

应对碳价格波动的新能源汽车联合生产策略

程永伟^{1,2}, 穆东¹

(1. 北京交通大学经济管理学院, 北京 100044;

2. 北京物资学院现代物流产业研究院, 北京 101149)

摘要: 建立了碳交易制下传统燃油车与新能源汽车的联合生产决策模型, 分析了碳价格对汽车生产商产量、定价及利润的影响, 在配额交易量不受限和受限两种情形下, 得到了碳价格波动下生产计划的鲁棒区间及其应急调整策略, 建立非线性规划模型求解扰动管理下最优的初始生产计划, 最后通过数值算例验证了文中结论的正确性. 研究表明: 在新能源汽车发展初期, 碳交易制对生产决策的影响相对较大, 随着碳价格升高, 新能源汽车的竞争优势逐步增强; 初始生产计划存在非对称性鲁棒区间, 初始生产计划的优化方向与鲁棒区间的非对称倾斜方向一致; 交易限量的存在将改变最优调整策略和生产计划的应急响应区间.

关键词: 新能源汽车; 碳价格; 碳交易; 扰动管理; 联合决策

中图分类号: F272 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2018)06-0780-013

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2018.06.007

Joint production strategies of new energy vehicle with carbon price disruption

Cheng Yongwei^{1,2}, Mu Dong¹

(1. School of Economics and Management, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Academy of Modern Logistics Industry, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China)

Abstract: This study models joint production decision-making of traditional and new energy vehicles considering carbon trading, and analyzes the effect of carbon price on vehicle productivity, pricing and profit. The robustness range and emergency adjustment strategies of production planning are obtained considering carbon price disruption, assuming carbon quota trading volume is unlimited or limited respectively. Furthermore, a nonlinear programming model is built to improve the initial production planning with carbon price disruption, and a numerical analysis verifies the above conclusions. The results show that carbon trading significantly affects production decision at the primary stage of new energy vehicles development, and that the competitiveness of new energy vehicles increases with carbon prices. There exists asymmetry in the robustness range of initial production planning and its improving direction is the same as the asymmetry direction of robustness range. The results also demonstrate that carbon trading limitation may change the optimal solutions and the corresponding emergency response interval of initial production planning.

Key words: new energy vehicle; carbon price; carbon trading; disruption management; joint decision

收稿日期: 2017-09-06; 修订日期: 2018-03-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71473013; 71772016); 教育部人文社科青年基金资助项目(17YJC630203); 教育部人文社科规划基金资助项目(16YJAZH012); 北京物资学院校级重大资助项目(2017XJZD05); 北京物资学院科技协同攻关团队建设资助项目(2017GG06; 2018XJGG01).

1 引言

随着新能源汽车业的迅猛发展,越来越多的车企开始选择燃油车+新能源汽车“两条腿走路”的发展模式。同时,2020年补贴政策到期后,我国将正式进入“后补贴时代”,碳交易制将取代当前的财税制度。根据国家发改委《新能源汽车碳配额管理办法》的要求,届时所有燃油车规模企业的新能源汽车产销量必须达到一定比例,否则须从碳市场中购买相应的配额用于清缴,汽车生产商生产运营将面临新的挑战。目前,碳交易方面的研究已较为丰富,He等^[1]研究了碳限额交易下制造商生产决策问题。Jiang等^[2]分析了随机低碳需求和策略消费行为下的生产定价策略。赵道致^[3]、马秋卓^[4]等研究了碳排放总量限制和交易政策下供应链减排及定价问题。也有学者关注了碳价格的影响。Rezaee等^[5]采用两阶段随机规划模型研究了碳价格和需求不确定下选址问题。Diabat等^[6]分析了碳价格对供应链结构的影响。文献[7,8]研究了碳价格对供应链企业减排效果的影响以及上下游企业合作减排问题。上述研究只针对单一产品的减排决策,但在汽车行业却是以新能源汽车的产销比例作为减排标准,碳交易收益和生产收益均关系到两种不同的车型。因此,需要从多产品联合决策^[9]视角来构建汽车生产商碳交易模型。

同时,在碳市场中汽车生产商将面临更多的不确定性^[10],车企往往需要事先对碳价格等进行预判才能开展生产活动,一旦它们的波动幅度超过预期,原有的生产计划将面临调整从而产生额外的应急处置成本^[11]。尽管当前碳市场波动大、波动规则复杂^[12-14],但对碳价格的扰动研究却十分鲜见。扰动管理(disruption management)最早由 Clausen 等^[15]提出,应用于应急管理等领域^[16,17]。田江等^[18]研究了碳价格波动对企业减排决策的影响,Kockar等^[19]分析了碳价格对电力行业运营及电价的影响,但这些研究只做了碳价格的灵敏度分析,未考虑生产计划的调整成本。其他相关研究主要围绕需求和成本扰动展开:Zhu等^[20]采用系统动力学分析了供应链的扰动因素及其组合应对策略。Atan等^[21]研究了供应系统随机扰动下易逝品的最优库存问题。Huang等^[22]研究了生产成本扰动下双渠道供应链的生产与定价问题。文献[23,24]分析了需求和成本扰动下闭环供应链的生产策略。黄松等^[25]研究发现需求扰动效应和生产成本扰动效应的交互作用使得初始的生产计划具有一定的稳健性。Zhang^[26]、Xu^[27]等研究了扰动情形下供应链的协调问题。碳价格波动关系到汽车生产商的碳交易收益,本质上属于成本扰动范畴,因此上述研究对本文有较好的借鉴意义。但这些研究主要从正向角度考虑扰动发生后如何对生产计划进行调整,没有反向地去思考,在不同的应急措施下(不调整、小范围调整、价格或产量调整,等等),所对应的最优初始生产计划也是不一样的;换言之,企业制定怎样的初始生产计划,在很大程度上已经决定了一旦发生应急情形,所能采取的扰动管理策略。对初始生产计划进行优化,方能从根本上削弱碳价格扰动所带来的负面影响,但现有文献并没有关注到这个视角。此外,配额交易量也是现有研究中被普遍忽视的另一重要因素。在实际交易中,尤其是特定企业之间的碳交易,交易量往往是有限的而不是无限的。交易量的多寡同样决定着企业是否启动应急调整计划。

综上,本文尝试探讨碳交易实施后汽车生产商将面临的联合决策、碳价格扰动和初始生产计划优化三个急迫又紧密关联的现实问题,本文基于新能源汽车产销比例建立碳交易下燃油车与新能源汽车联合生产决策模型,分析碳价格对汽车生产商产量、定价及利润的影响;在配额交易量不受限和受限两种情形下,得到初始生产计划的鲁棒区间以及两种产品价格、产量的阶梯调整策略;建立非线性规划模型求解最优的预期碳价格及初始生产计划。

2 碳交易下新能源汽车联合生产决策模型

本文考虑一个同时生产燃油车与新能源汽车的传统燃油车规模企业。两种产品满足相同的细分市场,市场潜在销售量为 ϕ ,由于生产成本和需求偏好的差异,采取差别定价策略。市场中主要有两类消费者:第一类消费者坚定选择传统燃油车,不考虑购买新能源汽车,需求函数为 $\phi_m - b_m p_m$,其中 ϕ_m 为这类人群的潜在销售量, p_m 为燃油车价格, b_m 是它们的价格敏感系数。第二类消费者在两种产品中犹豫不决,依据两者

的性价比进行决策. 假定这部分人群的潜在销售量为 ϕ_n , $\phi_n = \phi - \phi_m$, 新能源汽车定价为 p_n , 比燃油车价格高 $\Delta p = p_n - p_m$; 这类消费者综合考虑续航里程、充电便利性等因素, 认为新能源汽车性能(下文以续航里程作为当前新能源汽车主要性能指标)^[28] 达到燃油车的 h ($0 < h < 1$) 水平¹, 对燃油车的心理支付意愿为 $1 - h$. 根据 Ferrer^[29]、Yan^[30] 等人的研究成果, 第二类消费者中将有 $\phi_n - \frac{b_n(p_n - p_m)}{h}$ 的人群选择购买新能源汽车, 但仍有 $\frac{b_n((1-h)p_n - p_m)}{h(1-h)}$ 的人群选择购买燃油车, 其中 b_n 是第二类人群的价格敏感系数. 由此, 可以得到燃油车的最终销售量为 $q_m = (\phi_m - b_m p_m) + \frac{b_n((1-h)p_n - p_m)}{h(1-h)}$, 新能源汽车销售量为 $q_n = \phi_n - \frac{b_n(p_n - p_m)}{h}$.

