

政策-市场-技术协同驱动的工业园区低碳转型路径研究

韩洁平¹, 张博涵^{1,*}, 邵文冬¹, 戈泽琦², 汤熙², 刘禹含¹

1. 东北电力大学 经济管理学院, 吉林 132012;

2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 132012



摘要： 推动工业园区深度脱碳对实现碳达峰碳中和目标至关重要。为解决当前碳减排政策激励低效、主体协同不足与电-碳市场割裂等问题，本文构建包括政府、虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）与园区企业的三方动态演化博弈模型。其中，政府通过阶梯碳税施加压力并利用动态补贴提供激励；VPP设计收益分成合约连接政府与企业；园区企业在成本收益约束下优化减排行为。同时，本文引入季节性动态权重机制，采用遗传算法求解模型的高维非凸策略空间，得到碳税税率、补贴强度、分成比例、服务费及企业碳减排量的均衡解。进一步地，本文以江苏某工业园区为对象，开展算例讨论。结果表明：该模型能够在维持经济活力的同时，显著提升协同减排效果，验证了三方博弈与合约设计的有效性。本文研究结果为园区层面的差异化、时变减排政策制定与电-碳市场协同治理提供了支持。

关键词： 虚拟电厂；政策激励；工业减排；三方动态博弈；遗传算法；碳效码

中图分类号： F420 **文献标志码：** A **文章编号：** 2097-4981(2026)01-0134-16

DOI: 10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2025-0036

0 引言

在碳达峰碳中和目标与新型电力系统建设并行推进的当下，以高能耗、长链条、集中成片为特征的工业部门仍占据区域碳排放的主导地位。工业园区是连接宏观区域与微观企业的枢纽，承载区域减排目标，以规模化治理破解企业单体减排动力不足与技术壁垒高的困境，是政策落地与要素集成的关键单元。然而，工业企业在推动能源替代与能效提升的过程中，仍面临技术成本高、市场激励不足等挑战，这抑制了节能减排的积极性。为推动园区建设与工业深度脱碳，虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）作为聚合分布式资源的核心载体，在解决政策激励

低效、市场机制割裂等难题方面具有重要潜力^[1-3]。因此，本文提出考虑政府、VPP和园区企业的三方动态演化博弈模型，刻画多主体在“约束-激励-响应”机制下的策略演化过程，进而破解工业减碳过程中面临的政策与市场机制不协同、激励与减排效益不匹配等难题。

现有国内外针对政府与企业之间碳减排政策博弈关系的研究多聚焦于碳税、补贴等政策工具的优化。平新乔等^[4]分析了1997—2017年中国碳排放强度的变化趋势，提出了结合行政调控与市场机制的优化政策。王新玲^[5]研究提出，应完善碳市场建设、加大创新技术支持和政策协同，以推动碳减排政策的精细化管理。宋鹏等^[6]从经济、能源与环境效益的综

收稿日期： 2025-07-31；**接受日期：** 2025-10-23

基金项目： 国家自然科学基金面上项目（72174039）

作者介绍： 韩洁平（1969—），女，博士，教授，主要研究方向为能源经济和电力经济。E-mail: 1020848485@qq.com

通讯作者： 张博涵（1998—），男，硕士研究生，主要研究方向为工业工程管理。E-mail: 895918343@qq.com

引用格式： 韩洁平, 张博涵, 邵文冬, 等. 政策-市场-技术协同驱动的工业园区低碳转型路径研究[J]. 能源与气候变化, 2026, 2(1): 134-149.

HAN J P, ZHANG B H, SHAO W D, et al. Research on Low-Carbon Transformation Path of Industrial Parks Driven by Policy-Market-Technology[J]. Journal of Energy and Climate Change, 2026, 2(1): 134-149.

合视角出发,对比分析了不同政策情景的优劣。张旭等^[7]综合考虑运输成本、转运成本、时间成本以及强制碳排放、碳税、碳交易和碳补偿政策下的碳排放成本,构建了多任务多式联运路径选择模型,探索规模经济和碳减排政策的影响作用。张济建等^[8]评估了阶梯碳税与碳交易的替代效应,研究了替代效应影响下微观减排主体企业的碳减排决策问题。ZHANG等^[9]提出了“政策驱动-技术驱动-市场驱动”三阶段减排路径模型,识别了东西部地区差异化政策的最优区间。ZHANG等^[10]将VPP与能效和碳效率服务相结合,形成了完整的运营方案。陈诗一等^[11]研究提出,以技术为核心、以市场为机制、以政策为引导是中国工业部门实现碳中和的重要决策。

同时,国内外学者也关注VPP在电-碳市场中的角色与作用。贾德香等^[12]构建了VPP-碳-电一体化交易策略模型,发现引入碳交易机制可显著降低高碳机组的竞价出力水平。王家怡和贺帅佳^[13]提出了计及新型分布式资源和电碳交易的VPP分布鲁棒低碳调度模型,验证了所提分布鲁棒调度模型在处理源荷不确定性、提升虚拟电厂调度经济性与低碳性方面的有效性。宋大为等^[14]、张钧钊等^[15]提出了一种基于VPP的两阶段双层联合竞价模型。李咸善等^[16]构建了电碳市场与VPP之间的主从博弈交易决策模型和VPP效益分配模型,实现了VPP内部各主体效益的公平分配。周亦洲等^[17]建立了面向多级电-碳市场的VPP两阶段自适应鲁棒优化模型,并采用列与约束生成算法求解了所提的两阶段鲁棒模型。李健等^[18]提出了一种基于动态演化博弈的多VPP优化调度模型。陈洁等^[19]构建了兼顾经济性和环保性的VPP总成本最小的优化调度模型。樊伟等^[20]提出了VPP参与电碳市场的两阶段分布鲁棒优化模型,采用Wasserstein模糊集刻画了风光不确定性,实现了多方共赢与资源潜力激发。魏春晖等^[21]提出了考虑碳排放成本的园区VPP日前-日内两阶段优化调度模型,使园区VPP参与需求响应获取的净收益最大化。

基于博弈论与演化博弈理论,部分研究构建了多方主体的策略互动框架。杨霞等^[22]构建了多情景政企碳减排演化博弈理论模型,推演了不同的碳减排政策组合对企业碳减排的影响机理和作用机制。张金良和王玉珠^[23]研究了多政策情形下市场主体参

与交易的市场架构,分别在非合作博弈和合作博弈两种情况下构建了最优生产交易模型。张雅楠等^[24]构建了碳交易和碳税制度下的政企博弈模型,通过比较不同模型的决策结果,帮助设计和优化碳定价政策。YANG和PAN^[25]构建了VPP策略下碳交易市场参与者和政府的演化博弈模型,分析了策略的稳定性和长期演变。周建国和吴昭波^[26]构建了包含Stackelberg博弈和合作博弈的双层博弈模型,讨论了利润分配和惩罚成本问题。YAN等^[27]构建了政府/电网运营商为领导者、VPP为追随者的VPP-多能源系统双层框架,通过Stackelberg博弈求解了均衡策略,验证了“政策先行-VPP响应-企业执行”的序贯决策合理性。CAO等^[28]提出了多VPP协同优化的纳什议价模型,证明了合作联盟可通过议价博弈实现效益的公平分配。

在优化算法方面,遗传算法(Genetic Algorithm, GA)因能够处理高维、非凸问题而得到了广泛应用。张旭等^[7]在多式联运路径选择模型中,采用了精英交叉混合自适应GA,挖掘了不同碳政策对总成本和排放量的影响机制。模拟二进制交叉(Simulated Binary Crossover, SBX)与自适应变异是提高GA性能的常用策略。胡成玉等^[29]采用SBX策略和改进的自适应变异策略增强算法,显著提升了收敛速度。然而,现有研究尚未系统性地将改进GA应用于解决“政府-VPP-企业”三方博弈中因季节性目标冲突引发的多峰性问题,也未充分论证其在规避此类特定问题局部最优方面的有效性。

尽管VPP在工业园区碳减排中展现出显著潜力,但现有成果集中于政府-企业二元博弈或VPP-企业双侧优化框架,将碳税、补贴等政策工具视为外生参数,未能内生于动态博弈过程;政府作为规则制定者的策略空间被边缘化,导致多主体协同机制缺失;此外,现有模型多采用静态权重,忽略了季节性目标冲突导致的政策效能波动。上述局限使得当前理论模型难以有效支撑工业园区碳减排的动态激励与协同调控需求。

本文的研究贡献主要体现在以下两个方面。1) 本文构建了一个将政府策略内生化的“政府-VPP-企业”三方动态博弈模型,突破了传统二元分析的静态视角,将阶梯碳税、动态补贴等政策工具作为政

府的内生决策变量，完整刻画了“政策制定-市场响应-技术执行”的闭环反馈机制；2）本文引入了季节性动态权重与碳效码分级机制，并采用GA求解高维非凸策略空间，有效应对了政策目标的时变冲突与局部最优陷阱，具体设计了夏季保电与冬季治霾两种情景下的权重切换规则，并运用GA求解了碳税、补贴、分成比例等关键参数的纳什均衡解。上述理论框架与求解方法的协同创新，为在工业园区层面制定差异化、自适应的高效减排政策提供了可操作的理论依据与决策工具。

