

# 多期生物质发电燃料供应链优化

檀勤良<sup>1,2</sup> 王婷然<sup>1</sup> 张一梅<sup>3</sup> 苗新燕<sup>1</sup> 祝君<sup>1</sup>

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

<sup>3</sup>(华北电力大学苏州研究院, 苏州 215123)

〔摘要〕随着我国生物质发电产业的迅速发展, 生物质发电装机容量逐年增加, 然而生物质电厂必须依靠政府补贴才能维持正常运行。本文针对生物质电厂盈利能力差这一现实问题, 以电厂利润最大为目标, 考虑燃料的收集、运输、预处理、贮存及使用环节, 建立了生物质发电燃料供应链的多期非线性优化模型。研究在现有的发电技术和自然资源条件下, 电厂能否通过调整发电量、燃料收购量及燃料掺烧比例实现更高的盈利水平。本文通过将模型应用于东北某生物质电厂, 求出电厂最大年利润和相应的决策变量值。证明了在其他条件不变的情况下, 电厂可以通过改变燃料收购和使用模式, 提升其盈利能力。

〔关键词〕生物质发电 供应链 非线性优化 多期优化 对比分析 季节波动

DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2017.11.003

〔中图分类号〕F272.3 〔文献标识码〕A

## 引言

2014年以来, 我国已成为世界上能源年消耗量最大的国家。化石能源大量使用造成了许多环境问题, 我国早已开始大力扶持可再生能源发电产业, 生物质发电便是其中之一。目前, 我国生物质发电主要利用的燃料为农业和林业废弃物。在利用其发电过程中, 产生的二氧化碳即为植物生长过程中光合作用吸收的二氧化碳, 从长远来看可以实现碳平衡<sup>[1]</sup>。同时, 生物质燃料在直燃过程中只产生极少量的有害气体, 是一种清洁的可再生能源。因此, 生物质发电具有广泛的应用前景。

但在实际中, 生物质发电行业仍旧存在一些问题: (1) 由于我国农村人均耕地较少, 导致秸秆资源分布分散、机械化生产程度低; (2) 虽然我国森林面积广大, 但人均森林面积较少。这些因素造成我国生物质电厂燃料收集困难、燃料成本过高。在调研中发现, 生物质电厂的燃料成本占到其总成本的三分之二以上; (3) 燃料成本过高导致了几乎所有的生物质电厂必须依靠政府补贴才能盈利, 加大了政府财政压力。

针对生物质发电的燃料供应链, 中外都有许多相关的研究: 王燕和沈辉<sup>[2]</sup>对秸秆发电燃料供应链进行了博弈分析, 探讨了电厂对农户和中间商的价格激励机制; 魏巧云<sup>[3]</sup>构建了影响生物质发电秸秆供应链物流成本的关键因素指标体系, 对秸秆发电的物流成本进行了研究; 常春阳<sup>[4]</sup>建立了适用于新建电厂系统规划的仓库规模与库存控制联合动态优化模型, 提供了可行的降低生物质电厂运营成本的方法; Silke van Dyken等<sup>[5]</sup>建立了生物质发电燃料供应链的非线性混合整数模型, 对燃料热值和燃料在生物质发电供应链各环节含水率之间的关系进行了研究; Nazanin Shabani等<sup>[6]</sup>为了提高林业剩余物发电的成本竞争力, 将一年分为12期, 对林业生物质发电燃料供应链进行了优化, 测算了一年中各月份最优燃料收购量; 之后, Nazanin Shabani等<sup>[7]</sup>还在燃料质量和可获得量不确定的情况下, 对林业生物质发电供应链进行了优化, 优化结果在降低了燃料购买成本的同时, 减小了库存的季节性波动。

上述文献从不同方面, 对生物质发电燃料供

收稿日期: 2017-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目“考虑农户和农村组织行为的生物质发电供应链优化及协同机制研究”(项目编号: 71373077); 北京市共建项目“北京市新能源产业现状与发展对策研究”(项目编号: GJ2013012)。

作者简介: 檀勤良, 华北电力大学经济与管理学院教授, 博士生导师, 博士。研究方向: 技术经济评价与优化。王婷然, 华北电力大学经济与管理学院硕士研究生。研究方向: 管理科学与工程。张一梅, 华北电力大学苏州研究院副教授、博士。研究方向: 环境科学。苗新燕, 华北电力大学经济与管理学院硕士研究生。研究方向: 管理科学与工程。祝君, 华北电力大学经济与管理学院硕士研究生。研究方向: 技术经济及管理。

