

引用格式: 王仲, 马思明, 王婷婷, 等. 工业园区碳排放核算与“双碳”转型路径研究[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 1-9. WANG Z, MA S M, WANG T, et al. Research on carbon emission accounting and the “dual carbon” transformation path of industrial parks [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 1-9. DOI: 10.16516/j.ceec.2023-311.

工业园区碳排放核算与“双碳”转型路径研究

王仲¹, 马思明^{1,✉}, 王婷婷¹, 陶炜¹, 徐婧²

(1. 国家工业信息安全发展研究中心, 北京 100040;

2. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: [目的] 工业园区作为我国工业化与城市化发展的重要载体, 在提供大量基础设施和公共服务的同时也成为我国碳排放的主要源头, 是实现我国碳达峰、碳中和目标的重要切入点和着力点。为实现工业园区碳排放精细化管理, 提出了工业园区碳排放转移过程分析与“双碳”路径优化决策理论研究框架。[方法] 首先, 分析工业园区范围内能源、工业、建筑、交通、基础设施等业务场景的碳排放特性, 建立基于清单分析法的工业园区碳排放核算模型; 其次, 考虑工业总产值、产业结构、能源结构、能源消耗量等因素对碳排放的影响, 建立基于STIRPAT方法的碳排放影响因素分解模型; 最后, 分析数字化技术赋能绿色低碳转型的作用机理与影响路径, 提出“双碳”路径优化决策方案。[结果] 以江西省赣州经开区为研究对象, 计算2020—2022年工业园区的碳排放量和碳排放强度, 识别碳排放量增加的主要影响因素, 从产业结构、能源结构、政策制度和平台建设4个方面规划了工业园区“双碳”转型路径。[结论] 研究表明, 所提模型能够充分提炼工业园区统计数据的信息, 具有科学性和有效性, 为工业园区“双碳”转型路径决策与园区数字化碳管理工业互联网平台建设提供了理论支撑。

关键词: 工业园区; 碳排放核算; 碳排放影响因素; “双碳”转型路径; 工业互联网

中图分类号: TM7; F424

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)05-0001-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2023-311

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Research on Carbon Emission Accounting and the “Dual Carbon” Transformation Path of Industrial Parks

WANG Zhong¹, MA Siming^{1,✉}, WANG Tingting¹, TAO Wei¹, XU Jing²

(1. National Industrial Information Security Development Research Center, Beijing 100040, China;

2. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: [Introduction] As an important carrier of China's industrialization and urbanization, industrial parks not only provide a large amount of infrastructure and public services, but also become the main source of carbon emission in China and an important entry and focus point for achieving China's goals of carbon peaking and carbon neutrality. The paper proposes a theoretical research framework for analyzing the transfer process of carbon emission in industrial parks and optimizing the decision-making process of the "dual carbon" path, in order to achieve the refined management of carbon emission in industrial parks. [Method] Firstly, we analyzed the carbon emission characteristics of energy, industry, construction, transportation, and infrastructure in industrial parks, and established a carbon emission accounting model for industrial parks based on inventory analysis method. Secondly, considering the impact of factors such as gross industrial output value, industrial structure, energy structure, and energy consumption on carbon emission, we established a decomposition model of factors influencing carbon emission based on the STIRPAT method. Finally, we analyzed the mechanism and impact path of digital technology empowering green and low-carbon transformation, and proposed the optimization plan for decision-

收稿日期: 2023-11-19 修回日期: 2023-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“基于数据挖掘的区域综合能源系统能效状态评价与运行优化策略研究”(51906171); 国家工业信息安全发展研究中心自立青年科研创新项目“工业园区碳排放核算与‘双碳’转型路径研究”(ZL2321001)

making of the "dual carbon" path. [Result] Taking Ganzhou Economic and Technological Development Zone in Jiangxi Province as the research object, we calculated the carbon emission and carbon emission intensity from 2020 to 2022, identified the main factors influencing the increase of carbon emission, and planned the "dual carbon" transformation path from four aspects: industrial structure, energy structure, policy system, and platform construction. [Conclusion] Research suggests that the proposed model can fully explore the information contained in statistical data of industrial parks and is scientific and effective, providing theoretical support for the decision-making of "dual carbon" transformation path and the construction of industrial internet platform for digital carbon management of industrial parks.

Key words: industrial parks; carbon emission accounting; factors affecting carbon emissions; "dual carbon" transformation path; industrial internet

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

工业园区已成为重要的工业生产空间和主要布局方式,是工业化和城市化发展的重要载体。全国 2 500 多家国家级和省级工业园区贡献了 50% 以上全国工业产值,提供了大量基础设施和公共服务,同时也成为我国碳排放的主要源头。据统计,工业园区碳排放量约占全国总排放量的 30%^[1]。深入挖掘园区绿色建设和发展的系统作用和集成效应,推动工业园区绿色低碳转型,对于缓解高耗能企业绿电危机和碳排放双控压力,贯彻落实碳达峰、碳中和目标贡献巨大。

