

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2022.06.006

风电与火电的竞争性上网定价优化^①

——碳约束政策的影响研究

谢家平¹, 魏礼红^{2*}, 张为四³, 朱卫君¹, 孔令丞⁴

(1. 上海财经大学商学院, 上海 200433; 2. 上海对外经贸大学国际经贸学院, 上海 201620;
3. 上海海事大学物流科学与工程研究院, 上海 201306; 4. 华东理工大学商学院, 上海 200237)

摘要: 电力行业的高排放问题加速了碳约束时代的到来. 本研究考虑不同的碳约束政策, 针对由发电商-售电商组成的电力供应链, 建构成本共担契约, 研究碳约束下电力竞价与上网策略问题, 并为碳排放规制政策在电力市场的推行提出建议. 研究表明: 1) 在竞争性的供电市场中解决风电上网难题, 不但需平衡风电间歇性, 而且需关注火电发电成本; 2) 在激进型的碳配额政策或碳税政策下, 成本共担契约的引入既能促进风电上网, 亦能实现电力供应链利润的帕累托改进; 3) 不同碳约束环境对参与主体的影响取决于税率以及碳配额的大小. 碳配额与碳交易政策虽对售电商没有益处, 但在适当的碳配额下, 却是促进整个电力供应链发展的最优政策, 此时, 政府减少碳排放的有利举措为缩减碳配额或提高碳价, 本研究揭示了政府策略选择应遵循的临界点.

关键词: 上网电价; 竞价上网; 碳约束政策; 成本共担; 风电

中图分类号: F274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2022)06-0100-27

0 引言

随着全球气候变暖的加剧, 控制各行业的碳排放成为各国的重点任务. 据国际能源署发布的报告^②, 全球二氧化碳排放量达到 331 亿吨的历史新高, 其中全球电力业的二氧化碳排放量达到 130 亿吨, 占总排放量的 39%. 报告显示, 石油和煤炭发电的排放量分别为 600 克/千瓦时和 845 克/千瓦时~1020 克/千瓦时, 因而是造成电力行业碳排放强度之高的罪魁祸首. 而中国电力结构中火电占比较高, 2019 年火电发电量占全国

总发电量的 69.57%^③, 因而电力行业的高排放问题在我国尤为突出. 为解决这一问题, 政府正积极推进碳配额与碳交易政策的实施, 加速全社会进入碳约束时代, 并明确指出在发电行业率先启动全国碳排放交易体系^④. 随后, 地方政府采取措施响应该方案, 如《上海市碳排放交易纳入配额管理的单位名单(2018 版)》^⑤列出了 31 家电力行业的企业. 由此, 碳配额与碳交易政策在电力行业中被逐渐推行.

实践中, 碳配额与碳交易政策是一种配额交

① 收稿日期: 2019-12-21; 修订日期: 2021-07-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72073044); 国家社会科学基金资助项目(20AJY008); 上海财经大学研究生创新基金资助项目(CXJJ-2018-339)

通讯作者: 魏礼红(1993—), 女, 河南南阳人, 博士生. Email: lihongweineo@163.com

② 国际能源署, 2018, 《2018 全球能源与二氧化碳现状报告》. <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>

③ 国家统计局, 2019, 能源生产总量. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A070B&sj=2019>

④ 国家发展和改革委员会, 2017, 《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201712/t20171220_960930.html

⑤ 上海市发展和改革委员会, 2018, 《上海市碳排放交易纳入配额管理的单位名单(2018 版)》. <http://www.shanghai.gov.cn/nw2/nw2314/nw2319/nw12344/u26aw57582.html>

易政策,政府可将碳排放权分配至碳排放源企业,并允许其在碳交易市场上买卖碳排放权。全国碳交易市场的建立是保证该项政策全面普及的前提,中国已建立7个区域碳排放权交易市场。随着中国碳交易市场的深化完善,碳交易市场以外的企业亦逐渐被政府纳入减排管控范畴并征收碳税。相比碳配额与碳交易政策,碳税政策则是一种直接的碳约束政策;政府对碳排放源企业按照碳排放量收取税费。实践表明,碳配额与碳交易政策、碳税政策在控制碳排放上发挥重要作用,而在碳交易市场尚不完善、交易机制尚不健全背景下,碳配额与碳税政策的结合亦成为一种降低碳排放的有效途径。在各级政府监管与治理下,电力行业的碳排放问题有所缓解。例如,相较于2015年,2018年全国火电单位发电量二氧化碳排放约为841克/千瓦时,下降19.4%左右,电力行业碳排放减少约136.8亿吨,整个电力行业的碳排放强度呈现下降趋势^⑥。尽管2018年中国电力业在碳减排方面已经取得了一定成效,但为提升生态效益,电力业仍需持续减排。为此,本研究将碳约束政策纳入考虑,关注碳约束政策下电力的上网消纳问题。

在垂直垄断经营的电力系统中,成本加成定价一直是电力系统中常用的定价方式。随着市场的发展与成熟,电力供应链逐渐演化出竞争态势,并对政策风向产生同步影响;5号文侧重供给侧改革,推行以价格竞争上网;9号文侧重在需求侧改革,提倡发展发电、输电、配电、售电分离的市场化竞争模式,从根本上改变原指令性计划体制和政企不分、厂网不分等现象。在发电端,可再生能源电力(如风电)与传统能源电力(如火电)逐渐形成竞争局面,初步形成电力市场主体多元化的竞争格局。例如国家能源局要求内蒙古自治区将可再生能源电价作为主要竞争条件,合理进行电源有效配置。而在竞争环境中,两类电力如何进行价格竞争值得关注;其中,如何平抑风电间歇性对其上网的抑制尤为瞩目。据《中国电力行业年度

发展报告2019》,风电间歇性问题已致使风电投资连续三年下降,其中,2018年风电投资较上年下降5.2%。此外,电力行业的弃风问题一直是阻碍风电发展的瓶颈,2018年全国平均弃风率为7%。虽然近几年弃风问题在一定程度上得到改善,但这种长期问题依然存在并亟待解决。风电优先上网政策^①要求低边际发电成本的可再生能源发电机组电量优先上网,在这一配电顺序下,更为稳定的传统能源发电机组被视为后备机组,用于满足市场的剩余需求。然而,受制于风电间歇性,在实际的发电市场中,稳定性较高的火电更受电网以及售电商的青睐,而弃风问题的存在进一步说明风电优先上网消纳原则未被完全遵循。为探索促进风电投资与上网消纳的策略,政府部门一直努力尝试。2018年国家能源局华东监管局在征求意见^②中主张积极建立电力调峰辅助服务分担共享新机制,而当前的电力辅助服务市场也正在努力建立竞争有序的辅助服务市场共享与分担机制^③。由此,分担机制在电力系统的运营中被尝试引入。本研究据此引入成本共担契约,由风电商与售电商共同承担紧急购电成本,并探索该政策的可行性与有效性,进而促进风电上网消纳与新能源产业的健康发展。

在供应链管理中,缓解供应间歇性至关重要,该问题一直饱受学者关注。现有文献聚焦于研究垄断供应商的可靠性问题^[2,3],竞争性供应商的供应风险问题^[4,5],以及供应竞争性零售商的风险问题^[6]等。但这部分研究多忽略供应商的生产约束,仅部分文献研究资金约束或容量约束^[4,5]对企业运营的影响,对碳排放约束的研究匮乏。而现有考察碳约束政策的研究则鲜少考虑供给中断问题,部分文献关注企业碳排放权的有效配置^[7,8],更多的文献则聚焦碳配额与碳交易政策或者碳税政策对企业或供应链运营的影响。其中,涉及碳配额与碳交易政策的研究关注企业碳减排投资决策^[9]、生产决策^[10,11]和定价决策^[12]等。

⑥ 中国电力企业联合会,2019,《中国电力行业年度发展报告2019》。https://www.ccec.org.cn/detail/index.html? 1-163895

⑦ 国家能源局华东监管局,2018,《安徽电力调峰辅助服务市场运营规则(试行)》。http://hdj.nea.gov.cn/load.loadPage.d?newsid=1481288132&page=detail_index.xml&siteCode=hddjwucm&urlChannelId=-123&urlMenuId=\$channel.channel.id

⑧ 国家能源局,2018,《电力辅助服务市场建设加速》。http://www.nea.gov.cn/2018-05/23/c_137200258.htm

Zhu 等^[13]考虑了碳配额与碳交易政策对垄断性制造商生产量与减排投资的影响。周远祺^[14]等则运用实物期权法得到了企业绿色转型技术的最优投资规律和选择路线,并考察了碳交易价格的影响。而 Sunar 和 Plambeck^[15]则在零售端引入竞争,研究了碳税政策对整个供应链碳排放、参与者利润及社会福利的影响。更多的文献集中于碳税政策与其他政策的效果比较,且现有文献多聚焦于单个企业的投资决策(技术投资、减排投资)或生产决策^[16, 17],少数学者将碳规制政策研究由单个企业拓展至多个竞争企业^[18],但在供应链背景下研究政策效果的文献较为匮乏。本研究与 Xu 等^[19]的研究最为接近,研究碳配额与碳交易政策对供应链的订单与价格决策的影响,但 Xu 等^[19]重点关注一对一供应链中碳排放权在两种产品之间的分配。本研究进行深化拓展如下:1)考虑风电商与火电商的上网价格竞争,探究供应端具有竞争态势的企业订单与价格决策;2)考虑碳配额与碳交易政策在内的3种碳约束政策,分别引入成本共担契约并进行政策效果比较。

此外,电力系统的高排放问题使得低碳电力的研究也较为丰富,主要集中在以下3个方面:一是发电商碳减排投资的研究,其中运用实物期权方法研究发电商的减排投资策略最为广泛^[20, 21];二是可再生能源电力的相关研究,如投资决策研究^[22, 23]、间歇性对电价的影响研究^[24]、补贴政策比较研究^[25]等;三是研究碳政策对电力系统的规制,如龙勇等^[26]构建了双层规划模型,并研究了碳约束政策下微电网绿色能源发电对电力系统运营的影响。廖诺等^[27]考察碳配额与碳交易政策对电煤供应链及其碳排放量的影响,Aflaki 和 Netessine^[1]在垂直整合市场、竞争市场、部分竞争市场研究了碳税对风电商成本和发电容量占比的影响。与上述研究相区别,本研究重点关注异质发电商(风电商、火电商)的价格竞争,并研究不同碳约束政策对电力系统运营的影响。

通过文献梳理发现,目前运营管理领域对碳约束政策下单一企业的决策研究较为广泛,但以供应链为背景研究不同碳约束政策效果的文献较少,特别是在供需不确定的供应链中则更为缺乏。同时现有关于低碳电力的研究较少关注稳定性、

低碳性均异质的发电商竞争的电力结构,而厘清异质发电商之间如何竞争以及各自的最优策略在中国推进电力市场化改革进程中至关重要。为此,本研究借助报童模型与博弈理论,探究了碳约束环境下异质发电商的价格与产量竞争问题。本研究创新性地在竞争型供应链结构中考察常见的碳约束政策,通过政策效果的比较,为我国未来的电力产业布局和绿色低碳可持续发展提供参考依据。并根据现有实践,引入成本共担契约,为我国电力市场化改革提供一定的指导,特别是为未来进一步解决风电上网难的问题提出了建议,以促进节能高效环保机组得到充分利用。本研究的研究结论如下:第一,在供需随机的电力供应链中,参与主体在不同碳政策下的受益差别较大,但就供应链全局最优而言,碳配额与碳交易政策更值得推广;第二,电力市场化改革背景下稳定火电商与不稳定风电商的竞争中,只有在风电与火电的价格相同时,100%的火电采购才被售电商偏好,而其他情形下,售电商更偏好风电上网,甚至会选择纯风电采购;第三,售电商与风电商合理协调分担比例可使整个电力系统实现帕累托改进,且风电商成本共担比例的增加能够促进风电消纳量,这表明成本共担契约是一种值得在电力竞价上网实践中推行的举措。

1 模型描述与参数符号

风电作为常用的新能源电力,其主要特点在于清洁性与间歇性。在清洁性的刻画上,本研究将风电商的碳排放强度设为0,而在风力发电间歇性的刻画上,本研究借鉴 K6k 等^[28]将电能生产函数描述为容量投资 K 的函数 uK ,其中, u 刻画了风力转换效率,具有 0-1 二项分布的特征^[1, 28]: $u = [1, \rho; 0, 1 - \rho]$ 。本研究关注发电商的定价策略而非投资决策,因而容量投资 K 是外生参数,且假定风电商稳定供给时产能充足。与之相区分,火电商发电技术较为稳定,但传统燃料(煤炭、石油等)具有较高碳排放量,因而将火电商的单位碳排放强度记为 e_f 。

在用户需求端,电力需求 X 的累积分布函数记为 $F(x)$, 概率密度函数为 $f(x)$, 且需求的随

机分布具有递增的失效率 $h(x)$ 。在风电商参与的电力市场结构中,电力调度中心可助力实现电力系统平衡,通过合理调度电源组合以推动源网荷储与需求侧快速响应。当供需紧张时,电力调度中心统一向辅助服务市场调度,将辅助服务市场的电力交易价格记为 w_e 。这部分电力缺口的责任主体为售电商与风电商:一则售电商低估了市场需求,对发电商的总购电量不足;二则不稳定的风电商实际供电不足。本研究据此设计并引入成本共担契约,以建立辅助服务分担共享新机制,由风电商与售电商共同承担电力调度成本,并将风电商的成本分担比例记为 λ ,且 $\lambda \in [0,1]$ 。本研

究使用的参数总结见表 1。

电力系统的动态博弈分两阶段进行:第一阶段,风电商与受政策管制的火电商同时确定上网价格,分别记为 w_w, w_f ;第二阶段,售电商进行购电决策 q_w, q_f ,并以 p 的电力零售价格直接与用户交易。

本研究分别考察 4 种碳规制环境下发电商的价格与上网策略:无碳约束政策(N),碳配额与碳交易政策(C),碳税政策(T),以及碳配额与碳税组合政策(CT)。本研究首先在第 2 部分分析无碳约束环境下电力系统的最优运营决策。

表 1 变量与参数注释

Table 1 Notations of variables and parameters

| 模型参数 | | | |
|-----------|-------------|--------|----------------------------------|
| 符号 | 含义 | 符号 | 含义 |
| p | 电力销售价格 | t | 单位碳税 |
| c | 单位火电生产成本 | s | 单位碳配额售出价格 |
| w_e | 单位调峰调度价格 | b | 单位碳配额购入价格 |
| λ | 风电商的成本分担比例 | L | 火电商的碳配额 |
| u | 风电商的投资发电密度 | K | 风电商的容量投资 |
| e_f | 火电商的单位碳排放强度 | X | 用户需求 |
| Q | 总购电量 | ρ | 风电的间歇性参数 |
| ECE | 期望碳排放量 | k | 成本比值 ($k = (c + s e_f) / w_e$) |
| Π | 利润 | C | 总成本 |
| 上下标 | | | |
| N | 无碳约束政策 | w | 风电商 |
| C | 碳配额与碳交易政策 | f | 火电商 |
| T | 碳税政策 | g | 售电商 |
| CT | 碳配额与碳税组合政策 | * | 最优(反应)决策 |
| 决策变量 | | | |
| w_w | 风电上网价格 | q_w | 风电购买量 |
| w_f | 火电上网价格 | q_f | 火电购买量 |

2 无碳约束下发电商与售电商的契约模型

当碳约束政策未在电力行业完全普及或者约束无效时,火电商的上网电价决策仅需考虑发电端市场的竞争态势。售电商则依据发电商的上网电价 w_w^N, w_f^N 分别与风电商、火电商进行市场交易,售电商的购电决策问题可表示为

$$\min E[C_g^N(q_w^N, q_f^N)] = E\{w_w^N \min(q_w^N, uK) + w_f^N q_f^N + (1 - \lambda) w_e [X - \min(q_w^N, uK) - q_f^N]^+\} \quad (1)$$

当售电价格外生时,售电商只需最小化购电成本。式(1)中前两项分别为风电的实际购买成本、火电的实际购买成本;其中, $\min(q_w^N, uK)$ 代表风电上网量, q_f^N 代表火电上网量,亦是售电商的火电购买量。最后一项则是售电商分担的电力调度成本,这部分成本主要与调度中心向辅助服务市场紧急购买的电量有关^[29]。

风力发电项目因未消耗燃料,其发电成本可忽略不计,主要成本类别为投资成本(如海上风电项目的投资成本大约占全部成本的 60%^[30]),以及其他的使用与维护成本,然而这部分成本为

沉没成本,并对风电商的投资决策产生关键影响,对本研究的研究内容——风电上网价格与上网量——并无影响,因而本研究在模型中可将这一部分成本忽略,并设风电商发电运营成本为 $0^{[1,28]}$. 在成本共担契约下,风电商分担部分电力调度成本,其最优决策问题可表示为

$$\max E[\Pi_w^N(w_w^N)] = E\{w_w^N \min(q_w^N, uK) - \lambda w_e [X - \min(q_w^N, uK) - q_f^N]^+\} \quad (2)$$

$$\begin{cases} (1 - \rho)\bar{F}(q_f^{N*}) + \rho\bar{F}(Q^{N*}) - [(1 - \rho)f(q_f^{N*}) + \rho f(Q^{N*})] q_f^{N*} = \frac{c}{(1 - \lambda) w_e} \\ \bar{F}(Q^{N*}) = (1 - \lambda)f(Q^{N*}) q_w^{N*} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} w_f^{N*} = (1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^{N*}) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(Q^{N*}) \\ w_w^{N*} = (1 - \lambda) w_e \bar{F}(Q^{N*}) \end{cases} \quad (5)$$

在竞争的电力批发侧市场中,当 $w_f^{N*} \neq w_w^{N*}$ 时,售电商的购电模式只有两种:100%风电采购与混合电力采购. 而100%火电采购并不被售电商所偏好,其原因在于,该模式下火电的高上网价格会导致售电商承担更高的购电成本,因而售电商更偏好风电机组的参与以降低发电侧电能量价格. 定理1也表明在未来的电力系统中,发电端的市场化推进可以为风电商发展提供更多机遇.

