

工业园绿色发展路径

毛知新¹, 张筱楠²

¹中国电建集团江西省电力建设有限公司, 江西 南昌

²东华理工大学经济与管理学院, 江西 南昌

收稿日期: 2022年4月11日; 录用日期: 2022年5月11日; 发布日期: 2022年5月18日

摘要

工业园区是中国工业产业集聚发展的核心单元, 也是能源消耗和碳排放最集中的地方之一。作为先进要素高度集聚、创新活动蓬勃发展的产业活动主要载体, 各类园区将在“双碳”战略实践中发挥至关重要的作用。分析工业园区碳排放特征, 构建碳排放识别模型, 利用系数法“自上而下”和“自下而上”结合的方法核算工业园区碳排放数据, 应用Kaya恒等式和改进STIRPAT模型, 分析工业园区碳排放的主要影响因素, 规划工业园区绿色发展路径, 为工业园区碳达峰碳中和行动提供技术支持。

关键词

工业园区, 碳达峰碳中和, Kaya恒等式, 改进STIRPAT模型

Green Development Path of Industrial Park

Zhixin Mao¹, Xiaonan Zhang²

¹CHINAPOWER Jiangxi Electric power Construction Co., Ltd., Nanchang Jiangxi

²School of Economics and Management, East China University of Technology, Nanchang Jiangxi

Received: Apr. 11th, 2022; accepted: May 11th, 2022; published: May 18th, 2022

Abstract

Industrial Park is the core unit of China's industrial agglomeration development, and it is also one of the places with the most concentrated energy consumption and carbon emission. As the main carrier of industrial activities with high concentration of advanced elements and vigorous development of innovation activities, all kinds of parks will play a vital role in the practice of "double carbon" strategy. Analyze the carbon emission characteristics of industrial parks, build a carbon emission identification model, calculate the carbon emission data of industrial parks by using the coefficient method combined with the "top-down" and "bottom-up" methods, analyze the main influencing factors of carbon emission of industrial parks by using Kaya formula and improved

文章引用: 毛知新, 张筱楠. 工业园绿色发展路径[J]. 可持续发展, 2022, 12(3): 685-691.

DOI: 10.12677/sd.2022.123074

STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology) model, and plan the carbon peak and carbon neutralization path of industrial parks, provide technical support for green development in industrial parks.

Keywords

Industrial Parks, Carbon Peak and Carbon Neutrality, Kaya Formula, Improved STIRPAT Model

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

随着社会经济的快速发展, 气候变化治理已经成为世界各国密切关注的问题。通过《巴黎协定》, 各国达成了将全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上 2℃ 之内的共同目标。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)表明, 将温升限制在 1.5℃ 将可以实现全球碳减排目标[1] [2]。中国正处于工业化和城镇化的关键时期, 碳排放的总量和强度压力都很大, 在应对气候变化中任重道远。2020 年 9 月, 中国政府承诺将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和[3]。双碳目标已成为中国重大战略。

工业园区是由政府或企业为实现工业发展目标而规划创立的, 功能相对独立, 且配套有较完善的公共设施, 集聚工业行业和关联业态, 并实施统一规范管理的区域[4]。工业园区为了实现产业集聚发展, 担负着聚集创新资源、培育新兴产业、发展产业经济、推动社会发展、支撑民生福祉等一系列的重要使命[5]。人口和产业集聚的工业园区大量消耗能源, 大量产生的污染物和碳排放会产生“热岛效应”, 然而, 我国不同类型的工业园区数量大、种类多。且在一定时期内, 仍将是中国工业发展的重要形式。因此, 在国家能耗总量和强度双控向碳排放总量和强度双控转变的形势下, 为落实国家自主贡献和全球温升控制的双重目标, 园区面临着迅速推进能源低碳化转型和工业绿色发展的双重压力。

园区实现绿色发展, 首先要摸清碳排放家底。对园区温室气体排放的核算, 要坚持系统观, 从生命周期视角, 既要看直接排放, 也要重视间接排放[6]。采用 Kaya 恒等式和改进后的 STIRPAT 模型分析工业园区碳排放的主要影响因素, 有针对性地制定绿色发展路径, 从而实现经济增长与碳排放脱钩, 并最终实现碳中和。

