

成本不确定和运力影响下 新能源汽车供应链协调契约

高咏玲

(中央财经大学商学院,北京100081)

摘要:考虑由新能源汽车租赁企业和配送企业组成的供应链,在新能源汽车和燃油汽车的运营成本不确定和运力影响下,文章运用NAC容量期望效用和博弈论研究新能源汽车的租赁量、租赁价和配送价格决策,比较了有无成本分担与收益共享两种契约结果,揭示配送企业对运营成本的乐观度和运力的影响。研究发现,引入成本分担与收益共享能提高新能源汽车租赁量,降低配送价格,提升配送需求。随着配送企业对新能源汽车(燃油汽车)运营成本乐观度的提高(下降)或新能源汽车(燃油汽车)运力提升(下降),新能源汽车租赁量均提高,但受契约类型的影响,租赁价和配送价格不一定下降。

关键词:新能源汽车;供应链;博弈论;成本不确定性;运力

中图分类号:F272.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2154(2021)07-0005-10

DOI:10.14134/j.cnki.cn33-1336/f.2021.07.001

Coordination Contracts in the New Energy Vehicle Supply Chain Considering Cost Uncertainty and Carrying Capacity Impact

GAO Yongling

(Business School, Central University of Finance and Economics, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper investigates a supply chain composed of a distribution enterprise and a new energy vehicle (NEV) leasing enterprise. Considering the influence of uncertain operating costs of NEVs and fuel vehicles (FVs), this paper studies the decision-making of distribution service price, leasing price and leasing quantity of NEVs by using NAC capacity expected utility and game theory, compares results with and without the cost and gain sharing contract, and discloses the impact of vehicle carrying capacities and the distribution enterprise's optimism level about operating costs. Results indicate that introducing the cost and gain sharing contract can increase the leasing quantity of NEVs, decrease the distribution service price, and increase the distribution demand. When the optimism level about operating costs of NEVs (FVs) increases (decreases) or the carrying capacity of the NEV (FV) increases (decreases), the distribution enterprise can increase the leasing quantity of NEVs, but the optimal leasing price and distribution service price do not necessarily decrease, which depends on the contract type.

Key words: new energy vehicles; supply chain; game theory; cost uncertainty; carrying capacity

一、引言

配送是保障城市生产生活的重要环节,但配送车辆的尾气排放也成了城市大气污染物的主要来源。与

收稿日期:2021-04-21

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目“奈特不确定环境下配送企业碳减排行为与新能源汽车推广策略”(17YJC630027);国家社会科学基金一般项目“新能源汽车和燃油汽车竞争视角下城市配送车辆的通行政策研究”(18BGL217);国家自然科学基金面上项目“创新驱动型并购的影响因素与经济后果研究”(71672007)

作者简介:高咏玲,女,教授,工学博士,主要从事可持续运营管理和供应链管理研究。

燃油车辆相比,新能源汽车具有低噪音和尾气零排放的特点,在满足配送需求的同时能实现节能减排^[1]。沃尔玛、亚马逊、UPS和DHL等企业已签订《企业社会责任的可持续燃料购买者原则》,承诺加速推动绿色车辆的使用^[2]。顺丰和京东物流等纷纷采用新能源汽车^[3]¹⁷⁵。与购置相比,租用新能源汽车不仅能缓解车辆购置成本高的压力,还能减轻车辆贬值快和缺乏相关运营经验的担忧。因此,租赁成为我国配送企业采用新能源汽车的主要方式^[3]⁸⁰。

使用新能源汽车面临较大的不确定性,这种不确定性往往导致其应用不足^[4-5]。配送企业面临的不确定性因素包括:油价和电池成本^[6-7]、运营成本^[8]、油耗和日行驶里程等^[9]。已有研究^[6-9]关注这些不确定性因素影响下车辆采用时机或含退换期权的租赁合同设计,但主要针对配送企业的采用决策,较少关注它与新能源汽车租赁企业(以下简称“租赁企业”)的决策互动。在租赁企业契约协调方面,经有国等(2018)^[10]在需求随机且受推广努力影响下分析了政府和租赁企业博弈,发现成本共担与收益共享合同能实现帕累托改进。在需求不确定环境下,经有国等(2018)^[11]分析了政府分担多项租赁企业成本的影响。经有国等(2018)^[12]研究了收益共享与两部收费组合契约。戚正清等(2020)^[13]研究了租赁商、制造商和政府的三方协调,涉及成本共担、收益共享和两部收费的联合契约。这些文献为分析需求不确定情况下租赁企业的车队配置和租赁价格决策提供了重要借鉴,但较少考虑配送企业的车队配置决策和成本不确定性的影响。

已有文献多假设不确定因素的概率测度唯一,即风险环境,忽略了奈特不确定性,即无法用单一的概率测度来衡量的情况^[14]。现实中,新能源汽车运营成本受充电或充气不便、能源价格波动、载重性能弱于燃油车和缺乏运营经验等因素影响^[15];燃油汽车运营成本受限行政策、油耗和油价波动等影响^[9]。分析这两类车辆运营成本的奈特不确定性,能更全面地评估不确定性。根据 Ellsberg 悖论,奈特不确定环境下决策者的主观态度将影响其决策结果^[16]。因此,分析奈特不确定环境下配送企业对车辆运营成本的乐观度,有助于研究决策者的有限理性对新能源汽车推广应用的影响。此外,实践中,我国许多城市通过调整燃油汽车的限行时间和范围来治堵,还有一些城市如深圳、西安、成都和天津等放宽新能源配送车辆的通行时间和区域。这些政策将影响新能源汽车和燃油汽车的运力^[1,17],例如日均行驶里程或运量。

新能源汽车和燃油汽车属于配送企业的生产工具。这些车辆的运力和配送企业对这些车辆运营成本的乐观度将影响新能源汽车的租赁量和租赁价。但已有研究较少从这一视角展开分析。因此,本文在奈特不确定环境下利用 Chateauneuf 等(2007)提出的 NAC (Non-extreme-outcome-additive Capacity) 容度期望效用^[18]和 Stackelberg 博弈分析配送企业的新能源汽车租赁量和配送价格以及租赁企业的租赁价,揭示配送企业对车辆运营成本乐观度和车辆运力的影响。固定价格契约和成本分担与收益共享契约是常见的供应链协调手段,与固定价格契约相比,引入成本分担与收益共享契约能否提高新能源汽车租赁量亟待研究。因此,本文比较有无成本分担与收益共享契约下新能源汽车的租赁量,为分析新能源汽车的采用决策和制定推广策略提供新视角。