3 碳约束下发电商与售电商的契约模型

3.1 碳配额与碳交易政策下发电商与售电商的策略分析

在碳配额与碳交易(C)政策下,火电商具有部分免费排放的权利,该免费排放额又称为碳配额,由政府根据企业的历史排放量事先分配给发电企业. 设火电商的碳配额为 L ,而超出或低于该配额的碳排放权,火电商可在碳交易市场交易,其中碳排放权的售出价格设为 s ,而购进价格则被记为 $b^{[19,31]}$. 本研究在第5节将考虑碳价的波动性与内生性,进一步分析模型结果的稳定性.

在碳配额与碳交易政策下,为保证火电商愿意自主发电,设 $0 < s \leq b$. 火电商上网电价决策问题可表示为

与风电商不同,火电商对传统能源的使用使得其发电成本明显较高. 将火电商的单位发电生产成本记为 c ,则火电商的上网电价决策为

$$\max \Pi_f^N(w_f^N) = w_f^N q_f^N - c q_f^N \quad (3)$$

本研究采用逆向求解法求解风电商与火电商的最优决策,可得如下定理1(证明见附录1).

定理1 无碳排放限制政策下发电商(售电商)的最优电价(购电量) $w_w^{N*}, w_f^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*})$ 满足的条件为

$$\max \Pi_f^C(w_f^C) = w_f^C q_f^C - c q_f^C + s(L - e_f q_f^C)^+ - b(e_f q_f^C - L)^+ \quad (6)$$

在该政策下,售电商与风电商的利润函数未受影响,因而售电商的购电量与上网电价之间的关系形式仍为式(5),为方便求解,本研究将该函数关系代入发电商的利润函数,并将火电商的决策变量替换为 q_f^C ,进一步分析如下.

设 $\Pi_f^{Cs}(q_f^C)$ 为火电商碳配额较为充裕时的最大利润,其函数表达式可表示如下

$$\begin{aligned} \Pi_f^{Cs}(q_f^C) = \max \{ & [(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^C) + \\ & \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^C + q_f^C) - \\ & c - s e_f] q_f^C + sL \} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq q_f^C \leq \frac{L}{e_f} \quad (8)$$

设 $\Pi_f^{Cb}(q_f^C)$ 为火电商碳配额不足时的最大利润,其函数表达式可表示如下

$$\begin{aligned} \Pi_f^{Cb}(q_f^C) = \max \{ & [(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^C) + \\ & \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^C + q_f^C) - \\ & c - b e_f] q_f^C + bL \} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{s. t. } q_f^C \geq \frac{L}{e_f} \quad (10)$$

因而火电商的优化问题可重新表述为

$$\max \Pi_f^C(q_f^C) = \max \Pi_f^{Cs}(q_f^C), \Pi_f^{Cb}(q_f^C) \quad (11)$$

将售电商的最优购电量按照碳配额大小进行划分,得到定理2(证明见附录2).

定理2 售电商对风电的购买量为 $q_w^{C*} =$

$(q_w^{C*1}, q_w^{C*2}, q_w^{C*3})$, 满足式 $\bar{F}(q_w^{C*} + q_f^{C*}) = (1 - \lambda)f(q_w^{C*} + q_f^{C*}) q_w^{C*}$. 售电商对火电的购买量与碳配额直接相关, 且碳配额存在两个分界点 \underline{L} , \bar{L} ($\underline{L} = e_f q_f^{C*3}$, $\bar{L} = e_f q_f^{C*1}$).

1) 当政府分配的碳配额充裕时 ($L \geq \bar{L}$), 火电商进行碳排放权售出交易, 且火电上网量为 $q_f^{C*1} = \max[0, q_f^{s*}]$, q_f^{s*} 满足式 $(1 - \rho)[\bar{F}(q_f^{s*}) - f(q_f^{s*})] + \rho f(q_w^{C*1} + q_f^{s*})[(1 - \lambda)q_w^{C*1} - q_f^{s*}] = \frac{c + s e_f}{(1 - \lambda)w_e}$; 风电上网量为 q_w^{C*1} .

2) 当政府分配的碳配额适中时 ($\underline{L} \leq L < \bar{L}$), 火电上网量为 $q_f^{C*2} = \frac{L}{e_f}$; 风电上网量为 q_w^{C*2} .

3) 当政府分配的碳配额较低时 ($0 \leq L < \underline{L}$), 火电商进行碳排放权购进交易, 且火电上网量为 $q_f^{C*3} = \max[0, q_f^{b*}]$, q_f^{b*} 满足式 $(1 - \rho)[\bar{F}(q_f^{b*}) - f(q_f^{b*})] + \rho f(q_w^{C*3} + q_f^{b*})[(1 - \lambda)q_w^{C*3} - q_f^{b*}] = \frac{c + b e_f}{(1 - \lambda)w_e}$; 风电上网量为 q_w^{C*3} .

在碳配额与碳交易政策下, s 亦可理解为火电商将碳配额用作生产的单位机会成本. 碳配额的上界 \bar{L} 是火电商进行火电生产的边际收益等于出售碳排放权的边际成本 $c + s e_f$ 的碳排放量, 而下界 \underline{L} 则是进行火电生产的边际收益等于购进碳排放权的边际成本 $c + b e_f$ 的碳排放量. 当碳配额高于上界时, 火电商在碳交易市场上出售碳排放权, 出售量为 $L - \bar{L}$, 而在碳配额低于下界时, 火电商购进碳排放权, 购进量为 $\underline{L} - L$, 而在碳配额在两个分界值之间时, 火电商将全部碳配额用于电力生产, 此时碳交易机制并未发挥作用, 火电上网量与碳配额正相关, 因而在该范围内碳配额政策对整个电力系统的影响最为显著.

性质 1 随着碳配额政策的紧缩, 火电上网量与售电商的总购电量受到抑制, 而售电商的风电购买行为得到激励, 即 $q_f^{C*1} \geq q_f^{C*2} \geq q_f^{C*3}$, $Q^{C*1} \geq Q^{C*2} \geq Q^{C*3}$, $q_w^{C*1} \leq q_w^{C*2} \leq q_w^{C*3}$ (证明

$$\begin{cases} (1 - \rho)\bar{F}(q_f^{T*}) + \rho\bar{F}(Q^{T*}) - [(1 - \rho)f(q_f^{T*}) + \rho f(Q^{T*})] q_f^{T*} = \frac{c + t e_f}{(1 - \lambda)w_e} \\ \bar{F}(Q^{T*}) = (1 - \lambda)f(Q^{T*}) q_w^{T*} \end{cases} \quad (13)$$

见附录 3).

根据性质 1, 在促进风电上网的过程中, 政府加强对火电商的碳约束会有效降低火电上网, 促使售电商对风电的接纳. 但由于售电商对发电商总的电力购买量降低, 紧缩性的碳配额与碳交易政策亦增加了售电商对调峰辅助服务的依赖.

Du 等^[11]的研究假定企业的碳配额售出价格等于碳配额购入价格, 一定程度上对模型作了简化处理, 并由此认为碳配额对企业最优生产决策无影响. 与此观点不同, 性质 1 说明碳配额对企业的生产量具有直接影响, 该结果与 Xu 等^[19]达成了共识. 然而 Xu 等^[19]的研究结论表明, 在生产企业不存在竞争时, 即使企业生产的产品本身具有竞争性, 碳配额的增加也未必会抑制产品的生产, 更多的是对产品生产的促进作用. 根据本研究的研究, 在生产企业存在竞争时, 碳配额的增加必然会抑制竞争产品(风电)的生产.

性质 2 紧缩性的碳配额政策同时提高了风电与火电的上网价格, 即 $w_w^{C*1} \leq w_w^{C*2} \leq w_w^{C*3}$, $w_f^{C*1} \leq w_f^{C*2} \leq w_f^{C*3}$ (证明见附录 4).

性质 2 说明, 政府在促进风电上网时, 除了实行补贴策略之外, 亦可通过调控火电商的碳配额额度, 调节发电侧电能价格, 激励风电投资.

3.2 碳税政策下发电商与售电商的策略分析

在碳税 (T) 政策中, 火电商对每单位碳排放均需支付成本 t . 同样地, 售电商的购电量与上网电价之间的关系形式仍为式 (5), 火电商的上网电价决策问题可表示为

$$\max \Pi_f^T(w_f^T) = w_f^T q_f^T - c q_f^T - t e_f q_f^T \quad (12)$$

没有碳配额的存在, 火电商的利润函数与第 2 节类似, 碳税增加了火电商的单位发电成本, 因而在该政策下, 售电商对发电商的最优购电决策 (q_w^{T*}, q_f^{T*}) 满足的条件为

3.3 碳税与碳配额组合政策下发电商与售电商的策略分析

当碳交易市场未建立或者处于关闭状态时,碳配额与碳交易政策无法执行,因而碳税与碳配额的组合政策(CT)是一种有效手段,此时政府发放给企业的碳配额只能自用而无法交易,且火电商在碳配额内的电力生产无需缴纳碳税,而在超出碳配额之外的碳排放单位成本为 t . 火电商的最大化利润为

$$\max \Pi_f^{CT}(w_f^{CT}) = w_f^{CT} q_f^{CT} - c q_f^{CT} - t(e_f q_f^{CT} - L)^+ \tag{14}$$

在组合政策下,售电商与发电商的电力交易量同样遵循两个分界点 ($L^d = e_f q_f^{T*}$, $L^u = e_f q_f^{N*}$) 原则. 在碳配额充裕时 ($L \geq L^u$), 电力系统的运营决策与第 2 节相同; 在碳配额适中时 ($L^d < L < L^u$), 售电商对火电商的电力购买量为 L/e_f ; 在碳配额较低时 ($L \leq L^d$), 电力系统的运营决策则与第 3.2 节相同.

4 发电商与售电商最优策略的比较分析

4.1 敏感性分析

根据以上数学模型,无碳约束政策可看作碳配额与碳交易政策中 $s = b = 0, L \in [0, +\infty)$ 的特殊情形; $s \in [0, +\infty), L = 0, b = t$ 的情形则与碳税政策下电力系统的优化问题相同; $s = 0, b = t, L \in [0, +\infty)$ 则可看作碳配额与碳税组合政策下的电力系统运营问题. 因而本研究可将碳配额与碳交易政策下的模型看作基本模型,并分析主要参数的影响.

4.1.1 碳配额与碳价的影响

性质 3 碳配额的减少会导致火电商利润下降,风电商获益,同时降低系统碳排放(证明见附录 5).

L 的减少从增加风电上网消纳与提升风电上网价格两方面共同激励风电商的投资,但却限制了火电的生产进而减少了火电商的投资动机. 性质 3 表明,政府缩减碳配额额度不仅能够促进风电上网,更有利于增加风电商的利润,是对风电商的间接补贴,但这种促进风电投资的策略将以牺

牲火电商的利润为代价.

除发电商的利润变化,生态环境的变化亦是政府在制定政策时需考量的指标. 由于火电机组的灵活性,调峰辅助服务一般由传统能源作为支撑,因而本研究将电力系统的期望碳排放量 (ECE) 定义为整个电力供配过程(包括紧急调度电量的生产)中的所有碳排放量,则有

$$ECE = e_f E\{q_f^* + [X - \min(q_w^*, uK) - q_f^*]^+\} \tag{15}$$

根据性质 3,政府可通过调控碳配额直接控制系统的碳排放. 这一结果与 Xu 等^[19]的研究结论类似,而与 Benjaafar 等^[32]、Hua 等^[33]的研究结果不同,后者认为在碳配额与碳交易政策下,碳排放只受碳交易价格的影响,而与碳配额无关. 遗憾的是, Xu 等^[19]的研究仅指出碳配额可作为控制碳排放的直接抓手,但未分析碳配额大小对碳排放量的具体影响. 据式 (15),碳配额 L 的增加对 ECE 具有两种相反影响:一则火电上网量的增加导致碳排放量增加;二则售电商紧急购电量的减小导致碳排放量减少. 在二者的共同作用下, L 的增加最终使系统的期望碳排放量增加. 因此,单就碳排放而言,紧缩的碳配额政策更有利于整个电力系统的绿色发展. 然而,政府利用碳配额额度控制碳排放并不总是有效,当碳配额处于下界 \underline{L} 以下或上界 \bar{L} 以上两个区间范围时,降低碳配额并不会对电力系统的运营决策产生影响,因而无法实现降低碳排放的目标.

性质 4 碳交易价格(单位碳配额售出价格或购入价格)的增加一方面会减少售电商的总购电量与火电上网量,增加风电的上网消纳;另一方面会提升风电与火电的上网价格(证明见附录 6).

碳交易价格的提升增大了火电生产成本,促使火电商提高上网价格,并降低火电上网量,促进风电消纳;同时,火电上网价格的提升使得风电上网价格的提升空间扩大,并最终促使风电商同样采取提价行为,进而降低售电商的总购电量.

Zhang 和 Xu^[16]的研究未刻画产品竞争,因而研究发现碳交易价格的提升会增加低碳产品的产量,但对传统产品的产量无影响. 而 Xu 等^[19]的研究则刻画了垄断企业的产品竞争,并认为碳交易价格对产品产量以及碳排放的影响不具有单调

性,政府难以利用这一价格工具控制碳排放. 本研究发现:当企业竞争与产品竞争同时存在时,碳交易价格的提升在增加低碳品产量的同时会抑制传统高碳品的产量,从而大幅降低碳排放. 这一结果表明,碳交易价格同样是政府控制碳排放的有效抓手.

结论 1 政府控制碳排放的有效手段受制于碳配额额度. 在 $0 \leq L < \underline{L}$ 或者 $L \geq \bar{L}$ 两个区间段内,政府控制碳排放的有效手段为调整碳价;而在 L 位于两个分界值之间时,调整碳配额则更有效.

4.1.2 风电稳定性与成本共担比例的影响

性质 5 在碳配额适中时,风电稳定性 ρ 对售电商的电力购买量无影响(证明见附录 7).

风电稳定性的提升是否能够促进风电上网消纳与碳配额直接相关. 当碳配额适中时,火电商不进行碳排放权交易,给定政府发放的碳配额,售电商对火电的购买量为定值. 根据式(4),参数 ρ 仅通过火电订单量对风电订单量形成间接效应. 因而在火电消纳恒定时, ρ 亦不影响风电消纳.

结论 2 在碳配额与碳交易政策或碳配额与碳税组合政策下,针对风电这类环保企业,其发电稳定性这一竞争优势的提升未必会对传统火电企业的生产量产生影响.

性质 6 在碳配额较高(较低)时,风电稳定性 ρ 对电力消纳 ($q_w^{C*}, q_f^{C*}, Q^{C*}$) 的影响取决于成本比值 k , 如表 2 所示(证明见附录 7).

表 2 风电稳定性 ρ 对售电商购电量的影响

Table 2 The impact of wind power stability ρ on the purchasing quantity of the electricity retailer

| 参数范围 | | q_w^{C*} | q_f^{C*} | Q^{C*} |
|-------------------------------------|--------------------|------------|------------|----------|
| $L \geq \bar{L}(L < \underline{L})$ | $k > k_1(k > k_2)$ | ↓ | ↑ | ↑ |
| | $k < k_1(k < k_2)$ | ↑ | ↓ | ↓ |

注: $k_1 = (1 - \lambda) [\bar{F}(q_f^s) - f(q_f^s) q_f^s]$; $k_2 = (1 - \lambda) [\bar{F}(q_f^b) - f(q_f^b) q_f^b]$.

k 可看作是火电商的单位发电成本与单位调峰调度成本之比. 在碳配额 L 相对较高或较低时,若 k 超过一定值,风电稳定性的增加会减少售电商对风电的购置. 此时火电商的发电成本相对较高,促使电力批发市场形成高水平的上网价格,风电稳定性的提高对市场竞争的加剧虽能降低风电价格,但风电的价格优势并不具备吸引力. 售电商更偏好增加对火电的购买与总购电量,以降低发

电侧电能量价格的总体水平.

结论 3 是否应该在竞争的供电市场积极辅助风电商提高稳定性,政府应依据火电商的碳配额额度与发电成本“相机抉择”

性质 7 成本共担比例 λ 的增加能够促进风电消纳,并成功抑制火电上网(证明见附录 8).

与单独提高风电稳定性不同,风电商成本共担比例的提升总能够促进风电消纳. 这一结果的机理为:风电稳定性的提升是一种长期投资的结果,风电商无法在短期内快速调整风电的间歇性. 然而,风电商提升稳定性后,售电商减少对风电的购买仍能享受稳定性提升的福利,因而理性的售电商会转移平衡购电成本的焦点,例如,增加火电的购买量并降低电力上网价格. 然而当风电商成本共担比例 λ 提升时,售电商为激励风电商共担紧急购电成本,选择增加对风电的购买量,而减少与火电商的交易量. 因而,政府促成风电商与售电商缔结成本共担契约能够有效促进风电上网.

性质 8 风电商成本共担比例 λ 对售电商总购电量的影响取决于成本比值 k 与碳配额额度 L , 如表 3 所示(证明见附录 8).

表 3 成本共担比例 λ 对售电商总购电量的影响

Table 3 The impact of cost sharing ratio λ on the total purchasing quantity of the electricity retailer

| 参数范围 | | Q^{C*} |
|-------------------------------------|--------------------|----------|
| $L \geq \bar{L}(L < \underline{L})$ | $k > k_3(k > k_4)$ | ↓ |
| | $k < k_3(k < k_4)$ | ↑ |
| $\underline{L} \leq L < \bar{L}$ | | ↑ |

注: $k_3 = (1 - \lambda) q_w^{C*1} [(1 - \rho)f(q_f^s) + (1 - \rho) \varphi_{q_f^s}'(q_f^s, 0) + \rho f(q_w^{C*1} + q_f^s)]$; $k_4 = (1 - \lambda) q_w^{C*3} [(1 - \rho)f(q_f^b) + (1 - \rho) \varphi_{q_f^b}'(q_f^b, 0) + \rho f(q_w^{C*3} + q_f^b)]$.

