产业园区减污降碳路径及评价分析

刘香钰[1]，刘明艺[2]，张红红[1]

(1. 中国技术经济学会，北京 100081；2. 中国标准化协会，北京 100048)

摘要：“十五五”时期是国家实现“双碳”目标、经济社会发展全面绿色转型的重要阶段，也是产业园区通过减污降碳为美丽中国建设夯实基础、全面发力的关键时期。为科学高效地推进工业园区减污降碳工作，系统梳理了产业园区能源系统、建筑系统、交通系统、生产系统和公共基础设施系统的减污降碳技术路径，深入分析当前形势下产业园区减污降碳评价的发展趋势，并提出产业园区减污降碳的发展建议，为落实“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”战略提供支撑。

关键词：产业园区；减污降碳；技术路径

中图分类号：X322 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)12－0094－05

实现碳达峰碳中和是贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的内在要求，是党中央统筹国内国际两个大局作出的重大战略决策。减污降碳协同增效作为促进经济社会发展全面绿色转型的核心支点，在加快实现美丽中国建设和碳达峰碳中和目标的进程中发挥着重要作用[1]。2021年《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》指出，处理好减污降碳和能源安全、产业链供应链安全、粮食安全、群众正常生活的关系，有效应对绿色低碳转型可能伴随的经济、金融、社会风险[2]。2022年，生态环境部等7部门联合印发了《减污降碳协同增效实施方案》(以下简称《实施方案》)，提出“基于环境污染物和碳排放高度同根同源的特征”“遵循减污降碳内在规律，强化源头治理、系统治理、综合治理”“充分利用现有生态环境制度体系协同促进低碳发展，创新政策措施，优化治理路线，推动减污降碳协同增效”，为协同推进减污降碳工作指明了方向。2023年《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》强调，“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”“开展多领域多层次减污降碳协同创新试点”“支持能源结构低碳化、移动源清洁化、重点行业绿色化、工业园区循环化转型等”，为减污降碳协同工作提供了思路方法和侧重点。2024年国务院发布的《中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》、2025年党的二十届四中全会和2026年十四届全国人大四次会议批准通过的《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》都进一步强调，“以碳达峰碳中和为牵引，协同推进降碳、减污、扩绿、增长”，为减污降碳协同的能力提升和效果增强提供了政策保障。

当前，产业园区作为集聚要素资源推动经济增长的主要载体，是能源活动和碳排放的重要来源，也是减污降碳协同管控的核心单元。科学厘清产业园区基于生态环境多目标治理的减污降碳实践路径及评价要素，对于系统构建减污降碳评价体系、精准研判减污降碳治理成效、综合优化减污降碳治理措施具有重要意义。因此，本文旨在通过系统分析产业园区减污降碳技术路径及其评价发展趋势，探索提出产业园区减污降碳工作的优化建议，为构建科学合理、适配性强、可操作性强的减污降碳评价体系提供理论支撑，为产业园区制定减污降碳实施方案和管控及评价制度提供参考依据，以期推动国家减污降碳工作高质量、高标准发展，实现生态环境质量由量变到质变的改善提升。

1 产业园区减污降碳技术路径

目前，国家产业园区的生态环境治理和减污降碳工作已从单一目标治理向多目标协同优化转变，不仅要实现工业“三废”的源头减量、浓度持续下降及碳排放强度稳步降低等核心环境目标，也要同时

收稿日期：2026-05-28

作者简介：刘香钰(1993—)，女，辽宁本溪人，博士，助理研究员，研究方向为绿色低碳设计与评价、标准化；通信作者刘明艺(1992—)，女，湖南常德人，硕士，助理工程师，研究方向为绿色低碳、标准化；张红红(1986—)，女，山西运城人，硕士，工程师，研究方向双碳政策、节能降碳技术、产业规划。

兼顾产业结构升级优化、能源结构清洁化、能源利用高效化等经济转型目标[3-5]。产业园区可分为能源系统、建筑系统、交通系统、生产系统和公共基础设施系统,产业园区需要根据自身当前产业结构、用能结构及所在区域的自然资源禀赋条件等实际情况,围绕园区的实际需求和产业优势,制定适宜的碳减排技术路径,统筹园区内能源系统与生产系统、交通物流系统、建筑系统等的协调发展,循序渐进、因地制宜地推进园区减污降碳工作。

