碳市场和电力市场耦合研究

赵长红[1]，张明明[1]，吴建军[2]，袁家海[1*]

（1.华北电力大学新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室，华北电力大学经济与管理学院，北京 102206；
2.中国科学院城市环境研究所，厦门 361021）

【摘　要】 低碳化、清洁化是我国电力行业未来发展的方向。碳市场启动，电力作为试点行业，碳市场和电力市场面临着协调和融合问题。为研究碳市场和电力市场的耦合关系，本文首先分析了碳市场机制的成本节约效应以及与电力市场改革的互动效应；然后给出考虑碳排放价格的电力市场发电电能成本模型——LCOEe；最后以广东省为例，对广东碳市场碳价传导至电价设定情景并进行模拟分析。结果显示，碳市场和电力市场存在相互制约的关系，碳排放外部成本内部化影响电力市场出清电价，而电力市场能够缓解碳市场的减排压力，抑制碳市场的活跃度。两市场的耦合研究对于优化电源结构、促进新能源市场的发展，以及启发政策制定者重视两大市场的协同发展具有非常重要的现实意义。

【关键词】 碳市场；电力市场；平准化电能成本；碳市场模拟

【中图分类号】F832.5；F406.7　　【文章编号】1674-6252（2019）04-0105-08

【文献标识码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2019.04.105

引言

2017 年底我国以电力行业为突破口启动了全国性碳市场，近几年电力市场也逐步成长起来。在电力市场报价中，相对于其他成本构成部分的变化，碳价格变化所引起的成本冲击特别适合于对价格传导进行实证分析。中国市场碳价传导过程中，其排放成本会通过成本内部化的途径变化，最终部分甚至全部以电价的形式传导至终端消费者，此即碳排放价格变动对电价的穿越效应。

目前国外针对碳市场与电力市场传导机制研究已经取得不少的成果。Beat Hintermann [1] 根据德国现货市场数据，将德国电力市场的碳排放成本传导到每小时的电价上，实现了短期成本转嫁，进而可以估计不同负荷周期的成本传导，为研究碳成本的全面转嫁提供了最有力的证据。Natalia Fabra 等 [2] 对西班牙电力市场的排放成本转嫁率进行了量化，该文献采用西班牙电力市场的投标数据，通过构建简化估计模型及结构估计模型，考察了碳排放成本变动对电力价格的影响，并进一步利用结构分解方法识别了碳排放成本对电力价格的传导机制，从而验证了碳成本的不完全传导。这种不完全的传导是由需求反应和市场力量驱动的，它也反映了在碳市场形成后传统发电技术经济性的逐步降低，现在的技术将由更清洁的技术取代。Liliya 等 [3] 研究了在不完全竞争的情况下边际排放成本在电力市场中的成本转嫁，研究显示，价格的增加导致边际成本抬高还是降低，取决于市场集中度、可用容量、电力需求水平等结构因素。Sijm[4] 和 Zachmann[5] 等学者也研究了欧盟碳市场背景下碳价的传导率。

此外，在环境压力方面，袁家海等 [6] 以典型煤电企业为例，在产能过剩、能效标准提高、环境保护税、全国碳市场、水资源税和非水可再生能源规划目标的风险约束下，建立环境成本内部化和环境风险分析工具，考虑不同压力情境下对煤电企业价值的影响，构建环境风险影响财务成本的压力测试框架，得出产能过剩和碳市场风险对企业价值的影响是大多数地区在不同情景中面临的主要风险驱动因素。袁家海等 [7] 还对电力企业的各项污染排放值与环境违法事故进行研究，这一项在受到环保部门和监管者制约的同时也受到公众的监督，企业在环境压力方面的指标直接影响企业声誉，是企业减轻环境风险的核心。

综上可知，学者大多数都是针对国外现有碳市场碳价传导机制和碳排放成本对电价的影响以及碳市场对企业价值和企业环境风险影响进行分析，尚未有根据中国国情分析中国试点碳市场和电力市场耦合研究的文献。而碳市场建设和电力市场能源重组都是实现碳减排目标的重要因素，二者存在密切联系。在此背景下，本文以广东省试点碳市场区域减排行动为例，着重分析广东省碳市场与电力市场间的耦合机制，并总结对我国电力行业参与碳市场和电力市场的启示。

1 碳市场与电力市场的互动效应

1.1 我国碳市场与电力市场发展概述

2013 年 6 月起，我国陆续在北京、上海、深圳、重庆、

资助项目：国家自然科学基金面上项目“低碳电力转型目标决策、路径优化与政策机制协同设计”（71673085）。

作者简介：赵长红（1971—），男，副教授，硕士，研究方向为企业管理与技术经济，E-mail：zchh21@126.com。

*** 责任作者：**袁家海（1979—），男，教授，博士，博士生导师，研究方向为能源系统低碳转型与决策，E-mail：yuanjh126@126.com。

天津、广东、湖北 7 个省市展开了碳交易试点运行。2016 年国务院发布的《“十三五”控制温室气体排放工作方案》提出，全国碳排放权交易市场涵盖石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、电力和航空 8 个行业中年耗能 1 万 t 标准煤以上的企业。2017 年发布的《全国碳排放权交易市场建设方案（发电行业）》（以下简称《建设方案》）提出，当前碳市场建设中电力行业先行 [8]。碳市场涵盖了约 1700 家发电企业，其排放量占我国总排放量的 35%，占全国碳排放量的 1/3 左右（图 1），是迄今为止全球最大的碳排放权交易市场，也是继美国区域温室气体减排行动（RGGI）之后，第二个只有电力行业参与的碳排放权交易体系 [9]。碳市场的进一步发展势必将对电力行业的发展产生重要影响。