工业园区碳排放精准计量与核算是摸清园区碳家底台账,实现精细化碳管理的基础。IPCC 在《联合国气候变化框架公约》第 13 次缔约方会议通过的“巴厘岛路线图”中提出碳计量须遵守温室气体排放量要可测量、可报告、可核实的“三可原则”。园区碳排放核算方法分为“自下而上”与“自上而下”2 类^[2]:其中,清单分析法是根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)等权威机构发布的温室气体清单,依照清单“自下而上”进行温室气体排放的核算分析^[3];投入产出法是通过编制投入产出表,建立宏观经济数据与物质消耗、碳排放量之间的关系,“自上而下”地进行园区相关部门碳排放核算^[4]。此外,部分专家学者基于全生命周期评价方法开展工业园区碳足迹追溯研究,量化评价产品或活动在“从摇篮到大门”“从摇篮到坟墓”全生命周期过程中累计的碳排放量^[5-6]。利用工业互联网、人工智能等新一代信息技术有助于提高碳排放核算效率,支撑碳数据间的互信互认互通。康重庆等^[7]发挥电力大数

据实时性强、准确度高、分辨率高和采集范围广等优势,应用电力大数据测算碳排放量,提升碳排放数据采集分析的时效性。

我国工业园区碳排放组成和影响因素复杂多变,与园区类型、工业特征密切相关,具有跨系统跨部门耦合、技术行为和工业过程非线性等特点。为进一步识别诊断碳排放影响因素,很多专家学者利用计量经济学模型建立二氧化碳排放量与影响因素间的数学关系,定量化分析因素变化对碳排放的影响程度^[8],典型的建模分析方法包括:KAYA 等式^[9]、IPAT 模型^[10]、LMDI 分解模型^[11]、LEAP 模型^[12]、SFA 模型^[13]等。Hao 等^[14]利用 Kaya 等式和 LMDI 分解模型从能源、经济、社会 3 个方面 11 个特征进行因素分解,定量分析了不同因素对碳排放量的相对贡献度。Luo 等^[11]采用 LMDI 分解模型与格兰杰因果检验联合模型,研究碳排放影响因素间的因果关系。Liu 等^[15]利用 STIRPAT 模型求解碳排放影响因素的贡献度,采用岭回归方法消除影响因素间共线性的影响。曹斌等^[16]应用 LEAP 模型进行碳排放预测与节能减排情景分析,定量评价了厦门的节能减排潜力。目前各类碳排放核算清单编制指南和标准已经对于各行业碳排放活动的过程、机理及核算方法有了较为成熟的阐述,这些内容对碳排放核算的研究具有重要的参考价值和借鉴意义。但是由于工业园区碳排放涉及的主体多、业务环节多,且不同园区在产业结构、能源结构、碳减排成效基础、碳减排技术方面存在显著性差异,很多工业园区仍面临碳排放核算标准不统一、数字化绿色化协同转型不充分、转型路径不清晰的问题。

为贯彻落实工信部《工业领域碳达峰实施方案》, 推动工业园区碳排放精细化管理, 文章开展园区碳排放核算与碳排放影响因素分析研究, 建立“双碳”转型路径规划的研究框架, 并以江西省某工业园区为例, 综合分析政策、市场、技术等对工业园区碳排放的影响, 规划“双碳”转型路径。

1 工业园区碳排放核算建模

在工业园区中, 能源系统、生产系统、交通系统和建筑系统是产生碳排放的主要场景。工业园区碳排放核算既要考虑园区实际管辖边界内燃烧过程和化学生产过程产生的所有直接碳排放, 也要考虑园区从外部购入的电力、热力或制冷产生的间接碳排放。工业园区典型业务场景的有关碳数据如表 1 所示。

