

## 工业园区“废水-废气-固废”循环利用技术模式及低碳转型

王斌

河北嘉环环保科技有限公司，河北 石家庄 050000

[摘要]在工业园区迈向低碳转型的进程中，其“废水-废气-固废”（以下简称“三废”）的高效处置以及循环利用占据着重要的地位，是实现低碳转型的核心关键。文章研究基于相关前沿理论，构建了工业园区“三废”循环利用技术体系的完整框架。在此基础上，提出基于全生命周期理念的具有可针对性和可操作性的低碳转型优化策略，旨在为工业园区的低碳发展提供坚实参考。

[关键词]工业园区；三废循环利用；技术模式；低碳转型；物质流耦合

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18618 中图分类号: X327 文献标识码: A

## Industrial Park's "Wastewater Waste Gas Solid Waste" Recycling Technology Model and Low-carbon Transformation

WANG Bin

Hebei Jiahuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** In the process of industrial parks moving towards low-carbon transformation, the efficient disposal and recycling of "wastewater - waste gas - solid waste" (hereinafter referred to as "three wastes") play an important role and are the core key to achieving low-carbon transformation. The article studies the construction of a complete framework for the recycling technology system of "three wastes" in industrial parks based on relevant cutting-edge theories. On this basis, a targeted and operable low-carbon transformation optimization strategy based on the full lifecycle concept is proposed, aiming to provide solid reference for the low-carbon development of industrial parks.

**Keywords:** industrial park; three waste recycling; technical mode; low-carbon transformation; material flow coupling

### 引言

改革开放以后，我国环境保护和经济增长之间的矛盾在工业发展中表现得尤为突出，“高消耗、高排放、低循环、低效率”的粗放型工业发展模式严重阻碍了我国工业在新时期的发展<sup>[1]</sup>。工业园区是我国企业集聚发展的核心区域，也是我国实施制造业强国战略、产业转型升级的重要空间载体，其碳排放量占工业总排放量的很大比例<sup>[2]</sup>。党的二十大报告中强调：“推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节，要加强推动能源清洁低碳高效利用，推进工业、建筑、交通等领域清洁低碳转型”。我国工业园区在“三废”（废水、废气、固废）处置方面面临着诸多亟待解决的问题，废水循环的利用率较低，缺乏完善的再生水回用体系，导致水资源的有效循环利用受到阻碍<sup>[3]</sup>，未能实现资源的高效使用。固废综合利用率较低，资源潜力远未得到充分挖掘。目前“三废”处理过程普遍存在高能耗、高碳排放的问题，严重影响工业园区的低碳转型。鉴于此，构建一套科学、高效、可持续的“三废”循环利用技术体系尤为关键。本文研究紧密围绕“三废”处置过程中问题与循环利用技术体系构建之间的内在关联展开深入研究，致力于构建具有创新性和可操作性的技术模式，

深入揭示其背后的运行机制，并针对性地提出切实可行的策略建议，从而为工业园区的高质量发展提供坚实有力的支撑<sup>[4]</sup>。

### 1 低碳工业理论框架

低碳工业园区是以工业活动为核心，以低能耗、低污染、低排放为目标，通过系统性规划、技术创新和资源整合，在园区全生命周期（规划、建设、运营、更新）中实现“产业低碳化、能源清洁化、资源循环化、设施绿色化和管理智能化”的新型工业空间载体<sup>[5]</sup>。其本质是通过产业结构优化、能源结构调整、技术创新应用等手段，推动工业发展与生态环境的协同共生<sup>[6]</sup>。低碳工业园区核心特征包括：①目标导向性：以碳减排为奋斗目标，通过全流程（生产、运输、废弃物处理等）的低碳化设计，减少温室气体排放。②系统集成性：涵盖能源系统、产业体系、基础设施、管理机制等多维度协同优化，而非单一技术或环节的改进<sup>[7]</sup>。③动态适应性：需根据技术进步、政策调整及市场需求持续升级低碳发展路径。

