

基于系统动力学的工业园区零碳转型可行性评估模型

牛文娟,徐 箴,薛贵元,陈 琛,诸晓骏,吴 垠,王 鑫,肖人杰
(国网江苏省电力有限公司 电力经济技术研究院,南京 210000)

摘要:园区零碳转型可行性评估是推进零碳园区发展的重要基础。考虑到园区是否能实现零碳转型受到园区GDP、化石能源消费强度、新能源发电量、减碳技术投资等多因素的综合影响,提出一种基于系统动力学的工业园区零碳转型可行性评估模型,该模型含燃料燃烧及生产过程碳排放、污水处理碳排放、外购电力碳排放、碳汇及CCUS技术减碳四大模块。仿真结果表明,该模型能够预测多因素影响下园区实现零碳转型的具体时间,为园区实现零碳转型的策略配置提供依据。

关键词:零碳园区;系统动力学;碳排放;碳减排

Feasibility evaluation model of zero carbon transformation in industrial parks based on system dynamics

NIU Wenjuan, XU Zheng, XUE Guiyuan, CHEN Chen, ZHU Xiaojun, WU Yin, WANG Xin,
XIAO Renjie

(Econorrpic and Technical Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Feasibility assessment of zero carbon transformation in parks is an important basis for promoting the development of zero carbon parks. Considering that whether the park can achieve zero carbon transformation depends on the comprehensive effects of factors such as the park's GDP, fossil energy consumption intensity, new energy power generation, and carbon reduction technology investment, a feasibility assessment model for zero-carbon transformation of industrial parks based on system dynamics is proposed. The model consists of four modules: fuel combustion and production process carbon emissions, sewage treatment carbon emissions, purchased power carbon emissions, and carbon sinks and CCUS technology carbon reduction. The simulation results show that the model can predict the specific time for the park to achieve zero carbon transformation under the influence of multiple factors, and provide guidance for the configuration of emission reduction strategies.

Key words: zero carbon park; system dynamics; carbon emission; carbon reduction

0 引言

“双碳”背景下,园区作为碳排放的重要来源受到广泛关注。国务院2021年发布的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中提出开展碳达峰试点园区建设,推广园区多能梯级利用等节能新技术^[1]。国家发展和改革委员会2023年印发《国家碳达峰试点建设方案》^[2],提出在全国范围内选择100个具有典型代表性的城市和园区开展碳达峰试点建设,进一步推进零碳园区的发展。

据统计,工业园区能耗占全国能耗的比重高达69%,其碳排放量占全国总碳排放达到31%^[3-4]。可见,工业园区的零碳转型是实现“双碳”目标的重要一环,评估园区零碳转型的可行性的必要性凸显。

零碳园区并非完全不排放温室气体,而是实现了净碳排放为零的园区^[5]。因此,工业园区零碳转型可行性评估的核心是科学预测长时间尺度中、多因素综合影响下的园区各类碳排放量和各类减碳方式减碳量。

园区碳排放核算方面,现有碳排放核算方法包括排放清单法(直接因子法)^[6-7]、实测法^[7]、全生命周期法^[8-9]、投入产出法^[9]、碳流模型法^[10-14]、碳卫星估算法^[11-16]以及夜间灯光影像估算法^[12-18]等。园区碳减排方面,现有研究主要采取的方式包括在碳减排目标函数中增加碳交易成本^[13]或多目标函数中的最低碳排放量目标^[14],以及在约束条件中增加碳排放约束,规划运行设备中考虑可再生能源发电(power to gas, P2G)^[15]以及碳捕集利用与封存(carbon capture, utilisation and storage, CCUS)等减碳技术。其中,CCUS技术是除碳汇外的一项关键减碳技术,政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)第六次评估报告围

收稿日期:2025-07-12;修回日期:2025-09-17

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目资助(J2024008)

绕减排潜力、减排成本、综合效益及应用前景等方面,对CCUS相关技术进行了系统全面评估^[16]。尽管现有研究在碳排放核算和碳减排两方面开展了大量研究,鲜少研究同时考虑园区GDP、化石能源消费强度、新能源发电量、减碳技术投资等多因素综合影响下的长时间尺度碳排放量和减碳量,现有研究不足以支撑对园区零碳转型可行性的定性和定量评估,无法预测园区转型的具体时间。

