

# 生物质发电燃料收集成本测算模型及实证分析

檀勤良，杨海平，张兴平，邓艳明，魏咏梅

(1.华北电力大学经济与管理学院，北京102206；2.北京能源发展研究基地，北京102206)

**摘要：**生物质发电成本过高是制约生物质发电企业发展的重要因素，而秸秆燃料的收集成本是生物质发电燃料成本的主要构成部分。应用微积分法建立秸秆燃料收集成本模型，以25MW生物质电厂为例测算秸秆收集成本，并分析了秸秆收集成本的构成。实证研究表明，运输成本是秸秆收集成本的关键组成部分。敏感性分析表明，秸秆收集半径是影响秸秆收集成本的最敏感的因素。同时模拟分析表明秸秆收集成本、秸秆运输成本与经纪人数量呈u型关系，因此科学合理地确定经纪人数量有利于降低秸秆收集成本。根据研究结论，提出了促进生物质发电产业发展的相关政策建议。

许多学者对生物质秸秆的收集成本进行了研究。作为农业大国，我国有着丰富的生物质能资源。促进生物质能的健康发展，不仅有助于缓解日益突出的能源短缺与环境问题，也可以有效增加农民收入，推进社会主义新农村建设。为此，我国政府出台了相应的优惠政策促进生物质发电产业的发展。但生物质发电行业仍然出现持续大面积的亏损，究其原因，主要是我国秸秆资源分布散，生物质发电秸秆收集运输成本过高。

Sokhansanj等搭建了动态综合生物质供应分析和物流模型框架，模拟生物质燃料的收集、储存和运输。Dyken等在考虑供应、运输、储存和不同生物质用户的基础上建立了线性混合整数模型，分析生物质能源的物流系统。俞宏德等建立了一套生物质燃料从储料场到电厂之间的运输及处理相关过程的物流模型，用以模拟、观察并分析各种不同的物流方案。

Caputo等对生物质发电厂经济性分析结果表明，车辆运输价格增加、车容量下降、资源密度降低、生物质购买价格提高将增加运行成本，将导致经济效益降低。刘岗等认为生物质企业成本主要受生物质秸秆收集成本的影响，并通过定积分微元分析法，对给定环境下生物质秸秆的收集成本进行测算。曹溢等H伽以江苏地区某电厂为例，对秸秆收集成本进行测算并进行了敏感性分析。

杨树华等提出了秸秆收集的经济半径、平均运输半径及满载和空载等效模型，建立了综合反映颗粒燃料生产厂投资、运输条件、耗油价格关系的颗粒燃料生产厂原料收集最佳半径的数学模型经实例计算对模型进行了初步的验证，得出农作物的秸秆收集最佳半径随运输耗油量、油价的升高而降低。邢爱华等建立了描述秸秆收集过程成本、能耗和污染物排放的数学模型。针对单资源岛秸秆收集过程，讨论了压缩对秸秆收集成本、能耗及环境的影响，建立了计算秸秆收集过程的临界收集量和临界运输距离的数学表达式，并对收集成本和能耗进行了参数敏感性分析。LidijCu等在生物质能供应链中，针对生物质燃料收集、预处理、运输和能量转化四个关键环节，建立了不同的“环境足迹”模型来反映不同环节对生态环境的影响，并建立了多目标规划模型对区域生物质能供应链进行优化。文献建立大规模混合整数规划模型对生物质能供应链进行优化。

生物质秸秆收集模式的不同将会对收集成本产生显著的影响。绝大部分文献是假设在经纪人统一收集模式下进行核算。本文在对多个生物质发电厂进行深度实地调研后发现：生物质发电厂秸秆供应主要有两种模式，即来自于经纪人和农户，并且发现在距离电厂一定距离内，农户更倾向于自己把秸秆送到电厂而不是由经纪人统一收购后送往电厂。所以在电厂一定半径内秸秆是直接送往电厂的，而在这个半径外秸秆的收集基本上是由经纪人完成的。由此，本文充分考虑到以上两种情形，从多样性交易成本出发，分析秸秆原料从田间到进入生物质电厂的收集过程，构建秸秆发电燃料成本的计算方法并对影响成本的因素进行敏感性分析，为生物质发电上网电价的制定提供理论依据。