### 2 工业园“三废”循环利用技术体系框架构建

基于系统性、低碳高效、适配性的原则构建“源头减量-过程控制-末端循环-协同优化”四级工业园区“三废”循环利用技术体系框架，具体结构如图1所示。

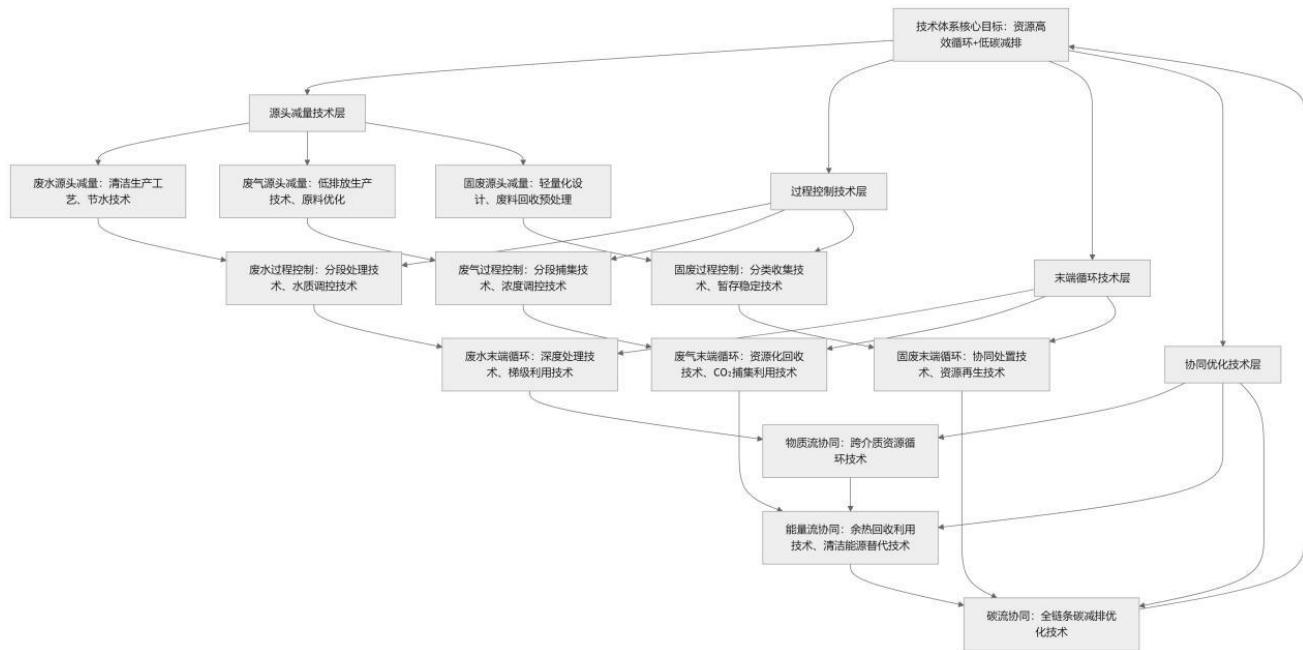


图1 工业园区“三废”循环利用技术体系框架

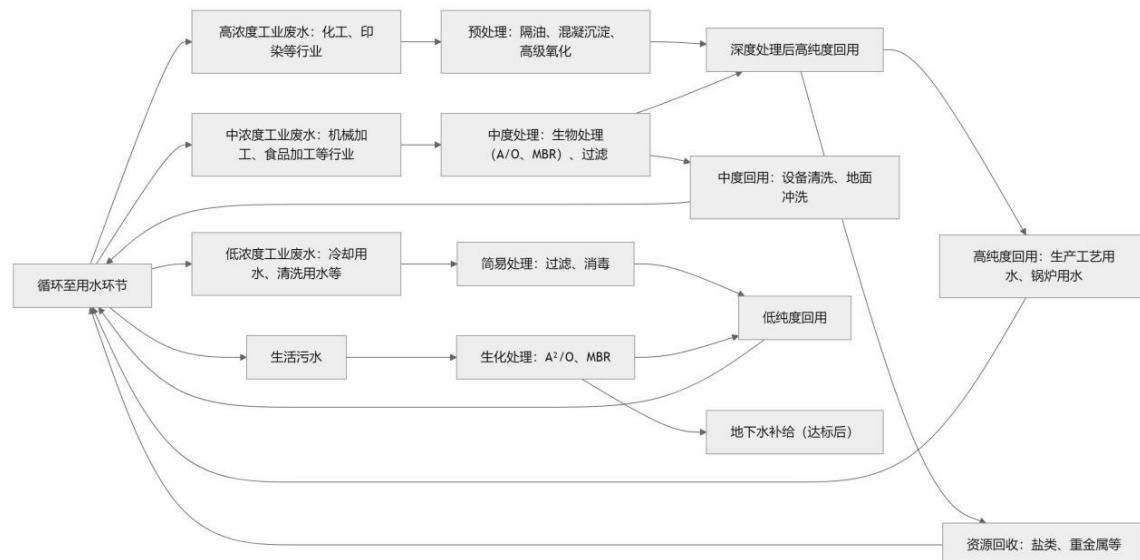


图2 废水梯级循环利用技术模式图

源头减量技术层作为整个技术体系的基石，借助节水节能技术、清洁生产工艺等先进手段从源头减少“三废”产生量，如废水治理领域，推行高效节能技术以及清洁工艺，减少废水产生量，降低污染。对于废气排放的问题，采用挥发性有机物（VOCs）含量的原料替代传统高污染原料，从而有效抑制废气中有害物质的产生。对于固体的废弃物，采用产品轻量化的设计理念，尽可能的减少原材料的使用量，降低固废产生量。降低后续处理环节所面临的压力，同时减少碳排放；过程控制技术层聚焦“三废”产生过程，运用分类收集、精准捕捉等针对性的干预措施，实施分段的精准调控，提升后续循环利用效率；末端循环

技术层依托深度处理、资源化回收等前沿技术实现“三废”中资源的高效循环再生，确保资源的最大化利用。协同优化技术层通过流量流、物质流、碳流在跨介质层面的协同优化，为整个技术体系提供了有力的保障，实现“三废”循环利用，推动工业园区低碳转型<sup>[8]</sup>。