基于这一研究现状,本文提出了一种基于系统动力学的园区零碳转型可行性评估模型,综合考虑了多因素综合影响下工业园区碳排放及降碳技术减碳量的长时间尺度变化趋势,可定性和定量评估工业园区零碳转型的可行性,为工业园区碳减排策略配置提供依据,助力园区实现“双碳”目标。

1 基本原理

1.1 系统动力学原理

系统动力学(system dynamics,SD)是系统科学理论与计算机仿真技术紧密结合、研究系统反馈结构与行为的一门科学,是系统科学和管理科学的一个重要分支^[17]。系统动力学方法在明确系统边界的基础上,绘制因果关系图以描述变量间的因果联系和反馈回路,进而区分变量的性质构建存量流量图,然后建立数学方程量化存量和流量的动态变化,随后借助软件仿真模拟分析系统行为,最后基于模型结果设计并评估改进系统的策略。因此,系统动力学是一种定性与定量相结合的综合推理方法^[18]。

1.2 建模基本原理

确定系统边界是系统动力学的建模基础,本文研究工业园区的零碳转型可行性,系统边界涵盖工业园区的碳排放和碳减排全过程。具体而言,本文中的工业园区企业生产活动产生较高的化石能源消费量,具备一定的分布式电源建设条件,具备采用CCUS技术进行碳减排的条件,同时,园区有一定的绿化面积。

工业园区是否能实现零碳转型取决于采取各类技术减少的碳排放量是否能抵消园区各类活动产生的碳排放量。根据《温室气体核算体系》,碳排放包括直接碳排放和间接碳排放,直接碳排放包括化石燃料燃烧碳排放和生产过程碳排放,间接碳排放则包括外购电力碳排放和废弃物处理排放等。对于工业园区而言,主要考虑化石燃料燃烧碳排放量、工业生产过程碳排放量、工业污水处理碳排放量以及外购电力碳排放量。当净碳排放量(碳排放量与减碳量的差值)为0时,园区即实现零碳转型。

2 基于SD的零碳转型可行性评估模型

2.1 SD仿真模型

借助 Vensim 软件建立的工业园区零碳转型可行性评估SD模型如图1所示。模型起始年份为2024年,时间范围为2024—2060年,仿真步长为1年。如图1所示,模型包含4个主要模块:燃料燃烧及生产过程碳排放模块、污水处理排放模块、碳汇及CCUS技术减碳模块、外购电力碳排放模块。

