

引用格式: 黄华, 丁慧平. 燃煤电厂环境污染第三方治理研究[J]. 资源科学, 2019, 41(2): 326-337. [Huang H, Ding H P. Environmental pollution control by a third party in coal-fired power plants[J]. *Resources Science*, 2019, 41(2): 326-337.] DOI: 10.18402/resci.2019.02.11

燃煤电厂环境污染第三方治理研究

黄 华, 丁慧平

(北京交通大学经济管理学院, 北京 100044)

摘 要: 作为中国环境治理思路由“谁污染谁治理”向“谁污染谁付费”转变的具体实施路径, 环境污染第三方治理在雾霾防治等方面得到推广。针对政府如何制定切实可行政策鼓励燃煤电厂实现达标排放、燃煤电厂如何选择清洁发展路径方面存在的问题, 以煤电行业烟气治理为研究对象, 从绿色供应链的视角, 分别构建在4种规制约束-政策激励下燃煤电厂采用自身投资运维、第三方治理2种模式的数学模型, 并求解分析。结果显示: 规制、激励政策同时实施能帮助燃煤电厂升级为绿色电厂; 因提供较少补贴就能帮助燃煤电厂, 政府更倾向根据第三方治理模式制定补贴政策; 第三方治理模式还能在让燃煤电厂获得更多收益的同时, 使传统环保企业转型为能够提供第三方治理的生产性服务企业而获得稳定收益, 有助于“谁污染谁付费”思路在实践中的推广。最后, 本文提出政府要加强环境约束政策执行、监督力度, 给予精准激励政策, 并出台鼓励提升环境绩效政策的建议。

关键词: 绿色供应链; 第三方治理; 环境污染; 规制约束; 政策激励; 环保补贴; 燃煤电厂

DOI: 10.18402/resci.2019.02.11

1 引言

良好生态环境是最公平的公共产品, 是最普惠的民生福祉^[1]。近年来, 雾霾严重影响公众日常生活, 中国政府已明确提出打赢蓝天保卫战^[2], 要求所有燃煤电厂必须安装环保设施实现达标排放^[3], 否则将受到巨额罚款甚至被强制关停^[4], 但由于巨额的环保设施初始投资和较高的运行维护成本^[5], 燃煤电厂缺乏主动安装环保设施动力。从经济学角度分析, 问题的本质是在市场机制下, 企业外部性的环境成本内部化带来的成本劣势成为燃煤电厂缺乏清洁生产动力的主要障碍。目前中国能源消费仍然是以煤为主的格局, 这也决定了以煤电为主的电力生产和消费结构在相当一段期间内不会改变^[6], 所以如何使燃煤电厂既能持续经营保持电力供应, 又能满足环境约束清洁生产是必须重点研究的问题。

目前, 中国环境治理思路已由“谁污染谁治理”向“谁污染谁付费”转变, 并于2013年11月12日首次从国家层面提出环境污染第三方治理^[7], 被认为是全新的突破和走向市场化的重要标志。该模式是指排污者通过缴纳或按合同约定支付费用, 委托第三方治理机构——环保服务企业进行污染治理的新模式^[8]。从供应链视角分析, 该模式是在政府的监管下, 由排污企业和环保服务企业构成的以经济效益和社会效益最大化为目标的绿色供应链管理, 强调两者通过合同约定, 建立相互督促、共同负责的市场运行机制^[9]。

环境污染第三方治理就是引入第三方主体的治理, 其所探讨的是多个不同治理主体之间关系的问题。其中, 资源的相互依赖是核心, 利益的相互依赖是本质^[10]。国内对于该模式的研究主要集中在论述内涵^[11], 对比新旧治理思路差异^[12], 介绍国外优

收稿日期: 2018-07-27; 修订日期: 2018-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(71372012); 北京交通大学基本科研业务费人文社会科学专项基金项目(2017JBWZ001)。

作者简介: 黄华, 男, 山西大同人, 博士生, 主要研究方向为资源环境经济与政策。E-mail: 14113173@bjtu.edu.cn

通讯作者: 丁慧平, E-mail: hpdng @bjtu.edu.cn

2019年2月

秀经验^[13]、相关做法^[14],分析理论依据及作用机制等方面^[15-16]。国际上研究更具体,政策方面,Hall、Simpson、Ageron等研究均表明监管压力在污染物减排过程中起着主要作用^[17-19]。Gang提出为了提高环境绩效应该制定对供应商进行环保补贴的政策^[20]。Anttonen等认为以第三方治理为代表的环境服务已成为促进社会可持续发展的有效选择,但并未广泛实施^[21]。Jayaram建立了将政府环境政策与可持续发展战略联系在一起的模型^[22]。Ding等围绕可持续供应链及绿色投资绩效评估作了系列研究,建立了包含多种环境政策的供应链模型,指出政府的激励政策在监督供应链企业的环境可持续行为方面起着主导作用^[23-26]。Almeida等讨论了企业与政府、工业部门之间合作的必要性,以促使更清洁的生产纳入政策和实践^[27]。企业方面,为了应对环境政策,企业有各种各样的可能做法来控制它们的环境影响,并可能改变组织策略^[28]。Vachon等、Dabhilkar等鼓励供应链伙伴之间的环境协作,认为这将有助于提高整体竞争力^[29-30]。Guarnieri等评估了固体废物管理外包的可能性,并提出了一个帮助决策者评估和选择最合适的第三方供应商的框架^[31]。

综上可知,对环境污染第三方治理具体实施阶段的理论研究还较少,特别是在煤电领域存在空白;同时,虽然中国政府在煤电领域大力推行该模式,但在具体实施中存在政府如何制定切实可行政策鼓励燃煤电厂实现达标排放,燃煤电厂如何选择清洁发展路径的问题。鉴于此,本文从绿色供应链的视角,构建4种规制约束—政策激励下燃煤电厂采用自身投资运维、第三方治理2种模式的数学模型,并求解、对比分析,旨在研究在环境污染治理过程中,政府是否有必要出台激励政策?如果需要,更倾向于在哪一种模式下给予补贴?环境污染第三方治理模式是否能够帮助燃煤电厂更好地实现达标排放和持续盈利?