根据性质 8,对于较高或较低的碳配额额度, λ 对售电商总购电量的影响同样与 k 有关,当成本比值 k 较小时,火电商具有较低的发电成本,低水平的上网电价使得售电商的总购电量随着风电成本共担比例的增加呈现增长趋势. 而随着 k 的增加,电力上网价格处于高水平,随着风电成本共担比例的增加火电上网量的急剧减少,并导致售电商的总购电量顺势下降.

结论 4 引入成本共担契约后,售电商是否增加总购电量,不仅需关注政府的碳配额政策,更需依据火电成本与紧急购电成本理性抉择.

表 4 风电稳定性 ρ 与成本共担比例 λ 对上网电价的影响

Table 4 The impact of wind power stability ρ and cost sharing ratio λ on the on-grid price

| 参数范围 | | w_w^{C*} | w_f^{C*} |
|---|----------------------------|--|--|
| $L \geq \bar{L}$ ($L < \underline{L}$) | $k > k_1$ ($k > k_2$) | $\rho \uparrow \Rightarrow w_w^{C*} \downarrow$ | $\rho \uparrow \Rightarrow w_f^{C*} \downarrow$ |
| | $k < k_3$ ($k < k_4$) | $\lambda \uparrow \Rightarrow w_w^{C*} \downarrow$ | $\lambda \uparrow \Rightarrow w_f^{C*} --$ |
| $\underline{L} \leq L < \bar{L}$ | | $\rho \uparrow \Rightarrow w_w^{C*} -$ | $\rho \uparrow \Rightarrow w_f^{C*} \downarrow$ |
| | | $\lambda \uparrow \Rightarrow w_w^{C*} \downarrow$ | $\lambda \uparrow \Rightarrow w_f^{C*} \downarrow$ |

注：“-”代表无影响；“--”代表不具有单调性影响（证明见附9）。

参数 ρ 与参数 λ 对电力上网价格的影响可划分为直接效应（参数直接对上网电价的影响）与间接效应（参数通过影响电力上网量进而影响上

网价格）。两个参数对上网价格的直接效应非正，即风电稳定性的提升以及成本共担比例的增加不会导致上网电价的直接提升。但参数对售电商总购电量的非单调性影响使其间接效应不明朗。在火电商的发电成本较高时，风电稳定性的提升凸显了火电的上网劣势，理性的火电商选择降低上网价格。在火电商的发电成本较低时，火电同时具备价格优势与稳定优势，因而共担调峰调度成本的风电商偏好降低上网价格以凸显风电优势。

4.2 政策比较分析

本节将不同碳约束政策下供应链的最优决策及主体利润进行比较。首先对几种政策下的最优决策比较分析，结果如表 5 所示。

表 5 不同碳约束政策下供应链的最优决策比较（证明见附录 10）

Table 5 The comparison of optimal decisions in the supply chain with different carbon constrained policies

| 参数范围 | | q_f^* | q_w^* | Q^* | w_w^* | w_f^* | |
|------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $t \leq s$ | | $q_f^{N*} \geq q_f^{CT*} \geq q_f^T$ | $q_w^{N*} \leq q_w^{CT*} \leq q_w^T$ | $Q^{N*} \geq Q^{CT*} \geq Q^T$ | $w_w^{N*} \leq w_w^{CT*} \leq w_w^T$ | $w_f^{N*} \leq w_f^{CT*} \leq w_f^T$ | |
| $t > s$ | $L \geq e_f q_f^{C*1}$ | $q_f^{N*} = q_f^{CT*} \geq q_f^T$ | $q_w^{N*} = q_w^{CT*} \leq q_w^T$ | $Q^{N*} = Q^{CT*} \geq Q^T$ | $w_w^{N*} = w_w^{CT*} \leq w_w^T$ | $w_f^{N*} = w_f^{CT*} \leq w_f^T$ | |
| | $e_f \max(q_f^{T*}, q_f^{C*3}) \leq L < e_f q_f^{C*1}$ | $q_f^{N*} \geq q_f^{CT*} = q_f^T$ | $q_w^{N*} \leq q_w^{CT*} = q_w^T$ | $Q^{N*} \geq Q^{CT*} = Q^T$ | $w_w^{N*} \leq w_w^{CT*} = w_w^T$ | $w_f^{N*} \leq w_f^{CT*} = w_f^T$ | |
| | $L < e_f \max(q_f^{T*}, q_f^{C*3})$ | $s \leq t \leq b$ | $q_f^{N*} \geq q_f^{CT*} = q_f^T$ | $q_w^{N*} \leq q_w^{CT*} = q_w^T$ | $Q^{N*} \geq Q^{CT*} = Q^T$ | $w_w^{N*} \leq w_w^{CT*} = w_w^T$ | $w_f^{N*} \leq w_f^{CT*} = w_f^T$ |
| | | $s \leq b \leq t$ | $q_f^{N*} \geq q_f^{CT*} \geq q_f^T$ | $q_w^{N*} \leq q_w^{CT*} \leq q_w^T$ | $Q^{N*} \geq Q^{CT*} \geq Q^T$ | $w_w^{N*} \leq w_w^{CT*} \leq w_w^T$ | $w_f^{N*} \leq w_f^{CT*} \leq w_f^T$ |

碳约束政策对各利益主体最优决策的影响不仅与碳配额额度有关，亦与碳税、碳价的相对大小有关。在无碳约束政策下，电力价格对售电商最有利，由于两种电力的上网价格均较低，售电商更偏好稳定的火电，因此火电的上网量最大。在 3 种碳约束政策中，碳税政策促进风电消纳的效果最为明显。然而碳税更多地体现在价格干预上，较大程度地提升了上网电价，增加了售电商的单位购电成本。只有在较高的碳交易价格或者紧缩的碳配额下，碳配额与碳交易政策促进风电消纳的作用才显著，此时火电的上网量最小，为风电的顺利上网增添机会。虽然碳配额与碳税的组合政策在促进风电消纳上并没有发挥极致作用，但从供电价格角度而言，该政策在增加风电消纳的同时并没有导致上网电价明显增加，是一种较为温和的碳约束政策。

对系统的期望碳排放量、风电商的期望利润以及火电商的利润进行比较，结果分别如表 6、表 7 所示。

在 4 种市场环境中，碳税政策或者碳配额与碳交易政策对风电商与环境更为有利。在税率小于碳排放权售出价格时，碳配额与碳交易政策下系统的碳排放更低；而在税率高于碳排放权购入价格时，碳税政策下系统具有更低的碳排放，这与 Xu 等^[34]的结果一致。然而，税率介于碳交易价格之间的情形，Xu 等^[34]并未得出分析结果。根据本研究的研究结论，此时碳约束政策对碳减排效果的影响与碳配额直接相关，在紧缩性的碳配额政策下，碳税的减排效果表现不佳。通过表 6 可知，解决风电上网问题具有重大意义，促进风电消纳不仅能够降低电力系统的碳排放，还能直接增加风电商的利润，有利于风电这一清洁能源的普及。

根据表 7, 不同碳约束环境对火电利润影响主要取决于碳配额额度 L . 碳配额额度较大时, 火电可在碳交易市场上获得额外收益, 因而碳配额与碳交易政策虽然降低了火电上网量, 但仍增加了火电的盈利. 相反, 相对较小的碳配额额度则对火电的负面影响较大, 火电在无碳约束政策下获利更多. 碳税政策直接增加了火电商

的发电成本, 因而并不利于火电的运营. 而碳税与碳配额的组合政策虽不能最大限度地增加火电的利润, 但亦未产生显著的负面效应. 结合表 6 与表 7, 本研究得出该组合政策适宜在碳约束政策推行初期使用, 在促进碳减排以及风电投资的同时, 不会导致火电与售电的利益严重受损.

表 6 不同碳约束政策下风电商利润比较以及 ECE 比较 (证明见附录 11)

Table 6 The comparison of wind power supplier's profit and ECE under different carbon constraint policies

| 参数范围 | | $E \Pi_w^*$ | ECE^* |
|-------------------|---|---|---|
| $t \leq s$ | | $E \Pi_w^{N^*} \leq E \Pi_w^{CT^*} \leq E \Pi_w^{T^*} \leq E \Pi_w^{C^*}$ | $ECE^{N^*} \geq ECE^{CT^*} \geq ECE^{T^*} \geq ECE^{C^*}$ |
| $t > s$ | $L \geq e_f q_f^{C^*1}$ | $E \Pi_w^{N^*} = E \Pi_w^{CT^*} \leq E \Pi_w^{C^*} \leq E \Pi_w^{T^*}$ | $ECE^{N^*} = ECE^{CT^*} \geq ECE^{C^*} \geq ECE^{T^*}$ |
| | $e_f \max(q_f^{T^*}, q_f^{C^*3}) \leq L < e_f q_f^{C^*1}$ | $E \Pi_w^{N^*} \leq E \Pi_w^{CT^*} = E \Pi_w^{C^*} \leq E \Pi_w^{T^*}$ | $ECE^{N^*} \geq ECE^{CT^*} = ECE^{C^*} \geq ECE^{T^*}$ |
| | $L < e_f \max(q_f^{T^*}, q_f^{C^*3})$ | $E \Pi_w^{N^*} \leq E \Pi_w^{CT^*} = E \Pi_w^{T^*} \leq E \Pi_w^{C^*}$ | $ECE^{N^*} \geq ECE^{CT^*} = ECE^{T^*} \geq ECE^{C^*}$ |
| | $s \leq t \leq b$ | $E \Pi_w^{N^*} \leq E \Pi_w^{C^*} \leq E \Pi_w^{CT^*} \leq E \Pi_w^{T^*}$ | $ECE^{N^*} \geq ECE^{C^*} \geq ECE^{CT^*} \geq ECE^{T^*}$ |
| $s \leq b \leq t$ | $E \Pi_w^{N^*} \leq E \Pi_w^{C^*} \leq E \Pi_w^{CT^*} \leq E \Pi_w^{T^*}$ | $ECE^{N^*} \geq ECE^{C^*} \geq ECE^{CT^*} \geq ECE^{T^*}$ | |

表 7 不同碳约束环境的火电商利润比较 (证明见附录 12)

Table 7 The comparison of thermal power supplier's profit under different carbon constraint policies

| 参数范围 | | Π_f^* |
|------------|---|---|
| $t \leq s$ | $L \geq \frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_f^{N^*}) - H^{C^*1}(q_w^{C^*1}, q_f^{C^*1})}{s} + e_f q_f^{C^*1}$ | $\Pi_f^{C^*} \geq \Pi_f^{T^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{N^*}$ |
| | $e_f q_f^{N^*} \leq L < \frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_f^{N^*}) - H^{C^*1}(q_w^{C^*1}, q_f^{C^*1})}{s} + e_f q_f^{C^*1}$ | $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} > \Pi_f^{C^*} \geq \Pi_f^{T^*}$ |
| | $\frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_f^{T^*}) - H^{C^*1}(q_w^{C^*1}, q_f^{C^*1})}{s} + e_f q_f^{C^*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T^*} \leq L$ $L < \min \left[\frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_f^{N^*}) - H^{C^*1}(q_w^{C^*1}, q_f^{C^*1})}{s} + e_f q_f^{C^*1}, e_f q_f^{N^*} \right]$ | $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{C^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*}$ |
| | $L < \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_f^{T^*}) - H^{C^*1}(q_w^{C^*1}, q_f^{C^*1})}{s} + e_f q_f^{C^*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T^*}$ | $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*} > \Pi_f^{C^*}$ |
| $t > s$ | $L \geq \frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_f^{N^*}) - H^{C^*1}(q_w^{C^*1}, q_f^{C^*1})}{s} + e_f q_f^{C^*1}$ | $\Pi_f^{C^*} \geq \Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*}$ |
| | $e_f q_f^{N^*} \leq L < \frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_f^{N^*}) - H^{C^*1}(q_w^{C^*1}, q_f^{C^*1})}{s} + e_f q_f^{C^*1}$ 或 $\max(e_f q_f^{T^*}, \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_f^{T^*}) - H^{C^*3}(q_w^{C^*3}, q_f^{C^*3})}{b} + \frac{t}{b} e_f q_f^{T^*} - e_f q_f^{C^*3}) \leq L < e_f q_f^{C^*1}$ | $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{C^*} \geq \Pi_f^{T^*}$ |
| | $e_f q_f^{C^*1} \leq L < \min \left[\frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_f^{N^*}) - H^{C^*1}(q_w^{C^*1}, q_f^{C^*1})}{s} + e_f q_f^{C^*1}, e_f q_f^{N^*} \right]$ 或 $e_f q_f^{C^*3} \leq L < e_f q_f^{T^*}, t > \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_f^{T^*}) - H^{C^*2}(q_w^{C^*2}, q_f^{C^*2})}{e_f q_f^{T^*}}$ 或 $\frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_f^{T^*}) - H^{C^*3}(q_w^{C^*3}, q_f^{C^*3})}{b} + \frac{t}{b} e_f q_f^{T^*} - e_f q_f^{C^*3} \leq L < e_f \min(q_f^{T^*}, q_f^{C^*3})$ | $\Pi_f^{N^*} > \Pi_f^{C^*} > \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*}$ |
| | $e_f q_f^{C^*3} \leq L < e_f q_f^{T^*}, t \leq \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_f^{T^*}) - H^{C^*2}(q_w^{C^*2}, q_f^{C^*2})}{e_f q_f^{T^*}}$ 或 $L < \min(e_f q_f^{C^*3}, \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_f^{T^*}) - H^{C^*3}(q_w^{C^*3}, q_f^{C^*3})}{b} + \frac{t}{b} e_f q_f^{T^*} - e_f q_f^{C^*3})$ | $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*} > \Pi_f^{C^*}$ |

注: $H(q_w, q_f) = (1 - \lambda) w_e q_f [(1 - \rho) \bar{F}(q_f) + \rho \bar{F}(q_w + q_f)] - c q_f$.

4.3 数值算例分析

相关参数设置如下:工业用电需求 $X \sim U[0, 500]$, $\rho = 0.5, c = 0.3, s = 0.1, b = 0.2, w_e = 1, p = 1.1$, 其中售电价格仅影响售电商的利润空间,对各个参数的敏感性趋势无影响.

4.3.1 成本共担契约对电力系统的影响

为深入分析成本共担契约的影响,本研究运用算例选取基础模型作进一步分析,且在碳配额为0时,基础模型可视作碳税政策下的电力系统.根据图1~图4, L 的增加提升了火电商的竞争力,并使火电商受益,且可能无损于风电商.然而在适中的碳配额额度下火电商并未实现最优利润,且售电商的电力购买受限,火电商利润的增加未能弥补风电商与售电商的利润损失,故而适中

的碳配额额度会对整个电力系统产生负面影响,激进型的碳配额政策(碳配额额度较高或较低)反而有利于电力系统的运营.

图1~图4亦描述了 λ 对各利益主体利润的影响.成本共担契约的引入使得风电商的成本增加,获利减少,同时减轻了售电商对火电的依赖,火电商的利润亦有所减少.然而售电商的购电成本可能大幅降低,一定碳配额额度下,售电商有动机促成契约的缔结.根据图4,在碳配额适中时,成本共担契约的引入反而有损整个电力系统,因此只有在激进型的碳配额政策下,成本共担契约的引入才是一种帕累托改进的策略.特别地,在碳税政策下,成本共担契约的引入无疑能够实现帕累托改进.

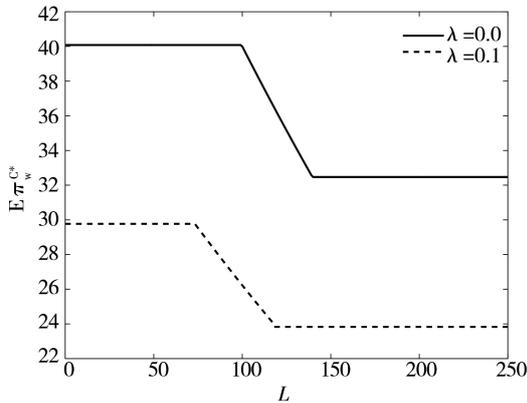


图1 λ, L 对风电商最优利润的影响

Fig.1 The impact of λ, L on the optimal profit of the wind power supplier

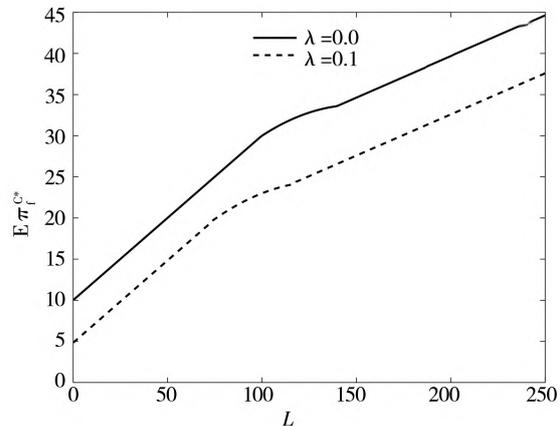


图2 λ, L 对火电商最优利润的影响

Fig.2 The impact of λ, L on the optimal profit of the thermal power supplier

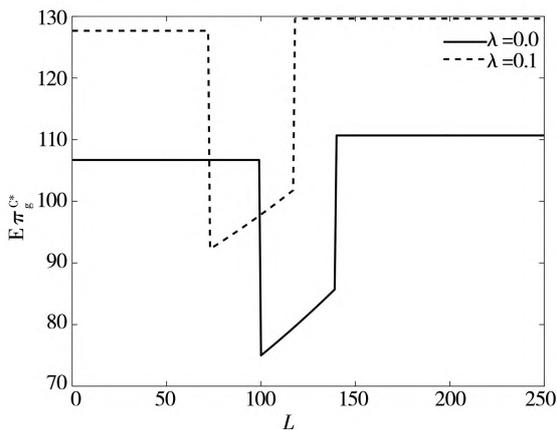


图3 λ, L 对售电商最优利润的影响

Fig.3 The impact of λ, L on the optimal profit of the electricity retailer

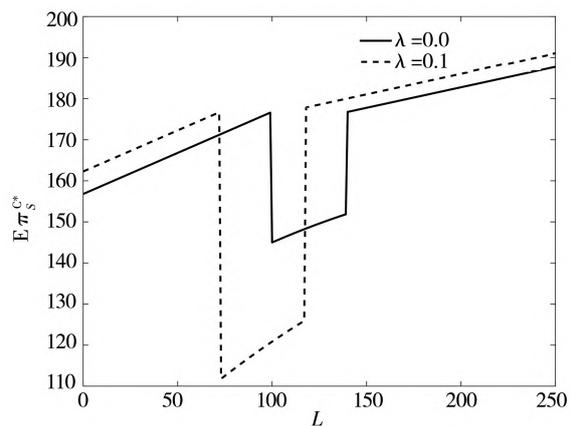


图4 λ, L 对供应链整体利润的影响

Fig.4 The impact of λ, L on the whole profit of the power supply chain

4.3.2 不同主体最优碳约束政策的分析

本节利用算例分析在碳配额与碳交易政策(C),碳税政策(T),碳税与碳配额的组合政策(CT)

中,何种碳约束政策对发电商与售电商运营更优.选取 $\lambda = 0.1$, 横坐标与纵坐标的参数分别取碳配额 L 与税率 t . 仿真结果如图5~图8所示.