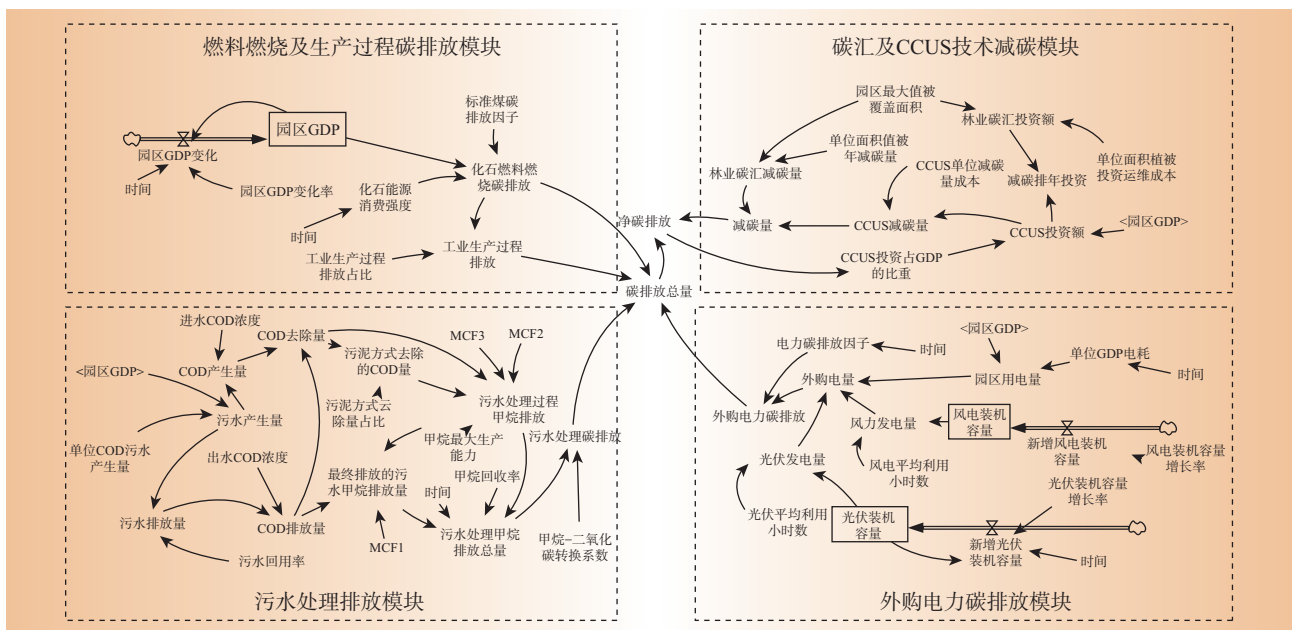


图1 园区零碳转型可行性评估SD模型

Fig. 1 SD model for evaluating the transformation feasibility of industrial park

2.2 模型结构分析

(1) 燃料燃烧及生产过程碳排放模块

化石燃料燃烧碳排放可表达为园区 GDP、化石能源消费强度和标准煤碳排放因子的乘积。相关表达式如下

$$E_{t,\text{fuel}} = D_{t,\text{fuel}} G_t f_{\text{coal}} \quad (1)$$

$$D_{t,\text{fuel}} = D_{t_0,\text{fuel}} (1 - R_{\text{fuel}})^{t-t_0} \quad (2)$$

$$G_t = G_{t_0} + \sum_{t_0}^t G_{t,\text{inc}} \quad (3)$$

$$G_{t,\text{inc}} = G_{t-1} R_{t,\text{GDP}} \quad (4)$$

式中： $E_{t,\text{fuel}}$ 为第 t 年的化石燃料燃烧碳排放； G_t 为第 t 年的园区 GDP； f_{coal} 为标准煤的碳排放因子； $D_{t,\text{fuel}}$ 为第 t 年的化石能源消费强度； $D_{t_0,\text{fuel}}$ 为化石能源消费强度初始值； R_{fuel} 为化石能源消费强度年均降速； G_{t_0} 为园区 GDP 初值； $G_{t,\text{inc}}$ 为第 t 年的园区 GDP 变化量； $R_{t,\text{GDP}}$ 为第 t 年的园区 GDP 增长率。

工业生产过程碳排放与化石燃料燃烧碳排放存在一定比例关系，但这一比例受生产企业行业、生产工艺和技术水平等因素的影响。园区可基于自身碳排放结构设置相应的工业生产过程碳排放占比。相关表达式如下

$$E_{t,\text{process}} = \frac{E_{t,\text{fuel}}}{1 - \alpha} \times \alpha \quad (5)$$

式中： $E_{t,\text{process}}$ 为第 t 年的工业生产过程碳排放； α 为工业生产过程碳排放占比。

(2) 污水处理碳排放模块

工业污水处理碳排放指的是甲烷排放，需通过甲烷-二氧化碳转换系数转换为碳排放量。参考已有研究，工业污水处理碳排放包含两部分，一部分产生于工业污水排入自然水体，另一部分产生于工业污水处理过程^[18]。根据《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》，工业污水处理过程中甲烷排放量的计算公式如下

$$E_{\text{CH}_4} = \sum_i (TOW_i \times EF_i - S_i \times EF_i - R_i) \quad (6)$$

$$TOW_i = Q \times (COD_{\text{in}} - COD_{\text{out}}) \quad (7)$$

$$EF_i = B_0 \times MCF \quad (8)$$

式中： E_{CH_4} 为甲烷排放量； TOW_i 为第 i 类工业污水中可降解有机物的总量（以 COD 计量）； EF_i 为第 i 类工业污水的甲烷排放因子； S_i 为第 i 类工业污水中以污泥方式清除的有机物总量（以 COD 计量）； R_i 为第 i 类工业污水的甲烷回收量； Q 为污水处理量； COD_{in} 为进水（chemical oxygen demand, COD）浓度； COD_{out} 为出水 COD 浓度； B_0 为甲烷最大生产能力（通常取值为 0.25 kg CH₄/kg COD）； MCF 为甲烷