2 理论分析与研究方法

2.1 问题阐述

本节分别介绍环境污染第三方治理模式涉及的政府、燃煤电厂和环保服务企业3个主体在环境治理中的可选决策。

(1)政府。为切实降低煤电行业烟气污染物排放量,大幅提升燃煤电厂的环境绩效,政府出台了一系列政策。规制约束方面,最为关键的是环境约束,这主要是指政府在综合考虑生态环境承载力、现有科技水平和煤电行业现实经营情况等多种因素基础上,出台的强制性大气污染物排放标准。激励政策方面,由于目前中国燃煤电厂的上网电价、上网电量是由政府和代表政府调度的电网公司决定的,所以为了鼓励加装环保设施,政府可以对满足排放标准的燃煤电厂给予环保补贴电量或者补贴电价。政府面临如何制定政策的选择,政策类型分为4种:不提供补贴、只提供补贴电量、只提供补贴电价、同时提供补贴电量和补贴电价。

(2)燃煤电厂。首先,作为排污企业,燃煤电厂面临是否遵守环境约束的选择。根据理性人假设,相比于巨额的罚款和被关停,虽存在成本劣势会降低盈利能力,但只要能在可接受的期间内扭亏,燃煤电厂还是愿意加装环保设施升级为绿色发电企业,来满足排放标准实现持续经营。在此过程中,综合实力差异等多种因素会导致大批落后煤电产能被淘汰。其次,燃煤电厂还面临满足环境约束实施路径的选择。其可以选择自身投资运维环保设施模式,也可选择环境污染第三方治理模式,即通过合同约定的方式,将投资、运维环保设施的业务交由有能力的环保服务企业“一揽子”实施(图1)。

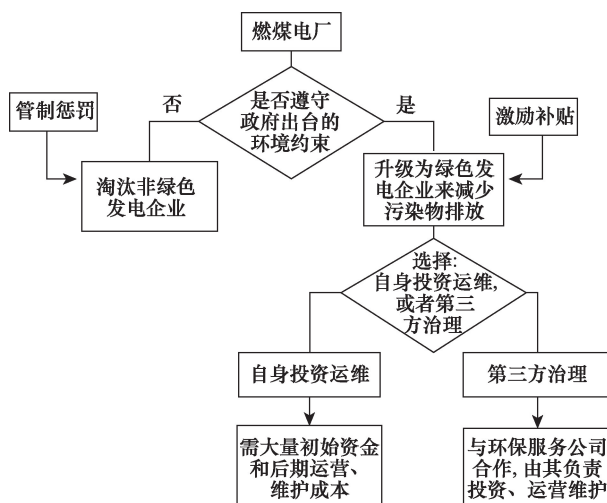


图1 规制约束—政策激励下燃煤电厂发展、投资路径选择

Figure 1 The choice of development and investment paths for coal-fired power plants under the government regulation and incentive policy

(3)环保服务企业。传统的环保企业多数是生产环保产品、建设环保设施的单一产品型、工程型企业,盈利模式单一,盈利能力易波动。而为燃煤电厂提供第三方治理服务的环保服务企业是生产性服务业企业,需要拥有资金、科技、人才实力和实践经验,能够为燃煤电厂加装环保设施实现达标排放,同时承担相应的初始投资和运维费用。作为回报,在服务期间燃煤电厂将向环保服务企业支付环保服务费,使其具有持续、稳定的盈利能力。此时,由燃煤电厂和环保服务企业构成了2级绿色供应链,包括环保补贴电量和环保补贴电价在内的激励政策都是由燃煤电厂直接或者间接转移到环保服务企业,使该供应链效益最大化是两者的共同目标。

2.2 不同政策下燃煤电厂环保投资模式决策模型

燃煤电厂在做决策时主要需要考虑2个问题:第一,是否满足环境约束;第二,利润最大化。本节构建了在考虑4种不同政策情况下,燃煤电厂采用2种不同模式实现达标排放的模型。本文39个公式的相关参变量含义如表1所示。

2.2.1 无补贴政策

在未出台强制环境约束情况下,从经营成本角度考虑,燃煤电厂不会主动投资环保设施。此时,其累计利润 R_p^U 可表示为:

$$R_p^U = \sum_{i=1}^N [Q_i^U (p^U - c_{Pst}^U - f_{Pi}^U)] \tag{1}$$

在实施环境约束后,燃煤电厂为了能够继续经

表1 本文公式的参变量标识及含义

Table 1 Variable and parameter notations and definitions of the formulas of this paper

参变量	参变量含义
Q^{\max}	燃煤电厂年最大上网电量
R_p^U	加装环保设施前,燃煤电厂年度累计利润
Q_i^U	加装环保设施前,燃煤电厂上网电量
p^U	加装环保设施前,燃煤电厂上网电价
c_{Pst}^U	加装环保设施前,燃煤电厂的生产经营成本
f_{Pi}^U	加装环保设施前,燃煤电厂的排污费
Q_i^a	加装环保设施后,燃煤电厂获得的环保补贴电量
E_{Pi}^E	加装环保设施后,燃煤电厂单位发电量的污染物排放量
NPV_{Pst}^I, NPV_{Pst}^E	分别采用自身投资运维模式、第三方治理模式,燃煤电厂的净现值
$\Delta C_i^I, \Delta C_i^E$	分别采用自身投资运维模式、第三方治理模式,燃煤电厂增加的成本
p_i^I, p_i^a	分别采用自身投资运维模式、第三方治理模式,燃煤电厂获得的环保补贴电价
I_p	采用自身投资运维模式,燃煤电厂的初始投资
c_{Pst}^I	采用自身投资运维模式,燃煤电厂的生产经营成本(含环保设施的运维成本)
NPV_{Ei}^E	采用第三方治理模式,环保服务企业的净现值
NPV_{SGi}^E	采用第三方治理模式,绿色供应链的净现值
I_E	采用第三方治理模式,环保服务企业的初始投资
c_{Est}^E	采用第三方治理模式,环保服务企业的运营成本
p_i^E	采用第三方治理模式,燃煤电厂与环保服务企业协商确定的第三方治理服务价格
Y	环境容量
t	燃煤电厂经营年限
t_N	实现盈亏平衡所需的年限
α	政府补贴系数
r	投资回报率
β_i	环保服务费系数
i	$i=1、2、3、4$ 分别代表无补贴、仅有补贴电量、仅有补贴电价、同时有补贴电量和补贴电价情况
λ_i	拉格朗日乘子
η	采用自身投资运维模式,燃煤电厂增加的生产运营成本系数
$\delta 1、\delta 2$	贴现因子

2019年2月

营,必须加装环保设施。在无政府补贴时,不论是选择自身投资运维模式还是第三方治理模式,燃煤电厂都将承受巨大的经营压力。

当选择自身投资运维模式时,燃煤电厂投资环保设施后的净现值 NPV_{P1}^I 为:

$$NPV_{P1}^I = \sum_{t=1}^{t=t_N} [Q_t^U (p^U - c_{Pvt}^I)] e^{-rt} - I_P \quad (2)$$

式中:等式右边第一部分代表燃煤电厂利润的现值。

当选择第三方治理模式时,燃煤电厂和环保服务企业构成绿色供应链。此时,由于实现达标排放,燃煤电厂不再支付排污费用,而需向环保服务企业支付第三方治理服务费 p_1^E 。在实现盈亏平衡前,燃煤电厂的净现值可表示为:

$$NPV_{P1}^E = \sum_{t=1}^{t=t_N} [Q_t^U (p^U - c_{Pvt}^U - p_1^E)] e^{-rt} \quad (3)$$

式中: p_1^E 是燃煤电厂和环保服务企业根据各自不同市场地位等因素,通过一轮轮讨价还价确定的。与此同时,环保服务企业的净现值可表示为:

$$NPV_{E1}^E = \sum_{t=1}^{t=t_N} [Q_t^U (p_1^E - c_{Evt}^E)] e^{-rt} - I_E \quad (4)$$

此时,由两者构成的2级绿色供应链净现值的表达式为:

$$NPV_{SC1}^E = \sum_{t=1}^{t=t_N} [Q_t^U (p^U - c_{Pvt}^U - p_1^E) + Q_t^U (p_1^E - c_{Evt}^E)] e^{-rt} - I_E \quad (5)$$