1.1 产业园区能源系统

产业园区能源系统一般指满足产业园区内用户对电、热/冷、气等多种能源形式的用能需求,实现能源供需动态平衡的系统,是园区减污降碳工作的核心系统之一。一是单一供能的优化提升,例如,利用屋顶、车棚等空间安装光伏组件或中小型风力发电机组,通过分布式光伏、分散式风电生产绿色电力;利用井下换热技术,提取中深层地热来替代天然气锅炉供热,提高中深层地热能利用率;进行生物质热电联产,利用生物质直燃或气化发电及余热回收的技术,同时生产绿色电力和工业蒸汽,实现生物质等固废资源的资源化利用等。园区也可以建设专用线路直供新能源电站,实现物理可追溯的绿电供应,来提高消纳比例。二是多能互补供能,例如,搭建风光互补发电系统,使用光伏和风电联合供电,利用风光互补性提高出力稳定性,对于一些风光资源较好区域,但风光系统建设条件有限的园区,可以将风光互补和外购绿电结合起来进行优化。三是供能和储能相结合,例如,将分布式光伏、分散式风电或风光互补和储能相结合,通过储能调控最大化利用风光资源,平滑出力,削峰填谷,进行稳定输出并提高自用率;将天然气冷热电联供和电储能或蓄热相结合,提高天然气冷热电联供系统的灵活性,参与需求响应;将光伏、储能、空气源或地源热泵结合起来进行光储热泵一体化建设,利用光伏发电驱动热泵,储能调峰,实现绿电供热或制冷;风光储氢一体化建设,即通过光伏、风电、电解水制氢、储氢的结合实现长周期储能和绿氢生产;运用蓄冷蓄热系统,通过水蓄冷、冰蓄冷、相变材料储热的方式,转移冷热负荷来平衡电网等。四是源网荷储一体化发展,例如,通过统筹智慧管控平台、分布式电源、储能和可调负荷,实现源、网、荷、储协同优化,提升自平衡能力;也可独立运行微电网,通过孤岛或并网双模式系统,提高供电可靠性,支持离网运行。

1.2 产业园区建筑系统

产业园区建筑系统一般指产业园区内的工业建筑、公共建筑和居住建筑,以及服务于建筑内部环境控制和功能运行的末端设备与控制系统。一是在围护结构节能方面,对于工业建筑、公共建筑的外墙及管道保温,可采用多腔孔、介孔材料,降低导热系数,减少建筑能量流失;对于新建及老旧建筑外墙节能改造,可采用碱土金属复合盐类等辐射换热保温涂料,基于红外热控技术,有效降低墙体热流密度。二是在用能设备高效节能方面,对于住宅、办公、商业建筑空调系统,可采用高效热泵空调系统,如采用两相流体相分离技术,提升传热效率。对于寒冷地区供暖、既有建筑采暖改造等,可采用空气源热泵高效供热技术,如通过双向可变送风和热气直通除霜热泵,提高制热节能率。对于新建绿色建筑、零碳建筑等项目,可采用光储直流化空调系统,提升光伏直驱利用率、电能转化率。三是在建筑能源智能管控方面,公共建筑可采用人工智能+物联网自控系统,通过人工智能节点实时感知并自动控制用能设备。四是在绿色建材方面,可以利用钢渣、矿渣、脱硫石膏等工业固废制备胶凝材料[6],生产混凝土、砂浆、建材制品等。

1.3 产业园区交通系统

产业园区交通系统一般指产业园区内的交通工具、道路设施、停车设施、公共交通及管理设施等。一是在新能源车辆方面,可在港口物流园区推广纯电动堆高机、纯电动智能导引运输等作业车辆,实现港区水平运输全电化,减少化石能源使用量。对于大型产业园区、高新技术园区的通勤,也可以积极推动纯电动或氢燃料电池车的使用。二是在车辆充电设施方面,利用园区停车位等空间建设光储充一体化系统,为园区交通设施供电。三是在智慧交通物流管理方面,对于有大规模电动车辆的园区,可以采集电动设备电量数据和充电桩状态,科学调度车辆回站充电,提升电动设备使用率;对于内河港口、沿海园区的水运,可以采用电动船替代传统燃油型船舶,辅以绿电供应,运用船电分离模式和直流组网技术,提升航行里程。四是在低碳道路方面,利用工业固废作为路基填料,节省石料,减少上游开山采石环节的碳排放;在园区内部道路养护维修中,应用废旧沥青混合料再生技术生成满足施工要求的再生混合料。