1.2. 文献综述

分析和研究工业园区碳达峰和碳中和途径, 是目前工业园区绿色发展的重要途径。在工业园区碳排放主要影响因素的分析研究中, Kaya 恒等式通过一种简单的数学公式将经济、政策和人口等因子与人类活动产生的 CO₂ 排放建立起联系, 我国学者也将 Kaya 恒等式引进到了国内低碳经济的研究。从宏观上研究了我国、省、区等区域能源消耗导致的地区间人均 CO₂ 排放的差别[7] [8] [9]。也分析了上海、西安、北京等地能源环境现状, 并从转变经济增长方式、调整产业结构, 发展节能技术、节约能源使用等方面发挥节能潜力[10] [11] [12]。

在区域碳达峰碳中和的研究中, 产业结构、城市化水平和能源结构与碳排放之间的关系问题一直是

国内外学术界研究的热点, IPAT 及其改进后的 STIRPAT 模型是进行碳足迹影响因素分析和预测的重要手段, 一些学者以 STIRPAT 模型为基础, 根据自己的研究目的, 对模型进行了扩展, 将各种可能影响环境的因素加入其中。采用 STIRPAT 模型研究了产业结构、城市化进程、技术水平、人口老龄化、能源结构等因素对环境 CO₂ 排放的影响, 对山东、江苏、南京、西安等地区碳足迹进行了与预测和情景分析 [13]-[20]。

对于工业园区, 产业和能源结构是影响园区及企业碳排放的重要因素, 增加产业和能源结构因子的 STIRPAT 更能完整地分析工业园区碳排放的影响因素。

2. 工业园区主要碳源及核算方法

工业园区绿色发展路径分析, 首先应识别园区企业碳排放的主要来源; 然后测算园区企业在能源活动、工业过程、废弃物以及全生命周期碳排放量; 最后在测算的基础上, 结合园区企业的发展规划预测碳排放的发展趋势, 针对性地采取相应措施降低碳排放, 使企业碳排放与工业生产值脱钩, 实现工业园区绿色发展和碳达峰和碳中和。

2.1. 基于生命周期的园区温室气体核算方法

对于工业园区碳排放核算, 通常采用“自上而下”与“自下而上”结合的方式, 首先, 自上而下分析主要基于工业园区当前发展状态和能源平衡, 根据园区发展规划预测未来经济增长、能源消耗和能效水平, 进而计算未来碳排放趋势, 即常用于估计峰值目标年和峰值排放量的大致范围。然后, 自下而上的分析方法则是从工业园区碳排放现状基准出发, 根据各部门和企业可选用的节能减排项目措施及其成本信息, 确定园区减排的经济成本潜力, 进而确定适合园区的峰值和减排目标, 主要用于在大致范围确定的基础上具体测算峰值目标的方法和途径。

国际上主流的温室气体排放量核算方法包括核算法和实际监测法。核算法又可具体分为元素平衡法和排放因子法, 排放因子法由于计算简单, 权威性高且应用广泛, 而被我国相关的温室气体清单编制指南、温室气体排放核算方法与报告所采用。

1) 排放因子法。温室气体排放量为活动数据与温室气体排放因子的乘积, 见式(1):

$$E_{GHG} = AD \times EF \times GWP \quad (1)$$

式中 E_{GHG} 为温室气体排放量, AD 为温室气体活动数据, EF 为温室气体排放因子, GWP 为全球变暖趋势。

2) 物料平衡法。根据质量守恒定律, 用输入物料中的含碳量减去输出物料中的含碳量进行平衡计算得到二氧化碳排放量, 见式(2):

$$E_{GHG} = \left[\sum (M_1 \times CC_1) - \sum (M_0 \times CC_0) \right] \times \omega \times GWP \quad (2)$$

式中 M_1 为输入物料的量, M_0 为输出物料的量, CC_1 为输入物料的含碳量, CC_0 为输出物料的含碳量, ω 为碳质量转化为温室气体质量的转换系数。

3) 实测法。实测法通过安装监测仪器、设备, 基于排放源实测基础数据, 汇总得到相关碳排放量。2020年12月生态环境部发布的《全国碳排放权交易管理办法(试行)》中明确指出, 重点排放单位应当优先开展含碳量实测法。

由于实测法实施难度大, 且技术不成熟, 目前, 我国主要采用核算法。

2.2. 工业园区主要碳排放识别

针对碳排放总量的影响因素, Kaya 提出了著名的 Kaya 恒等式:

$$CO_2 = \sum \left(pop \times \frac{GDP}{pop} \times \frac{GDP_i}{GDP} \times \frac{Energy_j}{GDP_i} \times \frac{Energy_{ij}}{Energy_j} \times \frac{CO_{2ij}}{Energy_{ij}} \right) \quad (3)$$