首先,对于燃煤电厂来讲,无论选择哪种模式,都必须遵守环保排放标准,即其污染物排放总量不能超过政府规定的环境容量,如公式(6)所示:

$$Q_t^U E_{P1}^E \leq Y \quad (6)$$

其次,在考虑利润最大化方面,燃煤电厂希望选择盈利情况更好的模式。这需对比 t 年期间2种不同模式下其净现值 NPV_{P1}^I 与 NPV_{P1}^E 的大小。 NPV_{P1}^I 的值可由公式(2)直接求得。对于 NPV_{P1}^E ,则需确定燃煤电厂和环保服务企业之间的交易价格 p_1^E 。本文将第三方治理服务价格定义为与环保服务企业平均总污染物减排成本成比例的数值,其表达式如下:

$$p_1^E = p_1^E(\beta_1) = \beta_1 \left(c_{Evt}^E + I_E / \sum_{t=1}^{t=t_N} Q_t^U \right) \quad (7)$$

式中: β_1 为环保服务费系数,表示燃煤电厂生产单

位电量所对应的环保服务企业平均污染物治理成本比例;等式右边括号中的第二部分表示环保服务企业的初始投资在服务期内的摊销。

根据绿色供应链管理和最优化理论,供应链整体取得最优值的条件是供应链系统上的每位成员通过合作所获得的收益都优于其独自经营(不参与供应链合作)时的收益。对于燃煤电厂来说,如果不加装环保减排设施,其将被强制关停,即独自经营的收益为0。故燃煤电厂在第三方治理模式下,收益更优的条件是经过一段可接受的时间 t_N 年后盈利即可,即:

$$NPV_{P1}^E = \sum_{t=1}^{t=t_N} \left\{ Q_t^U \left[p^U - \beta_1 \left(c_{Evt}^E + I_E / \sum_{t=1}^{t=t_N} Q_t^U \right) - c_{Pvt}^U \right] \right\} e^{-rt} \geq 0 \quad (8)$$

同样,对于环保服务企业来说,在未开展第三方治理之前其无持续性收入,即独自经营的收益为0,所以环保服务企业收益更优的条件也是经过一段时间 t_N 年后实现盈利,即:

$$NPV_{E1}^E = \sum_{t=1}^{t=t_N} \left\{ Q_t^U \left[\beta_1 \left(c_{Evt}^E + I_E / \sum_{t=1}^{t=t_N} Q_t^U \right) - c_{Evt}^E \right] \right\} e^{-rt} - I_E \geq 0 \quad (9)$$

可以分别从上述两式得到环保服务费系数 β_1 的最大值 $\beta_{1\max}$ 和最小值 $\beta_{1\min}$,如下所示:

$$\beta_{1\max} = \frac{\sum_{t=1}^{t=t_N} [Q_t^U (p^U - c_{Pvt}^U)] e^{-rt}}{\sum_{t=1}^{t=t_N} \left[Q_t^U \left(c_{Evt}^E + I_E / \sum_{t=1}^{t=t_N} Q_t^U \right) \right] e^{-rt}} \quad (10)$$

$$\beta_{1\min} = \frac{\sum_{t=1}^{t=t_N} (Q_t^U c_{Evt}^E) e^{-rt} + I_E}{\sum_{t=1}^{t=t_N} \left[Q_t^U \left(c_{Evt}^E + I_E / \sum_{t=1}^{t=t_N} Q_t^U \right) \right] e^{-rt}} \quad (11)$$

在 $[\beta_{1\min}, \beta_{1\max}]$ 这个可行域中存在一个最优环保服务费系数 β_1^* ,它是通过燃煤电厂和环保服务企业之间讨价还价确定的。根据鲁宾斯坦博弈论理论,这个讨价还价的过程为合作博弈。假定2个参与者的贴现因子分别是 δ_1 和 δ_2 ,则根据纳什均衡理论可以得到环保服务费系数的最优解 β_1^* ,如下所示:

$$\beta_1^* = \frac{(\delta_2 - \delta_1 \delta_2) \beta_{1\max} + (1 - \delta_2) \beta_{1\min}}{1 - \delta_1 \delta_2} \quad (12)$$

在确定了最优环保服务费系数 β_1^* 后,可以同时得到2级绿色供应链实现盈亏平衡的时间 t_N 。在第

t_N 年之后,环保服务企业收回了初始投资,燃煤电厂会重新和环保服务企业商定环保服务价格。此时,新的环保服务费 $p_1^{E'}$ 可表示为:

$$p_1^{E'} = p_1^{E'}(\beta_1') = \beta_1' c_{Evt}^E \quad (13)$$

式中: β_1' 为盈亏平衡之后的新环保服务费系数。利用上述方法,可继续求得盈亏平衡后的最优环保服务费系数 $\beta_1^{E'}$,进而得到新的燃煤电厂、环保服务企业和2级绿色供应链的净现值。

2.2.2 仅有补贴电量

当选择自身投资运维模式时,燃煤电厂净现值表达式为:

$$NPV_{P2}^I = \sum_{t=1}^{t=t_N} [(Q_t^U + Q_{t2}^a)(p^U - c_{Pvt}^I)]e^{-rt} - I_P \quad (14)$$

当选择第三方治理的模式,燃煤电厂和环保服务企业的净现值表达式分别为:

$$NPV_{P2}^E = \sum_{t=1}^{t=t_N} [(Q_t^U + Q_{t2}^a)(p^U - p_2^E - c_{Pvt}^U)]e^{-rt} \quad (15)$$

$$NPV_{E2}^E = \sum_{t=1}^{t=t_N} [(Q_t^U + Q_{t2}^a)(p_2^E - c_{Evt}^E)]e^{-rt} - I_E \quad (16)$$

上述两式表明,作为绿色供应链的构成单位,燃煤电厂和环保服务企业同时、等量地享受到政府的环保补贴电量,是利益共同体。其构成的2级绿色供应链净现值的表达式为:

$$NPV_{SC2} = \sum_{t=1}^{t=t_N} [(Q_t^U + Q_{t2}^a)(p^U - p_2^E - c_{Pvt}^U) + (Q_t^U + Q_{t2}^a)(p_2^E - c_{Evt}^E)]e^{-rt} - I_E \quad (17)$$

为比较 NPV_{P2}^I 和 NPV_{P2}^E ,首先需要确定环保补贴电量。用最优化方法求解该模型,因为决策变量非负且约束条件为不等式,可以运用库恩-塔克条件(Kuhn-Tucker Condition)来进行解析,寻求最优解。其基本思路是通过分析优化问题与库恩-塔克条件间的关系确定决策变量的最佳取值。

对于自身运维模式,构建其拉格朗日函数为:

$$L = \sum_{t=1}^{t=t_N} [(Q_t^U + Q_{t2}^a)(p^U - c_{Pvt}^I)]e^{-rt} - I_P + \lambda_t [Y - (Q_t^U + Q_{t2}^a)E_{Pt}^E] \quad (18)$$

$$\text{St. } 0 < (Q_t^U + Q_{t2}^a) < Q^{\max} \quad t = 1, \dots, t_N$$

其中, λ_t 是拉格朗日(Lagrange)乘子,对上述拉格朗日函数求导并构建方程组:

$$\begin{cases} \partial L / \partial Q_{t2}^a = 0, Q_{t2}^a > 0 \\ \lambda_t (\partial L / \partial \lambda_t) = \lambda_t [Y - (Q_t^U + Q_{t2}^a)E_{Pt}^E] = 0, \lambda_t \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

