

政府补贴对于生物质直燃发电供应链的影响研究

魏咏梅, 罗珍珍, 徐婕琼, 梁超月, 檀勤良

(华北电力大学经济与管理学院, 北京市 昌平区 102206)

Impact of Government Subsidy on Supply Chain for Direct-fired Biomass Based Power Generation

WEI Yongmei, LUO Zhenzhen, XU Jieqiong, LIANG Chaoyue, TAN Qinliang

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 生物质直燃发电在电力扶贫和电力低碳过程中发挥重要作用, 制定合理的政策补贴方式是生物质发电产业良好发展的关键因素。考虑季节影响因素, 以电厂利润最大化为目标确定生物质燃料的最优收购数量、收购价格和掺烧比例。在此基础上, 利用系统动力学方法动态模拟了生物质供应链运行过程, 分析了统一费率补贴、线性增长补贴以及先增后减补贴方式对生物质供应链的影响。算例分析结果表明, 政府采用线性增长补贴方式更有利于提高农户燃料供应意愿, 促进生物质供应链的运作, 其中对农户补贴的效果优于对生物质发电厂补贴, 对农户线性增长补贴能够显著提高生物质的有效利用, 提升生物质发电供应链的可持续发展。

关键词: 生物质发电; 政府补贴; 系统动力学; 供应链

Abstract: The direct-fired biomass based power generation plays an important role in both rural poverty alleviation through power generation and low-carbon electricity generation, thus to draft a reasonable manner for the government subsidy policy is the key factor to ensure the good development of direct-fired biomass based power generation enterprises. Considering the factor of season influence and taking the maximized profit of power plant as the object, the optimum purchase quantity, the purchasing price and the blending proportion of the purchased biomass fuel are determined. On this basis, the system dynamics method is applied to dynamically simulate the operational process of the biomass supply chain, and the impacts of subsidy manners such as the flat rate subsidy, the linear growth subsidy and the subsidy, which is increased at first and then decreased, on biomass supply chain are analyzed. Analysis results show that the linear growth subsidy manner adopted by the government is more conducive to raise the farmer-households' willingness of supplying the biomass fuel and to promote the operation of biomass supply chain. Besides, the effect of subsidizing farmer-households' is better than that of subsidizing biomass

power plants.

Keywords: biomass power generation; government subsidies; system dynamics; supply chain

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0652

0 引言

中国作为农业大国, 其生物质能源开发潜力巨大, 生物质能的利用能够实现能源的可持续发展, 夯实绿色发展的基础。生物质能源在一定程度上不仅能够替代石油、煤炭等化石能源, 还能实现农民增收节支、炊事采暖用能的清洁化以及改善农村环境, 推动生物质扶贫新模式的发展, 同时能够进一步深化精准扶贫^[1]。在政府补贴政策的支持下, 截至 2017 年, 我国农林生物质发电项目年消化农林废弃物近 5400 万 t^[2], 生物质资源利用的民生、环保意义重大。然而, 目前的生物质发电产业过度依赖政府补贴, 需要尽快探索更加合理的补贴政策, 减少补贴依赖, 提升燃料的利用率。

目前, 国内外学者对生物质的补贴政策进行了许多分析。文献 [3] 建立了生物质燃料供应链模型, 采用博弈论分析了收割与运输补贴政策对生物质利用率的影响, 结果表明 2 种补贴方式都能够提高生物质的燃料利用率。文献 [4] 利用 Logistic 模型对农户提供秸秆的意愿进行分析, 结果表明非盈利性组织收集模式以及政府对收集燃料的公益机构进行补贴能够提高农户的秸秆供应意愿。文献 [5] 分析政府在林木生物质发电产业发展的 3 个阶段的作用, 结论表明政府在林业