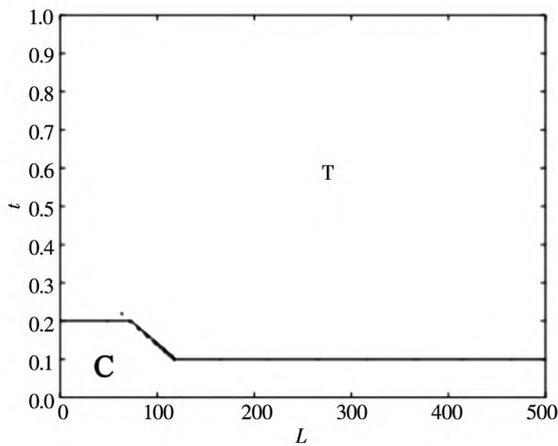


图5 对风电商最优的碳约束政策

Fig.5 The optimal carbon constraint policies for the wind power supplier

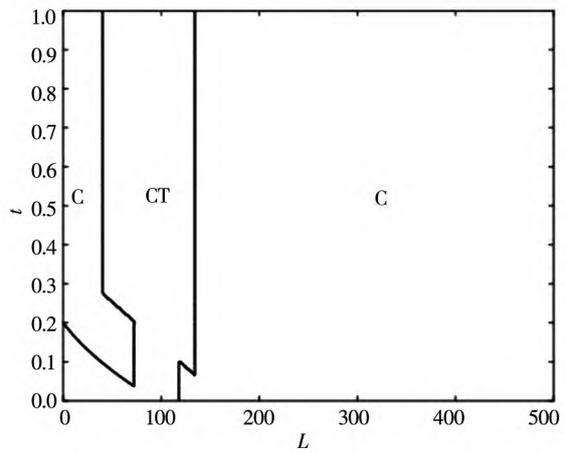


图6 对火电商最优的碳约束政策

Fig.6 The optimal carbon constraint policies for the thermal power supplier

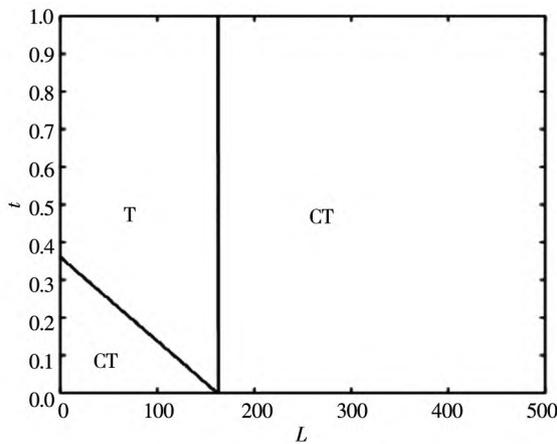


图7 对售电商最优的碳约束政策

Fig.7 The optimal carbon constraint policies for the electricity retailer

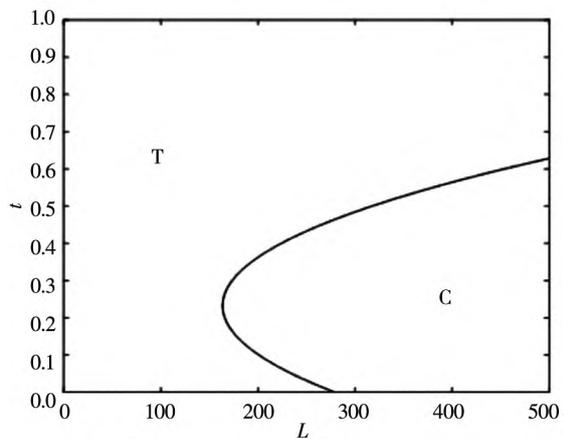


图8 对供应链最优的碳约束政策

Fig.8 The optimal carbon constraint policies for the power supply chain

图5验证了表3的内容,即从风电商的角度,对其最有利的碳约束政策是碳税政策或者碳配额与碳交易政策.在政府实行碳税政策并将税率制定在超出碳排放权售出价格的水平时,该政策激励风电投资的效果最优,且碳税的增加可提升风电竞争力,进而增加风电商的利润.而在实行碳配额与碳交易政策时,政府设法提升碳价或采取紧缩型碳配额政策,更利于借助该策激励风电投资.

根据图6,对火电商最有利的碳约束政策为碳配额与碳交易政策或者碳配额与碳税的组合政策.在碳配额额度处于一定范围时,组合政策更利于火电商的发展.在组合政策下,火电商损失了碳交易收益,但可以实现无碳约束政策下的运营效果,具有较高的上网量,并且获利更多.相比于组

合政策,碳配额与碳交易政策可能使两类发电商共赢,进而稳定整个电力系统.

相比之下,考察碳约束政策对售电商的影响发现,碳税政策虽损害了火电商的利润但却利于售电商的运营.在组合政策下,售电商购置火电的成本(包括紧急购电成本)相对较高,特别是在碳配额紧缩时,火电的上网价格进一步提升,加剧了组合政策的劣势.

对整个电力系统而言,碳税政策或碳配额与碳交易政策更利于整体绩效的提升.在税率较小且碳配额额度较高时,碳配额与碳交易政策在减少碳排放的同时能够促进整个电力系统的发展.碳税政策虽不利于火电商的运营,但在碳配额较小时能够实现风电商与售电商的共赢,有利于电力系统的平稳运营.

5 碳价的随机性与内生性

5.1 随机碳价

在第 3 节的研究中,本研究将碳配额的交易价格设为固定值,但实际中碳价受能源价格、政府政策、空气质量等诸多因素的影响波动较大^[35],部分有关碳配额与碳交易政策的研究认为碳价波动服从几何布朗运动^[20]. 类似地,本研究设碳配额交易价格 $s_t = b_t$ ($s_t \neq b_t$ 时,结果类似),且 $ds_t = \mu s_t dt + \sigma s_t dw_t, \mu, \sigma > 0$,分别为漂移百分比

$$\begin{cases} (1 - \rho)\bar{F}(q_t^{C*}) + \rho\bar{F}(Q_t^{C*}) - [(1 - \rho)f(q_t^{C*}) + \rho f(Q_t^{C*})] q_t^{C*} = \frac{(r - \mu)c + s_0[1 - e^{-(r-\mu)M}] e_f}{(1 - \lambda) w_e(r - \mu)} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \bar{F}(Q_t^{C*}) = (1 - \lambda)f(Q_t^{C*}) q_w^{C*} \\ w_f^{C*} = (1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_t^{C*}) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(Q_t^{C*}) \\ w_w^{C*} = (1 - \lambda) w_e \bar{F}(Q_t^{C*}) \end{cases} \quad (18)$$

性质 10 1) 当 $\mu \geq r$ 时,增加碳价单位时间漂移率会减少售电商的总购电量与火电上网量,而增加风电的消纳机会,并提升上网电价. 2) 当 $\mu < r$ 时,增加碳价单位时间漂移率会提升售电商的总购电量与火电上网量,而减少风电的上网消纳以及上网电价(证明见附录 13).

考虑随机碳价时,本研究的主要结论表现出一定稳健性,但碳价在单位时间内的漂移率对电力系统的运营具有重要影响. 碳价单位时间漂移率较大时,漂移率的增加提升了合约期内的平均碳价,进而增加风电消纳. 而在漂移率较小时,漂移率的增加反而降低合约期内的平均碳价,抑制风电消纳.

5.2 内生碳价

在以上的讨论中,碳交易价格均为外生变量,但在碳交易市场中,碳价与各企业碳排放权在碳交易市场的供给与需求相关,因而本节基于供求均衡理论,将碳价统一并内生化处理,记为 s . 事

和波动百分比, w_t 为维纳过程.

考虑合约期 M 内发电商与售电商的合约为 (w_t^C, q_t^C) , 设 r 为无风险利率, s_0 为碳价初始值,则合约期内火电商的期望利润为

$$\Pi_f^C(w_t^C) = w_f^C q_t^C - c q_t^C + E \left[\int_0^M [s_t(L - e_f q_t^C) e^{-rt}] dt \right] = w_f^C q_t^C - c q_t^C + \frac{s_0[1 - e^{-(r-\mu)M}]}{r - \mu} (L - e_f q_t^C) \quad (16)$$

在碳价随机的碳配额与碳交易政策下,发电商与售电商均存在最优决策 $(q_w^{C*}, q_f^{C*}), (w_w^{C*}, w_f^{C*})$, 且满足的条件为

实上,碳配额与碳交易政策是一种总量控制政策,政府实行该政策的目的是通过总量约束实现社会总体碳排放的减少,因而将政府制定的总体碳排放目标记为 L_A .

本节将电力供应链中火电商的数目拓展为 n 个,火电商 i 的发电成本记为 c_i ,单位碳排放强度为 e_{fi} ,获得的初始碳配额为 L_i ,电力上网量与价格分别为 q_{fi}^C, w_{fi}^C . 在博弈均衡时碳交易市场上购买碳排放权的火电商所在的集合记为 R ,则发电商对碳排放权的总需求 $Q_D = \sum_{i \in R} [q_{fi}^C(s) - L_i]$,而发电商对碳排放权的总供给为 $Q_S = \sum_{i \in \bar{R}} [L_i - q_{fi}^C(s)]$. 除火电商参与碳排放市场,其他高污染行业的企业,如钢铁公司、化工企业,亦进行碳排放权交易,将除火电商外其他企业的碳排放总量记为 $ECE_0(s)$,政府分配的碳配额总量为 L_0 .

电力供应链中各利益主体的博弈模型可表示为

$$\min E [C_g^C(w_w^C, w_f^C)] = E \left\{ w_w^C \min(q_w^C, uK) + \sum_{i=1}^n w_{fi}^C q_{fi}^C + (1 - \lambda) w_e \left[X - \min(q_w^C, uK) - \sum_{i=1}^n q_{fi}^C \right]^+ \right\} \quad (19)$$

$$s. t. \begin{cases} \max \Pi_{fi}^C(w_{fi}^C) = w_{fi}^C q_{fi}^C - c_i q_{fi}^C + s(L_i - e_{fi} q_{fi}^C), i = 1, 2, \dots, n \\ \max E[\Pi_w^C(w_w^C)] = E\left\{w_w^C \min(q_w^C, uK) - \lambda w_e \left[X - \min(q_w^C, uK) - \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right]^+\right\} \end{cases} \quad (20)$$

碳交易市场中的均衡碳价 s^* 满足条件

电力供应链中各参与者的最优决策如式

$$\sum_{i=1}^n e_{fi} q_{fi}^C(s^*) = L_A - ECE_0(s^*) \quad (21)$$

(22) 和式(23)所示.

$$\begin{cases} (1-\rho)\bar{F}\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^{C*}\right) + \rho\bar{F}(q_w^{C*} + \sum_{i=1}^n q_{fi}^{C*}) - \left[(1-\rho)f\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^{C*}\right) + \rho f(q_w^{C*} + \sum_{i=1}^n q_{fi}^{C*})\right] q_{fi}^{C*} = \frac{c_i + s^* e_{fi}}{(1-\lambda)w_e} \\ \bar{F}(q_w^{C*} + \sum_{i=1}^n q_{fi}^{C*}) = (1-\lambda)f(q_w^{C*} + \sum_{i=1}^n q_{fi}^{C*}) q_w^{C*} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} w_{fi}^{C*} = (1-\lambda)w_e \left[\rho\bar{F}(q_w^{C*} + \sum_{i=1}^n q_{fi}^{C*}) + (1-\rho)\bar{F}\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^{C*}\right)\right] \\ w_w^{C*} = (1-\lambda)w_e \bar{F}(q_w^{C*} + \sum_{i=1}^n q_{fi}^{C*}) \end{cases} \quad (23)$$

在竞争性的供电市场中,异质的火电商制定的上网电价相同,否则将失去上网机会,且随着供电市场竞争程度的增加,高发电成本与高污染的火电商将被迫退出发电市场.因而在供电段端推进市场化改革不仅能够降低用户的购电成本,更有利于促进能源结构的转型升级.

性质 11 当 $ECE_0(s)$ 为减函数时,政府可通过控制社会总体的碳排放量 L_A 促进风电上网(证明见附录 14).

一般而言,碳价的提升增加了企业生产非绿色产品的成本,能够促使企业进行技术更新进而减少碳排放.在碳配额与碳交易政策下,政府控制全社会的碳约束目标能够提升碳交易价格 s^* ,从而在竞争的供电市场中,通过减少火电上网而促进风电消纳.相较于控制发电商的初始碳配额,政府直接控制总体碳排放目标在政策执行上更有效.

6 结束语

随着碳减排政策在中国的逐步实施,越来越多的企业在运营决策时需考虑并控制自身的碳排放.在碳排放严重的电力供应链中,发电商上网电价的制定更应考虑外部的碳约束环境.本研究通

过考虑不同的碳约束政策,推导出风电商与火电商的最优定价策略,为发电端市场化的推进提供指导,同时给出不同政策下售电商的购电策略,一定程度上为风电的上网难问题指出了解决方向,并为政府碳约束政策的实施提供了一定借鉴.

针对 4 种碳约束环境,本研究得出的主要结论如下:1)无碳约束政策(N)下火电上网量最大,风电上网量最小.2)碳税政策(T)虽然在促进风电消纳上更具优势,但作为价格干预的政策,却增加了上网电价,不利于火电发展,因而该政策有利于实现电力市场结构的快速转型,并促进整个电力系统的发展.3)碳配额与碳税的组合政策(CT)在促进风电上网消纳的同时不会导致电力价格的过度攀升,是一种相对温和的政策,并在一定条件下是最有利于火电商以及售电商发展的碳约束政策;遗憾的是,组合政策对供应链整体利润的促进效果不佳.4)碳配额与碳交易政策(C)虽然对售电商的利好程度不太理想,但在适当的碳配额下,却是促进整个电力供应链系统发展的友好政策,这一政策在推进与执行中,更需政府对碳配额和碳价的合理管制.政府在解决风电消纳难问题时,需要适当调控碳价,避免碳价过低对风电消纳造成抑制.

在实施碳配额与碳交易政策(C)以减少碳排

放方面,政府应遵循两个分界点原则,在碳配额位于两个分界值之间时,缩减碳配额可直接减少电力系统碳排放,而在碳配额高于上分界点或低于下分界点时,提高碳交易价格则更为有效.此外,为在竞争的供电市场中促进风电上网消纳,政府需关注火电商的发电成本,相机抉择是否提高风电稳定性;同时成本共担契约的引入可促使整个电力供应链系统实现帕累托改进,且风电商成本共担比例的增加能促进风电上网,故而是一种值得在实践中广泛推行的手段.

本研究在拓展模型中研究了随机碳价与内生碳价的影响,其中随机碳价对电力系统影响的主要因素在于碳价的单位时间漂移率,而在内生碳价模型中,相比发电商的初始碳配额,社会整体的碳排放目标对电力系统作用有效.在未来的研究中,本研究可进一步考虑调峰机组的运营策略,或考虑消费者对绿色电力的偏好,研究不同偏好类型的消费者对电力供应链运营的影响.此外,将单期的运营策略拓展到多期也是研究的一个方向.

参考文献:

- [1] Aflaki S, Netessine S. Strategic investment in renewable energy sources: The effect of supply intermittency[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2017; 1 – 19.
- [2] Kök A G, Shang K, Yücel S. Investments in renewable and conventional energy: The role of operational flexibility[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2020, 22(5): 925 – 941.
- [3] 黄河, 曾能民, 徐鸿雁. 独占, 授权还是共享? ——存在随机产出风险的高技术企业专利运作战略研究[J]. *管理科学学报*, 2020, 23(6): 1 – 17.
Huang He, Zeng Nengmin, Xu Hongyan. Monopoly, licensing or sharing? Patent operation strategy for high-tech firms with random yield[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2020, 23(6): 1 – 17. (in Chinese)
- [4] Sunar N, Birge J R. Strategic commitment to a production schedule with uncertain supply and demand: Renewable energy in day-ahead electricity markets[J]. *Management Science*, 2019, 65(2): 714 – 734.
- [5] Ledari A M, Pasandideh S H R, Koupaei M N. A new newsvendor policy model for dual-sourcing supply chains by considering disruption risk and special order[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29: 237 – 244.
- [6] Chen J, Guo Z. Strategic sourcing in the presence of uncertain supply and retail competition[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(10): 1748 – 1760.
- [7] 王梅, 周鹏. 碳排放权分配对碳市场成本有效性的影响研究[J]. *管理科学学报*, 2020, 23(12): 1 – 11.
Wang Mei, Zhou Peng. Assessing the impact of emission permit allocation on the cost effectiveness of carbon market[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2020, 23(12): 1 – 11. (in Chinese)
- [8] 王明喜, 李明, 郭冬梅, 等. 碳排放权的非对称拍卖模型及其配置效率[J]. *管理科学学报*, 2019, 22(7): 34 – 51.
Wang Mingxi, Li Ming, Guo Dongmei, et al. An asymmetric auction model of carbon emission rights and its allocation efficiency[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(7): 34 – 51. (in Chinese)
- [9] Pang Q H, Li M Z, Yang T T, et al. Supply chain coordination with carbon trading price and consumers' environmental awareness dependent demand[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018; 1 – 11.
- [10] Chen Y Y, Li B Y, Bai Q G, et al. Decision-making and environmental implications under cap-and-trade and take-back regulations[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(4): 1 – 25.
- [11] Du S, Hu L, Song M. Production optimization considering environmental performance and preference in the cap-and-trade system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1600 – 1607.
- [12] Xu X P, He P, Xu H, et al. Supply chain coordination with green technology under cap-and-trade regulation[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 183: 433 – 442.
- [13] Zhu L, Zhou J, Yu Y, et al. Emission-dependent production for environment-aware demand in cap-and-trade system[J].

- Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2017, 16(1): 67 – 80.
- [14] 周远祺, 杨金强, 刘洋. 高能耗企业绿色转型技术的实物期权选择路线[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(1): 19 – 35.
- Zhou Yuanqi, Yang Jinqiang, Liu Yang. Selecting route of green transformation technologies of energy intensive enterprise with real options[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2019, 39(1): 19 – 35. (in Chinese)
- [15] Sunar N, Plambeck E. Allocating emissions among co-products: Implications for procurement and climate policy[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2016, 18(3): 414 – 428.
- [16] Zhang B, Xu L. Multi-item production planning with carbon cap and trade mechanism[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 144(1): 118 – 127.
- [17] Xu X Y, Xu X P, He P. Joint production and pricing decisions for multiple products with cap-and-trade and carbon tax regulations[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 112(20): 4093 – 4106.
- [18] Anand K S, Giraud-Carrier F C. Pollution regulation of competitive markets[J]. Management Science, 2020, 66(9): 4193 – 4206.
- [19] Xu X P, Zhang W, He P, et al. Production and pricing problems in make-to-order supply chain with cap-and-trade regulation[J]. Omega, 2017, 66: 248 – 257.
- [20] 王素凤, 杨善林, 彭张林. 面向多重不确定性的发电商碳减排投资研究[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 31 – 41.
- Wang Sufeng, Yang Shanlin, Peng Zhanglin. Research on the power producer's carbon abatement investment in view of multiple uncertainties[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(2): 31 – 41. (in Chinese)
- [21] Wang X, Du L. Study on carbon capture and storage (CCS) investment decision-making based on real options for China's coal-fired power plants[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 37(2): 4123 – 4131.
- [22] Xie J P, Li Z, Xia Y, et al. Optimizing capacity investment on renewable energy source supply chain[J]. Computer and Industrial Engineering, 2017, 107: 57 – 73.
- [23] 孔令丞, 李仲, 梁玲, 等. 供需数量不确定下可再生能源发电容量投资决策[J]. 管理工程学报, 2019, 33(2): 166 – 172.
- Kong Lingcheng, Li Zhong, Liang Ling, et al. Renewable energy source power capacity investment under uncertain demand and supply[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2019, 33(2): 166 – 172. (in Chinese)
- [24] Peura H, Bunn D W. Renewable power and electricity prices: The impact of forward markets[J]. Management Science, 2021, 67(8): 4643 – 5300.
- [25] Babich V, Lobel R, Yücel S. Promoting solar panel investments: Feed-in-tariff vs. tax-rebate policies[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22(6): 1148 – 1164.
- [26] 龙勇, 刘超, 汪於. 微电网利益相关者合作运营的双层规划模型[J]. 管理科学学报, 2019, 22(5): 69 – 82.
- Long Yong, Liu Chao, Wang Yu. A bi-level programming model cooperatively operated by the microgrid stakeholders[J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(5): 69 – 82. (in Chinese)
- [27] 廖诺, 赵亚莉, 贺勇, 等. 碳交易政策对电煤供应链利润及碳排放量影响的仿真分析[J]. 中国管理科学, 2018, 26(8): 154 – 163.
- Liao Nuo, Zhao Yali, He Yong, et al. Effects of carbon trading policies on profit and carbon emission of electric-coal supply chain based on simulation analysis[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(8): 154 – 163. (in Chinese)
- [28] Kök A G, Shang K, Yücel S. Impact of electricity pricing policies on renewable energy investments and carbon emissions[J]. Management Science, 2018, 64(1): 131 – 148.
- [29] 李娟, 李龙, 瞿慧, 等. 风电入网合同机制研究[J]. 管理科学学报, 2016, 19(8): 43 – 53.
- Li Juan, Li Long, Qu Hui, et al. Forecast-commitment contract of wind power integration[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(8): 43 – 53. (in Chinese)
- [30] 李力, 朱磊, 范英. 不确定条件下可再生能源项目的竞争性投资决策[J]. 中国管理科学, 2017, 25(7):

11 – 17.

Li Li, Zhu Lei, Fan Ying. Competitive investment strategy for renewable power generation under uncertainty[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(7): 11 – 17. (in Chinese)

[31] Gong X, Zhou S X. Optimal production planning with emissions trading[J]. Operation Research, 2013, 61(4): 908 – 924.

[32] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99 – 116.

[33] Hua G, Cheng T C E, Wang S. Managing carbon footprints in inventory management[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 132(2): 178 – 185.

[34] Xu X Y, Xu X P, He P. Joint production and pricing decisions for multiple products with cap-and-trade and carbon tax regulations[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 112(20): 4093 – 4106.

[35] Zhou K, Li Y. Influencing factors and fluctuation characteristics of China's carbon emission trading price[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 524: 459 – 474.

Optimization of pricing strategies for competitive grid-connected wind power and thermal power: The impact of carbon constraint policies

XIE Jia-ping¹, WEI Li-hong^{2*}, ZHANG Wei-si³, ZHU Wei-jun¹, KONG Ling-cheng⁴

1. College of Business, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China;
2. International Business School, Shanghai University of International Business and Economics, Shanghai 201620, China;
3. Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;
4. School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: The high emissions of the power industry have accelerated the advent of the carbon constraint era. This paper, considering different carbon constraint policies, constructs a cost-sharing contract for the electricity supply chain composed of power generators (a wind power supplier and a thermal power supplier) and an electricity retailer. The aim is to study the bidding strategies for interconnection to grids under carbon emission constraint, and examine the impact of different carbon policies on the electricity market. Our research shows that: 1) Whether it is possible to solve the difficulties of wind power grid connection in a competitive power supply market relates not only to the reduction of wind power intermittency, but also to the cost of thermal power generation. 2) Under an aggressive carbon cap policy or carbon tax policy, the introduction of a cost sharing contract both promotes the grid connection of wind power and achieves a pareto improvement in the profit of the power supply chain. 3) The impact of each carbon constraint policy on power supply chain depends on the scale of both the tax rate and the carbon cap. Although the cap and trade policy is not ideal for the electricity retailer, it is the optimal policy that promotes the development of the entire power system under an appropriate carbon cap. At this point, the effective measure for the government to reduce carbon emissions is either to reduce carbon caps or increase carbon trading prices, and the government's strategy follows a two-threshold policy.

Key words: on-grid price; competitive grid connection; carbon constraint policy; cost sharing; wind power

附录

附录 1

定理 1 的证明

$$E[\Pi_g^N(q_w^N, q_f^N)] = E\{pX - w_w^N \min(q_w^N, uK) - w_f^N q_f^N - (1 - \lambda) w_e [X - \min(q_w^N, uK) - q_f^N]^+\} \quad (A1)$$

$$E[C_g^N(q_w^N, q_f^N)] = E\{w_w^N \min(q_w^N, uK) + w_f^N q_f^N + (1 - \lambda) w_e [X - \min(q_w^N, uK) - q_f^N]^+\} = \rho w_w^N q_w^N + w_f^N q_f^N + \rho(1 - \lambda) w_e [\bar{a} - (q_w^N + q_f^N) - \int_{q_w^N + q_f^N}^{\bar{a}} F(x) dx] + (1 - \rho)(1 - \lambda) w_e [\bar{a} - q_f^N - \int_{q_f^N}^{\bar{a}} F(x) dx] \quad (A2)$$

售电商的期望成本关于购电量的一阶导与二阶导分别为 $\frac{\partial E[C_g^N(q_w^N, q_f^N)]}{\partial q_f^N} = w_f^N - (1 - \lambda) w_e [\rho \bar{F}(q_w^N + q_f^N) + (1 - \rho) \bar{F}(q_f^N)]$, $\frac{\partial^2 E[C_g^N(q_w^N, q_f^N)]}{\partial (q_f^N)^2} = (1 - \lambda) w_e [\rho f(q_w^N + q_f^N) + (1 - \rho) f(q_f^N)] > 0$, $\frac{\partial^2 E[C_g^N(q_w^N, q_f^N)]}{\partial q_f^N \partial q_w^N} = \rho(1 - \lambda) w_e f(q_w^N + q_f^N)$, $\frac{\partial E[C_g^N(q_w^N, q_f^N)]}{\partial q_w^N} = \rho w_w^N - \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^N + q_f^N)$, $\frac{\partial^2 E[C_g^N(q_w^N, q_f^N)]}{\partial (q_w^N)^2} = \rho(1 - \lambda) w_e f(q_w^N + q_f^N) > 0$. 海塞矩阵

$$H = \begin{bmatrix} (1 - \lambda) w_e [\rho f(q_w^N + q_f^N) + (1 - \rho) f(q_f^N)] & \rho(1 - \lambda) w_e f(q_w^N + q_f^N) \\ \rho(1 - \lambda) w_e f(q_w^N + q_f^N) & \rho(1 - \lambda) w_e f(q_w^N + q_f^N) \end{bmatrix} = \rho(1 - \rho) [(1 - \lambda) w_e]^2 f(q_f^N) f(q_w^N + q_f^N) > 0$$

0, 根据 FOC, 令一阶条件等于 0, 并联立解得

$$\begin{cases} \bar{F}(q_f^N) = \frac{w_f^N - \rho w_w^N}{(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e} \\ \bar{F}(q_w^N + q_f^N) = \frac{w_w^N}{(1 - \lambda) w_e} \end{cases} \quad (A3)$$

将上述反应函数转换为上网价格的函数表达, 即 $w_f^N = (1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^N) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^N + q_f^N)$, $w_w^N = (1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^N + q_f^N)$, 由于 $\bar{F}(q_f^N) \geq \bar{F}(q_w^N + q_f^N)$, 因而 $w_w^N = (1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^N + q_f^N) \leq w_f^N$.

$$E[\Pi_w^N(q_w^N)] = E\{w_w^N \min(q_w^N, uK) - \lambda w_e [X - \min(q_w^N, uK) - q_f^N]^+\} = \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^N + q_f^N) q_w^N - \rho \lambda w_e \times [\bar{a} - (q_w^N + q_f^N) - \int_{q_w^N + q_f^N}^{\bar{a}} F(x) dx] - (1 - \rho) \lambda w_e [\bar{a} - q_f^N - \int_{q_f^N}^{\bar{a}} F(x) dx] \quad (A4)$$

风电商的期望利润函数关于 q_w^N 的一阶导与二阶导分别为 $\frac{\partial E[\Pi_w^N(q_w^N)]}{\partial q_w^N} = \rho w_e \bar{F}(q_w^N + q_f^N) - \rho(1 - \lambda) w_e f(q_w^N + q_f^N) q_w^N$, $\frac{\partial^2 E[\Pi_w^N(q_w^N)]}{\partial (q_w^N)^2} = -\rho(2 - \lambda) w_e f(q_w^N + q_f^N) - \rho(1 - \lambda) w_e f'(q_w^N + q_f^N) q_w^N$. 定义函数 $\varphi(x, y) = f(x + y)x$, 且设 $\varphi(x, y)$ 是 x 的增函数, 是 y 的非增函数, 即 $\varphi'_x(x, y) = f'_x(x + y)x + f(x + y) > 0$, 在该假设下有 $\varphi'_{q_w^N}(q_w^N, q_f^N) > 0$, 很容易得到 $\frac{\partial^2 E[\Pi_w^N(q_w^N)]}{\partial (q_w^N)^2} < 0$, 即风电商的利润函数是 q_w^N 的凹函数, 根据 FOC 可得, $\bar{F}(q_w^N + q_f^N) = (1 - \lambda) f(q_w^N + q_f^N) q_w^N$.

$$\Pi_f(q_f^N) = w_f^N q_f^N - c q_f^N = [(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^N) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^N + q_f^N) - c] q_f^N \quad (A5)$$

一阶导与二阶导分别为 $\frac{\partial \Pi_f(q_f^N)}{\partial q_f^N} = (1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^N) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^N + q_f^N) - c - [(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \times f(q_f^N) + \rho(1 - \lambda) w_e f(q_w^N + q_f^N)] q_f^N$, $\frac{\partial^2 \Pi_f(q_f^N)}{\partial (q_f^N)^2} = -2[(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e f(q_f^N) + \rho(1 - \lambda) w_e f(q_w^N + q_f^N)] - [(1 - \rho)(1 - \lambda) \times w_e f'(q_f^N) + \rho(1 - \lambda) w_e f'(q_w^N + q_f^N)] q_f^N$. 根据假设 $\varphi'_{q_f^N}(q_f^N, 0) > 0$, $\varphi'_{q_f^N}(q_f^N, q_w^N) > 0$, 因而 $\frac{\partial^2 \Pi_f(q_f^N)}{\partial (q_f^N)^2} < 0$, 火电商的利润函数是 q_f^N 的凹函数, 根据 FOC 可得

$$(1 - \rho) \bar{F}(q_f^N) + \rho \bar{F}(q_w^N + q_f^N) - [(1 - \rho) f(q_f^N) + \rho f(q_w^N + q_f^N)] q_f^N = \frac{c}{(1 - \lambda) w_e} \quad (A6)$$

证毕.

附录 2

定理 2 的证明

根据定理 1, $w_f^c = (1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^c) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^c + q_f^c)$, $w_w^c = (1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^c + q_f^c)$, 风电的上网量满足的等式为 $\bar{F}(q_w^c + q_f^c) = (1 - \lambda)f(q_w^c + q_f^c) q_w^c$.

$$\Pi_f(q_f^c) = w_f^c q_f^c - c q_f^c + s(L - e_f q_f^c)^+ - b(e_f q_f^c - L)^+ = [(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^c) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^c + q_f^c) - c] \times q_f^c + s(L - e_f q_f^c)^+ - b(e_f q_f^c - L)^+ \quad (A7)$$

火电商的最优利润为 $\Pi_f(q_f^c) = \max[\Pi_f^s(q_f^c), \Pi_f^b(q_f^c)]$, $\Pi_f^s(q_f^c)$ 是火电商在出售多余的碳排放配额时的最优利润, 其决策过程如下

$$\Pi_f^s(q_f^c) = \max\{[(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^c) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^c + q_f^c) - c - s e_f] q_f^c + sL\} \quad (A8)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq q_f^c \leq \frac{L}{e_f} \quad (A9)$$

一阶导与二阶导分别为 $\frac{\partial \Pi_f^s(q_f^c)}{\partial q_f^c} = (1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^c) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^c + q_f^c) - c - s e_f - [(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e f(q_f^c) + \rho(1 - \lambda) w_e f(q_w^c + q_f^c)] q_f^c$, $\frac{\partial^2 \Pi_f^s(q_f^c)}{\partial (q_f^c)^2} = -2[(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e f(q_f^c) + \rho(1 - \lambda) w_e f(q_w^c + q_f^c)] - [(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e f'(q_f^c) + \rho(1 - \lambda) w_e f'(q_w^c + q_f^c)] q_f^c$. 根据假设 $\varphi_{q_f^c}^c(q_f^c, 0) > 0$, $\varphi_{q_f^c}^c(q_f^c, q_w^c) > 0$, 因而 $\frac{\partial^2 \Pi_f^s(q_f^c)}{\partial (q_f^c)^2} < 0$, 火电商的利润函数是 q_f^c 的凹函数, 根据 FOC 可得

$$(1 - \rho) \bar{F}(q_f^c) + \rho \bar{F}(q_w^c + q_f^c) - [(1 - \rho)f(q_f^c) + \rho f(q_w^c + q_f^c)] q_f^c = \frac{c + s e_f}{(1 - \lambda) w_e} \quad (A10)$$

由于 $(1 - \rho) \bar{F}(q_f^c) + \rho \bar{F}(q_w^c + q_f^c) < \bar{F}(q_f^c) \leq 1$, 为保证上述等式有解, 本研究设 $c + s e_f \leq (1 - \lambda) w_e$, 并将该等式的解记为 q_f^{s*} , 则火电商在此种情形下的反应函数是 $q_f^s(q_w^c) = \max[0, \min(q_f^{s*}, \frac{L}{e_f})]$, 即 $L \geq e_f q_f^{s*}$, $q_f^{cs}(q_w^c) = \max[0, q_f^{s*}]$; $L < e_f q_f^{s*}$, $q_f^{cs}(q_w^c) = \frac{L}{e_f}$.

$\Pi_f^{cb}(q_f^c)$ 是火电商在碳排放配额不足而在碳交易市场上购买碳排放权时的最优利润, 其决策过程如下

$$\Pi_f^{cb}(q_f^c) = \max\{[(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_f^c) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_w^c + q_f^c) - c - b e_f] q_f^c + bL\} \quad (A11)$$

$$\text{s. t. } q_f^c \geq \frac{L}{e_f} \quad (A12)$$

同理, 火电商的利润函数是 q_f^c 的凹函数, 根据 FOC 可得

$$(1 - \rho) \bar{F}(q_f^c) + \rho \bar{F}(q_w^c + q_f^c) - [(1 - \rho)f(q_f^c) + \rho f(q_w^c + q_f^c)] q_f^c = \frac{c + b e_f}{(1 - \lambda) w_e} \quad (A13)$$

同样设 $c + b e_f \leq (1 - \lambda) w_e$, 并将该等式的解记为 q_f^{b*} . $q_f^{cb}(q_w^c) = \max[\frac{L}{e_f}, \min(q_f^{b*}, \infty)] = \max[\frac{L}{e_f}, q_f^{b*}]$, 即 $L \geq e_f q_f^{b*}$, $q_f^{cb}(q_w^c) = \frac{L}{e_f}$; $0 \leq L < e_f q_f^{b*}$, $q_f^{cb}(q_w^c) = \max[0, q_f^{b*}]$.