应链进行了研究。其中进行供应链优化研究的大都为国外学者，而正如前文所述，我国特殊的地理和社会条件造成了目前我国生物质发电产业与国外存在较大差别。本文着眼于生物质发电燃料供应链的优化，充分考虑我国生物质发电燃料收集困难导致燃料成本过高的现状，以生物质电厂利润最大为目标，对燃料的收集、运输、预处理、贮存和使用各环节进行研究，建立了多期非线性优化模型。期望能够在现有的技术条件下，进一步提高生物质电厂盈利能力，为降低政府对生物质发电行业的补贴提供可能性。

## 1 生物质发电燃料供应链优化模型

### 1.1 模型的目标函数

目前，我国生物质电厂燃料收购模式主要为

$$Max\ profit = P \times (1 - EC) \times \sum_t q_t - \left\{ FC + \sum_t \left[ GC \times q_t + \sum_i \left( SC \times IQ_{i,t} + \sum_k SQ_{ik,t} \times PP_i \right) + Y \times extraY \right] \right\} \quad (1)$$

其中： $P$ 为售电单价； $EC$ 为厂用电率； $q_t$ 为第 $t$ 期发电量； $FC$ 为电厂年固定成本； $SC$ 为每吨燃料每期贮存成本； $IQ_{i,t}$ 为第 $t$ 期末第 $i$ 种生物质燃料的库存量； $SQ_{ik,t}$ 为在第 $t$ 期内电厂向经纪人 $k$ 收购第 $i$ 种生物质燃料的总量； $PP_i$ 为电厂收购第 $i$ 种

经纪人收购模式，即：经纪人负责收集农业剩余物（主要包括玉米秸秆、小麦秸秆、水稻秸秆等）或林业剩余物（主要包括木板、树枝、树皮等）并进行预处理，使其达到电厂对燃料的含水率要求，随即打包运往电厂，如图1所示。处理后的燃料贮存在电厂，直到将其用于直燃发电。因此生物质电厂的总成本包括固定成本（折旧、大修、工资福利等）和变动成本（发电成本、燃料购买成本、库存成本等）两部分<sup>[8]</sup>，而收益来源为售电收入。以 $i$ 表示生物质燃料种类， $k$ 表示不同的经纪人， $t$ 表示期数（以一年为周期，将一年分为 $t$ 期）。则目标函数——电厂年利润最大化如式（1）所示。

生物质燃料的价格； $Y$ 为0-1变量，用来判断库存量是否超出电厂合理库存，若库存量大于合理库存上界（ $SIub$ ），则由于库存管理难度增加以及需要租用更多土地等问题，电厂需负担额外库存成本 $extraY$ 。



图1 生物质发电燃料供应链

### 1.2 模型的约束条件

生物质发电供应链各环节包括：经纪人收购燃料、经纪人对燃料进行预处理、电厂收购经纪人的燃料、电厂贮存和发电。在这些环节中都存在一定的主客观条件制约。

#### 1.2.1 经纪人收购燃料约束

调研中得知，大型经纪人与电厂之间一般签订限制年最低生物质燃料供应量和燃料最高含水率的固定合约，且生物质燃料产量受季节影响明显。因此经纪人收购燃料数量受到其自身收购能力（包括运输能力、预处理能力）、与电厂之间的固定合约以及当地生物质燃料可获得量约束，

如式（2）~（5）所示。

$$\sum_t SQ_{ik,t} \geq SQ_{min_{ik}}, \forall i \in BF, k \in B \quad (2)$$

$$\sum_i PQ_{ik,t} \leq PQ_{max_k}, \forall k \in B, t \in TS \quad (3)$$

$$\sum_k PQ_{ik,t} \leq AQ_{max_{i,t}}, \forall i \in BF, t \in TS \quad (4)$$

$$SQ_{ik,t} / PQ_{ik,t} = WR_{ik,t}, \forall i \in BF, k \in B, t \in TS \quad (5)$$

其中： $BF$ 为生物质燃料种类集合； $B$ 为经纪人集合； $TS$ 为时间段集合； $SQ_{min_{ik}}$ 为合约规定的经纪人 $k$ 第 $i$ 种生物质燃料年最低供应量； $PQ_{ik,t}$ 为第 $t$ 期经纪人 $k$ 第 $i$ 种生物质燃料收购量； $PQ_{max_k}$ 为经纪人 $k$ 的最大收购能力； $AQ_{max_{i,t}}$ 为第 $t$ 期第 $i$ 种生物质燃料的区域内最大可获得量； $WR_{ik,t}$ 为第