剩余物供应阶段能够通过其补贴等政策手段促使农户与中间商提供林业剩余物燃料。以上研究表明政府对供应链利益相关者进行补贴都能够显著提高生物质的利用率，然而，大多数政府补贴相关研究都是从宏观角度出发给予政策建议，鲜有通过量化分析提出具体的补贴方案。生物质燃料的收集受季节、农民意愿等不确定因素的影响较大，其供应链各个环节成本核算困难。文献 [6-7] 建立了生物质燃料的收集、储存和运输成本模型，预测区域燃料的最大供给数量，并且分析了人工收集模式与机械收集模式的优劣势。文献 [8] 构建了低碳可持续的生物质原料供应链物流系统优化模型，通过对物流系统优化以提高生物质资源的利用率。文献 [9] 建立了生物质发电动态成本分析模型，核算不同秸秆价格下对应的发电成本最大值与最小值，发现燃料成本对发电成本的影响最大。除此之外，一些学者引入系统动力学模型对供应链进行仿真模拟。文献 [10] 通过构建系统动力学仿真模型，计算台湾生物质燃料的最大可利用量并且制定相应的补贴政策促进以改善燃料供应不足的现状。文献 [11] 通过构建脉冲响应函数模型研究了电价补贴对生物质发电装机容量的影响，结果表明优化电价补贴政策能够显著提高生物质燃料的利用效率。文献 [12] 通过在生物质供应链中加入激励机制来稳定利益相关者之间的合作。

基于此，本文在考虑季节因素的基础上，构建了 2 种收集模式并存的电厂利润最大化优化模型，确定了农业剩余物与林业剩余物的最佳掺烧比例、采购数量和价格。同时，利用系统动力学模型分别对农户和电厂动态模拟了 3 种补贴方式对生物质利用率的影响。研究表明：政府对农户补贴能够提高农户燃料供应意愿，促进生物质利用，而线性增长补贴方式更有利与生物质供应链的可持续发展。

1 系统动力学模型构建

1.1 问题描述及假设

本文主要研究生物质收集过程中政府的补贴对生物质综合利用的影响，及不同补贴形式对供应链良好运行的作用，通过政府补贴让电厂与农户从中切实受益，最终调动农户积极性，促进

生物质的综合利用。

供应链的主体包括农民、收购站和生物质电厂，收购站由电厂建设运营，并根据电厂的需求向电厂运输预处理后的生物质燃料。本文提出了两种燃料收购模式：1) 农户自主运输模式；2) 收购站收集模式。生物质发电供应链如图 1 所示。

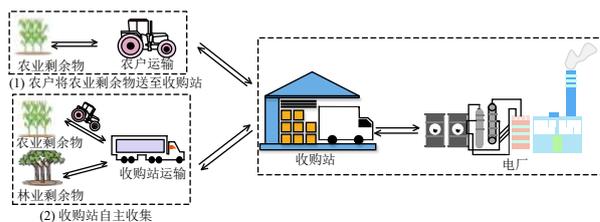


图 1 生物质发电供应链

Fig. 1 Supply chain for biomass power generation

本文所建立的模型基于如下假设：

1) 生物质发电供应链涉及的生物质燃料有 2 种，分别为农业剩余物和林业剩余物。

2) 农户自主运输模式中，农户要承担收集和运输农业剩余物的工作，假设只有距离收购站小于 10 km 的农户会将燃料自行运送至收购站。

3) 收购站收集模式中，收购站到生物质燃料较多的地区收集林业剩余物与农业剩余物，要负责收集、运输、燃料预处理与储存工作。

4) 生物质发电供应链中林业剩余物由林业部门提供，政府对林业剩余物补贴为 50 元/t，对农民的补贴额度以及对电厂的补贴额度与电厂燃料处理能力有关。

1.2 生物质发电供应链因果系统图

系统动力学是一种使用系统建模来模拟复杂系统中的动态变化行为和反馈机制的方法。针对生物质发电供应链，利用系统动力学设计了外部激励机制，以促进供应链有效运行。本研究中的生物质发电供应链可视为复杂的动态系统，在引入政府补贴后，主要供应链利益相关者之间的复杂互动会影响供应链的运作。模型中设置的补贴是对农户和电厂的补贴，对农户补贴能够增加农户收益提高农户的累积利润，从而促使农户提供农业剩余物的数量。同时，政府对电厂的补贴能够增加电厂收入，从而影响农业剩余物的收购价格，进而影响农户收入，最后增加电厂收集农业剩余物的数量。运用系统动力学 VENSIM PLE 软件构建模型的因果关系，如图 2 所示。