根据假设可得 $\frac{c + s e_f}{(1 - \lambda) w_e} \leq \frac{c + b e_f}{(1 - \lambda) w_e}$, 两者分别满足式(A10)与式(A13), 故有

$$\begin{cases} (1 - \rho) [\bar{F}(q_f^{s*}) - \bar{F}(q_f^{b*})] + \rho [\bar{F}(q_w^{c*1} + q_f^{s*}) - \bar{F}(q_w^{c*3} + q_f^{b*})] \leq [(1 - \rho)f(q_f^{s*}) + \rho f(q_w^{c*1} + q_f^{s*})] q_f^{s*} - \\ [(1 - \rho)f(q_f^{b*}) + \rho f(q_w^{c*3} + q_f^{b*})] q_f^{b*} \end{cases} \quad (A14)$$

已知 (q_w^{c*}, q_f^{c*}) 一定满足的关系为 $\bar{F}(q_w^* + q_f^*) = (1 - \lambda)f(q_w^* + q_f^*) q_w^*$. 等式两边同时对 q_w^* 求导后可得 $\frac{\partial q_f^{c*}}{\partial q_w^{c*}} < 0$.

总的电力订单量满足的条件为 $\bar{F}(Q^{c*}) = (1 - \lambda)f(Q^{c*}) q_w^*$, 即 $\frac{\bar{F}(Q^{c*})}{(1 - \lambda)f(Q^{c*})} = q_w^*$. 定义 $\zeta(x) = \frac{\bar{F}(x)}{(1 - \lambda)f(x)} =$

$\frac{1}{(1 - \lambda)h(x)}$, 则 $\zeta(x)$ 为减函数.

因而, 假设 $q_f^{s*} < q_f^{b*}$, 必有 $q_w^{c*1} > q_w^{c*3}$, $\zeta(Q^{c*1}) > \zeta(Q^{c*3}) \Leftrightarrow Q^{c*1} < Q^{c*3}$. $(1 - \rho)[\bar{F}(q_f^{s*}) - \bar{F}(q_f^{b*})] + \rho[\bar{F}(q_w^{c*1} + q_f^{s*}) -$

$$\bar{F}(q_w^{C*2} + q_i^b)] = (1 - \rho)[\bar{F}(q_i^s) - \bar{F}(q_i^b)] + \rho[\bar{F}(Q^{C*1}) - \bar{F}(Q^{C*3})] > 0.$$

定义函数 $\psi(x, y) = [(1 - \rho)f(x) + \rho f(y + x)]x = (1 - \rho)\varphi(x, 0) + \rho\varphi(x, y)$, 则根据假设可得 $\psi(q_i^s, q_w^{C*1}) < \psi(q_i^b, q_w^{C*1}) < \psi(q_i^b, q_w^{C*3})$.

不等式(A12)左侧大于0, 而右侧小于0, 因而矛盾. 故有 $q_i^s \geq q_i^b$.

将两种情形下火电商的反应函数进行合并. 当 $L \geq \max[0, e_i q_i^s]$ 时, $q_i^{Cs}(q_w^C) = \max[0, q_i^s], q_i^{Cb}(q_w^C) = \frac{L}{e_i}$. 在利润为 $\Pi_i^{Cs}(q_i^C)$ 时, $\frac{L}{e_i}$ 是其可行解但并未在该点处取得最大值, 因而 $q_i^C(q_w^C) = \max[0, q_i^s]$. 当 $\max[0, e_i q_i^b] \leq L < \max[0, e_i q_i^s]$ 时, $q_i^C(q_w^C) = \frac{L}{e_i}$. 同理, 当 $0 \leq L < \max[0, e_i q_i^b]$ 时, $q_i^C(q_w^C) = \max[0, q_i^b]$.

联立风电商与火电商的反应函数, 售电商从风电商与火电商的最优购电量满足以下条件

1) $L \geq \bar{L} = e_i q_i^{C*1}$ 时, $q_i^{C*1} = \max[0, q_i^s]$

$$\begin{cases} (1 - \rho)\bar{F}(q_i^s) + \rho\bar{F}(q_w^{C*1} + q_i^s) - [(1 - \rho)f(q_i^s) + \rho f(q_w^{C*1} + q_i^s)] q_i^s = \frac{c + s e_i}{(1 - \lambda) w_e} \\ \bar{F}(q_w^{C*1} + q_i^{C*1}) = (1 - \lambda)f(q_w^{C*1} + q_i^{C*1}) q_w^{C*1} \end{cases} \quad (A15)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} (1 - \rho)[\bar{F}(q_i^s) - f(q_i^s)] + \rho f(q_w^{C*1} + q_i^s)[(1 - \lambda) q_w^{C*1} - q_i^s] = \frac{c + s e_i}{(1 - \lambda) w_e} \\ \bar{F}(q_w^{C*1} + q_i^s) = (1 - \lambda)f(q_w^{C*1} + q_i^s) q_w^{C*1} \end{cases} \quad (A16)$$

2) $\underline{L} \leq L < \bar{L}$ 时

$$\begin{cases} q_i^{C*2} = \frac{L}{e_i} \\ \bar{F}(q_w^{C*2} + \frac{L}{e_i}) = (1 - \lambda)f(q_w^{C*2} + \frac{L}{e_i}) q_w^{C*2} \end{cases} \quad (A17)$$

3) $0 \leq L < \underline{L} = e_i q_i^{C*3}$ 时, $q_i^{C*3} = \max[0, q_i^b]$

$$\begin{cases} (1 - \rho)[\bar{F}(q_i^b) - f(q_i^b)] + \rho f(q_w^{C*3} + q_i^b)[(1 - \lambda) q_w^{C*3} - q_i^b] = \frac{c + b e_i}{(1 - \lambda) w_e} \\ \bar{F}(q_w^{C*3} + q_i^{C*3}) = (1 - \lambda)f(q_w^{C*3} + q_i^{C*3}) q_w^{C*3} \end{cases} \quad (A18)$$

由于 $Q^{C*} = q_w^{CC*} + q_i^{CC*}$, 电力最优上网价格满足的条件为

$$\begin{cases} w_i^{C*} = (1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \bar{F}(q_i^{C*}) + \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}(Q^{C*}) \\ w_w^{C*} = (1 - \lambda) w_e \bar{F}(Q^{C*}) \end{cases} \quad (A19)$$

证毕.

附录3

性质1的证明

由于 $q_i^s \geq q_i^b$, 很容易得到 $q_i^s \geq q_i^{C*2} \geq q_i^b$. 若 $q_i^{C*1} = 0$, 则必有 $q_i^{C*3} = 0$, 此时 q_i^{C*2}, q_i^b 不在可行域内, 因而 $q_i^{C*} = 0, q_i^{C*1} = q_i^{C*2} = q_i^{C*3}$. 故 $q_i^{C*1} \geq q_i^{C*2} \geq q_i^{C*3}$.

以下分析中, 假设 $q_i^s \geq 0$. 因而, $q_w^{C*1} \leq q_w^{C*2} \leq q_w^{C*3}$, 且对 $\forall L_1 \leq L_2, q_w^{C*2}(L_1) \geq q_w^{C*2}(L_2)$.

$\zeta(Q^{C*1}) \leq \zeta(Q^{C*2}) \leq \zeta(Q^{C*3}) \Leftrightarrow Q^{C*1} \geq Q^{C*2} \geq Q^{C*3}$, 且对 $\forall L_1 \leq L_2, Q^{C*2}(L_1) \leq Q^{C*2}(L_2)$.

证毕.

附录4

性质2的证明

根据式(A19)以及性质1, 很容易得到 $w_w^{C*1} \leq w_w^{C*2} \leq w_w^{C*3}; w_i^{C*1} \leq w_i^{C*2} \leq w_i^{C*3}; w_w^{C*} \leq w_i^{C*}$.

证明略.

附录 5

性质 3 的证明

根据性质 1 与性质 2, $E\Pi_w^{C*1} \leq E\Pi_w^{C*2} \leq E\Pi_w^{C*3}$. 由于对 $\forall L_1 \leq L_2, q_w^{C*2}(L_1) \geq q_w^{C*2}(L_2)$, 因而 $E[\Pi_w^{C*2}(L_1)] \geq E[\Pi_w^{C*2}(L_2)]$, 因而 $E[\Pi_w^{C*}]$ 是 L 的非增函数.

$$\Pi_f^{C*1} = [(1-\rho)(1-\lambda)w_e\bar{F}(q_f^{C*1}) + \rho(1-\lambda)w_e\bar{F}(Q^{C*1}) - c]q_f^{C*1} + s(L^1 - e_f q_f^{C*1}) \tag{A20}$$

$$\Pi_f^{C*2} = [(1-\rho)(1-\lambda)w_e\bar{F}(q_f^{C*2}) + \rho(1-\lambda)w_e\bar{F}(Q^{C*2}) - c]q_f^{C*2} \tag{A21}$$

$$\Pi_f^{C*3} = [(1-\rho)(1-\lambda)w_e\bar{F}(q_f^{C*3}) + \rho(1-\lambda)w_e\bar{F}(Q^{C*3}) - c]q_f^{C*3} + b(L^3 - e_f q_f^{C*3}) \tag{A22}$$

定义 $H(q_w, q_f) = (1-\lambda)w_e q_f [(1-\rho)\bar{F}(q_f) + \rho\bar{F}(q_w + q_f)] - c q_f = M(q_f) - c q_f$, 对于 $\forall q_f \leq q_f^{C*1}, \frac{\partial H(q_f)}{\partial q_f} = \frac{\partial M(q_f)}{\partial q_f} - c \geq c + s e_f - c = s e_f \geq 0$. 因而, $H(q_w^{C*1}, q_f^{C*1}) \geq H(q_w^{C*1}, q_f^{C*2}) \geq H(q_w^{C*1}, q_f^{C*3}), H(q_w^{C*2}, q_f^{C*2}) \geq H(q_w^{C*2}, q_f^{C*3})$; 由于 $H(q_w^{C*1}, q_f^{C*2}) \geq H(q_w^{C*2}, q_f^{C*2}), H(q_w^{C*2}, q_f^{C*3}) \geq H(q_w^{C*3}, q_f^{C*3})$, 能够得到 $H(q_w^{C*1}, q_f^{C*1}) \geq H(q_w^{C*2}, q_f^{C*2}) \geq H(q_w^{C*3}, q_f^{C*3})$. 而 $s(L^1 - e_f q_f^{C*1}) \geq 0 \geq b(L^3 - e_f q_f^{C*3})$, 故 $\Pi_f^{C*1} \geq \Pi_f^{C*2} \geq \Pi_f^{C*3}$. 已知 $\frac{\partial q_f^{C*2}}{\partial L} > 0, \frac{\partial q_w^{C*2}}{\partial L} < 0, \frac{\partial Q^{C*2}}{\partial L} > 0, \Pi_f^{C*2} = H(q_w^{C*2}(L), q_f^{C*2}(L))$. 设 $\forall L_1 < L_2$ 且 $L_1, L_2 \in [e_f q_f^b, e_f q_f^s]$, 则 $q_w^{C*2}(L_1) > q_w^{C*2}(L_2); q_f^{C*2}(L_1) < q_f^{C*2}(L_2), H(q_w^{C*2}(L_1), q_f^{C*2}(L_1)) < H(q_w^{C*2}(L_1), q_f^{C*2}(L_2)) < H(q_w^{C*2}(L_2), q_f^{C*2}(L_2))$. 因而 Π_f^{C*2} 是 L 的增函数, 故有 Π_f^{C*} 是 L 的增函数.

$$ECE = e_f E\left\{q_f^* + [X - \min(q_w^*, uK) - q_f^*]^+\right\} = e_f \left\{\bar{a} - \rho q_w^* - \rho \int_{q_w^*+q_f^*}^{\bar{a}} F(x) dx - (1-\rho) \int_{q_f^*}^{\bar{a}} F(x) dx\right\} \tag{A23}$$

根据性质 1, 有 $ECE^{C*1} \geq ECE^{C*2} \geq ECE^{C*3}$. 对于 $\forall L_1 \leq L_2, q_f^{C*2}(L_1) \leq q_f^{C*2}(L_2)$, 因而 $ECE^{C*2}(L_1) \leq ECE^{C*2}(L_2)$, 故 ECE^{C*} 是 L 的非减函数.

证毕.

附录 6

性质 4 的证明

当 $L \geq \bar{L}$ 时, 将等式 (A15) 两边同时对 s 求导, 联立求解可得

$$\frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial s} = -\frac{\beta_2 \gamma_1}{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2} \frac{\partial q_f^s}{\partial s} = \frac{\alpha_2 \gamma_1}{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2}, \gamma_1 = -\frac{e_f}{(1-\lambda)w_e} < 0, \text{因而 } \frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial s} > 0, \frac{\partial q_f^s}{\partial s} < 0. \frac{\partial Q^{C*1}}{\partial s} = \frac{\gamma_1(\alpha_2 - \beta_2)}{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2} < 0. \text{类似地, } \frac{\partial q_w^{C*3}}{\partial b} > 0, \frac{\partial q_f^b}{\partial b} < 0, \frac{\partial Q^{C*3}}{\partial b} < 0.$$

其中, $\alpha_1 = \rho \varphi'_{q_f^s}(q_f^s, q_w^{C*1}), \beta_1 = (1-\rho)f(q_f^s) + (1-\rho)\varphi'_{q_f^s}(q_f^s, 0) + \rho f(q_w^{C*1} + q_f^s) + \rho \varphi'_{q_f^s}(q_f^s, q_w^{C*1}), \alpha_2 = (1-\lambda)\varphi'_{q_w^{C*1}}(q_w^{C*1}, q_f^s) + f(q_w^{C*1} + q_f^s), \beta_2 = (1-\lambda)\varphi'_{q_w^{C*1}}(q_w^{C*1}, q_f^s) + \lambda f(q_w^{C*1} + q_f^s). \alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2 = [\beta_2 + (1-\lambda)f(q_w^{C*1} + q_f^s)] [(1-\rho)f(q_f^s) + (1-\rho)\varphi'_{q_f^s}(q_f^s, 0) + \rho f(q_w^{C*1} + q_f^s)] + \alpha_1(1-\lambda)f(q_w^{C*1} + q_f^s) > 0.$

$$\frac{\partial w_w^{C*}}{\partial s} = -(1-\lambda)w_e f(q_w^{C*} + q_f^{C*}) \left(\frac{\partial q_w^{C*}}{\partial s} + \frac{\partial q_f^{C*}}{\partial s} \right) \tag{A24}$$

$$\frac{\partial w_f^{C*}}{\partial s} = -(1-\rho)(1-\lambda)w_e f(q_f^{C*}) \frac{\partial q_f^{C*}}{\partial s} - \rho(1-\lambda)w_e f(q_w^{C*} + q_f^{C*}) \left(\frac{\partial q_w^{C*}}{\partial s} + \frac{\partial q_f^{C*}}{\partial s} \right) \tag{A25}$$

$$\frac{\partial q_f^s}{\partial s} < 0, \frac{\partial Q^{C*}}{\partial s} < 0, \text{因而 } \frac{\partial w_w^{C*1}}{\partial s} > 0, \frac{\partial w_f^{C*1}}{\partial s} > 0; \text{类似地, } \frac{\partial w_w^{C*3}}{\partial b} > 0, \frac{\partial w_f^{C*3}}{\partial b} > 0.$$

证毕.

附录 7

性质 5、性质 6 的证明

当 $L \geq \bar{L}$ 时, 将式 (A15) 两边同时对 ρ 求导可得

$$\rho \varphi'_{q_f^s}(q_f^s, q_w^{C*1}) \frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \rho} + [(1-\rho)f(q_f^s) + (1-\rho)\varphi'_{q_f^s}(q_f^s, 0) + \rho f(q_w^{C*1} + q_f^s) + \rho \varphi'_{q_f^s}(q_f^s, q_w^{C*1})] \frac{\partial q_f^s}{\partial \rho} =$$

$$\bar{F}(q_w^{C*1} + q_f^{s*}) - \bar{F}(q_f^s) + [f(q_f^s) - f(q_w^{C*1} + q_f^s)] q_f^s \tag{A26}$$

$$[(1 - \lambda) \varphi'_{q_w^{C*1}}(q_w^{C*1}, q_f^{s*}) + f(q_w^{C*1} + q_f^s)] \frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \rho} + [(1 - \lambda) \varphi'_{q_w^{C*1}}(q_w^{C*1}, q_f^s) + \lambda f(q_w^{C*1} + q_f^s)] \frac{\partial q_f^s}{\partial \rho} = 0 \tag{A27}$$

联立求解可得

$$\begin{cases} \frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \rho} = -\frac{\beta_2 \gamma_2}{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2} \\ \frac{\partial q_f^s}{\partial \rho} = \frac{\alpha_2 \gamma_2}{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2} \end{cases} \tag{A28}$$

其中 $\gamma_2 = \bar{F}(q_w^{C*1} + q_f^s) - \bar{F}(q_f^s) + [f(q_f^s) - f(q_w^{C*1} + q_f^s)] q_f^s$.