## 1模型建立

由于秸秆资源分布的不确定性，假设秸秆资源的收集范围是以电厂为中心的圆形区域，并且是均匀分布在收集范围之内。秸秆的收集成本主要由秸秆购买成本、运输成本、预加工成本和仓储成本构成。

### 1.1秸秆的购买成本

秸秆购买成本是指秸秆所有人，即农户，放弃秸秆所有权而得到的补偿。秸秆收集量  $Q$  与收集半径  $R$  和收集区域秸秆的密度  $\rho_i$  有关，即

$$Q = \pi \cdot R^2 \cdot \rho_i \quad (1)$$

由于农户在一年中会种植不同的作物，用  $C_{g,i}$  代表某一种秸秆的购买成本，则购买成本表达式为：

$$C_g = \sum_{i=1}^n C_{g,i} = \sum_{i=1}^n Q \cdot u_i \quad (2)$$

式中， $i$  代表秸秆的种类； $u_i$  代表秸秆购买单价，即单位补偿价格， $\frac{\text{元}}{t}$ 。

#### 1.2 秸秆的运输成本

运输成本包括公路运输费用与秸秆装卸费用。运输费用与运输距离和运输量有关，考虑到实际情况农村的公路不可能是直线，所以引入曲折因子 $\beta$ ，取它的值为 $\sqrt{2}$ <sup>[17]</sup>。对于散户直接送往电厂的运费用 $C_{n,1}$ 表示，其计算公式为：

$$C_{n,1} = \sum_{i=1}^n \iint \rho_i r \beta c_n r dr d\theta \quad (3)$$

式中， $c_n$ 代表散户的单位运费，由普通拖拉机的耗油费与人工费进行核算， $\frac{\bar{c}_n}{(t \cdot \text{km})}$ 。

对式(3)积分得：

$$\sum_{i=1}^n \int_0^{2\pi} \int_0^r \sqrt{2} \rho_i r^2 c_n dr d\theta = \sum_{i=1}^n \frac{2\sqrt{2}}{3} \pi \rho_i r^3 c_n \quad (4)$$

散户的装卸过程为一装一卸，即在农田中把秸秆装上车到电厂卸下，所以散户的装卸费用为：

$$C_{n,2} = \sum_{i=1}^n 2p_n \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho_i \quad (6)$$

式中， $p_n$ 代表散户单位装卸费用，由普通农民人工费进行核算， $\frac{\bar{p}_n}{t}$ 。

则，散户的总运输成本为：

$$C_{n1} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{2\sqrt{2}}{3} \pi \rho_i r^3 c_n + 2p_n \cdot \pi r^2 \rho_i \right) \quad (7)$$

对于经纪人的运费用 $C_{2,1}$ 表示，由于电厂周围存在 $m$ 个经纪人，用 $C_{2,1}^k$ 代表某一个经纪人的运输费用（ $k = 1 \cdots m$ ）。 $C_{2,1}^k$ 分为两部分费用，经纪人在其收集半径内的运输费用 $C_{2,11}$ 和收购点到电厂的运输费用 $C_{2,12}$ 。与 $C_{n,1}$ 类似， $C_{2,11}$ 可表示为：

$$C_{2,11} = \sum_{i=1}^n \int_0^{2\pi} \int_0^{r_k} \sqrt{2} \rho_i r_k^2 c_j dr d\theta = \sum_{i=1}^n \frac{2\sqrt{2}}{3} \pi \rho_i r_k^3 c_j \quad (8)$$

式中， $r_k$ 代表某一个经纪人的收集半径， $m$ ； $c_j$ 代表经纪人的单位运费， $\frac{\bar{c}_j}{(t \cdot \text{km})}$ 。

$C_{2,12}$ 为运输距离与运输量的乘积：

$$C_{2,12} = \sum_{i=1}^n \pi \cdot r_k^2 \cdot \rho_i \cdot \beta \cdot L_k \quad (9)$$