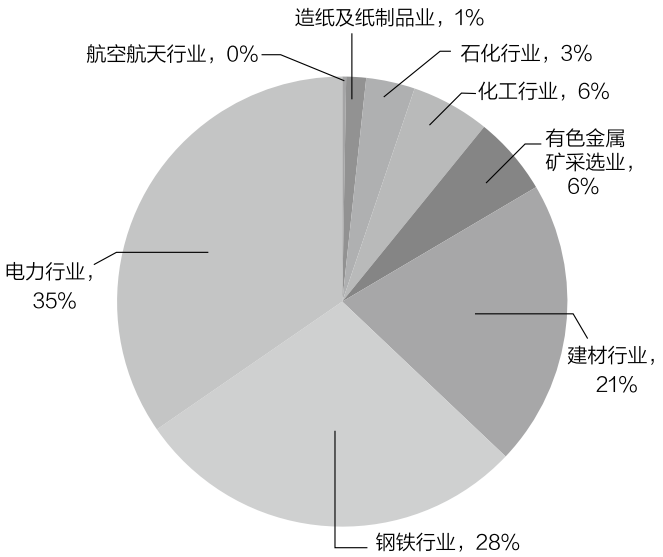


图1 8大行业排放量比例

数据来源：根据“中国环境数据库”相关数据整理计算得出

与此同时，我国电力市场发展也迈出新的重要一步。2015 年 3 月 15 日，中共中央国务院发布了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》（9 号文），同时出台包括《关于有序放开发用电计划的实施意见》等 6 份配套文件 [10]。这些文件对具体的改革领域提出了明确的要求，旨在发电侧、售电侧以及增量配电等领域逐步引入市场竞争，以实现电力行业总体的资源优化配置，提高行业整体竞争力。在电力体制改革的推动下，成熟完善的电力市场可以实现扩大清洁能源的消纳空间、提供发电成本的传导机制、优化电源结构与盈利模式、改善需求侧的用电习惯以及促进发电侧的技术升级等诸多目标，将极大程度实现资源优化配置，推动行业绿色可持续发展。截止 2018 年底，我国电力装机总容量 19.0 亿 kW，发电量 6.994 万亿 kW·h，均居全球之首 [8]。目前我国已经建成了全球最大规模的电力系统。

1.2 碳市场与电力市场的互动效应

我国电力行业需要加快发展以满足快速增长的电力需求，同时，来自国家的减排压力有增无减。目前我国对电力行业减排已有较为严格的标准和要求，火电机组技术水平已接近或达到国际水平，为实现未来的减排目标，要求进一步发展非化石能源发电、提高电力系统整体效率 [11]。在电力市场环境下，碳市场的实施将对环境效益、电力改革等方面产生重大影响。

1.2.1 碳市场对环境效益的影响

碳市场作为一种基于市场的减排政策工具，是应对气候变化的一项重大制度创新，由于其在成本有效性、环境有效性及政治可行性等方面的优势，近年来被越来越多的国家和地区应用于各自的减排实践中。碳定价能够减少煤炭和其他化石能源的使用，促使人们转向使用更为清洁的能源，进而研发和采用控制污染的新技术，对环境产生外部效益 [12]。

图 2 表示化石燃料使用的一个静态模型，该模型主要用于评估国内碳定价的效益，它显示了煤炭等化石燃料产品的需求和供给情况。需求曲线表示企业每消耗一单位燃料从额外单位获得的边际收益，供给曲线的高度反映了边际成本（劳动力，资本，能源的支付，以及提取、运输、加工或进口燃料的成本），X1 变为 X2 表示燃料消耗减少。在先前存在燃油费或补贴的情况下，增加了碳排放交易市场后，碳成本收费的福利效应如阴影三角形 ABC 所示，其底部宽度等于碳成本引起的燃料使用减少量，高度等于碳价，三角形面积为企业对每单位碳排放付出的代价；图中阴影梯形 BCDE 代表碳收益净成本。

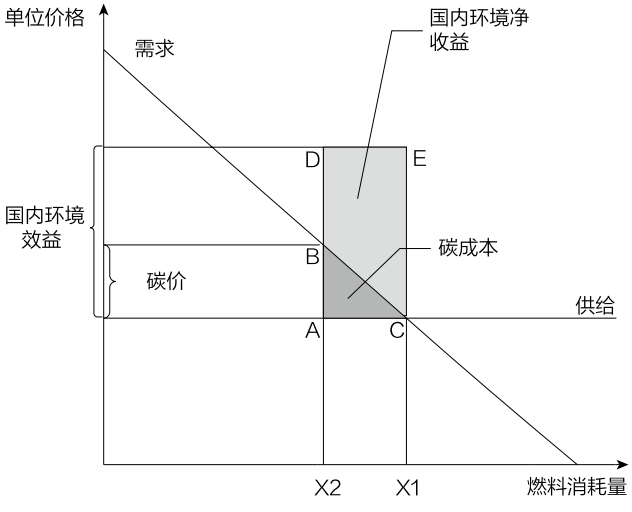


图2 燃料市场中碳排放的福利效应

碳排放交易体系作为一种经济手段，其基本特征是将二氧化碳的外部成本内部化，即生产者或消费者产生的外部费用进入它们的生产和消费决策，由它们自己承担或“内部消化”，从而弥补外部成本与社会成本的差额，以解决环境污染问题。碳排放交易体系建立后产生的配额是定