二、配送企业与新能源汽车租赁企业的效用分析

(一) 奈特不确定环境下配送车辆运营成本的 NAC 容度期望效用

奈特不确定环境下的经典效用框架包括:Choquet 预期效用^[19]、Maxmin 多先验期望效用^[20]和 α -Maxmin 多先验期望效用^[21]等。与其他效用相比,NAC 容度期望效用的优势是利用乐观度细腻地刻画决策者态度,兼顾不确定环境下的极乐观、极悲观和非极端的情景。本文中,乐观指配送企业把运营成本的期望视为对其有利时,与这种期望有关的心境或态度。配送企业乐观度越高,越侧重运营成本最低的情景^[22]。本文将新能源汽车(燃油汽车)运营成本的乐观度定义为配送企业对此成本最低情景的侧重程度。针对运营成本的奈特不确定性,采用 NAC 容度期望效用量化配送企业对不确定因素的判断。与经典期望效用采用的概率不同,容度(Capacity)取代概率分布作为计算效用的权重,容度不具备可加性,但满足单调性和标准化性质^[23]。NAC 容度期望效用能反映不确定事件发生的客观概率和决策主体对不确定因素的乐观度。

采用 $i = E$ 和 F 分别代表新能源汽车和燃油汽车。在有限状态空间 Ω 上, 定义事件域 F , 由事件 $A_i(1), A_i(2), \dots, A_i(H)$ 构成的事件集合 $A_i \subset F$, 采用 $\phi[A_i(h)]$ 代表 $A_i(h)$ 发生的客观概率, 式中, $1 \leq h \leq H$, $H \geq 2$ 。由于配送企业对客观概率 $\phi[A_i(h)]$ 缺乏自信, 其判断偏离 $\phi[A_i(h)]$ 。采用 α_i 和 δ_i 反映配送企业对采用 i 的单位运营成本的乐观度和含糊度(以下简称“新能源汽车或燃油汽车成本的乐观度和含糊度”)。 α_i 刻画对成本最低的情景侧重程度, δ_i 代表配送企业对客观概率 $\phi[A_i(h)]$ 缺乏自信的程度, $1 - \delta_i$ 代表配送企业对客观概率 $\phi[A_i(h)]$ 的自信程度。对于状态空间 Ω 上事件 $A_i(h)$ 的新容度(Neo-additive Capacity) $\nu\{\phi[A_i(h)]\}$ 定义为^[23]:

$$\nu\{\phi[A_i(h)]\} = \delta_i \alpha_i + (1 - \delta_i) \phi[A_i(h)] \quad \forall A_i(h) \subseteq \Omega \quad (1)$$

式中, $\alpha_i = 1$ 和 $\alpha_i = 0$ 分别代表仅侧重极乐观情景和极悲观情景, $\delta_i = 0$ 表明仅依靠客观概率。

根据 Chateauneuf 等(2007)^[18] 分析, NAC 容度期望效用下配送企业采用 $i = E, F$ 的单位运营成本的预期效用为:

$$CE[C_i] = \varpi_i(1 - \delta_i) + \delta_i \left[\alpha_i \min_{A_i(h) \in A_i} \{C_i(h)\} + (1 - \alpha_i) \max_{A_i(h) \in A_i} \{C_i(h)\} \right] \quad (2)$$

式中, ϖ_i 表示 i 单位运营成本的非极端结果, 是根据客观概率计算的预期效用, $\varpi_i = \sum_{A_i(h) \in A_i} \phi[A_i(h)] C_i(h)$ 。

令 h 反映成本结果的排序, 成本最高到最低取值依次为: $C_i(1) > C_i(2) > \dots > C_i(H)$ 。根据成本排序结果, 可知 $C_i(1) = \max_{A_i(h) \in A_i} \{C_i(h)\}$ 和 $C_i(H) = \min_{A_i(h) \in A_i} \{C_i(h)\}$, 式中, $i = E, F$ 。化简得, NAC 容度期望效用下 i 的单位运营成本的预期值为:

$$c_i = CE[C_i] = \varpi_i(1 - \delta_i) + \delta_i [\alpha_i C_i(H) + (1 - \alpha_i) C_i(1)] \quad (3)$$

由式(3)可知, $\delta_i = 0$ 时配送企业对 i 单位运营成本的判断具有自信, 不关注极乐观或极悲观结果, 只关注非极端结果; $\delta_i = 1$ 且 $\alpha_i = 1$ 时配送企业仅关注极乐观结果 $C_i(H)$; $\delta_i = 1$ 且 $\alpha_i = 0$ 时配送企业仅关注极悲观结果 $C_i(1)$ 。由此可知, NAC 容度期望效用同时考虑风险环境下的预期效用、奈特不确定环境下极乐观和极悲观的结果, 运用乐观度 α_i 和含糊度 δ_i 细腻地刻画配送企业对不确定因素的主观态度和缺乏自信的程度。

(二) 配送企业和新能源汽车租赁企业的效用分析

考虑由租赁企业、配送企业和客户组成的供应链。租赁企业决定新能源汽车的租赁价 p 。配送企业购置燃油汽车和租赁新能源汽车, 以满足客户的配送需求。配送企业决定新能源汽车租赁量 q 和服务于客户的配送价格 f , 如图1所示。



图1 租赁企业与配送企业的供应链协调

配送企业租赁新能源汽车 n 天。配送企业总收入为 $nD(f)f$, 式中, $D(f)$ 为配送需求(单位: km/天), f 为配送价格(单位: 元/km)。配送需求 $D(f)$ 受配送价格 f 的影响: $D(f) = a - bf$, 式中, a 为需求潜量(单位: km), b 为需求对配送价格 f 的敏感系数。

配送企业的成本包括车辆拥有成本、运营成本和碳减排努力成本。首先, 新能源汽车拥有成本 T_E 取决于其租赁量 q 和租赁价 p , 即 $T_E = pq$ 。采用 K_E 和 K_F 代表新能源汽车运力和燃油汽车运力, 运力单位为: km/天。配送需求 $D(f)$ 由新能源汽车总运力 qK_E 和燃油汽车总运力 $\hat{q}K_F$ 满足, 即 $qK_E + \hat{q}K_F = D(f)$ 。则配送企业使用燃油汽车数量为: $\hat{q} = [D(f) - qK_E]/K_F$ 。燃油汽车拥有成本 T_F 取决于其数量 \hat{q} 、购置成本 w_F 和租赁期末残值 ξ_F , T_F 计算如下:

$$T_F = \hat{q}(w_F - \xi_F) \quad (4)$$

租赁期 n 天内,每辆燃油汽车折旧成本为 $w_F - \xi_F = n\tau$,式中, τ 为每辆燃油汽车每天折旧成本。

其次,根据 i 的单位运营成本预期值 c_i 和运力 K_i 可知,新能源汽车和燃油汽车的总运营成本分别为 $nqK_E c_E$ 和 $n[D(f) - qK_E]c_F$,式中, $i = E, F$ 。