式中， $L_k$ 代表收购点到电厂的距离， $m$ 。

所以，对于一个经纪人来说其运输费用为：

$$C_{2,1}^k = C_{2,11} + C_{2,12} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{2\sqrt{2}}{3} \pi \rho_i r_k^3 c_j + \pi r_k^2 \rho_i \beta L_k \right) \quad (10)$$

电厂共有 $m$ 个经纪人，所有经纪人的运输费用可以表示为：

$$C_{2,1} = \sum_{k=1}^m C_{2,1}^k = \sum_{k=1}^m \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{2\sqrt{2}}{3} \pi \rho_i r_k^3 c_j + \pi r_k^2 \rho_i \beta L_k \right) \right] \quad (11)$$

经纪人的装卸过程为由田间到其收购点再由收购点到电厂，所以存在两次装卸费用，经纪人的装卸费用为：

$$C_{2,2} = \sum_{i=1}^n 4p_j \cdot \pi \cdot (R^2 - r^2) \cdot \rho_i \quad (12)$$

式中， $p_j$ 代表经纪人单位装卸费用， $\frac{\bar{p}_j}{t}$ 。

由于 $p_j$ 是经纪人聘用专门人员进行装卸，所以单位装卸费用 $p_j$ 会与 $p_n$ 有所不同。则经纪人的总运输成本为：

$$C_{2} = C_{2,1} + C_{2,2} = \sum_{k=1}^m \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{2\sqrt{2}}{3} \pi \rho_i r_k^3 c_j + \pi r_k^2 \rho_i \beta L_k \right) + 4p_j \pi (R^2 - r^2) \rho_i \right] \quad (13)$$

### 1.3 秸秆预处理与仓储费用

经纪人在收集秸秆过程中，为运输方便，需要对秸秆进行粉碎、压缩与打包的预处理。用  $C_w$  代表预处理费用，主要包括预处理设备的折旧费  $F_{year}$  和运行费  $C_{w,o}$ 。

假设设备的购置费用为  $F$ ，采用平均折旧法，年折旧额为：

$$F_{year} = F \times \frac{(1 - RV)}{n} \quad (14)$$

式中， $RV$  为固定资产净残值率； $n$  为折旧年限。运行费用（主要是燃料费）的计算公式为：

$$C_{w,o} = \sum_{i=1}^n \pi \cdot (R^2 - r^2) \cdot \rho_i \cdot O \cdot C_o \quad (15)$$

式中， $O$  代表秸秆加工单位耗油量， $\frac{L}{t}$ ； $C_o$  代表单位油价， $\frac{\text{元}}{L}$ 。

总预加工费用为：

$$C_w = F_{year} + C_{w,o} = F \times \frac{(1 - RV)}{n} + \sum_{i=1}^n \pi (R^2 - r^2) \rho_i \cdot O \cdot C_o \quad (16)$$

仓储费用主要包括储存场地租赁费、打捆、码垛以及人工费。仓储费用的计算公式为：

$$C_l = \sum_{i=1}^n \pi \cdot (R^2 - r^2) \cdot \rho_i \cdot s_i \quad (17)$$

式中， $s_i$  为单位存储费用， $\frac{\text{元}}{t}$ 。

#### 1.4 秸秆收集成本

本文的收集成本是指秸秆到厂成本，并非生物质电厂的入炉成本。农户和经纪人的目标利润可以表示为：

$$P = \sum_{i=1}^n [\pi r^2 \rho_i \cdot a_i + \pi(R^2 - r^2)\rho_i \cdot b_i] \quad (18)$$

式中， $a_i$  代表支付给散户的单位利润， $\frac{\bar{\pi}}{t}$ ； $b_i$  代表支付给经纪人的单位利润， $\frac{\bar{\pi}}{t}$ 。