价的，通过规定碳排放总量，对每吨 CO_2 都有排放配额，使总配额等于控制总量。一方面，以拍卖方式出售碳配额能够为政府带来支持可持续发展所需要的公共资金。另一方面碳成本的存在能够间接减少温室气体排放，减少对人体健康和环境的影响。

1.2.2 改变机组调度顺序，促进电力市场优化升级

当前电力市场施行中，机组边际成本隐性决定了最低成本调度，并且边际成本是竞争市场定价的标准决定因素。每个发电厂的发电机组都有一个边际成本，发电机组成本的集合定义了产生的电从最便宜到最贵的“优先顺序”，这个优先顺序定义了短期边际成本曲线，进而调控了电力供应。同样，用户的需求对价格敏感，高价格会降低电力需求。为了实现碳市场大环境下碳的合理定价，未来碳市场施行市场参与者使用双边交易提供用电计划和其相关报价的做法，能源节约发电将优先考虑最有效的化石燃料发电机组和零排放发电机组，碳价将会改变机组出清顺序，进而改变出清边际成本[13]。

在竞争激烈的市场中，碳成本的传导在高峰时段面临完全无弹性的需求，碳价的高低影响出清顺序的变化。图 3 列出了两种具有不同类型发电技术的简单排序。技术 A 具有排放交易前边际成本低、排放系数高的特点，而技术 B 相反，即排放交易前的边际成本较高，排放系数较低；垂直虚线表示固定的需求；阴影区域代表每项技术的碳成本，这取决于它们的排放因子和实际碳价格。碳排放权交易后，调度顺序的变化和碳成本的传导取决于碳价格，如图 3a 所示，只要碳价相对较低，顺序就不会发生变化。未来碳价增长到一定价格，低排放机组碳成本较低，而高排放机组碳成本大大增高，边际出清价格增高，如图 3b 所示，其相应的出清顺序必将发生变化。

由以上分析得，碳市场对电力体制改革的意义在于让火电企业的环境外部性得以计入，促进实现火电行业的优胜劣汰，淘汰落后老旧的高排放机组，发展高效率、低排放的新型机组，为火电供给侧改革提供动力。

2 模型和方法介绍

2.1 实时发电成本构成

对于燃煤发电厂，其发电成本可分为容量成本和电量成本[15]。容量成本主要有工资财务成本、设备折旧成本等；电量成本则有运行维护与燃料成本等。其中，燃料成本是构成电量成本的主体[16]。具体关系如下：

$$C_{发电}=C_{容量}+C_{电量} \tag{1}$$

$$C_{容量}=C_{折旧}+C_{工资财务}+C_{管理} \tag{2}$$

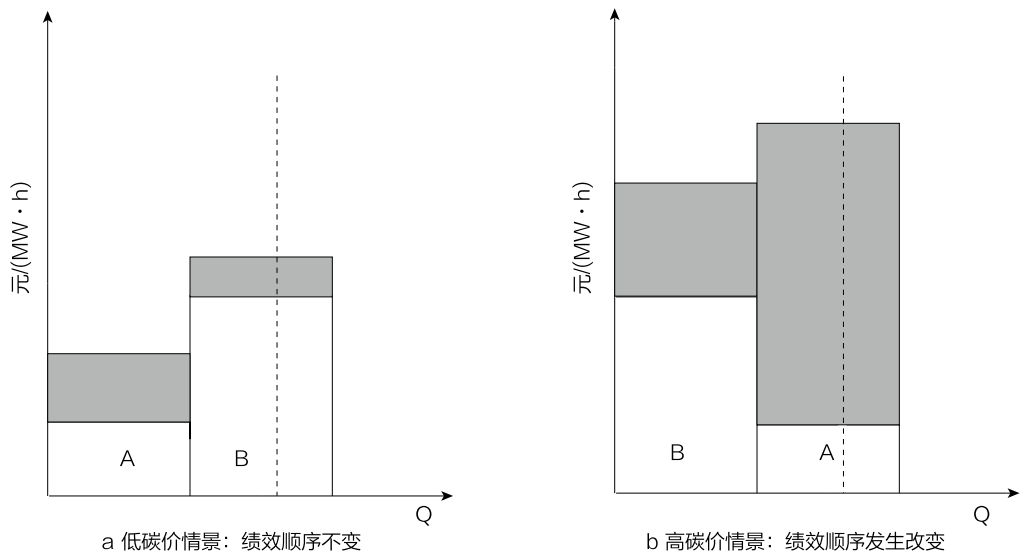
$$C_{电量}=C_{总燃料}+C_{其他可变成本} \tag{3}$$

对于火力发电厂，其容量成本 $C_{容量}$ 相对占比较低，且实际电力企业运行过程中较为固定，在竞价策略的成本构成因素中可忽略。而发电成本主要构成为电量成本，以下进行重点分析。