令 $\beta_m = b_m + \frac{b_n}{h(1-h)}$, $\beta_n = \frac{b_n}{h}$, 可将 q_m 和 q_n 简化为

$$q_m = \phi_m - \beta_m p_m + \beta_n p_n, \quad q_n = \phi_n - \beta_n p_n + \beta_n p_m.$$

由于交叉价格项系数均为 β_n , 表明燃油车与新能源汽车具有完全替代性, 只是市场接受程度不同^[11].

假定政府规定燃油车规模企业的新能源汽车产销比例为 ρ , 那么生产 q_m 数量的燃油车应至少生产 $\frac{\rho}{1-\rho} q_m$ 数量的新能源汽车. 令 $t = \frac{\rho}{1-\rho}$ 为新能源汽车与燃油车的生产比例, tq_m 为新能源汽车产销达标值, 则汽车生产商的实际配额量为 $(q_n - tq_m)\eta$, 其中 η 是每辆新能源汽车的配额系数. 当 $q_n \geq tq_m$ 时, 汽车生产商超额完成任务, 将有剩余配额可向碳市场出售获益, 反之须从碳市场中购买不足配额. 综上, 若两者生产成本分别为 c_m 和 c_n , 碳价格为 p_e , 则汽车生产商的收益函数为

$$\pi = q_m(p_m - c_m) + q_n(p_n - c_n) + (q_n - tq_m)\eta p_e.$$

整理得

$$\pi = (\phi_m - \beta_m p_m + \beta_n p_n)(p_m - (c_m + t\eta p_e)) + (\phi_n - \beta_n p_n + \beta_n p_m)(p_n - (c_n - \eta p_e)). \quad (1)$$

观察式(1)可知, 碳交易后实质上增加了燃油车的单位生产成本 $t\eta p_e$, 降低了新能源汽车单位生产成本 ηp_e , 使 π 达到最大的最优价格及产量为

$$p_m^* = \frac{\phi_m + \phi_n}{2(\beta_m - \beta_n)} + \frac{1}{2}(c_m + t\eta p_e) = p_m^0 + \frac{1}{2}t\eta p_e, \quad (2)$$

$$p_n^* = \frac{\beta_n \phi_m + \beta_m \phi_n}{2\beta_n(\beta_m - \beta_n)} + \frac{1}{2}(c_n - \eta p_e) = p_n^0 - \frac{1}{2}\eta p_e, \quad (3)$$

$$\Delta p^* = \frac{\phi_n}{2\beta_n} + \frac{1}{2}((c_n - \eta p_e) - (c_m + t\eta p_e)) = \Delta p^0 - \frac{1}{2}(1+t)\eta p_e, \quad (4)$$

$$q_m^* = \frac{1}{2}(\phi_m - \beta_m(c_m + t\eta p_e) + \beta_n(c_n - \eta p_e)) = q_m^0 - \frac{1}{2}(\beta_n + t\beta_m)\eta p_e, \quad (5)$$

$$q_n^* = \frac{1}{2}(\phi_n - \beta_n(c_n - \eta p_e) + \beta_n(c_m + t\eta p_e)) = q_n^0 + \frac{1}{2}\beta_n(1+t)\eta p_e, \quad (6)$$

其中 p_m^0 和 p_n^0 分别为实行碳交易前的燃油汽车价格和新能源汽车价格, $\Delta p^0 = p_m^0 - p_n^0$, q_m^0 和 q_n^0 分别为实行碳交易前燃油汽车销量和新能源汽车销量. 有下列结论.

命题 1 随着碳价格升高, 燃油车价格将上涨、销售量下降; 新能源汽车价格将下降、销售量增加; 两者差价逐步缩小, 且新能源汽车的利润贡献率也将逐步提高. 同时, 碳价格对两种产品价格的影响均与新能源汽车的续航里程无关; 当新能源汽车的续航里程较低时, 碳价格对两种车型产量及利润的影响相对较大.

证明 燃油车利润为 $(q_m^0 - (\beta_n + t\beta_m)\eta p_e/2)(y_m^0 - t\eta p_e/2)$, 新能源汽车利润为 $(q_n^0 + \beta_n(1+t)\eta p_e/2) \times (y_n^0 + \eta p_e/2)$, 其中 y_m^0 和 y_n^0 分别为原先的单位产品利润, 易知前者利润在降低, 后者利润在提升, 新能

¹当 $h = 0$ 或 1 时, 第二类消费者将完全不购买或完全购买新能源汽车, 这两种特殊情形不在本文讨论范畴.

源汽车的利润贡献率在增长. 同时, 易知 $\frac{\partial \Delta q_n^*}{\partial h} < 0$, $\frac{\partial \Delta q_m^*}{\partial h} = \frac{t(1+t) - (h - (1+t))^2}{(h(1-h))^2} b_n < 0$ (当 $h \leq (1+t) - \sqrt{t(1+t)}$ 时), 且 $\Delta q_n^* \geq 0$, $\Delta q_m^* \leq 0$, 可知 h 越小, 碳价格对新能源汽车产量的拉动作用越大, 对燃油车产量的负面影响也越大; 随着 h 的提升, 新能源汽车市场逐步成熟和稳定, 碳价格波动所造成的影响也将有所下降. 证毕.

计算配额基数 $q_n^* - tq_m^* = (q_n^0 - tq_m^0) + \frac{1}{2}(\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n)\eta p_e$, 可知碳交易制下汽车生产商的配额基数增加了 $\frac{1}{2}(\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n)\eta p_e$, 有如下结论.

命题 2 激励汽车生产商完成新能源汽车产销比例的碳价格临界点为 $\hat{p}_e = \frac{-2(q_n^0 - tq_m^0)}{(\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n)\eta}$, 当实际碳价格高于 \hat{p}_e 时, 汽车生产商将超额完成任务并卖出剩余碳配额, 反之须买入碳配额; 碳市场存在均衡价格 $\frac{-2}{n(\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n)\eta} \sum_{i=1}^n (q_n^0 - tq_m^0)_i$; 当碳价格分别达到 $\frac{2\Delta p_e^0}{(1+t)\eta}$ 和 $\frac{2(q_m^0 - q_n^0)}{((2+t)\beta_n + t\beta_m)\eta}$ 时, 新能源汽车价格及产量优势将超越燃油车.

证明 由 $q_n^* - tq_m^* = 0$, $p_n^* \leq p_m^*$, $q_n^* \geq q_m^*$ 易得上述碳价格临界点; 由碳市场中 n 家车企的配额供需条件 $\sum_{i=1}^n (q_n^* - tq_m^*)_i = 0$ 可得上述碳市场均衡价格. 证毕.

进一步计算碳价格对汽车生产商利润的影响

$$\begin{aligned} \pi^* &= \left(q_m^0 - \frac{1}{2}(\beta_n + t\beta_m)\eta p_e \right) \left(y_m^0 - \frac{1}{2}t\eta p_e \right) + \left(q_n^0 + \frac{1}{2}\beta_n(1+t)\eta p_e \right) \left(y_n^0 + \frac{1}{2}\eta p_e \right) \\ &= \pi^0 + \frac{1}{2}\eta p_e \left(\frac{1}{2}(\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n)\eta p_e + 2(q_n^0 - tq_m^0) \right), \end{aligned} \tag{7}$$

其中 π^0 为原先未实行碳交易前汽车生产商的总利润, $q_n^0 - tq_m^0 = \frac{1}{2}(-t\phi_m + \phi_n + (\beta_n + t\beta_m)c_m - \beta_n(1+t)c_n)$; 碳交易下汽车生产商利润变动 $\frac{1}{2}\eta p_e \left(\frac{1}{2}(\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n)\eta p_e + 2(q_n^0 - tq_m^0) \right)$.

由此得下列结论.