$$I_{\text{income}} = \sum_t q_t \times [P \times (1 - R) - C_{\text{ge}}] \quad (2)$$

$$C_{\text{fule}} = \sum_t Q_{\text{far},t} \times P_{\text{far}} - \sum_i \sum_t Q_{\text{pur},it} \times P_{\text{pur},i} \quad (3)$$

$$C_{\text{inventory}} = \sum_i \sum_t (Q_{i,t-1} \times (1 - R_q) + (Q_{\text{pur},it} + Q_{\text{far},t}) \times W_i - q_t \times R_t \times B_i) \times C_q \quad (4)$$

$$C_{\text{transport}} = \sum_i \sum_t P_{\text{pur},i} \times C_{\text{tpur},i} \times C_{\text{dis},i} \quad (5)$$

$$C_{\text{fixed}} = F_p + F_{\text{pur}} \quad (6)$$

式中： q_t 表示第 t 月发电量，kW·h； P 表示售电价格，元/kW·h； R 表示厂用电率，%； C_{ge} 表示电厂发电成本，元/kW·h； $Q_{\text{far},t}$ 表示第 t 月农户运送农业剩余物至收购站的数量，t/月； P_{far} 表示收购站支付给农户农业剩余物价格，元/t； $Q_{\text{pur},it}$ 表示第 t 月收购站收集燃料的数量； $P_{\text{pur},i}$ 表示收购站收集燃料 i 的价格，元/t； $Q_{i,t-1}$ 表示第 $t-1$ 月末电厂燃料 R_q 的库存数量，t； R_q 表示电厂燃料库存损失率，%； R_t 表示燃料转化率，%； B_i 表示燃料 i 的掺烧比例，%； C_q 表示电厂单位燃料库存价格，元/t； W_i 表示生物质燃料 i 预处理后的含水率，%； $C_{\text{tpur},i}$ 表示收购站收集燃料 i 时的单位运输成本，元/km； $C_{\text{dis},i}$ 表示收购站收集燃料 i 的收集距离，km； F_p 表示电厂固定成本； F_{pur} 表示收购站固定成本。

1.4.2 约束条件

1) 发电量约束

$$q_t \leq q_{\text{max}} \quad (7)$$

$$Q_{\text{min}} \leq \sum_t q_t \leq Q_{\text{max}} \quad (8)$$

式中： q_{max} 表示电厂每月的发电量上限； Q_{min} 代表电厂年发电量下限； Q_{max} 代表电厂年发电量上限。

2) 生物质热值约束

为保证生物质电厂正常发电，发电时混合热值需满足一定范围，如下：

$$H_{\text{min}} \leq \sum_i H_i \times B_i \leq H_{\text{max}} \quad (9)$$

$$\sum_i B_i = 1 \quad (10)$$

式中： H_{min} 表示燃料混合掺烧时的最低热值，kJ/kg； H_{max} 表示燃料混合掺烧时的最高热值，kJ/kg； B_i 表示燃料 i 的掺烧比例。

3) 电厂库存约束

$$Q_{\text{lower},i} \leq \sum_i Q_{i,t-1} \times (1 - R_q) + (Q_{\text{pur},it} + Q_{\text{far},t}) \times W_i - q_t \times R_t \times B_i \leq Q_{\text{upper}} \quad (11)$$

