

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.001

# 长三角地区工业园区水资源高效利用的发展趋势与策略

李 轶, 万芬芬, 张文龙

(河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 针对长三角地区工业园区面临的水资源、水环境、水生态与碳排放的多重限制问题, 认为工业园区的水资源高效利用是高质量发展的重要支撑, 污水资源化利用是水资源高效利用的关键途径。基于工业园区水资源高效利用相关研究、实践和政策, 结合综合统筹与系统优化原则, 提出了以五级处理-五级回用体系为核心的工业园区水资源高效利用策略。基于“双碳”战略, 提出了耦合污水回用、资源回收、节能增效与多能互补的工业园区水资源高效低碳利用思路, 可推动园区节水减排降碳协同优化。提出未来长三角地区工业园区水资源利用应向“低碳化、区域化、集成化、智能化”的方向发展。

**关键词:** 水资源高效利用; 污水资源化利用; 碳减排; 综合统筹; 系统优化; 工业园区; 长三角地区  
**中图分类号:** TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)03-0001-09

## Development trend and strategy of efficient utilization of water resources for industrial parks in Yangtze River Delta Region

LI Yi, WAN Fenfen, ZHANG Wenlong

(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** At present, industrial parks in Yangtze River Delta Region are facing multiple restrictions on water resources, water environment, water ecology and carbon emissions. The efficient utilization of water resources in the industrial parks is an important support for the high-quality development of the Yangtze River Delta Region, with the sewage resource utilization as a key way to achieve the goal. Based on the relevant research, practice and policy as well as the combination of the principles of comprehensive planning and systematic optimization, a strategy for the efficient utilization of water resources in the industrial parks was proposed with the five-level treatment and five-level reuse system as the core. Based on the “double carbon” strategy, a new idea for the efficient and low-carbon utilization of water resources in the industrial parks coupled with the sewage reuse, resource recovery, energy conservation and multi-energy complementary was proposed, which could promote the collaborative optimization of water conservation, pollution reduction and carbon reduction. It can also be found that the utilization of water resources in industrial parks in Yangtze River Delta Region should develop towards a low-carbon, regional, integrated and intelligent mode in the future.

**Key words:** efficient utilization of water resources; wastewater utilization; carbon emission reduction; comprehensive planning; systematic optimization; industrial parks; Yangtze River Delta Region

改革开放以来, 我国经济飞速发展, 但同时资源环境问题日益凸显, 水资源、水环境、水生态已成为经济社会发展的限制性因素。2021 年 10 月, 习近平总书记在深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上强调要全方位贯彻“四水四定”原则<sup>[1]</sup>。“四水四定”是习近平总书记对当前经济社会发展与资源生态保护之间制约关系的深刻认识, 是对高质量发展路径的准确判断<sup>[2]</sup>。新时期的水资源开发利用应以水资源刚性约束为基础, 兼顾安全、高效与绿色<sup>[3]</sup>, 支撑经济社会的高质量发展。

长江三角洲(以下简称“长三角”)地区是我国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一, 肩负着探索区域新发展格局的使命<sup>[4]</sup>。目前, 长三角地区经济发展以工业为重点, 工业发展重点则在工

**基金项目:** 国家重点研发计划(2019YFC0408300); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项重大科技示范项目(BE2022601)

**作者简介:** 李轶(1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事水资源保护与水环境治理研究。E-mail: envly@hhu.edu.cn

**引用本文:** 李轶, 万芬芬, 张文龙. 长三角地区工业园区水资源高效利用的发展趋势与策略[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 1-9.

LI Yi, WAN Fenfen, ZHANG Wenlong. Development trend and strategy of efficient utilization of water resources for industrial parks in Yangtze River Delta Region[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 1-9.

业园区。长三角地区共建成省级及以上开发区 320 家<sup>[5]</sup>, 园区的主导产业集中, 多为电子信息、装备制造、纺织服装等产业<sup>[6]</sup>。园区生产活动集聚, 水资源消耗多、污水排放量大, 污染物组成复杂, 且可能含有有毒有害的特征污染物, 对区域水资源有着重要影响<sup>[7-8]</sup>。同时, 园区发展也面临着水资源节约、水污染防治、水生态治理、区域碳减排等挑战<sup>[9]</sup>。工业园区是长三角地区绿色发展的重要着力点, 综合节水、减污、降碳等措施推动园区水资源高效利用尤为必要, 对于全国工业园区发展具有显著的示范意义。

本文以国内外工业园区水资源高效利用相关研究、实践以及政策为背景, 基于综合统筹与系统优化原则, 提出了以污水资源化利用为核心的工业园区水资源高效与低碳利用的策略与思路, 以期能为推动长三角地区工业园区水资源高效低碳利用提供参考。

## 1 长三角地区工业园区基本情况

### 1.1 水资源现状与问题

随着工业化进程加快, 入园企业快速增加, 工业园区逐渐成为节水减污降碳的主战场。然而, 长三角地区的工业园区尚未摆脱资源与环境要素驱动依赖, 资源利用方式与污水处理模式较为粗放<sup>[10]</sup>, 园区水系统的碳排放显著, 区域资源环境压力不断增加。

水资源利用方面, 长三角地区工业园区水资源消耗量大, 水资源利用率低, 资源约束日益趋紧。2020 年长三角地区人均水资源占有量为  $1\,237.9\text{ m}^3$ , 为中度缺水水平, 但水资源利用模式粗放。《中国水资源公报(2021)》显示苏浙沪皖万元工业增加值用水量分别为  $56.1\text{ m}^3$ 、 $13.3\text{ m}^3$ 、 $60.5\text{ m}^3$  和  $62.6\text{ m}^3$ , 整体高于全国平均水平( $28.2\text{ m}^3$ )。以江苏为例, 耗水率是其水资源承载力主要障碍因子之一<sup>[11]</sup>。随着经济持续增长与入园企业增加, 园区需水量将继续增加, 水资源供需关系将更为紧张。