根据式 (A15), 进一步化简得, $\gamma_2 = \frac{1}{\rho} \left[\frac{c + s e_f}{(1 - \lambda) w_e} + f(q_f^s) q_f^s - \bar{F}(q_f^s) \right] \cdot \frac{\partial Q^{C*1}}{\partial \rho} = \frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \rho} + \frac{\partial q_f^{C*1}}{\partial \rho} = \frac{\gamma_2 (\alpha_2 - \beta_2)}{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2}$, 当 $\gamma_2 > 0$, 即 $k = \frac{c + s e_f}{w_e} > (1 - \lambda) [\bar{F}(q_f^s) - f(q_f^s) q_f^s] = k_1$ 时, $\frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial q_f^s}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial Q^{C*1}}{\partial \rho} > 0$; 反之, $\frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial q_f^s}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial Q^{C*1}}{\partial \rho} < 0$.

$$\underline{L} \leq L < \bar{L} \text{ 时, } \frac{\partial q_w^{C*2}}{\partial \rho} = \frac{\partial q_f^{C*2}}{\partial \rho} = \frac{\partial Q^{C*2}}{\partial \rho} = 0.$$

$L < \underline{L}$ 时, ρ 的影响与 $L \geq \bar{L}$ 情形下类似. 不同的是各参数发生了变化, 其中, $\alpha_3 = \rho \varphi'_{q_f^b}(q_f^b, q_w^{C*3}), \beta_3 = (1 - \rho) f(q_f^b) + (1 - \rho) \varphi'_{q_f^b}(q_f^b, 0) + \rho f(q_w^{C*3} + q_f^b) + \rho \varphi'_{q_f^b}(q_f^b, q_w^{C*3}), \alpha_4 = (1 - \lambda) \varphi'_{q_w^{C*3}}(q_w^{C*3}, q_f^b) + f(q_w^{C*3} + q_f^b), \beta_4 = (1 - \lambda) \times \varphi'_{q_w^{C*3}}(q_w^{C*3}, q_f^b) + \lambda f(q_w^{C*3} + q_f^b), \gamma_3 = \frac{1}{\rho} \left[\frac{c + b e_f}{(1 - \lambda) w_e} + f(q_f^b) q_f^b - \bar{F}(q_f^b) \right]$. 当 $\frac{c + b e_f}{(1 - \lambda) w_e} > (1 - \lambda) [\bar{F}(q_f^b) - f(q_f^b) q_f^b] = k_2$ 时, $\frac{\partial q_w^{C*3}}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial q_f^b}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial Q^{C*3}}{\partial \rho} > 0$; 反之, $\frac{\partial q_w^{C*3}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial q_f^b}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial Q^{C*3}}{\partial \rho} < 0$.

将上述结论进行梳理, 即可得到表 2.

证毕.

附录 8

性质 7、性质 8 的证明

当 $L \geq \bar{L}$ 时, 将式 (A15) 两边同时对 λ 求导可得

$$[(1 - \rho) f(q_f^s) + \rho f(q_w^{C*1} + q_f^s) + (1 - \rho) \varphi'_{q_f^s}(q_f^s, 0) + \rho \varphi'_{q_f^s}(q_f^s, q_w^{C*1})] \frac{\partial q_f^s}{\partial \lambda} + \rho \varphi'_{q_f^s}(q_f^s, q_w^{C*1}) \frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \lambda} = -\frac{c + s e_f}{(1 - \lambda)^2 w_e} \tag{A29}$$

$$[(1 - \lambda) \varphi'_{q_w^{C*1}}(q_w^{C*1}, q_f^s) + f(q_w^{C*1} + q_f^s)] \frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \lambda} + [(1 - \lambda) \varphi'_{q_w^{C*1}}(q_w^{C*1}, q_f^s) + \lambda f(q_w^{C*1} + q_f^s)] \frac{\partial q_f^s}{\partial \lambda} = f(q_w^{C*1} + q_f^s) q_w^{C*1} \tag{A30}$$

联立求解得

$$\begin{cases} \frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \lambda} = \frac{\gamma_5 \beta_1 - \gamma_4 \beta_2}{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2} \\ \frac{\partial q_f^s}{\partial \lambda} = \frac{\alpha_2 \gamma_4 - \alpha_1 \gamma_5}{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2} \end{cases} \tag{A31}$$

其中 $\gamma_4 = -\frac{c + s e_f}{(1 - \lambda)^2 w_e} < 0, \gamma_5 = f(q_w^{C*1} + q_f^s) q_w^{C*1} > 0, \gamma_5 \beta_1 - \gamma_4 \beta_2 > 0$ 恒成立; $\alpha_2 \gamma_3 - \alpha_1 \gamma_5 < 0$ 恒成立. 因而, $\frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \lambda} >$

$0, \frac{\partial q_f^s}{\partial \lambda} < 0$

$$\frac{\partial Q^{C*1}}{\partial \lambda} = \frac{\partial q_w^{C*1}}{\partial \lambda} + \frac{\partial q_f^{C*1}}{\partial \lambda} = \frac{\gamma_5 (\beta_1 - \alpha_1) + \gamma_4 (\alpha_2 - \beta_2)}{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2}, \gamma_5 (\beta_1 - \alpha_1) > -\gamma_4 (\alpha_2 - \beta_2) \text{ 即 } \frac{c + s e_f}{w_e} < (1 - \lambda)^2 \times$$

$$\frac{\gamma_5(\beta_1 - \alpha_1)}{\alpha_2 - \beta_2} = (1-\lambda) q_w^{C*1} [(1-\rho)f(q_i^s) + (1-\rho)\varphi'_{q_i^s}(q_i^s, 0) + \rho f(q_w^{C*1} + q_i^s)] = k_3 \text{ 时, } \frac{\partial Q^{C*1}}{\partial \lambda} > 0, \text{ 反之, } \frac{\partial Q^{C*1}}{\partial \lambda} < 0.$$

$$\underline{L} \leq L < \bar{L} \text{ 时, } \frac{\partial q_i^{C*2}}{\partial \lambda} = 0, \frac{\partial q_w^{C*2}}{\partial \lambda} = \frac{f(q_w^{C*2} + \frac{L}{e_f}) q_w^{C*2}}{(1-\lambda)\varphi'_{q_w^{C*2}}(q_w^{C*2}, \frac{L}{e_f}) + f(q_w^{C*2} + \frac{L}{e_f})} > 0, \frac{\partial Q^{C*2}}{\partial \lambda} > 0.$$

$L < \underline{L}$ 时, 同样与 $L \geq \bar{L}$ 的情形类似, 其中 $k_4 = (1-\lambda)^2 \frac{\gamma_6(\beta_3 - \alpha_3)}{\alpha_4 - \beta_4} = (1-\lambda) q_w^{C*3} [(1-\rho)f(q_i^b) + (1-\rho)\varphi'_{q_i^b}(q_i^b, 0) + \rho f(q_w^{C*3} + q_i^b)]$, $\gamma_6 = -\frac{c + b e_f}{(1-\lambda)^2 w_e} < 0$, $\gamma_7 = f(q_w^{C*3} + q_i^b) q_w^{C*3}$

将上述结论进行梳理, 即可得到表 3.

证毕.

附录 9

性质 9 的证明

$$\frac{\partial w_i^{C*}}{\partial \rho} = (1-\lambda) w_e \left\{ [\bar{F}(q_w^{C*} + q_i^{C*}) - \bar{F}(q_i^{C*})] - (1-\rho)f(q_i^{C*}) \frac{\partial q_i^{C*}}{\partial \rho} - \rho f(q_w^{C*} + q_i^{C*}) \left(\frac{\partial q_w^{C*}}{\partial \rho} + \frac{\partial q_i^{C*}}{\partial \rho} \right) \right\} \quad (A32)$$

$$\frac{\partial w_w^{C*}}{\partial \rho} = -(1-\lambda) w_e f(q_w^{C*} + q_i^{C*}) \left(\frac{\partial q_w^{C*}}{\partial \rho} + \frac{\partial q_i^{C*}}{\partial \rho} \right) \quad (A33)$$

在 $L \geq \bar{L}$ 或 $L < \underline{L}$ 时, 满足条件 $k > k_1 (k_2)$ 下, $\frac{\partial Q^{C*}}{\partial \rho} > 0$, 有 $\frac{\partial w_w^{C*}}{\partial \rho} \leq 0$, 反之, $\frac{\partial w_w^{C*}}{\partial \rho} \geq 0$; $\underline{L} \leq L < \bar{L}$ 时, $\frac{\partial w_w^{C*}}{\partial \rho} = 0$. $L \geq \bar{L}$ 时, 满足条件 $k > k_1$ 下, $\frac{\partial q_i^{C*}}{\partial \rho} > 0$, 故有 $\frac{\partial w_i^{C*}}{\partial \rho} < 0$. $\underline{L} \leq L < \bar{L}$ 时, $\frac{\partial w_i^{C*}}{\partial \rho} = (1-\lambda) w_e [\bar{F}(q_w^{C*} + q_i^{C*}) - \bar{F}(q_i^{C*})] < 0$. $L < \underline{L}$ 时, 类似地, 在条件 $k > k_2$ 下, $\frac{\partial w_i^{C*}}{\partial \rho} < 0$.

$$\frac{\partial w_i^{C*}}{\partial \lambda} = -(1-\rho) w_e \bar{F}(q_i^{C*}) - (1-\rho)(1-\lambda) w_e f(q_i^{C*}) \frac{\partial q_i^{C*}}{\partial \lambda} - \rho w_e \bar{F}(q_w^{C*} + q_i^{C*}) - \rho(1-\lambda) w_e f(q_w^{C*} + q_i^{C*}) \left(\frac{\partial q_w^{C*}}{\partial \lambda} + \frac{\partial q_i^{C*}}{\partial \lambda} \right) \quad (A34)$$

$$\frac{\partial w_w^{C*}}{\partial \lambda} = -(1-\lambda) w_e f(q_w^{C*} + q_i^{C*}) \left(\frac{\partial q_w^{C*}}{\partial \lambda} + \frac{\partial q_i^{C*}}{\partial \lambda} \right) - w_e \bar{F}(q_w^{C*} + q_i^{C*}) \quad (A35)$$

在 $k < k_3 (k < k_4)$ 时, $\frac{\partial Q^{C*}}{\partial \lambda} > 0$, 因而 $\frac{\partial w_w^{C*}}{\partial \lambda} < 0$. 在 $\underline{L} \leq L < \bar{L}$ 时, $\frac{\partial q_i^{C*2}}{\partial \lambda} = 0$, $\frac{\partial Q^{C*2}}{\partial \lambda} > 0$, 此时一定有 $\frac{\partial w_i^{C*}}{\partial \lambda} < 0$. 其他情形下, $\frac{\partial w_i^{C*}}{\partial \lambda}$ 的符号并不能确定.

证毕.

附录 10

表 5 的证明

类似于性质 1、性质 2 的证明过程, 并将结果进行合并整理, 可以得到 4 种碳减排政策环境下最优决策的相对关系.

证明略.

附录 11

表 6 的证明

类似于性质 3 的证明过程, 并根据表 5 的内容即可得到表 6.

证明略.

附录 12

表 7 的证明

$$\Pi_i^{N*} = [(1-\rho)(1-\lambda) w_e \bar{F}(q_i^{N*}) + \rho(1-\lambda) w_e \bar{F}(Q^{N*}) - c] q_i^{N*} \quad (A36)$$

$$\Pi_f^{T*} = [(1-\rho)(1-\lambda)w_e \bar{F}(q_f^{T*}) + \rho(1-\lambda)w_e \bar{F}(Q^{T*}) - c]q_f^{T*} - t e_f q_f^{T*} \quad (A37)$$

1. $t \leq s$, $H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) \geq H^{CT*}(q_w^{N*}, q_f^{CT*}) \geq H^{T*}(q_w^{N*}, q_f^{T*}) \geq H^{C*}(q_w^{N*}, q_f^{C*})$, 由于 $q_w^{N*} \leq q_w^{CT*} \leq q_w^{T*} \leq q_w^{C*}$, 可以得到 $H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) \geq H^{CT*}(q_w^{CT*}, q_f^{CT*}) \geq H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) \geq H^{C*}(q_w^{C*}, q_f^{C*})$, 因而 $\Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{T*}$, $\Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{C*2} \geq \Pi_f^{C*3}$, $\Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{CT*}$.

1.1 $L \geq e_f q_f^{N*}$ 时, $\Pi_f^{N*} = \Pi_f^{CT*}$, $\Pi_f^{C*} = \Pi_f^{C*1} = H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1}) + s(L - e_f q_f^{C*1})$, 因而 $\Pi_f^{CT*} = \Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{T*}$.

当 $L \geq \frac{H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1}$ 时, $\Pi_f^{C*1} \geq \Pi_f^{N*}$, 有 $\Pi_f^{C*} \geq \Pi_f^{N*} = \Pi_f^{CT*} \geq \Pi_f^{T*}$.

当 $\frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T*} \leq L < \frac{H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1}$ 时,

$\Pi_f^{C*1} < \Pi_f^{N*}$, $\Pi_f^{C*1} \geq \Pi_f^{T*}$, 有 $\Pi_f^{N*} = \Pi_f^{CT*} > \Pi_f^{C*} \geq \Pi_f^{T*}$.

当 $L < \frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T*}$ 时, $\Pi_f^{C*1} < \Pi_f^{T*}$, 有 $\Pi_f^{N*} = \Pi_f^{CT*} \geq \Pi_f^{T*} > \Pi_f^{C*}$.

1.2 $e_f q_f^{T*} \leq L < e_f q_f^{N*}$ 时, $\Pi_f^{N*} > \Pi_f^{CT*} = H^{CT*}(q_w^{CT*}, q_f^{CT*}) = \Pi_f^{C*2}(q_w^{C*2}, \frac{L}{e_f}) \geq H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) \geq \Pi_f^{T*}$, $\Pi_f^{C*} = \Pi_f^{C*1} > \Pi_f^{CT*}$.

当 $L \geq \frac{H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1}$ 时, $\Pi_f^{C*1} \geq \Pi_f^{N*}$, 有 $\Pi_f^{C*} \geq \Pi_f^{N*} > \Pi_f^{CT*} \geq \Pi_f^{T*}$.

当 $\frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T*} \leq L < \frac{H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1}$ 时,

$\Pi_f^{C*1} < \Pi_f^{N*}$, $\Pi_f^{C*1} \geq \Pi_f^{T*}$, $\Pi_f^{CT*} \leq \Pi_f^{C*1}$, 有 $\Pi_f^{N*} > \Pi_f^{C*} \geq \Pi_f^{CT*} \geq \Pi_f^{T*}$.

当 $L < \frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T*}$ 时, 有 $\Pi_f^{N*} > \Pi_f^{CT*} \geq \Pi_f^{T*} > \Pi_f^{C*}$, 与 $\Pi_f^{C*1} > \Pi_f^{CT*}$

矛盾, 因而 $\frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T*} < e_f q_f^{T*}$.

1.3 $L < e_f q_f^{T*}$ 时, $\Pi_f^{CT*} = \Pi_f^{T*}$, 因而 $\Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{T*} = \Pi_f^{CT*}$.

当 $L \geq \frac{H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1}$ 时, $\Pi_f^{C*} \geq \Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{CT*} = \Pi_f^{T*}$.

当 $q_f^{C*1} \leq L < \frac{H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1}$ 时, 若 $\frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} -$

$\frac{t}{s} e_f q_f^{T*} \leq L < \frac{H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1}$, $\Pi_f^{N*} > \Pi_f^{C*} \geq \Pi_f^{CT*} = \Pi_f^{T*}$. 若 $q_f^{C*1} \leq L <$

$\frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T*}$, $\Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{CT*} = \Pi_f^{T*} > \Pi_f^{C*}$.

当 $L < q_f^{C*1}$ 时, $\Pi_f^{N*} > \Pi_f^{C*}$, 若 $\frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T*} \leq L < q_f^{C*1}$, $\Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{C*} \geq$

$\Pi_f^{CT*} = \Pi_f^{T*}$. 若 $L < \frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T*} < q_f^{C*1}$, 则 $\Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{CT*} = \Pi_f^{T*} > \Pi_f^{C*}$.

综上, 1) 当 $L \geq \frac{H^{N*} - H^{C*1}}{s} + e_f q_f^{C*1}$ 时, $\Pi_f^{C*} \geq \Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{CT*} \geq \Pi_f^{T*}$;

2) $e_f q_f^{N*} \leq L < \frac{H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1}$ 时, $\Pi_f^{N*} = \Pi_f^{CT*} > \Pi_f^{C*} \geq \Pi_f^{T*}$;

3) 当 $\frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T*} \leq L < \min\left[\frac{H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1}, e_f q_f^{N*}\right]$

时, $\Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{C*} \geq \Pi_f^{CT*} \geq \Pi_f^{T*}$;

4) 当 $L < \frac{H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*}) - H^{C*1}(q_w^{C*1}, q_f^{C*1})}{s} + e_f q_f^{C*1} - \frac{t}{s} e_f q_f^{T*}$ 时, $\Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{CT*} \geq \Pi_f^{T*} > \Pi_f^{C*}$.

2. $t > s$

2.1 $L \geq e_f q_f^{C*1}$ 时, $H^{N*}(q_w^{N*}, q_f^{N*}) \geq H^{CT*}(q_w^{CT*}, q_f^{CT*}) \geq H^{C*}(q_w^{C*}, q_f^{C*}) \geq H^{T*}(q_w^{T*}, q_f^{T*})$, 故 $\Pi_f^{N*} \geq \Pi_f^{CT*} \geq \Pi_f^{T*}$, $\Pi_f^{C*} \geq \Pi_f^{T*}$.

当 $L \geq \frac{H^{N^*} - H^{C^{*1}}}{s} + e_f q_i^{C^{*1}}$ 时, $\Pi_f^{C^*} \geq \Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*}$.

当 $L < \frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_i^{N^*}) - H^{C^{*1}}(q_w^{C^{*1}}, q_i^{C^{*1}})}{s} + e_f q_i^{C^{*1}}$ 时, $\Pi_f^{C^*} < \Pi_f^{N^*}$,若 $e_f q_i^{N^*} \leq L < \frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_i^{N^*}) - H^{C^{*1}}(q_w^{C^{*1}}, q_i^{C^{*1}})}{s} + e_f q_i^{C^{*1}}$, $\Pi_f^{N^*} = \Pi_f^{CT^*} > \Pi_f^{C^*} \geq \Pi_f^{T^*}$;若 $e_f q_i^{C^{*1}} \leq L < \min\left[\frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_i^{N^*}) - H^{C^{*1}}(q_w^{C^{*1}}, q_i^{C^{*1}})}{s} + e_f q_i^{C^{*1}}, e_f q_i^{N^*}\right]$,则 $q_i^{CT^*} = \frac{L}{e_f}$, $\Pi_f^{C^*} > \Pi_f^{CT^*}$,因而 $\Pi_f^{N^*} > \Pi_f^{C^*} > \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*}$.