式中： $Q_{\text{lower},i}$ 表示电厂燃料 i 的月库存下限，t； Q_{upper} 表示电厂燃料月库存上限，t。

4) 农户运输量约束

$$Q_{\text{far},t} \leq Q_{\text{farmax},t} \quad (12)$$

$$\sum_t Q_{\text{far},t} \leq \sum_t Q_{\text{farmax},t} \quad (13)$$

式中： $Q_{\text{farmax},t}$ 表示第 t 月距离收购站周边 10 km 之内农业剩余物的最大数量。

5) 农户预期收入约束

只有保证具有收益，农户才能将农业剩余物送至电厂，农户的成本包括农业剩余物的人工收集成本、农业剩余物的储存成本与农业剩余物的运输成本。农户收益约束如下：

$$I_{\text{far}} \geq C_{\text{art}} + C_{\text{in}} + C_{\text{tra}} \quad (14)$$

式中： I_{far} 代表农户自行运输农业剩余物至电厂时农户的收入，元； C_{art} 代表燃料收集的人工成本，元； C_{in} 表示农户将燃料储存在田间地头时的燃料储存成本，元； C_{tra} 表示燃料的运输成本，元。表达式分别如下：

$$I_{\text{far}} = \sum_t Q_{\text{far},t} \times P_{\text{far}} \quad (15)$$

$$C_{\text{art}} = \frac{\sum_t Q_{\text{far},t}}{Q_r} \times C_r \quad (16)$$

$$C_{\text{in}} = \frac{P_c \times A_c}{10} \quad (17)$$

$$C_{\text{tra}} = C_{\text{far}} + C_{\text{tla}} + C_{\text{dep}} + C_m \quad (18)$$

式中： Q_r 表示农户每天能够收集的燃料数量，t/d； C_r 表示农户每天的劳动成本，元/d； P_c 表示帆布的单位价格，元/m²； A_c 表示农户储存燃料所需帆布面积，m²； C_{far} 表示车辆的耗油成本，元； C_{tla} 表示运输中产生的人工费用，元； C_{dep} 表示车辆的折旧成本，元； C_m 表示车辆维修成本，元。

6) 生物质收购站采购数量约束

$$\sum_i Q_{\text{pur},it} \leq Q_{\text{purmax}} \quad (19)$$

$$Q_{\text{pur},it} + Q_{\text{far},t} \leq Q_{\text{Amax},it} \quad (20)$$

式中： Q_{purmax} 表示收购站每月的燃料收集最大

能力, t /月; $Q_{Amax,it}$ 表示第 t 月燃料 i 的最大获得量, t 。

目标优化模型的自变量为: 收购站第 t 月收集的生物质燃料 i 的数量 $Q_{pur,it}$, 第 t 月农户运送农业剩余物至收购站的数量 $Q_{far,t}$, 收购站支付给农户农业剩余物价格 P_{far} , 收购站购买燃料 i 的价格 $P_{pur,i}$, 燃料 i 的掺烧比例 B_i , 第 t 月发电量 q_t 。求解这五组数据后, 将其年数据作为生物质发电系统动力学模型的上限值输入, 以此动态模拟政府补贴对生物质发电供应链的影响过程。

2 实例分析

对中国东北地区多家生物质电厂进行实地调研后, 将模型应用于一家 30 MW 的生物质电厂。求解电厂利润最大化模型时, 考虑到燃料的收集数量受季节性因素影响, 因而这部分模型计算步长为 12 个月 (即 $t=12$)。当研究政府补贴对燃料利用率的影响时, 考虑到供应链主体利润是一个长期的动态累积过程, 同时要得到不同补贴方式对供应链影响的显著趋势, 需要一个较长的周期, 因而这部分的计算步长为 10 年。

2.1 基础数据

表 1 列出了与目标函数相关的参数值。

表 1 目标函数输入参数值

Table 1 Input parameter values of objective function

参数	参数值	参数	参数值
P (元/kW·h)	0.75	$W_i(i=1)/\%$	0.84
$R/\%$	10	$W_i(i=2)$	0.95
C_{ge} (元/kW·h)	0.1	$C_{tpur,i}(i=1)/(\text{元}/\text{km})$	1.617
C_q (元/t)	1	$C_{tpur,i}(i=2)$	4.104
F_p (万元/年)	10000	$C_{dis,i}(i=1)/\text{km}$	55
F_{pur} (万元/年)	620	$C_{dis,i}(i=2)$	70