式中, i 代表产业, j 代表能源种类。式(3)表明, 影响碳排放总量的主要因素包括人口、人均 GDP、GDP 结构、单位 GDP 能源强度、能源结构以及单位能源碳排放强度等。

集聚特色产业的工业园区, 包括了多个细分部门, 根据工业园区的产业特性, 将 Kaya 恒等式的分析思路引入产业低碳化研究, 通过将影响产业 CO_2 排放的能源结构碳强度、规模产业能源强度、单位产出的产业规模比率和产业 GDP 带入恒等式, 调整后的公式为:

$$CI_i = \frac{CO_{2i}}{IAV} = \sum (IIS_i \times EI_i \times ES \times EF) = \sum \left(\frac{IAV_i}{IAV} \times \frac{Energy_j}{IAV_i} \times \frac{Energy_{ij}}{Energy_j} \times \frac{CO_{2ij}}{Energy_{ij}} \right) \quad (4)$$

式中, CI_i 、 IIS_i 、 EI_i 、 ES 、 EF 分别代表单位工业增加值碳排放、工业内部产业结构、单位工业增加值能耗、能源结构、能源碳排放因子。 IAV 代表工业增加值, IAV_i 代表第 i 产业工业增加值。从式(4)可以看出, 工业部门碳强度指标的影响因素主要包括工业内部产业结构、单位工业增加值能耗、能源结构、能源碳排放因子四个方面。

对于工业产业聚集的工业园区, 改进后的 Kaya 公式可以有效识别主要碳排放。

3. 方法与模型

3.1. 基于 STIRPAT 量化分析

Ehrlich 和 Holdren (1971)首次使用 IPAT 模型来分析人口规模(P)、富裕程度(A)、技术水平(T)对环境压力(I)的影响。

$$I = P \times A \times T \quad (5)$$

但 IPAT 模型在实际运用中不允许各影响因素存在非单调、不同比例的变化, 因而具有一定的局限性。为了使模型更适合于参数估计和假设检验, Dietz 和 Rosa 将其改进为 SPIRPAT 方程, 即“人口、经济、科技与环境污染的指数增长方程”。具体表达方式如下:

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times e \quad (6)$$

其中, b 、 c 和 d 分别为 P 、 A 、 T 的指数, a 为常数项, e 为误差项。模型拟合和预测时通常变形为对数形式, 对(6)式两边同时取对数, 得到:

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

式中变量分别表示人口数量、经济发展水平、能源消耗强度、碳排放系数, 模型显示了相关解释变量对被解释变量化石能源消耗二氧化碳排放的影响, 为更好地分析工业园区碳排放的影响因素, 探究园区经济发展水平、产业结构、能源结构、能耗强度等因素对其碳排放总量和单位生产总值碳排放的影响, 根据工业园区的特性, 改进后的 STIRPAT 模型为

$$I = \alpha \times P^a \times A^b \times T^c \times E^d \times e \quad (8)$$

式中, I 为碳排放; α 为系数; P 为人口; A 为人均工业增加值; T 为第二产业占比; E 为传统火电占比; e 为误差项, a 、 b 、 c 、 d 为变量系数。为了计算方便, 公式两边取对数后为:

$$\ln I = \ln \alpha + a \ln P + b \ln A + c \ln T + d \ln E + e \quad (9)$$

根据式(9)可以计算出人口、工业增加值、第二产业占比和传统能源占比对工业园区碳排放的影响, 针对性提出节能减排措施, 实现绿色发展。

3.2. 工业园区碳达峰碳中和路径

从工业系统和能源系统角度出发, 结合供应侧和需求侧进行分析, 工业园区碳达峰碳中和路径主要包括。

- 1) 优化产业结构。降低高耗能行业比例, 引进和培育低碳产业和服务业;
- 2) 节能减排。通过技术节能和提升能源产出率降低能耗, 如工艺替代、能效提升、资源回收、燃料替代技术等;
- 3) 绿能替代, 增加风能、光能、氢能、生物质能、工业余热、电化学储能、生物柴油燃料、生活垃圾与污泥在能源消费中的比例;
- 4) 应用零碳和负碳技术, 如土壤改良、海洋利用、碳捕集/利用/封存等实现碳中和;
- 5) 数字化平台技术, 还包括 5G、AI、大数据等最新数字技术。通过数字化平台提高数据采集、传输、储存、应用等各个环节的流转效率, 高效协同“源、网、荷、储”等能源资产及系统, 采集资产运营数据, 实现对能源资产及能源供需的数字化和智能化监控、分析、预测和优化, 提升能源的供应和使用效率, 进而最大化能源投资、能碳源管理、能源运营、能碳源交易等各环节的经济效益。