1.4 产业园区生产系统

产业园区生产系统一般指产业园区内所有企

业的生产过程。一是工业废水集中预处理，对企业的难处理废水（如含重金属、高化学需氧量、高盐度）进行集中预处理，降低后续园区污水处理厂负荷。二是工业固废资源化利用，针对园区主导产业产生的固废（如粉煤灰、钢渣、废催化剂等），建设资源化利用设施。三是建立副产品交换系统，建立园区内企业间的物质交换网络，将一企业的副产品作为另一企业的原料，实现产业共生。

1.5 产业园区公共基础设施系统

产业园区公共基础设施系统一般指产业园区的公共照明设施和新型基础设施等。一是在公共照明设施方面，积极采用发光二极管（light emitting diode，LED）高效灯具，结合感应控制、时控、调光等技术实现按需照明，引入集成照明、视频监控、信息发布、环境监测、电动车充电等功能的多功能灯杆。二是新型基础设施方面，当前人工智能、大数据、工业4.0等数字化技术的发展为园区减污降碳建设提供了更多可能性，通过数据融合、智能调控与全链条追踪等技术，不仅提升园区减污脱碳效率，更推动技术路径及其评价向动态化和精细化迭代，加快驱动园区减污降碳工作的高效化与数据可信化。例如，园区基于物联网、人工智能、数字孪生等数字技术的综合应用，可以实现能源、环境、设备数据的实时采集、监测、分析、预测，并对电、水、气、热等能源数据进行能耗管理、优化调度和能效诊断，也可以聚合园区分布式电源、储能、可调负荷等资源，实现电力市场需求响应和柔性供电，提高园区能源、资源利用效率，实现数据系统化和标准化管理。

2 产业园区减污降碳评价发展趋势

近年来，国家对产业园区减污降碳工作即低碳、零碳园区建设的政策引导力度不断加强[7]，生态环境部、商务部、科技部、国家发展改革委、财政部、工业和信息化部等部门先后出台了国家生态工业示范园区、园区循环化改造、国家低碳工业园区、绿色工业园区、园区碳达峰碳中和试点等相关政策，从污染防控与生态环境保护、构建循环产业链、节能降耗、碳减排、绿色产业培育等不同侧重方向引导园区、企业加大绿色低碳转型力度，探索产业园区减污降碳的相关评价。例如，2016年工业和信息化部启动的绿色园区建设工作，其评价指标体系共包含6大类31项指标，涉及能源产出率、可再生能源使用比例、余热资源回收利用率、废气资源回收利用率、园区空气质量优良率等近20项与减污降碳相关的指标[8]。2025年，在《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》中，单位能耗碳排放核心指标及清洁能源消费占比、园区企业产出产品单位能耗、工业固体废弃物综合利用率、余热/余冷/余压综合利用率、工业用水重复利用率等引导指标被纳入国家级零碳区建设指标体系。立足实际评价工作对科学合理性和可操作性的双重要求及当前数智化技术在产业园区减污降碳数据采集、监测、管控中的应用情况，产业园区减污降碳评价呈现分类差异化评价、全生命周期动态评价、兼顾经济与环境的综合效益评价等发展趋势。

2.1 评价从“通用化”向“分类差异化”发展

产业园区的减污降碳技术路径与实施成效是与园区主导产业、规模、能源结构、发展阶段、资源环境禀赋密切相关的，因此在评价阶段应按照园区的主导产业，结合用能需求及碳排放特征，对产业园区进行分类测评，向“分类差异化”发展。例如，以化工、钢铁、冶金、建材为主要产业的园区，园区企业需连续生产，园区高耗能并对工艺热力和蒸汽的需求量较大，且常有余热，碳排放来源主要为燃料燃烧和工艺过程排放，并以直接排放为主。针对这类园区，需要重点关注是否包含余热回收、单位能耗碳排放、建筑围护结构综合传热系数、新能源车辆占比等指标。同时，这类园区通常会产生大量钢渣、粉煤灰、废催化剂等工业固废，资源化价值高，并且产业链长，副产品交换潜力大，需要重点关注固废资源化利用率、副产品交换覆盖率等指标。而主要通过零部件装配组合进行生产的离散型产业园区，能源消耗以电力为主，其碳排放主要是间接排放，来源主要是外购电力，压缩空气系统的负载运行通常表现为间歇性启停，负荷波动较大。针对这类园区，需要重点关注可再生能源渗透率、是否配置储能设施、能碳平台、新能源车辆占比、高效智能照明等指标。此外，这类园区通常对成本较为敏感，也需要关注平准化度电成本、投资回收期、共享设施增量成本等相关情况。