系统动力学仿真的输入参数主要来自目标规划模型的求解方案, 部分来自市场调查, 如表 2 所示。

参考李娅楠^[3]与 Liu Y^[12]等人的研究, 设置了生物质电厂的 3 种补贴方案: 1) 统一费率补贴, 政府对生物质电厂补贴保持不变; 2) 线性增长补贴, 补贴价格随着电厂燃料处理能力的增加而增加; 3) 先增长后降低补贴, 政府对电厂补贴随着电厂燃料处理能力增加而增加, 直至到

表 2 系统动力学输入值

Table 2 Input values of system dynamics

参数	参数值	数据来源
燃料掺烧比例	0.4 : 0.6	单目标优化结果
农户运送至收购站的农业剩余物数量 (t/年)	4050	单目标优化结果
收购站收集农业剩余物数量 (t/年)	110363	单目标优化结果
收购站收集林业剩余物数量 (t/年)	180568	单目标优化结果
收购站收集农业剩余物价格 (元/t)	129	单目标优化结果
收购站收集林业剩余物价格 (元/t)	145	单目标优化结果
收购站支付给农户的农业剩余物价格(元/t)	219	单目标优化结果
火电厂单位发电碳减排量 (kg/(kW·h))	0.844	文献[13]
货运车辆碳排放因子 (kg/t×km)	0.141	文献[14]

达一定水平后, 电厂补贴开始下降。同样, 针对提供农业剩余物的农户设计了 3 种补贴方案。具体方程式如表 3 所示。

2.2 结果分析

2.2.1 单目标优化求解结果

本研究使用 Lingo11 对单目标进行求解, 并且获得了全局最优解。电厂年利润为 3295.60 万元, 农业剩余物收集数量为 11.43 万 t, 林业剩余物的收集数量为 18.06 万 t, 收购站支付给农户的农业剩余物价格 219 元/t, 收购站收购农业剩余物价格为 129 元/t, 收购站收购林业剩余物价格为 145 元/t, 林业剩余物及农业剩余物的掺烧比例为 0.6 : 0.4, 在考虑季节因素的前提下, 电厂年最优发电量为 2.3 亿 kWh。

图 4 为电厂每月发电量示意图, 电厂在一年中有 10 个月能够达到满发电厂, 5 月份为发电低谷, 5 月与 6 月对电厂进行检修为最佳时间。

图 5 为电厂燃料收集数量, 可知林业剩余物收购数量明显高于农业剩余物, 7 月为农忙季节, 也是农业剩余物燃料富余的月份, 林业剩余的收集高峰集中在冬季。

2.2.2 政府动态补贴机制结果

政府补贴能够提高生物质的利用率, 是促进电力系统低碳化的有效途径, 为了观察 3 种政府补贴方式对供应链良性循环的影响, 选择以单位补贴碳减排量为观察指标, 确定哪种补贴方案能够更有效的提高供应链的可持续性。

表 3 电价与农户动态补贴方案
Table 3 Electricity Price and dynamic subsidy schemes for farmer-households