$t$ 期经纪人 $k$ 对第 $i$ 种生物质燃料进行预处理前后的质量比。

### 1.2.2 经纪人燃料预处理约束

$$MCaft_{ik} = 1 - PQ_{ik,t} \times (1 - MCori_{i,t}) / SQ_{ik,t} \leq MCmax_i, \forall i \in BF, k \in B, t \in TS \quad (6)$$

其中： $MCaft_{ik}$ 为第 $k$ 个经纪人对第 $i$ 种生物质燃料进行预处理后的含水率； $MCori_{i,t}$ 为第 $t$ 期第 $i$ 种生物质燃料的平均原始含水率； $MCmax_i$ 为电厂

$$WR_{ik,t} = SQ_{ik,t} / PQ_{ik,t} \leq (1 - MCori_{i,t}) / (1 - MCmax_i), \forall i \in BF, k \in B, t \in TS \quad (7)$$

### 1.2.3 电厂收购燃料约束

电厂收购燃料时必须保证经纪人有可观的收益，否则会导致经纪人缺乏积极性、电厂燃料收

$$\sum_t \sum_i SQ_{ik,t} \times PP_i \geq \left[ FCb_k + \sum_t \sum_i SQ_{ik,t} \times \left[ (AP_{i,t} + 2 \times TCcb_i \times Dcb_{ik}) / WR_{ik,t} + 2 \times TCtp_i \times Dtp_k \right] \right] \times (1 + ER), \forall k \in B \quad (8)$$

其中： $FCb_k$ 为经纪人 $k$ 的年固定成本； $AP_{i,t}$ 为第 $t$ 期经纪人收购第 $i$ 种生物质燃料的单价； $TCcb_i$ 为经纪人收集每吨第 $i$ 种生物质燃料的平均单位运输成本； $Dcb_{ik}$ 为经纪人 $k$ 收购第 $i$ 种生物质燃料的平均运距； $TCtp_i$ 为经纪人运输每吨第 $i$ 种生物质燃料到电厂时的平均单位运输成本； $Dtp_k$ 为经纪人 $k$ 到电厂的路程； $ER$ 为经纪人的预期利润率。

$$IQ_{i,t} = IQ_{i,t-1} \times (1 - IL) + \sum_k SQ_{ik,t} - q_t \times R_t \times BR_{i,t}, \forall i \in BF, t \in TS \quad (11)$$

$$R_t = HVe / \left( \sum_i HV_i \times BR_{i,t} \times E \right) \quad (12)$$

其中： $Sllb_i$ 为第 $i$ 种生物质燃料的安全库存下界； $IQmax$ 为电厂最大库存能力； $IL$ 为平均每期库存损失比率； $R_t$ 为第 $t$ 期发电转化率； $BR_{i,t}$ 为第 $t$ 期第 $i$ 种生物质燃料的掺烧比率； $HVe$ 为每度电的热值； $HV_i$ 为第 $i$ 种燃料预处理后的平均热值； $E$ 为生物质电厂效率。

此外，为了保证电厂持续平稳运行，最后一期期末燃料库存量与第一期期初燃料库存量不应差别过大，如式(13)~(14)所示。

$$IQ_{i,tmax} \geq 0.9 \times IQ_{i,0}, \forall i \in BF \quad (13)$$

$$IQ_{i,tmax} \leq 1.1 \times IQ_{i,0}, \forall i \in BF \quad (14)$$

其中： $IQ_{i,tmax}$ 为最后一期期末第 $i$ 种燃料的库存量； $IQ_{i,0}$ 为第一期期初第 $i$ 种燃料的库存量。

### 1.2.5 电厂发电约束

发电过程主要受到发电量和燃料掺烧比率的制约。为了保证电厂安全平稳运行，必须保证足够的检修时间(在此期间不能发电)，发电量也

经纪人对燃料进行预处理的目的是为了满足不同电厂对于燃料的最高含水率要求，如式(6)所示。

规定的第 $i$ 种生物质燃料最大入厂含水率。也可将式(6)表示为式(7)的形式。

购困难。经纪人的成本主要包括固定成本、生物质购买成本、运输成本、预处理成本等<sup>[9]</sup>，则约束条件如式(8)所示。

### 1.2.4 电厂燃料库存约束

电厂库存量不可能无限大，因此燃料库存受到电厂存储能力的约束，如式(9)；同时，电厂燃料贮存量必须满足发电最低需求(一般为半个月或20天的满发燃料需求)，如式(10)。