1 工业园区VPP碳减排激励体系构建

工业园区VPP碳减排激励体系的理论构建，源于对传统减排路径局限性的突破性重构。传统模式下，政府依赖强制性碳排放配额与单向补贴政策，工业企业被动承担技改成本、实施设备升级与能源替代，而VPP仅作为电网调峰的辅助技术载体，三者呈割裂状态。政府出台的政策缺乏精准数据支撑导致激励粗放，企业面临减排投入与收益不匹配的困境，VPP

则受限单一电力市场价值转化能力，形成“政策落地难-企业动力弱-技术价值低”的负向循环。

本体系创新性地建立“政策规则-市场链接-技术执行”三元协同范式：政府角色转型，从指令型管控者转向市场化规则设计者，通过阶梯式碳税施加减排压力，同时建立动态补贴基金形成激励杠杆，并引入碳效码标识体系实现减排绩效分级管理，将政策工具内化为博弈策略变量；VPP功能升级，从负荷聚合商跃迁为电-碳价值转换枢纽，通过设计收益分成合约平衡三方利益，包括企业获得减排分成、VPP收取技术服务费、政府则降低监管成本，创新绿证-碳配额动态折算机制，破解年度绿证交易与分钟级调度间的时空割裂；企业行为激活，从成本承担者转变为主动减排创效者，在碳税压力和补贴激励的双重作用下，基于VPP提供的碳资产证券化等金融工具，将碳减排量转化为可交易资产，形成“减排即收益”的内生动力，最终形成“政策定规则-市场赋价值-技术保执行”的闭环激励生态。工业园区VPP碳减排激励体系架构如图1所示。

本文通过电能量流、碳数据流、资金流协同传

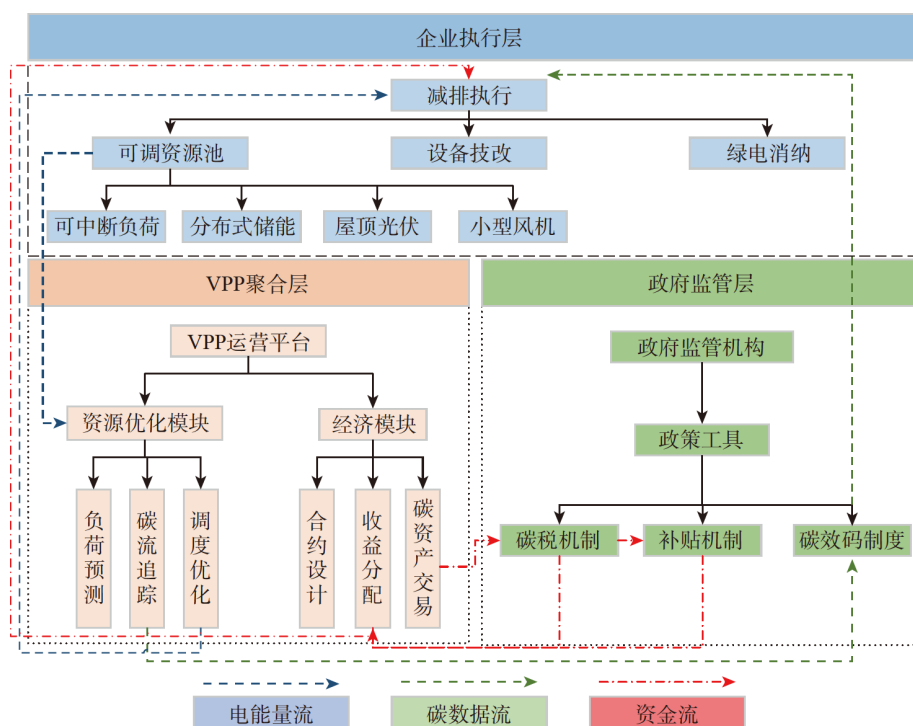


图1 工业园区VPP碳减排激励体系架构

Fig.1 Architecture of the VPP carbon emission reduction incentive system for enterprises in industrial parks

导机制，系统构建了政府监管层、VPP聚合层和企业执行层的动态交互框架。园区企业将可中断负荷、分布式储能、屋顶光伏和小型风机等可调资源数据上传至VPP运营平台，VPP运营平台基于电网需求和碳目标下达光-储-荷协同调度指令，驱动企业用电行为实时优化，直接降低生产环节的碳强度，形成电能量流的物理执行闭环；园区企业通过物联终端采集设备级实时收集碳排放数据，VPP聚合生成可验证碳减排量证明并同步政府，政府据此实施碳效码动态分级管理，实现减排绩效与政策工具的精准匹配，建立碳数据流价值度量基准；政府通过阶梯碳税征收与动态补贴分配调节资金流向，VPP依据分成合约将补贴定向分配至企业并收取技术服务费，企业碳税支出部分被注入区域性减排基金池，形成“政策调控-市场分配-再投资升级”的价值再生系统，构建资金流激励循环网络。

2 三方动态演化博弈模型构建

在工业园区碳减排的三方博弈中，政府、VPP和企业形成“规则制定-价值转化-行为响应”的闭环协同关系。政府作为博弈发起者，通过碳税（施加减排压力）与补贴（提供经济激励）设定政策边界，并以减排总量目标审核企业承诺，驱动体系运行；VPP承接政策信号并转化为市场合约（分成比例 α +服务费 θ ），聚合企业减排承诺形成总方案，在政府审核不通过时动态调整合约参数，充当政策与企业间的策略缓冲层；企业响应执行，基于碳税成本与补贴收益的权衡，计算最优碳减排量并反馈至VPP，最终执行负荷调节或设备技改，其利润最大化目标构成博弈的微观决策基础。具体博弈流程如图2所示。

在该三方博弈框架中，政府首先以碳税税率 C_t 、

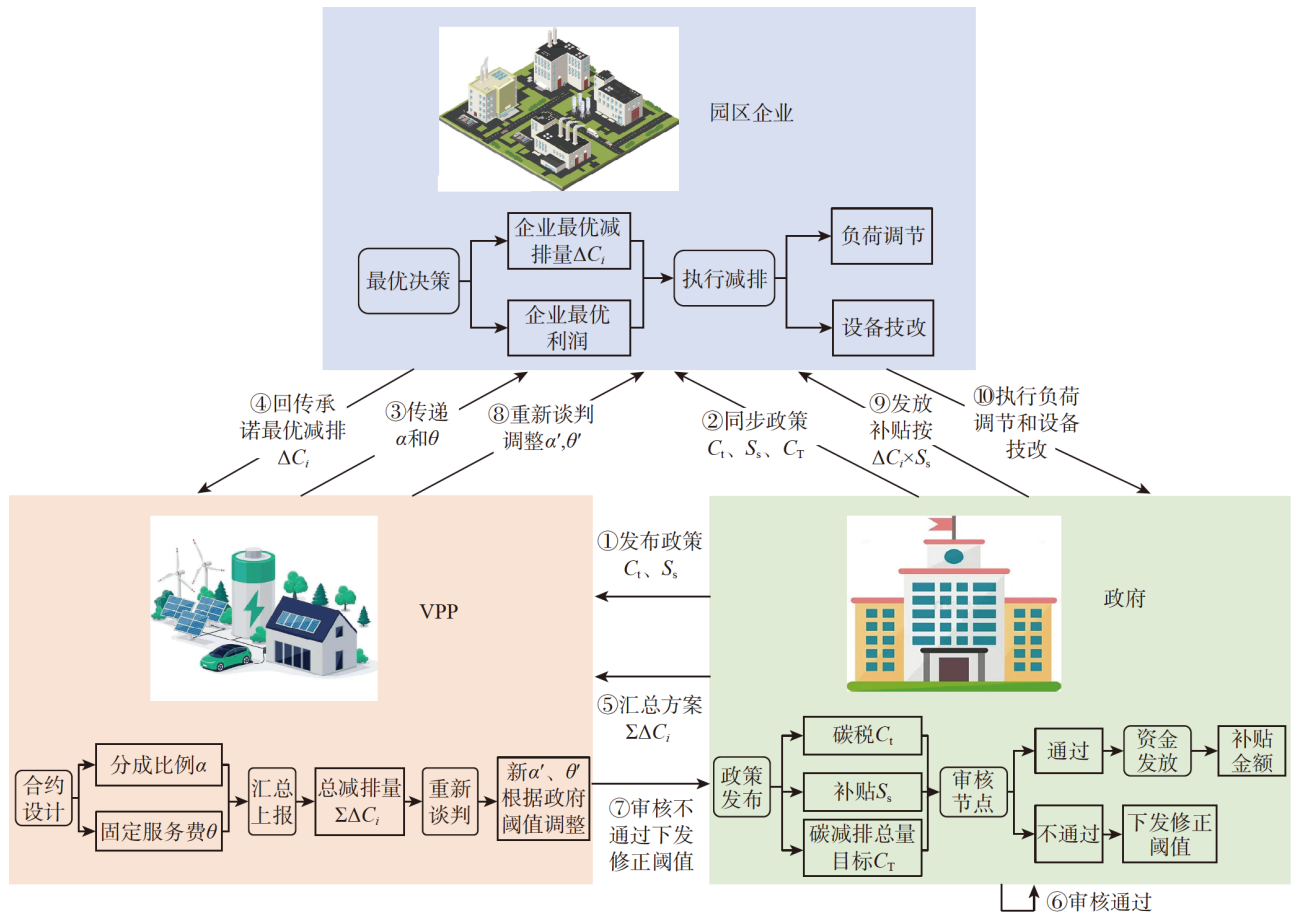


图2 政府-VPP-企业三方博弈决策流程

Fig.2 Decision-making flow for the tripartite game among the government, VPP, and enterprises