污水处理与资源化利用方面, 长三角地区工业园区污水量大, 污染物组成复杂, 污水资源化利用处于起步阶段, 资源环境保护形势严峻<sup>[12]</sup>。据各省市统计年鉴, 2020 年沪浙皖工业废水排放量为 3.12 亿 t、10.03 亿 t、4.04 亿 t, 2019 年江苏工业废水排放量为 13.75 亿 t, 占全国工业废水排放量的 26.3%。同时污水中存在重金属、氟化物<sup>[7]</sup>等特征污染物, 水资源安全面临风险<sup>[13]</sup>。另外, 2020 年长三角地区城市市政再生水用量为 24.2 亿  $\text{m}^3$ , 污水回用率约为 20%, 低于全国平均水平(24.3%)<sup>[14]</sup>。

碳排放量也是长三角地区工业园区的重要限制性因素。长江经济带工业园区温室气体排放量占全国园区的 37%, 其中 39% 位于长三角地区<sup>[15]</sup>。工业园区水系统以水输送与水处理为主, 对园区碳排放量有着显著的贡献。污水处理行业属于能源密集型行业, 存在大量能耗与药耗并伴随着  $\text{CH}_4$  与  $\text{N}_2\text{O}$  的产生与逸散, 位居前十大碳排放行业<sup>[16]</sup>。且长三角地区工业园区废水处理量大, 2020 年《中国生态环境统计年报》中苏浙皖工业废水处理量排名分列第一位、第三位、第八位, 碳排放量明显高于其他地区。

因此, 长三角地区工业园区的发展面临着资源、环境、生态与碳排放的多重限制, 如何突破重围实现绿色发展成为急需解决的问题。

### 1.2 破解水问题的关键途径

与常规水资源高效利用措施相比, 污水资源化利用在潜力、功能、优点三方面具有显著优势, 是长三角地区工业园区实现水资源高效利用, 践行生态优先绿色发展路线的关键途径。

一是污水资源化利用提升水资源利用效率的效果显著, 且仍有较大的发展潜力。常规水资源高效利用措施多聚焦于需求侧的局部水资源效率提升, 存在常规水资源量的限制, 缓解水资源短缺的空间有限。再生水等非常规水资源对缓解水资源短缺的重要性更加突出。2020 年, 苏浙皖的工业用水重复利用率已基本达到全国平均水平<sup>[14]</sup>。采用常规工业节水措施进一步提升水资源利用效率的空间较小、难度较大。同年, 长三角地区的污水排放量约为 124.9 亿  $\text{m}^3$ , 但市政再生水利用量仅为 24.2 亿  $\text{m}^3$ <sup>[14]</sup>, 污水资源化利用潜力巨大。随着经济社会发展, 长三角地区水资源供需关系将更加紧张, 对污水资源化利用将有更大需求。

二是污水资源化利用是破解长三角地区工业园区多重水问题的有效措施。长三角地区是水质型缺水地区, 工业园区是环境污染的重要来源。刘磊等<sup>[6]</sup>调研了长三角地区 404 个产业园区, 发现约 50.7% 园区所在区域的环境质量超标。污水资源化利用既可增加供水缓解水资源供需矛盾, 又可减少废水排放并增加生态补水, 助力水资源与水生态保护<sup>[17]</sup>。2020 年苏浙皖的再生水利用量占各省用水总量的 2.77%、2.36%、2.90%<sup>[14]</sup>。朱增银等<sup>[18]</sup>发现太湖流域部分园区污水处理厂制备的再生水的 23.1% 用于环境用水。因此,

污水资源化利用是破解长三角地区水资源、水环境、水生态问题的多赢途径<sup>[19]</sup>。

三是污水资源化利用具有水量水质稳定、可用领域广泛、产生多重效益的优点:①2020年长三角地区城市污水厂处理能力为4 218万m<sup>3</sup>/d<sup>[14]</sup>,可再生处理的水量大且分布广泛。且再生水水质符合相应要求,水质稳定;②污水处理后可形成不同水质的再生水,回用于工业、市政等多领域。且景观用水等领域的再生水需求大;③可从污水污泥中回收资源和能量产生多方面效益,如林莉峰等<sup>[20]</sup>估算上海市全年可从污泥中回收4万t磷(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计),苏州工业园区开展污水污泥资源化利用工作,每年可节约320万t水和1万t标准煤<sup>[21]</sup>。

综上,污水资源化利用可显著提升水资源利用效率,产生综合效益,是缓解水资源短缺、减少水环境污染、保障水生态安全的重要举措。因此,长三角地区工业园区需以污水资源化利用为重点,结合节水减排降碳措施实现水资源高效绿色利用,推动经济社会发展与资源环境保护齐头并进。

## 2 工业园区水资源高效利用的发展

随着工业化的推进,水问题逐渐成为工业园区发展的阻碍,如何推动水资源高效利用备受关注。当前的研究与实践较为重视工业园区水资源管理和污水资源化利用,相关政策也陆续出台。