$$IQ_{i,t} \geq Sllb_i, \forall i \in BF, t \in TS \quad (9)$$

$$\sum_i IQ_{i,t} \leq IQmax, \forall t \in TS \quad (10)$$

不应过低。发电量约束如式(15)~(17)所示。

$$q_t \leq qmax, \forall t \in TS \quad (15)$$

$$\sum_t q_t \leq Qmax \quad (16)$$

$$\sum_t q_t \geq Qmin \quad (17)$$

其中： $qmax$ 为每期最大发电量； $Qmax$ 为年最大发电量； $Qmin$ 为年最小发电量。

在调研中了解到，只要发电时混合燃料的热值在一定范围内，就能维持发电机组正常运行。混合燃料热值由各种燃料的热值和燃料掺烧比率决定，则燃料掺烧比率约束如式(18)~(20)所示。

$$\sum_i BR_{i,t} = 1, \forall t \in TS \quad (18)$$

$$\sum_i HV_i \times BR_{i,t} \leq HVmax, \forall t \in TS \quad (19)$$

$$\sum_i HV_i \times BR_{i,t} \geq HVmin, \forall t \in TS \quad (20)$$

其中： $HVmax$ 和 $HVmin$ 分别为混合燃料热值的上界和下界。

综上所述，完整模型如式(21)所示。

$$\begin{aligned}
 \max \text{ profit} &= P \times (1 - EC) \times \sum_t q_t - \left\{ FC + \sum_t \left[ GC \times q_t + \sum_i \left( SC \times IQ_{i,t} + \sum_k SQ_{ik,t} \times PP_i \right) + Y \times \text{extraY} \right] \right\} \\
 \text{s.t. } \sum_t SQ_{ik,t} &\geq SQ_{\min_{ik}}, \forall i \in BF, k \in B \\
 \sum_i PQ_{ik,t} &\leq PQ_{\max_k}, \forall k \in B, t \in TS \\
 \sum_k PQ_{ik,t} &\leq AQ_{\max_{i,t}}, \forall i \in BF, t \in TS \\
 WR_{ik,t} &\leq (1 - MCori_{i,t}) / (1 - MC_{\max_i}), \forall i \in BF, k \in B, t \in TS \\
 \sum_t \sum_i SQ_{ik,t} \times PP_i &\geq \left[ FCb_k + \sum_t \sum_i SQ_{ik,t} \times \left[ (AP_{i,t} + 2 \times TCcb_i \times Dcb_{ik}) / WR_{ik,t} + 2 \times TCtp_i \times Dtp_k \right] \right] \times (1 + ER), \forall k \in B \\
 IQ_{i,t} &= IQ_{i,t-1} \times (1 - IL) + \sum_k SQ_{ik,t} - q_t \times HVe \times BR_{i,t} / \left( \sum_i HV_i \times BR_{i,t} \times E \right) \geq Sllb_i, \forall i \in BF, t \in TS \\
 \sum_i IQ_{i,t} &\leq IQ_{\max}, \forall t \in TS \\
 0.9 \times IQ_{i,0} &\leq IQ_{i,t \max} \leq 1.1 \times IQ_{i,0}, \forall i \in BF \\
 q_t &\leq q_{\max}, \forall t \in TS \\
 Q_{\min} &\leq \sum_t q_t \leq Q_{\max} \\
 \sum_i BR_{i,t} &= 1, \forall t \in TS \\
 HV_{\min} &\leq \sum_i HV_i \times BR_{i,t} \leq HV_{\max}, \forall t \in TS
 \end{aligned} \tag{21}$$

其中： $q_t$ 、 $SQ_{ik,t}$ 、 $PP_i$ 、 $BR_{i,t}$ 为自变量； $IQ_{i,t}$ 、 $Y$ 、 $PQ_{ik,t}$ 为因变量；其余为参数。

## 2 实证分析

### 2.1 实例简介

在对我国多家生物质电厂进行实地调研之后，以东北地区某1×30MW生物质电厂为例进行实证分析。将一年按月分期，即 $t=1,2,3 \dots 12$ ；该电厂有8个固定合约经纪人，按规模从大到小分别

