

# 碳达峰目标下工业园区能源-环境协同优化模型构建与实证分析

许杰<sup>1</sup> 季晓华<sup>2</sup> (通讯作者) 李建国<sup>3</sup>

1. 四川轻行数智科技有限公司 四川省成都市, 610213

2. 南通楹环城市环境服务有限公司 江苏省南通市, 226000

3. 潍坊市清大国华环境资源有限公司 山东省潍坊市, 262724

**【摘要】**：工业园区作为碳排放的重要来源，其能源系统的低碳转型是实现碳达峰目标的关键环节。本文针对碳达峰目标下工业园区能源消耗与环境排放的协同优化问题，构建了涵盖能源成本、碳排放和环境治理三个维度的多目标协同优化模型，引入纳什均衡理论寻求经济性与低碳性的最优平衡点。以华东地区某综合型工业园区为实证对象，基于2023—2025年实际运行数据，设置基准情景和优化情景进行对比分析。结果表明，优化模型可使园区年运行总成本下降11.2%，碳排放量降低18.6%，污染排放总量减少13.8%，验证了模型的可行性与有效性。研究结论可为我国工业园区能源-环境协同管理提供方法论支撑。

**【关键词】**：碳达峰；工业园区；能源-环境协同；多目标优化；纳什均衡

## 1 引言

工业园区是我国工业经济的重要载体，也是能源消耗和碳排放的集中区域。据统计，截至2019年，我国各类工业园区数量已达2543个，园区碳排放量占全国碳排放总量的比重超过30%。2024年中央经济工作会议首次提出“建立一批零碳园区”，2025年7月，国家发展改革委等部门联合印发《关于开展零碳园区建设的通知》，明确了加快园区用能结构转型、推进节能降碳等八大重点任务。碳达峰目标的实现，迫切要求工业园区从能源供给、消费模式和排放管理等方面进行系统性优化。

近年来，国内外学者围绕工业园区能源-环境协同优化开展了大量研究。裴金铃等构建了工业园区减污降碳协同效应评价体系，通过实证研究发现评价体系可有效反映园区协同治理成效。高超等针对含电-气-热耦合的园区综合能源系统，引入阶梯式碳交易机制建立优化调度模型，结果显示系统运行成本降低12.4%，碳排放量降低16.2%。在国际研究方面，有学者针对生态工业园区开发了多目标优化框架，优化情景下碳排放强度在2025年和2030年分别下降27.29%和45.64%。然而，现有研究多侧重于能源系统的单目标优化或技术层面的设备调度，在能源、经济、环境三者的协同机理刻画和实际应用验证方面仍有不足。

本文旨在构建一个融合能源成本、碳排放与环境治理的多目标协同优化模型，以纳什均衡理论刻画经济目标与环境目标之间的博弈关系，并通过典型工业园区的实证分析检验模型效果，为碳达峰目标下工业园区绿色低碳转型提供决策工具。

## 2 能源-环境协同优化模型构建

### 2.1 问题描述与建模思路

工业园区能源-环境协同优化的核心问题在于：在满足园区生产和用能需求的前提下，如何通过能源结构调整、用能策略优化和污染治理手段的组合，实现经济成本与碳排放、污染物排放的协同最优。本质上，这是一个典型的“不可能三角”问题——追求经济成本最小化往往伴随着能源清洁化投入不足，进而导致碳排放和污染物排放偏高；而过度追求低碳环保又可能造成经济成本急剧上升。

鉴于此，本文采用多目标规划方法，将经济成本、碳排放和污染排放作为三个相互制约的优化目标，引入纳什均衡思想，寻求各方利益主体都能接受的均衡解。

### 2.2 目标函数

(1) 经济成本目标。园区总经济成本包括能源采购成本、设备运行维护成本、碳交易成本和污染治理成本四个部分。优化目标为总成本最小化：

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^n c_{e,i} E_{i,t} + C_{om} + c_c \cdot \max(0, E_{c,t} - Q_c) + \sum_{j=1}^m c_{p,j} R_{j,t} \right)$$

