

# 补贴退坡视角下农林生物质发电供应链决策研究

王乙娜<sup>1</sup>，张浩<sup>2</sup>，庄道元<sup>2</sup>

(1. 淮北师范大学数学科学学院，安徽淮北235000；2. 淮北师范大学经济与管理学院，安徽淮北235000)

**摘要：**针对农林生物质发电盈利能力弱、运营不理想的问题，构建发电厂和中间商所构成的农林生物质发电供应链序贯博弈模型，求解了分散式决策与集中式决策下的变量值。研究表明：(1)集中式决策下，中间商农林生物质收集量和供应链总收益优于分散式决策，通过Shapley值法可以对该二级供应链进行协调。(2)政府补贴、生物质密度是供应链的关键影响因素；补贴退坡、生物质密度降低对农林生物质发电供应链产生负面影响，但可以通过供应链协调在一定程度上减弱。

## 引言

生物质发电是利用生物质所具有的生物质能进行的发电，包括农林废弃物、城镇垃圾，从处理技术方面可分为农林废弃物直接燃烧发电、农林废弃物气化发电、垃圾焚烧发电、垃圾填埋气发电、沼气发电。垃圾发电原料供应稳定，还可以收取垃圾处理费，相比之下，农林生物质发电供应链总成本高，商业化进程较慢[1]，再加之2020年10月财政部、国家发改委、国家能源局联合发布《关于 关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见 有关事项的补充通知》中关于实施补贴退坡政策的要求，进一步使农林生物质发电陷入举步维艰的境地。

当前关于农林生物质发电供应链管理的研究主要集中于三个方面：(1)供应链成本研究。苏世伟依据供应链环节和生物质原料生命周期理论将其物流成本分为收集成本、存储成本和运输成本3类进行研究[2]。张茜对生物质能秸秆回收物流成本进行了分析及测算[3]。Simon高精度估算木本生物质生产的技术可用性和运营成本[4]。(2)生物质回收模式研究。檀勤良通过供应链中各主体的收益情况，研究了基金组织等三种生物质回收模式[5 - 6]。Luo和Jiang考虑了村民委员会生物质供应模式[7 - 8]。(3)供应链协调机制研究。檀勤良通过引入契约机制、信息共享机制和收益分配机制来构建新的供应链协同合作模式[9]，还建立了生物质发电供应链系统协同模型，分析生物质发电供应链系统的协同特性[10]。薛朝改从公平偏好的视角对秸秆发电供应链的协调问题进行了研究[11]。吴军提出了秸秆发电供应链上游收集与采购合作契约设计[12]。张济建构建了“政府—农户—秸秆发电企业”三方博弈模型，提出有限激励、理性退坡下秸秆绿色处理协同机制[13]。Fan设计了农民与制造商之间的“保护价+补贴”合同，以及中间商与制造商之间的“回购+收入共享”合同[14]。

当前的研究为农林生物质发电供应链的良好发展提供了丰富的理论依据，但对补贴退坡的影响较少考虑。本文在参考供应链成本研究成果的基础上，针对“中间商—发电厂”这一二级生物质发电供应链决策进行研究，为后补贴时代下农林生物质发电供应链可持续发展提供决策支持。

## 1 农林生物质发电供应链模型构建与分析

为了简化模型且不失一般性，假设农林生物质在收集区域内具有广泛性、周期性且分布密度均匀，则中间商会优先收集周边的生物质，然后根据需求量逐步扩大收集距离，因此，假设收集区域呈圆形状态，收集距离也称为收集半径[15]。中间商对农林生物质进行收集、存储、运输并销售给发电厂，发电厂将电力销售给国家电网并获得生物质发电补贴。模型相关参数如下：