### 2.1 水资源管理的研究与实践进展

针对工业园区水资源管理,大量学者以水资源利用效率最高为主要目标开展研究。其中,水系统集成优化是工业生产实现水资源高效利用的重要方法<sup>[22-24]</sup>。Zhang等<sup>[25]</sup>针对钢铁工业园区构建了多尺度水网络超结构模型,并研究了间接集成与混合集成差异,发现两者淡水消耗量均减少了22%,混合集成总成本节省23%,优于间接集成。Rubio等<sup>[26]</sup>提出了面向园区内企业集群的水网络构建与优化方法,系统挖掘园区水网络优化潜力。Misrol等<sup>[27]</sup>考虑同时进行余热回收、可再生能源发电、水回用和资源回收等,构建了水-能-废物网络优化模型,优化后可节省66%的淡水,回收3.2MW能源。

近年来,我国工业园区面临着高效用水、减排降碳等政策要求,推进节水型园区建设刻不容缓。工业园区水管理十分重视用水效率与水污染控制,积极采用串级用水等手段<sup>[28]</sup>。但相关措施过于聚焦局部用水系统,其节水减排空间不断缩减,仅靠局部手段提升整体水平难度大、成本高。而园区整体层面仍有较大污水再生利用空间,通过厂际及园区的污水分质回用可有效提升整体水资源利用效率。因此急需扩大水系统优化范围,着眼于园区整体开展水系统集成优化,发掘节水减排新空间。

综上,水系统集成优化研究多带有特定行业的用排水特征,并逐渐向全局优化和多要素协同发展。但当前园区水系统优化聚焦于局部,全局的水系统集成优化实践较少<sup>[22]</sup>,也较少考虑工业园区水系统与生态环境的交互。因此开展考虑水量水质的园区整体水系统集成优化研究与实践十分必要。

### 2.2 污水资源化利用的研究与实践进展

污水资源化利用涉及水、资源与能源的回收利用<sup>[19]</sup>,且与碳排放存在着密切联系。Muñoz等<sup>[29]</sup>评估了炼油厂废水回用的水资源、水环境、碳减排等效益,发现回用1m<sup>3</sup>废水可节约1m<sup>3</sup>淡水,降低84%的富营养化影响。且1m<sup>3</sup>废水回用于锅炉用水可减少2.2kgCO<sub>2</sub>-eq。Santana等<sup>[30]</sup>评估了分散式、集中式及混合式的再生水利用的环境效益与碳排放量,发现集中式污水再生利用的碳排放量最少。Diaz等<sup>[31]</sup>综述了从废水中回收水、能量和营养物对环境和经济的影响,发现大型水回收系统温室气体排放量(280kgCO<sub>2</sub>-eq/(人·a))低于中小型系统(4 600、23 740kgCO<sub>2</sub>-eq/(人·a))。

随着技术的快速发展与认识的逐渐深入,我国废水管理的目标已从减少污染物排放转向水的再利用、水生态恢复和资源回收<sup>[32]</sup>。2015—2020年的《中国城乡建设统计年鉴》显示全国城市市政再生水利用量从44.49亿m<sup>3</sup>增长至135.38亿m<sup>3</sup>。2016年水利部水务管理年报公布城市污水再生回用于工业与环境占比为27.8%和60.9%。近年来污水行业追求更优的水质和更高的效率,不断向着污水近零排放与绿色低碳迈进。工业园区污水近零排放的内涵经历了企业零排-区域零排-低碳零排的变化,范围不断扩大,考虑因素逐渐全面。企业作为园区的基本单元,其废水近零排放能够缓解供水压力,但无法支撑园区整体的水资源水环境改善。园区污水近零排放则从园区整体出发,利用水网络优化等技术推动资源环境保护。另外,工业园区是碳减排的重点对象,“双碳”战略下工业园区污水近零排放也需考虑碳排放问题。

目前,污水资源化利用相关研究关注污水再生利用与资源能源回收,碳排放效益的研究也逐渐增多。污

水资源化利用实践向近零排放与绿色低碳发展。但污水资源化利用与碳排放关系的研究仅处于效益评估和措施推荐层面,从区域整体协调污水资源化利用与碳减排措施的研究与实践较为缺乏。

2.3 工业园区水资源高效利用相关政策

近年来,国家对长三角地区工业园区的水资源高效利用与水生态环境保护给予了高度重视,陆续出台了相关重要文件(表1)。同时“双碳”战略对园区发展也提出了新要求。国家政策对工业园区的要求呈现以下特征:①强调系统优化,以园区为整体推动水资源高效利用、水环境污染治理与水生态质量提升,达到园区综合效益最优。②节约提效开源并重,通过水资源节约利用、水系统集成优化与污水资源化利用等措施,多角度缓解水资源供需矛盾。③节水减污降碳协同,基于碳达峰、碳中和目标解决发展中出现的多重水问题。④实施统筹管理,以企业为落脚点以水系统为骨架,逐层次推进园区节水、减污、降碳工作。

表1 关于长三角地区工业园区水资源利用的相关指导意见

| 年份   | 政策文件                                                    | 相关指导意见表述                                                                       |
|------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 2017 | 《关于加强长江经济带工业绿色发展的指导意见》(工信部联节[2017]178号) <sup>[33]</sup> | 改造提升工业园区,实现园区绿色循环低碳发展;推进工业水循环利用,推进非常规水资源的开发利用                                  |
| 2018 | 《长江保护修复攻坚战行动计划》(环水体[2018]181号) <sup>[34]</sup>          | 重点开展长江经济带工业园区污水整治,以全面提质增效加强生态环境保护                                              |
| 2021 | 《关于推进污水资源化利用的指导意见》(发改环资[2021]13号) <sup>[35]</sup>       | 积极推动工业废水资源化利用,推进企业内部工业用水循环利用,提高重复利用率,推进园区内企业间用水系统集成优化                          |
| 2021 | 《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》(国发[2021]4号) <sup>[36]</sup> | 提升产业园区和产业集群循环化水平,推进既有产业园区和产业集群循环化改造,推动能源梯级利用、资源循环利用等                           |
| 2021 | 《“十四五”工业绿色发展规划》 <sup>[37]</sup>                         | 需推进区域能源资源优化配置,高水平建设长三角生态绿色一体化发展示范区;推进水资源节约利用,推进企业、园区用水系统集成优化,建设一批废水循环利用示范企业和园区 |