命题 3 激励汽车生产商提高新能源汽车产量的碳政策临界点 $\hat{t} = \frac{\phi_n - \beta_n c_n + \beta_n c_m}{\phi_m - \beta_m c_m + \beta_n c_n}$, 当实际生产比例低于 \hat{t} 时, 政府规定将失效, 此时只有碳价格在发挥激励作用. 若实际生产比例高于 \hat{t} 时, 则碳价格应至少达到 2 倍的 \hat{p}_e , 汽车生产商方能在碳交易制下盈利.

证明 由 $q_n^0 - tq_m^0 = 0$ 易得临界点 \hat{t} , \hat{t} 反映初始的新能源汽车产销比是否满足政府规定, 若实际生产比例 t 低于 \hat{t} 说明政府规定过于宽松; 由 $\frac{1}{2}\eta p_e \left(\frac{1}{2}(\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n)\eta p_e + 2(q_n^0 - tq_m^0) \right) \geq 0$ 且 $p_e \geq 0$ 可得盈利条件 $p_e \geq 2\hat{p}_e$. 证毕.

命题 1~命题 3 表明, 碳交易制的确对汽车生产商的产品结构、价格、利润乃至竞争优势产生显著影响, 尤其在新能源汽车发展初期影响更大. 碳交易制下企业生产资源的优化配置依赖于对碳价格等关键要素的精准预判, 若企业生产柔性较低、碳市场波动较大, 那么这种生产方式将面临巨大挑战, 亟需对碳价格进行扰动管理.

3 应对碳价格波动的联合生产策略

假定汽车生产商按照预期碳价格 \bar{p}_e 进行产能安排和产品定价, 但实际碳价格 \tilde{p}_e 发生了 Δp_e 的波动, $\tilde{p}_e = \bar{p}_e + \Delta p_e$. 若汽车生产商能够根据实际碳价格即时调整生产计划, 根据式(7) 可计算完全生产柔性给企

业带来的利润增量

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{\pi}_f &= \pi^*|_{\bar{p}_e+\Delta p_e} - \pi^*|_{\bar{p}_e} \\ &= \frac{1}{2}\eta\Delta p_e \left((\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n) \eta \left(p_e + \frac{1}{2}\Delta p_e \right) + 2(q_n^0 - tq_m^0) \right).\end{aligned}\quad (8)$$

但完全柔性只是理想状态,实际生产过程中生产计划具有一定的稳定性和滞后性,产品价格体系也不能频繁变更.在生产计划不作调整的情况下,碳价格波动将造成利润变动为

$$\Delta\tilde{\pi}_u = (q_n^* - tq_m^*)\eta\Delta p_e = \frac{1}{2}\eta\Delta p_e ((\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n) \eta p_e + 2(q_n^0 - tq_m^0)).\quad (9)$$

由此,可得生产计划完全柔性的价值

$$\pi_f = \Delta\tilde{\pi}_f - \Delta\tilde{\pi}_u = \frac{1}{4}(\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n) (\eta\Delta p_e)^2.\quad (10)$$

若生产计划调整成本低于完全柔性价值,那么汽车生产商将有动力启动应急调整计划.以下从交易量不受限和受限两种情形展开讨论.

3.1 交易量不受限时的扰动管理策略

交易量不受限是指汽车生产商的任意碳配额均能在相应的碳价格出清或买入.首先讨论实际碳价格 \bar{p}_e 上涨时的情形,令上涨幅度 $\Delta p_e \geq 0$ 至 $\bar{p}_e + \Delta p_e$ 水平.根据第2节分析,当碳价格上涨时汽车生产商有动力增加新能源汽车产量,为了出清这部分新增产能,新能源汽车价格也须进行一定的下调,假设下调幅度为 x_n ($x_n \geq 0$),调整后价格为 $p_n - x_n$.此时燃油车价格调整幅度 x_m ,调整后价格为 $p_m + x_m$,应急调整后优化模型为

$$\begin{cases} \text{Max } \tilde{\pi} = (\bar{q}_m - (\beta_m x_m + \beta_n x_n)) (\bar{y}_m + x_m - t\eta\Delta p_e) + (\bar{q}_n + (\beta_n x_m + \beta_n x_n)) \times \\ \quad (\bar{y}_n - x_n + \eta\Delta p_e) - (\beta_m x_m + \beta_n x_n) s_m - (\beta_n x_m + \beta_n x_n) g_n \\ \text{s.t.} \\ \quad \beta_m x_m + \beta_n x_n \geq 0 \\ \quad \beta_n x_m + \beta_n x_n \geq 0 \\ \quad x_n \geq 0, \end{cases}$$

其中 $\bar{q}_m, \bar{q}_n, \bar{y}_m, \bar{y}_n$ 是汽车生产商根据预期碳价格 \bar{p}_e 制定的初始产能及单位产品利润; $\beta_m x_m + \beta_n x_n, \beta_n x_m + \beta_n x_n$ 分别为生产计划调整后燃油车减少的产能和新能源汽车增加的产能; s_m 是燃油车减产部分的滞销处置成本, g_n 是新能源汽车新增产能部分的加急生产成本^[23-25].

$$\begin{aligned}\tilde{\pi} &= \bar{\pi} + (\bar{q}_n - t\bar{q}_m) \eta\Delta p_e + x_m ((\bar{q}_m - \beta_m \bar{y}_m + \beta_n \bar{y}_n) - \beta_m x_m + (\beta_n + t\beta_m) \eta\Delta p_e - (\beta_n g_n + \beta_m s_m)) + \\ &\quad x_n ((-\bar{q}_n + \beta_n \bar{y}_n - \beta_n \bar{y}_m) - \beta_n x_n + \beta_n (1+t) \eta\Delta p_e - \beta_n (g_n + s_m)) - 2\beta_n x_n x_m,\end{aligned}$$

其中 $\bar{\pi}$ 为初始生产计划下汽车生产商的预期利润.

根据式(2)~式(4)可知上式中 $\bar{q}_m - \beta_m \bar{y}_m + \beta_n \bar{y}_n = 0, -\bar{q}_n + \beta_n \bar{y}_n - \beta_n \bar{y}_m = 0$; 并且由于 $\beta_m - \beta_n = b_m + \frac{b_n}{1-h} > 0, -\frac{\beta_n}{\beta_m} x_n > -x_n$, 因而约束条件 $\beta_n x_n + \beta_n x_m \geq 0$ 为无效约束,因此上述应急调整后模型可进一步简化为

$$\begin{cases} \text{Max } \tilde{\pi} = \bar{\pi} + (\bar{q}_n - t\bar{q}_m) \eta\Delta p_e + x_m (-\beta_m x_m + (\beta_n + t\beta_m) \eta\Delta p_e - (\beta_n g_n + \beta_m s_m)) + \\ \quad x_n (-\beta_n x_n + \beta_n (1+t) \eta\Delta p_e - \beta_n (g_n + s_m)) - 2\beta_n x_n x_m \\ \text{s.t.} \\ \quad \beta_m x_m + \beta_n x_n \geq 0 \\ \quad x_n \geq 0, \end{cases}\quad (11)$$

$$\text{KKT 条件为} \begin{cases} 2\beta_m x_m + 2\beta_n x_n - (\beta_n + t\beta_m) \eta \Delta p_e + (\beta_n g_n + \beta_m s_m) - \lambda \beta_m = 0 \\ 2\beta_n x_m + 2\beta_n x_n - \beta_n(1+t)\eta \Delta p_e + \beta_n(g_n + s_m) - \lambda \beta_n = 0 \\ \lambda(\beta_m x_m + \beta_n x_n) = 0 \\ x_n \geq 0, \lambda \geq 0. \end{cases}$$

情形 1 若 $\lambda = 0$, 则有

$$\begin{cases} 2\beta_m x_m + 2\beta_n x_n - (\beta_n + t\beta_m) \eta \Delta p_e + (\beta_n g_n + \beta_m s_m) = 0 \\ 2\beta_n x_m + 2\beta_n x_n - \beta_n(1+t)\eta \Delta p_e + \beta_n(g_n + s_m) = 0, \end{cases}$$

解得 $x_n^* = \frac{1}{2}(\eta \Delta p_e - g_n)$, $x_m^* = \frac{1}{2}(t\eta \Delta p_e - s_m)$,

$$\beta_m x_m + \beta_n x_n = \frac{1}{2}((\beta_n + t\beta_m) \eta \Delta p_e - (\beta_n g_n + \beta_m s_m)).$$

由于滞销处置成本一般要高于加急生产成本即 $s_m > g_n$, 满足不等式 $\frac{g_n}{\eta} \leq \frac{\beta_n g_n + \beta_m s_m}{(\beta_n + t\beta_m) \eta} \leq \frac{s_m}{t\eta}$, 由 x_n 和 $\beta_m x_m + \beta_n x_n$ 非负条件可知该情形下碳价格涨幅应大于 $\Delta p_e > \frac{\beta_n g_n + \beta_m s_m}{(\beta_n + t\beta_m) \eta}$; 并且, 当 $0 \leq \Delta p_e \leq \frac{g_n}{\eta}$ 时, $x_n^* \leq 0$, 碳价格涨幅不足以触发企业调整生产计划; 当 $\Delta p_e \geq \frac{s_m}{t\eta}$ 时, x_n^* 和 x_m^* 均大于 0, 表明碳价格涨幅达到一定程度时, 汽车生产商不仅会增加新能源汽车产量, 还会主动减少燃油车产量以获取更多的碳配额收益.