单位减排补贴 S_s 和总碳减排目标 C_T 作为外生政策变量，向VPP与园区企业同步发布，确立减排激励与规制基准。然后，VPP依据政策参数设计合约条款，设定分成比例 α 与固定服务费 θ ，并向企业提出；企业确定最优碳减排量并向VPP反馈。VPP汇总总碳减排量并提交政府审核。若总碳减排量高于总碳减排目标，则政府通过审核并执行补贴至企业账户；若未达到目标，政府向VPP下发修正阈值 $\alpha_{\min}$ 与 $\theta_{\max}$ ，触发VPP与企业的重新谈判，形成新的合约参数 α' 与 θ' ，并再次进入申报-审核循环，直至满足总量约束，最终实现政策目标与各方激励相容的均衡。

2.1 园区企业响应层模型构建

在工业园区VPP碳减排激励体系下，企业的最优碳减排量决策本质为政策信号和市场合约双重约束下的净收益最大化。企业接收政府发布的碳税和补贴政策，碳税转化为碳排放的边际成本，补贴转化为碳减排的边际收益，二者共同定义减排的外部经济性边界。分成比例决定企业实际获得的补贴比例，服务费形成固定成本项，合约将政策激励转化为企业可支配收益。每个企业 i 根据当前政策参数（ C_t 、 S_s ）和合约参数（ α 、 θ ），在技术可行的减排范围内求解净收益最大化的碳减排量 ΔC_i ，其决策模型如下：

$$\max_{\Delta C_i} \pi_i = \alpha S_s \Delta C_i - C_t e_i^{\text{dynamic}} E_i^{\text{total}} - [a_i (\Delta C_i)^2 + b_i \Delta C_i] - \theta \quad (1)$$

$$0 \leq \Delta C_i \leq \Delta C_i^{\max} \quad (2)$$

式中， e_i^{dynamic} 为电碳排放因子； a_i 、 b_i 为企业 i 的技改成本系数； E_i^{total} 为企业 i 的总用电量； $\Delta C_i^{\max}$ 为企业 i 最大碳减排量。

电碳排放因子指发电侧单位上网电量对应的 CO_2 排放量，反映了该地区电力生产中产生的间接碳排放量。因此，各时段的电碳排放因子水平主要取决于该时段内各发电机发电量比例、机组自身的碳排放强度、区域间净电力输入（包括跨国输电）和其他区域或国家同期的电碳排放因子值^[30]，具体计算公式为

$$e_i^{\text{dynamic}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{fi}(t) e_{fi} + \sum_j P_j(t) e_j(t) + \sum_k P_k(t) e_k(t)}{\sum_{i=1}^n P_{fi}(t) + P_w(t) + P_s(t) + \sum_j P_j(t) + \sum_k P_k(t)} \quad (3)$$

式中， $P_{fi}(t)$ 、 $P_w(t)$ 和 $P_s(t)$ 分别为 t 时段本区域火电机组 i 、风电机组 i 和光伏机组 i 的上网功率； n 为火电机组数量； e_{fi} 为火电机组 i 的碳排放强度； $P_j(t)$ 和 $P_k(t)$ 分别为 t 时段区域 j 和国家 k 向本区域净输送电能功率； $e_j(t)$ 和 $e_k(t)$ 分别为区域 j 和国家 k 在 t 时段向本区域输送电能对应的碳排放强度。该电碳排放因子是对不同时段发电侧各类型机组出力占比、各类型机组碳排放强度等数据计算得到的，其数值随时间动态变化，可以作为调度信号对电力用户的用电行为进行优化。

低碳需求响应机制会对用户和整个电力系统产生影响。用户可以通过改变自身的用电行为降低用电碳排放量，并在碳市场环境中获得实在的收益；对于VPP而言，用户用电行为的调整会促进系统清洁能源消纳，降低全电力系统的碳排放水平^[31]。本文假设提前一天将动态碳排放因子预测曲线发布给用户，用户以天为单位对自身用电行为进行调整。用户在感知到未来不同时段用电碳排放因子差异后，在自身调节能力允许的范围内，进行自身碳减排，由此计算VPP用户企业碳减排量。

$$\Delta C_i = \sum_{t \in T_D} (\Delta P_{L,t}^- - \Delta P_{L,t}^+) \Delta t e_i^{\text{dynamic}} \quad (4)$$

式中， T_D 为需求响应总时段数； Δt 为单位时长（调度周期）； $\Delta P_{L,t}^+$ 和 $\Delta P_{L,t}^-$ 分别为电力用户在低碳响应中时段 t 的负荷增加量和负荷减少量。

式（5）～式（7）为反映用户在参与低碳需求响应时调节能力的约束。其中，式（5）为最大/最小调节量约束；式（6）表明用户在基线负荷基础上的负荷增加量不可超过其最大额定负荷；式（7）表明用户在某时段的负荷削减量不可低于当前时段的基线负荷量。

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta P_{L,t}^+ \leq u_{L,t}^+ \Delta P_L^- \\ 0 \leq \Delta P_{L,t}^- \leq u_{L,t}^- \Delta P_L^- \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{L,t} + \Delta P_{L,t}^+ \leq P_L^- \quad (6)$$

$$\Delta P_{L,t}^- \leq P_{L,t} \quad (7)$$

式中, $P_{L,t}$ 为 t 时段的基线负荷; P_L^- 为电力用户的最大额定负荷功率; ΔP_L^- 为电力用户各时段能够调节的负荷上限; $u_{L,t}^+$ 和 $u_{L,t}^-$ 分别为指示用户是否处于增负荷状态和减负荷状态的0-1变量。

式(8)表明, 在用电行为调节前后, 单日总负荷量基本保持不变。

$$\left| \sum_{t \in T_D} (\Delta P_{L,t}^+ - \Delta P_{L,t}^-) \right| \leq \Delta Q_L^- \quad (8)$$

式中, ΔQ_L^- 为电力用户的全天最大用电量变化值。

对 $\Delta C_i^{\max}$ 进行一阶求导, 得出企业最优碳减排量。

$$\frac{\partial \Delta C_i^{\max}}{\partial \Delta C_i} = \alpha S_s - 2a_i \Delta C_i - b_i = 0 \quad (9)$$

$$\Delta C_i^* = \frac{\alpha S_s - b_i}{2a_i} \quad (10)$$

本文在构建企业响应模型时, 对负荷和可再生能源出力的预测作了简化处理, 即假设动态碳排放因子和基线负荷是可准确预测的已知量。在实际应用中, 本模型框架的有效运行高度依赖于VPP平台集成的高精度短期气象预警与负荷预测系统进行数据收集工作。

2.2 VPP 优化层模型构建

在VPP优化层求解中, 运营商以聚合利润最大化为目标, 通过动态调整合约参数实现策略优化, 具体利润模型如式(11)所示:

$$E_{VPP}^{\max(\alpha, \theta)} = \sum_{i=1}^n [(1-\alpha)S_s \Delta C_i^* + \theta \Delta C_i^*] - \left(c_0 + c_1 \sum_{i=1}^n \Delta C_i^* \right) \quad (11)$$

$$0 < \alpha < 1, \theta \geq 0 \quad (12)$$

式中, $E_{VPP}^{\max(\alpha, \theta)}$ 为VPP的最大利润; ΔC_i^* 为企业 i 的最优碳减排量; c_0 为聚合成本; c_1 为单位减排边际成本。

VPP的优化本质是多种分布式能源的聚合方式规划, 在本文中, 园区下同一VPP内的同类型分布式能源的聚合价格相同^[32]。聚合成本关系到每种能源的

聚合能否确立, 也关系到VPP的成本回收, 受未来的实际出力、电价等多个不确定因素影响, 有必要进行合理优化, 管控运营风险。结合上述简化流程, VPP的聚合成本可以表示为

$$c_0 = \sum_N \phi_N Q_N \quad (13)$$

式中, Q_N 为VPP内 N 种分布式能源的总聚合量; ϕ_N 为聚合价格。

2.3 政府决策层模型构建

在政府决策层求解中, 政府作为三方博弈的规则制定者与公共利益守护者, 通过动态调整碳政策实现社会福利的帕累托优化。其核心逻辑为权衡经济产出与环境效益的双重目标, 基于VPP提交的减排方案与企业响应数据, 精准调控碳税税率与补贴强度的组合策略。在决策过程中, 政府需兼顾工业增长底线与减排刚性约束, 通过评估政策成本与社会收益的边际替代关系, 迭代寻找激励强度与政策可持续性的最优平衡点, 最终形成驱动多方协同的碳治理政策包。本文以社会福利最大化为目标动态优化政策参数, 如式(14)所示:

$$E_{\text{gov}} = y_1 V_G + y_2 \sum \Delta C_i^* - \left[S_s \sum \Delta C_i^* + C_t \sum e_i^{\text{dynamic}} Q_i - \Delta C_i^* \right] \quad (14)$$