4. 案例分析

某工业园区主要规模以上工业企业 200 多家, 主要以陶瓷、水泥等建材行业为主。高耗能高排放企业占比大, 给园区的绿色发展带来很大的压力。

4.1. 碳排放现状

1) 园区碳排放测算分析

园区碳排放主要来自于能源碳排放, 根据高新区能源结构和用能平衡分析, 采用的排放因子依据主要如下: a) 2016 年《省级人民政府控制温室气体目标责任自评估报告编制指南》; b) 国家发改委, 2011, 《省级温室气体清单编制指南(试行)》; c) IPCC《2006 年 IPCC 国家清单指南》; d) WRI 城市温室气体核算工具 2.0。经核算, 2010~2020 年园区碳排放量计算结果如表 1 所示。

Table 1. Data of the park 2010~2020

表 1. 园区 2010~2020 年数据

年份	人口/ 万人	工业增 加值	人均 GDP/ 万元	第二产业 占比/%	化石能源 占比/%	能耗(万 吨标煤)	总排放(万 吨 CO ₂)	能耗强度 (tce/万元)
2010 年	0.66	52.14	79.00	84.2	98	45.258	120.235	0.868
2011 年	0.68	65.86	96.86	85.1	96	56.379	146.743	0.856
2012 年	0.74	80.71	109.07	82.4	96	67.962	179.429	0.842
2013 年	0.78	93.78	120.23	82.1	95	77.465	208.104	0.826
2014 年	0.92	102.63	111.55	80.4	86	84.051	227.420	0.819
2015 年	0.94	113.82	121.09	78.6	85	92.766	251.890	0.815
2016 年	0.98	122.25	124.74	76.4	85	99.264	269.919	0.812
2017 年	1.12	133.63	119.31	76.5	76	108.104	294.648	0.809
2018 年	1.24	148.59	119.83	75.8	75	119.469	327.351	0.804
2019 年	1.34	161.97	120.87	75.6	72	128.925	356.003	0.796
2020 年	1.45	172.82	119.19	75.4	72	136.31	379.164	0.789

根据改进 STIRPAT 计算可得

$$\ln I = 1.2458 + 0.9966 \ln P + 0.8952 \ln A - 0.262 \ln T + 0.0900 \ln e \quad (10)$$

根据式(10)分析, 工业园区人口变化 1%, 碳排放变化 0.9%, 人均工业增加值变化 1%, 碳排放变化 1.14%, 第二产业占比变化 1%, 碳排放变化 0.5%, 化石能源占比变化 1%, 碳排放变化 0.12%。

2) 重点行业分析

本园区主要行业包括水泥、焦化、陶瓷、炭黑等工业生产行业和学校、研究院等服务行业, 其中水泥、焦化、陶瓷、炭黑四个第二产业行业能耗约占工业园区能耗的 75.4%, 为园区高耗能行业(表 2)。

Table 2. Statistics of total energy consumption of enterprises in the park in 2020

表 2. 2020 年园区企业总能耗统计表

行业	总能耗(吨标准煤)	占比/%
陶瓷	630232.7	46.24
水泥	238926.89	17.53
焦化	97050.36	7.12
炭黑	61525.04	4.51
其他	335288.16	24.6

4.2. 绿色发展路径

除根据国家相关关于工业园区绿色发展和循环化发展的要求进行相应的管理制度、发展机制等政策性变革外, 从产业结构、能源结构和节能减排方案进行了相应的规划部署。

1) 产业结构调整

针对园区高耗能产业占比过大现状, 压减水泥、陶瓷、化工等传统产业; 引入食品、机械电子、新能源材料、电子产业和咨询设计企业; 实施高耗能水泥、陶瓷、炭黑制定逐步退出计划, 开展节能改造和资源优化利用, 十四五末实现能源强度低于 0.4 tce/万元, 碳强度达到省内先进水平; 提高循环回收效率, 进一步推进企业开展煤改气, 提高工业的电气化水平。