$\pi_P$ : 发电厂收益

$\pi_M$ : 中间商收益

$\pi_{P+M}$ : 供应链总收益

$P$ : 单位电价

$S$ : 发电上网单位补贴

$t$ : 发电厂电能的生物质转化系数

$\omega$ : 发电厂从中间商收购生物质的价格

$q$ : 生物质的收集量

$\omega_F$ : 农林生物质的市场价格

$\pi$ : 圆周率

$r$ : 中间商收集半径

$\eta$ : 生物质密度, 即单位面积生物质资源产量

$C_1$ : 单位发电成本

$C_2$ : 单位面积生物质的收集成本

$C_3$ : 中间商将单位生物质资源运输至发电厂的单位运输成本

$C_4$ : 中间商生物质的单位存储成本

$d$ : 中间商至发电厂的距离

根据文献<sup>[16]</sup>, 生物质的收集量  $q = \pi r^2 \eta$ , 收集总成本为  $\frac{2\pi r^3 \eta C_2}{3}$ .

### 1.1 分散式决策模型

在分散式决策情形下, 中间商和发电厂都以自身利益最大化为目标, 决策顺序为发电厂确定从中间商收购生物质的价格, 中间商根据发电厂的收购价格确定生物质的收集量 $q$ 。发电厂和中间商的收益函数如下:

$$\pi_p = (P+S-C_1)qt - q\omega, \quad (1)$$

$$\pi_M = q(\omega - \omega_F) - \frac{2\pi r^3 \eta C_2}{3} - qdC_3 - qC_4. \quad (2)$$

根据逆向求解法的思路,先考虑中间商利润最大化,对式(2)求 $q$ 的二阶偏导数,得

$$\frac{\partial^2 \pi_M}{\partial q^2} = -\frac{C_2}{2\sqrt{\pi\eta q}} < 0, \text{ 表明 } \pi_M \text{ 为关于 } q \text{ 的凹函数, 有极大值, 令 } \frac{\partial \pi_M}{\partial q} = 0 \text{ 得}$$

$$q = \frac{\pi\eta(\omega - \omega_F - dC_3 - C_4)^2}{C_2^2}. \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),并对 $\omega$ 求二阶偏导数得

$$\frac{\partial^2 \pi_p}{\partial \omega^2} = \frac{2\pi\eta}{C_2^2} \{ (P+S-C_1)t - 3\omega + 2\omega_F + 2dC_3 + 2C_4 \},$$

为保证式(1)有极大值,需满足条件 $\frac{\partial^2 \pi_p}{\partial \omega^2} < 0$ ,令 $\frac{\partial \pi_p}{\partial \omega} = 0$ 得发电厂对中间商的最优收购价格为:

$$\omega^* = \frac{2(P+S-C_1)t + \omega_F + dC_3 + C_4}{3}. \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)(2)(3)分别得中间商最优收集量、发电厂最大收益、中间商最大收益、供应链总收益分别为:

$$q^* = \frac{4\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^2}{9C_2^2}, \quad (5)$$

$$\pi_p^* = \frac{4\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{27C_2^2}, \quad (6)$$

$$\pi_M^* = \frac{8\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{81C_2^2}, \quad (7)$$

$$\pi_{p+M}^* = \frac{20\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{81C_2^2}. \quad (8)$$

## 1.2集中式决策模型

在集中式决策情形下,发电厂和中间商视为一个合作的整体,两者都以供应链整体收益最大化为目标进行决策,将式(1)和式(2)相加得供应链总收益函数为:

$$\pi_{p+M} = (P+S-C_1)qt - q\omega - \frac{2\pi r^3 \eta C_2}{3} - qdC_3 - qC_4. \quad (9)$$

由 $\frac{\partial^2 \pi_{p+M}}{\partial q^2} = -\frac{C_2}{2\sqrt{\pi\eta q}} < 0$ 知 $\pi_{p+M}$ 为关于 $q$ 的凹函数,令 $\frac{\partial \pi_{p+M}}{\partial q} = 0$ 得集中决策下中间商的最优收集

量为:

$$q^{**} = \frac{\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^2}{C_2^2}. \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)得集中决策下供应链最大总收益为:

$$\pi_{p+M}^{**} = \frac{\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{3C_2^2}. \quad (11)$$

由于在集中式决策情形下,不能直接求得发电厂向中间商支付的收购价格,运用Shapley值法对该情形下的供应链整体利润进行合理分配后再加以确定。与分散式决策相比,将发电厂、中间商两个主体构成利益分享集合,则发电厂应