式中, y_1 为经济权重, y_2 为环保权重, $y_1 + y_2 = 1$; V_G 为园区总产值; Q_i 为企业 i 的总用电量; E_{gov} 为政府的社会福利。

政府决策层中经济权重与环境权重的制定, 本质为可持续发展目标下“增长-减排”动态平衡的科学量化, 是政策目标、区域禀赋、季节约束的函数。首先, 考虑到中国工业园区目前多处于人均国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)1万~2万美元的发展阶段, 且研究表明碳排放强度拐点通常出现在工业化后期, 设定一般过渡期的权重比为 $y_1 : y_2 = 6 : 4$, 对于重工业主导区域, 为强化环境约束, 设定其权重比为 $y_1 : y_2 = 4 : 6$ 。其次, 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》(以下简称“十五五”规划)将能源安全列为第一目标(权重为0.35)、气候承诺第二(0.30)、工业增长第三(0.25)、就业保障第四(0.10), 综

合推导基础权重 $y_1=0.6$, $y_2=0.4$ 。但在季节响应下, 夏季电网负荷超过阈值(90%)时, 会触发经济保障机制, 经济增长优先保电; 冬季 $PM_{2.5}$ 浓度 $>75 \mu g/m^3$ 时, 强化环境效益, 环境保护优先减排。本文综合上述分析, 以季节为平衡点设计动态权重机制, 如表1所示。

表1 动态权重机制
Table 1 Dynamic weight mechanism

情景	y_1	y_2	触发条件
基础情景	0.6	0.4	默认状态
夏季保电模式	0.8	0.2	电网负荷 $>90\%$
冬季治霾模式	0.3	0.7	$PM_{2.5}$ 浓度 $>75 \mu g/m^3$

3 模型求解

3.1 模型构建

政府首先设定碳税 C_t 和补贴政策参数 S_s , VPP拟定合约分成比例 α 和服务费 θ 上传企业; 企业基于碳税成本压力与补贴收益激励, 求解净收益最大化的最优碳减排量并反馈至VPP; VPP聚合企业减排承诺, 通过内循环迭代以聚合利润最大化为目标, 调整合约参数 (α', θ') , 当企业碳减排量变化量 $|\Delta C_i^k - \Delta C_i^{k-1}| < 0.1 \text{ t}$, 即在第 k 次迭代、碳减排量达到最优后提交政府审核。

政府基于社会福利最大化目标, 综合考虑经济产出与环境效益的动态权重调整, 并权衡政策执行成本与减排目标达成度, 在外循环中迭代搜索更优政策组合。钢铁、水泥、电解铝等中国高耗能行业的碳减排边际成本曲线表明, 当碳价小于60元/吨时, 由于减排成本大于碳税成本, 企业技改动力不足, 且欧盟碳边境调节机制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)要求出口企业支付碳差价, 2025年的基准碳价约为450元, 按中国碳强度为欧盟的2.5倍进行折算得出等效碳税为60元。研究表明, 碳税区间在[60, 100]元/吨时可兼容韩国碳排放权交易市场(48~60元)与美国加州碳配额(80~112元)标准, 避免中国出口企业受欧盟CBAM冲击[33]。同时在区域公平性约束下, 当碳税大于100元/吨时, 园区承接高碳产业转移, 将加剧区域发展失衡。基于上

述考虑, 本文将迭代碳税 C_t 调整范围设定为[60, 100]元/吨。

在碳税收入-补贴支出平衡研究中, 补贴下限(30元/吨)基于企业参与意愿阈值设定。调研结果表明, 当补贴低于30元/吨时, 园区企业参与VPP聚合的意愿小于40%。补贴30元/吨可激活“碳抵贷”等金融工具, 银行要求减排项目内部收益率大于5%, 对应补贴强度需 ≥ 28 元/吨, 超过70元/吨将扭曲市场定价[34], 因此将迭代补贴 S_s 调整范围设定为[30, 70]元/吨。

政府每轮政策调整涉及预算评审、企业宣贯等行政工作, 其成本约为50万~80万元, 与中国省级行政成本均值约为65万元基本一致。研究表明, 当政策调整成本占预期福利增益的60%以上时, 政策可持续性将显著下降[35]。因此, 本文设定100万元作为成本阈值, 以确保政策净福利能够覆盖执行成本。当政策调整引起的社会福利变化趋于收敛时即社会福利变化量 $|E_{\text{gov}}^k - E_{\text{gov}}^{k-1}| < 100$ 万元时终止, 并输出同时满足三方最优策略的五元组均衡解, 包括碳税税率、补贴强度、分成比例、服务费及企业碳减排量。通过上述流程, 最终求得三方博弈的纳什均衡。均衡求解算法流程如图3所示。

3.2 基于GA的调控模型求解

GA是一种受达尔文生物进化论启发的群体式随机优化方法, 无需目标函数梯度信息, 并具有天然并行性和鲁棒性, 通过种群并行搜索和概率性转移, 可在高维、非凸、多峰的政策空间内有效逼近全局最优, 避免陷入局部极值, 显著优于传统梯度或线性规划方法。本文利用GA的全局搜索能力, 解决政策优化中的多峰性如夏季保电与冬季减排的目标冲突, 以及非线性企业减排响应的边际递减特性难题, 具体求解步骤如下:

步骤1: 初始化种群。种群规模 N_p 设为50个个体, 每个个体表示一个政策组合 (C_t, S_s) , 随机生成

$$\begin{cases} C_t^{(j)} \sim \text{Uniform}(60, 100) \\ S_s^{(j)} \sim \text{Uniform}(30, 70) \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, N_p \quad (15)$$

步骤2: 评估适应度。对每个个体(政策组合)计算适应度(社会福利 W)。首先, 固定当前政

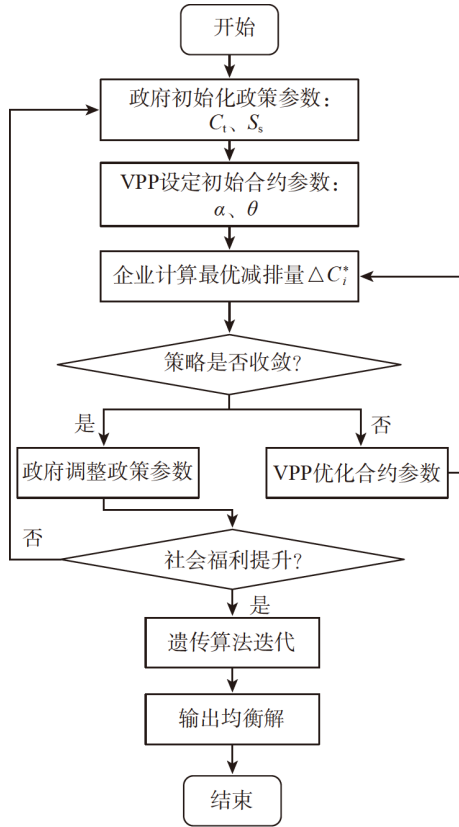


图3 均衡求解算法流程

Fig.3 Flow of the equilibrium solution algorithm

策 $(C_t^{(j)}, S_s^{(j)})$ ，传递给VPP层，启动VPP-企业内循环。随后，VPP初始化合约参数 $(\alpha^{(0)}, \theta^{(0)})$ ，企业根据当前政策和合约计算最优碳减排量 ΔC_i^* ，VPP调整 (α, θ) 最大化自身利润，直至总碳减排量变化收敛至 $|\Delta C_i^k - \Delta C_i^{k-1}| < 0.1$ t。最终输出最优合约 (α^*, θ^*) 和总碳减排量 $\sum \Delta C_i^*$ ，计算社会福利 $W^{(j)}$ 。

$$W^{(j)} = y_1 V_G + y_2 \sum \Delta C_i^* - \left(S_s^{(j)} \sum \Delta C_i^* + C_{ad, \min} \right) \quad (16)$$

式中， $C_{ad, \min}$ 为政策执行成本，固定为65万元/轮。

步骤3：选择操作。采用轮盘赌选择法计算每个个体的选择概率。

$$p_j = \frac{F_k - \min(F) + \varepsilon}{\sum_{k=1}^{N_p} [F_k - \min(F) + \varepsilon]} \quad (17)$$

式中， F_k 为个体 k 的适应度值； $\min(F)$ 为当前种群中的最小适应度值； ε 为极小常数（取0.01），防止分母为0。按概率 p_j 选择个体进入交配池。

步骤4：交叉操作。采用SBX随机配对父代个体，对每对父代 (C_t^{p1}, S_s^{p1}) 和 (C_t^{p2}, S_s^{p2}) ，生成两个子代。

$$\begin{cases} C_t^{c1} = 0.5[(1+\beta)C_t^{p1} + (1-\beta)C_t^{p2}] \\ S_s^{c1} = 0.5[(1+\beta)S_s^{p1} + (1-\beta)S_s^{p2}] \end{cases} \quad (18)$$

式中， β 为交叉分布因子。其计算公式如下：

$$\beta = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{n_c+1}}, & \text{if } u \leq 0.5 \\ \left[\frac{1}{2(1-u)} \right]^{\frac{1}{n_c+1}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