上式为该最优化问题的库恩-塔克条件,其中 $\partial L / \partial Q_{t2}^a = 0$ 为最优化的必要条件, $\lambda_t (\partial L / \partial \lambda_t) = 0$ 为最优化的互补条件,即若 $\lambda_t > 0$,则 $\partial L / \partial \lambda_t = 0$,若 $\lambda_t = 0$,则 $\partial L / \partial \lambda_t > 0$ 。由于在本例中, $\lambda_t \neq 0$,所以 $\partial L / \partial \lambda_t = 0$,可以得到:

$$Y - (Q_t^U + Q_{t2}^a)E_{Pt}^E = 0 \quad (20)$$

同样,对于第三方治理的模式,构建其拉格朗日函数为:

$$L = \sum_{t=1}^{t=t_N} \left\{ (Q_t^U + Q_{t2}^a)(p^U - p_2^E - c_{Pvt}^U) + (Q_t^U + Q_{t2}^a) \times (p_2^E - c_{Evt}^E) \right\} e^{-rt} - I_E + \lambda_t [Y - (Q_t^U + Q_{t2}^a)E_{Pt}^E] \quad (21)$$

$$\text{St. } 0 < (Q_t^U + Q_{t2}^a) < Q^{\max}, t = 1, \dots, t_N$$

同理,运用库恩-塔克定理对上述拉格朗日函数求导并构建方程组:

$$\begin{cases} \partial L / \partial Q_{t2}^a = 0, Q_{t2}^a > 0 \\ \lambda_t (\partial L / \partial \lambda_t) = \lambda_t [Y - (Q_t^U + Q_{t2}^a)E_{Pt}^E] = 0 \quad (\lambda_t \geq 0) \end{cases} \quad (22)$$

可以看到,2种模式得到的方程组一样,说明政府给予环保补贴电量的多少与燃煤电厂选择何种模式来满足环境约束无关,两者的最优解是相同的。

为方便计算,假设政府每年给予的环保补贴电量相同,即 $Q_{t2}^a = Q_2^a$,则求得补贴电量的最优解为:

$$Q_2^{a*} = Y / E_{Pt}^E - Q^U \quad (23)$$

从上式中可以进一步得出,政府给予环保补贴电量的多少只与单位发电量的污染物排放量有关,即在环保标准不变的条件下,单位发电量的污染物排放量越低,燃煤电厂或者绿色供应链上的成员可以享受到的环保补贴电量就越多,这些电量来自于新增社会用电量和被淘汰落后电力产能释放出的电力负荷,不增加政府的实际支出。这样的政策设计能够鼓励燃煤电厂(无论选择自身投资运维模式还是选择第三方治理模式)不断通过提升环保减排技术、加强管理来获得更多的环保补贴电量,进而尽早地实现盈亏平衡。

在确定了最优环保补贴电量 Q_2^{a*} 后,就可以直接得出燃煤电厂采用自身投资运维模式的净现值 NPV_{P2}^I 。对于采用第三方治理模式,在仅有补贴电

2019年2月

量时,环保服务价格可以定义为:

$$p_2^E = p_2^E(\beta_2) = \beta_2 \left[c_{Eut}^E + I_E / \sum_{t=1}^{t=t_N} (Q_t^U + Q_{t4}^a) \right] \quad (24)$$

参照2.2.1节的方法,继续确定盈亏平衡前后燃煤电厂和环保服务企业讨价还价得到的最优环保服务费系数 β_2^* 和 $\beta_2'^*$,进而可以得到 $NPV_{p_2}^E$ 和 $NPV_{p_2}^{E'}$ 。

2.2.3 仅有补贴电价

假设环保补贴电价与燃煤电厂的平均增量成本成正比,在自身投资模式和第三方治理模式情况下都是如此,分别表示如下:

$$p_3^{Ia} = \alpha \Delta C_3^I \quad (0 < \alpha < 1) \quad (25)$$

$$p_3^a = \alpha \Delta C_3 \quad (0 < \alpha < 1) \quad (26)$$

式中: ΔC_3^I 、 ΔC_3 分别代表采用自身投资运维模式和第三方治理模式情况下,燃煤电厂的平均增量成本。 α 是环保电量补贴系数, $\alpha < 1$ 意味着政府提供的补贴是部分补贴,其目的是鼓励燃煤电厂或者绿色供应链在环境污染治理方面的投入,而不是补偿其全部增量成本。

增加的经营成本会因燃煤电厂采用自身投资运维模式或第三方治理模式而有所不同。在采用自身投资运维模式的情况下,燃煤电厂的增量平均成本如下:

$$\Delta C_3^I = \left[\sum_{t=1}^{t=t_N} (c_{Pvt}^I - c_{Pvt}^U - f_{Pt}^U) Q_t^U + I_p \right] / \sum_{t=1}^{t=t_N} Q_t^U \quad (27)$$

其中, $c_{Pvt}^I = c_{Pvt}^U + \eta c_{Eut}^E$ 。此时燃煤电厂总运维成本由原电力生产成本和新增的环保设施运维成本构成。当 $\eta > 1$ 时,意味着燃煤电厂自身运营维护环保设施来实现污染物减排过程中的运维成本要比环保服务企业高,在实际情况中也是如此。

在采用第三方治理模式的情况下,燃煤电厂的增量平均成本如下:

$$\Delta C_3 = \sum_{t=1}^{t=t_N} [p_3^E + c_{Pvt}^U - c_{Pvt}^U - f_{Pt}^U] Q_t^U / \sum_{t=1}^{t=t_N} Q_t^U \quad (28)$$

上述两式中的 f_{Pt}^U 可以被看作是当燃煤电厂通过2种模式减少污染时,单位发电量节约的成本。从另一个角度来说,这也意味着对于燃煤电厂而言,与其缴纳更高的罚金或者排污费,不如将资金用来加装环保设施,这样既可以满足环境约束,又

能实现企业的可持续发展,达到了政府将现有燃煤电厂升级为绿色电厂的目标。

当选择自身投资运维的模式,燃煤电厂净现值表达式为:

$$NPV_{p_3}^I = \sum_{t=1}^{t=t_N} [Q_t^U (p^U + p_3^{Ia} - c_{Pvt}^I)] e^{-rt} - I_p \quad (29)$$

上式表明,与无政府补贴情况相比,在实现盈亏平衡之前的 t_N 年里,政府会在原来的上网电价 p^U 的基础上给予环保补贴电价 p_3^{Ia} ,部分弥补燃煤电厂增加的成本。

当选择第三方治理的模式,燃煤电厂和环保服务企业在实现盈亏平衡前的净现值表达式分别为:

$$NPV_{p_3}^E = \sum_{t=1}^{t=t_N} [Q_t^U (p^U + p_3^a - p_3^E - c_{Pvt}^U)] e^{-rt} \quad (30)$$

$$NPV_{E3}^E = \sum_{t=1}^{t=t_N} [Q_t^U (p_3^E - c_{Eut}^E)] e^{-rt} - I_E \quad (31)$$