电价补贴类型	方程
统一费率补贴	电价补贴=with lookup(年燃料处理能力 (10.24,0.25), (10.41,0.25), (10.59,0.25), (10.76,0.25), (10.93,0.25), (11.10,0.25), (11.27,0.25), (11.44,0.25)))农户补贴=with lookup(年燃料处理能力([(0,40)-(20,60)],(9.9,50), (10.07,50), (10.24,50), (10.41,50), (10.59,50), (10.76,50), (10.93,50), (11.10,50), (11.27,50), (11.44,50)))
线性增长补贴	电价补贴=with lookup(年燃料处理能力([(9.5,0)-(12,0.7)],(9.9,0.05), (10.07,0.1), (10.24,0.15), (10.41,0.2), (10.59,0.25), (10.76,0.3), (10.93,0.35), (11.10,0.4), (11.27,0.45), (11.44,0.55)))农户补贴=with lookup(年燃料处理能力([(2,0)-(20,100)],(9.9,10), (10.07,20), (10.24,30), (10.41,40), (10.59,50), (10.76,60), (10.93,70), (11.10,80), (11.27,90), (11.44,100)))
先增后减补贴	电价补贴=with lookup(年燃料处理能力([(2,0)-(12,0.5)],(9.9,0.05), (10.07,0.11), (10.24,0.2), (10.42,0.25), (10.6,0.30), (10.76,0.35), (10.93,0.3), (11.10,0.26), (11.27,0.22), (11.44,0.17)))农户补贴=with lookup(年燃料处理能力([(2,0)-(15,100)],(9.9,12.4), (10.07,22.8), (10.24,36.8), (10.41,48.4), (10.6,62.4), (10.76,80), (10.93,65.5), (11.1,54.4), (11.27,44.8), (11.44,33.2)))

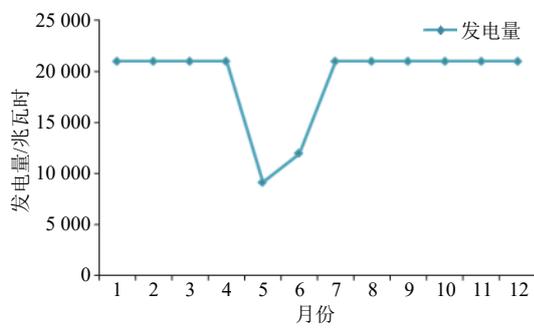


图 4 生物质电厂最优发电量

Fig. 4 Optimal generated energy of biomass power plant

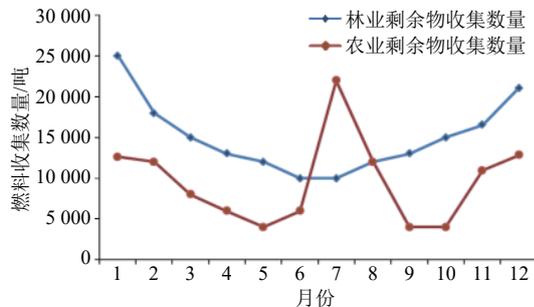


图 5 生物质电厂燃料最优收购数量

Fig. 5 Optimal purchased amount of biomass power plant

本文模拟了政府对生物质电厂补贴 10 年期间的生物质发电供应链运营过程。图 6 为政府对生物质电厂的 3 种动态补贴模式下的单位补贴碳减排量。统一费率补贴在 3 种补贴机制中效果最差，其单位补贴碳减排量基本每年保持不变，没有明显的变动趋势；先增长后降低补贴与统一费率补贴的单位补贴碳减排曲线趋势一致，但是明显线性增长补贴在促进供应链运行效果方面优于其他两种补贴机制。

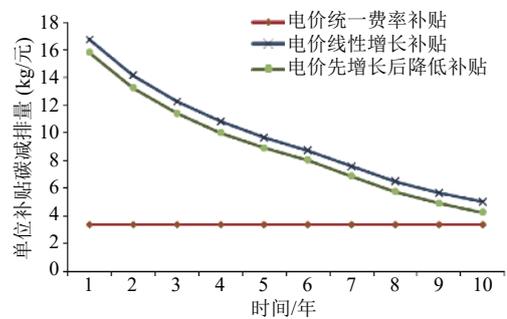


图 6 生物质电厂 3 种动态补贴模式单位补贴碳减排量
Fig. 6 Carbon emission reductions of unit subsidy under three kinds of dynamic subsidy modes for biomass power plant

同样，本文模拟了政府对农户补贴 10 年期间的生物质供应链运营结果。图 7 为政府对农户的 3 种动态补贴模式下的单位补贴碳减排量。可知，统一费率补贴在 3 种补贴机制中效果最差，其单位补贴碳减排量基本每年保持不变，没有明显的变动趋势；农户先增长后降低补贴机制与电价统一费率补贴的单位补贴碳减排量在 10 年期间不断降低；先增长后降低补贴机制下降趋势较大，农户线性增长补贴在促进供应链运行效果方面优于其他两种补贴机制。