则秸秆的到厂成本可以表示为：

$$C = C_g + C_t + C_w + C_l + P = \sum_{i=1}^n \pi \cdot \rho_i \cdot \left[ \frac{2\sqrt{2}}{3} r^3 \cdot c_n + r^2 \cdot (2p_n + a_i) + \sum_{k=1}^m \left( \frac{2\sqrt{2}}{3} r_k^3 c_j + r_k^2 \beta L_k \right) + R^2 \cdot u_i + (R^2 - r^2)(4p_j + b_i + s_i + O \cdot C_o) \right] + F \times \frac{(1 - RV)}{n} \quad (19)$$

#### 2 实证分析

选取河北省一个25MW的生物质发电厂为例，该生物质电厂正常生产需要秸秆量大约28万吨。该地区的秸秆量为337.5万吨，面积为1.2万平方公里，所以秸秆密度为337.5t / km<sup>2</sup>

。但实际可用于秸秆发电的秸秆只占到20%左右，即可利用密度为67.5t / km<sup>2</sup>

。这样，理论收集半径达到36.33km，但在实际的调研中发现该电厂收集半径最远能达到100km。本文在做了大量的实际调查研究之后以实际情况进行秸秆收集成本的预测。本文选取半径70km收集区域为研究对象，通过调研得知，如果在电厂10km以内，农户还是会选择自己把秸秆送往电厂的。经纪人的数量为12人，收购点距离电厂的距离统一选取为40km。相关的数据如表1所示(根据统计年鉴和调研数据整理)。

**表 1 秸秆收集参数**

指标	数值	指标	数值
$r$	10.00	$L_k$	40.00
$R$	70.00	$p_j$	10.00
$r_k$	20.00	$O$	0.85
$\rho_i$	18.19	$p_n$	5.00
$a_i$	10.00	$\pi$	3.14
$c_n$	2.00	$RV$	0.50
$b_i$	50.00	$F$	20.00
$c_j$	5.00	$N$	15.00
$C_o$	7.72	$JN$	12.00
$u_i$	70.00	$s_i$	30.00
$r_k^r$	20.00	$\xi$	0.50

项目所在地作物为一年一季，即只有一种作物，设备燃油消耗根据文献所得。按照本文所建的模型得到的秸秆收集成本，结果见表2。

**表 2 收集成本分析表 (单位: 万元)**

项 目	购买成本	运输成本	预处理费用	仓储费用	目标利润	收集成本	单位收集成本 (元)	单位千瓦收集成本 (元)
金额	1960.00	3409.90	184.40	840.00	1377.10	7771.50	277.60	0.48
百分比	25.22%	43.88%	2.37%	10.81%	17.72%	100.00%		

计算得到秸秆的单位收集成本为277.6元/t左右，根据实际调研的数据了解到电厂的收集成本在290元/t左右，比较接近实际情况，说明模型的设定比较合理。以一个25MW的生物质电厂为例，年秸秆消耗量在28万吨左右，按年运行6500小时，发电量为1.625亿度，可以计算出每度电秸秆收集成本为0.48元。根据对该电厂的实际调研数据可知，其每度电发电成本为0.75元左右，度电收集成本占到发电成本的64%。因此，秸秆收集成本是决定生物质发电厂能否盈利的关键因素。

表2说明，运输成本占秸秆收集成本的比例高达43.88%，高昂的运输成本在使秸秆收集困难的同时也增加了秸秆的收集成本。经纪人和农户的目标利润占到17.72%。在调研过程中发现，经纪人的利润率是比较高的。仓储成本占到10.81%，也是收集成本的重要组成部分。由于秸秆的低密度性，秸秆的存储需要占用较大的空间。秸秆在进行打捆、堆垛前要进行预加工处理来降低秸秆的占用空间，进而节省运输与存储成本。该电厂预处理成本占到2.39%，占收集成本比例较小。所以，通过秸秆的粉碎、压缩等预处理可以降低秸秆的收集成本。

通过实地调研了解到，目前大多数生物质电厂处于亏损边缘，发电成本过高严重制约着生物质发电厂的发展。对于一个年发电量在1.6亿度电的生物质电厂，其秸秆消耗量在28万吨左右，每年可以减排CO<sub>2</sub>约15.3万吨，如果按照清洁发展机制下的CERs补贴价为每吨60元，可以给生物质电厂补贴收入918万，生物质电厂就能达到盈利的状态。