分配的利润为：

$$\pi_p^{**} = \frac{(1-1)! (2-1)!}{2!} (\pi_p^* - 0) + \frac{(2-1)! (2-1)!}{2!} (\pi_{P+M}^{**} - \pi_p^*) = \frac{31\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{162C_2^2} \quad (12)$$

中间商应分配的利润为：

$$\pi_M^{**} = \frac{(1-1)! (2-1)!}{2!} (\pi_M^* - 0) + \frac{(2-1)! (2-1)!}{2!} (\pi_{P+M}^{**} - \pi_p^*) = \frac{23\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{162C_2^2} \quad (13)$$

将式(10)代入式(1)并与式(12)相等或将式(10)代入式(2)并与式(13)相等得集中式决策下发电厂最优收购价格：

$$\omega^{**} = \frac{131(P+S-C_1)t + 31\omega_F + 31dC_3 + 31C_4}{162} \quad (14)$$

### 1.3不同决策模型比较分析

对两种决策情形下发电厂、中间商各变量值进行对比分析，见表1所示。

表1 分散式和集中式决策下变量值对比

|         | 分散式决策  | 集中式决策   |
|---------|--|---|
| 发电厂收购价格 | $\frac{2(P+S-C_1)t + \omega_F + dC_3 + C_4}{3}$                    | $\frac{131(P+S-C_1)t + 31\omega_F + 31dC_3 + 31C_4}{162}$           |
| 中间商收集量  | $\frac{4\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^2}{9C_2^2}$   | $\frac{\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^2}{C_2^2}$      |
| 发电厂收益   | $\frac{4\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{27C_2^2}$  | $\frac{31\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{162C_2^2}$ |
| 中间商收益   | $\frac{8\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{81C_2^2}$  | $\frac{23\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{162C_2^2}$ |
| 供应链总收益  | $\frac{20\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{81C_2^2}$ | $\frac{\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{3C_2^2}$     |

对比表1中变量取值，得出以下结论。

结论1集中式决策下，中间商农林生物质收集量和供应链总收益总是优于分散式决策。

证明：由  $q^{**} - q^* = \frac{5\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^2}{9C_2^2} > 0$ ,

$\pi_{P+M}^{**} - \pi_{P+M}^* = \frac{7\pi\eta [(P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4]^3}{81C_2^2} > 0$  可证。

结论1表明，由发电厂和中间商构成的二级供应链，在分散式决策下存在双重边际效应，使得供应链总收益低于集中决策；中间商农林生物质收集量也低于集中决策，客观上加重了发电厂原料不足的困境，也使得农林生物质未得到充分的资源化利用。

结论2集中式决策下，通过Shapley值法可以对发电厂、中间商构成的二级供应链进行协调。

$$\text{证明：由 } \pi_P^{**} - \pi_P^* = \frac{7\pi\eta \left[ (P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4 \right]^3}{162C_2^2} > 0,$$

$$\pi_M^{**} - \pi_M^* = \frac{7\pi\eta \left[ (P+S-C_1)t - \omega_F - dC_3 - C_4 \right]^3}{162C_2^2} > 0 \text{ 可证.}$$

结论2表明，通过Shapley值法，可以对集中式决策下发电厂、中间商的收益根据贡献度进行合理分配，由于双方收益均高于分散式决策，从而使得供应链协调。

结论3在其他参数取值不变的情况下，无论是集中式还是分散式决策，中间商收集量、发电厂收购价格、发电厂收益、中间商收益、供应链总收益均随着补贴降低、生物质市场价格升高而降低。

证明：由表1各表达式分别对S、 $\omega_F$  求导可证。

结论3表明，随着补贴的降低、生物质市场价格升高，无论是集中式决策还是分散式决策，发电厂、中间商收益、农林生物质收集量均降低，但集中式决策下降低速率更快，使得双重边际效应减弱。