3 长三角地区工业园区水资源高效利用策略

基于以上分析,结合笔者所在团队近年来的研究与实践,以工业园区为整体,以绿色发展为目标,提出了以五级处理-五级回用体系为核心的长三角地区工业园区水资源高效利用策略。并基于“双碳”目标提出了耦合污水回用、资源回收、节能增效与多能互补的长三角地区工业园区水资源高效低碳利用思路,系统性、阶段性推动区域节水减污降碳的协同优化,助力工业园区绿色低碳发展。

3.1 水资源高效利用的原则

在日益完善的资源管控、生态保护和碳减排的政策导向下,常规水资源高效利用措施不足以平衡发展与保护。工业园区需以综合统筹与系统优化为基本原则推动园区水资源高效、绿色、低碳利用。

工业园区水系统是社会水循环的重要组成部分,且与企业、园区及周边流域紧密联系<sup>[9]</sup>。企业生产影响园区水系统及周边资源环境,周边资源环境又影响园区水系统的管控。因此,园区水资源高效利用既要关注企业等局部水系统,也要统筹园区供排水等涉水过程,更要考虑园区与周边流域的相互影响。此外,系统优化观念可保障水资源开发利用的内部协调。工业园区是发展与保护矛盾较为突出的区域,需平衡发展与保护,因此要兼顾水资源的高效利用与绿色利用。另外,园区水系统运作伴随着碳排放,“双碳”战略下水资源利用应考虑碳排放量。系统优化可协调各环节多方面的措施,有效解决多重矛盾,达到综合最优效果,是工业园区水资源高效利用策略的重要组成。

3.2 面向园区水系统整体的水资源高效利用策略

基于长三角地区工业园区特点和综合统筹系统优化的原则,本文提出了以五级处理-五级回用体系为核心的面向园区水系统整体的水资源高效利用策略。该策略以园区为研究对象,以五级处理-五级回用体系为指导,以单元-厂际-园区多层次区域水资源优化配置为基础,以污水处理与资源化利用技术为关键,以水资源综合管理和智慧决策系统为支撑,以水资源高效利用配套标准政策体系为保障,可提升园区水资源利用效率和水生态环境质量,助力工业园区高质量发展。

3.2.1 核心思路

五级处理-五级回用体系着眼于长三角地区及其工业园区的特点与需求,从园区内各单元用排水特征出

发,通过多层次区域水资源配置与污水资源化利用等手段,全面提高水资源利用效率。

供水方面,长三角地区是典型的水质型缺水地区,工业园区是水生态环境的重要影响单元,因此需要控制园区污染物排放,从水质角度保护水资源<sup>[38]</sup>。用水方面,长三角地区工业园区面临着水资源短缺问题,且常规工业节水措施的能力有限。因此需充分利用非常规水资源并推动园区水资源优化配置,平衡解决水资源供需关系。污水资源化利用方面,长三角地区工业园区废水量大、污染物组分复杂且含有重金属等特征污染物,对污水再生利用和水生态环境有较大影响。因此需要结合废水特性进行污水处理与特征污染物去除。

五级处理-五级回用体系(图1)由工艺单元原位处理回用、企业废水处理回用、污水厂集中处理回用、生态湿地生态处理回用和再生水厂再生处理回用组成,可满足不同的出水标准和回用要求。针对企业内工艺单元,采用短流程处理高效去除特征污染物,并进行工艺单元的污水回用。针对园区内企业,在企业污水处理站进行污水处理并回收重金属等有价值组分,根据企业及周边企业的需求进行污水回用。针对园区污废水,在园区污水厂集中处理至达标,部分出水可回用于景观用水等。剩余污水厂出水可经人工湿地进行生态处理,回用于周边河湖的生态补水。也可将剩余污水厂出水作为再生水厂的水源,采用多级膜分离等技术获得再生水并回用于企业生产活动。该体系内含多阶段污水再生利用与多层次水资源优化配置,可有效提升园区整体的水资源利用效率。另外,该体系通过多级处理多次削减污染物排放量,并依托人工湿地提供生态补水,可从水量、水质两方面保护资源与环境。