### 3 工业园区“三废”循环利用核心技术模式解析

#### 3.1 废水梯级循环利用技术模式

废水梯级循环利用技术模式围绕“分类处理-梯级回用-资源回收”这一核心思路展开，以废水的水质差异及用水需求为依据，合理构建针对性的处理与回用路径，提升水资源利用效率并降低环境污染风险，模式如图2所示。

针对高浓度工业废水的处理，可采用“预处理-深度处理”的集成化组合工艺，在工艺体系过程中运用高级氧化技术，通过其强大的氧化能力，高效降解废水中的有机物，将其转化为易于后续处理的简单小分子物质，再用膜分离净化水质，满足工艺用水要求，实现废水中盐类、重金属等有价资源的回收再利用。生物处理技术应用于中浓度的工业废水处理中，随后辅以精密过滤工艺进一步优化水质。针对低浓度工业废水与生活污水，采用简易过滤、消毒处理以及生化处理等综合技术手段实现循环冷却用水、绿化用水的标准要求，实现水资源的回用。该模式所展现出的低碳效益比较显著，通过减少对新鲜水资源的开采量，可以有效降低水资源开采与输送过程中的碳排放。同时，大幅削减了废水的排放总量，降低污水处理厂末端处理的能耗，减少了相应的碳排放。此外，资源回收减少了原生资源开采与加工过程中的碳排放，如，对废水中的盐类进行回收利用，可替代原生盐矿开采，降低采矿与加工过程的能源消耗及碳排放。

### 3.2 废气资源化循环利用技术模式

废气资源化循环利用技术以“分类捕集-精准处理-资源化回收-能源利用”为核心，依废气成分及浓度差异，用差异化技术实现污染物资源或能源回收，减少温室气体与污染物排放，模式如图3所示。