为 $k=1,2,3 \dots 8$ ；用于生物质发电的燃料分为两类：农业剩余物（ $i=1$ ）和林业剩余物（ $i=2$ ）。目前我国的生物质发电上网电价为0.75元/千瓦时<sup>[10]</sup>，在各地不同的火电标杆电价基础上由政府负担补贴电价。通过对调研资料的总结和整理，参数取值如表1~3所示。

表1 参数取值表（与k,t无关的参数）

与 i,k,t 均无关的参数								
参数	取值	单位	参数	取值	单位	参数	取值	单位
P	0.75	元/千瓦时	ER	0.20	-	qmax	21,000,000	千瓦时/月
EC	0.1	-	IL	0.01	-	Qmin	240,000,000	千瓦时/年
FC	25,000,000	元/年	HVe	3600	千焦/千瓦时	Qmax	180,000,000	千瓦时/年
GC	0.06	元/千瓦时	E	0.18	-	HVmin	16,800	千焦/千克
SC	1.5	元/(月·吨)	IQmax	50,000	吨	HVmax	17,400	千焦/千克
ExtraY	50,000	元/月	Sllub	40,000	吨			
仅与 i 有关的参数								
参数	取值	单位	参数	取值	单位	参数	取值	单位
MCmax <sub>1</sub>	0.25	-	TCtp <sub>1</sub>	0.4708	元/(吨·千米)	Sllb <sub>1</sub>	8000	千瓦时
MCmax <sub>2</sub>	0.20	-	TCtp <sub>2</sub>	0.3409	元/(吨·千米)	Sllb <sub>2</sub>	10,000	千焦/千克
TCcb <sub>1</sub>	0.8663	元/(吨·千米)	HV <sub>1</sub>	15,000	千焦/千克	IQ <sub>1,0</sub>	10,000	吨
TCcb <sub>2</sub>	0.3409	元/(吨·千米)	HV <sub>2</sub>	18,500	千焦/千克	IQ <sub>2,0</sub>	18,000	吨

表 2 参数取值表 (与 k 有关的参数)

仅与 k 有关的参数		取 值							
参数	单位	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
PQmax <sub>k</sub>	吨 / 月	7000	6800	5500	5200	4600	3800	3000	2300
FCb <sub>k</sub>	元 / 年	632,210	619,130	517,880	498,860	445,780	374,530	325,510	241,180
Dtp <sub>k</sub>	千米	25	30	40	40	50	60	50	45

与 i,k 有关的参数		取 值							
参数	单位	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
SQmin <sub>1k</sub>	吨 / 年	13,000	12,000	9000	8000	7000	5000	4000	3000
SQmin <sub>2k</sub>	吨 / 年	18,000	17,000	14,000	13,000	12,000	10,000	8000	7000
Deb <sub>1k</sub>	千米	35	38	35	33	40	42	36	35
Deb <sub>2k</sub>	千米	65	60	62	68	70	66	70	67

表 3 参数赋值表 (与 t 有关的参数)

与 i,t 有关的参数		取 值											
参数	单位	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10	t=11	t=12
AQmax <sub>1,t</sub>	千吨	26	18	10	6	2	4	16	12	6	8	18	30
AQmax <sub>2,t</sub>	千吨	30	24	20	15	11	10	8	6	5	10	20	36
MCori <sub>1,t</sub>	-	0.35	0.35	0.4	0.43	0.48	0.5	0.55	0.55	0.48	0.45	0.4	0.38
MCori <sub>2,t</sub>	-	0.27	0.28	0.3	0.32	0.35	0.36	0.38	0.38	0.36	0.33	0.3	0.28
WR <sub>1,t</sub> *	-	0.85	0.85	0.80	0.75	0.68	0.66	0.60	0.60	0.68	0.72	0.80	0.82
WR <sub>2,t</sub> *	-	0.90	0.88	0.85	0.85	0.80	0.80	0.75	0.75	0.80	0.80	0.85	0.88
AP <sub>1,t</sub>	元 / 吨	25	45	70	90	150	120	50	60	90	80	45	20
AP <sub>2,t</sub>	元 / 吨	85	90	95	100	120	130	140	150	180	130	95	80

注: \* 一般来说, 各个经纪人对同种燃料进行预处理后的含水率差别不大, 因此 WR<sub>i,t</sub> 可视为与 k 无关的参数。

一般来说, 各个经纪人对同种燃料进行预处理后的含水率差别不大, 因此 WR<sub>i,t</sub> 可视为与 k 无关的参数。

## 2.2 优化结果

在 2.1 部分的基础上, 利用 Lingo11 软件求得全局最优解。目标函数——电厂年利润最大值约为 4067.35 万元, 此时相应的变量取值如下:

### 2.2.1 发电量

电厂最优年发电总量约为 2.03 亿千瓦时, 各期发电量如图 2 所示。可看出电厂在 1~4 月、7 月、11 月和 12 月的发电量达到了最大发电量, 而 6 月和 9 月发电量最低。这与当地生物质燃料产量的季节波动密切相关: 在生物质燃料供应旺季, 经纪人能够以较低的价格收集到大量燃料, 使电厂得到充足的燃料供应; 在生物质燃料供应淡季,

经纪人收集燃料困难且燃料价格较高,导致电厂因燃料不足而减少发电量。可看出燃料收购量是影响电厂发电量最关键的因素,因此电厂应根据燃料收购情况合理安排检修时间。将检修尽量安排在燃料收购困难的季节,可以减小燃料不足给电厂带来的损失。

### 2.2.2 燃料收购价格

电厂收购农业剩余物与林业剩余物的最优价格分别为217元/吨和277元/吨。两种燃料之间的价差不能过大,否则会导致经纪人更倾向于收集某一种燃料;此外,由于经纪人购买林业剩余物的价格较高且林业生物质燃料热值较高,因此林业生物质燃料的单价应高于农业生物质燃料。

### 2.2.3 燃料收购量

电厂年燃料收购总量约为22.88万吨,其中:农业剩余物8.21万吨;林业剩余物14.67万吨。各期燃料收购量如图3所示。可看出燃料收购量存在着明显的季节波动,这是由区域内生物质燃料产量决定的:当地主要种植的农作物种类为春小麦、单季水稻、玉米、大豆等,均为春季播种秋季收获,农作物收割完成后便是收集秸秆的高峰期。区域内存在大面积湿地,种植的芦苇可在夏季大量收集作为发电燃料,因此农业剩余物的收购旺季为冬、夏两季。对树木的砍伐一般不会选择在春季和夏季进行,则林业剩余物的收购旺季主要在冬季。

### 2.2.4 掺烧比例

各期燃料掺烧比例如图4所示。在1~6月以及8月、11月,林业生物质燃料的掺烧比例达到最大;在9月和12月,农业生物质燃料的掺烧比例达到最大。这反映了当两种燃料都较易于收集时,经纪人倾向于供应更多的林业生物质燃料,因其收集过程简便、利润更高,此时电厂将提高林业生物质燃料的掺烧比例;当林业生物质燃料收集困难而农业生物质燃料收集较易时,电厂会降低林业生物质燃料的掺烧比例,更多地使用农业剩余物,以节约成本;当两种燃料都难以收集时,电厂只能降低发电量。

### 2.2.5 库存量

每种燃料库存量及库存总量在一年内的变动

趋势如图5所示。可看出2~3月的库存总量超出了合理库存量上界,在这两个月电厂需要支付额外库存成本。两种生物质燃料库存量具有相似的波动情况:农业生物质燃料的库存量在1~3月呈上升趋势,3~5月呈下降趋势,之后基本保持不变;林业生物质燃料的库存量同样在1~3月呈上升趋势,3~5月呈下降趋势,但在5~6月又有所上升,6~8月再次下降,之后基本保持不变。因此8月之后,总库存量基本保持不变。