2.2 $e_f \max(q_i^{T^*}, q_i^{C^{*3}}) \leq L < e_f q_i^{C^{*1}}$ 时, $H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_i^{N^*}) \geq H^{CT^*}(q_w^{CT^*}, q_i^{CT^*}) = H^{C^*}(q_w^{C^*}, q_i^{C^*}) \geq H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*})$, $\Pi_f^{C^*} = \Pi_f^{C^{*2}} = H^{C^*}(q_w^{C^*}, q_i^{C^*})$,因而 $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} = \Pi_f^{C^{*2}} \geq \Pi_f^{T^*}$.

2.3 $L < e_f \max(q_i^{T^*}, q_i^{C^{*3}})$ 时,又可分为两种情形.

A. $s \leq t \leq b$ 时, $H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_i^{N^*}) \geq H^{CT^*}(q_w^{CT^*}, q_i^{CT^*}) = H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) \geq H^{C^*}(q_w^{C^*}, q_i^{C^*})$,此时 $e_f \max(q_i^{T^*}, q_i^{C^{*3}}) = e_f q_i^{T^*}$, $q_i^{CT^*} = e_f q_i^{T^*}$,故 $\Pi_f^{CT^*} = \Pi_f^{T^*}$, $\Pi_f^{C^*} = \Pi_f^{C^{*2}}$ 或 $\Pi_f^{C^{*3}}$, $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} = \Pi_f^{T^*}$, $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{C^*}$.

当 $e_f q_i^{C^{*3}} \leq L < e_f q_i^{T^*}$ 时, $\Pi_f^{C^*} = H^{C^{*2}}(q_w^{C^{*2}}, q_i^{C^{*2}})$, $\Pi_f^{T^*} = H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - t e_f q_i^{T^*}$,若 $t \leq \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*2}}(q_w^{C^{*2}}, q_i^{C^{*2}})}{e_f q_i^{T^*}}$,则 $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} = \Pi_f^{T^*} \geq \Pi_f^{C^*}$;若 $t > \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*2}}(q_w^{C^{*2}}, q_i^{C^{*2}})}{e_f q_i^{T^*}}$,则 $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{C^*} > \Pi_f^{CT^*} = \Pi_f^{T^*}$.

当 $L < e_f q_i^{C^{*3}}$ 时, $\Pi_f^{C^*} = H^{C^{*3}}(q_w^{C^{*3}}, q_i^{C^{*3}}) - b(e_f q_i^{C^{*3}} - L)$,若 $L \geq \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*3}}(q_w^{C^{*3}}, q_i^{C^{*3}})}{b} + \frac{t}{b} e_f q_i^{T^*} - e_f q_i^{C^{*3}}$, $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{C^*} > \Pi_f^{CT^*} = \Pi_f^{T^*}$;若 $L < \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*3}}(q_w^{C^{*3}}, q_i^{C^{*3}})}{b} + \frac{t}{b} e_f q_i^{T^*} - e_f q_i^{C^{*3}}$, $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} = \Pi_f^{T^*} > \Pi_f^{C^*}$.

B. $s \leq b \leq t$ 时, $H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_i^{N^*}) \geq H^{C^*}(q_w^{C^*}, q_i^{C^*}) \geq H^{CT^*}(q_w^{CT^*}, q_i^{CT^*}) \geq H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*})$,此时, $e_f \max(q_i^{T^*}, q_i^{C^{*3}}) = e_f q_i^{C^{*3}}$, $\Pi_f^{C^*} = \Pi_f^{C^{*3}}$, $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*}$, $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{C^*}$.

当 $e_f q_i^{T^*} \leq L < e_f q_i^{C^{*3}}$ 时, $\Pi_f^{CT^*} = \Pi_f^{C^{*2}} \geq \Pi_f^{C^{*3}}$,若 $L \geq \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*3}}(q_w^{C^{*3}}, q_i^{C^{*3}})}{b} + \frac{t}{b} e_f q_i^{T^*} - e_f q_i^{C^{*3}}$, $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{C^*} \geq \Pi_f^{T^*}$;若 $L < \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*3}}(q_w^{C^{*3}}, q_i^{C^{*3}})}{b} + \frac{t}{b} e_f q_i^{T^*} - e_f q_i^{C^{*3}}$,则 $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*} > \Pi_f^{C^*}$;

当 $L < e_f q_i^{T^*}$ 时, $\Pi_f^{CT^*} = \Pi_f^{T^*}$,此时与 $L < e_f q_i^{C^{*3}}$ 的情形相同.

综上,5) $L \geq \frac{H^{N^*} - H^{C^{*1}}}{s} + e_f q_i^{C^{*1}}$ 时, $\Pi_f^{C^*} \geq \Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*}$.

6) $e_f q_i^{N^*} \leq L < \frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_i^{N^*}) - H^{C^{*1}}(q_w^{C^{*1}}, q_i^{C^{*1}})}{s} + e_f q_i^{C^{*1}}$ 或 $\max(e_f q_i^{T^*}, \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*3}}(q_w^{C^{*3}}, q_i^{C^{*3}})}{b} + \frac{t}{b} e_f q_i^{T^*} - e_f q_i^{C^{*3}}) \leq L < e_f q_i^{C^{*1}}$ 时, $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{C^*} \geq \Pi_f^{T^*}$.

7) $e_f q_i^{C^{*1}} \leq L < \min\left[\frac{H^{N^*}(q_w^{N^*}, q_i^{N^*}) - H^{C^{*1}}(q_w^{C^{*1}}, q_i^{C^{*1}})}{s} + e_f q_i^{C^{*1}}, e_f q_i^{N^*}\right]$ 或 $e_f q_i^{C^{*3}} \leq L < e_f q_i^{T^*}$, $t > \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*2}}(q_w^{C^{*2}}, q_i^{C^{*2}})}{e_f q_i^{T^*}}$ 或 $\frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*3}}(q_w^{C^{*3}}, q_i^{C^{*3}})}{b} + \frac{t}{b} e_f q_i^{T^*} - e_f q_i^{C^{*3}} \leq L < e_f \min(q_i^{T^*}, q_i^{C^{*3}})$ 时, $\Pi_f^{N^*} > \Pi_f^{C^*} > \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*}$.

8) $e_f q_i^{C^{*3}} \leq L < e_f q_i^{T^*}$, $t \leq \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*2}}(q_w^{C^{*2}}, q_i^{C^{*2}})}{e_f q_i^{T^*}}$ 或 $L < \min(e_f q_i^{C^{*3}}, \frac{H^{T^*}(q_w^{T^*}, q_i^{T^*}) - H^{C^{*3}}(q_w^{C^{*3}}, q_i^{C^{*3}})}{b} + \frac{t}{b} e_f q_i^{T^*} - e_f q_i^{C^{*3}})$ 时, $\Pi_f^{N^*} \geq \Pi_f^{CT^*} \geq \Pi_f^{T^*} > \Pi_f^{C^*}$.

证毕.

附录 13

性质 10 的证明

$$E[\Pi_f^C(q_f^C)] = w_f^C q_f^C - c q_f^C + E\left[\int_0^M [s_t(L - e_f q_f^C) e^{-rt}] dt\right] = w_f^C q_f^C - c q_f^C + \frac{s_0[1 - e^{-(r-\mu)M}]}{r - \mu}(L - e_f q_f^C)$$

$$= w_f^C q_f^C - c q_f^C + s'(L - e_f q_f^C) \tag{A38}$$

$$\frac{\partial s'}{\partial \mu} = -\frac{(-1 + e^{-(r-\mu)M})(1 + (r - \mu)M)}{(r - \mu)^2} s_0. \mu \geq r \text{ 时, } (-1 + e^{-(r-\mu)M})(1 + (r - \mu)M) s_0 \leq 0, \frac{\partial s'}{\partial \mu} \geq 0; \mu < r \text{ 时,}$$

$\frac{\partial s'}{\partial \mu} < 0$; 根据性质 4, $\mu \geq r$ 时, 碳价单位时间漂移率的增加会减少售电商的总购电量与火电上网量, 但却能增加风电的上网消纳机会, 并提升风电与火电的上网价格; $\mu < r$ 时, 碳价单位时间漂移率的增加会增加售电商的总购电量与火电上网量, 减少风电的上网消纳机会以及电力上网价格。

证毕.

附录 14

性质 11 的证明

$$E[C_g^C(q_w^C, q_{fi}^C)] = E\left\{w_w^C \min(q_w^C, uK) + \sum_{i=1}^n w_{fi}^C q_{fi}^C + (1 - \lambda) w_e \left[X - \min(q_w^C, uK) - \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right]^+\right\}$$

$$E[C_g^C(q_w^C, q_{fi}^C)] = E\left\{w_w^C \min(q_w^C, uK) + \sum_{i=1}^n w_{fi}^C q_{fi}^C + (1 - \lambda) w_e \left[X - \min(q_w^C, uK) - \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right]^+\right\}$$

$$= \rho w_w^C q_w^C + \sum_{i=1}^n w_{fi}^C q_{fi}^C + \rho(1 - \lambda) w_e \left[\bar{a} - (q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C) - \int_{q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C}^{\bar{a}} F(x) dx\right] +$$

$$(1 - \rho)(1 - \lambda) w_e \left[\bar{a} - \sum_{i=1}^n q_{fi}^C - \int_{\sum_{i=1}^n q_{fi}^C}^{\bar{a}} F(x) dx\right] \tag{A39}$$

售电商的期望成本关于购电量的一阶导与二阶导分别为 $\frac{\partial E[C_g^C(q_w^C, q_{fi}^C)]}{\partial q_{fi}^C} = w_{fi}^C - (1 - \lambda) w_e \left[\rho \bar{F}(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C) + (1 - \rho) \bar{F}(\sum_{i=1}^n q_{fi}^C)\right]$, $\frac{\partial^2 E[C_g^C(q_w^C, q_{fi}^C)]}{\partial (q_{fi}^C)^2} = (1 - \lambda) w_e \left[\rho f(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C) + (1 - \rho) f(\sum_{i=1}^n q_{fi}^C)\right] > 0$, $\frac{\partial^2 E[C_g^C(q_w^C, q_{fi}^C)]}{\partial q_{fi}^C \partial q_w^C} = \rho(1 - \lambda) \times w_e f\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right)$, $\frac{\partial^2 E[C_g^C(q_w^C, q_{fi}^C)]}{\partial q_{fi}^C \partial q_{fj}^C} = (1 - \lambda) w_e \left[\rho f(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C) + (1 - \rho) f(\sum_{i=1}^n q_{fi}^C)\right]$, $\frac{\partial E[C_g^C(q_w^C, q_{fi}^C)]}{\partial q_w^C} = \rho w_w^C - \rho(1 - \lambda) \times w_e \bar{F}\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right)$, $\frac{\partial^2 E[C_g^C(q_w^C, q_{fi}^C)]}{\partial (q_w^C)^2} = \rho(1 - \lambda) w_e f\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right) > 0$.

海塞矩简化后可得

$$H = \begin{bmatrix} \rho(1 - \lambda) w_e f\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right) & \rho(1 - \lambda) w_e f\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right) \\ (1 - \lambda) w_e \left[\rho f\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right) + (1 - \rho) f\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right)\right] & \rho(1 - \lambda) w_e f\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right) \end{bmatrix}$$

$$= \rho(1 - \rho) \left[(1 - \lambda) w_e\right]^2 f\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right) > 0$$

根据 FOC, 令一阶条件等于 0, 并联合解得

$$\begin{cases} w_{fi}^C = (1 - \lambda) w_e \left[\rho \bar{F}\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right) + (1 - \rho) \bar{F}\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right)\right] \\ w_w^C = (1 - \lambda) w_e \bar{F}\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right) \end{cases} \tag{A40}$$

$$E[\Pi_w^C(q_w^C)] = E\left\{w_w^C \min(q_w^C, uK) - \lambda w_e \left[X - \min(q_w^C, uK) - \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right]^+\right\} = \rho(1 - \lambda) w_e \bar{F}\left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right) q_w^C -$$

$$\rho \lambda w_e \left[\bar{a} - \left(q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C\right) - \int_{q_w^C + \sum_{i=1}^n q_{fi}^C}^{\bar{a}} F(x) dx\right] - (1 - \rho) \lambda w_e \left[\bar{a} - \sum_{i=1}^n q_{fi}^C - \int_{\sum_{i=1}^n q_{fi}^C}^{\bar{a}} F(x) dx\right] \tag{A41}$$

风电商的期望利润函数关于 q_w^c 的一阶导与二阶导分别为 $\frac{\partial E[\Pi_w^C(q_w^c)]}{\partial q_w^c} = \rho w_e \bar{F}\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) - \rho(1-\lambda) w_e f(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c) q_w^c$, $\frac{\partial^2 E[\Pi_w^C(q_w^c)]}{\partial (q_w^c)^2} = -\rho(2-\lambda) w_e f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) - \rho(1-\lambda) w_e f'\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) q_w^c = -\rho w_e f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) - \rho(1-\lambda) w_e \varphi'_{q_w^c}\left(q_w^c, \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) < 0$, 根据 FOC 可得, $\bar{F}\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) = (1-\lambda)f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) q_w^c$.

$$\Pi_{fi}^C(q_{fi}^c) = w_{fi}^c q_{fi}^c - c_i q_{fi}^c + s(L_i - e_{fi} q_{fi}^c) = \left\{ (1-\lambda) w_e \left[\rho \bar{F}\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + (1-\rho) \bar{F}\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) \right] - c_i - s e_{fi} \right\} q_{fi}^c + s L_i \tag{A42}$$

一阶导与二阶导分别为 $\frac{\partial \Pi_{fi}^C(q_{fi}^c)}{\partial q_{fi}^c} = (1-\rho)(1-\lambda) w_e \bar{F}\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \rho(1-\lambda) w_e \bar{F}\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) - c_i - s e_{fi} - \left[(1-\rho)(1-\lambda) w_e f\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \rho(1-\lambda) w_e f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) \right] q_{fi}^c$, $\frac{\partial^2 \Pi_{fi}^C(q_{fi}^c)}{\partial (q_{fi}^c)^2} = -2 \left[(1-\rho)(1-\lambda) w_e f\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \rho(1-\lambda) w_e f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) \right] - \left[(1-\rho)(1-\lambda) w_e f'\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \rho(1-\lambda) w_e f'\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) \right] q_{fi}^c$. 记 $\varphi(x_i, y) = f\left(\sum_{i=1}^n x_i + y\right) x_i$, 且设 $\varphi(x_i, y)$ 是 x_i 的增函数, 即 $\varphi'_{x_i}(x_i, y) = f'\left(\sum_{i=1}^n x_i + y\right) x_i + f\left(\sum_{i=1}^n x_i + y\right) > 0$, 根据假设可得 $\frac{\partial^2 \Pi_{fi}^C(q_{fi}^c)}{\partial (q_{fi}^c)^2} < 0$, 根据 FOC 可得

$$(1-\rho) \bar{F}\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \rho \bar{F}\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) - \left[(1-\rho) f\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \rho f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) \right] q_{fi}^c = \frac{c_i + s e_{fi}}{(1-\lambda) w_e} \tag{A43}$$

综上, 电力上网量满足的条件为

$$\begin{cases} (1-\rho) \bar{F}\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \rho \bar{F}\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) - \left[(1-\rho) f\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \rho f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) \right] q_{fi}^c = \frac{c_i + s e_{fi}}{(1-\lambda) w_e} \\ \bar{F}\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) = (1-\lambda) f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) q_w^c \end{cases} \tag{A44}$$

碳交易市场中的均衡碳价满足条件

$$\sum_{i \in R} [e_{fi} q_{fi}^C(s^*) - L_i] + [ECE_0(s^*) - L_0] = \sum_{i \in \bar{R}} [L_i - e_{fi} q_{fi}^C(s^*)] \tag{A45}$$

化简后即可得

$$\sum_{i=1}^n e_{fi} q_{fi}^C(s^*) = L_A - ECE_0(s^*) \tag{A46}$$

将式 (A17) 两边同时对 s 求导可得 $\frac{\partial q_w^C}{\partial s} = -\frac{\delta_4 \varepsilon}{\delta_2 \delta_3 - \delta_1 \delta_4}$; $\frac{\partial q_{fi}^C}{\partial s} = \frac{\delta_3 \varepsilon}{\delta_2 \delta_3 - \delta_1 \delta_4}$. 其中 $\delta_1 = \rho \varphi'_{q_{fi}^c}(q_{fi}^c, q_w^c)$; $\delta_2 = (1-\rho) \left[f\left(\sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \varphi'_{q_{fi}^c}(q_{fi}^c, 0) \right] + \rho \left[f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \varphi'_{q_{fi}^c}(q_{fi}^c, q_w^c) \right]$; $\delta_3 = (1-\lambda) \varphi'_{q_w^c}\left(q_w^c, \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right)$; $\delta_4 = (1-\lambda) \varphi'_{q_w^c}\left(q_w^c, \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) + \lambda f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right)$; $\varepsilon = -\frac{e_{fi}}{(1-\lambda) w_e}$; $\delta_2 \delta_3 - \delta_1 \delta_4 = \delta_2 \left(\delta_4 + (1-\lambda) f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) \right) - \delta_1 \delta_4 = (\delta_2 - \delta_1) \delta_4 + (1-\lambda) \delta_2 f\left(q_w^c + \sum_{i=1}^n q_{fi}^c\right) > 0$. 因而 $\frac{\partial q_w^C}{\partial s} > 0$; $\frac{\partial q_{fi}^C}{\partial s} < 0$.

$ECE_0(s)$ 为减函数时, L_A 减少必然导致均衡碳价 s^* 增加, 因而减少火电消纳并增加风电消纳. 类似地, λ 增加, 会导致均衡碳价 s^* 减少, 但对电力上网量的影响无法确定. 同样地, ρ 增对电力上网量的影响也无法确定.

证毕.