## 2数值算例

基于两种决策模型，本文参考网络资料及文献[17]，参数取值及计算结果见表2、表3。

表2 参数取值

| 参数 | P/元  | S/元 | t   | $\omega_F/$<br>(元/t) | d/km | $C_1/$<br>元 | $C_2/$<br>(元/m <sup>3</sup> ) | $C_3/$<br>(元/t) | $C_4/$<br>(元/t) | $\eta/$<br>(t/m <sup>2</sup> ) |
|----|------|-----|-----|----------------------|------|-------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|
| 取值 | 0.45 | 0.3 | 700 | 20                   | 1    | 0.2         | 0.3                           | 10              | 10              | 0.001                          |

表3 初始值下两种决策模型计算结果

| 决策模式 | 收购价格/元 | 收集量/t | 发电厂收益/元 | 中间商收益/元 | 供应链总收益/元 |
|------|--------|-------|---------|---------|----------|
| 分散式  | 270    | 1 846 | 212 247 | 141 498 | 353 745  |
| 集中式  | 319    | 4 153 | 274 152 | 203 403 | 477 555  |

从表3可知，集中式决策下中间商生物质收集量、供应链总收益均优于分散式决策，通过Shapley值法可使发电厂、中间商均获得合理的收益，从而使供应链协调。从表1理论推导的结果可以看出，两种决策方式下供应链总收益受到多个参数的影响，为了识别出关键影响因素，有必要进行灵敏度分析，由于发电转换系数t、发电成本C1、收集成本C2等参数取值主要取决于技术水平等外生因素，本文不予讨论，分析结果见表4。

灵敏度分析表明，无论是集中式还是分散式决策，补贴标准和生物质密度都是影响供应链总收益的重要因素，下面进行具体分析。

表4 参数灵敏度分析结果

单位：%

| 决策模式 | 补贴 $S$ | 生物质密度 $\eta$ | 市场价格 $\omega_F$ | 距离 $d$ |
|------|--------|--------------|-----------------|--------|
| 分散式  | 17.2   | 10.0         | 1.7             | 0.9    |
| 集中式  | 17.2   | 10.0         | 1.7             | 0.9    |

表5 调低补贴标准下两种决策模型计算结果

| 参数调控     | 决策模式 | 收购价格/元 | 收集量/t | 发电厂收益/元 | 中间商收益/元 | 供应链总收益/元 |
|----------|------|--------|-------|---------|---------|----------|
| $S=0.30$ | 分散式  | 270    | 1 846 | 212 247 | 141 498 | 353 745  |
| $S=0.27$ | 分散式  | 256    | 1 628 | 175 800 | 117 200 | 293 000  |
| $S=0.30$ | 集中式  | 319    | 4 153 | 274 152 | 203 403 | 477 555  |
| $S=0.27$ | 集中式  | 302    | 3 662 | 227 075 | 168 475 | 395 550  |

表6 生物质密度降低下两种决策模型计算结果

| 参数调控          | 决策模式 | 收购价格/元 | 收集量/t | 发电厂收益/元 | 中间商收益/元 | 供应链总收益/元 |
|---------------|------|--------|-------|---------|---------|----------|
| $\eta=0.0010$ | 分散式  | 270    | 1 846 | 212 247 | 141 498 | 353 745  |
| $\eta=0.0009$ | 分散式  | 270    | 1 661 | 191 022 | 127 348 | 318 370  |
| $\eta=0.0010$ | 集中式  | 319    | 4 153 | 274 152 | 203 403 | 477 555  |
| $\eta=0.0009$ | 集中式  | 319    | 3 737 | 246 737 | 183 063 | 429 800  |

由表5、表6可以看出，当其他参数取值不变，政府补贴标准、生物质密度降低，均会导致中间商生物质收集量、发电厂收益、中间商收益、供应链总收益的持续降低，使得农林生物质发电供应链的发展遇到阻碍。但是值得注意的是，补贴标准为0.27元时集中式决策下的收集量、发电厂收益、中间商收益、供应链总收益仍高于补贴标准为0.3元时分散式；生物质密度为0.0009t/m<sup>2</sup>