通过分解工业园区碳排放系统, 收集碳排放活动数据, 采用基于碳排放因子的清单分析法进行工业园区碳排放核算, 核算流程如图 1 所示。

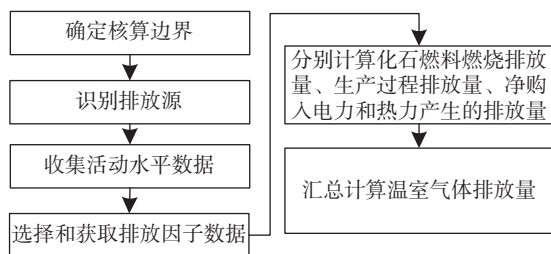


图 1 工业园区碳排放核算流程

Fig. 1 Process for carbon emission accounting of industrial parks

表 1 工业园区典型业务场景的有关碳数据

Tab. 1 Carbon data related to typical scenarios in industrial parks

系统	数据
能源系统	园区范围内可再生能源发电状态, 包括: 分布式光伏发电、分散式风电、空气源热泵等可再生能源利用设施。
	园区范围内电力系统的发电电量和用电电量计量点, 每个计量点应装设智能物联电能计量装置。
	园区范围内发、用电数据, 并与当地管理部门或电网调度系统实现互联互通, 保障电力来源与消纳的精准追溯。
	园区范围内微电网数据, 以及电化学、物理以及氢能等储能设施的电量数据。
生产系统	园区企业生产过程数据, 包括: 生产进度、现场操作、质量检验、设备状态、物料传送等。
	园区企业生产设备的能耗数据。
	园区企业生产过程产生的废物、废水、废气和碳排放数据。
建筑系统	园区企业内部间、企业内部与外部之间的循环经济产业链的相关数据。
	园区范围内工业建筑、公共建筑和居住建筑供热、供冷、通风、照明等设备设施的用电数据。
交通系统	园区范围内工业建筑、公共建筑和居住建筑热水、冷水等资源的使用消耗数据。
	园区范围内燃油私家车和公共服务车辆的碳排放数据。
	园区范围内新能源车辆的用电数据, 以及氢能和生物液体燃料汽车的能耗数据。
	园区范围内停车位、充电桩, 推进加注(气)站、加氢站等交通配套设施的状态数据。

工业园区碳排放核算模型, 如公式(1)和公式(2)所示。

$$E = E_1 + E_2 = \sum_{i=1}^n D_i \times F_i \quad (1)$$

$$r = \frac{E}{G} \quad (2)$$

式中:

- E ——园区碳排放量;
- E_1 ——核算边界范围 1 的碳排放量;
- E_2 ——核算边界范围 2 的碳排放量;
- D_i ——第 i 种碳排放活动数据;
- F_i ——第 i 种碳排放活动因子;
- r ——碳排放强度(t/万元);
- G ——工业总产值(亿元)。

化石燃料燃烧的活动数据计算采用年度内燃料消耗量与平均低位发热量的乘积, 如公式(3)所示。化石燃料燃烧的碳排放因子计算, 如公式(4)所示。外购电力的碳排放量计算, 如公式(5)所示。

$$D_i = N_i \times C_i \quad (3)$$

$$F_i = V_i \times O_i \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

$$E_2 = D_e \times F_e \quad (5)$$

式中:

- N_i ——第 i 种化石燃料的平均低位发热量;
- C_i ——第 i 种化石燃料的净消耗量;

V_i ——第 i 种化石燃料的单位热值含碳量 (tC/GJ);

O_i ——第 i 种化石燃料的碳氧化率(%);

F_e ——区域电力供应的碳排放因子。

2 工业园区碳排放影响因素分解建模

工业园区碳排放量上升不能简单理解为化石能源消费增长的结果,与经济、人口、科技、社会等宏观因素有关,影响因素及关系描述如表 2 所示。

表 2 影响工业园区碳排放的宏观影响因素

Tab. 2 Macroscopic factors influencing carbon emission in industrial parks

影响因素	关系描述
经济发展	根据环境库兹涅茨曲线与环境质量呈“倒U型”关系,即当经济发展到一定水平,经济发展与环境质量将呈现正相关 ^[17] 。
产业结构	与碳排放密切相关,其中工业是碳排放密集产业,第二产业占比的增大会加剧碳排放规模 ^[18] 。
能耗强度与能源结构	体现区域经济发展对能源的依赖程度,降低能耗强度、提高能源效率是气候政策的核心目标,化石燃料燃烧是主要园区碳排放源,碳减排任务的重点之一是降低煤炭的消耗,并提高其清洁低碳化利用能力。
碳排放强度	用于衡量碳排放水平与经济发展之间的脱钩关系 ^[19] 。强调技术创新发展,加大清洁能源使用,保持碳排放强度的不断下降对我国尽快出现碳排放峰值至关重要。

IPAT 模型由 Enrlich 等在 1971 年提出,采用链式乘积的形式,构建人口(P)、经济(A)、技术(T)与环境(I)的等式关系,如公式(6)所示。

$$I = P \times A \times T \quad (6)$$

为进一步表征碳排放影响因素间的非线性关系,同时避免因素同比例变动造成的影响,基于 IPAT 模型的非随机线性回归模型 STIRPAT 被发展提出,如公式(7)所示。

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times e \quad (7)$$

由于工业园区内以工业企业为主,民用设施很少,人口因素对碳排放总量影响不大,重点考虑工业总产值、产业结构、能源结构、能源消耗量 4 类因素对碳排放的影响。构建基于 STIRPAT 方法的工业园区碳排放影响因素分解模型,如公式(8)所示。

$$\ln I = \ln a + c \ln A + d \ln T_1 + d \ln T_2 + d \ln T_3 + \ln e \quad (8)$$

式中:

I ——碳排放总量;

A ——工业总产值;

T_1 ——能源消耗量;

T_2 ——能源结构;

T_3 ——产业结构;

e ——截距项。

3 工业园区“双碳”转型路径规划建模

工业园区具有产业结构与碳排放源差异性大等特点,增加了系统建模与转型路径规划的复杂性。自 2000 年以来,国务院及国家部委发布的重要文件中提及 10 余类示范试点园区,以生态工业园区、园区循环化改造、绿色园区、低碳园区等为抓手,开展了一系列绿色低碳转型实践探索。关于园区绿色低碳发展的相关政策与概念分类见表 3。