修正因子。

其中，COD 衡量的是水体中有机污染物被化学氧化剂氧化时所消耗的氧化剂的量，可以间接但快速地反映水体受有机物污染的程度。

污水处理甲烷排放总量相关表达式如下

$$E_{t,\text{waste}} = \xi E_{t,\text{CH}_4} \quad (9)$$

$$E_{t,\text{CH}_4} = (E_{t,\text{CH}_4\text{E}} + E_{t,\text{CH}_4\text{T}})(1 - R_{\text{CH}_4}) \quad (10)$$

$$E_{t,\text{CH}_4\text{E}} = COD_{t,\text{emission}} B_0 \times MCF_1 \quad (11)$$

$$E_{t,\text{CH}_4\text{T}} = B_0 \times (MCF_2 \times COD_{t,\text{removal}} - MCF_3 \times COD_{t,\text{mud}}) \quad (12)$$

$$COD_{t,\text{mud}} = \lambda \times COD_{t,\text{removal}} \quad (13)$$

$$COD_{t,\text{removal}} = COD_{t,\text{produce}} - COD_{t,\text{emission}} \quad (14)$$

$$COD_{t,\text{emission}} = W_{t,\text{emission}} \times COD_{\text{out}} \quad (15)$$

$$W_{t,\text{emission}} = W_{t,\text{produce}} (1 - R_{\text{waste}}) \quad (16)$$

$$COD_{t,\text{produce}} = W_{t,\text{produce}} \times COD_{\text{in}} \quad (17)$$

$$W_{t,\text{produce}} = G_t D_{\text{waste}} \quad (18)$$

式中： $E_{t,\text{waste}}$ 为第 t 年的污水处理碳排放； E_{t,CH_4} 为第 t 年的污水处理甲烷排放总量； ξ 为甲烷-二氧化碳转换系数； $E_{t,\text{CH}_4\text{E}}$ 、 $E_{t,\text{CH}_4\text{T}}$ 分别为第 t 年的最终排放的污水甲烷排放量和污水处理过程甲烷排放量； R_{CH_4} 为甲烷回收率； $COD_{t,\text{emission}}$ 为第 t 年的 COD 排放量； B_0 为甲烷最大生产能力； $COD_{t,\text{removal}}$ 和 $COD_{t,\text{mud}}$ 分别为第 t 年的 COD 去除量和以污泥方式去除的 COD 量； λ 为以污泥方式去除的 COD 量占比； MCF_1 、 MCF_2 、 MCF_3 均为甲烷修正因子； $W_{t,\text{emission}}$ 为第 t 年的污水排放量； COD_{out} 为出水 COD 浓度； $W_{t,\text{produce}}$ 为第 t 年的污水产生量； R_{waste} 为污水回用率； $COD_{t,\text{produce}}$ 为第 t 年的 COD 产生量； COD_{in} 为进水 COD 浓度； D_{waste} 为单位 GDP 污水产生量。

(3) 外购电力碳排放模块

对园区而言，只有园区分布式新能源发电量供给不足的部分才需外购电力。园区新能源发电量主要来源于分布式光伏和风电，二者的装机容量均为状态变量，然而受限于园区规划面积，新能源发电量无法持续增长。园区用电量则可简化为单位 GDP 电耗和园区 GDP 的乘积，其中单位 GDP 电耗是一个随时间下降的辅助变量。最后，外购电力与电力碳排放因子的乘积即为外购电力碳排放。随着新能源发电量占比的提升，电力碳排放因子也随时间下降。相关表达式如式(19)一式(29)所示

$$E_{t,\text{electricity}} = f_{t,\text{electricity}} P_{t,\text{purchase}} \quad (19)$$

$$f_{t,\text{electricity}} = f_{t_0,\text{electricity}} (1 - R_{\text{electricity}})^{t-t_0} \quad (20)$$

$$P_{t,\text{purchase}} = P_{t,\text{demand}} - P_{t,\text{wind}} - P_{t,\text{pv}} \quad (21)$$