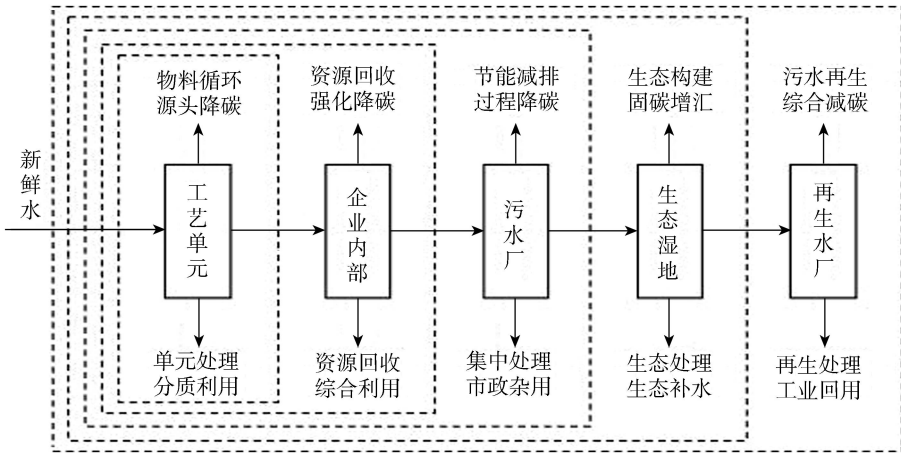


图1 五级处理-五级回用体系

Fig.1 System of five-level treatment and five-level reuse

3.2.2 主要内容

长三角地区工业园区水资源高效利用策略基于园区污废水组分与污水处理过程的解析,面向水量、水质需求采用不同的污水资源化利用技术;考虑水资源总量等要素,利用水系统集成优化确定最优污水回用路径,形成全局最优的园区水网络;基于数字孪生等构建园区水系统综合管理平台,支撑园区水系统的管控决策;针对再生水价等完善标准与政策体系,为园区水资源高效利用提供保障。

a. 废水处理与资源化利用。针对工艺单元废水预处理效果差、特征污染物难去除、有价值组分难分离等问题,宜以废水处理达标、废水回收利用与资源回收为重点,结合废水水质特点和再生水利用需求,采用适配的废水处理与有价值组分回收利用技术。充分体现了五级处理-五级回用体系的分类处理特点,并为污水分级分质回用提供技术支撑,是工业园区水资源高效利用的关键。

b. 区域多层次水资源优化配置。区域多层次水资源优化配置以园区整体的资源环境效益全局最优为主要目标,遵循水量匹配、水质适配的原则,按照单元-厂际-园区的结构分层次优化配置水资源,体现了五级处理-五级回用体系的分质回用与系统优化的特点,是园区水资源高效利用的基础。根据园区内各环节的水量、水质需求与特征,单元层面考虑原位回用,厂际层面考虑企业内及企业间回用,园区层面考虑市政、生态与工业的污水回用,构建多尺度园区水网络超结构模型。并以整体水资源利用效率最高、水环境生态质量提升幅度最大等为目标,依据极限浓度等确定约束条件,建立园区污水再生利用多目标优化模型,求解获得全局最优的工业园区的水资源优化配置方案。

c. 水资源综合管理和智慧决策系统。工业园区水资源综合管理和智慧决策系统综合了数字孪生等技

术,并以多层次水资源优化配置和涉水过程模拟优化模型为基础。该系统汇聚涉水全过程的数据,加以分析与共享,综合业务需求提出全局决策方案,可实现涉水过程的信息采集、数据传输、过程模拟与智慧管控,并通过数据可视化平台直观呈现,为园区涉水全过程的管理决策提供了技术平台与决策支持,可助力园区水资源管理和环境生态管控效率的提升,是工业园区水资源高效利用的支撑。

d. 污水资源化利用的标准政策体系。基于再生水定价等构建园区污水资源化利用的标准政策体系,可助力污水再生利用的管控与市场化,保障园区水资源高效利用。经济方面,宜建立财政扶持政策,并基于自来水价格与财政补贴调整再生水价格。产业方面,为扩大规模与增强竞争活力宜采取激励与约束政策。管理方面,宜由单一部门管理事务,并建立部门协调机制,按照总目标分配工作。

3.3 面向碳减排的园区水资源高效利用策略

3.3.1 关键抓手

“双碳”战略下,工业园区的发展必须打破资源环境限制并考虑碳排放问题。园区内水系统运行与碳减排措施多为局部并行管理,缺乏水系统和碳排放的协调优化。基于园区发展受资源环境约束、整体水资源利用率低、水系统与碳排放缺乏统筹等特点,工业园区宜以能量节约回收及能源优化、高碳值资源回收与区域水碳协同优化作为兼顾水资源高效利用与减污降碳协同增效的关键抓手。

工业园区水系统的各涉水过程均涉及水的输送,需要消耗大量能量,污水处理和再生也存在大量能耗。因此通过节能降耗、能量回收与能源优化来减少园区水系统碳排放的潜力较大。目前,水系统节能降耗与能源优化已有较多研究,包括排水泵站优化调度及污水源热泵等研究。营养物质回收、有价金属回收等资源回收也是园区水系统的重要碳减排措施。资源回收利用可有效减少资源生产、运输与处理等过程中的碳排放量,同时可缓解资源供给压力。另外,工业园区水碳过程协同优化是实现园区综合效益最优的重要保障。园区的水、能、资源相互影响相互作用,且各涉水单元中措施的节水减排降碳效益不同,需要权衡各类措施以实现园区整体的综合效益最优。因此,基于水系统与碳排放的关系,构建统筹水碳的园区水碳过程协同优化模型,是未来建设绿色循环低碳工业园区的关键手段。

3.3.2 基本框架

工业园区水资源高效低碳利用创新思路面向碳达峰、碳中和目标,紧扣园区整体水资源利用效率亟待提升、水系统能耗物耗显著、水系统及其碳排放缺乏统筹管理等特点。以工业园区水资源高效利用创新策略为基础,以综合统筹与系统优化为原则,在五级处理-五级回用体系的基础上,深入探究各涉水过程的水碳关系并充分挖掘各环节的降碳潜力,采用针对性的科学降碳技术,形成多级处理-多级回用-多级减碳体系(图2)。并基于园区内的水碳关系系统优化节水减污降碳措施,助力水资源高效利用与减污降碳协同增效,对长三角地区工业园区绿色低碳循环发展具有重要意义。