以园区碳排放核算基础与影响因素分解作为决策依据,差异化分析不同工业园区的碳排放现状,识别“双碳”转型的目标、约束和挑战,通过产业结构优化,绿色能源转型、技术布局、政策引导等手段方式,循序渐进推动工业园区“双碳”目标的实现。工业园区“双碳”转型路径规划研究框架如图 2 所示。

数字化和绿色化转型是科技发展的主线,智能制造与绿色制造具有协同互补性。在工业园区“双碳”转型路径规划中,推动数字化与绿色化两大战略相互协同、相互促进,既有利于在数字化转型中同步实现绿色化,探明地区碳排放底数、支撑决策治理;也有助于在绿色化转型中充分发挥数字化赋能作用,贯通协同碳排放核算、碳减排追踪、碳资产管理、碳中和认证、碳交易^[20]等服务流程。通过建设园区数字化碳管理工业互联网平台,打造网络、标识、平台、安全等设施体系,构建园区内、园区间、园区与政产学研用能等各产业角色间的绿色协同的有机生态

表 3 绿色低碳园区政策汇总
Tab. 3 Summary of policies for green and low-carbon parks

建设任务	年份	政策文件	实施目的
循环经济示范园区	2012	《关于做好“十四五”园区循环化改造工作有关事项的通知》	通过产业空间布局优化、产业循环链接,实现园区内资源高效利用、副产品和废物的循环回收、污染物超低排放。
低碳工业园区	2013	《国家低碳工业园区试点工作方案》	以降低单位工业增加值碳排放和提升产业竞争力为目标,促进高能耗企业、环节、设备的节能化改造,并降低温室气体排放。
生态工业示范园区	2015	《国家生态工业示范园区管理办法》	通过工业共生和清洁生产实现园区污染防治和生态环境保护。
绿色工业园区	2016	《工业和信息化部办公厅关于开展绿色制造体系建设的通知》	致力于聚焦建立绿色制造体系,贯彻资源节约和环境友好理念,实现布局集聚化、结构绿色化、链接生态化。
工业园区(产业集群)清洁生产审核创新	2022	《关于推荐清洁生产审核创新试点项目的通知》	推动区域内优势互补、资源能源高效循环利用,提升园区层面基础设施共建共享水平和园区发展效率效益。

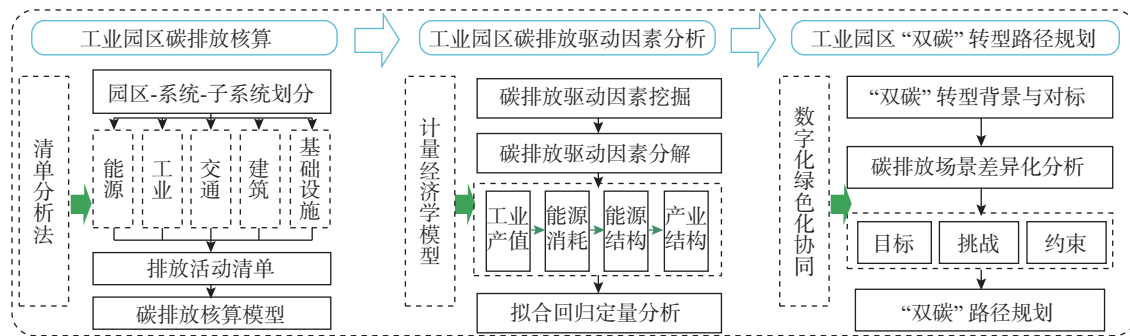


图 2 工业园区“双碳”转型路径规划研究框架

Fig. 2 Research framework for the planning of the “dual carbon” transformation path of industrial parks

平台。

4 算例

赣州经开区位于江西省赣州市中心城区西北部,成立于 1990 年 7 月,2010 年被批准为国家级经开区,代管 6 个乡镇、1 个综保区、1 个高铁新区,在 2022 年全国国家级经开区综合考评中排名第 31 位,位列中部地区第 6、全省第 1,现聚集工业企业 1 300 余家,工业营收总量约占赣州市 1/4,规上工业企业 300 余家。

4.1 数据来源

文章使用的社会经济和能源消费数据来自赣州经开区 2020—2022 三年的统计数据、政策文件、发展规划、工作报告、研究报告等资料。碳排放因子数据取值于 IPCC 公布的数据与国家部委发布的温室气体报告中提供的缺省值。对于部分重点行业和

企业,采用调研问卷的方式,确保数据的科学性与准确性。赣州经开区聚焦电子信息和新能源及新能源汽车双首位产业,招大引强,2020—2022 年工业总产值分别是 707 亿、954.7 亿、1 162 亿,呈连续上升趋势,如图 3 所示。

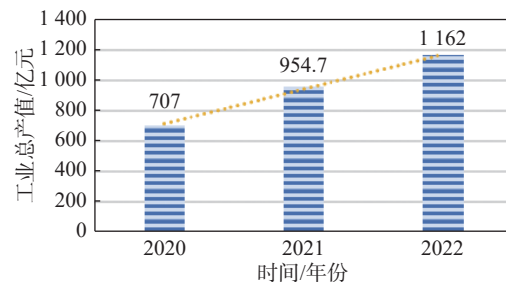


图 3 2020—2022 年赣州经开区工业总产值

Fig. 3 Gross industrial output value of Ganzhou Economic and Technological Development Zone from 2020 to 2022