最后,在碳减排努力成本方面,与燃油汽车相比,采用新能源汽车虽有助于碳减排,但需投入新技术管理费用和员工培训费用等,加上载重续航能力较弱,特别是在偏远地区和重货配送方面适用性有限。假设碳减排努力成本为新能源汽车租赁量 q 的二次函数 $Mq^2/2$,反映了边际成本随着 q 的增加而增加,其中, M 表示碳减排努力成本系数^[24]。配送企业效用为:

$$\pi(f, q) = nD(f)f - pq - nqK_E c_E - n[D(f) - qK_E] \left(c_F + \frac{\tau}{K_F} \right) - \frac{1}{2}Mq^2 \quad (5)$$

定义参数 $\eta = n(v_F - c_E)$, $v_F = c_F + \tau/K_F$ 。代入式(5)可得配送企业效用为:

$$\pi(f, q) = nD(f)(f - v_F) - pq + qK_E \eta - \frac{1}{2}Mq^2 \quad (6)$$

电动汽车是新能源汽车的主流车型。

考虑运营需要,租赁企业为配送企业建设配套充电设施,根据车桩比 ρ ,建设充电桩数量为 ρq ,式中,车桩比 $\rho < 1$ 。每辆新能源汽车的购置成本为 w_E ,租赁期末残值为 ξ_E ,保险和维修保养费用为 ε 。新能源汽车的单位租赁成本为 $L = w_E - \xi_E + \varepsilon + \rho s$,式中, s 为充电桩单位成本。租赁企业效用为:

$$\Pi(p) = q(p - L) \quad (7)$$

总结主要参数如表1所示。

表1 参数定义

参数	定义
i	$i = E, F$ 表示新能源汽车,燃油汽车
j	$j = B, S$ 表示基准模型、成本分担与收益共享联合契约
α_i	i 的单位运营成本乐观度
δ_i	i 的单位运营成本含糊度
K_i	i 的运力
L	新能源汽车的单位租赁成本
c_i	i 的单位运营成本预期值
n	租赁期
M	碳减排努力成本系数
φ	收益共享比例
β	成本分担比例

三、成本不确定和运力影响下新能源汽车供应链协调契约

(一) 新能源汽车供应链协调契约模型

1. 基准模型。基准模型($j = B$)是指租赁企业和配送企业签订新能源汽车租赁的固定价格契约模型,不考虑收益共享或成本分担。本文建立租赁企业为领导者和配送企业为追随者的 Stackelberg 博弈模型。时间顺序为:租赁企业首先决定新能源汽车租赁价格 p_B ,随后,配送企业作为跟随者优化新能源汽车租赁量 q_B 和配送价格 f_B 。基准模型的目标函数为:

$$\text{租赁企业: } \max_{p_B} \Pi_B(p_B) = q_B(p_B - L)$$

$$\text{配送企业: } \max_{f_B, q_B} \pi_B(f_B, q_B) = n(a - bf_B)(f_B - v_F) - p_B q_B + q_B K_E \eta - \frac{M}{2} q_B^2$$

2. 成本分担与收益共享的联合契约。成本分担与收益共享的联合契约($j = S$,以下简称“联合契约”)是实现供应链整体协调的重要工具。实践中,租赁企业如地上铁租车公司,凭借其专业化的优势,针对顺丰和京东等配送企业的运营实际,提供个性化的充电解决方案、安全检查和司机培训等配套服务来推广新能源汽车。令 β 表示租赁企业分担碳减排努力成本比例(以下简称“成本分担比例”), $\beta \in (0, 1]$ 。与基准模型不同,联合契约下租赁企业和配送企业承担碳减排固定成本分别为 $\beta M q_s^2/2$ 和 $(1 - \beta) M q_s^2/2$ 。

联合契约下租赁企业不仅获得新能源汽车租赁收入 $q_s p_s$,还获得共享收益 $n\varphi q_s K_E f_s$ 。式中, φ 为配送企业与租赁企业共享收益比例, $\varphi \in [0, 1]$ 。收益共享能反映配送企业为新能源汽车运力 K_E 的提升提供直接激励的情形,还能反映租赁企业承担配送企业转包业务的情形。实践中,北汽集团旗下的摩范速运,不仅提供新能源汽车租赁服务,还招募司机,使用新能源汽车提供城市配送服务,其客户包括京东和美团等企业。当收益共享系数为 $\varphi = 0$ 时,联合契约演变为成本分担契约。

联合契约的 Stackelberg 博弈模型中, 租赁企业首先决定新能源汽车租赁价格 p_s 。随后, 配送企业作为跟随者优化新能源汽车租赁量 q_s 和配送价格 f_s 。联合契约模型的目标函数为:

$$\text{租赁企业: } \max_{p_s} \Pi_s(p_s) = q_s(p_s - L) + n\varphi q_s K_E f_s - \frac{\beta M q_s^2}{2}$$

$$\text{配送企业: } \max_{f_s, q_s} \pi_s(f_s, q_s) = n(a - bf_s)(f_s - v_f) - p_s q_s + q_s K_E \eta - n\varphi q_s K_E f_s - \frac{(1 - \beta) M q_s^2}{2}$$

采用逆向归纳法求解基准模型和联合契约下新能源汽车租赁价格 p_j 、新能源汽车租赁量 q_j 和配送价格 f_j , 式中, $j = B, S$ 。在基准模型下, 根据 $\pi_B(f_B, q_B)$ 关于 f_B 和 q_B 的一阶导数为零, 可得, $A_U - 2bf_B = 0$, $-p_B + K_E \eta - Mq_B = 0$, 式中, $A_U = a + bv_f$ 。整理可得, $q_B(p_B) = (K_E \eta - p_B)/M$ 。根据 $\partial^2 \pi_B / \partial f_B^2 = -2bn$, $\partial^2 \pi_B / \partial q_B^2 = -M$ 和 $\partial^2 \pi_B / (\partial f_B \partial q_B) = 0$, 可知, 海塞矩阵负定。根据 $\Pi_B(p_B)$ 关于 p_B 的一阶条件和二阶条件, 可得, $p_B^* = (K_E \eta + L)/2$, $\partial^2 \Pi_B / \partial p_B^2 = -2/M < 0$ 。将 p_B^* 代入得到 q_B^* 和 f_B^* 。