2.2 评价从“静态＋结果型”向“动态＋全生命周期”发展

目前，关于园区减污降碳评价指标多以静态评价为主，但随着全生命周期管理和全过程监督的理念逐渐发展、实践逐渐成熟，有必要加强对产业园区规划、建设、运营、改造及拆除全过程跟踪和动态评价的相关指标和机制研究，通过全生命周期的动态评价，有效跟踪和调控园区减污降碳工程中的关

键点、改进机会和预期效果。一方面,对于园区的技术路径而言,加强过程性指标与预测性指标研究,为优化不同时间尺度下产业园区减污降碳技术路径和最终的环境及社会绩效提供决策依据。随着对量化技术路径减污降碳潜力的方法学研究日渐完善和成熟,对技术应用后碳减排绩效分配和碳排放负荷变化的预测性指标被逐渐纳入园区的减污降碳评价指标。另一方面,人工智能、大数据、工业4.0等数字化技术在园区的应用日渐成熟,可以为园区基于数字孪生的实时监测与预警功能提供技术保障。在这些新型基础设施的数据支持下,园区的减污降碳评价也可以将碳污轨迹是否可追溯、减污降碳效果是否可预估、技术路径是否可调控纳入评价范围,通过对数据的采集、分析、预测实现全生命周期的动态闭环评价。

2.3 评价逐渐兼顾经济成本效益

为了园区减污降碳工作的可持续推进,评价工作需要同时考虑园区减污降碳技术路径的经济成本效益[9]。这些技术路径不仅要能够实现生态环境方面的减污降碳效果,也要保证园区在经济效益方面不会有过多的经济损失。这就需要运用技术经济分析量化减污降碳技术路径的经济与环境综合效益,考量技术路径实现减污降碳效果后的经济效益,如节能改造实现的成本降低、固废及余热等综合利用产生的经济效益等,以及实施该技术路径的投入成本,如减污降碳工程、设施投资和运维成本、排放权购买费用等[10]。因此,对于减污降碳技术路径绿色溢价的核算及环境质量的市场定价等方面的方法学研究将有助于加强园区减污降碳评价的科学合理性,逐渐把经济成本效益纳入评价体系,综合考量园区减污降碳路径的经济与环境效益,推动园区减污降碳工作的可持续发展。

3 产业园区减污降碳发展建议

基于产业园区减污降碳技术路径的发展趋势和评价导向,产业园区可在绿色技术研发、碳数据管控及应用、基础设施升级、数智化管理、产业链协同及产业共生等方面进一步加强减污降碳工作。

3.1 加强绿色技术研发及配套政策保障

对重点减污降碳技术加快规范行业标准,促进大规模的应用推广,对空白领域技术加快协同研发,根据园区实际情况及预期适配性,积极拓展减污降碳技术在园区中的应用场景。配套发展“两高一低”(即高载能、高效率、低排放)产业,推动低碳技术、新能源技术、碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage,CCUS)技术、物联网技术、大数据技术等碳减排及碳管理技术的集成应用,加强产业园区“能源-建筑-交通-生产-公共基础设施”各系统间的减污降碳协同增效。同时,配套更有利于绿色技术研发创新和成果转化的财税、金融政策,推动绿色技术与资本等要素有效结合。

3.2 深化对能碳数据的管控和市场应用

加强碳排放管理与监控,建立碳排放清单编制工作机制,尤其是对重点碳排放源和重点企业的碳排放情况进行动态管控。健全园区层面能碳数据管理制度,根据碳排放统计需要,细化园区能源统计分类标准,完善适应园区碳排放核算需要的能源统计体系,加强园区用能单位能源计量、数据统计申报、节能技改等方面的管理。深挖碳数据核算结果的应用潜力,建立与金融系统联动的绿色认证采信机制,推动碳数据及数字认证结果在绿色信贷、绿色保险、碳资产交易中发挥作用,完善园区碳排放与电力市场和碳市场的衔接机制。