当 $\frac{g_n}{\eta} < \Delta p_e \leq (\beta_n g_n + \beta_m s_m) / ((\beta_n + t\beta_m) \eta)$ 时满足如下情形:

情形 2 $\lambda \neq 0$, 且有

$$\begin{cases} 2\beta_m x_m + 2\beta_n x_n - (\beta_n + t\beta_m) \eta \Delta p_e + (\beta_n g_n + \beta_m s_m) - \lambda \beta_m = 0 \\ 2\beta_n x_m + 2\beta_n x_n - \beta_n(1+t)\eta \Delta p_e + \beta_n(g_n + s_m) - \lambda \beta_n = 0 \\ \beta_m x_m + \beta_n x_n = 0, \end{cases}$$

解得 $x_n^* = \frac{1}{2}(\eta \Delta p_e - g_n)$, $x_m^* = -\frac{\beta_n}{\beta_m} x_n = -\frac{\beta_n}{2\beta_m}(\eta \Delta p_e - g_n)$,

$$\lambda = \frac{1}{\beta_m}((\beta_n g_n + \beta_m s_m) - (\beta_n + t\beta_m) \eta \Delta p_e) \geq 0,$$

满足非负条件, 因此该情形在 $\Delta p_e \in \left(\frac{g_n}{\eta}, \frac{\beta_n g_n + \beta_m s_m}{(\beta_n + t\beta_m) \eta}\right]$ 成立.

当碳价格下跌至 $\bar{p}_e - \Delta p_e$ ($\Delta p_e \geq 0$) 时, 汽车生产商倾向于购入低价碳配额以取代部分的新能源汽车产能, 调整后两者价格分别为 $\bar{p}_n + x_n$ ($x_n \geq 0$) 和 $\bar{p}_m - x_m$, 此时优化模型为

$$\begin{cases} \text{Max } \tilde{\pi} = \bar{\pi} - (\bar{q}_n - t\bar{q}_m) \eta \Delta p_e + x_m(-\beta_m x_m + (\beta_n + t\beta_m) \eta \Delta p_e - (\beta_n s_n + \beta_m g_m)) - \\ \quad x_n(\beta_n x_n - \beta_n(1+t)\eta \Delta p_e + \beta_n(s_n + g_m)) - 2\beta_n x_n x_m, \\ \text{s.t.} \\ \quad \beta_m x_m + \beta_n x_n \geq 0, \\ \quad x_n \geq 0, \end{cases}$$

其中 s_n 是新能源汽车减产部分的滞销处置成本, g_m 是燃油车新增产能部分的加急生产成本.

通过求解 KKT 条件得到相应的最优解. 表 1 汇总了碳价格波动下汽车生产商对两种车型价格、产量及

利润的应对策略.

表1 交易量不受限时碳价格波动下初始生产计划的鲁棒区间及其调整策略

Table 1 The robust range and adjusting strategies of initial production planning with carbon disruption under unlimited trading volume

\tilde{p}_e	$\Delta\tilde{p}_n$	$\Delta\tilde{p}_m$
$\left(\bar{p}_e - \frac{s_n}{\eta}, \bar{p}_e + \frac{g_n}{\eta}\right)$	0	0
$\left(\bar{p}_e + \frac{g_n}{\eta}, \bar{p}_e + \frac{\beta_n g_n + \beta_m s_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta}\right)$	$-\frac{1}{2}(\eta\Delta p_e - g_n)$	$-\frac{\beta_n}{2\beta_m}(\eta\Delta p_e - g_n)$
$\left(\bar{p}_e + \frac{\beta_n g_n + \beta_m s_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta}, +\infty\right)$	$-\frac{1}{2}(\eta\Delta p_e - g_n)$	$\frac{1}{2}(t\eta\Delta p_e - s_m)$
$\left(\bar{p}_e - \frac{\beta_n s_n + \beta_m g_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta}, \bar{p}_e - \frac{s_n}{\eta}\right)$	$\frac{1}{2}(\eta\Delta p_e - s_n)$	$\frac{\beta_n}{2\beta_m}(\eta\Delta p_e - s_n)$
$\left[0, \bar{p}_e - \frac{\beta_n s_n + \beta_m g_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta}\right)$	$\frac{1}{2}(\eta\Delta p_e - s_n)$	$-\frac{1}{2}(t\eta\Delta p_e - g_m)$
$\Delta\tilde{q}_n$	$\Delta\tilde{q}_m$	$\Delta\tilde{\pi}$
0	0	0
$\frac{\beta_n(\beta_m - \beta_n)}{2\beta_m}(\eta\Delta p_e - g_n)$	0	$\frac{\beta_n(\beta_m - \beta_n)}{4\beta_m}(\eta\Delta p_e - g_n)^2$
$\frac{1}{2}\beta_n \begin{bmatrix} (1+t)\eta\Delta p_e \\ -(g_n + s_m) \end{bmatrix}$	$-\frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\beta_n + t\beta_m)\eta\Delta p_e \\ -(\beta_n g_n + \beta_m s_m) \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \left\{ \begin{array}{l} \beta_m(t\eta\Delta p_e - s_m)^2 + \\ \beta_n(\eta\Delta p_e - g_n) \begin{bmatrix} (1+2t)\eta\Delta p_e \\ -(g_n + 2s_m) \end{bmatrix} \end{array} \right\}$
$-\frac{\beta_n(\beta_m - \beta_n)}{2\beta_m}(\eta\Delta p_e - s_n)$	0	$\frac{\beta_n(\beta_m - \beta_n)}{4\beta_m}(\eta\Delta p_e - s_n)^2$
$-\frac{1}{2}\beta_n \begin{bmatrix} (1+t)\eta\Delta p_e \\ -(s_n + g_m) \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\beta_n + t\beta_m)\eta\Delta p_e \\ -(\beta_n s_n + \beta_m g_m) \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \left\{ \begin{array}{l} \beta_m(t\eta\Delta p_e - g_m)^2 + \\ \beta_n(\eta\Delta p_e - s_n) \begin{bmatrix} (1+2t)\eta\Delta p_e \\ -(s_n + 2g_m) \end{bmatrix} \end{array} \right\}$

注: 表中 $\Delta p_e = |\tilde{p}_e - \bar{p}_e|$.