下的集中式决策的

收集量、发电厂收益、中间商收益、

供应链总收益也高于生物质密度为0.001t/m<sup>2</sup>

下的分散式决策，这表明农林生物质发电供应链可以通过集中式决策在一定程度上减弱政府补贴标准、生物质密度降低带来的负面影响。

### 3结论与建议

农林生物质发电行业的发展面临着诸多困难。本文构建发电厂和中间商构成的农林生物质发电供应链博弈模型，通过对分散式决策与集中式决策的对比得到以下结论：(1)集中式决策下，中间商农林生物质收集量和供应链总收益总是优于分散式决策，通过Shapley值法可以对发电厂、中间商构成的二级供应链进行协调。(2)参数灵敏度分析表明，政府补贴标准、生物质密度是供应链总收益的关键影响因素；在其他参数取值不变的情况下，政府补贴标准、生物质密度降低对供应链各方面都会产生负面作用，但通过集中式决策可在一定程度上减弱负面作用的影响。一方面，政府应积极推动发电厂与中间商的合作，通过合理的利益分配来引导供应链的协调运作，从而平稳渡过补贴退坡、生物质波动带来的影响；另一方面，在实施补贴退坡政策时，应注意平稳过渡，给发电厂和中间商应对的时间，注重建立健全生物质原料应急机制，应对恶劣气候等因素造成作物减产进而导致生物质密度不足的问题。

## 参 考 文 献

- [1] GE Y T, LI L, YUN L X. Modeling and economic optimization of cellulosic biofuel supply chain considering multiple conversion pathways [J/OI]. *Applied Energy*, 2021, 281:116059.
- [2] 苏世伟, 陈妍, 聂影. 生物质燃料供应链物流成本的文献比较研究 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(15):7-10.
- [3] 张茜, 李洋, 王磊明. 生物质能秸秆回收物流成本分析及测算 [J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(12):185-193.
- [4] SIMON F, GIRARD A, KROTKI M, et al. Modelling and simulation of the wood biomass supply from the sustainable management of natural forests [J/OI]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 282:124487.
- [5] 檀勤良, 邓艳明, 赵建英, 等. 基于基金组织模式的生物质燃料供给研究 [J]. *中国管理科学*, 2016, 24(9):99-105.
- [6] 檀勤良, 王瑞武, 潘昕昕, 等. 模糊供给下生物质发电燃料供应链模式研究 [J]. *中国软科学*, 2017(2):123-131.
- [7] LUO K Y, ZHANG X P, TAN Q L. Novel Role of Rural Official Organization in the Biomass-Based Power Supply Chain in China: A Combined Game Theory and Agent-Based Simulation Approach [J]. *Sustainability*, 2016, 8(8):1-23.
- [8] JIANG Z Z, HE N, XIAO L. Government subsidy provision in biomass energy supply chains [J]. *Enterprise Information Systems*, 2019, 13(10):1367-1391.
- [9] 檀勤良, 魏咏梅, 李旭彦, 等. 生物质燃料供应链协同优化研究 [J]. *中国科技论坛*, 2016(10):127-133.
- [10] 檀勤良, 潘昕昕, 王瑞武, 等. 生物质发电供应链协同演化研究: 基于山东省生物质发电厂的实证研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(2):190-196.
- [11] 薛朝改, 王新凤. 公平偏好对秸秆发电供应链决策的影响分析 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(10):307-312.
- [12] 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.
- [13] 张济建, 刘宏筵, 孙立成, 等. 双重破窗效应下考虑政府激励有限性的秸秆绿色处理协同机制 [J]. *重庆理工大学学报(社会科学)*, 2019, 33(6):7-22.
- [14] FAN K, LI X N, WANG L, et al. Two-stage supply chain contract coordination of solid biomass fuel involving multiple suppliers [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 135:1167-1174.
- [15] 吴军, 郝伟怡, 杨晓红, 等. 两级林木生物质供应链的决策与优化研究 [J]. *工业工程与管理*, 2021, 26(2):83-89.
- [16] 李娅楠, 林军. 政府补贴政策对生物质利用率的影响: 基于生物质供应链的视角 [J]. *系统工程*, 2015, 33(9):68-73.
- [17] 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.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/179668.html>