式中， u 为区间 $[0, 1]$ 上的均匀分布随机数； n_c 为交叉分布指数，取值为2。

步骤5：变异操作。变异概率 p_m 取0.1，个体 (C_t, S_s) 变异后的新值为

$$C_t' = C_t + 40q_t \quad (20)$$

$$S_s' = S_s + 40q_s \quad (21)$$

式中， q_t 和 q_s 为变量，计算方式相同。

$$q_t = \begin{cases} [2r + (1-2r)(1-q_1)^{n_m+1}]^{\frac{1}{n_m+1}} - 1, & r < 0.5 \\ 1 - [2(1-r) + 2(r-0.5)(1-q_2)^{n_m+1}]^{\frac{1}{n_m+1}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

式中， r 为区间 $[0, 1]$ 内的均匀分布随机数； n_m 为变异分布指数，取值为20； q_1 为下边界归一化距离，取值为 $(C_t - 60)/40$ ； q_2 为上边界归一化距离，取值为 $(100 - C_t)/40$ 。

步骤6：循环终止，输出参数。最大迭代次数为100，社会福利收敛条件为连续5代社会福利最大值的变化小于100万元，即 $|E_{\text{gov}}^k - E_{\text{gov}}^{k-1}| < 100$ 万元时终止，算法输出最优碳税税率 C_t^* 、最优补贴强度 S_s^* 、最优分成比例 α^* 、最优服务费 θ^* 、企业总碳减排量 $\sum \Delta C_i^*$ 。

本文所采用的GA和博弈求解框架具有较强的通用性和可迁移性，可适用于不同区域的碳政策优化

问题。然而，最优政策组合（碳税、补贴等）的数值结果高度依赖于本地数据，包括企业技改成本、动态碳排放因子、电网负荷特性等。因此，在将该模型应用于不同区域时，需重新输入本地参数并进行迭代求解，以确保输出策略的适用性与科学性。

4 算例分析

4.1 参数设置

本节以江苏某工业园区为对象进行算例分析，旨在验证所提三方博弈模型的有效性与优越性。算例分析基于一个重要的模型假设，即VPP平台能够获得未来24 h精确的动态碳排放因子与企业基线负荷数据。园区聚合了32家重点排放企业，包含钢铁、电子、生物医药行业，已部署分布式光伏185 MW、储能系统45 MW/90 MWh，并接入VPP平台运营。园区2024年的碳排放总量为9.80 Mt，目标减排总量为2.16 Mt（22%减排率），符合国家工业降碳目标。本节以该园区为基准场景，通过三方博弈模型求解最优动态政策组合，验证机制在真实工业环境下的减排效能与经济可持续性。初始数据及取值如表2所示。

4.2 均衡策略与参数敏感性分析

输入上述初始数据进行GA迭代，得出社会福利的收敛轨迹及政策参数的演化路径，如图4所示。

可以看出，社会福利随碳税（ C_t ）和补贴（ S_s ）的变化呈现明显的单峰分布。在 $C_t=86$ 、 $S_s=52$ 处，社

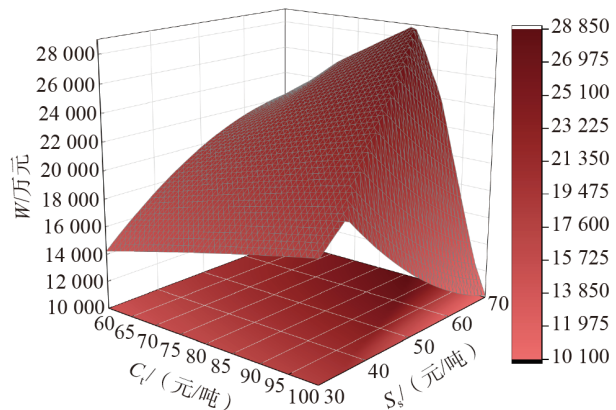


图4 博弈动态曲面
Fig.4 Game dynamic surface

会福利达到峰值（28 850万元），在 $C_t \in [84, 88]$ 、 $S_s \in [50, 54]$ 内（图中深红色区域），社会福利维持在高位（ $W > 26\,975$ 万元）。碳税压力高于企业技改成本阈值，会迫使高碳企业升级设备，补贴强度满足绿电项目内部收益率大于5%的融资门槛，能够激活“碳抵贷”等金融工具。当碳税低于70时，企业减排成本（约65元/吨）高于碳税，导致技改动力不足。例如，当 $C_t=60$ 时，即使 $S_s=70$ ， W 仅为22 257万元，较峰值减少约23%，反映出政策激励失效。碳税过高（ ≥ 95 元），导致超出欧盟CBAM碳关税等效值，会加剧企业外迁风险。在 $C_t=100$ 、 $S_s=60$ 的组合下， W 降至18 141万元，较峰值减少37%，印证了区域产业转移压力。在低补贴情景下，如 $S_s=30$ 、 $C_t=80$ ，VPP聚合参与率低于40%；而在高补贴情景下，如 $S_s=70$ 、 $C_t=70$ ，则易引发市场扭曲，滋生“骗补”等行为，

表2 初始数据
Table 2 Initial data

数据类型	取值	说明
碳税	75 元/吨	中国碳市场试点价格均值
补贴	45 元/吨	企业参与意愿阈值
分成比例	0.3	VPP 行业分成惯例（0.3~0.6），取保守值
服务费	10 万元/（企业·年）	园区企业规模中位数（年营收 5 亿）的 0.02%
碳减排总量目标	2.16 Mt	园区 2024 年碳排放总量为 9.80 Mt，22% 减排率
技改成本系数（钢铁）	1 200.8 元/吨	高碳行业
技改成本系数（电子、医药）	800.5 元/吨	低碳行业
最大可调节负荷	30%	占基线负荷比例
基础经济权重	0.60	“十五五”规划目标权重合成（能源安全 0.35+工业增长 0.25）

如虚报碳减排量等。短期来看,在政策峰值区($C_t=86$ 、 $S_s=52$),企业通过VPP聚合可中断负荷、分布式光伏等资源,以低碳需求响应获取补贴,缩短技改成本回收期。

在 $C_t=86$ 、 $S_s=52$ 的情况下,进行VPP合约参数敏感性分析,量化分成比例 α 和服务费 θ 对总碳减排量的影响,进而计算VPP利润与社会福利,结果如图5所示。

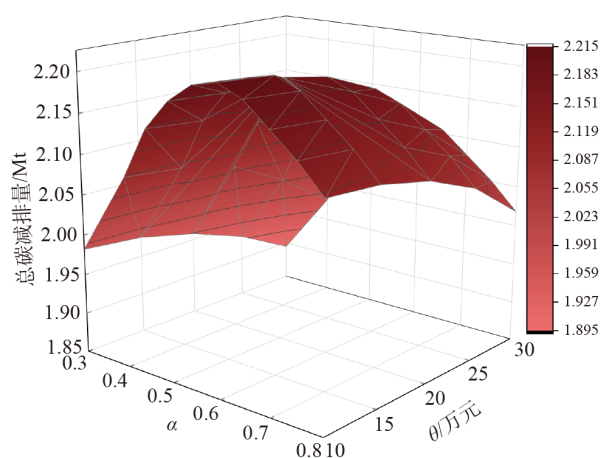


图5 VPP合约参数敏感性分析

Fig.5 Sensitivity analysis of VPP contract parameters

可以看出,当 $\alpha=0.55$ 、 $\theta=18.0$ 时,碳减排量达到峰值(2.19 Mt)。由此计算VPP利润为2 650万元,社会福利为28 325万元。碳减排量在 $\alpha \in [0.55, 0.66]$ 达到峰值,之后随 α 的增加而下降。从企业层面看, α 作为分成比例,其数值增加直接意味着企业从减排收益中获取的份额提高,提升企业的减排积极性,从而增加碳减排量; θ 增加,企业的固定成本将会增加,从而降低企业的净收益。如果 θ 过高,净收益为负可能使一些中小企业退出,从而降低总碳减排量。从VPP层面看,在给定总减排收益的前提下, α 增加会提高VPP的分成收益; θ 增加,VPP向每家企业收取的服务费增加,直接增加VPP的收入,但过量增加会导致企业退出,因此需要权衡 θ 的取值。从政府层面看, α 增加能够激励企业减排,从而增加总碳减排量,但同时政府需要支付更多的补贴。由此可见,企业追求净收益最大化要求中低 α 值和低 θ 值,VPP追求利润最大化要求高 α 值和高 θ 值,政府需在二者之间寻找平衡点。

4.3 政策效应与企业响应分析

使用三方博弈模型求解得到多组均衡解,每组解包含碳减排量 ΔC 和园区GDP,不同碳税和补贴组合下的碳减排量和GDP增长率如图6所示。

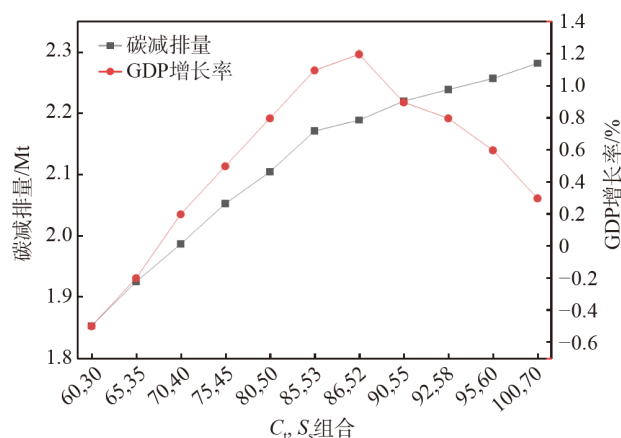


图6 政策驱动下碳减排量-经济效益优化图

Fig.6 Optimization diagram of carbon emission reduction volume and economic benefits under policy drive