3.2 交易量受限时的扰动管理策略

假设汽车生产商面临一笔限量交易 $(\tilde{p}_e, u\eta)$, \tilde{p}_e 为碳价格, $u\eta$ 为交易限量总额, 那么企业该如何应对该笔碳交易. 由前面结果可知, $\tilde{p}_e \in \left(\bar{p}_e - \frac{s_n}{\eta}, \bar{p}_e + \frac{g_n}{\eta}\right)$ 为生产计划的鲁棒区间, 不作任何调整. 在其他区间需要讨论调整后的配额量是否满足限量约束. 仍以 $\tilde{p}_e \geq \bar{p}_e$ 情形为例, 此时新能源汽车新增产能 $\Delta q_n = \beta_n x_m + \beta_n x_n$, 燃油车缩减产能 $\Delta q_m = \beta_m x_m + \beta_n x_n$, 配额增加 $\Delta q_e = (\Delta q_n - t\Delta q_m)\eta = ((\beta_n + t\beta_m)x_m + \beta_n(1+t)x_n)\eta$, 由 $\Delta q_e \leq u\eta$ 限量条件可得式(11)的新增约束条件 $(\beta_n + \beta_m t)x_m + \beta_n(1+t)x_n \leq u$, 进而有 KKT 条件

$$\begin{cases} 2\beta_m x_m + 2\beta_n x_n - (\beta_n + t\beta_m)\eta\Delta p_e + (\beta_n g_n + \beta_m s_m) - \lambda_1 \beta_m + \lambda_2 (\beta_n + t\beta_m) = 0 \\ 2\beta_n x_m + 2\beta_n x_n - \beta_n(1+t)\eta\Delta p_e + \beta_n(g_n + s_m) - \lambda_1 \beta_n + \lambda_2 \beta_n(1+t) = 0 \\ \lambda_1 (\beta_m x_m + \beta_n x_n) = 0 \\ \lambda_2 ((\beta_n + t\beta_m)x_m + \beta_n(1+t)x_n - u) = 0 \\ x_n \geq 0, \lambda_1 \geq 0, \lambda_2 > 0, \end{cases}$$

同理可得交易量受限时的最优生产策略, 如表2所示. 表中主要参数为

$$\begin{aligned} u^+ &= \frac{\beta_n(\beta_m - \beta_n)(s_m - tg_n)}{2(\beta_n + t\beta_m)}, & u^- &= \frac{\beta_n(\beta_m - \beta_n)(g_m - ts_n)}{2(\beta_n + t\beta_m)}, \\ \Delta p_{e1}^+ &= \frac{2\beta_m u + \beta_n(\beta_m - \beta_n)g_n}{\beta_n(\beta_m - \beta_n)\eta}, & \Delta p_{e1}^- &= \frac{2\beta_m u + \beta_n(\beta_m - \beta_n)s_n}{\beta_n(\beta_m - \beta_n)\eta}, \\ \Delta p_{e2}^+ &= \frac{2u + \beta_n(1+t)g_n + (\beta_n + t\beta_m)s_m}{(\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n)\eta}, & \Delta p_{e2}^- &= \frac{2u + \beta_n(1+t)s_n + (\beta_n + t\beta_m)g_m}{(\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n)\eta}. \end{aligned}$$

表 2 交易量受限时碳价格波动下初始生产计划的鲁棒区间及其调整策略

Table 2 The robust range and adjusting strategies of initial production planning with carbon disruption under limited trading volume

实际碳价格	限量区间	应急响应区间	$\Delta \tilde{p}_n$	$\Delta \tilde{p}_m$
$\tilde{p}_e \geq 0$	$u \in [0, +\infty)$	$\tilde{p}_e \in \left[\bar{p}_e - \frac{s_n}{\eta}, \bar{p}_e + \frac{g_n}{\eta} \right]$	0	0
$\tilde{p}_e \geq \bar{p}_e$	$u \in [0, u^+]$	$\tilde{p}_e \in \left(\bar{p}_e + \frac{g_n}{\eta}, \bar{p}_e + \Delta p_{e1}^+ \right]$	$-\frac{1}{2} (\eta \Delta p_e - g_n)$	$-\frac{\beta_n}{2\beta_m} (\eta \Delta p_e - g_n)$
		$\tilde{p}_e \in \left(\bar{p}_e + \Delta p_{e1}^+, +\infty \right)$	$\frac{-\beta_m u}{\beta_n (\beta_m - \beta_n)}$	$\frac{-u}{\beta_m - \beta_n}$
	$u \in (u^+, +\infty)$	$\tilde{p}_e \in \left(\bar{p}_e + \frac{g_n}{\eta}, \frac{\beta_n g_n + \beta_m s_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta} \right]$	$-\frac{1}{2} (\eta \Delta p_e - g_n)$	$-\frac{\beta_n}{2\beta_m} (\eta \Delta p_e - g_n)$
$\tilde{p}_e \in \left(\bar{p}_e + \frac{\beta_n g_n + \beta_m s_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta}, \bar{p}_e + \Delta p_{e2}^+ \right]$		$-\frac{1}{2} (\eta \Delta p_e - g_n)$	$\frac{1}{2} (t\eta \Delta p_e - s_m)$	
$\tilde{p}_e \in \left(\bar{p}_e + \Delta p_{e2}^+, +\infty \right)$		$-\frac{2u + (\beta_n + t\beta_m)(s_m - tg_n)}{2[\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n]}$	$\frac{2tu - \beta_n(1+t)(s_m - tg_n)}{2[\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n]}$	
$\tilde{p}_e < \bar{p}_e$	$u \in [0, u^-]$	$\tilde{p}_e \in \left[\bar{p}_e - \Delta p_{e1}^-, \bar{p}_e - \frac{s_n}{\eta} \right)$	$\frac{1}{2} (\eta \Delta p_e - s_n)$	$\frac{\beta_n}{2\beta_m} (\eta \Delta p_e - s_n)$
		$\tilde{p}_e \in \left[0, \bar{p}_e - \Delta p_{e1}^- \right)$	$\frac{\beta_m u}{\beta_n (\beta_m - \beta_n)}$	$\frac{u}{\beta_m - \beta_n}$
	$u \in (u^-, +\infty)$	$\tilde{p}_e \in \left[\bar{p}_e - \frac{\beta_n s_n + \beta_m g_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta}, \bar{p}_e - \frac{s_n}{\eta} \right)$	$\frac{1}{2} (\eta \Delta p_e - s_n)$	$\frac{\beta_n}{2\beta_m} (\eta \Delta p_e - s_n)$
		$\tilde{p}_e \in \left[\bar{p}_e - \Delta p_{e2}^-, \bar{p}_e - \frac{\beta_n s_n + \beta_m g_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta} \right)$	$\frac{1}{2} (\eta \Delta p_e - s_n)$	$-\frac{1}{2} (t\eta \Delta p_e - g_m)$
		$\tilde{p}_e \in \left[0, \bar{p}_e - \Delta p_{e2}^- \right)$	$\frac{2u + (\beta_n + t\beta_m)(g_m - ts_n)}{2[\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n]}$	$-\frac{2tu - \beta_n(1+t)(g_m - ts_n)}{2[\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n]}$

注: 交易限量总额为 $u\eta$; $\Delta p_e = |\tilde{p}_e - \bar{p}_e|$.

3.3 扰动管理下初始生产计划的优化

所谓初始生产计划是指汽车生产商根据预期碳价格对新能源汽车和燃油车进行定价和产能安排. 因此, 对初始生产计划的优化本质上是提高对预期碳价格的预测水平. 尽管当前碳市场波动较大, 但仍存在一定的规律性^[14,31,32]. 假设碳价格为连续型随机变量, 服从均值为 μ 、标准差为 σ 的概率分布, 概率密度函数为 $f(\cdot)$, 分布函数为 $F(\cdot)$. 根据式 (9) 可计算生产计划完全柔性时的期望利润

$$E[\tilde{\pi}^*] = \pi_m^0 + \frac{1}{4} (\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n) \eta^2 \mu^2 + (q_n^0 - tq_m^0) \eta \mu + \frac{1}{4} (\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n) \eta^2 \sigma, \quad (12)$$

根据式(9)计算生产计划不作扰动管理时的期望利润

$$E[\tilde{\pi}^*] = \pi_m^0 - \frac{1}{4} (\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n) \eta^2 \bar{p}_e^2 + \frac{1}{2} (\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n) \eta^2 \mu \bar{p}_e + (q_n^0 - tq_m^0) \eta \mu. \quad (13)$$

易知, 当预期碳价格取 $\bar{p}_e = \mu$ 时无扰动管理下的期望值最大. 将 $\bar{p}_e = \mu$ 代入式(13), 由 $E(\tilde{\pi}^*) - E[\tilde{\pi}^*]$ 计算生产计划完全柔性时的期望价值 $\frac{1}{4} (\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n) \eta^2 \sigma$. 换言之, 如果不对碳价格波动进行扰动管理, 将造成相应的期望利润损失. 那么, 扰动管理下最优的预期碳价格是否仍为均值 μ ? 有下列结论.