其中， $c_{e,i}$ 、 $c_{p,j}$ 、 $i$ 为第 $i$ 种能源的单价， $E_{i,t}$ 、 $t$ 为时段 $t$ 的能源使用量； $C_{om}$ 为设备运维费用； $c_{cc}$ 为单位碳交易价格， $E_{c,t}$ 、 $t$ 为实际碳排放量， $Q_c$ 为碳配额； $c_{p,j}$ 、 $j$ 为第 $j$ 类污染物单位治理成本， $R_{j,t}$ 、 $t$ 为污染物排放量。

(2) 碳排放目标。以园区碳排放总量最小化为目标：

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \eta_i \cdot E_{i,t} \cdot \theta_i$$

其中， $\eta_i$ 、 $i$ 为第 $i$ 种能源的碳排放因子， $\theta_i$ 为能源利用效率修正系数。

(3) 环境治理目标。以园区主要污染物排放总量最小化为目标：

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m \omega_j \cdot P_{j,t} \cdot (1 - \alpha_j)$$

其中,  $\omega_{jj}$  为第  $jj$  类污染物的环境损害权重系数,  $P_j, tP_j, t$  为污染产生量,  $\alpha_j$  为末端治理设施的去除效率。

2.3 约束条件

模型需满足以下约束:

- (1) 供需平衡约束: 各时段能源供应量须满足园区生产生产活能用需求;
- (2) 设备运行约束: 各类供能设备和治理设施的出力须在额定容量范围内;
- (3) 碳排放强度约束: 单位工业增加值碳排放强度须满足碳达峰目标要求, 逐年下降幅度不低于政策规定的基准值;
- (4) 污染物排放限值: 各类污染物排放须符合国家和地方环保标准;
- (5) 可再生能源消纳约束: 园区可再生能源消纳比例须达到区域绿色发展规划要求。

2.4 基于纳什均衡的多目标求解方法

上述三个目标函数存在天然冲突, 难以同时达到最优。传统方法通常采用线性加权将其转化为单目标问题, 但权重系数的选取具有较强主观性。本文借鉴博弈论中的纳什均衡思想, 将经济成本、碳排放和污染排放视为三个“博弈方”的目标函数, 求解使各方都无法通过单方面改变策略而获得更好结果的均衡点。

具体而言, 设决策变量向量为  $XX$ , 三个目标的函数分别为  $f_1(X), f_2(X), f_3(X)$ , 纳什均衡解  $X^*$  满足:

对任意可行的  $XX$ , 均不存在使  $f_k(X) < f_k(X^*)$  同时不恶化其他目标的情况。本文采用 NSGA-II 算法进行求解, 通过 Pareto 前沿筛选获得最优均衡解。

3 实证分析

3.1 案例园区概况与数据来源

选取华东地区某综合型工业园区作为实证案例。该园区占地面积约 15 平方公里, 入驻企业 120 余家, 涵盖电子信息、装备制造、新材料等多个行业门类。园区能源结构以电力为主 (约占 65%), 天然气和蒸汽为辅, 可再生能源 (分布式光伏) 占比约 8%。研究数据来源于园区能源管理平台 2023—2025 年的运行记录, 包括逐月用能数据、碳排放监测数据和污染物在线监测数据。

3.2 情景设置与参数说明

设置两个对比情景:

基准情景 ( $S_0$ ): 按照园区历史运行模式, 不施加额外的低碳约束, 碳交易价格取全国碳市场 2024 年均价 (约 80 元/吨  $CO_2$ )。

优化情景 ( $S_1$ ): 采用本文构建的协同优化模型, 在满足碳排放强度年均下降 5% 的约束下求解最优方案, 碳交易价格设定为阶梯式 (基准价 80 元/吨, 超出配额部分按 1.5 倍征收)。

3.3 优化结果与对比分析

经过模型求解, 两个情景下的主要指标对比见表 1。

表1 两种情景下园区主要指标对比

| 指标                 | 基准情景 ( $S_0$ ) | 优化情景 ( $S_1$ ) | 变化率     |
|--------------------|----------------|----------------|---------|
| 年运行总成本 (万元)        | 12,560         | 11,152         | -11.2%  |
| 能源采购成本 (万元)        | 9,840          | 8,760          | -11.0%  |
| 碳交易成本 (万元)         | 452            | 208            | -54.0%  |
| 碳排放总量 (万吨 $CO_2$ ) | 48.6           | 39.6           | -18.6%  |
| 单位增加值碳排放 (吨/万元)    | 0.72           | 0.59           | -18.1%  |
| 可再生能源消纳比例 (%)      | 8.2            | 16.5           | +101.2% |
| 污染物排放总量 (吨)        | 1,256          | 1,083          | -13.8%  |