该模式所依托的核心技术涵盖CO<sub>2</sub>捕集利用技术、挥发性有机化合物(VOCs)资源回收技术等，其中，对于高浓度二氧化碳废气，采用吸附、吸收或膜分离等先进方法进行高效捕集，捕集后的二氧化碳可应用于合成各类产品、食品加工等领域；若无法实现有效利用，则采取地质封存措施以确保环境安全。VOCs资源回收技术主要运用专业的捕集装置与工艺高效收集含VOCs的废气，回收后根据其成分与性质作溶剂或燃料，低浓度的VOCs废气，通过降解处理，回收降解过程中产生的热能，进而提高能源的利用效率。烟气脱硫脱硝及余热回收技术聚焦于电力、钢铁等重污染行业所排放的烟气，通过采用催化还原、化学吸收等工艺手段去除烟气中的二氧化硫(SO<sub>2</sub>)和氮氧化物(NO<sub>x</sub>)，作为优质的化肥原料<sup>[9]</sup>，同时借助高效的热交换设备，深度回收烟气中蕴含的热能，提高能源的整体利用效率。针对工业生产过程中产生的低热值废气实施低热值废气利用技术，通过精密的净化处理装置，去除其中的杂质、有害物质和颗粒物，经过净化后的低热值废气可引入专门的发电设备、也可输送至供热系统。在工业废气综合治理领域中可以减少温室气体排放，降低原生资源开采加工碳排放，减少化石能源消耗及生产碳排放<sup>[10]</sup>。

发性有机化合物(VOCs)资源回收技术等，其中，对于高浓度二氧化碳废气，采用吸附、吸收或膜分离等先进方法进行高效捕集，捕集后的二氧化碳可应用于合成各类产品、食品加工等领域；若无法实现有效利用，则采取地质封存措施以确保环境安全。VOCs资源回收技术主要运用专业的捕集装置与工艺高效收集含VOCs的废气，回收后根据其成分与性质作溶剂或燃料，低浓度的VOCs废气，通过降解处理，回收降解过程中产生的热能，进而提高能源的利用效率。烟气脱硫脱硝及余热回收技术聚焦于电力、钢铁等重污染行业所排放的烟气，通过采用催化还原、化学吸收等工艺手段去除烟气中的二氧化硫(SO<sub>2</sub>)和氮氧化物(NO<sub>x</sub>)，作为优质的化肥原料<sup>[9]</sup>，同时借助高效的热交换设备，深度回收烟气中蕴含的热能，提高能源的整体利用效率。针对工业生产过程中产生的低热值废气实施低热值废气利用技术，通过精密的净化处理装置，去除其中的杂质、有害物质和颗粒物，经过净化后的低热值废气可引入专门的发电设备、也可输送至供热系统。在工业废气综合治理领域中可以减少温室气体排放，降低原生资源开采加工碳排放，减少化石能源消耗及生产碳排放<sup>[10]</sup>。