在联合契约下, 根据 $\pi_s(f_s, q_s)$ 关于 f_s 和 q_s 的一阶导数为零, 可得, $nA_U - 2nbf_s - n\varphi q_s K_E = 0$, $-n\varphi K_E f_s - p_s + K_E \eta - (1 - \beta) M q_s = 0$ 。根据 $\partial^2 \pi_s / \partial f_s^2 = -2nb$, $\partial^2 \pi_s / \partial q_s^2 = -(1 - \beta) M$ 和 $\partial^2 \pi_s / \partial f_s \partial q_s = -n\varphi K_E$, 可知, $Z_s = 2bnM(1 - \beta) - (n\varphi K_E)^2 > 0$ 时海塞矩阵负定, 最优解存在。租赁企业效用为: $\Pi_s(p_s) = (p_s - L + n\varphi K_E f_s) q_s - \beta M q_s^2 / 2$ 。根据 $\partial \Pi_s(p_s) / \partial p_s = 0$ 且 $\partial^2 \Pi_s(p_s) / \partial p_s^2 < 0$, 可得 p_s^* 。由此, 可证命题1。

命题1: (1) 基准模型下, 配送企业的新能源汽车最优租赁量 $q_B^* = W / (2M)$, 最优配送价格 $f_B^* = A_U / (2b)$, 租赁企业的新能源汽车最优租赁价 $p_B^* = (K_E \eta + L) / 2$, 配送企业效用 $\pi_B(f_B^*, q_B^*) = (nA_L^2 + 2bMq_B^{*2}) / (4b)$, 租赁企业效用 $\Pi_B(p_B^*) = W^2 / (4M)$, 式中, $W = K_E \eta - L$, $A_U = a + bv_f$, $A_L = a - bv_f$, $\eta = n(v_f - c_E)$, $v_f = c_f + \tau / K_f$ 。

(2) 联合契约下, 配送企业的新能源汽车最优租赁量 $q_s^* = W / [M(2 - \beta)]$, 最优配送价格 $f_s^* = A_U / (2b) - \varphi K_E W / [2bM(2 - \beta)]$, 租赁企业的新能源汽车最优租赁价 $p_s^* = [LZ_s + K_E \eta Y - n^2 M A_U \varphi K_E (2 - \beta)] / [2bnM(2 - \beta)]$, 租赁企业效用 $\Pi_s(p_s^*) = W^2 / [2M(2 - \beta)]$, 配送企业效用 $\pi_s(f_s^*, q_s^*) = \{nA_L^2 + [2(1 - \beta)bM - n\varphi^2 K_E^2] q_s^{*2}\} / (4b)$, 式中, $Y = 2bnM + (n\varphi K_E)^2$ 。

命题1表明, 新能源汽车带来的运营成本节约大于其单位租赁成本 ($K_E \eta > L$) 时, 配送企业的新能源汽车租赁量大于零。基准模型和联合契约下, 新能源汽车的单位租赁成本 L 越低, 新能源汽车的租赁价 p_j^* 越低, 其租赁量 q_j^* 越大, 式中, $j = B, S$ 。这说明降低新能源汽车的单位租赁成本能推动其租赁价下降, 从而提高其推广规模。配送企业效用 $\pi_j(f_j^*, q_j^*)$ 和租赁企业效用 $\Pi_j(p_j^*)$ 随着 L 的下降而提高。配送企业的碳减排努力成本系数 M 反映新能源汽车租赁量增加带来的管理成本。随着 M 的下降, 新能源汽车租赁量 q_j^* 提高, 其推广规模增加。

(二) 结果比较

命题1中, $q_s^* - q_B^* \geq 0$ 。比较 f_s^* 和 f_B^* 可得, $f_s^* \leq f_B^*$ 。比较 p_s^* 和 p_B^* , 若 $L < L_p$, $p_s^* > p_B^*$; 否则, $p_s^* \leq p_B^*$, 式中参数在命题2中定义。租赁企业效用关系为: $\Pi_s(p_s^*) - \Pi_B(p_B^*) = \beta W^2 / [4M(2 - \beta)]$ 。可知, $\Pi_s(p_s^*) \geq \Pi_B(p_B^*)$ 。配送企业效用关系为: $\pi_s(f_s^*, q_s^*) - \pi_B(f_B^*, q_B^*) = -[bnM\beta^2 + 2(n\varphi K_E)^2] W^2 / [8bnM^2(2 - \beta)^2] \leq 0$ 。根据上述表达式, 易证命题2。

命题2: (1) 基准模型和联合契约下配送企业的新能源汽车租赁量关系为: $q_s^* \geq q_B^*$, 配送价格关系为: $f_s^* \leq f_B^*$, 租赁企业的新能源汽车租赁价关系为: 若 $L > L_p$ 时, $p_s^* < p_B^*$; 否则, $p_s^* \geq p_B^*$, 式中, $L_p = [K_E \eta - n^2 M(2 - \beta) A_U \varphi K_E] / [bnMB + (n\varphi K_E)^2]$ 。

(2) 基准模型和联合契约下, 租赁企业效用关系为: $\Pi_s(p_s^*) \geq \Pi_B(p_B^*)$, 配送企业效用关系为: $\pi_s(f_s^*, q_s^*) \leq \pi_B(f_B^*, q_B^*)$ 。

与基准模型不同, 联合契约考虑收益共享 $n\varphi q_s K_E f_s$, 使配送价格受新能源汽车租赁量的影响。新能源汽车租赁量越大, 意味着配送企业采用新能源汽车带来的运营成本节约越大, 其配送价格随之下降。与基准模型结果相比, 联合契约能降低配送价格, 提高配送需求, 通过成本分担降低配送企业的碳减排努力成本, 从而

促进新能源汽车租赁量的提高,但联合契约下新能源汽车的租赁价不一定更高。当新能源汽车租赁成本 L 大于(小于) L_p 时,成本分担与收益共享使联合契约下新能源汽车的租赁价小于(大于)基准模型下的结果。这是因为新能源汽车的单位租赁成本 L 增加时,联合契约下新能源汽车的租赁价的增幅比基准模型下该租赁价增幅更小。因此,与基准模型结果相比,联合契约下配送企业的新能源汽车租赁量更大,租赁企业的效用也更大。这说明租赁企业应主动推行联合契约,通过与配送企业合作分担成本与共享收益,扩大新能源汽车的推广规模。

配送企业的效用包括与配送需求相关的收益 A_j 和与新能源汽车租赁量相关的收益 χ_j ,即 $\pi_j(f_j^*, q_j^*) = A_j + \chi_j$,式中, $A_j = n(a - bf_j^*)(f_j^* - v_F)$, $j = B, S$, $\chi_B = (K_E \eta - p_B^* - Mq_B^*/2)q_B^*$, $\chi_S = [K_E \eta - p_S^* - n\varphi K_E f_S^* - (1 - \beta)Mq_S^*/2]q_S^*$ 。根据 $A_B = n(a - bv_F)^2/(4b)$ 和 $A_S = n\{(a - bv_F)^2 - (\varphi K_E W)^2/[M(2 - \beta)]^2\}/(4b)$ 可知, A_B 不受 φ 的影响, A_S 随收益共享比例 φ 的增加而降低。当 $\varphi > 0$ 时,配送企业在联合契约下获得与配送需求相关的收益 A_S 小于其在基本模型下的结果 A_B 。根据 $\chi_B = (K_E \eta - L)^2/(8M)$ 和 $\chi_S = (1 - \beta)(K_E \eta - L)^2/[2M(2 - \beta)^2]$ 可知, χ_B 不受 β 的影响, χ_S 随成本分担比例 β 的增加而下降。随着成本分担比例 β 的增加,配送企业提高新能源汽车的租赁量 q_S^* ,租赁企业提高新能源汽车的租赁价 p_S^* ,这使得配送企业在联合契约下获得新能源汽车租赁量相关的收益 χ_S 小于其在基本模型下的结果 χ_B 。因此,联合契约下配送企业的效用小于其在基准模型下的效用。