2) 优化能源结构

a) 在原有 140 MW 分布式光伏和 1 t/h 生物质锅炉的基础上, 规划建设 269 MW 分布式光伏、39 MW 分散式风电、10 MW/10 MWh 储能, 以及 70 MW 氢能联合循环与生物质气化耦合系统, 提高可再生能源比例, 配套智慧能源管理系统, 提高能源的综合利用效率;

b) 提高能源利用效率, 规划余热发电装机 24 MW, 实现余热余压尽可能梯级利用, 提高整体能源利用效率。

3) 节能减排

a) 工业节能。对标先进企业, 加强先进技术攻关, 在水泥行业推广应用低阻高效预热预分解系统、第四代篦冷机等; 在陶瓷企业推广应用陶瓷砖(板)低温快烧工艺技术, 节能窑炉及高效烧成技术, 低能及余热的高效利用技术等绿色低碳功能化建筑陶瓷制备技术等。

b) 低碳交通。配套光储充能源系统, 促进园区公共交通和私人汽车电能替代。依靠燃料替代提高交通工具能效水平。

c) 绿色建筑。以电力和燃气为主, 实现村园互动、城乡一体的发展策略, 优化配套服务、凸显风貌特色。新建建筑面积 80% 以上达到绿色建筑基础级要求; 提高建筑能效和高效设备普及率; 完全去除散

煤的使用; 提高电力比例。

5. 总结

工业园区作为我国工业产业集聚生产地, 能源的大量应用和工业过程碳排放导致严重影响环境, 通过应用 Kaya 公式和 STIRPAT 模型分析园区的碳排放主要影响因素, 以实例验证改进后的 STIRPAT 模型分析人口、经济、第二产业占比和传统能源占比的变化对碳排放的改变, 针对性地提出节能减排措施和绿色发展路径分析。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf
- [2] Energy & Climate Intelligence Unit (2021) Net Zero Emissions Race.
<https://eciu.net/netzerotracker/map>
- [3] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2020.
- [4] 吕秋生, 彭琛, 潘崇超, 方静, 吴祭凤, 戴远边, 等. T/CSPSTC 51-2020. 智慧零碳工业园区设计和评价技术指南[S]. 北京: 中国科技产业促进会, 2020.
- [5] 禹湘, 王苒, 武占云. 工业园区碳排放的影响因素——基于国家低碳工业园区试点的研究[J]. 城市与环境研究, 2017, 3(4): 80-91.
- [6] 郭扬, 吕一铮, 严坤, 田金平, 陈吕军. 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.
- [7] 任晓松, 赵涛. 中国碳排放强度及其影响因素间动态因果关系研究——以扩展型 KAYA 公式为视角[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(3): 6-10.
- [8] 袁路, 潘家华. Kaya 恒等式的碳排放驱动因素分解及其政策含义的局限性[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(3): 210-215.
- [9] Feng, X. and Wang, X. (2009) Analysis of Impact Factors on China's CO₂ Emission Trends During 1971-2005. *Climate Change Research*, 5, 66-72.
- [10] 张玲玲, 车力, 王宗志, 郝伦. 长江经济带水污染与经济脱钩关系演变及驱动因素研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(12): 47-59.
- [11] 轩党委, 沈静文, 胡庆芳, 王银堂, 刘勇, 崔婷婷. 基于 KAYA 恒等式和 LMDI 分解法的淮安市生产用水驱动因素分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 40-47.
- [12] 张巍. 基于 Kaya 恒等式的西安市碳足迹影响因素分析[J]. 环境科学导刊, 2020, 39(6): 40-45.
- [13] Dietz, T. and Rosa, E.A. (1994) Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology. *Human Ecology Review*, 1, 277-300.
- [14] 崔学勤, 王克, 傅莎, 邹骥. 2°C 和 1.5°C 目标下全球碳预算及排放路径[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4353-4362.
- [15] 郭承龙, 徐蔚蓝. 基于 STIRPAT 模型的江苏省碳排放影响因素研究[J]. 中国林业经济, 2022(1): 89-93.
- [16] 颜伟, 黄亚茹, 张晓莹, 高梦斐. 基于 STIRPAT 模型的山东半岛蓝色经济区碳排放预测[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(2): 125-131.
- [17] 王立猛, 何康林. 基于 STIRPAT 模型的环境压力空间差异分析——以能源消费为例[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 1032-1037
- [18] 姜磊, 季民河. 基于 STIRPAT 模型的中国能源压力分析——基于空间计量经济学模型的视角[J]. 地理科学, 2011, 31(9): 1072-1077.
- [19] 范振月, 赵梦真, 公维凤. 基于 STIRPAT 模型的碳排放影响因素及峰值研究——以山东省为例[J]. 低碳经济, 2020, 9(2): 100-110. <https://doi.org/10.12677/JLCE.2020.92011>
- [20] 戴德颐. 产业结构变迁、城市化进程与碳排放——基于 STIRPAT 模型[J]. 江苏经贸职业技术学院学报, 2020(1): 1-6.