命题 4 初始生产计划的鲁棒区间为 $[\bar{p}_e - s_n/\eta, \bar{p}_e + g_n/\eta]$, 鲁棒区间长度为 $\Delta p_e = s_n + g_n/\eta$, 初始生产计划保持稳定的概率 $F(\bar{p}_e + g_n/\eta) - F(\bar{p}_e - s_n/\eta)$. 同时, 初始生产计划鲁棒区间具有非对称性特征, 即应对碳价格上涨或下跌的应急调整触发点存在差异 $\left(\frac{s_n}{\eta} \neq \frac{g_n}{\eta}\right)$, 非对称率为 $\frac{s_n - g_n}{s_n + g_n} \times 100\%$.

命题 4 表明, 由于新能源汽车的滞销处置成本往往高于加急生产成本, 因此汽车生产商在应对碳价格上涨和下跌时的调整收益必然存在差异. 具体而言, 汽车生产商实施扰动管理后将额外增加期望利润 (参见表 1 中 $\Delta \tilde{\pi}$) 为

$$E[\Delta \tilde{\pi}] = \frac{1}{4} \int_{\bar{p}_e + \frac{g_n}{\eta}}^{\bar{p}_e + \frac{\beta_n g_n + \beta_m s_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta}} \frac{1}{\beta_m} \beta_n (\beta_m - \beta_n) (\eta \Delta p_e - g_n)^2 f(x) dx + \frac{1}{4} \int_{\bar{p}_e + \frac{\beta_n g_n + \beta_m s_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta}}^{+\infty} \left(\beta_m (t\eta \Delta p_e - s_m)^2 + \beta_n (\eta \Delta p_e - g_n) ((1 + 2t)\eta \Delta p_e - (g_n + 2s_m)) \right) f(x) dx +$$

$$\frac{1}{4} \int_{\bar{p}_e - \frac{\beta_n s_n + \beta_m g_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta}}^{\bar{p}_e - \frac{s_n}{\eta}} \frac{\beta_n (\beta_m - \beta_n)}{\beta_m} (\eta \Delta p_e - s_n)^2 f(x) dx +$$

$$\frac{1}{4} \int_0^{\bar{p}_e - \frac{\beta_n s_n + \beta_m g_m}{(\beta_n + t\beta_m)\eta}} \left(\beta_m (t\eta \Delta p_e - g_m)^2 + \beta_n (\eta \Delta p_e - s_n) ((1 + 2t)\eta \Delta p_e - (s_n + 2g_m)) \right) f(x) dx,$$

其中 $\Delta p_e = |x - \bar{p}_e|$.

显然, $E[\Delta \tilde{\pi}]$ 是关于预期碳价格 \bar{p}_e 的函数. 观察 $E[\Delta \tilde{\pi}]$ 发现, 若鲁棒区间向左倾斜, 即 $s_n > g_n$, 表明碳价格下跌时触发调整计划相对困难, 下跌区间的调整收益相对较低, 因此在制定初始生产计划时应适当下调预期碳价格, 以降低实际碳价格低于预期碳价格的概率.

实施扰动管理后将增加调整收益 $E[\Delta \tilde{\pi}]$, 但由于鲁棒区间的非对称性将导致预期碳价格偏离均值, 根据式(13), 若预期碳价格偏离均值达 $|\bar{p}_e - \mu|$ 时, 相比极大值点将造成 $\frac{1}{4} (\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n) \eta^2 (\bar{p}_e - \mu)^2$ 的期望损失. 由此, 有初始生产计划的优化模型

$$\begin{cases} \text{Max } Z(\bar{p}_e) = E(\Delta \tilde{\pi}) - \frac{1}{4} (\beta_m t^2 + 2\beta_n t + \beta_n) \eta^2 (\bar{p}_e - \mu)^2 \\ \text{s.t. } \bar{p}_e \geq 0. \end{cases} \quad (14)$$

本文采用 MATLAB 全局搜索算法求解该非线性规划模型.

4 数值算例

以某同时生产燃油车和新能源汽车的整车企业为例进行数值仿真, 取参数 $\phi_m = 200$ 万辆, $\phi_n = 10$ 万辆, $h = 0.5$ (续航里程 250 km), $b_m = 12$, $b_n = 0.25$, $\beta_m = 13$, $\beta_n = 0.5$, $c_m = 70\,000$, $c_n = 140\,000$, $\eta = 4\,000$, $\rho = 10.0\%$ ($t = 1/9$), $g_m = 5\,000$, $g_n = 8\,000$, $s_m = 20\,000$, $s_n = 40\,000$, $u = 5\,000$, 随机变量碳价格 P_e 服从 $N(45, 15^2)$ 的正态分布².

碳价格对汽车生产商生产决策的影响见表 3.

表 3 碳价格对汽车生产商生产决策的影响

Table 3 The influence of carbon price on vehicle manufacturer's production decision

$p_e / \text{元/t}$	$p_m / \text{万元/辆}$	$p_n / \text{万元/辆}$	$\Delta p / \text{万元/辆}$	$q_m / \text{万辆}$	$q_n / \text{万辆}$	$\pi / \text{亿元}$
0.00	11.90	25.40	13.50	58.00	3.25	321.25
10.00	12.12	23.40	11.28	54.11	4.36	311.56
30.00	12.57	19.40	6.83	46.33	6.58	310.69
45.00	12.90	16.40	3.50	40.50	8.25	326.25
60.00	13.23	13.40	0.17	34.67	9.92	355.69
80.00	13.68	9.40	-4.28	26.89	12.14	416.56
100.00	14.12	5.40	-8.72	19.11	14.36	502.11

从表 3 可以看到, 随着碳价格升高, 燃油车价格将上涨, 新能源汽车价格将下降, 在碳价格达到 60.75 元/t 时两者价格持平; 它们的产量也相应发生了升降, 在碳价格达到 109.5 元/t 时新能源汽车产量将超越燃油车产量. 由于完成减排任务时的碳价格临界点为 20.7 元/t, 因此汽车生产商的利润呈先降后升走势, 并在碳价格达到 41.4 元/t 后开始盈利. 此外, 政府设置的新能源汽车产销比例应高于 5.31%, 否则过于宽松而起不到监管作用. 表 4 显示了新能源汽车续航里程对联合生产决策的影响, 尽管续航里程不同, 但碳价格对两种车型的定价影响却没有差异, 对产量和利润的影响在续航里程较低时相对较大, 这表明碳交易制对处于新能源汽车发展初期的企业影响更大.

²为保证碳价格的非负性, 以非负部分累计概率 0.998 7 作为调整系数, 将相关计算结果调整为条件概率, 调整后非负部分累计概率为 1; 亦可采用卡方分布 $\chi^2(45)$ 进行数值演算, 但鉴于自由度较大, 实际计算仍近似为正态分布.

表 4 不同续航里程下碳价格对汽车生产商生产决策的影响
Table 4 The influence of carbon price on production decision under different cruising range

p_e / 元 / t	Δp_m / 万元 / 辆		Δp_n / 万元 / 辆		Δq_m / 万辆		Δq_n / 万辆		$\Delta \pi$ / 亿元	
	120 km	250 km	120 km	250 km	120 km	250 km	120 km	250 km	120 km	250 km
10.00	0.22	0.22	-2.00	-2.00	-5.05	-3.89	2.32	1.11	-15.72	-9.69
30.00	0.67	0.67	-6.00	-6.00	-15.16	-11.67	6.95	3.33	-12.64	-10.56
45.00	1.00	1.00	-9.00	-9.00	-22.74	-17.50	10.42	5.00	19.88	5.00
60.00	1.33	1.33	-12.00	-12.00	-30.32	-23.33	13.89	6.67	78.28	34.44
80.00	1.78	1.78	-16.00	-16.00	-40.43	-31.11	18.52	8.89	196.42	95.31
100.00	2.22	2.22	-20.00	-20.00	-50.54	-38.89	23.15	11.11	360.59	180.86

图 1 反映了汽车生产商采取不同生产策略所取得的收益. 若汽车生产商以均值 45 元 / t 作为预期碳价格来安排初始生产计划, 那么当实际碳价格一直维持在该水平时, 汽车生产商将在碳交易制下获得正收益. 一旦实际碳价格发生波动偏离均值, 那么不作任何扰动管理将造成期望利润的重大损失. 图中阴影部分即是汽车生产商获得的扰动管理收益, 较大程度上释放了生产柔性的潜在价值.