### 3敏感性分析

为了更加直观地反映出秸秆收集成本的变化情况，对影响秸秆收集成本的主要因素进行敏感性分析。把收集半径、购买单价和经纪人利润率分别增大10%、20%、30%、40%、50%后，计算秸秆收集成本的变化情况，结果如图1。

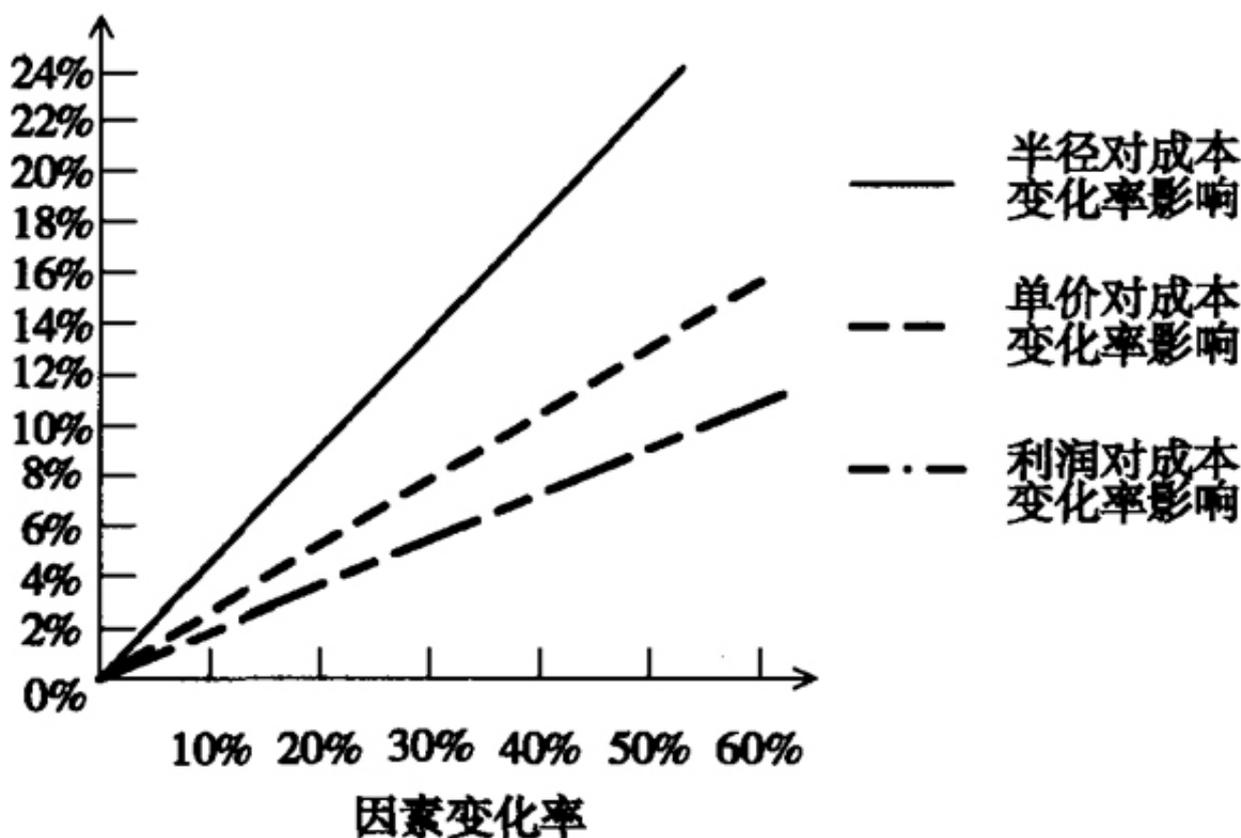


图1 增长率对比分析图

从图1可以明显地看出，收集半径对秸秆成本的影响明显地比其他因素显著。因此合理确定秸秆的收集半径对于降低秸秆收集成本具有关键的作用，电厂在选址时要充分考虑到周围秸秆量。这就要求在项目规划时，国家要出台严厉的限制性准入政策，在一定范围内，不允许存在多家利用秸秆作为原料的企业，保证生物质电厂有足够的秸秆来源。