### 3.3 固废协同循环利用技术模式

固废协同循环利用技术模式以“分类收集-协同处置-资源再生-能源回收”为核心，具体整合工业园区内固废的协同处置流程如下如图4所示。

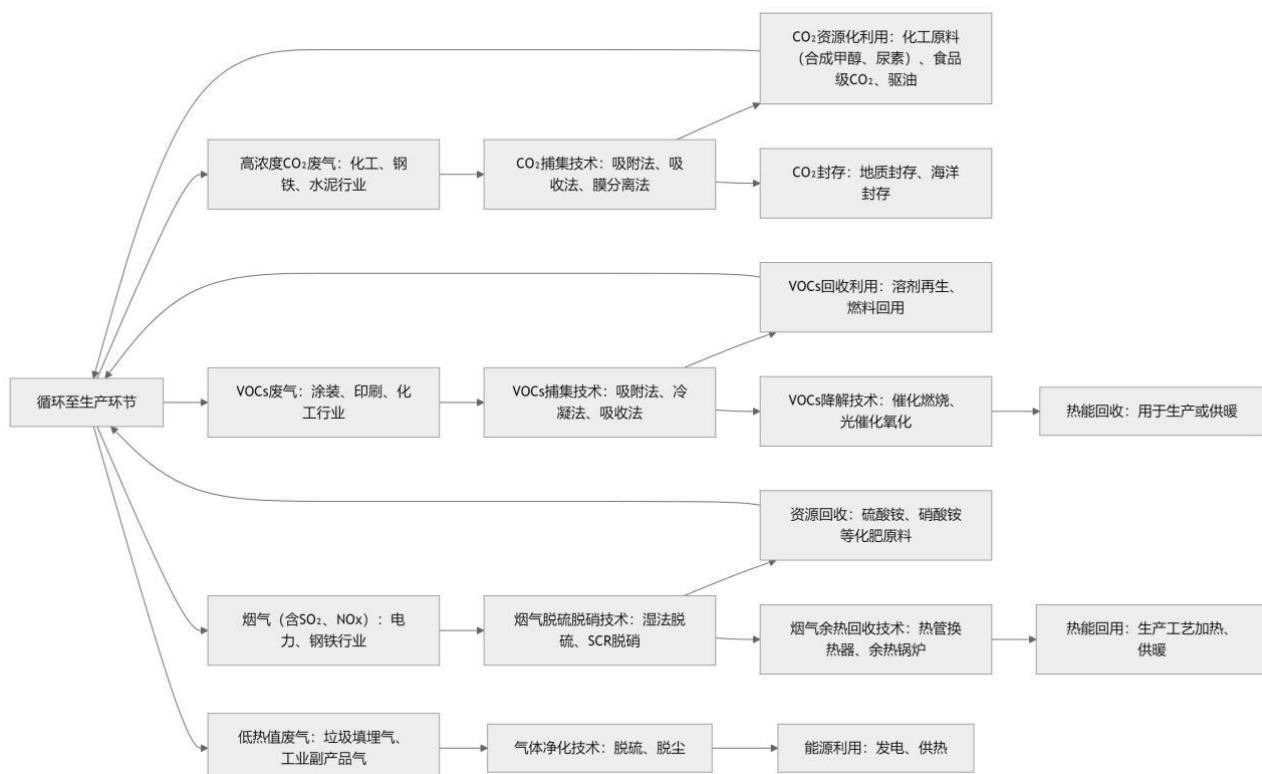


图3 废气资源化循环利用技术模式图

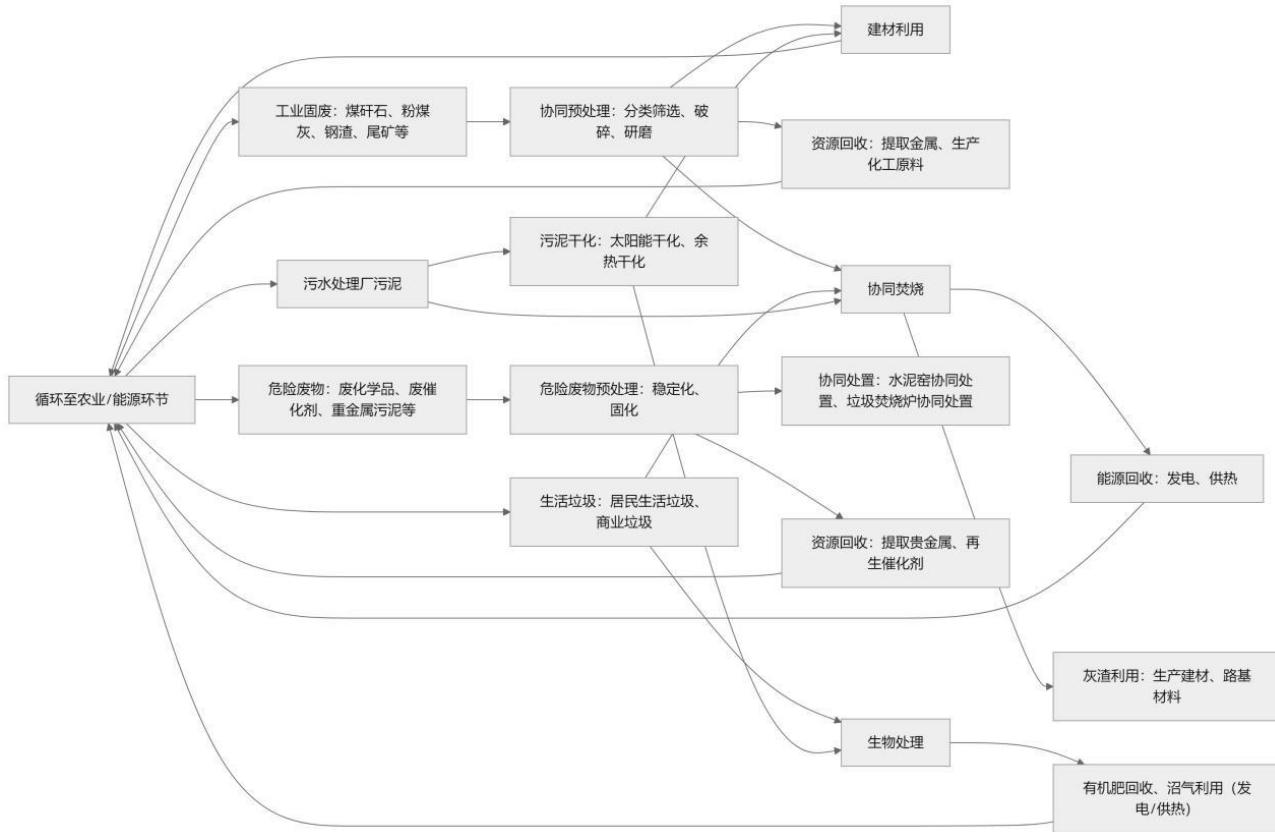


图 4 固废协同循环利用技术模式图

该模式所依托的核心技术涵盖工业固废的资源化的高效利用，即对工业固废进行预处理后，将其用于建材生产或从中提取金属及化工原料。对危险废物开展预处理操作后，实施无害化处理流程，并同步实现资源的有效回收。通过协同焚烧的方式回收生活垃圾中的热能，运用生物处理技术，将其中有机成分转化为有机肥与沼气加以回收；针对污泥进行干化处理后再开展后续处置工作。该模式在低碳领域效果较为明显，削减固体废弃物的填埋量，降低填埋过程中甲烷等温室气体的排放，从源头上遏制此类气体的产生与释放。通过协同焚烧与沼气利用的有机结合实现能源回收，将固废中的可燃成分转化为热能，降低碳排放；工业固废的再利用中采用工业固废替代原生建材原料，减少了原生资源的消耗，降低了建材生产过程中的能源需求与碳排放。危险废物的协同处置模式有助于提高处理效率，降低单独处理危险废物时的能耗。

#### 4 工业园区“三废”循环利用低碳转型优化策略

##### 4.1 基于全生命周期的技术模式优化

以全生命周期理论为战略指引，优化“三废”循环利用技术模式，达成“源头-过程-末端”全链条低碳化运行模式。在源头环节，应用先进的低碳工艺与清洁生产技术，从源头上减少“三废”产生量及碳排放强度。于过程阶段，精准优化各类处理参数，通过精细化管理与技术创新，显著提升能源利用效率，同步降低碳排放水平；在末端处置

时，优先选用资源化回收率高、碳排放低的先进技术，强化副产品的深度循环利用，实现物质的高效闭环流动与价值最大化。构建覆盖全生命周期的碳核算体系，量化“三废”循环利用模式下的碳足迹全貌，通过系统性的分析，明确碳排放中的关键控制节点，有针对性地开展工艺优化或技术创新。如对于废水处理过程中曝气环节的高碳排放特性，可以采用清洁能源或是引入低能耗曝气技术进行电力供应，以此实现节能与减排。针对固废处理中的运输环节，通过推行就近协同处置策略，优化物流路线规划等措施，可以有效降低运输过程中的碳排放。