上述两式表明,在燃煤电厂享受环保补贴电价的同时,环保服务企业也通过环保服务费获得了政策激励,也是利益共同体,但与环保补贴电量同时、等量的情况有所不同。2级绿色供应链净现值的表达式为:

$$NPV_{SC3} = \sum_{t=1}^{t=t_N} [Q_t^U (p^U + p_3^a - c_{Pvt}^U - c_{Eut}^E)] e^{-rt} - I_E \quad (32)$$

此时燃煤电厂和环保服务企业之间的环保服务价格定义为:

$$p_3^E = p_3^E(\beta_3) = \beta_3 \left(c_{Eut}^E + I_E / \sum_{t=1}^{t=t_N} Q_t^U \right) \quad (33)$$

可以参照上述2节的方法对本节模型进行求解。

2.2.4 同时有补贴电量和补贴电价

采用2.2.3节的方法,政府对2种模式的补贴电价可以分别表示为:

$$p_4^{Ia} = \alpha \Delta C_4^I = \alpha \left[\sum_{t=1}^{t=t_N} (c_{Pvt}^I - c_{Pvt}^U - f_{Pt}^U) (Q_t^U + Q_{t4}^a) + I_p \right] / \sum_{t=1}^{t=t_N} (Q_t^U + Q_{t4}^a) \quad (34)$$

$$p_4^a = \alpha \Delta C_4 = \alpha \sum_{t=1}^{t=t_N} (p_4^E + c_{Pvt}^U - c_{Pvt}^U - f_{Pt}^U) (Q_t^U + Q_{t4}^a) / \sum_{t=1}^{t=t_N} (Q_t^U + Q_{t4}^a) \quad (35)$$

当选择自身投资运维的模式,燃煤电厂净现值的表达式为:

$$NPV_{p4}^I = \sum_{t=1}^{t=T_N} [(Q_t^U + Q_{t4}^a)(p^U + p_4^a - c_{pvt}^U)]e^{-rt} - I_p \quad (36)$$

当选择第三方治理的模式,在实现盈亏平衡前,燃煤电厂和环保服务企业的净现值表达式分别为:

$$NPV_{p4}^E = \sum_{t=1}^{t=T_N} [(Q_t^U + Q_{t4}^a)(p^U + p_4^a - p_4^E - c_{pvt}^U)]e^{-rt} \quad (37)$$

$$NPV_{E4}^E = \sum_{t=1}^{t=T_N} [(Q_t^U + Q_{t4}^a)(p_4^E - c_{Evt}^E)]e^{-rt} - I_E \quad (38)$$

此时,燃煤电厂和环保服务企业之间的环保服务价格定义为:

$$p_4^E = p_4^E(\beta_4) = \beta_4 \left[c_{Evt}^E + I_E / \sum_{t=1}^{t=T_N} (Q_t^U + Q_{t4}^a) \right] \quad (39)$$

可以参照上述3节的方法对本节模型进行求解。

3 结果及分析

本文选择某燃煤电厂2台600 MW机组为例,对上述4种情况下采用自身投资运维和第三方治理2种模式进行计算。初始投资额等投资相关数据取自燃煤电厂和环保服务企业实际投资分析报告,电厂经营数据取自《中国电力行业年度发展报告》^[32],相关系数为经验值。初始投资和后期运维费用数据如表2所示,最优计算结果分别如表3~表8所示:

从表3可以看到,在无政府补贴时,采用自身投

表2 燃煤电厂和环保企业初始投资及运维参数数据

Table 2 Initial investment cost and operating parameters of coal power plant and environmental protection enterprise

参变量	数值	参变量	数值	参变量	数值
Q^{\max}	66亿kW·h	c_{pvt}^U	0.302 0元/kW·h	α	0.3
Q^U	50.064 亿kW·h	c_{Ev}^E	0.015 0元/kW·h	r	12%
Y	1 583.4 t/年	c_{pvt}^I	0.321 5元/kW·h	δ_1	0.2
E_p^E	0.302 g/(kW·h)	p^U	0.327 0元/kW·h	δ_2	0.1
I_E	3.20 亿元	f_p^E	0.009 7元/kW·h	η	1.3
I_p	3.68 亿元				

资运维模式的燃煤电厂在其运行寿命(一般为30年)里始终没有实现盈亏平衡;采用第三方治理模式的燃煤电厂和环保服务企业,通过讨价还价确定了较大的环保服务费系数后,后者和绿色供应链整体最快在第13年可以实现盈亏平衡,而在此之前燃煤电厂净现值较低,仅仅是维持不亏损,盈亏平衡后,两者继续通过讨价还价重新确定环保服务费系数,即绿色供应链上的2家企业重新分配了利润,燃煤电厂的净现值在接下来的几年迅速增长,环保服务企业也保持合理利润水平,而在全过程中,燃煤电厂始终保持持续盈利。

表4显示,在仅有环保补贴电量的情况下,2种模式计算所得的最优补贴电量是相同的。在采用

表3 无政府补贴情况下燃煤电厂分别选择自身投资运维和第三方治理模式的最优计算结果

Table 3 Numerical results of optimal solutions to both self-investment and third-party control cases with no subsidy of coal power plant

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
NPV_{p1}^I /万元	-34 342	-32 146	-30 187	-28 437	-26 874	-25 479	-24 234	-23 122	-22 129	-21 242	-20 450	-19 744	-19 113	-18 549	-18 046
β_1^*	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.252 9	1.054 4	1.054 4
p_1^{E*} /(元/(kW·h))	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.025 0	0.015 8	0.015 8
NPV_{p1}^{E*} /万元	20	38	55	69	82	93	104	113	121	128	135	141	146	1 087	1 927
NPV_{E1}^{E*} /万元	-27 550	-23 577	-20 030	-16 863	-14 035	-11 510	-9 256	-7 243	-5 446	-3 841	-2 408	-1 129	13	97	171
NPV_{sc1}^* /万元	-27 530	-23 539	-19 975	-16 794	-13 953	-11 417	-9 152	-7 130	-5 325	-3 713	-2 274	-988	159	1 183	2 098

表4 仅有补贴电量情况下燃煤电厂分别选择自身投资运维和第三方治理模式的最优计算结果

Table 4 Numerical results of optimal solutions to both self-investment and third-party control cases with Q_2^{E*} of coal power plant

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Q_2^{E*} /亿kW·h	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	0	0
NPV_{p2}^I /万元	-34 224	-31 923	-29 869	-28 036	-26 398	-24 936	-23 631	-22 466	-21 425	-20 496	-19 667	-18 926	-18 265	-17 674
β_2^*	1.237 8	1.237 8	1.237 8	1.237 8	1.237 8	1.237 8	1.237 8	1.237 8	1.237 8	1.237 8	1.237 8	1.237 8	1.054 4	1.054 4
p_2^{E*} /(元/(kW·h))	0.024 9	0.024 9	0.024 9	0.024 9	0.024 9	0.024 9	0.024 9	0.024 9	0.024 9	0.024 9	0.024 9	0.024 9	0.015 8	0.015 8
NPV_{p2}^{E*} /万元	66	125	177	224	266	304	337	367	394	417	439	457	1 511	2 452
NPV_{E2}^{E*} /万元	-27 382	-23 258	-19 576	-16 289	-13 354	-10 734	-8 394	-6 305	-4 439	-2 774	-1 287	41	134	218
NPV_{sc2}^* /万元	-27 316	-23 133	-19 399	-16 065	-13 088	-10 430	-8 057	-5 938	-4 046	-2 357	-848	498	1 646	2 670