3.3 推进基础设施升级改造及数智化能碳管理

系统推进电力、热力、燃气、氢能、供排水、污染治理等基础设施的建设改造,利用大数据、云计算、物联网等现代信息技术建设智慧能碳管理平台,明晰园区多产品、多元素、多层级的物质能量代谢结构、路径、过程等特征,提升物质流、能量流、碳流的相关数据采集、监测、存储、核算和校验的可靠性与即时性,加快普及对园区各项碳污染指标的精细化实时监管和预测及调配能力,进而实现碳足迹可追溯、减排效果可预估、技术路径可调控。

3.4 强化产业链协同及产业共生

基于园区资源禀赋和主导产业优势,以产业联盟、项目合作、人才培养、共建研究平台等形式强化产学研协作,推动建立园区产业链协同创新平台[11],鼓励园区内开展跨行业技术集成创新。引导园区企业间的循环利用和产业共生,通过开展企业间多级串联循环使用、副产品交换、废料循环利用、蒸汽-热水多级利用等,构建企业间产业共生的生产工业链、物质循环产业链、能量阶梯利用链[12]。

参考文献

[1] 李丽平,王敏,杨儒浦,等. 切实推动减污降碳协同增效——作为促进经济社会发展全面绿色转型的总抓手[J]. 世界环境,2026(1):44-46.

[2] 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]. (2021-10-24)[2026-05-28]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/con-

tent_5644613. htm.
[3] 易佳敏，王金龙，杨伶. 重污染企业技术创新与减污降碳耦合协调研究[J]. 科技和产业，2024，24(6)：132-139.
[4] 尤红军，杨明光，亓凯，等. 工业园区减污降碳的策略与实践[J]. 化工管理，2025(36)：66-71.
[5] 卢悦心. 新质生产力的碳减排效应研究[J]. 科技和产业，2025，25(21)：302-308.
[6] 杨艳会，郑明，袁胜，等. 矿冶固废制备混凝土配合比优化及耐久性研究[J]. 有色金属(矿山部分)，2024，76(5)：185-192.
[7] 丁丁，解瑞丽，郭凤琪. 我国“十四五”减污降碳协同增效实施成效及“十五五”展望[J]. 中国环境管理，2026，18(1)：24-35.
[8] 杨儒浦，王敏，胡敬韬，等. 工业园区减污降碳协同增效评价方法及实证研究[J]. 环境科学研究，2023，36(2)：9.
[9] 闫晶，李德山，张静，等. 产业园区规划环境影响评价中减污降碳措施的环境经济评价方法探索[J]. 环境保护与循环经济，2024，44(4)：90-93.
[10] 闫晶，李德山，张静，等. 产业园区规划环境影响评价中减污降碳措施的环境经济评价方法探索[J]. 环境保护与循环经济，2024，44(4)：90-93.
[11] 史正，翁异静. 长三角一体化对减污降碳协同治理的影响及其门槛效应[J]. 科技和产业，2025，25(16)：313-320.
[12] 费伟良，崔永丽，刘兆香，等. “双碳”目标下工业园区减污降碳协同增效路径研究[J]. 中国环保产业，2022(12)：19-22.

Pathways and Evaluation Analysis of Pollution Reduction and Carbon Mitigation in Industrial Parks

LIU Xiangyu[1], LIU Mingyi[2], ZHANG Honghong[1]
(1. Chinese Society of Technology Economics, Beijing 100081, China; 2. China Association for Standardization, Beijing 100048, China)

Abstract: The 15th Five-Year Plan period marks a crucial stage for China to achieve the dual carbon goals and advance the comprehensive green transition of economic and social development. It is also a key phase for industrial parks to underpin the construction of a Beautiful China through pollution reduction and carbon mitigation. To promote pollution reduction and carbon mitigation in industrial parks in a scientific and efficient manner, technical pathways for pollution reduction and carbon mitigation were systematically sorted out covering energy systems, building systems, transportation systems, production systems and public infrastructure systems of industrial parks. The development trends of relevant evaluation systems under the current context was further analyzed. Targeted development suggestions are puts forward, and references are provided for implementing the national strategy of coordinating carbon reduction, pollution abatement, green expansion and economic growth.

Keywords: industrial park; pollution reduction and carbon mitigation; technical pathway