随着政策组合强度增加(碳税和补贴均逐步提高),碳减排量从1.85 Mt逐渐增加到2.28 Mt。GDP增长率先上升后下降,在点(86,52)处达到峰值(1.2%),之后逐渐下降。在政策强度低于该点时,提高政策强度(增加碳税和补贴)可以同时提高碳减排量和GDP增长率。该结果表明,在政策强度不足时,适当提高政策强度可以激发企业的减排动力并促进经济转型。在政策强度高于该点时,虽然碳减排量继续增加,但GDP增长率开始下降,说明过高的政策强度可能对企业造成负担,抑制经济增长。VPP视角下,当政策组合在(80,50)到(86,52)之间时,GDP增长率为0.8%~1.2%,碳减排量为2.10~2.19 Mt,区间对VPP较为有利。此时,补贴足够支持VPP开展投资,碳税水平也尚未造成过大的成本压力。园区视角下,在低碳税和低补贴阶段,碳减排量低且GDP增长率为负值,说明政策力度不足时,无法有效激励减排,同时可能因为经济转型缓慢而影响增长。当政策组合在(70,40)到(85,53)之间时,GDP增长率由负转正并持续上升,碳减排量也稳步提升,说明该区间内的政策组合对园区企业转型具有明显的激励作用。当政策强度超过(86,52)后,GDP增长率下

降，表明园区内企业可能面临成本上升过快、竞争力下降的问题。

通过分析企业响应行为，进一步分析博弈影响效果（图7）。可以看出，钢铁、电子制造、生物医药3类企业通过参与VPP均获得了一定的额外收益，从而使净收益变化为正。钢铁作为高碳行业，虽然其技改成本和碳税支出最高，但获得的补贴收益也最高，最终净收益为210万元，说明政策设计对高碳企业转型有激励作用。而低碳行业的电子制造和生物医药企业获得的补贴收益高于技改成本，其负荷有一定的可调节性，更能参加VPP需求响应获取额外收益。以上结果说明，在当前政策组合配合VPP机制下，3类企业均实现了净收益增加，说明政策设计合理。

4.4 季节性调控与碳效码机制验证

在 $C_t=86$ 、 $S_s=52$ 的政策组合下，不同情景的表现如图8所示。基础场景中，企业通过参与VPP提升净收益，减排积极性较高，总碳减排量达到2.19 Mt。夏季保电模式下，政府优先保障经济增长，企业用电约束放宽，减排压力降低，企业减少负荷调节，转向满负荷生产，导致碳减排量降至1.95 Mt，但GDP增长率升至1.5%，企业营收增加。冬季治霾模式下，环保权重提升，政府强化减排目标，企业面

临更高碳税压力和更严排放监管，被迫加大技改投入，通过VPP聚合响应补贴政策，积极参与负荷调节，总碳减排量升至2.35 Mt。然而，GDP增长率降至0.9%，表明企业生产受限。对于VPP，夏季保电模式下，电网负载大于90%会触发保电机制，VPP优先保障供电稳定性，减少需求响应调用，VPP利润因企业参与率降低和技术服务费减少而降低，需动态调整合约维持企业参与意愿。冬季治霾模式下， $PM_{2.5}$ 浓度 $>75 \mu g/m^3$ 会触发强化减排，VPP通过光-储-荷协同调度最大化绿电消纳，负荷调节指令频率增加，企业响应率提升至95%，社会福利为24 600万元。尽管技术服务费 θ 可维持在高位，但高分成比例压缩VPP利润空间。动态权重机制通过三方博弈实现“保电-治霾”弹性过渡，最优平衡点为基础场景下 $\alpha=0.55$ 、 $\theta=18$ 、 $C_t=86$ 、 $S_s=52$ 的政策组合，其社会福利为28 850万元，较冬季场景提高了17.3%，验证了三方激励相容机制的设计有效性。

由上述算例实证分析可知，在 $\alpha=0.55$ 、 $\theta=18$ 、 $C_t=86$ 、 $S_s=52$ 的均衡策略下，社会福利达到峰值（28 850万元），总碳减排量为2.19 Mt，GDP增长1.2%，求解具有帕累托最优性。首先，该策略实现了社会福利最大化，符合社会计划者视角下的优化准则，任何单方利益提升均会损害整体福利。其次，

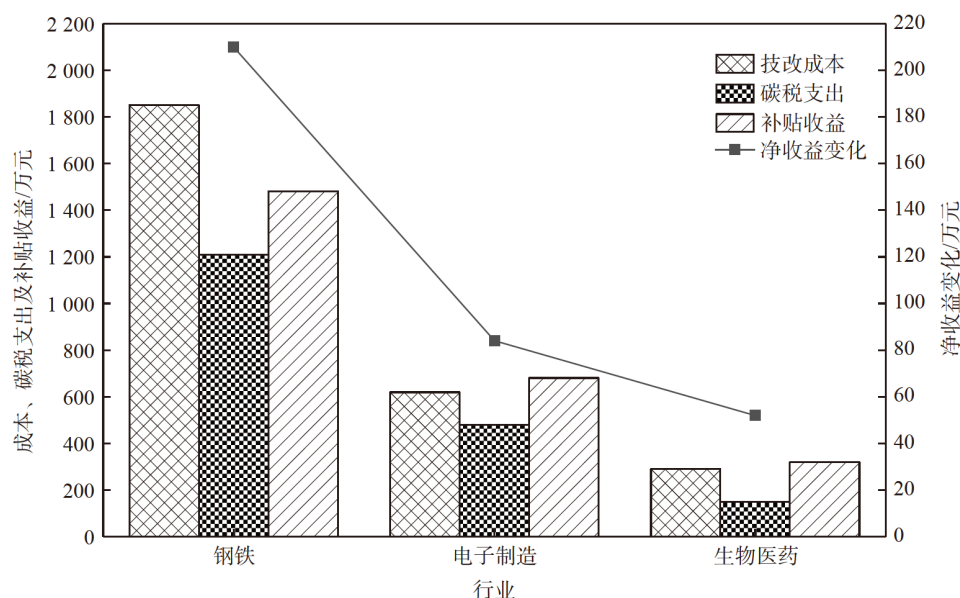


图7 企业响应行为分析
Fig.7 Analysis of enterprise response behavior

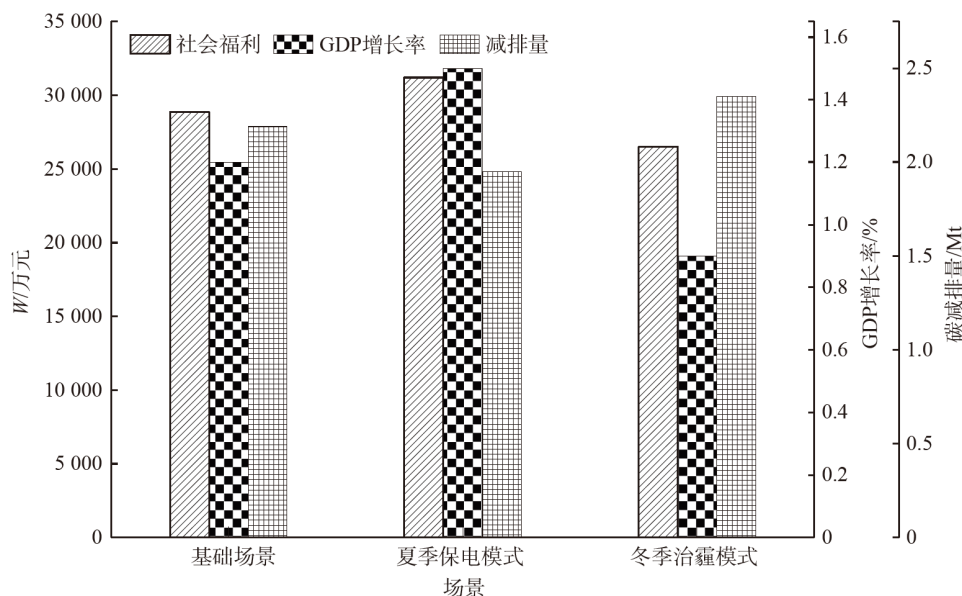


图8 动态权重季节性影响分析

Fig.8 Analysis of the seasonal impact on dynamic weight

该状态为纳什均衡，三方激励相容，任意主体单独偏离均无法获得更高收益，体现了博弈在非合作框架下的稳定性与可实现性。最后，数值结果表明该均衡显著优于其他策略，偏离点的社会福利下降幅值最高达37%，实现了从低效状态向更优状态的帕累托改进，使所有参与者的收益均得到提升。