$$P_{t,\text{demand}} = G_t D_{t,\text{electricity}} \quad (22)$$

$$D_{t,electricity} = D_{t_0,electricity} (1 - R_{electricity}) \quad (23)$$

$$P_{t,wc} = P_{t,wc} T_{wind} \quad (24)$$

$$P_{t,wc} = P_{t_0,wc} + \sum_{t_0}^t P_{t,wc_inc} \quad (25)$$

$$P_{t,wc_inc} = P_{t-1,wc} R_{t,wc} \quad (26)$$

$$P_{t,pv} = P_{t,pv} T_{pv} \quad (27)$$

$$P_{t,pv} = P_{t_0,pv} + \sum_{t_0}^t P_{t,pv_inc} \quad (28)$$

$$P_{t,pv_inc} = P_{t-1,pv} R_{t,pv} \quad (29)$$

式中: $E_{t,electricity}$ 、 $f_{t,electricity}$ 和 $P_{t,purchase}$ 分别为第 t 年的外购电力碳排放、电力碳排放因子和外购电量; $f_{t_0,electricity}$ 为电力碳排放因子初值; $R_{electricity}$ 为电力碳排放因子的年均降速; $P_{t,demand}$ 、 $P_{t,wind}$ 和 $P_{t,pv}$ 分别为第 t 年的园区用电量、风力发电量和光伏发电量; $D_{t,electricity}$ 为第 t 年的单位 GDP 电耗; $D_{t_0,electricity}$ 为单位 GDP 电耗初始值; $R_{electricity}$ 为单位 GDP 电耗的年均降速; $P_{t,wc}$ 和 $P_{t,pvc}$ 分别为风电和光伏装机容量; T_{wind} 和 T_{pv} 分别为风电和光伏年平均利用小时数; $P_{t_0,wc}$ 和 $P_{t_0,pvc}$ 分别为风电和光伏装机容量初始值; P_{t,wc_inc} 和 P_{t,pvc_inc} 分别为第 t 年的风电和光伏装机容量的变化量; $R_{t,wind}$ 和 $R_{t,pv}$ 分别为第 t 年的风电和光伏的年增长率。

(4) 碳汇及 CCUS 技术减碳模块

考虑到购买碳配额及 CCER 未实现物理意义上的减碳,本文所提模型只考虑林业碳汇和 CCUS 技术两种减碳方式。相关表达式如式(30)一式(34)

$$C_{forest} = \frac{S_{max}}{A} \quad (30)$$

$$C_{t,ccus} = \sum_{t_0}^t \frac{I_{t,ccus}}{OC_{ccus}} \quad (31)$$

$$I_{t,ccus} = \beta G_t \quad (32)$$

$$I_{forest} = A \times OC_{forest} \quad (33)$$

$$I_{t,total} = I_{forest} + I_{t,ccus} \quad (34)$$

式中: C_{forest} 为林业碳汇最大减碳量; S_{max} 为园区最大植被覆盖面积; A 为单位面积植被年减碳量; $C_{t,ccus}$ 为第 t 年的 CCUS 减碳量; $I_{t,ccus}$ 为第 t 年的 CCUS 投资额; OC_{ccus} 为 CCUS 单位减碳成本; β 为 CCUS 投资占 GDP 的比重; OC_{forest} 为单位面积植被投资运维成本; I_{forest} 为林业碳汇投资额; $I_{t,total}$ 为第 t 年的碳减排年投资。

3 仿真分析

3.1 仿真情景及参数设定

根据前述分析,推广零碳交通等技术使化石能

源消费强度下降属于从源头减排的方法,而碳汇和 CCUS 技术属于末端治理的方法。本文设定如表 1 所示的 4 个仿真情景。园区相关参数如表 2 所示。

表 1 仿真情景设定

Table 1 Simulation scenario setting

情景名称	情景设定
基准情景	园区以最大绿化面积实现林业碳汇减排(不考虑时间成本)
情景 1	在基准情景的基础上,推广零碳交通等技术使化石能源消费强度年均下降 5%
情景 2	在基准情景的基础上,园区每年将 GDP 的 0.4% 投资于 CCUS 技术
情景 3	在基准情景的基础上,化石能源消费强度以 1% 的年均速率下降、园区 GDP 的 0.2% 投资于 CCUS 技术