2019年2月

表5 仅有补贴电价情况下燃煤电厂选择自身投资运维模式的最优计算结果

Table 5 Numerical results of optimal solutions to self-investment case with p_3^{ls} of coal power plant

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_3^{ls}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8
$NPV_{p_3}^{ls}/\text{万元}$	-32 662	-28 968	-25 669	-22 724	-20 094	-17 747	-15 650	-13 779	-12 107	-10 615
t	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$p_3^{ls}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8
$NPV_{p_3}^{ls}/\text{万元}$	-9 283	-8 093	-7 031	-6 083	-5 236	-4 481	-3 806	-3 203	-2 665	-2 184
t	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$p_3^{ls}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0	0	0
$NPV_{p_3}^{ls}/\text{万元}$	-1 755	-1 372	-1 031	-725	-453	-209	8	123	226	318

表6 仅有补贴电价情况下燃煤电厂选择第三方治理模式的最优计算结果

Table 6 Numerical results of optimal solutions to third-party control case with p_3^{ls} of coal power plant

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
β_3^*	1.194 0	1.194 0	1.194 0	1.194 0	1.194 0	1.194 0	1.054 4	1.054 4	1.054 4	1.054 4
$p_3^{ls}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	0.030 6	0.030 6	0.030 6	0.030 6	0.030 6	0.030 6	0.015 8	0.015 8	0.015 8	0.015 8
$p_3^{as}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	0.006 3	0.006 3	0.006 3	0.006 3	0.006 3	0.006 3	0	0	0	0
$NPV_{p_3}^{ls}/\text{万元}$	290	550	781	988	1 172	1 337	3 417	5 274	6 932	8 412
$NPV_{p_3}^{ls}/\text{万元}$	-25 014	-18 776	-13 207	-8 234	-3 794	170	355	520	667	799
$NPV_{SC3}^*/\text{万元}$	-24 723	-18 226	-12 426	-7 246	-2 622	1 507	3 772	5 794	7 599	9 211

表7 同时有补贴电量和补贴电价情况下燃煤电厂选择自身投资运维模式的最优计算结果

Table 7 Numerical results of optimal solutions to self-investment case with Q_4^{as} and p_4^{ls} of coal power plant

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_4^{as}/\text{亿kW}\cdot\text{h}$	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
$p_4^{ls}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0
$NPV_{p_4}^{ls}/\text{万元}$	-32 328	-28 335	-24 769	-21 586	-18 744	-16 206	-13 940	-11 917	-10 111	-8 498
t	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$Q_4^{as}/\text{亿kW}\cdot\text{h}$	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	0
$p_4^{ls}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0
$NPV_{p_4}^{ls}/\text{万元}$	-7 058	-5 772	-4 624	-3 599	-2 684	-1 867	-1 138	-486	95	394

表8 同时有补贴电量和补贴电价情况下燃煤电厂选择第三方治理模式的最优计算结果

Table 8 Numerical results of optimal solutions to third-party control case with Q_4^{as} and p_4^{ls} of coal power plant

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_4^{as}/\text{亿kW}\cdot\text{h}$	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	0	0	0	0
β_4^*	1.191 1	1.191 1	1.191 1	1.191 1	1.191 1	1.191 1	1.054 4	1.054 4	1.054 4	1.054 4
$p_4^{ls}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	0.030 0	0.030 0	0.030 0	0.030 0	0.030 0	0.030 0	0.015 8	0.015 8	0.015 8	0.015 8
$p_4^{as}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	0.006 1	0.006 1	0.006 1	0.006 1	0.006 1	0.006 1	0	0	0	0
$NPV_{p_4}^{ls}/\text{万元}$	518	981	1 395	1 764	2 093	2 388	4 467	6 324	7 982	9 463
$NPV_{p_4}^{ls}/\text{万元}$	-24 985	-18 721	-13 129	-8 136	-3 677	303	488	653	800	932
$NPV_{SC4}^*/\text{万元}$	-24 466	-17 740	-11 734	-6 372	-1 584	2 691	4 955	6 977	8 783	10 395

自身投资运维模式时,燃煤电厂在其运行寿命里也没有实现盈亏平衡,说明计算得到的最优补贴电量还远远不够;在第三方治理模式下,环保服务企业

和绿色供应链整体第12年实现盈亏平衡,比没有政府补贴的情况提前了1年,说明政府提供的环保补贴电量政策能够有助于绿色供应链及早实现盈亏

平衡。表3和表4都显示,燃煤电厂在采用第三方治理模式时在全过程保持持续盈利,且净现值要远远大于采用电厂自身投资运维的模式。

分析表5和表6,自身投资运维模式下,燃煤电厂的最优解是需要0.0038元/(kW·h)的补贴电价才能在第27年实现盈亏平衡,几乎是在燃煤电厂运行寿命的最后阶段,这显然是其不愿意接受的。第三方治理模式下,政府只需要提供6年0.0063元/(kW·h)的补贴电价就能实现盈亏平衡。从数值上看,虽然在自身投资运维模式下所需的补贴电价0.0038元/(kW·h)要小于第三方治理模式下所需的0.0063元/(kW·h),但是补贴时间却多出21年。根据计算,用同样6年的时间实现盈亏平衡,自身投资运维模式需要的政府补贴电价为0.0131元/(kW·h),是第三方治理模式所需补贴电价0.0063元/(kW·h)的2.1倍,而在享有相同的政府补贴电价(0.0063元/(kW·h))时,自身投资运维模式需要13年的时间实现盈亏平衡,比第三方治理模式所需的6年时间增长了一倍期限还多。从提供环保补贴电价的年限和价格方面考虑,政府都会倾向于第三方治理模式。从表7和表8中可以得出同时有补贴电量和补贴电价情况下与仅有补贴电价类似的结论。

进一步分析可知,对于有政府补贴电价下的第三方治理模式,在盈亏平衡之前,政府提供的补贴电价分别为0.0063元/(kW·h)和0.0061元/(kW·h),而燃煤电厂支付给环保服务企业的环保服务费用分别为0.0306元/(kW·h)和0.0300元/(kW·h),说明在这个过程中,燃煤电厂要分别再支付0.0243元/(kW·h)和0.0239元/(kW·h);在盈亏平衡之后,政府不再提供补贴,此时的环保服务费用完全由燃煤电厂支付,费用均为0.0158元/(kW·h)。目前燃煤电厂的度电利润水平较低,甚至亏损。根据中电联《2018年中国电力行业年度发展报告》数据显示,2017年全国各地区燃煤发电标杆电价在0.3元/(kW·h)左右,而受电煤价格大幅上涨、市场化交易量增价降等因素影响,2017年华能、大唐、华电、国家能源集团和国家电投五大发电集团煤电业务亏损132亿元,继2008年后再次出现煤电板块整体亏损。具体到燃煤电厂利润方面,本例中,在减去发电成本后,燃煤电厂的度电利润为0.0250元/(kW·h),