2.2 方法介绍

平准化发电成本（Levelized Cost of Electricity，LCOE）是指发电项目在建造运营周期内每千瓦小时（kW·h）的发电成本，是一种被广泛认可的、透明度高的发电成本计算方法[14]。对 LCOE 的定义来自于收入的净现值等于成本的净现值这一恒等式。

$$\sum_{n=1}^{N}\frac{(\mathrm{LCOE}_n)\times(E_n)}{(1+r)^n}=\sum_{n=1}^{N}\frac{\mathrm{Cost}_n}{(1+r)^n} \tag{4}$$



a 低碳价情景：绩效顺序不变　　b 高碳价情景：绩效顺序发生改变

图3　碳价形成前后电力系统中不同类型发电技术“优先次序”变化的简化示意图

公式（4）代表的意义是收入的净现值等于成本的净现值，即 LCOE 的恒等式定义，其中 $LCOE_n$ 与 E_n 的乘积是系统在生命周期内的总收益；E_n 为发电量；$Cost_n$ 为总成本；n 为电厂运营年限；r 为贴现率。将公式（4）进行恒等变形后得出公式（5）。

$$LCOE = \sum_{n=1}^{N} \frac{Cost_n}{(1+r)^n} / \sum_{n=1}^{N} \frac{E_n}{(1+r)^n} \quad (5)$$

平准化发电成本（LCOE）作为一种可衡量发电站发电寿命周期内的最终成本的分析工具，可更好地估计出每种发电技术的出清电价。

在电力市场报价中，以边际成本确定实时电价可使社会效益最大。电能成本是制定实时电价和长期电价的基础，当前采用边际成本报价的原则，即根据发电机组的电能成本从小到大的顺序进行报价，取边际机组的成本为电力交易达成成本。

引入碳排放交易体系后，在电力市场交易中，增加碳减排成本，将改变电能成本部分，即影响燃煤机组和天然气发电机组的边际报价。所以，本文将在计算发电机组电能成本的过程中重点考虑碳减排成本对电力市场的影响。定义平准化电能成本（Levelized Cost of Electricity energy，LCOEe），电能成本包括燃料成本、碳排放成本、其他可变成本（包括生产消耗性材料费、其他污染物排放成本、水费等），其中电能总成本用公式（6）表示。

$$Cost_n = C_n^{Fuel} + C_n^{CO_2} + C_n^{OV} \quad (6)$$

$$LCOEe = \frac{\sum_{n=1}^{N} \frac{C_n^{Fuel} + C_n^{CO_2} + C_n^{OV}}{(1+r)^n}}{\sum_{n=1}^{N} \frac{EP_n}{(1+r)^n}} \quad (7)$$

将公式（6）带入式（5）得到 LCOEe 的标准计算公式如式（7）所示，其中 C_n^{Fuel} 为燃料成本；$C_n^{CO_2}$ 为碳排放成本；C_n^{OV} 为其他可变成本；EP_n 为预期的发电量；n 为电厂运营年限；r 表示贴现率。

其中，C_n^{Fuel} 表示电厂每年的燃料成本；$C_n^{CO_2}$ 表示碳排放成本，包括碳减排投资、减排设备运营成本、碳价等；C_n^{OV} 表示其他可变成本，包括生产消耗性材料费、其他污染物排放成本（包括碳氧化物、氮氧化物、硫氧化物等）及水费等。

一旦引入碳市场，碳价将影响电力市场机组出清的短期边际成本，即边际排放成本在电力市场中的成本转嫁，传统发电技术成本就会增加，在经济调度的情景下传统发电技术的经济性就会降低。针对碳市场影响发电技术成本的研究，国外的学者认为重点是对碳排放进行定价，方法的基本思想是根据运营成本把每个可用的发电机组进行排序，由于碳成本是发电机组运营成本的一部分并且发电机组的碳排放各不相同，碳价格也使得低排放电源在“优先次序”中的地位进一步得到巩固，从而鼓励更低排放机组的使用。因此需要建立碳成本转嫁机制，这对未来中国碳市场启动后分析不同发电技术经济性有借鉴意义。

3 算例分析

为验证所提方法的有效性，本文选取了广东省碳市场和电力市场作为研究对象。广东省作为国家首批售电侧改革试点省之一，同时也是中国最大的省级经济体和电力消费省，其电力市场改革的推进对国家具有重要的战略意义。广东碳市场作为中国碳排放权交易体系中率先启动的试点碳市场，自 2013 年启动以来，坚持配额有偿分配和免费分配相结合的方式，建设一二级市场联动、健全成熟的试点碳市场，在四年的稳定运行中积累了有益经验，并在全国统一碳市场建设中做出有效贡献。首先，通过实地调研以及网络查询等途径，收集了广东省的相关基础数据；然后，根据广东碳市场交易现状，设置情景，并对每个情景进行模拟计算；最后，对引入碳市场的预期结果进行评价分析。

3.1 基础数据及电力市场模拟结果

3.1.1 基础数据分析

算例分析基于广东省 2016 年电力统计年鉴数据进行模拟，如表 2 至表 4 所示。

表 2 广东省电力装机构成

装机类型	装机容量 / 万 kW	综合厂用电率	负荷率上限	供电上限 / MW
生物质发电	97	5.39%	85%	777
径流式水电	912	1.31%	45%	4 050
抽水蓄能	498	1.31%	100%	4 915
核电	1 047	5.4%	87%	8 661
气电	1 643	2.02%	100%	16 097

注：1. 数据来源于 2016 年《中国电力年鉴》；2. 负荷率 = 发电机组某时期实际发电量 / 发电机组该时期满负荷发电量；3. 供电上限 = 装机容量 × 负荷率上限 ×（1– 厂用电率 %）