研究验证了三方博弈可激励企业减排，帮助政府建立合理的碳税补贴机制。研究进一步补充了政策实施路径流程，系统描述了从碳税立法到年度调整的闭环政策执行流程，将文档中分散的政策工具（阶梯碳税、动态补贴、碳效码等）整合为可操作的行动链条，明确各环节的衔接关系，作为对三方博弈模型的补充，帮助政府决策如何通过制度设计转化为企业行动。

图9系统描述了“立法-执行-反馈”的动态治理闭环：以碳税立法为起点，同步建立减排基金池与效码标准，奠定制度基础；高碳企业自动纳入阶梯征税体系，通过VPP平台完成企业接入认证；每季度基于实时碳数据流进行核查评级，根据碳效码结果实施差异化激励，绿码企业在正常缴纳碳税的同时获得补贴激励，黄码企业接受常态化监管与适度补贴，红码企业面临惩罚性征税且限产，其惩罚性征税被注入减排基金池，反哺绿码企业补贴；年度汇

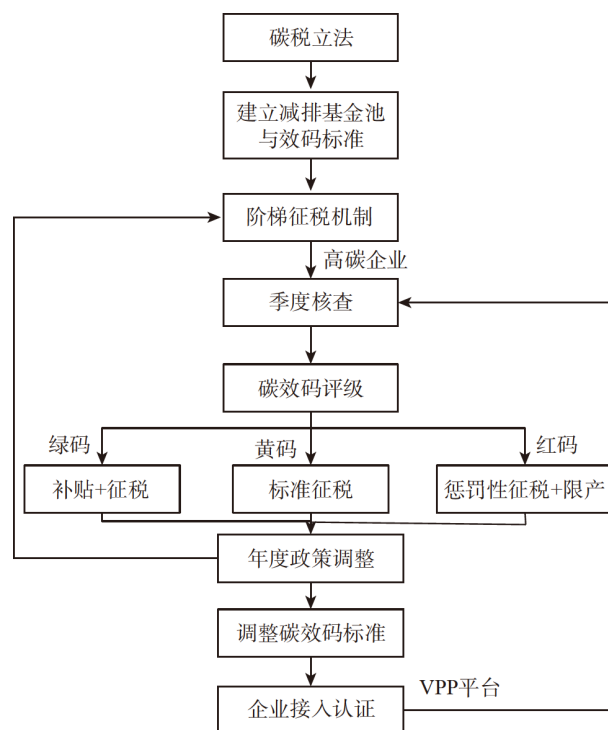


图9 政策实施路径流程

Fig.9 Flow of policy implementation path

总政策效能数据，动态调整碳税阶梯阈值与碳效码评定标准，该流程将文档中“政府-VPP-企业”的三方博弈机制转化为可操作的行动指南。具体碳效

码分级标准如表3所示。

本文构建的碳效码分级判定标准具体阈值的设定源于对国家政策目标、电网运营需求、项目经济性及国际竞争格局的综合考量，旨在为三方博弈提供量化依据。减碳率以《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中的18%为基准，并对园区设定更高要求（ $\geq 20\%$ ），以发挥其示范作用。VPP响应率（ $\geq 95\%$ ）依据电网高可靠性标准设定，旨在保障系统运行稳定与经济性。成本效率阈值（ < 50 元/吨）则兼顾了绿色金融的收益率要求（临界成本约52元/吨）与高碳行业（钢铁、水泥）技改成本的中位数现实。单位碳强度标准（ < 1.0 吨/万元）严于国家生态工业园普遍准入水平，并前瞻性地对标欧盟CBAM等国际碳壁垒的潜在风险阈值，以引导产业升级。综上，通过上述4个维度的量化分级，“碳效码”将宏观目标转化为可审计的微观调控工具，其判定结果直接与企业获得的实际补贴比例 α 挂钩，从而精准驱动政府、VPP与企业三方博弈向预定目标演进。

5 结论与建议

5.1 结论

本文针对当前工业园区碳减排存在的政策激励低效、多主体协同不足、电-碳市场割裂的难题，提出创新性的“政府-VPP-企业”三方动态博弈框架。其中，政府作为规则制定者，通过阶梯碳税施加减排压力，以动态补贴提供经济激励；VPP作为价值转化枢纽，设计分成合约比例 α 和服务费 θ ，连接政策与企业；企业则基于成本收益权衡响应减排。模型通过逆向归纳法求解纳什均衡，内循环优化VPP-企业合约参数，外循环调整政府政策组合，最终协同

优化碳税-补贴动态组合与VPP分成合约，并建立以碳效码为精准激励组带的三方激励相容机制。具体结论如下：

（1）本文通过构建“政府-VPP-企业”三方动态博弈框架，成功求解了帕累托最优均衡策略： $\alpha=0.55$ 、 $\theta=18$ 、 $C_t=86$ 、 $S_s=52$ 。在该均衡点下，对江苏某工业园区进行了实证分析。结果表明，在该均衡点下，总碳减排量达到2.19 Mt，超过园区设定的2.16 Mt目标，GDP增长率为1.2%，社会福利峰值为28 850万元。该结果表明，该机制能有效协同减排目标与经济发展，将政策工具、VPP合约与企业响应内生耦合，破解传统模式下的激励粗放与机制割裂难题。

（2）碳减排政策工具存在严格的有效区间（ C_t ：70~95； S_s ：30~70），精准设定是保障政策效能与经济可持续性的关键。敏感性分析表明，碳税低于70元时技改动力不足，高于95元时企业负担过重并可能触发产业外迁；补贴低于30元时，中小企业VPP聚合意愿低，高于70元时则存在市场扭曲和“骗补”风险。碳减排政策工具超出此区间将导致社会福利显著下降或政策目标落空。

（3）融入季节性动态权重的调控机制是弹性应对短期目标冲突、保障长期减排路径适应性的有效手段。实证表明，夏季保电模式下GDP增长率可升至1.5%，但碳减排量降至1.95 Mt；冬季治霾模式下碳减排量可增至2.35 Mt，但GDP增长率降至0.9%。配套的碳效码分级管理体系基于减碳率、响应率、成本效率、单位碳强度4个维度，为差异化的政策执行提供了客观依据，将博弈理论转化为可操作的监管工具，确保了机制的执行力。基础场景下的均衡策略（ $\alpha=0.55$ 、 $\theta=18$ 、 $C_t=86$ 、 $S_s=52$ ）社会福利产出最高，为28 850万元，较极端场景提高17.3%。

表3 碳效码分级管理标准
Table 3 Carbon-efficient code grading management standard

维度	绿码	黄码	红码
减碳率/%	≥ 20	10 ~ < 20	< 10
VPP 响应率/%	≥ 95	80 ~ < 95	< 80
成本效率（技改成本/碳减排量）/（元/吨）	< 50	50 ~ 70	> 70
单位碳强度/（吨/万元）	< 1.0	1.0 ~ 1.5	> 1.5

5.2 建议

本文为构建清晰的三方博弈框架，在建模时对企业响应行为进行了必要的简化处理，即假设所有企业均遵循同一形式的利润函数和碳减排量决策函数。虽抓住了企业响应政策激励的核心逻辑，但未能完全体现现实企业中因行业属性、技术水平、融资能力、管理者意识等产生的巨大异质性。技改成本敏感性分析表明，当高碳行业的技改成本系数提升20%时，其最优碳减排量下降约15%，意味着政府需提供更高的补贴强度或VPP需提供更高的分成比例才能激励企业达到相同的减排目标。调节能力敏感性分析表明，企业的最大可调节负荷直接决定了其通过需求响应实现碳减排的上限。对于调节能力不足的企业，碳税政策的效果远优于补贴政策，因其减排手段更依赖设备技改而非负荷调整。因此，在实践中应用本模型框架时，决策者必须首先进行本地化的企业调研与参数校准，尤其要准确把握关键异质性参数的分布情况，从而求解出更符合当地实际的最优政策组合。

构建动态适配的碳治理框架，强化制度协同与精准调控。政府需从指令型管控转向市场化规则设计者角色，建立“政策工具箱+动态反馈”的双层治理体系。核心为设计阶梯式碳税与动态补贴的协同机制，通过立法设定碳税基础税率及递增规则，同时将碳税收入定向注入区域性减排基金池，依据季度核查的碳效码评级结果差异化分配补贴：对积极减排企业实施补贴加成，对滞后企业削减补贴并触发审计。针对季节性目标冲突如夏季保电与冬季治霾，应建立经济-环保权重自动切换机制。当电网负载或污染指数突破阈值时，动态调整政策优先级，避免静态政策在极端场景下的失效。政策设计应充分考虑园区企业的异质性，避免“一刀切”。在实际政策制定中，政府应授权VPP或第三方机构，建立企业碳减排潜力和成本承受力的分级评估体系。基于评估结果，对高碳排、高技改成本的重点管控企业设定更严格的碳效码达标线并提供过渡期技术支持；对减排潜力大、成本承受力弱的中小微企业则提供更高的补贴比例或简化认证流程，以提升政策整体的公平性与执行效率。