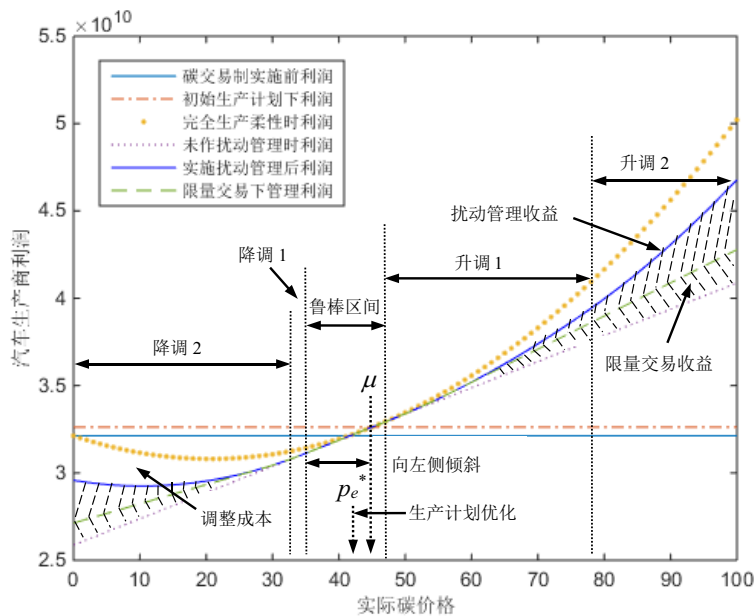


图 1 碳价格波动下汽车生产商扰动管理收益

Fig. 1 Automobile manufacturer disturbance management income under the fluctuation of carbon price

表 5 具体给出了初始生产计划的鲁棒区间和一组应急调整策略. 结合图 1, 实际碳价格在 [35.0, 47.0] 区间内波动时, 初始生产计划具有稳健性, 无须调整. 在升调区间 1 中, 汽车生产商应同时下调新能源汽车和燃油车销售价格, 此时新能源汽车销售量上升, 燃油车销量不变; 当碳价格进入升调区间 2 高位运行时, 燃油车价格同步提升, 加速被新能源汽车取代; 在下降调整区间 1 和区间 2 也有类似规律.

此外, 初始生产计划维持稳定的概率为 30.09%, 其鲁棒区间具有显著的非对称性特征, 非对称率达 66.67%, 向左侧降调区间倾斜, 表明初始生产计划应对碳价格上涨相对容易, 汽车生产商应采取保守策略、适当调低预期碳价格. 经测算, 最优预期碳价格为 $\bar{p}_e^* = 43.10$ 元 / t, 偏离均值 1.9 元 / t, 此时燃油车定价 12.86 万元 / 辆, 新能源汽车定价 16.78 万元 / 辆.

表 6 给出了一组限量交易下的扰动管理策略. 经计算, 应对碳价格上涨时的限量临界点和下跌时的限量临界点分别为 $u^+ = 30\,714.29$ t 和 $u^- = 892.86$ t. 因此, 当 $u = 5\,000$ t 时, 升调区间策略取 [0, 30 714.29], 而降调区间策略取 [892.86, $+\infty$), 参见表 2. 显然, 交易量受限不仅改变了最优调整策略, 而且对碳价格响应

区间及其扰动管理收益也造成了显著影响(如图1所示).例如,当碳价格偏离均值上涨至60.0元/t时,限量条件下新能源汽车和燃油车价格分别下调1.04万元/辆和0.04万元/辆,低于非限量条件下2.60万元/辆和0.10万元/辆的调整幅度,响应区间也从原先的[47.0,78.9]变更至(52.2, +∞).可见,限量交易对汽车生产商的碳价格扰动管理水平提出了更高要求.

表5 交易量不受限时碳价格扰动管理策略
Table 5 Strategies of carbon price disruption management with unlimited trading volume

调整区间	\tilde{p}_e / 元/t	$\Delta\tilde{p}_n$ / 万元/辆	$\Delta\tilde{p}_m$ / 万元/辆	$\Delta\tilde{q}_n$ / 万辆	$\Delta\tilde{q}_m$ / 万辆	$\Delta\tilde{\pi}$ / 亿元
鲁棒区间	[35.0, 47.0]	0	0	0	0	0
升调区间1	60.0. \in [47.0, 78.9]	-2.600 0	-0.100 0	1.250 0	0.000 0	3.250 0
升调区间2	95.0. \in [78.9, +∞]	-9.600 0	0.111 1	4.855 6	-6.244 4	47.307 2
降调区间1	34.5. \in [34.1, 35.0]	0.100 0	0.003 8	-0.048 1	0.000 0	0.004 8
降调区间2	20.0. \in [0, 34.1]	3.000 0	-0.305 6	-1.652 8	5.472 2	6.630 4

表6 交易量受限时碳价格扰动管理策略
Table 6 Strategies of carbon price disruption management with limited trading volume

限量临界点	\tilde{p}_e (元/吨)	$\Delta\tilde{p}_n$ (万元/辆)	$\Delta\tilde{p}_m$ (万元/辆)	$\Delta\tilde{q}_n$ (万辆)	$\Delta\tilde{q}_m$ (万辆)	$\Delta\tilde{\pi}$ (亿元)
鲁棒区间	[35.0, 47.0]	0	0	0	0	0
$u^+ = 30\ 714.29$	50.0 \in (47.0, 52.2]	-0.600 0	-0.023 1	0.288 5	0.000 0	0.173 1
	60.0 \in (52.2, +∞)	-1.040 0	-0.040 0	0.500 0	0.000 0	2.080 0
$u^- = 892.86$	34.5 \in [34.1, 35.0)	0.100 0	0.003 8	-0.0481	0.000 0	0.004 8
	32.0 \in [31.4, 34.1)	0.600 0	-0.038 9	-0.319 4	0.805 6	0.223 0
	20.0 \in [0, 31.4)	0.718 0	-0.052 0	-0.385 0	1.035 0	2.612 3

注:表中配额交易量上限取值 $u = 5\ 000$ t, 限量总额为 $u\eta = 2\ 000 \times 10^4$ t.

5 结束语

目前,对碳价格扰动管理尤其在汽车产业领域的研究还比较少见.本文结合我国新能源汽车产业发展背景,构建了传统燃油车与新能源汽车的联合生产决策模型,分析了碳价格对汽车生产商生产决策与运营收益的影响,求解了配额交易量不受限和受限条件下的应急调整策略,并对初始生产计划作了优化.研究表明:在新能源汽车发展初期,碳交易制对汽车生产商生产决策的影响相对较大,随着碳价格升高,新能源汽车的竞争优势逐步增强,加速取代传统燃油车;初始生产计划具备一定的稳健性,并且其鲁棒区间具有非对称性特征,从而将导致预期碳价格偏离均值,经证明,初始生产计划的优化方向与生产计划鲁棒区间的非对称倾斜方向一致;最优调整策略同时取决于碳价格波动幅度和交易量上限,交易限量的存在将改变最优调整策略及其应急响应区间.鉴于此,在新能源汽车发展初期,政府碳监管强度应相对宽松,以稳定碳市场价格、激发碳市场活跃度为其首要任务;对于汽车生产商而言,则应积极推动新能源汽车发展和技术进步,改变以往单阶段生产模式,形成“初始生产计划+应急调整计划”的完备策略集,提升碳交易下企业生产柔性水平,避免新能源汽车产业过度起伏和资源浪费.当然,本文研究尚有不足,如未考虑新能源汽车的需求扰动问题,下一步将研究需求和碳价格同时扰动时汽车生产商的最优应对策略.

参考文献:

- [1] He P, Dou G, Zhang W. Optimal production planning and cap setting under cap-and-trade regulation. Journal of the Operational Research Society, 2017, 68(9):1-12.