四、配送企业乐观度和车辆运力的影响

本节揭示配送企业的乐观度和车辆运力对最优决策的影响,辅以算例分析结果。算例参数取值如下:需求潜量 $a = 10000\text{km}/\text{天}$,需求敏感系数 $b = 6000$,碳减排努力成本系数 $M = 700$ 。租赁期 $n = 365$ 天,车桩比 $\rho = 0.3$ 。充电桩单位成本 $S = 0.2$ 万元/个。新能源汽车单位租赁成本 $L = 68$ 元/天,每辆燃油汽车每天折旧成本 $\tau = 80$ 元/天。运力 $K_E = 120\text{km}/\text{天}$ 和 $K_F = 100\text{km}/\text{天}$,配送企业对新能源汽车和燃油汽车成本的乐观度和含糊度分别为: $\alpha_E = \alpha_F = 0.7$, $\delta_E = \delta_F = 0.75$ 。新能源汽车单位运营成本的非极端结果、极乐观结果和极悲观结果分别为 $W_E = 0.1$ 元/km, $C_E(H) = 0.098$ 元/km 和 $C_E(1) = 0.37$ 元/km。燃油汽车单位运营成本的非极端结果、极乐观结果和极悲观结果分别为 $W_F = 0.4$ 元/km, $C_F(H) = 0.2$ 元/km 和 $C_F(1) = 0.86$ 元/km^{[3]22}。在联合契约下,租赁企业成本分担比例为 $\beta = 0.3$,收益共享比例为 $\varphi = 0.2$ 。

c_E 通过参数 W 和 η 影响决策结果,式中, $\eta = n(v_F - c_E)$, $W = K_E \eta - L$ 。可得, $\partial \eta / \partial c_E = -n$, $\partial W / \partial c_E = -nK_E$ 。对最优决策结果求关于 c_E 的导数,可得, $\partial q_B^* / \partial c_E = -nK_E / (2M) < 0$, $\partial f_B^* / \partial c_E = 0$, $\partial p_B^* / \partial c_E = -nK_E / 2 < 0$, $\partial q_S^* / \partial c_E = -nK_E / [M(2 - \beta)] < 0$, $\partial f_S^* / \partial c_E = \varphi n K_E^2 / [2bM(2 - \beta)] > 0$, $\partial p_S^* / \partial c_E = -K_E Y / [2bM(2 - \beta)] < 0$ 。

c_F 通过参数 v_F 、 η 、 A_L 、 A_U 和 W 影响决策结果,可得, $\partial v_F / \partial c_F = 1$, $\partial \eta / \partial c_F = n$, $\partial A_L / \partial c_F = -b$, $\partial A_U / \partial c_F = b$, $\partial W / \partial c_F = nK_E$ 。对最优决策结果求关于 c_F 的导数,可得, $\partial q_B^* / \partial c_F = nK_E / 2M > 0$, $\partial f_B^* / \partial c_F = 1/2 > 0$, $\partial p_B^* / \partial c_F = nK_E / 2 > 0$, $\partial q_S^* / \partial c_F = nK_E / [M(2 - \beta)] > 0$, $\partial f_S^* / \partial c_F = 1/2 - n\varphi K_E^2 / [2bM(2 - \beta)]$, $\partial p_S^* / \partial c_F = K_E [(2 - 2\varphi + \varphi\beta)bnM + (n\varphi K_E)^2] / [2bM(2 - \beta)]$ 。由于 $\varphi \in [0, 1)$ 和 $\beta \in (0, 1]$, 可知, $\partial p_S^* / \partial c_F > 0$ 。当 $\varphi < \bar{\varphi}$ 时, $\partial f_S^* / \partial c_F > 0$; 当 $\varphi \geq \bar{\varphi}$ 时, $\partial f_S^* / \partial c_F \leq 0$, 式中, $\bar{\varphi} = Mb(2 - \beta) / (nK_E^2)$ 。

对 c_i 求解关于乐观度 α_i 和含糊度 δ_i 的导数,可得 $\partial c_i / \partial \alpha_i = \delta_i [C_i(H) - C_i(1)] < 0$, $\partial c_i / \partial \delta_i = \alpha_i C_i(H) + (1 - \alpha_i) C_i(1) - \varpi_i$, 式中, $i = E, F$ 。可知, 当 $\alpha_i < \hat{\alpha}_i$ 时, $\partial c_i / \partial \delta_i > 0$ 。当 $\alpha_i \geq \hat{\alpha}_i$ 时, $\partial c_i / \partial \delta_i \leq 0$, 式中, $\hat{\alpha}_i = [C_i(1) - \varpi_i] / [C_i(1) - C_i(H)]$ 。由此,可证命题3。

(一) 配送企业乐观度的影响

命题3: (1) 租赁企业的租赁价 p_j^* 和配送企业的新能源汽车租赁量 q_j^* 随新能源汽车成本乐观度 α_E 的提高而提高,基准模型下配送价格 f_B^* 不受 α_E 的影响,联合契约下配送价格 f_S^* 随 α_E 的提高而下降,式中, $j = B, S$ 。

(2) 租赁企业的租赁价 p_j^* 和配送企业的新能源汽车租赁量 q_j^* 随着燃油汽车成本乐观度 α_F 的提高而下降, 基准模型下配送价格 f_B^* 随着 α_F 的提高而下降, 在联合契约下, 当收益共享比例 φ 小于(大于) $\bar{\varphi}$ 时, 配送价格 f_S^* 随着 α_F 的提高而下降(提高), 式中, $\bar{\varphi} = Mb(2 - \beta)/(nK_E^2)$ 。

新能源汽车成本乐观度 α_E 越高, 意味着新能源汽车的预期运营成本 c_E 越低。这使得配送企业的新能源汽车租赁量 q_j^* 更大, 租赁企业制定的租赁价 p_j^* 提高, 如图2(b)和图2(c)所示。此关系在基准模型和联合契约下类似。基准模型下配送企业基于燃油汽车的运营成本定价, 配送价格 f_B^* 不受 α_E 的影响, 在联合契约下配送价格 f_S^* 随着乐观度 α_E 的提高而下降, 如图2(a)所示。