升级电-碳价值转化枢纽功能，创新市场化服务模式。VPP运营商需突破传统负荷聚合商定位，向“技术集成+金融赋能”双核心服务商转型。一方面，设计差异化的分成合约机制，实现对本研究模型中单一碳税和补贴的假设拓展。针对高碳企业，应设计高分成比例碳税+高服务费补贴的合约包，侧重对其大规模技改进行激励；针对用能灵活的中小企业，则应提供低服务费+低碳资产证券化门槛的轻量化合约，降低其参与壁垒，扩大聚合规模。另一方面，联合金融机构创新碳金融服务，基于企业历史减排数据及可调节负荷潜力，将未来减排收益权打包为标准化金融产品，如碳收益债券，吸引社会资本参与；探索“技改设备租赁+减排分成”的服务模式，企业无需预付高额改造费用，可通过后期减排收益分期偿付，从而显著降低中小企业参与壁垒。

主动嵌入碳价值链条，构建“减排即收益”的内生机制。企业需转变被动合规思维，通过深度参与VPP生态将减排转化为核心竞争力。高碳排放企业优先将高耗能设备接入VPP可调资源池，利用负荷调节响应补贴政策，缩短技改成本回收周期；同时将碳成本管理纳入重大决策，在VPP提供的碳资产证券化等金融工具支持下，将碳减排量转化为可质押融资的流动资产。中小型制造企业则需挖掘分布式资源价值，如屋顶光伏、备用储能等设施，通过VPP聚合参与绿电交易，获取额外收益；柔性生产线配合VPP需求响应指令，在低碳电价时段提升产能利用率。鼓励企业建立碳效码目标管理体系，将减碳率、VPP响应率等指标纳入绩效考核，主动寻求VPP的技术诊断服务优化用能结构。

参考文献

- [1] 张增凯, 彭彬彬, 解伟, 等. 能源转型与管理领域的科学研究问题[J]. 管理科学学报, 2021, 24(8): 147-153.
- [2] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.
- [3] 段宏波, 汪寿阳. 中国的碳中和: 技术经济路径与政策选择[J]. 管理科学学报, 2024, 27(2): 1-17.
- [4] 平新乔, 郑梦圆, 曹和平. 中国碳排放强度变化趋势与“十四五”时期碳减排政策优化[J]. 改革, 2020(11): 37-52.
- [5] 王新玲. 政策工具视角下欧美碳减排政策比较分析及对中国的启示[J]. 国际贸易, 2024(12): 18-27.
- [6] 宋鹏, 黄婉婷, 毛显强, 等. 协同碳减排与非化石能源发展目标

- 的政策效应：征税与补贴[J]. 管理科学学报, 2025, 28(5): 174–190.
- [7] 张旭, 柳佳瑶, 袁旭梅, 等. 不同碳减排政策下考虑规模经济的多式联运路径选择研究[J]. 工业工程与管理, 2022, 27(4): 22–31.
- [8] 张济建, 丁露露, 孙立成. 考虑阶梯式碳税与碳交易替代效应的企业碳排放决策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(11): 41–48.
- [9] ZHANG B, SONG X H, ZHANG C, et al. An energy storage roadmap study incorporating government subsidies based on a combined tripartite evolutionary game and Monte Carlo simulation approach: evidence from China[J]. Energy, 2025, 331: 137046.
- [10] ZHANG Y L, PAN W W, LOU X D, et al. Operation characteristics of virtual power plant and function design of operation management platform under emerging power system[C]//2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Haikou, China, 2022: 194–196.
- [11] 陈诗一, 王畅, 郭越. 面向碳中和目标的中国工业部门减排路径与战略选择[J]. 管理科学学报, 2024, 27(4): 1–20.
- [12] 贾德香, 柳占杰, 高骞, 等. 计及碳—电一体化交易的虚拟电厂竞价策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 89–97.
- [13] 王家怡, 贺帅佳. 计及新型分布式资源与电碳交易的虚拟电厂分布鲁棒低碳调度模型[J]. 电力建设, 2025, 46(7): 13–26.
- [14] 宋大为, 尹硕, 何洋, 等. 基于虚拟电厂的多元小微主体参与现货市场的竞价策略[J]. 南方电网技术, 2021, 15(9): 75–84.
- [15] 张钧钊, 姜欣, 段世杰, 等. 虚拟电厂参与电-碳联合市场运行的竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 108–118.
- [16] 李咸善, 杨华, 张远航, 等. 考虑CCER机制的虚拟电厂电碳市场运营策略[J/OL]. 现代电力, 1–13[2025-03-25]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2024.0244>.
- [17] 周亦洲, 吴俊钊, 孙国强, 等. 面向多级电-碳耦合市场的虚拟电厂两阶段鲁棒交易策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(18): 38–46.
- [18] 李健, 张净杰, 杜龙, 等. 考虑“电-碳-绿”联合交易的虚拟电厂博弈优化调度[J]. 浙江电力, 2025, 44(2): 64–74.
- [19] 陈洁, 王樊云, 徐涛, 等. 电-碳市场下考虑风光不确定性的虚拟电厂优化调度[J]. 分布式能源, 2024, 9(4): 60–68.
- [20] 樊伟, 范英, 谭忠富, 等. 基于多层利益共享的虚拟电厂参与电碳市场分布鲁棒优化模型[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(2): 661–683.
- [21] 魏春晖, 单林森, 胡大栋, 等. 面向需求响应的园区虚拟电厂优化调度策略[J]. 中国电力, 2025, 58(6): 112–121.
- [22] 杨霞, 何刚, 张世玉, 等. 碳减排政策组合使用效能差异及提升策略[J]. 中国环境科学, 2025, 45(3): 1699–1712.
- [23] 张金良, 王玉珠. 不同碳减排政策交互影响下发电企业交易策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(1): 134–142.
- [24] 张雅楠, 董媛香, 张国珍. 基于Stackelberg博弈模型的企业减排策略及混合碳政策决策研究[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(11): 81–91.
- [25] YANG Y Y, PAN L Y. An evolutionary game model of market participants and government in carbon trading markets with virtual power plant strategies[J]. Energies, 2024, 17(17): 4464.
- [26] 周建国, 吴昭波. 双碳目标下基于Stackelberg和合作博弈的虚拟电厂双层优化调度[J]. 动力工程学报, 2024, 44(10): 1611–1619.
- [27] YAN Y Y, XIE S W, TANG J L, et al. Transaction strategy of virtual power plants and multi-energy systems with multi-agent Stackelberg game based on integrated energy-carbon pricing[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12: 1459667.
- [28] CAO J Y, YANG D C, DEGHANIAN P. Cooperative operation for multiple virtual power plants considering energy-carbon trading: A Nash bargaining model[J]. Energy, 2024, 307: 132813.
- [29] 胡成玉, 余果, 代立国, 等. 知识驱动的高维多目标优化算法研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 19–25.
- [30] 崔杨, 邹新鹏, 赵钰婷, 等. 考虑动态电碳排放因子的新型电力系统电碳综合需求响应调度方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(10): 1–7.
- [31] 李姚旺, 张宁, 杜尔顺, 等. 基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2830–2842.
- [32] 梁博森, 杨甲甲, 文福拴, 等. 兼顾公平与效率的聚合多元灵活资源虚拟电厂协同规划[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(10): 67–76.
- [33] 胡海生, 王克强, 刘红梅. 增值税税率降低和加计抵减政策的经济效应评估：基于动态可计算一般均衡模型的研究[J]. 财经研究, 2021, 47(1): 4–17.
- [34] 刘蓉, 余英杰, 陈凌庆. 组合式税费支持政策的理论演进与组合效能研究[J]. 财政研究, 2023(10): 16–30.
- [35] 魏楚. 工业能源效率、节能潜力与影响因素：基于浙江省的实证分析[J]. 学习与实践, 2010(3): 16–25.

Research on Low-Carbon Transformation Path of Industrial Parks Driven by Policy-Market-Technology

HAN Jieping¹, ZHANG Bohan^{1,*}, SHAO Wendong¹, GE Zeqi²,
TANG Xi², LIU Yuhan¹

1. School of Economics and Management, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China

Abstract : Promoting the deep decarbonization of industrial parks is crucial for achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals. In order to solve the problems of low incentive efficiency of carbon emission reduction policies, insufficient cooperation among the main bodies, and the fragmentation of the electricity-carbon market, this paper constructs a tripartite dynamic evolutionary game model including government, virtual power plant (VPP) and park enterprises. In this model, the government exerts pressure through a carbon tax ladder and provides incentives via dynamic subsidies; VPPs design revenue sharing contracts to connect the government and enterprises; and enterprises in the park can optimize their reduction behaviors under cost-benefit constraints. Additionally, this study introduces the seasonal dynamic weight mechanism and solves the high-dimensional nonconvex strategy space of the model by genetic algorithm, deriving equilibrium solutions for the carbon tax rate, subsidy intensity, share ratio, service fee, and enterprise emission reduction. Furthermore, this study uses an industrial park in Jiangsu as an example to discuss. The results show that the model can significantly improve the effect of coordinated emission reduction while maintaining economic vitality, which verifies the effectiveness of the tripartite game and contract design. It provides support for the differentiation at the park level, the formulation of time-varying emission reduction policies, and the coordinated governance of the electricity-carbon market.

Key Words : virtual power plant; policy incentives; industrial emission reduction; three-way dynamic game; genetic algorithm; carbon-efficient code