其次，经纪人的目标利润占秸秆收集成本的比重也比较高。通过调研数据得到，被调研地区经纪人的利润一般在60元/t左右。一些地方由于经纪人过少，经纪人无论是对农户，还是电厂在秸秆的供应方面具有很大的话语权，一方面降低了农户的积极性，另一方面增大了电厂的收集成本。所以要适当引入竞争机制，避免经纪人垄断秸秆的现象存在。本文对项目所在地的电厂周围的经纪人调查可知，每个经纪人的秸秆收集半径在20km左右时既有利于秸秆的收集，又不会造成因经纪人互相争抢秸秆而带来购买单价增加。假设经纪人的数量在7到16人之间，分别研究对收集成本、购买成本、运输成本的影响，计算结果如图2所示。

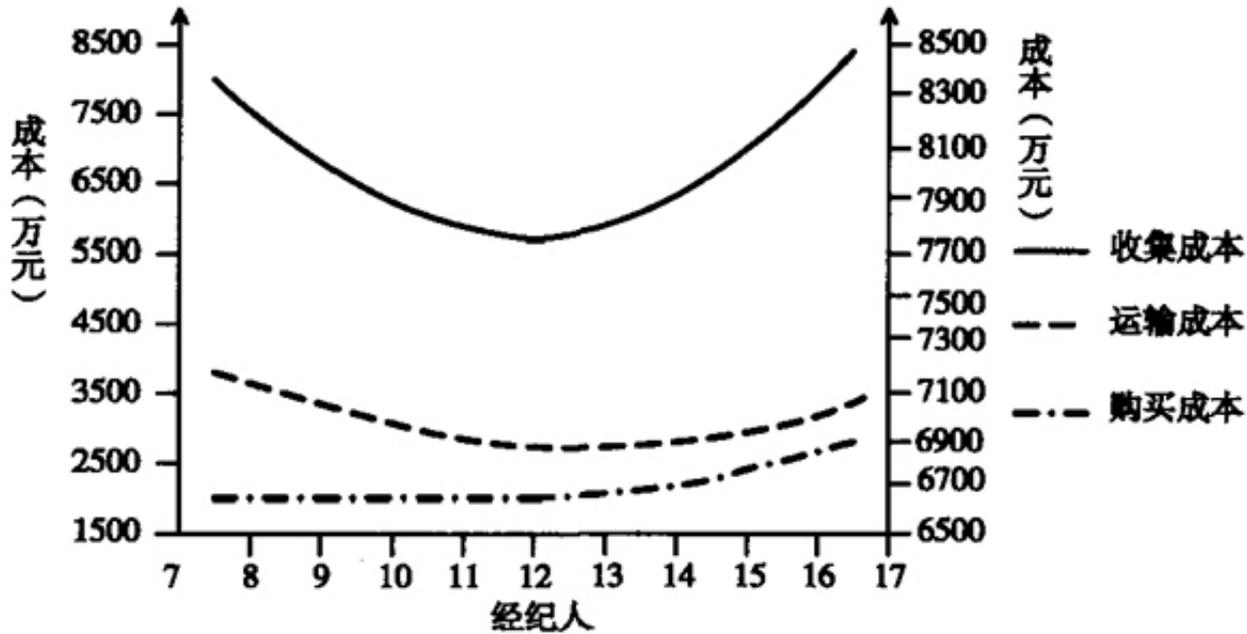


图2 成本变化分析图

由图2可以看出随着经纪人数量的增加，收集成本呈U型变化趋势，先减小后增大，在达到12人左右时，收集成本最小。究其原因，经纪人数量在8~12人时，由于经纪人之间存在一定的竞争，因而经纪人对秸秆供应的垄断力下降，经纪人降低各自的目标利润，同时由于收集半径变小使得运输成本减小。如果经纪人太多，就会抬高秸秆收购价格，同时由于收购点比较分散从而增加运输成本。本例中，当经纪人数量在12人以后时，由于秸秆太分散从而增加了运输量，同时由于过度竞争购买成本转为增大，所以导致收集成本增加。