燃油汽车成本乐观度 α_F 的提高意味着燃油汽车预期运营成本 c_F 的下降, 削弱了新能源汽车的竞争优势, 这使得基准模型和联合契约下新能源汽车租赁量 q_j^* 及其租赁价 p_j^* 下降, 如图3(b)和图3(c)所示。随着 α_F 提高, 基准模型下配送价格 f_B^* 下降, 当收益共享比例 φ 小于 $\bar{\varphi}$ 时, 联合契约下配送价格 f_S^* 也下降, 如图3(a)所示。虽然 α_F 的提高使得预期运营成本 c_F 下降, 但租赁企业的收益共享比例较高 ($\varphi \geq \bar{\varphi}$), 使得配送企业提高配送价格 f_S^* 。

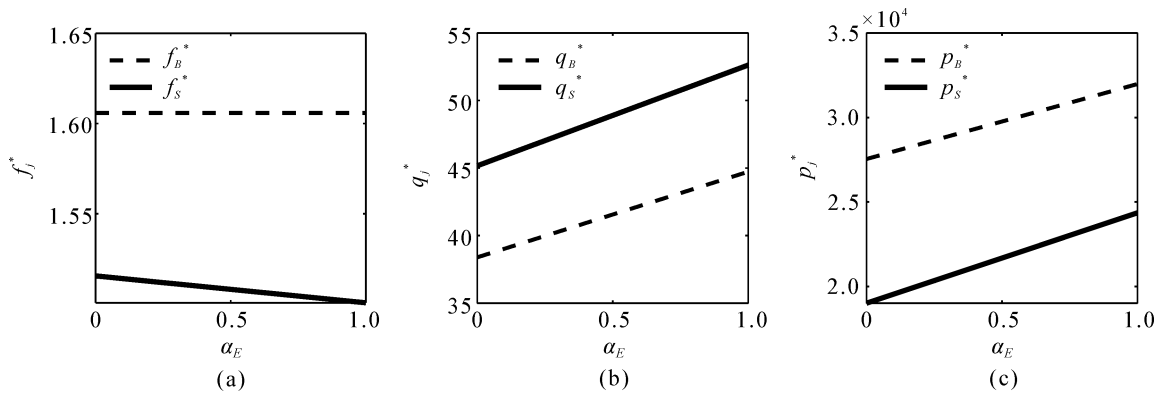


图2 新能源汽车成本乐观度 α_E 对配送价格、新能源汽车租赁量和租赁价的影响

注: 图2至图5中配送价格和租赁价单位分别为: 元/km 和元/辆, 租赁量单位为: 辆。下同

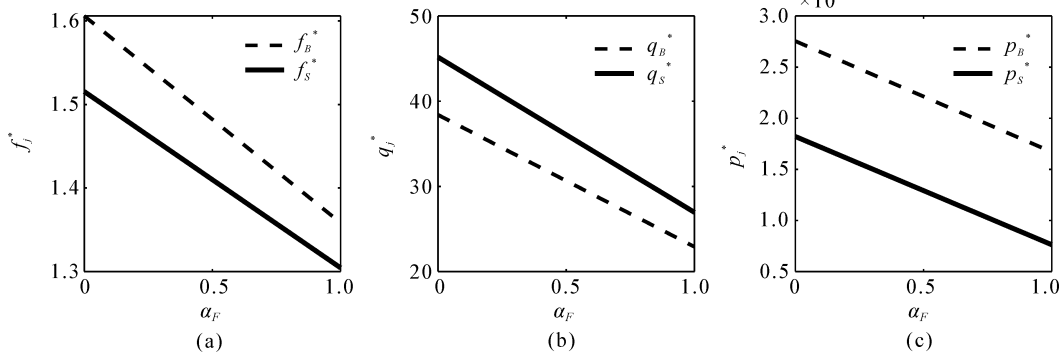


图3 燃油汽车成本乐观度 α_F 对配送价格、新能源汽车租赁量和租赁价的影响

乐观度较高 ($\alpha_i > \hat{\alpha}_i$) 的配送企业, 积极看待含糊度 δ_i 变化的影响, 认为含糊度 δ_i 的增加或乐观度 α_i 的提高均使预期成本 c_i 降低, 式中, $i = E, F, \hat{\alpha}_i = [C_i(1) - \varpi_i]/[C_i(1) - C_i(H)]$ 。因此, 若配送企业乐观度较高 ($\alpha_i > \hat{\alpha}_i$), 其含糊度 δ_i 变化与命题3中乐观度 α_i 变化对最优决策的影响一致。乐观度较低 ($\alpha_i \leq \hat{\alpha}_i$) 的配送企业较谨慎, 认为随含糊度 δ_i 的增加导致预期成本 c_i 提高, 因而含糊度 δ_i 变化与命题3中乐观度 α_i 变化对最优决策的影响相反。

(二) 配送车辆运力的影响

K_E 通过参数 W 、 Z_S 和 Y 等参数影响最优决策。这些参数关于 K_E 的一阶导数为: $\partial W/\partial K_E = \eta, \partial Z_S/\partial K_E = -2n^2\varphi^2 K_E, \partial Y/\partial K_E = 2n^2\varphi^2 K_E$ 。已知 $\eta > 0$ 以确保租赁量非负。对最优决策结果求关于 K_E 的导数, $\partial q_B^*/\partial K_E =$

$\eta/(2M) > 0, \partial f_B^*/\partial K_E = 0, \partial p_B^*/\partial K_E = \eta/2 > 0, \partial q_S^*/\partial K_E > 0, \partial f_S^*/\partial K_E < 0$ 。当 $L < \hat{L}_p$ 时, $\partial p_S^*/\partial K_E > 0$; 否则, $\partial p_S^*/\partial K_E \leq 0$, 式中, \hat{L}_p 在命题4中定义。由此, 可证命题4。

命题4: 基准模型下租赁企业的租赁价 p_B^* 随着新能源汽车运力 K_E 的提高而提高, 在联合契约下当 L 小于(大于) \hat{L}_p 时, 租赁价 p_S^* 随 K_E 的提高而提高(下降), 基准模型和联合契约下配送企业的新能源汽车租赁量均随 K_E 的提高而提高, 配送价格 f_B^* 不受影响, 配送价格 f_S^* 随 K_E 的提高而下降, 式中, $\hat{L}_p = [2bM\eta + 3n\eta(\varphi K_E)^2 - \varphi nMA_U(2 - \beta)] / (2n\varphi^2 K_E)$ 。