表 3 广东省煤电机组细分

装机类型	单机容量 /MW	机组数	综合厂用电率	负荷率上限
综合利用	300	5	6.38%	100%
热电联产	600	1	6.38%	90%
	300	20	6.38%	90%
	200	2	6.38%	90%
常规煤电	1 000	17	6.38%	100%

注：1. 数据来源于 2016 年《中国电力年鉴》；2. 负荷率 = 发电机组某时期实际发电量 / 发电机组该时期满负荷发电量

3.1.2 广东电力市场模拟结果

2019 年 1 月 29 日，发改委公布《关于规范优先发电优先购电计划管理的通知》，优先发电是实现风电、太阳能发电等清洁能源保障性收购，确保核电、大型水电等清洁能源按基荷满发和安全运行，促进调峰调频等调节性电源稳定运行的有效方式 [17]。除国家规定优先发电的机组外，电力市场

表4　广东省煤电机组在各负荷率下的平均供电煤耗

项目	机组类型	单机容量	负荷率					
			≥90%	80%～90%	70%～80%	60%～70%	50%～60%	45%～50%
供电煤耗 /[g/（kW·h）]	热电联产	600MW	–	286	290	296	305	–
		300MW	–	296	299	304	311	–
		200MW	–	307	308	312	318	–
	常规煤电	1 000MW	272	273	277	284	293	304
		600MW	289	291	295	301	310	321
		300MW	301	301	304	309	316	326

注：1. 煤耗变化参考调研数据及相关参考文献确定；2. 此表主要说明煤电机组在各负荷率下的平均供电煤耗数

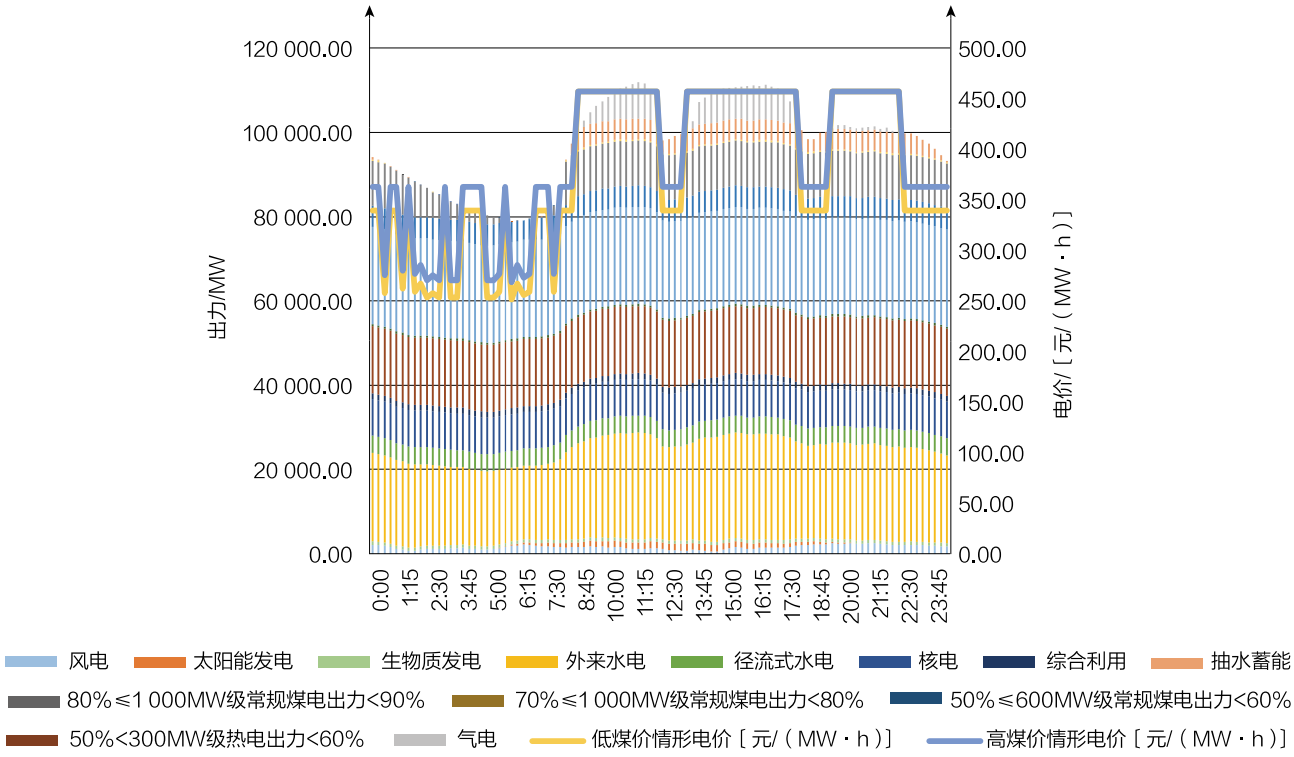


图4　广东省夏季工作日有风有光情形下电力供给曲线和出清电价

按供电边际成本递增的原则对发电机组进行经济调度，故实时电价的波动情况与电力负荷的波动情况基本保持一致。电力市场模拟显示，在广东省夏季工作日有风有光情形下，可再生能源优先发电，气电作为调峰，高效率煤电替代低效煤电，其电力供给曲线和出清电价如图 4 所示。