表 2 园区主要参数设置

Table 2 Main parameter setting of park

参数名称	参数值
园区 GDP 初值/亿元	238
单位 GDP 电耗初值/(kWh·万元 ⁻¹)	560
单位 GDP 污水产生量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	2.54
化石能源消费强度初值/(tce·万元 ⁻¹)	0.189
工业生产过程碳排放占比/%	14.5
风电装机容量初值/MW	0
光伏装机容量初值/MW	10
园区最大植被覆盖面积/m ²	4×10 ⁶
单位面积植被年投资运维成本/(元·m ⁻²)	6.42
单位面积植被年减碳量/(tCO ₂ ·m ⁻²)	0.036 7
CCUS 单位减碳量成本/(元·tCO ₂ ⁻¹)	1 000

3.2 各情景下的零碳转型可行性分析

基准情景的仿真结果如图 2 所示,该情景下化石能源碳排放随着园区 GDP 的增长而持续上升,外购电力碳排在园区 GDP 增长和单位 GDP 电耗下降的综合作用下呈现先增后减的趋势,污水处理碳

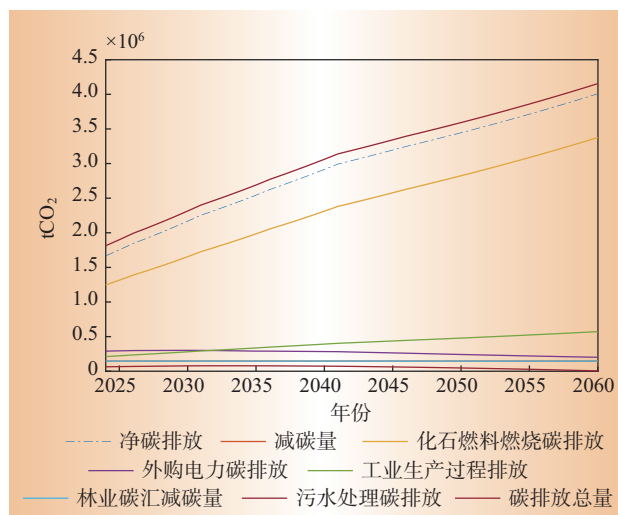


图 2 基准情景仿真结果

Fig. 2 Simulation result of baseline scenario

排放则在园区 GDP 增长和甲烷回收率的提高呈现先增后减的趋势。最终,净碳排放持续增长,到2060年达到400万t左右。

情景1的仿真结果如图3所示。由图3可知,化石能源消费强度年均下降5%时,净碳排放下降较为明显,到2060年,相较于基准情景下降83%。然而,即便化石能源消费强度年均降速高达5%,到2060年,仅靠园区碳汇仍无法使园区净零碳降至0。

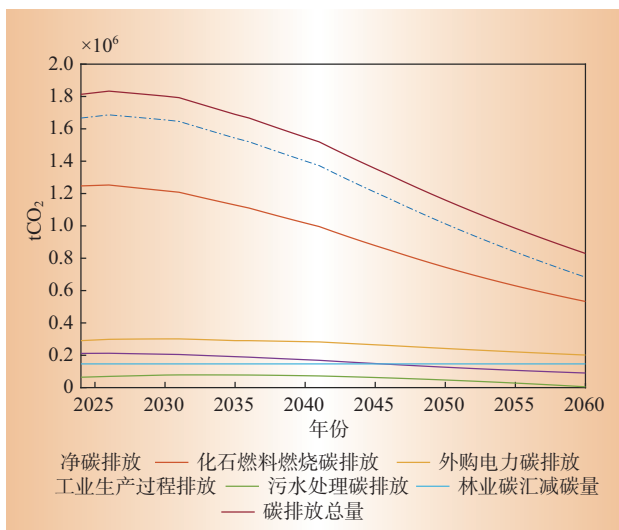


图3 情景1仿真结果

Fig. 3 Simulation result of scenario 1

情景2和情景3的仿真结果分别如图4至图5所示。由图5可知,在基准情景的基础上,当园区每年将GDP的0.4%投资于CCUS技术时,园区净零碳在2045年降至0,也即园区可在2045年实现净零碳。而通过推广零碳交通等技术使化石能源消费强度以1%的年均速率下降,每年将GDP的0.2%投资于CCUS技术,园区可在2057年实现零碳转型。