##### 4.2 推动能源结构与产业结构协同优化

能源结构优化作为工业园区实现低碳转型的核心驱动力，要与“三废”循环利用协同<sup>[11]</sup>，运用光伏发电等可再生能源技术将其作为“三废”处理设施的主要能源供给，降低对化石能源的依赖。构建多能互补的能源梯级利用系统，优先利用“三废”处理过程中回收的热能、生物质能等二次能源，并将剩余能量有序接入园区能源管网，实现能源的高效配置。在“三废”处理设施周边建分布式能源站，通过能源的就地转化与供给减少损耗。产业结构优化是提升“三废”循环利用效能、提升低碳发展效益的关键支撑，规划产业空间布局，引导关联企业集聚形成循环链，实现“三废”资源在企业间的就近利用与高效配置。同时加快淘汰高排放、高能耗的落后产能，削减污染物的产生，

推进园区绿色低碳发展。

#### 4.3 构建数字化智慧管理平台

依托数字化与智能化技术的深度融合,构建工业园区“三废”循环利用与低碳转型的智慧化综合管理平台。构建覆盖园区全生产流程的立体化监测网络,运用物联网技术实时精准的采集“三废”排放、能源消耗、碳排放强度等关键信息。基于人工智能算法,大数据分析等智能技术开发效率评估模型、碳排放趋势预测模型及异常预警系统,依托平台智能算法,优化资源配置策略,降低园区整体碳排放水平<sup>[12]</sup>,提升废弃物循环利用率与能源使用效率。建立多维度、多层次的信息公开体系,通过平台向政府监管部门、园区企业及社会公众实时披露环境管理数据、低碳转型进展及成效,主动接受外部监督,提升园区绿色低碳发展透明度。

### 5 结论与展望

本文基于循环与低碳经济理论,构建“源头减量-过程控制-末端循环-协同优化”四级“三废”循环利用技术体系框架,涵盖废水、废气、固废子系统,实现资源循环与碳排放削减。解析三大核心技术模式,均有显著低碳效益。提出技术模式、能源与产业结构、数字化管理等优化策略,为工业园区提供转型路径参考。未来需加强新型技术研发应用,借鉴国际经验开展跨区域协同研究,探索适合我国国情的绿色低碳发展路径。

#### [参考文献]

- [1]胡鞍钢.中国式绿色现代化:回顾与展望[J].北京工业大学学报:社会科学版,2023,23(6):1-18.

- [2]冯钦忠,杨世童,刘俐媛,等.“双碳”目标下工业园区减污降碳协同增效路径分析与技术要求[J].环境保护科学,2023,49(3):1-7.  
[3]许幸荣,刘琪,梁鹏,等.工业“零碳”园区建设路径探讨[J].信息通信技术,2023,17(4):63-68.  
[4]王雪萌,安燕,唐昊,等.“双碳”战略目标下工业领域实施路径的研究[J].应用化工,2023,52(10):2875-2879.  
[5]裴元杰,樊金龙,欧阳东,等.双碳智慧园区高效节能新型设备应用探讨[J].建筑节能(中英文),2024,52(10):122-129.  
[6]贺飞燕.中国低碳工业经济的可持续性评估[J].现代工业经济和信息化,2023,13(12):200-201.  
[7]陈波,石磊,邓文靖.工业园区绿色低碳发展国际经验及其对中国的启示[J].中国环境管理,2021,13(6):40-49.  
[8]杜汇良.鄂尔多斯推进能源产业绿色创新发展的实践探索[J].新经济导刊,2022,11(4):50-54.  
[9]马永健.零碳产业园区面临的现实挑战与空间规划应对策略[J].工程技术研究,2023,8(19):223-225.  
[10]梁志蓉,杨鑫超,王姝,等.产业园区温室气体排放环评试点进展及建议[J].环境工程,2023,41(12):310-312.  
[11]尹志芳,胡家磊,熊方,等.既有建筑零碳改造路径探索与评价[J].建筑节能(中英文),2023,51(10):32-39.  
[12]张高峰.“双碳”目标下零碳园区综合能源利用潜力的研究与应用[J].建筑科技,2023,7(3):153-155.

作者简介: 王斌 (1993.11—), 毕业院校: 河北环境工程学院, 所学专业: 环境工程技术, 当前就职单位: 河北嘉环环保科技有限公司, 职务: 员工。