命题4表明, 在基准模型和联合契约下, 新能源汽车运力 K_E 的提高能促进其租赁量的提升, 如图4(b)所示。目前, 深圳、西安、成都和天津等城市已实施新能源配送车辆的通行便利政策, 如不限行或与燃油车相比少限行。这些政策有助于提升新能源汽车的运力, 从而促进其推广应用。

基准模型下配送企业的新能源汽车租赁量 q_B^* 和租赁企业制定的租赁价 p_B^* 均随新能源汽车运力 K_E 的提高而提高, 配送价格 f_B^* 主要根据使用燃油汽车的成本制定, 因而不受 K_E 影响, 如图4(a)所示。基本模型下 K_E 仅通过参数 W 影响租赁价, 式中, $W = K_E\eta - L$ 。相比之下, 联合契约考虑共享收益 $n\varphi q_S K_E f_S$, 使得 K_E 通过参数 W, Z_S 和 Y 影响租赁价, 导致租赁价 p_S^* 与 K_E 的关系变得非单调, 式中, $Z_S = 2bnM(1 - \beta) - (n\varphi K_E)^2, Y = 2bnM + (n\varphi K_E)^2$ 。在联合契约下, 租赁价 p_S^* 是新能源汽车单位租赁成本 L 的增函数。当 L 小于 \hat{L}_p 时, 租赁价 p_S^* 较低, 因而租赁价 p_S^* 随着 K_E 的提高而提高, 如图4(c)所示; 当 L 大于 \hat{L}_p 时, 则相反。在联合契约下, K_E 越大, 配送价格 f_S^* 越低, 如图4(a)所示。上述结论说明, 在基准模型和联合契约下, 新能源汽车运力的变化对租赁价和配送价格的影响不同。

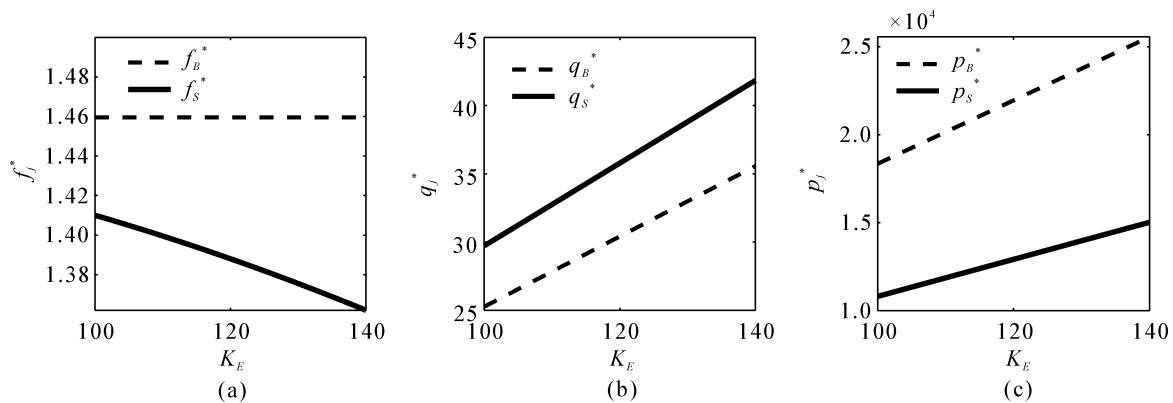


图4 新能源汽车运力 K_E 对配送价格、新能源汽车租赁量和租赁价的影响

已知 $\eta = n(v_F - c_E), v_F = c_F + \tau/K_F$ 和 $A_U = a + bv_F$ 。 η, v_F 和 A_U 关于 K_F 的一阶导数为: $\partial \eta / \partial K_F = -n\tau/K_F^2, \partial v_F / \partial K_F = -\tau/K_F^2, \partial A_U / \partial K_F = b\partial v_F / \partial K_F$ 。最优决策关于 K_F 的一阶导数为: $\partial q_B^* / \partial K_F < 0, \partial p_B^* / \partial K_F < 0, \partial f_B^* / \partial K_F < 0, \partial q_S^* / \partial K_F < 0, \partial p_S^* / \partial K_F = -\tau K_E [bnM(2 - 2\varphi + \beta\varphi) + (n\varphi K_E)^2] / [2bM(2 - \beta)K_F^2] < 0, \partial f_S^* / \partial K_F = \tau [n\varphi K_E^2 - bM(2 - \beta)] / [2bM(2 - \beta)K_F^2]$ 。由此, 易证命题5。

命题5: 租赁企业的租赁价 p_j^* 和配送企业的新能源汽车租赁量 q_j^* 均随燃油汽车运力 K_F 的下降而提高, 基准模型下配送价格 f_B^* 随 K_F 的下降而提高, 联合契约下, 当收益共享比例 φ 小于(大于) $\bar{\varphi}$ 时, 配送价格 f_S^* 随 K_F 的下降而提高(下降), 式中, $j = B, S, \bar{\varphi} = Mb(2 - \beta) / nK_E^2$ 。

近年来, 对燃油汽车限行越来越严格已成为许多城市实现缓解拥堵和减排的重要手段。例如, 巴黎从2015年起逐步限制柴油车行驶^[4], 深圳市于2018年开始设置10个绿色物流区, 仅允许新能源汽车通行。命题5揭示了燃油汽车运力下降的影响。由于燃油汽车运力下降, 基准模型和联合契约下新能源汽车租赁量 q_j^* 和租赁价 p_j^* 提升, 如图5(b)和图5(c)所示。

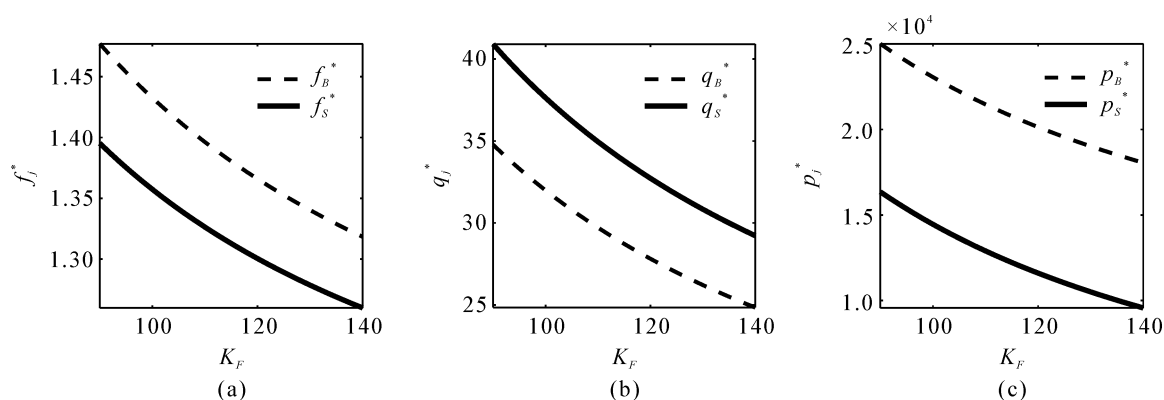


图5 燃油汽车运力 K_F 对配送价格、新能源汽车租赁量和租赁价的影响

燃油汽车运力的下降,使得燃油汽车每公里成本提高,基准模型下或联合契约下收益共享比例 φ 小于 $\bar{\varphi}$ 时,配送价格均上涨,如图5(a)所示。若租赁企业的收益共享比例 φ 大于 $\bar{\varphi}$,虽然运力 K_F 的下降导致燃油汽车每公里成本的提高,但配送企业仍倾向于降低配送价格 f_S^* 来提升配送需求。命题5表明,基准模型和联合契约下运力 K_F 对新能源汽车租赁量 q_j^* 和租赁价 p_j^* 的影响类似,但对配送价格的影响不同。