由公式(1)可知,在未加装环保设施时燃煤电厂的度电利润为0.0153元/(kW·h);对于有政府补贴电价下的第三方治理模式,盈亏平衡之前燃煤电厂的度电利润分别为0.0007元/(kW·h)和0.0011元/(kW·h),盈亏平衡之后燃煤电厂的度电利润为0.0092元/(kW·h)。可以看到,相对于燃煤电厂的度电利润,其支付给环保服务企业的环保服务费用0.0243元/(kW·h)、0.0239元/(kW·h)和盈亏平衡之后的0.0158元/(kW·h)已占燃煤电厂生产成本的很高比例。综上可知,采用第三方治理模式很好体现了目前“谁污染谁付费”的新的治理思路。

计算结果还显示,在不改变现有环境约束和污染物排放水平的大背景下,采用自身投资运维模式的燃煤电厂,在无政府补贴或仅有环保补贴电量时均不能及时达到盈亏平衡,只有在给予补贴电价的情况下才能实现(分别需要27年和19年);而采用第三方治理模式时,政府给予环保补贴电量和补贴电价均能帮助绿色供应链更早实现盈亏平衡,特别是在给予补贴电价的情况下,能够使绿色供应链在较合理的时间阶段(均为6年)实现盈亏平衡。上述分析结果说明政府给予环保补贴是必要的,而且政府选择给予环保补贴电价的方式能够更快地帮助燃煤电厂或者绿色供应链实现盈亏平衡。

4 结论与建议

4.1 结论

面对日益严重的生态破坏和环境污染,既能使企业保持持续经营,又能内部化企业经营带来的负外部性是当前社会发展必须解决的紧迫问题。从绿色供应链的视角,构建了规制约束-政策激励作用下燃煤电厂环保投资模式决策模型,对“谁污染谁治理”和“谁污染谁付费”2种思路进行了对比分析。研究的主要结论如下:

(1)政府必须同时实施规制约束(严格的污染物排放标准)和激励引导(补贴电价、补贴电量)政策,才能在淘汰一批落后煤电产能的同时,帮助有实力的燃煤电厂实现达标排放,升级为绿色电厂,这符合中国正在实施的供给侧结构性改革。

(2)对政府而言,其愿意选择根据环境污染第三方治理模式的情况制定相应的环保补贴政策,因为具有补贴成本上的优势(在达到同样减排效果的

2019年2月

情况下,第三方治理模式需要的补贴电价是自身投资运维模式的1/2左右),且能够体现“谁污染谁付费”的治理思路。

(3)对燃煤电厂而言,第三方治理模式能够帮助解决初始投资的巨大压力和后期的运维成本,特别是所得到的净现值要远远大于自身投资运维模式下的净现值,既满足了环境约束,又满足其经济效益最大化的要求,是符合其升级为绿色电厂的路径选择。

(4)对环保服务企业来讲,第三方治理模式下将其引入到绿色供应链,通过讨价还价方式确定的其与燃煤电厂都能接受的环保服务费用,使生产性服务收入成为其新的盈利模式和新的利润增长点,可以帮助有实力的环保行业向综合型、集约型发展。

4.2 政策建议

综上,提出如下政策建议:

(1)政府应加强对污染物排放标准等强制性约束政策的执行、监督力度,严厉惩罚违反环保法律法规的燃煤电厂,切实发挥政策的导向作用,淘汰落后产能。

(2)经济上可行是推进“谁污染谁付费”的关键,政府应出台更多直接给予绿色供应链的精准激励政策,帮助有实力的燃煤电厂渡过因投资环保设施承受巨额成本压力的经营困境期。

(3)政府还应出台激励政策,鼓励已经开展第三方治理的绿色供应链不断提升环境绩效,促使环保服务企业主动加大环保科技投入、提升管理水平,形成“减排有收益”的正确政策导向,不断提升绿色供应链整体的经济效益和社会效益。

参考文献(References):

- [1] 习近平. 良好生态环境是最普惠的民生福祉: 一论生态文明建设[EB/OL]. (2013-04-08)[2014-11-07]. http://epaper.gmw.cn/gmrb/html/2014-11/07/nw.D110000gmrb_20141107_5-01.htm. [Xi J P. A Good Ecological Environment Is the Most Beneficial to People's Well-Being [EB/OL]. (2013-04-08)[2014-11-07]. http://epaper.gmw.cn/gmrb/html/2014-11/07/nw.D110000gmrb_20141107_5-01.htm.]
- [2] 中国共产党十八届中央委员会. 决胜全面建成小康社会夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利: 在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告[EB/OL]. (2017-10-18)[2018-07-27]. http://www.xinhuanet.com/politics/19cpcnc/2017-10/27/c_1121867529.htm. [The 18th Central Committee of the Communist Party of China. Secure a Decisive Victory in Building a Moderately Prosperous Society in All Respects and Strive for the Great Success of Socialism with Chinese Characteristics for a New Era[EB/OL]. (2017-10-18)[2018-07-27]. http://www.xinhuanet.com/politics/19cpcnc/2017-10/27/c_1121867529.htm.]
- [3] 国务院. 大气污染防治行动计划[EB/OL]. (2013-09-10)[2018-07-27]. <http://www.jingbian.gov.cn/gk/zfwj/gwywj/41211.htm>. [State Council. Action Plan for Air Pollution Control[EB/OL]. (2013-09-10)[2018-07-27]. <http://www.jingbian.gov.cn/gk/zfwj/gwywj/41211.htm>.]
- [4] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国大气污染防治法[EB/OL]. (2015-08-29)[2018-07-27]. <https://max.book118.com/html/2017/0708/121214915.shtm>. [The NPC Standing Committee. Law of the People's Republic of China on the Prevention and Control of Atmospheric Pollution[EB/OL]. (2015-08-29)[2018-07-27]. <https://max.book118.com/html/2017/0708/121214915.shtm>.]
- [5] Krass D, Nedorezov T, Ovchinnikov A. Environmental taxes and the choice of green technology[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(5): 1035-1055.
- [6] 中国电力企业联合会. 中国煤电清洁发展报告[EB/OL]. (2017-09-22)[2018-07-27]. <http://www.cec.org.cn/zhuanti/2017nian-zhuanti/zhongguomeidianqingjiefazhanyuhuanjingyingxiangfabuy-antaohui/yaowen/2017-09-22/173384.html>. [China Electricity Council. Report on Clean Development of Coal and Electricity in China[EB/OL]. (2017-09-22)[2018-07-27]. <http://www.cec.org.cn/zhuanti/2017nian-zhuanti/zhongguomeidianqingjiefazhanyuhuanjingyingxiangfabuy-antaohui/yaowen/2017-09-22/173384.html>.]
- [7] 中国共产党十八届中央委员会. 中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定[EB/OL]. (2013-11-15)[2018-07-27]. https://www.sohu.com/a/216562168_99914060. [The 18th Central Committee of the Communist Party of China. Decision of the CCCPC on Some Major Issues Concerning Comprehensively Deepening the Reform[EB/OL]. (2013-11-15)[2018-07-27]. https://www.sohu.com/a/216562168_99914060.]
- [8] 国务院. 关于推行环境污染第三方治理的意见[EB/OL]. (2015-01-14)[2018-07-27]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/14/content_9392.htm. [State Council. Opinions on the Implementation of Third Party Environmental Pollution Control[EB/OL]. (2015-01-14)[2018-07-27]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/14/content_9392.htm.]
- [9] 生态环境部. 关于推进环境污染第三方治理的实施意见[EB/OL]. (2017-08-16)[2018-07-27]. <http://www.h2o-china.com/news/262518.html>. [Ministry of Ecology and Environment. Opinions on the Implementation of Third Party Environmental Pollution Control[EB/OL]. (2017-08-16)[2018-07-27]. <http://www.h2o-china.com/news/262518.html>.]