4.2 能源结构与消费分析

赣州经开区通过前期绿色低碳转型升级,已分批次淘汰燃煤锅炉、燃煤窑炉等用煤设备,并且园区暂未建设集中供热管道,无外购热力消费。园区能源结构主要是:天然气、成品油、外购电力3类。采用统一折算成标煤的方式,对工业园区的用能结构进行对比分析,不同能源折算成标煤的系数如表4所示。2022年赣州经开区用能结构对比,如图4所示。

表4 不同能源折标煤的系数

Tab. 4 Coefficient of conversion of different energy sources to standard coal

能源种类	折算系数
外购电力/[kgce·(kWh) ⁻¹]	0.122 9
燃气(天然气)/(kgce·m ⁻³)	1.33
成品油(煤油)/(kgce·kg ⁻¹)	1.47

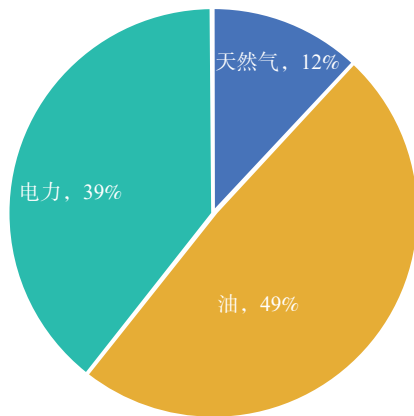


图4 2022年赣州经开区用能结构对比

Fig. 4 Comparison of energy consumption structure of Ganzhou Economic and Technological Development Zone in 2022

赣州经开区能源消费以外购电力和成品油为主,天然气消费占比趋于稳定,连续3年保持在12%左右,电力消费在能源结构中占比呈增长趋势,2020—2022分别是:36.5%、36.7%、39.5%,能源消费逐渐向清洁低碳加速转变。

根据天然气、油、外购电力3种能源形式的消费量数据,以及工业总产值数据,计算园区内的能耗总量与能耗强度。2020—2022年赣州经开区能耗总量与能耗强度变化趋势,如图5所示。

4.3 碳排放量与碳排放强度核算

赣州经开区碳排放源主要来自2方面:(1)园区内化石能源活动直接造成的CO₂排放;(2)通过外购电力调入造成的间接CO₂排放。依据《中国能源统

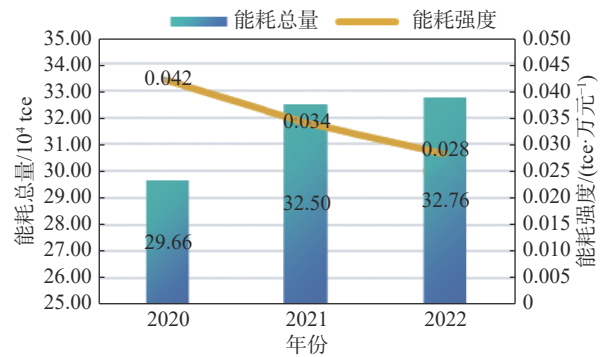


图5 2020—2022年赣州经开区能耗总量与能耗强度

Fig. 5 Total energy consumption and energy intensity of Ganzhou Economic and Technological Development Zone from 2020 to 2022

计年鉴2019》《省级温室气体清单编制指南(试行)》公布的数据,天然气和成品油碳排放核算相关参数的取值,如表5所示。根据《企业温室气体排放核算方法与报告指南发电设施》(环办气候[2021]9号)的指导要求,外购电力碳排放因子取0.581 tCO₂/MWh。

表5 能源碳排放核算相关参数取值

Tab. 5 Parameter values related to carbon emission accounting

能源种类	平均低位发热量/ (GJ·10 ⁻⁴ Nm ⁻³ , GJ·t ⁻¹)	单位热值含碳量/(tC·TJ ⁻¹)	碳氧化率/%
燃气	389.31	15.3	98
成品油	43.07	19.6	99

根据公式(1)和公式(2)的碳排放核算模型,计算工业园区的碳排放量与碳排放强度。2020—2022年赣州经开区碳排放量与碳排放强度变化趋势,如图6所示。

从图中可见,尽管赣州经开区碳排放总量仍处于持续上升阶段,但是由于全市大力实施科技创新赋能行动,推动企业绿色化低碳化转型升级,碳排放强度随时间的增加呈缓慢下降趋势。

4.4 碳排放影响因素分析

根据第2节的碳排放影响因素分解模型,定量分析赣州经开区碳排放的主要影响因素。能源结构采用电力消费占总能源消费占比表示,产业结构采用工业园区内电子信息和新能源及新能源汽车双首位产业规上企业数量占比表示。碳排放影响因素分解模型用于回归训练的数据如表6所示。