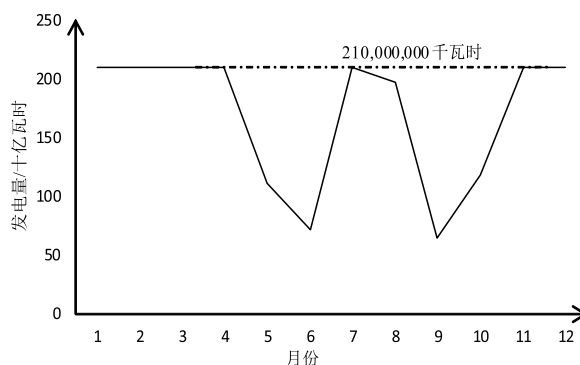


图2 发电量曲线

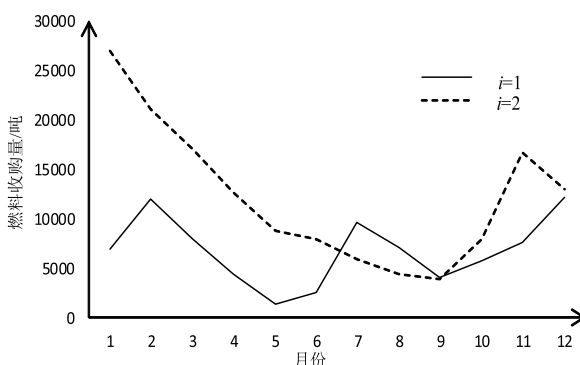


图3 燃料收购量曲线

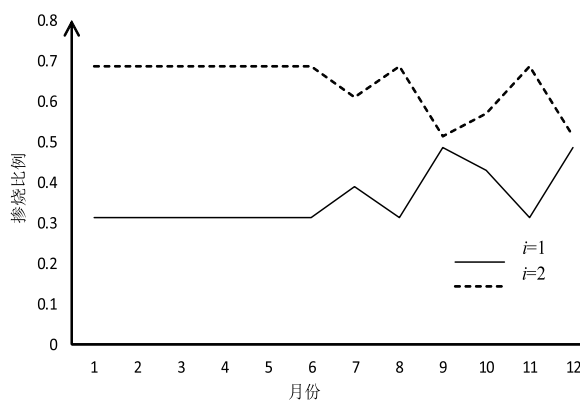


图4 掺烧比例曲线

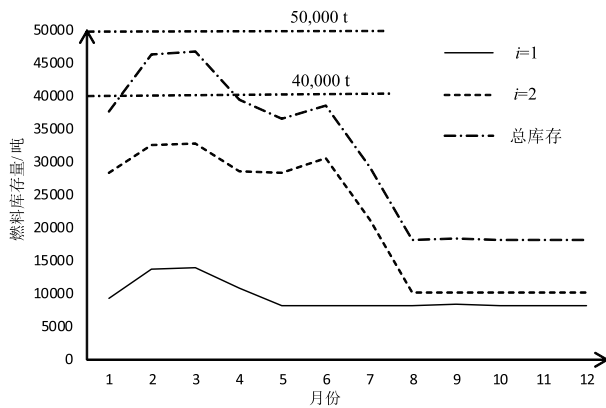


图 5 库存量曲线

### 2.3 对比分析

将优化结果与调研中获得的电厂 2015 年各项实际数据相比较，可以发现：（1）最优年发电量与电厂 2015 年实际发电量（约 2 亿千瓦时）几乎相等，而最大利润却远高于电厂 2015 年获得的实际利润（约两千万）。证明在技术条件、环境资源、政府补贴不变的条件下，可以通过优化燃料供应链实现生物质电厂利润的大幅增加；（2）最优燃料收购价格大大低于实际的燃料收购价格（农业剩余物 260 元/吨、林业剩余物 300 元/吨），表明经纪人的实际利润率大大超出预期。在调研中发现，部分经纪人仅需 2~3 年就可以收回全部投资。而相应的，电厂负担了过高的燃料成本；（3）农业剩余物年最优收购总量大于电厂 2015 年实际农业剩余物收购量，而林业剩余物年最优收购量小于电厂 2015 年实际林业剩余物收购量。表明优化结果增大了发电过程中农业剩余物的利用率，而现实中追求利润最大化的经纪人往往更愿意向电厂供应可获得更高利润的林业剩余物；（4）最优解中燃料的掺烧比例不固定，而是随燃料供应量的季节波动而变化。但在调研中发现，虽然混合燃料热值在一定范围内即可正常发电，生物质电厂却都将两种燃料的掺烧比例维持在 1/3:2/3。固定的掺烧比例不利于电厂根据燃料供应状况灵活调整直燃发电的燃料用量，增大了燃料收集难度。因此，电厂不得不提高生物质燃料的收购价格才能获得足够的燃料。同时，电厂必须在燃料供应旺季加大收购量，负担更多的燃料贮存成本。