五、研究结论与展望

本文研究运营成本不确定和运力影响下租赁企业和配送企业的契约协调,利用 NAC 容度期望效用和 Stackelberg 博弈分析新能源汽车的租赁量、租赁价和配送价格决策,比较基准模型和成本分担与收益共享联合契约下的结果,揭示配送企业对车辆运力和运营成本乐观度的影响。研究发现:与基准模型相比,联合契约能提升配送企业的新能源汽车租赁量。在基准模型和联合契约中,当配送企业对新能源汽车(燃油汽车)成本乐观度提高(下降)或燃油汽车运力下降时,新能源汽车的租赁量和租赁价均提高。新能源汽车的运力提高使其租赁量提高,对租赁价的影响取决于契约类型,基准模型下新能源汽车的租赁价随其运力的提高而提高。联合契约下若新能源汽车单位租赁成本较低(较高)时,其租赁价随其运力的提高而提高(下降)。

上述结论从政策、供应链协调契约和配送企业行为方面为促进新能源汽车的推广应用提供参考。首先,新能源汽车通行便利或燃油汽车更严格的限行政策的实施,将影响这些车辆的运力并促进新能源汽车推广应用。其次,租赁企业应利用成本分担与收益共享契约,加强与配送企业的合作,提升新能源汽车的采用规模。最后,租赁企业应改善产品和服务质量,提升配送企业对新能源汽车运营成本的乐观度,从而扩大租赁量。此外,除了本文关注的长租模式外,新能源汽车推广模式还包括销售和分时租赁。研究这些模式下新能源汽车的供应链决策有助于更全面地指导其推广应用。

参考文献:

- [1]FRANCESCHETTI A,HONHON D,LAPORTE G, et al. Strategic fleet planning for city logistics[J]. Transportation Research Part B: Methodological,2017,95:19-40.
- [2]BSR. Sustainable fuel buyers' principles[EB/OL]. (2017-05-01)[2021-03-24]. <https://www.bsr.org/en/collaboration/groups/sustainable-fuel-buyers-principles>.
- [3]中国新能源物流车发展报告编委会,等. 2019 版中国新能源物流车发展报告[M]. 上海:复旦大学出版社,2019:22,80,175.
- [4]MORGANTI E,BROWNE M. Technical and operational obstacles to the adoption of electric vans in France and the UK: an operator perspective[J]. Transport Policy,2018,63:90-97.

- [5] SIERZCHULA W, BAKKER S, MAAT K, et al. The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption[J]. *Energy Policy*, 2014, 68: 183-194.
- [6] KLEINDORFER P R, NEBOIAN A, ROSET A, et al. Fleet renewal with electric vehicles at La Poste[J]. *Interfaces*, 2012, 42(5): 465-477.
- [7] NEBOIAN A, SPINLER S. Fleet replacement, technology choice, and the option to breach a leasing contract[J]. *Decision Sciences*, 2015, 46(1): 7-35.
- [8] 高咏玲. 政府补贴下企业采用电动汽车配送的时机与价格分析[J]. *中央财经大学学报*, 2017(3): 79-88.
- [9] ANSARIPOOR A H, OLIVEIRA F S. Flexible lease contracts in the fleet replacement problem with alternative fuel vehicles: a real-options approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 266(1): 316-327.
- [10] 经有国, 郭培强, 秦开大. 需求率受推广努力水平影响的新能源汽车租赁系统协调契约[J]. *中国管理科学*, 2018(3): 94-100.
- [11] 经有国, 郭培强, 秦开大. 成本分担政策下新能源汽车租赁系统激励契约[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018(1): 13-19, 29.
- [12] 经有国, 戚正清, 陶建华. 价格影响需求的新能源汽车租赁系统协调契约[J]. *工业工程与管理*, 2018(3): 72-79.
- [13] 戚正清, 经有国, 安桂芳, 等. 需求率依赖价格的新能源汽车租赁系统三方协调契约[J]. *系统管理学报*, 2020(6): 1188-1196.
- [14] ETNER J, JELEVA M, TALLON J. Decision theory under ambiguity[J]. *Journal of Economic Surveys*, 2012, 26(2): 234-270.
- [15] 中国新能源物流车发展报告编委会, 等. 2018版中国新能源物流车发展报告[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2018: 48-51.
- [16] ELLSBERG D. Risk, ambiguity, and the savage axioms[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1961, 75(4): 643-669.
- [17] 都牧, 胡祥培, KONG N, 等. 限行条件下配送车辆配置的二阶段随机规划[J]. *系统工程理论与实践*, 2018(12): 3212-3221.
- [18] CHATEAUNEUF A, EICHBERGER J, GRANT S. Choice under uncertainty with the best and worst in mind: neo-additive capacities[J]. *Journal of Economic Theory*, 2007, 137(1): 538-567.
- [19] SCHMEIDLER D. Subjective probability and expected utility without additivity[J]. *Econometrica*, 1989, 57(3): 571-587.
- [20] GILBOA I, SCHMEIDLER D. Maxmin expected utility with a non-unique prior[J]. *Journal of Mathematical Economics*, 1989, 18(2): 141-153.
- [21] GHIRARDATO P, MACCHERONI F, MARINACCI M. Differentiating ambiguity and ambiguity attitude[J]. *Journal of Economic Theory*, 2004, 118(2): 133-173.
- [22] 高咏玲, 佟岩. 实物期权视角下合同期对供应商定价行为的影响[J]. *商业经济与管理*, 2017(10): 5-12.
- [23] 姚东旻, 王麒植, 崔琳, 等. 为什么最好雇个乐观者? ——模糊性下的最优合同[J]. *经济学报*, 2015(4): 62-81.
- [24] ZHOU P, WEN W. Carbon-constrained firm decisions: from business strategies to operations modeling[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 281(1): 1-15.



(责任编辑 游旭平)