3.2 碳市场情景模拟及分析

根据国外碳市场经验，碳价的传导和需求反应有关，通过设置不同的情景，模拟广东碳市场碳价的传导。广东省电力行业的燃煤燃气发电机组配额采用的是“基准线法”，并按机组类型给出了容量基准线，即标杆值。对电力行业的资源综合利用发电（使用煤矸石、油页岩、水煤浆等燃料）则使用“历史法”分配配额[18]。本文在模拟广东省碳市场与电力市场耦合研究中，假设在不同负荷的情况下，包括用电高峰期（上午八点至下午八点）与用电低峰期（高峰期外的其他时间）的电价传导效应不同：低峰期的电价穿越效应保持在 60% 左右，而高峰期的电价穿越效应达到 100%，接近完全传导状态。通过设置不同的参数变化，得到不同情景下碳成本对电价的影响关系。

（1）按照电力配额试算方案，如果按照碳配额交易均价 30 元，各机组按照平均利用 4000 h 计算，改变不同的配额分配比例，包括：全部有偿分配，免费配额缺口 10%，免费配额缺口 5%，免费配额缺口 3% 的情况，则有偿分配情形下碳成本最有优势，发电成本受到影响最大，如表 5 所示。

（2）参考国内外碳市场模拟及中国现状，如果按照碳配额交易均价 30 元，有偿配额比例设定 10% 不变，假设高峰时段碳价传导率为完全 100% 传导，溢价为 0.5；低谷时段碳价传导率为 60%，无溢价。如图 5 所示，各时刻不同传导系数下的碳价对电力市场边际出清成本产生影响，高

表5 不同配额比例下的碳成本

划分基准	配额分配基准值 /［tCO_2/（MW·h）］	全部有偿分配配额，发电成本影响 /［元 /（MW·h）］	免费配额缺口 10%，发电成本影响 /［元 /（MW·h）］	免费配额缺口 5%，发电成本影响 /［元 /（MW·h）］	免费配额缺口 3%，发电成本影响 /［元 /（MW·h）］
超超临界 600MW 机组	0.827	24.80	2.50	1.20	0.50
超临界 600MW 机组	0.861	25.80	2.60	1.30	0.50
超临界 300MW 机组	0.875	26.20	2.70	1.30	0.60
亚临界 600MW 机组	0.893	26.80	2.80	1.40	0.70
亚临界 300MW 机组	0.927	27.80	3.10	1.50	0.80

峰时段碳价增加的趋势比较大，低谷时段趋势较小。

（3）当前 2019 年 2 月份广东省碳价已经突破 20 元关口[19]。根据 2018 年碳价调查碳价和预期，模拟未来广东碳价分别为 20、25、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90 元的情景，假设有偿配额比例设定 10% 不变；高峰时段碳价传导率为完全 100% 传导，溢价为 0.5；低谷时段碳价传导率为 60%，无溢价。

如图 6 所示，随着碳排放价格的不断增加，电能成本根据碳价的增加呈直线增长的趋势，即碳排放价格升高将引起燃煤、燃气机组发电成本的增加和利润的减少。所以火电机组均倾向于少发电，市场供给随之减少，从而抬高市场价格。

（4）预期未来碳价增长到一定价格，不同类型机组的出清顺序将会发生变化。以广东省为例，图 7 中柱形图展示



图5 不同时刻碳价作用下出清机组电能成本变化

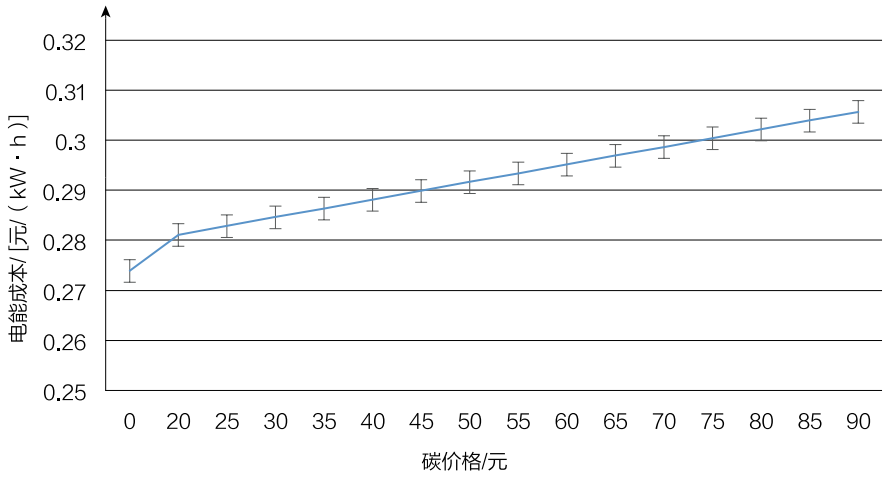


图6 煤电机组能量市场价格随碳排放价格变化的曲线

的是在电力系统中某一小时内不同类型发电机组的“优先次序”。可再生能源没有燃料成本，因此可再生能源发电通常会排序第一。以煤炭或者天然气作为燃料的发电机组能效也千差万别，因此运营成本也不一样，“优先次序”自然也不一样。图 8 中的柱形图展示了引入高碳价后所带来的改变。