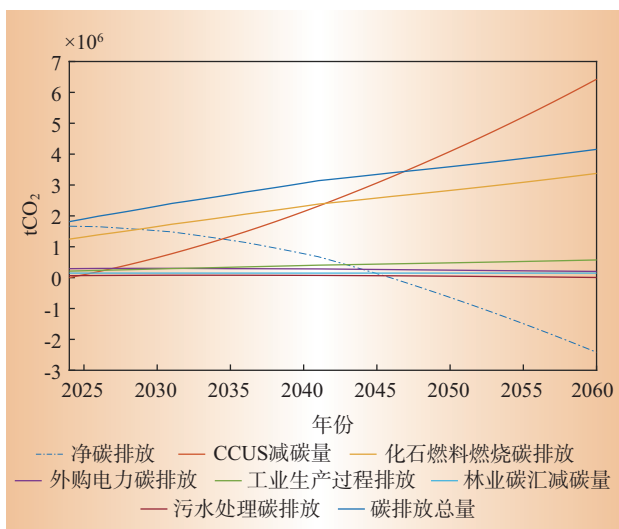


图4 情景2仿真结果

Fig. 4 Simulation result of scenario 2

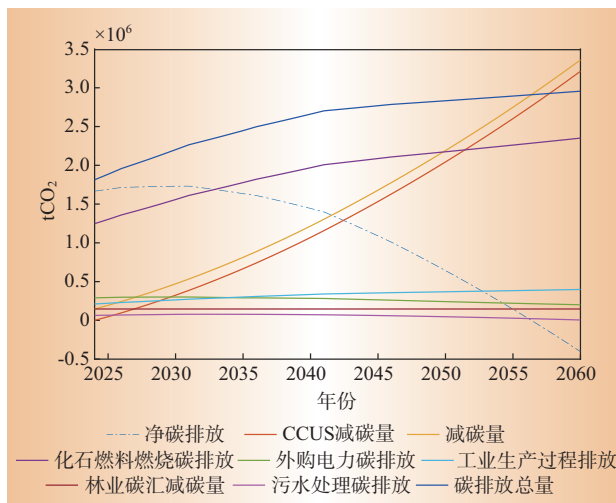


图5 情景3仿真结果

Fig. 5 Simulation result of scenario 3

综合以上各情景的仿真结果可知,仅靠林业碳汇这一末端治理方式,即便化石能源消费强度以较快速度(5%)下降,园区仍旧无法在2060年前实现碳减排;在林业碳汇的基础上,园区投资于CCUS这一末端治理技术的GDP比例越高,园区可越早实现零碳转型;综合采用源头减排(推广零碳交通技术等方式使化石能源消费强度下降)和末端治理方式(林业碳汇、CCUS技术)可使园区更快实现零碳转型。可见,园区何时实现零碳转型受减排策略影响较大,园区可从实际出发依据仿真结果合理配置减排策略从而实现零碳转型。

4 结束语

园区零碳转型可行性评估是推进零碳园区发展的重要基础,本文提出一种基于系统动力学的工业园区零碳转型可行性评估模型,综合考虑了多因素影响下、长时间尺度中工业园区各类碳排放及末端治理技术减碳量的变化趋势,可预测多情景下工业园区实现零碳转型的具体年份,并为工业园区实现零碳转型的碳减排策略配置提供依据。本文所提模型具有如下优势

(1) 园区碳排放的核算范围更全面。以往工业园区碳排放研究着重于二氧化碳排放研究,本文所提模型还分析了工业污水甲烷排放,并通过转换系数转换为二氧化碳排放,碳排放核算范围更加全面。

(2) 模型仿真结果可为园区碳排放管理策略制定提供依据。基于园区现状及未来发展预期,设定相关参数进行仿真分析,模型可预测园区实现零碳转型的具体时间,管理者可根据其实现零碳转型的时间需求调整参数,进而配置减排策略。D

参考文献:

- [1] 新华社. 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. 北京: 中国政府网, 2021[2023-04-25]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
Xinhua News Agency. Opinions of the Central Committee of the communist party of china and the state council on fully implementing the new development concept and doing a good job in Carbon Peaking and Carbon Neutrality[EB/OL]. Beijing: China Government Network, 2021 [2023-04-25]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [2] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于印发《国家碳达峰试点建设方案》的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6913873.htm.
The State Development and Reform Commission. Notice of the State Development and Reform Commission on issuing the National Carbon Peak Pilot Construction Plan.
- [3] 郭扬, 吕一铮, 严坤, 等. 中国工业园区低碳发展路径研究[J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 49-58.
GUO Yang, LYU Yizheng, YAN Kun, et al. Low-carbon development pathways of industrial parks in China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(1): 49-58.
- [4] GUO Y, TIAN J, ZANG N, et al. The role of industrial parks in mitigating greenhouse gas emissions from China[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(14): 7 754-7 762.
- [5] 陈艳波, 张宁, 李嘉祺, 等. 零碳园区研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5 496-5 517.
CHEN Yanbo, ZHANG Ning, LI Jiaqi, et al. Review and Prospect of Zero Carbon Park Research[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5 496-5 517.
- [6] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248-258.
LIU Mingda, MENG Jijun, LIU Bihan. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248-258.
- [7] 王泽森, 石岩, 唐艳梅, 等. 考虑LCA能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1 614-1 626.
WANG Zesen, SHI Yan, TANG Yanmei, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1 614-1 626.
- [8] LUO F, GUO Y, YAO M T, et al. Carbon emissions and driving forces of China's power sector: input-output model based on the disaggregated power sector[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268: 121 925.
- [9] 唐冬来, 李擎宇, 钟声, 等. 基于碳流追踪的居民碳排放核查方法研究[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(6): 24-29.
TANG Donglai, LI Qingyu, ZHONG Sheng, et al. Research on resident carbon emission verification method based on carbon flow tracking[J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(6): 24-29.
- [10] WANG H D, GONG F Y, NEWMAN S, et al. Consistent weekly cycles of atmospheric NO₂, CO, and CO₂ in a North American megacity from ground-based, mountain-top, and satellite measurements[J]. Atmospheric Environment, 2022, 268: 118 809.
- [11] 吕倩, 刘海滨. 京津冀县域尺度碳排放时空演变特征——基于DMSP/OLS夜间灯光数据[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(6): 41-50.
LYU Qian, LIU Haibin. Spatio-temporal evolution characteristics of county scale carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region—a study based on DMSP/OLS night-time light data[J]. Journal of Beijing Institute of Technology(Social Sciences Edition), 2019, 21(6): 41-50.
- [12] MELGAR- DOMINGUEZ O D, POURAKBARI- KASMAEI M, LEHTONEN M, et al. An economic environmental asset planning in electric distribution networks considering carbon emission trading and demand response[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 181: 106 202.
- [13] NIKNAM T, AZIZIPANAH-ABARGHOEE R, ROOSTA A, et al. A new multi-objective reserve constrained combined heat and power dynamic economic emission dispatch[J]. Energy, 2012, 42(1): 530-545.
- [14] ZHOU S Y, SUN K Y, WU Z, et al. Optimized operation method of small and medium-sized integrated energy system for P2G equipment under strong uncertainty[J]. Energy, 2020, 199: 117 269.
- [15] 彭雪婷, 吕昊东, 张贤. IPCC AR6报告解读: 全球碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展评估[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5): 580-590.
PENG Xueting, LYU Haodong, ZHANG Xian. Interpretation of IPCC AR6 report on carbon capture, utilization and storage(CCUS)technology development[J]. Advances in climate change Research, 2022, 18(5): 580-590.
- [16] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖. 系统动力学(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
ZHONG Yongguang, JIA Xiaojing, QIAN Ying, et al. System Dynamics (2nd edition) [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [17] 胡迪, 高庆水, 张楚, 等. 基于系统动力学的风力机备件需求预测研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(3): 666-672.
HU Di, GAO Qingshui, ZHANG Chu, et al. Research on demand forecast of spare parts of wind turbine based on system dynamics [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(3): 666-672.
- [18] 任佳雪, 程海鹰, 孟丹, 等. 基于系统动力学模型的城市生活污水处理系统的甲烷排放特征及减排潜力分析[J]. 环境工程学报, 2022, 16(11): 3 655-3 663.
REN Jiaxue, CHENG Haiying, MENG Dan, et al. Methane emission characteristics and emission reduction potential analysis of urban domestic wastewater treatment system based on system dynamics model [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(11): 3 655-3 663.

作者简介:

牛文娟(1983), 女, 江苏南京人, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力市场、能源战略等。

(责任编辑 方德康)