#### 4结论及政策建议

本文在已有成果的基础上，将农户个人收集和经纪人收集两个过程分开考虑，建立了秸秆收集成本测算模型，并对收集成本进行敏感性分析，得到如下一些结论：

(1) 秸秆收集成本占生物质发电成本比例很高，是影响生物质发电产业健康发展的关键。根据本文的测算，秸秆的收集成本为277.55元/t。其中，对于25Mw的生物质发电厂，如果年运行6500小时，单位千瓦的秸秆收集成本高达0.48元，这仅仅是秸秆的到厂成本，还没有考虑生物质电厂对秸秆的预处理费用、存储费用等。

(2) 运输成本占到收集成本的43.88%，运输成本高是导致生物质发电收集成本高的主要原因。因此合理的运输规划是非常重要的。

(3) 收集半径对秸秆成本的影响明显地比其他因素显著。

(4) 经纪人数量对秸秆收集成本有明显的影。由于经纪人的数量既影响运输距离，同时也影响秸秆的购买价格，因此对经纪人数量进行了模拟分析。对于一个25MW的生物质发电厂，秸秆收集成本与经纪人数量呈u型关系，经纪人的数量为12人左右是比较经济的。

生物质发电不仅具有良好的节能减排效果，同时对于我们这个农业大国而言，也是建设社会主义新农村、提高农民收入的有效措施，因此国家应该出台更有效的措施大力支持生物质发电产业的发展。从实际调研和分析结构来看，应重点从以下几个方面促进生物质发电产业的持续发展。

(1) 合理组织获得相关补贴。生物质发电项目满足清洁发展机制规定的条件，同时也符合我国清洁可持续发展的要求，我国政府鼓励开展CDM项目。但CDM项目在生物质电厂项目中并未取得好的效果。一个装机25WM的生物质电厂，年发电量为1.625亿度，可替代5.85万吨标准燃煤，减排15.3万吨二氧化碳。按照清洁发展机制下的CERs补贴价为

每吨60元，可以给生物质电厂补贴收入918万，相当于每度电降低成本0.056元。发展CDM项目不仅降低环境负荷，同时使生物质发电项目更具有竞争力。

(2)适当提高上网电价，设计合理的成本分摊机制。我国政府虽然鼓励生物质发电产业的发展，但生物质电厂除了享受国家给予的0.75KW.h的上网电价外，在电厂规划、占用土地、税收，还有秸秆的收购、运输、存储等方面并无优惠政策。由于秸秆收集成本非常高，因此国家应该继续适当提高生物质发电的上网电价。电网是电厂的唯一买家，提高上网电价又会增加电网企业的成本，这些成本也不应该由电网企业独自承担。由于生物质发电具有良好的节能减排效果，本着谁受益谁承担的原则，成本应该在全社会进行合理的分摊。

(3)尽快建立碳排放交易市场。一些国家已经建立起碳排放交易制度，而且从国际上看，这也是未来发展的趋势。我国应加快碳排放交易制度的建设，这样生物质电厂可以通过出卖碳排放权而获得一些补偿，提升生物质发电厂的持续发展能力。

(4)做好生物质电厂选址规划。由于秸秆供应量直接影响生物质电厂是否能正常运行，所以电厂在选址时要充分考虑到周围秸秆量。这就要求在进行项目规划时，国家要出台限制性的准入政策，在电厂秸秆收集范围内，不允许有多家利用秸秆作为原料的企业存在，确保生物质电厂有足够的秸秆来源。

(5)改变分散种植模式，走集约化种植模式。目前我国的种植模式比较分散，导致秸秆资源分散，收集难度大，运输成本高。因此，采取合理的引导措施，引导农户进行集约化种植，这样有利于秸秆的收集和运输。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/111192.html>