经训练,碳排放影响因素分解模型回归拟合度

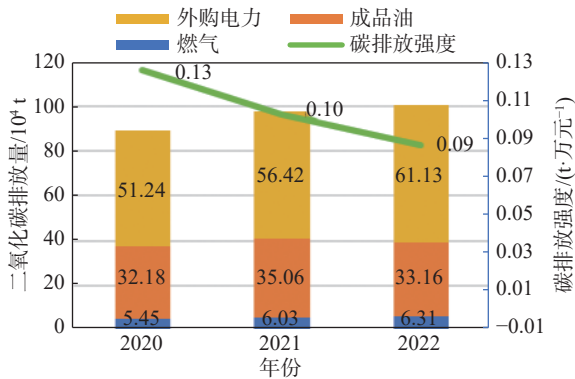


图 6 2020—2022 年赣州经开区碳排放量与碳排放强度
Fig. 6 Carbon emission and carbon emission intensity of Ganzhou Economic and Technological Development Zone from 2020 to 2022

R2 等于 1, 拟合模型的估计值与实际值具有较好的拟合度。回归模型系数如表 7 所示。

从拟合结果上看, 能源消耗量与能源结构对碳排放总量贡献度较大, 赣州经开区碳排放总量持续增长的主要因素是产业发展势头强劲, 以及与此伴生的能源消耗量的增加。电力消费占比与碳排放量呈负相关, 对碳排放量增长产生显著的负向驱动效应。除园区内少数企业自建分布式光伏电站实现“自发自用”外, 全区电力消费需求主要依赖外购电力, 且消费比例不断提升, 随着我国外购电力清洁化水平的不断提升, 将进一步助推赣州经开区“双碳”目标的实现。

4.5 “双碳”转型路径规划

立足赣州经开区的发展特点, 把握优势, 正视短板, 找准突破点, 从产业结构调整、能源结构优化、政策制度完善、数字化赋能 4 个方面, 规划“双碳”转型路径。

1) 调整产业结构。加快构建绿色现代化产业体

系, 调整第二产业内部结构, 积极发展战略性新兴产业, 继续坚持内培与外引相结合, 大力培育绿色产业增量, 促进各项生产要素投向绿色产业, 提升服务业低碳发展水平, 推动重点骨干绿色产业企业规模与效益“双倍增”。依托电子信息、新能源及新能源汽车两个产业高电气化能源结构占比与低耗能优势, 坚持推动传统产业转型升级, 推进园区内有色、建材等高耗能产业落实工艺优化以及节能减排技术应用, 增加产品增加值。

2) 优化能源结构。建设区域综合能源系统, 鼓励厂区、园区建设新能源、分布式能源和智能微电网项目, 利用可再生能源满足用能需求并逐步推进存量替代。通过对电、热、气、冷等不同供能环节的科学协调与调度, 实现不同品位能源的梯级利用。积极开展电力需求侧改革, 推进终端清洁能源替代, 在推动电气化水平不断提升的同时, 通过绿电、绿证采购可以进一步提高绿色电力消费比重。

3) 完善政策制度完善绿色低碳管理制度。建立和完善低碳监测、评价和统计工作的制度、标准和方法。完善温室气体基础数据统计体系, 周期性编制区域温室气体排放清单。完善企业绿色项目管理制度, 推动企业制定清晰的绿色转型战略、应用绿色低碳技术, 建立完善绿色项目管理和信息披露体系。

4) 深化工业互联网平台赋能应用。依托工业互联网平台对碳数据的采集分析与汇聚, 建立健全能源利用统计预测与监测体系, 夯实园区数据资产底座, 提高不同业务系统间数据互信互任, 推动园区碳排、碳减、碳汇、负碳等业务场景间数据贯通, 提升园区碳排放核算的精细化水平, 支撑碳中和路径规划与决策。园区数字化碳管理工业互联网平台架构如图 7 所示。

表 6 赣州经开区碳排放分解模型的训练数据

Tab. 6 Training data of carbon emission decomposition model of Ganzhou economic development zone

年份	碳排放量/ 10^4 t	工业总产值/亿元	能源消耗量/ 10^4 tce	能源结构/%	产业结构/%
2020	88.87	707	29.66	36.55	28.21
2021	97.50	954.7	32.50	36.72	28.21
2022	100.60	1 162	32.76	39.47	28.21

表 7 赣州经开区碳排放分解模型回归系数

Tab. 7 Regression coefficient of carbon emission decomposition model of Ganzhou Economic and Technological Development Zone