### 3 结论

本文针对我国生物质电厂燃料收购成本过高导致盈利能力差的问题，以生物质电厂利润最大为目标建立了生物质发电供应链的多期非线性优化模型。模型中考虑了燃料从收集、运输、预处理、储存直到用于直燃发电这一完整过程中各个阶段产生的收益和费用以及受到的约束，研究了电厂如何选择发电量、燃料收购价和收购量、燃料掺烧比例才能使电厂利润达到最大。将模型应用于我国东北某 1×30MW 生物质电厂后，通过对优化结果和与实际情况相比较，可以发现我国生物质电厂的燃料收购和使用模式存在问题，主要表现在电厂没有充分发挥其在燃料供应链中的主导地位。这导致了经纪人过度挤占电厂收益，不利于整个生物质发电产业的发展<sup>[1]</sup>。针对此问题，具体建议有以下几点：（1）电厂可适当降低生物质燃料收购价格，将经纪人利润率控制在合理范围内：既能保证电厂燃料需求，又不会过多挤占电厂利润；（2）电厂可与大型经纪人签订更加细化的燃料供应合同，在对当地生物质产量和经纪人供应能力进行分析后按月规定其最低燃料供应量；（3）在满足发电机组对燃料热值要求的前提下，电厂应根据燃料供应量的季节波动，对两种燃料掺烧比例进行适当的动态调整。

目前我国的生物质电厂必须依靠政府补贴才能盈利，高昂的电价补贴给政府带来了巨大压力。充分发挥生物质电厂在生物质发电燃料供应链中的主导作用、提高生物质电厂盈利能力，对实现电价补贴的降低甚至取消、减轻政府财政压力、促进生物质发电产业的健康持续发展具有重要意义。

#### 参 考 文 献

- [1] Claudia Cambero, Taraneh Sowlati. Assessment and Optimization of Forest Biomass Supply Chains from Economic, Social and Environmental Perspectives—A Review of Literature [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 36: 62 ~ 73.
- [2] 王燕, 沈辉. 生物质发电供应链的完全信息动态博弈分析 [J]. 价值工程, 2010, (19): 41 ~ 42.
- [3] 魏巧云. 生物质发电秸秆供应链物流成本研究 [M]. 中国农业大学, 2014: 111.
- [4] 常春阳. 生物质直燃发电燃料供应链库存系统优化 [M]. 南京航空航天大学, 2014: 111.

- [5] Silke Van Dyken, Bjorn H. Bakken, Hans I. Skjelbred. Linear Mixed-Integer Models for Biomass Supply Chains with Transport, Storage and Processing [J]. *Energy*, 2010, 35 (3): 1338 ~ 1350.
- [6] Nazanin Shabani, Taraneh Sowlati. A Mixed Integer Non-Linear Programming Model for Tactical Value Chain Optimization of a Wood Biomass Power Plant [J]. *Applied Energy*, 2013, 104: 353 ~ 361.
- [7] Nazanin Shabani, Taraneh Sowlati. A hybrid Multi-Stage Stochastic Programming-Robust Optimization Model for Maximizing the Supply Chain of a Forest-Based Biomass Power Plant Considering Uncertainties [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 3285 ~ 3293.
- [8] 赵浩亮, 张旭, 翟明岭. 秸秆直燃生物质电厂动态发电成本分析 [J]. *动力工程学报*, 2015, (5): 412 ~ 417.
- [9] 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, (5): 463 ~ 466.
- [10] 闫庆友, 陶杰. 中国生物质发电产业效率评价 [J]. *运筹与管理*, 2015, (1): 173 ~ 178.
- [11] 檀勤良, 魏咏梅, 李旭彦. et al. 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.

## Research on Multi-stage Optimization for a Biomass Power Generation Supply Chain

Tan Qinliang<sup>1,2</sup> Wang Tingran<sup>1</sup> Zhang Yimei<sup>3</sup> Miao Xinyan<sup>1</sup> Zhu Jun<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Research Center for Beijing Energy Development, Beijing 102206, China;

3. Suzhou Research Institute, North China Electric Power University, Suzhou 215123, China)

[ **Abstract** ] With the rapid development of biomass power generation industry in China, the biomass power generation capacity had increased year by year. However, the biomass power plants would not survive without government subsidies. This paper focused on maximizing the profit of biomass power plants and established a nonlinear multi-stage optimization model for a biomass power generation supply chain with consideration of the collection, transportation, processing, storage, and using of biomass fuel. The aim was to find that under existing technology and resource conditions, whether the biomass power plants could gain more profits by adjusting their power generation quantity, fuel purchasing quantity and fuel blending ratio. Then the model was applied to a biomass power plant in Northeast China. The optimization results confirmed that the biomass power plants could improve their profitability by changing fuel purchasing and using patterns in terms of other conditions remain unchanged.

[ **Key words** ] biomass fuel; biomass power generation; supply chain; nonlinear optimization; contrastive analysis; seasonal fluctuation

(责任编辑:王平)