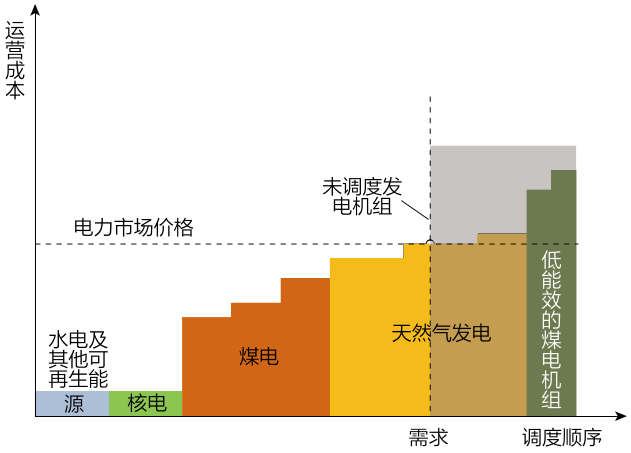


图 7　广东省碳价形成前电力系统中不同类型发电技术“优先次序”的简化示意

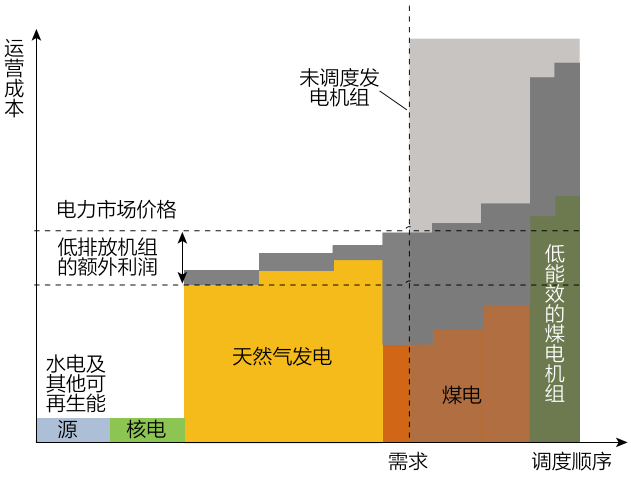


图 8　广东省碳价形成后电力系统中不同类型发电技术“优先次序”的简化示意

在广东省电力现货市场中，碳价的出现相当于提高了以化石为燃料的发电机组的运营成本，核电以及可再生能源没有这部分成本，而天然气的碳排放成本，通常会低于煤电。因此，碳价和经济调度的相互作用一般都会使低排放发电机组获得更高收益，碳市场的施行将鼓励投资者们更多地关注低排放发电装机。另外，也能够促进现有减排技术的精进及新技术的开发。

4　结论与政策建议

综上分析，碳市场和电力市场存在相互制约的关系。对碳市场而言，碳排放总量增加，碳交易中碳价上升会反作用于电力市场的火电机组，提高火电机组发电成本，抑制火电机组的市场竞争力，促使新能源发电比重上升；未来随着电力市场化的推进和碳市场的启动，新的环境下碳价等因素会影响不同发电技术的成本，进而影响其经济性，是未来评价不同发电技术经济性时关注的重点。碳市场将碳排放外部成本内部化，其在提高化石能源成本的同时，也为非化石能源发电提供额外的经济激励和强大的价格信号，能够将资金从化石燃料引至更清洁、更高效的能源使用方式上。随着电力改革的推进和电力市场的建立，碳市场与电力市场的结合可以在助力电源结构调整，减少碳排放领域做出更大的贡献[20]。通过分析碳市场和电力市场的特点及耦合机制，为我国碳市场和电力市场建设提供了相关经验。

（1）继续完善碳市场建设。碳市场建设是一项重大的制度创新，也是一项复杂的系统工程，需要有效的管理机制、完善的法规制度、可靠的交易系统、真实的排放数据、扎实的能力建设。政府相关部门应持续优化碳市场制度设计，继续完善配额分配政策，即适时引入有偿分配，并逐步提高比例；应出台有关碳排放权交易市场的管理条例、指导意见等相关制度，包括总量控制、碳价调控等具体措施；应以碳排放总量控制为基础，建立新阶段温室气体减排制度，完善相应的测量报告核查体系，促进产业、能源、交通、用地结构的绿色转型；应充分调动部门、地方、企业和社会积极性，共同推进和完善碳市场建设，逐步向碳排放的绝对量减排过渡，寻找新思路和替代方案，为实现 2030 年甚至更长远的减碳目标打好基础。

（2）考虑机组边际成本，逐步引入竞价机制，促进可再生能源的消纳。目前，我国尚未建立起电力市场竞价机制，仅是引入售电侧改革，逐步过渡到电力市场还需做出诸多努力。电力市场中，可再生能源发电具有边际成本低的优势，在按边际成本递增原则对发电机组进行经济调度时，可以被优先调度和消纳，将有利于解决我国现阶段尚比较严重的“弃风弃光”问题，提高可再生能源发电的利用水平，改善可再生能源发电的经济性。为建立完善的电力市场，通过有序放开发用电计划，赋予供需两端自主选择权，实现多方直接交易，使市场出清电价合理化，在为用户提供更加经济、优质的电力保障的同时，也将提高发电侧资源利用效率。

（3）理清碳市场与电力市场的关系，推动两者协调发展。电源结构重组下，电力市场一方面能够缓解碳市场的减排压力，另一方面可能会抑制碳市场的活跃度；碳市场的配额拍卖机制和能效管理投资增强了清洁能源在电力市场中竞争力，但碳市场可能会迫使高排放燃煤电厂外迁，增大电力进口比例，存在碳泄漏危险；我国电力市场建设中计划与市场将在较长时间内并存，碳市场形成的碳成本除部分能在电力市场中传导外，还需同步考虑基于计划发用电量的碳价联动机制。全国碳市场建设可与电力能源市场协同推进，以此为基础，“十四五”时期可设立碳排放总量控制制度，取代现有的能源消费总量控制指标。以电力

市场和碳市场两市场机制为主要手段，共同促进电力行业向更加清洁高效和低碳的方向发展。

参考文献

[1] HINTERMANN B. Pass-through of CO_2 emission costs to hourly electricity prices in Germany[J]. Journal of the association of environmental and resource economists, 2016, 3(4): 857-891.