- tion Control[EB/OL]. (2017-08-16) [2018-07-27]. <http://www.h2o-china.com/news/262518.html>.]
- [10] 陈潭. 第三方治理: 理论范式与实践逻辑[J]. 政治学研究, 2017, (1): 90-98. [Chen T. Third party governance: Theoretical paradigm and practical logic[J]. *Cass Journal of Political Science*, 2017, (1):90-98.]
- [11] 骆建华. 第三方治理推进治污新变革: 环境污染第三方治理的发展及完善建议[J]. 环境保护, 2014, 42(20): 15-19. [Luo J H. Proposal on the development and improvement of third-party management over environmental pollution[J]. *Environm Ental Protection*, 2014, 42(20): 15-19.]
- [12] 刘超. 管制、互动与环境污染第三方治理[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(2): 96-104. [Liu C. Regulation, interaction and environmental pollution control by a third party[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(2): 96-104.]
- [13] 万子豪. 中澳环境污染治理政策的比较研究: 以第三方治理为例[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(4): 29-33. [Wan Z H. Comparative study of environmental pollution governance policies in China and Australia: Take third party governance as an example[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2017, 24(4): 29-33.]
- [14] 任维彤, 王一. 日本环境污染第三方治理的经验与启示[J]. 环境保护, 2014, 42(20): 34-38. [Ren W T, Wang Y. Japan's experiences and enlightenment about third-party management on environmental pollution[J]. *Environmental Protection*, 2014, 42(20): 34-38.]
- [15] 董战峰, 董玮, 田淑英, 等. 我国环境污染第三方治理机制改革路线图[J]. 中国环境管理, 2016, 8(4): 52-59. [Dong Z F, Dong W, Tian S Y, et al. Reform roadmap of the third-party environmental pollution control in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2016, 8(4): 52-59.]
- [16] 刘倩, 丁慧平, 侯海玮. 供应链环境成本内部化利益相关者行为抉择博弈探析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(6): 71-76. [Liu Q, Ding H P, Hou H W. Game analysis of stakeholders for supply chain environmental cost internalization[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(6): 71-76.]
- [17] Hall J. Environmental supply chain dynamics[J]. *Journal of cleaner production*, 2000, 8(6): 455-471.
- [18] Simpson D. Institutional pressure and waste reduction: The role of investments in waste reduction resources[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 139(1): 330-339.
- [19] Ageron B, Gunasekaran A, Spalanzani A. Sustainable supply management: An empirical study[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 140(1): 168-182.
- [20] Gang X. Cooperative strategies for sustainability in a decentralized supply chain with competing suppliers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113: 807-821.
- [21] Anttonen M, Halme M, Houtbeckers E, et al. The other side of sustainable innovation: Is there a demand for innovative services?[J]. *Journal of cleaner production*, 2013, 45(2): 89-103.
- [22] Jayaram J, Avittathur B. Green supply chains: A perspective from an emerging economy[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 234-244.
- [23] Ding H P, Liu Q, Zheng L. Assessing the economic performance of an environmental sustainable supply chain in reducing environmental externalities[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 255(2): 463-480.
- [24] Ding H P, Wang L, Zheng L. Collaborative mechanism on profit allotment and public health for a sustainable supply chain[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, DOI:10.1016/j.ejor.2017.11.057.
- [25] Ding H P, Zhao Q L, An Z R, et al. Collaborative mechanism of a sustainable supply chain with environmental constraints and carbon caps[J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 181: 191-207.
- [26] Ding H P, Zhao Q L, An Z R, et al. Pricing strategy of environmental sustainable supply chain with internalizing externalities[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 170: 563-575.
- [27] Almeida C M V B, Agostinho F, Giannetti B F, et al. Integrating cleaner production into sustainability strategies: An introduction to this special volume[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96: 1-9.
- [28] Chung S H, Weaver R D, Friesz T L. Strategic response to pollution taxes in supply chain networks: Dynamic, spatial, and organizational dimensions[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 231(2): 314-327.
- [29] Vachon S, Klassen R D. Environmental management and manufacturing performance: The role of collaboration in the supply chain [J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 111(2): 299-315.
- [30] Dabhilkar M, Bengtsson L, Haartman R V, et al. Supplier selection or collaboration? Determining factors of performance improvement when outsourcing manufacturing[J]. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2009, 15(3): 143-153.
- [31] Guarnieri P, Sobreiro V A, Nagano M S, et al. The challenge of selecting and evaluating third-party reverse logistics providers in a multicriteria perspective: A Brazilian case[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96: 209-219.
- [32] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告[M]. 北京: 中国市场出版社, 2017. [China Electricity Council. Annual Development Report of Power Industry in China[M]. Beijing: China Market Press, 2017.]

Environmental pollution control by a third party in coal-fired power plants

HUANG Hua, DING HuiPing

(School of Economics and Management, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In China, coal-fired power plants still play a major role in the power sector, which is considered as a major emission source of air pollution, such as haze. Meanwhile, the concrete implementation path of the transformation of China's environmental governance thinking from "who pollutes, who governs" to "who pollutes, who pays" is under way. Although the third party governance of environmental pollution has been popularized in air pollution prevention and control, there are also problems in existence. This study aims to take the flue gas control of coal-fired power industry as the research object. From the perspective of green supply chain, the mathematical models of coal-fired power plants using two modes of self-investment operation and third-party management under four kinds of regulatory constraints and policy incentives, including no subsidy, only electricity sales price subsidy, only extra sales volume ration of electricity are constructed, solved, and analyzed, respectively. Through the calculation and evaluation, the results show that: the simultaneous implementation of regulation and incentive policies can help coal-fired power plants upgrade to green power plants. Since less subsidies can help coal-fired power plants, the government is more inclined to formulate subsidy policies based on the third-party governance model. This model can also make more profits for coal-fired power plants and make the traditional environmental protection enterprises transform into productive service enterprises and obtain stable profits, which is helpful to popularize the idea of "who pollutes, who pays" in practice. As a green service provider, by devoting itself through innovating environmental technology to reduce pollutant emissions, the environmental protection enterprises can also assist the coal-fired power plants to gain additional sales volume of electricity and to maximize the supply chain's profit as well. Therefore, it puts forward suggestions on strengthening the implementation and supervision of environmental restraint policies, giving precise incentive policies, and promulgating policies to encourage the improvement of environmental performance.

Key words: green supply chain; third party control; environmental pollution; government regulation; incentive policy; environmental subsidy; coal-fired power plants