通过以上模拟分析可知，政府不管是对电厂补贴，还是对农户补贴，线性增长补贴方式都优于其他 2 种补贴方式。

图 8 比较了政府分别对农户与电厂进行 10 年的单位补贴碳减排量，由图 8 可知，政府对农户进行的 10 年补贴效果都优于对电厂的补贴。由此可见，政府对农户的补贴能够更加直接有效地提高农户的燃料供应意愿，主要原因是在生物质

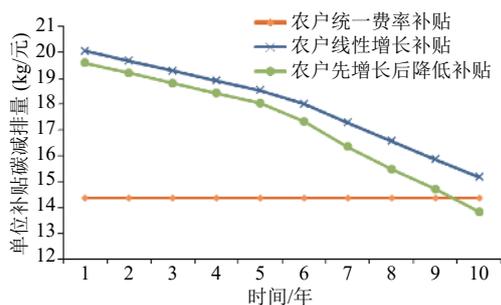


图7 农户3种动态补贴模式单位补贴碳减排量

Fig. 7 Carbon emission reductions of unit subsidy under three kinds of dynamic subsidy modes for farmer-households

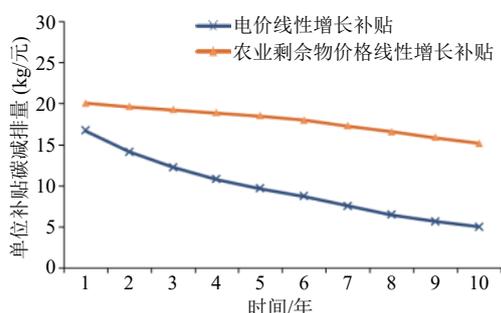


图8 农户与生物质发电厂线性增长补贴碳减排量比较

Fig. 8 Comparison of carbon emission reductions between farmer-households and biomass power plant under linear growth subsidy

发电供应链中, 农户提供燃料的意愿是影响供应链良好运行的决定性因素。

3 结论

为实现生物质发电产业的快速发展与电力行业低碳化的愿景, 本文对政府补贴下生物质能源的利用率问题进行研究, 主要结论如下:

1) 建立了以电厂利润最大化为目标的优化模型, 模型涉及了2种燃料收集模式, 农业剩余物与林业剩余物掺烧比例应设置为4:6, 林业剩余物的收集高峰集中在冬季, 而农业剩余物的收购旺季集中在夏季和冬季, 电厂可以根据季节的需求采取更适合电厂的燃料收集模式, 在燃料收购旺季可以选择与第三方物流公司或中间商合作收集燃料。

2) 在以电厂利润最大化为前提的下获得供应链最佳运营的参数, 并引入政府补贴机制以促进供应链的管理和运营, 设置了对农户和电厂的2种补贴情景, 分析得出政府对农民的线性增长

补贴能够显著提高生物质能源的利用率。

无论是对电厂还是农户而言, 线性增长补贴都能够在10年规划期内促进生物质发电供应链可持续发展, 但是补贴方式所取得的效果逐年递减, 因而后续的研究可以考虑以电厂的税收政策调整线性增长补贴模式。