[2] FABRA N, REGUANT M. Pass-through of emissions costs in electricity markets[J]. American economic review, 2014, 104(9): 2872-2899.

[3] CHERNYAVS'KA L, GULLÌ F. Marginal CO_2 cost pass-through under imperfect competition in power markets[J]. Ecological economics, 2008, 68(1-2): 408-421.

[4] SIJM J, NEUHOFF K, CHEN Y. CO_2 cost pass-through and windfall profits in the power sector[J]. Climate policy, 2006, 6(1): 49-72.

[5] ZACHMANN G, VON HIRSCHHAUSEN C. First evidence of asymmetric cost pass-through of EU emissions allowances: examining wholesale electricity prices in Germany[J]. Economics letters, 2008, 99(3): 465-469.

[6] 袁家海 , 吴梦雅 . 中国煤电企业环境压力测试 [J]. 中国环境管理 , 2018, 10(6): 43-54.

[7] 袁家海 , 郭宇 . 中国大型发电上市公司 ESG 评价体系开发与分值研究 [J]. 中国环境管理 , 2018, 10(5): 50-58.

[8] 美国环保协会 . 碳市场与电力市场耦合共推电力行业低碳发展 [EB/OL]. (2019-04-11). http://greenfinance.xinhua08.com/a/20190411/1815216.shtml.

[9] 国家发展改革委 . 全国碳排放权交易市场建设方案 (发电行业)[EB/OL]. (2017-12-18). http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/gfxwj/201712/W020171220566893899825.pdf.

[10] 中华人民共和国国家发展和改革委员会 , 经济体制综合改革司 . 中共中央 国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见 (中发 [2015]9 号)[EB/OL]. (2015-03-15). http://tgs.ndrc.gov.cn/zywj/201601/t20160129_773852.html.

[11] 碳交易网 . 碳市场给我国电力行业带来的挑战有哪些 ?[EB/OL]. (2014-12-21). http://www.tanpaifang.com/tanguwen/2014/1221/41047.html.

[12] CRAMTON P, MACKEY D J C, OCKENFELS A, et al. Global Carbon Pricing: The Path to Climate Cooperation[M]. Cambridge: The MIT Press, 2017.

[13] SIJM J, CHEN Y, HOBBS B F. The impact of power market structure on CO_2 cost pass-through to electricity prices under quantity competition–A theoretical approach[J]. Energy economics, 2012, 34(4): 1143-1152.

[14] BRANKER K, PATHAK M J M, PEARCE J M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2011, 15(9): 4470-4482.

[15] 马超群 , 莫艳梅 . 发电企业的竞价博弈分析 [J]. 统计与决策 , 2008(15): 177-179.

[16] 李林 , 周大为 . 面向电力市场竞价的燃煤电厂实时发电成本计算模型 [J]. 湖北电力 , 2017, 41(12): 37-40, 44-44.

[17] 国家发改委 , 国家能源局 . 国家发改革委、能源局关于 : 规范优先发电优先购电计划管理的通知 [EB/OL]. (2019-01-29). http://www.sohu.com/a/292129740_100089986.

[18] 碳交易网 . 广东碳市场电力行业配额分配方法 [EB/OL]. (2019-03-19). http://www.tanpaifang.com/tanzhibiao/201903/1963307_7.html.

[19] 广碳所 . 知否知否 , 广东碳价已突破 20 元关口 [EB/OL]. (2019-02-22). http://www.tanjiaoyi.com/article-26043-1.html?from=app.

[20] 美国环保协会 . 建言全国碳市场 (一): RGGI 的借鉴意义和启示 [EB/OL]. (2017-12-20). http://www.sohu.com/a/211684932_289755.

The Coupling Study on Carbon Market and Power Market

ZHAO Changhong[1], ZHANG Mingming[1], WU Jianjun[2], YUAN Jiahai[1]*

(1. Beijing Key Laboratory of New Energy and Low-Carbon Development, School of Economic and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Institute of urban environment, Chinese academy of sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: Low carbonization and cleanliness are the future direction of China's power industry. With the launch of the carbon market that taking the electricity market as pilot, these two markets face coordination and integration issues. In order to study the coupling relationship between carbon market and electricity market, this paper analyzes the cost-reduction effect of carbon market mechanism and the interaction effect with electricity market reform; then conducts the Levelized Cost of Electricity-energy (LCOEe) model to evaluate electricity market cost considering carbon price; finally, taking Guangdong province as an example, the carbon price of Guangdong carbon market is transmitted to the setting scenario of electricity price and simulated analysis is carried out. The results show that there is a mutually restrictive relationship between the carbon market and the electricity market. The internalization of carbon external costs affects the electricity market clearing price. In addition, the electricity market can alleviate the carbon market emission reduction pressure and inhibit the carbon market activity. The coupling study on carbon market and power market plays an important role in optimizing power supply structure and promoting the development of new energy market, which can provide suggestions for the synergic development of China's carbon market and power market.

Keywords: carbon market; power market; LCOEe; carbon market simulation