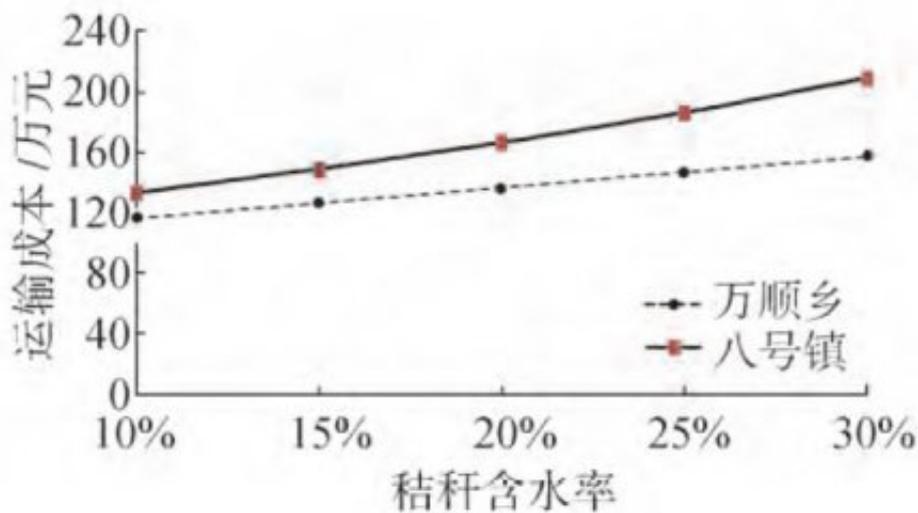


图3 秸秆含水率与运输成本的关系

自然状态下的秸秆并不是完全干燥的，而是具有一定的含水率。由图3可知，秸秆含水率越高，秸秆的运输成本越高，这主要是因为秸秆含水率越高，秸秆的重量越大，会影响秸秆运输的次数、汽车耗油量等，所以秸秆含水率越高，秸秆运输成本越高。一般地，秸秆含水率应控制在15%以下，此时运输成本将得到有效地降低。

4) 最低秸秆库存。秸秆资源的到厂成本与秸秆在电厂的最低库存数量关系如图4所示。

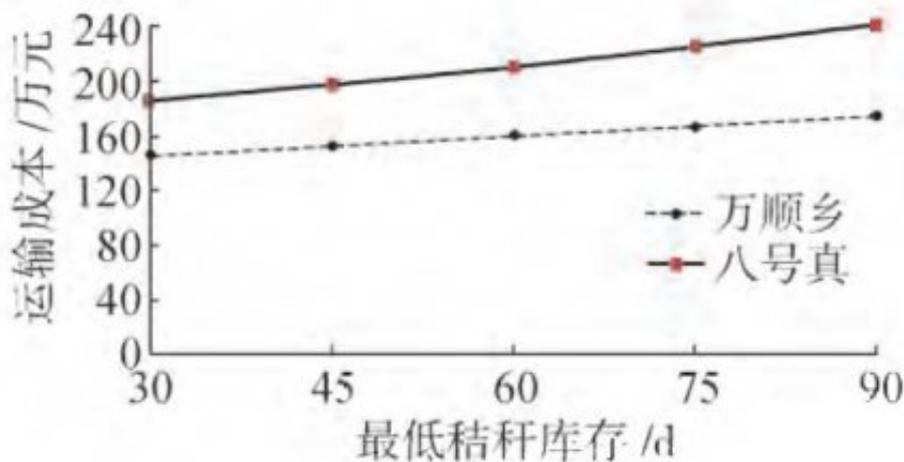


图4 运输车辆与最低秸秆库存的关系

在电厂储存一定数量的秸秆可以保证电厂的正常运行，但是，过多的秸秆库存将占用大面积的厂区用地，因此应加以控制。由图4可知，当增加电厂最低秸秆资源库存时，秸秆到厂运输成本将增加，与最低1个月秸秆库存相比，库存每增加半个月，八号镇和万顺乡的秸秆到厂成本将平均增加13.64万元和7.15万元。

综上所述，秸秆资源到厂的运输成本受很多因素的影响，结合秸秆自身特点逐一分析秸秆综合可利用系数、燃油价格、秸秆含水率及最低秸秆库存数量对秸秆到厂运输成本进行敏感性分析，最后发现秸秆含水率和最低秸秆库存数量是主要影响因素。

3结束语

本文结合了长春市农作物收获季节特性、秸秆自身特点、可能源化利用秸秆资源量及电厂发电规模和库存要求等数据，对长春市的两个备选秸秆电厂厂址八号镇和万顺乡的秸秆燃料运输成本进行优化，并对不同影响因素下的运输成本进行了敏感性分析。经对运输成本核算发现，万顺乡的全年秸秆燃料运输成本皆小于八号镇的运输成本。运输成本的核算过程受秸秆含水率和最低秸秆库存数量影响较大。在实际运用中，可以通过降低秸秆含水率和最低秸秆库存数量来降低秸秆的运输成本。

## 参考文献：

- [1] 刘岗, 郝德海, 董玉平. 秸秆收集成本研究及实证分析[J]. 技术经济, 2006(2):85-88.
- [2] 马洪儒, 张运真. 秸秆发电技术研究进展与分析[J]. 水利电力机械, 2006, 28(12):9-13.
- [3] 李忠. 秸秆综合利用现状与对策分析[J]. 中国资源综合利用, 2017(12):72-74.
- [4] 陈丽欢. 生物质发电秸秆收集储存运输物流技术规范研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- [5] 曹溢, 沈辉. 秸秆发电过程中原料收集的成本分析[J]. 电力与能源, 2012, 33(5):463-466.
- [6] 黄少鹏. 影响秸秆发电产业发展的制约因素分析——基于五河凯迪生物质能发电厂调研[J]. 再生资源与循环经济, 2014, 7(8):17-19.
- [7] 许文秀, 张珊珊, 吴金卓. 城市停车换乘两阶段选址模型[J]. 交通科技与经济, 2018, 20(1):13-16.
- [8] 张世龙, 郑美灵. 生物质直燃发电项目经济效益分析及政策选择[J]. 杭州电子科技大学学报(社会科学版), 2013(1):36-41.
- [9] 闻雯. 我国秸秆发电原料供应链成员间的博弈分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
- [10] 王丽欣, 胡晋山. 基于移动 GIS 物流管理系统的设计与开发[J]. 交通科技与经济, 2017, 19(3):58-62.
- [11] 高建伟, 张昊渤, 纵翔宇. 秸秆发电厂秸秆收购优化方案及其成本估算模型[J]. 可再生能源, 2017, 35(1):141-147.
- [12] 汪芳, 陈新春. 农作物秸秆利用现状及综合利用技术[J]. 农技服务, 2007, 24(8):117-117.
- [13] 顾克军, 顾东祥, 张斯梅, 等. 耕作与秸秆还田方式对稻茬麦草谷比及麦秸可收集系数的影响[J]. 江西农业学报, 2014, 26(4):6-9.
- [14] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):211-217.
- [15] BUSSIECK M R, MEERAUS A. General Algebraic Modeling System (GAMS)[M]. Modeling Languages in Mathematical Optimization. Springer US, 2004: 137-157.
- [16] SOKHANSANJ S, KUMAR A, TURHOLLOW A F. Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL)[J]. Biomass & Bioenergy, 2006, 30(10):838-847.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/167376.html>