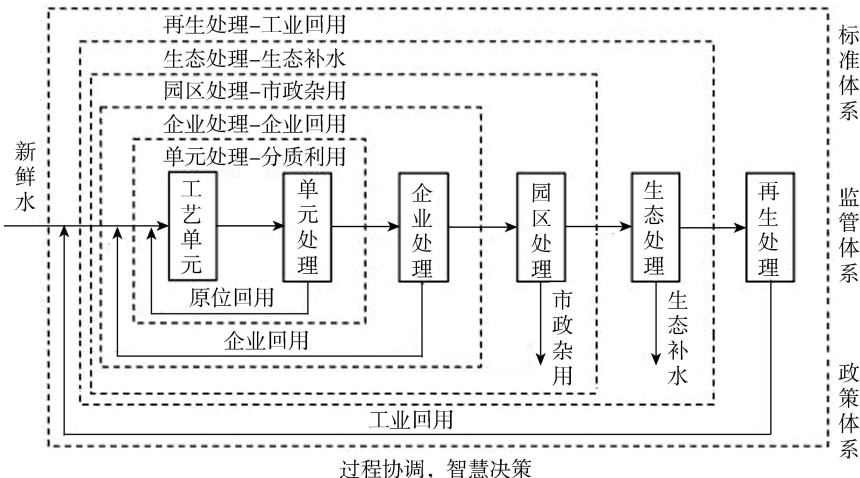


图2 多级处理-多级回用-多级减碳体系

Fig.2 System of multi-level treatment, multi-level reuse and multi-level carbon reduction

多级处理-多级回用-多级减碳体系从水、资源、能源的角度针对园区各层次采用了不同的降碳手段,构成了单元处理-分质利用-源头降碳、企业处理-综合利用-强化降碳、园区处理-市政杂用-过程降碳、生态处理-

生态回用-固碳增汇、再生处理-工业回用-综合减碳的多级处理-多级回用-多级减碳体系,是工业园区水资源高效低碳利用创新思路的核心。对于企业内工艺单元,优化工艺设备与技术参数,推动单元物料循环利用。对于园区内企业,采用废水低碳处理再生、有价值组分低碳资源化等技术,推动企业内的污水低碳再生回用与资源回收。对于园区内污水厂,从节能增效、减污降碳、多能互补等角度入手,采用厂网联合优化调度、污水源热泵等手段,推动污水收集处理过程的减污降碳协同增效。对于生态湿地,根据固碳机制优化工艺组成和调控机制,发挥湿地的固碳能力提升湿地的碳汇增量。对于再生水厂,利用低碳振动膜、光伏发电等技术推动节能减排。

在多级处理-多级回用-多级减碳体系的指导下,工业园区水资源高效低碳利用创新思路遵循综合统筹、系统优化的原则,在解析园区涉水全过程碳排放特征的基础上,以园区涉水全过程为骨架,利用水碳协同优化协调污水回用、资源回收、节能增效、多能互补等碳减排措施,达到综合效益全局最优。基于区域内涉水全过程水碳特征的解析,核算园区污水回用、资源回收等措施的节水减排降碳潜力。剖析园区水系统中影响资源环境与碳排放的关键环节与因素,定量解析区域涉水全过程中水-碳相互作用关系,建立单元-厂际-园区多层次水碳耦合网络结构模型。并以区域整体新鲜水用量最小、水环境质量最优与碳排放总量最小为主要目标,构建水碳协同优化配置模型。最终形成全局最优的园区水资源高效低碳利用方案,助力工业园区的顶层设计与规划。其次,在园区水碳协同优化的指导下,针对各涉水过程选择并优化碳减排措施。针对企业内、排水系统与生态湿地,分别以工业废水低碳处理与资源化、污水厂网减污降碳协同优化、生态湿地减污固碳精准调控为关键手段,充分挖掘各涉水过程的降碳潜力。并结合数字孪生等技术构建园区水资源与碳排放综合管理平台,为园区水系统及碳排放的综合管控提供支撑。该思路可有效缓解水资源短缺,减少污染物排放,降低碳排放总量,为建设绿色低碳循环园区提供坚实保障。

3.4 水资源高效利用策略的应用

结合笔者所在团队近年来的研究与实践,以江苏省某国家级高新区为例,开展长三角地区工业园区水资源高效利用策略的应用研究。在进行该高新区的现状调研与需求分析后,按照长三角地区工业园区水资源高效利用策略制定了区域污水近零排放与资源化利用方案,目前正在逐步落地中。

基于该园区的用排水、水环境等资料,以多类型的污水回用方式为基础,以水资源利用效率和水生态环境质量全局最优为目标,构建了多层次水资源优化配置模型并形成水资源优化配置方案,从工业回用与生态补水等方面为推进区域水资源高效利用工作提供了指导。该配置方案应用后,区域新鲜水用量可减少约12 600 t/d,生态补水量增加约1 700 t/d,有效助力了园区的水资源与水环境保护。此外,基于该园区的主导产业,以用排水量最大的某企业为例开展了企业内污水处理与资源化利用工作。针对该企业纯水需求量大、排水中含有镍等重金属的用排水特点,提出了工艺单元内进行废水预处理、有价值组分回收与污水再生回用的方案。该方案可有效降低废水处理难度,提高污水资源化利用效率。目前,该企业已按照该方案进行污水回用与有价值组分回收,污水回用量约为3 600 t/d,镍回收率可达95%。另外,已开发了该园区的水资源综合管理系统,并开展了配套政策标准的研究,形成了较为完善的污水近零排放标准政策体系。