从表 1 可以看出, 优化情景较基准情景取得了全方位的改善。经济维度上, 园区年运行总成本降低 11.2%, 主要得益于能源采购效率提升和碳交易成本的大幅下降 (降幅达 54.0%)。环境维度上, 碳排放总量下降 18.6%, 单位增加值碳排放强度降至 0.59 吨/万元, 已提前达到碳达峰目标要求的强度控制水平; 污染物排放总量亦下降 13.8%, 实现了减污降碳的协同增效。可再生能源消纳比例从 8.2% 跃升至 16.5%, 提升幅度超过一倍, 说明优化模型有效促进了清洁能源对传统化石能源的替代。

3.4 结果讨论

优化方案取得显著成效的内在机理主要体现在三个层面: 一是能源结构优化效应, 模型通过提高光伏等可再生能源占比、

优化天然气与电力用能配比, 从源头上降低了碳排放强度; 二是负荷调度效应, 利用分时电价信号引导企业错峰用电, 既降低了购电成本又缓解了电网压力; 三是碳交易激励效应, 阶梯式碳价机制使超排成本显著上升, 倒逼企业加大节能改造投入。本研究结果与已有文献中碳交易机制可降低碳排放 16%~33% 的结论基本一致。

当然, 本研究也存在一定局限性: 一是未考虑企业间的物质循环和产业共生关系, 工业共生可进一步释放减排潜力; 二是模型假设了园区内企业具有完全信息且理性决策, 与实际情况存在一定偏差。后续研究可将产业共生网络纳入优化框架, 并引入不完全信息条件下的博弈分析方法。

4 结论与建议

本文构建了碳达峰目标下工业园区能源-环境协同优化模型,并以华东某综合型园区为对象进行了实证验证,主要结论如下:

第一,所构建的多目标协同优化模型能够有效刻画工业园区经济成本、碳排放和污染排放之间的动态权衡关系,基于纳什均衡的求解方法避免了传统权重法的主观性缺陷。

第二,实证结果显示,优化方案可使园区年运行总成本下降11.2%,碳排放总量下降18.6%,可再生能源消纳比例提高至16.5%,实现了经济效益与环境效益的双赢。

第三,阶梯式碳交易机制和可再生能源替代是协同优化的

两大关键驱动力,碳交易成本的大幅下降印证了市场化减排机制的有效性。

基于研究结论,提出以下政策建议:一是加快园区能源管理数字化平台建设,实现对能耗和碳排放的实时监测与动态优化调度;二是因地制宜推广分布式可再生能源,构建“源网荷储”一体化微电网系统;三是完善阶梯式碳交易制度设计,适度提高碳价水平,增强碳排放约束的市场化激励效应;四是推动园区内企业间的能源梯级利用和产业共生,进一步释放系统性减排潜力。

## 参考文献

- [1] 国家发展改革委,工业和信息化部,国家能源局. 关于开展零碳园区建设的通知(发改环资〔2025〕910号)[Z]. 2025.
- [2] 裴金铃,杨晓,罗千里,等. 工业园减污降碳协同效应评价体系与实证研究[J]. 环境工程学报, 2024, 18(11): 3340-3347.
- [3] 高超,陈亚彬,王长伟,等. 低碳园区冷热电能源资源互动运行优化[J]. 分布式能源, 2025, 10(2): 58-68.
- [4] Achieving synergy between pollution reduction and carbon mitigation in the eco-industrial park: a multi-objective optimization framework[J]. Journal of Environmental Management, 2025.
- [5] Integrated optimization model to explore the green transformation of energy-intensive industrial parks from environmental-economic perspectives[J]. Energy, 2025, 325: 136200.
- [6] Optimization of Industrial Parks Considering the Joint Operation of CHP-CCS-P2G Under a Reward and Punishment Carbon Trading Mechanism[J]. Energies, 2025.

作者简介: 许杰(1980—),男,汉族,本科,研究方向为能源与环境系统工程。