参考文献

- [1] 穆献中, 余漱石, 徐鹏. 农村生物质能源化利用研究综述 [J]. 现代化工, 2018, 38(3): 9-13.
MU Xianzhong, YU Shushi, XU Peng. Review on utilizing rural biomass as energy [J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(3): 9-13 (in Chinese).
- [2] 王圣, 徐静馨. 我国农林生物质发电现状及相关问题思考 [J]. 环境保护, 2018, 46(23): 61-63.
WANG Sheng, XU Jingxin. Analysis on agricultural and forestry biomass power sector in China [J]. Environmental Protection, 2018, 46(23): 61-63 (in Chinese).
- [3] 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.
LI Yanan, LIN Jun. The Impact of Policies on Biomass Utilization [J]. Systems Engineering, 2015, 33(9): 68-73 (in Chinese).
- [4] 檀勤良, 邓艳明, 张兴平, 等. 农业秸秆综合利用中农户意愿和行为研究 [J]. 兰州大学学报(社会科学版), 2014, 42(5): 105-111.
TAN Qinliang, DENG Yanming, ZHANG Xingping, et al. A study of farmers' willingness and behavior in the comprehensive utilization of agricultural straw [J]. Journal of Lanzhou University (Social Sciences), 2014, 42(5): 105-111 (in Chinese).
- [5] 来飞, 米锋. 我国林木生物质发电产业中政府角色与发展模式的思考 [J]. 世界林业研究, 2020, 33(2): 106-111.
LAI fei, MI feng. Thoughts on government's role and development mode in forest biomass power industry [J]. World Forestry Research, 2020, 33(2): 106-111 (in Chinese).
- [6] SUN Y, CAI W, BO C, et al. Economic analysis of fuel collection, storage, and transportation in straw power generation in China [J]. Energy, 2017(132): 194-203.
- [7] 翟明岭, 张旭, 程飞, 等. 生物质发电中农户秸秆供应成本敏感性分析 [J]. 动力工程学报, 2016, 36(7):

- 569 – 574.
- ZHAI Mingling, ZHANG Xu, CHENG Fei, *et al.* Sensitivity analysis on supply cost of farmer straw for power generation [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2016, 36(7): 569 – 574(in Chinese).
- [8] 李明玉, 李凯, 张广胜. 政府补贴条件下秸秆回收企业收入的系统动力学模型 [J]. *农业经济*, 2018(7): 81 – 83.
- LI Mingyu, LI Kai, ZHANG Guangsheng. The system dynamics model of income of straw recycling enterprises under the condition of government subsidy [J]. *Agricultural Economy*, 2018(7): 81 – 83(in Chinese).
- [9] 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, 35(05): 412 – 417.
- ZHANG Haoliang, ZHANG Xu, ZHAI Mingling. Analysis on dynamic cost of straw direct combustion power generation [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2015, 35(05): 412 – 417(in Chinese).
- [10] Tsai C K, Syu-Hong L, Ming-Lang T, *et al.* Biofuels for vehicles in Taiwan: Using system dynamics modeling to evaluate government subsidy policies [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019(145): 31–39.
- [11] 王风云, 文心攸, 李啸虎. 电价补贴对可再生能源发电的动态影响研究 [J]. *价格理论与实践*, 2019(4): 54 – 58.
- WANG Fengyun, WEN Xinyou, LI Xiaohu. Study on the dynamic impact of electricity price subsidy on China's renewable energy power generation [J]. *Price Theory & Practice*, 2019(4): 54 – 58(in Chinese).
- [12] LIU Y, ZHAO R, WU K J, *et al.* A hybrid of multi-objective optimization and system dynamics simulation for straw-to-electricity supply chain management under the belt and road initiatives [J]. *Sustainability*, 2018, 10(3): 868.
- [13] 周建, 易点点. 中国碳排放省级差异及其影响因素与减排机制研究 [J]. *上海经济研究*, 2012, 24(11): 65 – 80.
- ZHOU Jian, YI Diandian. Studies on provincial differences, influential factors and reduction mechanisms of China's carbon dioxide emission [J]. *Shanghai Journal of Economics*, 2012, 24(11): 65 – 80(in Chinese).
- [14] 彭美春, 朱兵禄, 胡红斐, 等. 重型货运车辆碳排放特性研究 [J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(1): 269 – 272.
- PENG Meichun, ZHU Binglu, HU Hongfei, *et al.* Study on the carbon emission characteristics of the heavy duty freight trucks [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(1): 269 – 272(in Chinese).

收稿日期：2019-07-11

作者简介：

魏咏梅 (1969), 女, 副教授, 研究方向为工业经济与电力工业, Email: wymeimei@ncepu.edu.cn。