该高新区污水近零排放与资源化利用方案完全落地后,区域污水回用率可达90%以上,水处理成本小于6元/t,可助力区域水资源利用率、污水资源化利用率与水生态环境质量的提升。

4 结 语

在开展工业园区水资源高效利用工作的过程中,要从园区整体角度出发,统筹区域涉水全过程,围绕单元处理技术-总体优化配置-综合智慧管控-标准政策保障系统性多层次提升园区整体的水资源利用效率,推动园区经济、资源、生态环境的全方面可持续发展。与此同时,工业园区应积极响应“碳达峰、碳中和”战略,统筹园区整体,兼顾水资源高效利用与减污降碳协同增效,充分利用污水回用、节能增效、资源回收与多能互补等多项技术,推动工业园区绿色低碳循环发展。

未来,长三角地区工业园区水资源高效利用应向低碳化、区域化、集成化、智能化方向发展。开展水资源高效利用工作时,应兼顾水资源高效利用与减污降碳协同增效;在工作整体规划方面,从园区层面整体考虑系统优化,统筹园区内部涉水全过程,实现园区水资源利用效率、水生态环境质量与碳减排量的全局综合最优;在水资源高效与低碳利用的技术开发方面,综合污水回用、节能增效、资源回收与多能互补等多项技术形

成工业园区水资源高效低碳利用集成技术;在工业园区水系统及其碳排放的管理上,基于水系统及其碳排放的规律,充分利用数字孪生、大数据等技术,监测预测重要过程,建立园区水系统及碳排放综合管理平台。长三角地区工业园区水资源高效与低碳利用的相关研究与实践,可有效推动长三角地区工业园区的绿色转型发展,为长三角地区的高质量发展提供保障。

参考文献:

[ 1 ] 全方位贯彻“四水四定”原则[N]. 中国水利报,2021-11-02(1).

[ 2 ] 陈思. 坚决落实“四水四定”用好管好水资源[N]. 中国水利报,2021-11-18(5).

[ 3 ] 王红瑞,李一阳,杨亚锋,等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用[J]. 水资源保护,2022,38(1):18-25. ( WANG Hongrui,LI Yiyang,YANG Yafeng,et al. Construction and application of evaluation model for intensive and safe utilization of water resources[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):18-25. (in Chinese))

[ 4 ] 中共中央,国务院. 中共中央国务院印发《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》[EB/OL]. (2019-12-01). [http://www.gov.cn/zhengce/2019-12/01/content\\_5457442.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2019-12/01/content_5457442.htm).

[ 5 ] 国家发展改革委,科技部,国土资源部,住房城乡建设部,商务部,海关总署. 中国开发区审核公告目录[EB/OL]. [2018-02-26]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content\\_5434045.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content_5434045.htm).

[ 6 ] 刘磊,张永,王永红,等. 长三角地区产业园区环境管理存在的主要问题及对策建议[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2019,42(2):135-140. ( LIU Lei,ZHANG Yong,WANG Yonghong,et al. Problems and countermeasures for environmental management of Yangtze River Delta Industrial Parks[J]. Journal of Anhui Normal University(Natural Science),2019,42(2):135-140. (in Chinese))

[ 7 ] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):425-432. ( HU Qiling,DONG Zengchuan,YANG Yanfei,et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(5):425-432. (in Chinese))

[ 8 ] 高玉琴,吴迪,刘海瑞,等. 城市化影响下区域水资源承载力评价[J]. 水利水电科技进步,2022,42(3):1-8. ( GAO Yuqin,WU Di,LIU Hairui,et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under urbanization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):1-8. (in Chinese))

[ 9 ] 马晔,田金平,陈吕军. 工业园区水管理创新研究[J]. 中国环境管理,2019,11(4):59-66. ( MA Ye,TIAN Jinping,CHEN Lyujun. Study of the water stewardship in the Chinese industrial parks[J]. Environmental Conformity Assessment,2019,11(4):59-66. (in Chinese))

[ 10 ] 黄磊,吴传清. 长江经济带城市工业绿色发展效率及其空间驱动机制研究[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(8):40-49. ( HUANG Lei,WU Chuanqing. Industrial green development efficiency and spatial driven mechanism in cities of the Yangtze River Economic Belt[J]. China Population,Resources and Environment,2019,29(8):40-49. (in Chinese))

[ 11 ] 李少朋,赵衡,王富强,等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2021,37(3):20-25. ( LI Shaopeng,ZHAO Heng,WANG Fuqiang,et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):20-25. (in Chinese))

[ 12 ] 卢纯. “共抓长江大保护”若干重大关键问题的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):283-295. ( LU Chun. Reflection on several key issues regarding the “Making Efforts to Protect the Yangtze River Together” project[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(4):283-295. (in Chinese))

[ 13 ] 陈华鑫,陆沈钧,何建兵,等. 长三角一体化示范区水资源保护协作机制创新研究[J]. 水资源保护,2021,37(5):56-61. ( CHEN Huaxin,LU Shenjun,HE Jianbing,et al. Research on innovation of water resources protection cooperation mechanism in Yangtze River Delta integration demonstration area[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):56-61. (in Chinese))

[ 14 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城乡建设统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社,2021.