因素	工业总产值	能源消耗量	能源结构	产业结构	截距
系数	0.237 7	0.245 1	-0.240 5	0	2.152 9

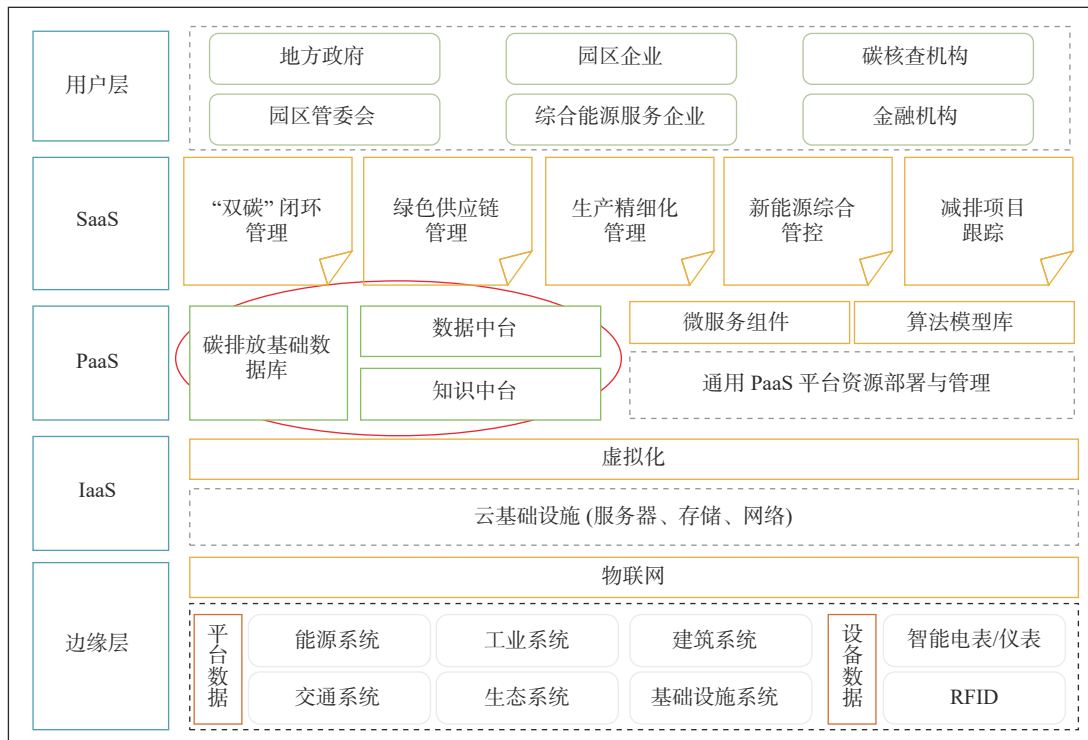


图 7 工业园区数字化碳管理工业互联网平台架构

Fig. 7 Architecture of industrial internet platform for digital carbon management of industrial parks

园区数字化碳管理工业互联网平台架构分为：边缘层、IaaS层、PaaS层、SaaS层，平台提供的服务功能包括：双碳闭环管理、生产精细化管理、绿色供应链管理、新能源综合管控、减排项目跟踪。平台向下接入企业级平台采集企业数据、模型；向上与外部的电子政务平台、区域级工业互联网平台等进行互联。

5 结论

为贯彻落实我国“双碳”目标，推动工业园区碳排放精细化管理，开展工业园区碳排放核算与“双碳”转型路径研究，重点研究工业园区碳排放核算、碳排放影响因素分解与“双碳”转型路径规划 3 个核心问题，分析数字化赋能工业园区绿色低碳转型的作用机理与影响路径。以赣州经开区为研究对象，计算 2020—2022 年工业园区的碳排放量和碳排放强度，识别碳排放量增加的主要影响因素，从产业结构、能源结构、政策制度、平台建设等 4 个方面规划了“双碳”转型路径，设计了工业园区数字化碳管理工业互联网平台。研究表明，所提模型能够充分挖掘工业园区统计数据的信息，具有科学性和有效性，为工

业园区“双碳”转型路径决策优化提供了理论支撑。

参考文献：

- [1] 工业互联网产业联盟. 工业互联网碳达峰碳中和园区指南 (2021) [R/OL]. (2021-12) [2023-11-15]. <https://aii-alliance.org/uploads/1/20211230/e2cb0bfc10df274a064c959dd49489c6.pdf>. Alliance of Industrial Internet. Guidelines for industrial internet carbon peak and carbon neutrality parks (2021) [R/OL]. (2021-12) [2023-11-15]. <https://aii-alliance.org/uploads/1/20211230/e2cb0bfc10df274a064c959dd49489c6.pdf>.
- [2] 严坤, 吕一铮, 郭扬, 等. 工业园区温室气体核算方法研究 [J]. 中国环境管理, 2021, 13(6): 13-23. DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2021.06.013.
YAN K, LÜ Y Z, GUO Y, et al. Review on greenhouse gas accounting methods on China's industrial parks [J]. Chinese journal of environmental management, 2021, 13(6): 13-23. DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2021.06.013.
- [3] ZHANG M, WANG C, WANG S S, et al. Assessment of greenhouse gas emissions reduction potential in an industrial park in China [J]. Clean technologies and environmental policy, 2020, 22(7): 1435-1448. DOI: 10.1007/s10098-020-01864-5.
- [4] 陈彬, 杨维思. 产业园区碳排放核算方法研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(3): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2017.03.001.
CHEN B, YANG W S. Carbon emission accounting methods for industrial parks [J]. China population, resources and environment, 2017, 27(3): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2017.03.001.
- [5] SUH S, LENZEN M, TRELOAR G J, et al. System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches [J].