- [2] Jiang W, Chen Y. Optimal strategies for manufacturer with strategic customer behavior under carbon emissions-sensitive random demand. *Industrial Management & Data Systems*, 2016, 116(4): 759–776.
- [3] 赵道致, 原白云, 夏良杰, 等. 碳排放约束下考虑制造商竞争的供应链动态博弈. *工业工程与管理*, 2014, 19(1): 65–71.
Zhao D Z, Yuan B Y, Xia L J, et al. Dynamic game study in supply chain with manufacturers' competition under the constraint of productions' emission. *Industrial Engineering and Management*, 2014, 19(1): 65–71. (in Chinese)
- [4] 马秋卓, 宋海清, 陈功玉. 考虑碳交易的供应链环境下产品定价与产量决策研究. *中国管理科学*, 2014, 22(8): 37–46.
Ma Q Z, Song H Q, Chen G Y. Research on product pricing and production decision making under the supply chain environment considering the carbon-trading mechanism. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(8): 37–46. (in Chinese)
- [5] Rezaee A, Dehghanian F, Fahimnia B, et al. Green supply chain network design with stochastic demand and carbon price. *Annals of Operations Research*, 2017, 250(2): 463–485.
- [6] Diabat A, Abdallah T, Al-Refaie A, et al. Strategic closed-loop facility location problem with carbon market trading. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2013, 60(2): 398–408.
- [7] 谢鑫鹏, 赵道致. 低碳供应链企业减排合作策略研究. *管理科学*, 2013, 26(3): 108–119.
Xie X P, Zhao D Z. Research on cooperation strategy of enterprises' carbon emission reduction in low carbon supply chain. *Journal of Management Science*, 2013, 26(3): 108–119. (in Chinese)
- [8] 夏良杰, 赵道致, 李友东. 基于转移支付契约的供应商与制造商联合减排. *系统工程*, 2013, 31(8): 39–46.
Xia L J, Zhao D Z, Li Y D. Game on jointly emission reduction based on transfer payment contract between the supplier and the manufacturer. *Systems Engineering*, 2013, 31(8): 39–46. (in Chinese)
- [9] 朱庆华, 夏西强, 王一雷. 政府补贴下低碳与普通产品制造商竞争研究. *系统工程学报*, 2014, 29(5): 640–651.
Zhu Q H, Xia X Q, Wang Y L. Study of the competition between low carbon products and ordinary products manufacturer based on government subsidies. *Journal of Systems Engineering*, 2014, 29(5): 640–651. (in Chinese)
- [10] Zakeri A, Dehghanian F, Fahimnia B, et al. Carbon pricing versus emissions trading: A supply chain planning perspective. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164(10): 197–205.
- [11] 颜波, 刘艳萍, 李鸿媛. 需求扰动下风险规避型零售商主导的双渠道供应链的决策. *南开经济研究*, 2016(2): 73–91.
Yan B, Liu Y P, Li Hong Y. Decision on risk-averse retailer-dominated dual-channel supply chain under demand disruption. *Nankai Economic Studies*, 2016(2): 73–91. (in Chinese)
- [12] Zhu B Z, Ma S J, Chevallier J, et al. Modelling the dynamics of European carbon futures price: A Zipf analysis. *Economic Modelling*, 2017, 38(38): 372–380.
- [13] 杨星, 梁敬丽. 国际碳排放权市场分形与混沌行为特征分析与检验. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(6): 1420–1431.
Yang X, Liang J L. Analysis and test of fractal and chaotic behavior characteristics of the international carbon emissions market. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2017, 37(6): 1420–1431. (in Chinese)
- [14] 郭白滢, 周任远. 我国碳交易市场价格周期及其波动性特征分析. *统计与决策*, 2016(21): 154–157.
Guo B Y, Zhou R Y. Study on carbon price cycle and fluctuation characteristic of Chinese carbon market. *Statistics and Decision*, 2016(21): 154–157. (in Chinese)
- [15] Clausen J, Larsen J, Larsen A, et al. Disruption management-operations research between planning and execution. *Operations Research Management Science Today*, 2001, 28(5): 40–43.
- [16] Qi X, Bard J F, Yu G. Supply chain coordination with demand disruptions. *International Journal of Management Science*, 2004, 32(4): 301–312.
- [17] Chen K, Xiao T J. Demand disruption and coordination of the supply chain with a dominant retailer. *European Journal of Operational Research*, 2009, 197(1): 225–234.
- [18] 田江, 钱广玉, 秦霞. 基于碳交易价格波动环境下企业减排策略研究. *生态经济*, 2015, 31(5): 57–61.
Tian J, Qian G Y, Qin X. Research on tactics of enterprises' carbon emission under the carbon trading price fluctuation scenario. *Ecological Economy*, 2015, 31(5): 57–61. (in Chinese)
- [19] Kockar I, Conejo A J, McDonald J R. Influence of the emissions trading scheme on generation scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2009, 31(9): 465–473.
- [20] Zhu Q, Krikke H, Caniels M. Collaborate or not: A system dynamics study on disruption recovery. *Industrial Management & Data Systems*, 2016, 116(2): 271–290.
- [21] Atan Z, Rousseau M. Inventory optimization for perishables subject to supply disruptions. *Optimization Letters*, 2016, 10(1): 89–108.

- [22] Huang S, Yang C, Liu H. Pricing and production decisions in a dual-channel supply chain when production costs are disrupted. *Economic Modelling*, 2013, 30(1): 521–538.
- [23] 李新然, 何琦, 牟宗玉. 差别定价闭环供应链协调应对生产成本扰动研究. *中国管理科学*, 2015, 23(10): 113–124.
Li X R, He Q, Mu Z Y. Differential price closed-loop supply chain coordination with contract under production cost disruption. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(10): 113–124. (in Chinese)
- [24] 王玉燕. 需求与成本双扰动时闭环供应链的生产策略和协调策略. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(5): 1149–1157.
Wang Y Y. Adjusted production strategy and coordination strategy in closed-loop supply chain when demand and cost disruptions. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2013, 33(5): 1149–1157. (in Chinese)
- [25] 黄松, 杨超, 杨珺. 需求和成本同时扰动下双渠道供应链定价与生产决策. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(5): 1219–1230.
Huang S, Yang C, Yang J. Pricing and production decisions in dual-channel supply chains with demand and production cost disruptions. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2014, 34(5): 1219–1230. (in Chinese)
- [26] Zhang W G, Fu J H, Li H Y, et al. Coordination of supply chain with a revenue-sharing contract under demand disruptions when retailers compete. *Int. J. Production Economics*, 2012, 138(1): 68–75.
- [27] Xu M H, Qi X T, Yu G, et al. Coordinating dyadic supply chains when production costs are disrupted. *IIE Transactions*, 2006, 38(9): 765–775.
- [28] 朱勇胜, 朱继松, 余升文, 等. 新能源汽车的消费者特征研究: 基于深圳市消费者调查的分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(3): 429–435.
Zhu Y S, Zhu J S, Yu S W, et al. Research of customer's choice preference for new energy vehicles: Based on the analysis of a consumer survey in Shenzhen. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(3): 429–435. (in Chinese)
- [29] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and remanufactured products. *Management Science*, 2006, 52(1): 15–26.
- [30] Yan R, Pei Z. Information asymmetry, pricing strategy and firm's performance in the retailer- multi-channel manufacturer supply chain. *Journal of Business Research*, 2011, 64(4): 377–384.
- [31] 袁娜, 刘纪显, 张芳. 碳配额市场价格非对称性波动研究: 基于欧盟碳配额管理制度的实证分析. *金融论坛*, 2015(5): 44–53.
Yuan Y, Liu J X, Zhang F. A study of the asymmetry fluctuation in the price of carbon quota market: An analysis based on the management system of EU carbon quota. *Finance Forum*, 2015(5): 44–53. (in Chinese)
- [32] Du J B, Li Q, Qiao F X, et al. Estimation of vehicle emission on mainline freeway under isolated and integrated ramp metering strategies. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2018, 17(5): 1237–1248.

作者简介:

程永伟(1986—), 男, 浙江金华人, 博士生, 研究方向: 低碳供应链与物流产业经济, Email: chehan1986@126.com.

穆东(1962—), 女, 天津人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 物流复杂系统, 低碳物流等, Email: mueast@163.com.