[ 15 ] 郝吉明,田金平,卢琬莹,等. 长江经济带工业园区绿色发展战略研究[J]. 中国工程科学,2022,24(1):155-165. ( HAO Jiming,TIAN Jinping,LU Wanying,et al. Green development of industrial parks in the Yangtze River Economic Belt[J]. Strategic Study of CAE,2022,24(1):155-165. (in Chinese))

[ 16 ] 王洪臣. 我国城镇污水处理行业碳减排路径及潜力[J]. 给水排水,2017,53(3):1-3. ( WANG Hongchen. The path and potential of carbon emission reduction in China’s urban sewage treatment industry[J]. Water & Wastewater Engineering,2017,53(3):1-3. (in Chinese))

[ 17 ] 陈述,吕文芳,王建平. 长江流域水资源利用效率时空演变特征分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):80-86. ( CHEN Shu,LYU Wenfang,WANG Jianping. Analysis on the spatio-temporal evolution of water resources utilization efficiency in the Yangtze

- River Basin[J]. *Water Resources Protection*,2022,38(4):80-86. (in Chinese))
- [18] 朱增银,张满成,王晓祎.太湖流域工业园区再生水回用政策与实践研究[J]. *环境科技*,2019,32(3):59-63. (ZHU Zengyin,ZHANG Mancheng,WANG Xiaoyi. Research on the policies and practices of the reclaimed water reuse in Taihu Basin [J]. *Environmental Science and Technology*,2019,32(3):59-63. (in Chinese))
- [19] 胡洪营. 聚焦矛盾精准施策全面提升污水资源化利用水平[J]. *给水排水*,2021,57(2):1-3. (HU Hongying. Focusing on key issues and precise measures to comprehensively upgrade wastewater utilization[J]. *Water & Wastewater Engineering*,2021,57(2):1-3. (in Chinese))
- [20] 林莉峰,胡维杰,王丽花.城市污水和污泥中磷回收技术发展和应用前景:以上海市为例[J]. *给水排水*,2022,58(5):23-30. (LIN Lifeng, HU Weijie, WANG Lihua. Phosphorus recovery techniques review and application prospect in municipal wastewater and sludge: taking Shanghai as an example [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58 (5): 23-30. (in Chinese))
- [21] 城市污泥变废为宝 苏州方案助力长三角一体化协同发展[N]. *苏州日报*,2021-04-16(1).
- [22] 张凯莉.典型钢铁工业园水网络优化[D].北京:中国科学院大学,2018.
- [23] 张军.现代煤化工水系统特性分析及优化研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [24] 蒋世威.炼厂热媒水系统的优化[D].大连:大连理工大学,2020.
- [25] ZHANG Kaili,ZHAO Yuehong,CAO Hongbin,et al. Multi-scale water network optimization considering simultaneous intra- and inter-plant integration in steel industry[J]. *Journal of Cleaner Production*,2018,176:663-675.
- [26] RUBIO C E, PONCE O J M,SERNA G M,et al. Optimal reconfiguration of multi-plant water networks into an eco-industrial park [J]. *Computers & Chemical Engineering*,2012,44:58-83.
- [27] MISROL M A, ALWI S R W, LIM J S, et al. Optimization of energy-water-waste nexus at district level: a techno-economic approach[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*,2021,152:111637.
- [28] 赵月红,谢勇冰,曹宏斌,等.基于全过程污染控制策略的钢铁工业园区水网络全局优化[J]. *过程工程学报*,2022,22(1):127-134. (ZHAO Yuehong,XIE Yongbing,CAO Hongbin,et al. Global optimization of water network in the steel industrial park driven by the strategy of whole process pollution control[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*,2022,22(1):127-134. (in Chinese))
- [29] MUÑOZ I,AKTURK A S,AYYILDIZ O,et al. Life cycle assessment of wastewater reclamation in a petroleum refinery in Turkey [J]. *Journal of Cleaner Production*,2020,268:121967.
- [30] SANTANA M V E,CORNEJO P K,RODRIGUEZ-RODA I,et al. Holistic life cycle assessment of water reuse in a tourist-based community[J]. *Journal of Cleaner Production*,2019,233:743-752.
- [31] DIAZ E N,REZAEI N,NDIAYE A,et al. Trends in the environmental and economic sustainability of wastewater-based resource recovery: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*,2020,265:121598.
- [32] QU Jiuhui,WANG Hongchen,WANG Kaijun,et al. Municipal wastewater treatment in China: development history and future perspectives[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*,2019,13(6):88.
- [33] 工业和信息化部,发展改革委,科技部,等.工业和信息化部发展改革委科技部财政部生态环境部关于加强长江经济带工业绿色发展的指导意见[EB/OL]. (2017-06-30). [https://www.miiit.gov.cn/jgsj/jns/wjfb/art/2020/art\\_b554dc38456542d890f562b051ebd8f0.html](https://www.miiit.gov.cn/jgsj/jns/wjfb/art/2020/art_b554dc38456542d890f562b051ebd8f0.html).
- [34] 生态环境部,国家发展和改革委员会.关于印发《长江保护修复攻坚战行动计划》的通知[EB/OL]. (2019-01-21). [http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201901/t20190125\\_690887.html](http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201901/t20190125_690887.html).
- [35] 国家发展和改革委员会.关于推进污水资源化利用的指导意见[EB/OL]. (2021-01-11). [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202101/t20210111\\_1264795.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202101/t20210111_1264795.html?code=&state=123).
- [36] 国务院.国务院关于加强建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见[EB/OL]. (2021-02-02). [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content\\_5588274.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm).
- [37] 工业和信息化部.工业和信息化部关于印发《“十四五”工业绿色发展规划》的通知[EB/OL]. (2021-11-15). [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/content\\_5655701.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/content_5655701.htm).
- [38] 王浩,王建华,胡鹏.水资源保护的新内涵:“量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. *水资源保护*,2021,37(2):1-9. (WANG Hao,WANG Jianhua,HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration[J]. *Water Resources Protection*,2021,37(2):1-9. (in Chinese))