- Environmental science & technology*, 2004, 38(3): 657-664. DOI: 10.1021/es0263745.
- [6] DONG H J, GENG Y, XI F M, et al. Carbon footprint evaluation at industrial park level: a hybrid life cycle assessment approach [J]. *Energy policy*, 2013, 57: 298-307. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.01.057.
- [7] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架 [J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 821-833. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2550.
- KANG C Q, DU E S, LI Y W, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems [J]. *Power system technology*, 2022, 46(3): 821-833. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2550.
- [8] ANG B W. LMDI decomposition approach: a guide for implementation [J]. *Energy policy*, 2015, 86: 233-238. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.07.007.
- [9] 杜涵蓓, 赵立君, 刘巨炜, 等. 基于 LEAP 模型和 KAYA 模型的主城区碳达峰预测及不确定性分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(8): 983-991. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0205.
- DU H B, ZHAO L J, LIU C W, et al. Prediction of peaking carbon dioxide emissions in main city areas based on LEAP model and KAYA model and analyses on its uncertainty [J]. *Journal of ecology and rural environment*, 2022, 38(8): 983-991. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0205.
- [10] 朱宇恩, 李丽芬, 贺思思, 等. 基于 IPAT 模型和情景分析法的山西省碳排放峰值年预测 [J]. *资源科学*, 2016, 38(12): 2316-2325. DOI: 10.18402/resci.2016.12.11.
- ZHU Y E, LI L F, HE S S, et al. Peak year prediction of Shanxi province's carbon emissions based on IPAT modeling and scenario analysis [J]. *Resources science*, 2016, 38(12): 2316-2325. DOI: 10.18402/resci.2016.12.11.
- [11] LUO Y L, ZENG W L, HU X B, et al. Coupling the driving forces of urban CO₂ emission in Shanghai with logarithmic mean Divisia index method and Granger causality inference [J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 298: 126843. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126843.
- [12] HEAPS C, KUYLENSTIERNA J C I, HICKS K, et al. The long-range energy alternatives planning-integrated benefits calculator (LEAP-IBC) [R]. Sweden: Stockholm Environment Institute (SEI), 2017.
- [13] 张玲, 袁增伟, 毕军. 物质流分析方法及其研究进展 [J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 6189-6198. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.11.054.
- ZHANG L, YUAN Z W, BI J. Substance flow analysis (SFA): a critical review [J]. *Acta ecologica sinica*, 2009, 29(11): 6189-6198. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.11.054.
- [14] HAO J H, GAO F, FANG X Y, et al. Multi-factor decomposition and multi-scenario prediction decoupling analysis of China's carbon emission under dual carbon goal [J]. *Science of the total environment*, 2022, 841: 156788. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156788.
- [15] LIU J P, ZHANG X B, SONG X H. Regional carbon emission evolution mechanism and its prediction approach driven by carbon trading – a case study of Beijing [J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 172: 2793-2810. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.133.
- [16] 曹斌, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 基于 LEAP 的厦门市节能与温室气体减排潜力情景分析 [J]. *生态学报*, 2010, 30(12): 3358-3367.
- CAO B, LIN J Y, CUI S H, et al. Scenario analysis of reduction potentials of energy demand and GHG emissions based on LEAP model in Xiamen city [J]. *Acta ecologica sinica*, 2010, 30(12): 3358-3367.
- [17] 朱永彬, 王铮, 庞丽, 等. 基于经济模拟的中国能源消费与碳排放高峰预测 [J]. *地理学报*, 2009, 64(8): 935-944. DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.08.004.
- ZHU Y B, WANG Z, PANG L, et al. Simulation on China's economy and prediction on energy consumption and carbon emission under optimal growth path [J]. *Acta geographica sinica*, 2009, 64(8): 935-944. DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.08.004.
- [18] 赵玉焕, 钱之凌, 徐鑫. 碳达峰和碳中和背景下中国产业结构升级对碳排放的影响研究 [J]. *经济问题探索*, 2022(3): 87-105.
- ZHAO Y H, QIAN Z L, XU X. Study on the impact of industrial structure upgrading on carbon emissions in China in the context of carbon peaking and carbon neutrality [J]. *Inquiry into economic issues*, 2022(3): 87-105.
- [19] HE C Y, HUANG G H, LIU L R, et al. A multi-perspective factorial hypothetical simulation model for cutting the carbon emission intensity of China [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 275: 123943. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123943.
- [20] 李汪繁, 吴何来. 双碳目标下我国碳市场发展分析及建议 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 118-126. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.015.
- LI W F, WU H L. Analysis and suggestions for the development of carbon emissions trading markets in China under carbon peak and neutrality goals [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 118-126. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.015.

作者简介:



王仲

王仲 (第一作者)

1993-, 男, 工程师, 华北电力大学热能工程专业博士, 主要从事工业互联网、能效诊断、复杂系统状态监测与故障诊断等方面的研究工作(e-mail)18810425965@email.com。



马思明

马思明 (通信作者)

1995-, 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事工业互联网、数字化转型等方向的研究工作(e-mail)646626012@qq.com。

(编辑 徐嘉铨)