

陈仲贇, 张元娜, 孙文俊, 等. “碳中和”目标下 IUS 方法在水务行业中的融合应用[J]. 净水技术, 2026, 45(3): 103-113, 122.

Chen Z Y, Zhang Y N, Sun W J, et al. Integrated application of IUS method in water industries under "carbon neutrality" goals [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(3): 103-113, 122.

“碳中和”目标下 IUS 方法在水务行业中的融合应用

陈仲贇^{1,2}, 张元娜¹, 孙文俊^{1,*}, 韦婷婷²

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 清华苏州环境创新研究院, 江苏苏州 215163)

摘要 在我国“双碳”目标背景下, 水务行业面临绿色低碳与智慧化转型的迫切需求, 但存在系统集成度不高、标准体系不完善、跨部门数据壁垒等问题。【目的】 本文旨在探讨工业-城市共生关系(IUS)方法在我国水务行业中的融合应用潜力, 为行业实现“碳中和”与智慧化转型提供系统性解决方案。【方法】 通过梳理 IUS 方法的理论起源与发展脉络, 总结其方法论框架, 包括: (1) 构建结构化的技术目录, 涵盖资源、能源与水三大维度的标准化数据; (2) 建立参数化混合投入产出模型, 模拟系统内物质与能量流动; (3) 设计融合环境、社会与治理(ESG)理念的多维评估体系, 从技术、环境、经济与社会 4 个维度进行综合评价。最后, 结合我国水务行业的实际, 从技术适应性、政策匹配性与数据可获得性 3 个方面分析 IUS 方法的适用性。【结果】 IUS 方法在水务行业展现出显著的应用潜力, 尤其在资源回收利用、能量优化与智慧水务集成方面。案例研究表明, 该方法能够识别跨部门协同效应, 提升资源循环效率。然而, 其本地化应用仍面临地域差异大、系统集成标准缺失、数据壁垒及复合型人才短缺等挑战。【结论】 当前, 我国水务数据基础设施初具规模, 但存在数据孤岛、质量参差不齐、共享机制不完善等问题。IUS 方法为水务行业提供了一条整合资源回收、能量优化、智慧运营与低碳管理的科学路径, 有助于推动行业从末端治理向循环共生型系统演进。未来需结合我国实际, 从跨部门协作、数据共享机制完善、标准体系建立等方面进行本土化拓展, 以促进水务行业绿色低碳与智慧化转型。同时, 仍需进一步研究模型的动态适应性、数据可靠性提升及可持续商业模式创新等问题。

关键词 工业-城市共生关系(IUS) 碳中和 智慧水务 循环经济 多维评估体系

中图分类号: X703; X322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)03-0103-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.03.010

Integrated Application of IUS Method in Water Industries under "Carbon Neutrality" Goals

Chen Zhongyun^{1,2}, Zhang Yuanna¹, Sun Wenjun^{1,*}, Wei Tingting²

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Research Institute for Environmental Innovation Suzhou Tsinghua, Suzhou 215163, China)

Abstract Against the backdrop of "dual carbon" goals in China, the water industry faces an urgent need for green, low-carbon, and intelligent transformation, yet it grapples with issues such as low system integration, an incomplete standard system, and cross-departmental data barriers. [Objective] This paper aims to explore the potential for integrating the industrial-urban symbiosis (IUS) method into China's water industry, providing a systematic solution to support its carbon neutrality and intelligent transformation. [Methods] By reviewing the theoretical origins and development of the IUS method, its methodological framework was summarized, including (1) constructing a structured technical catalog covering standardized data for resources, energy, and water; (2) establishing a parametric hybrid input-output model to simulate material and energy flows within the system; (3) and designing a multi-dimensional evaluation system incorporating environmental, social, and governance (ESG) principles, conducting comprehensive assessments from technical, environmental, economic, and social dimensions. The applicability of the IUS method was analyzed based on technical adaptability, policy alignment, and data availability within the context of China's water industry. [Results] The IUS method

[收稿日期] 2025-12-19

[基金项目] 国家重点研发计划(2023YFE0114100); 江苏省科技项目(BZ2024007); 北京市科技计划(Z201100007125027)

[作者简介] 陈仲贇(1982—), 女, 工程师, 主要从事城镇水循环利用等工作, E-mail: safetydisinfectionc@mail.tsinghua.edu.cn。

[通信作者] 孙文俊(1981—), 男, 研究员, 研究方向为城镇供水安全保障技术, E-mail: wsun@tsinghua.edu.cn。

demonstrated significant application potential in the water industry, particularly in resource recovery and utilization, energy optimization, and smart water integration. Case studies showed that this method could identify cross-sector synergies and enhance resource cycling efficiency. However, its localized application still faced challenges such as significant regional variations, lack of system integration standards, data barriers, and a shortage of interdisciplinary talent. [**Conclusion**] While China's water data infrastructure is taking shape, issues like data silos, inconsistent data quality, and imperfect sharing mechanisms persist. The IUS method offers a scientific pathway for the water industry to integrate resource recovery, energy optimization, intelligent operations, and low-carbon management, facilitating the transition from traditional end-of-pipe treatment to a circular symbiotic system. Future efforts should focus on localized adaptation, including enhancing cross-departmental collaboration, improving data-sharing mechanisms, and establishing standard systems to promote the green, low-carbon, and intelligent transformation of the water industry. Further research is needed on dynamic model adaptability, data reliability improvement, and sustainable business model innovation.

Keywords industrial-urban symbiosis (IUS) carbon neutrality smart water circular economy multi-dimensional evaluation system

全球资源与气候危机要求我们在材料和能源的生产、消费及回收利用方式上进行系统性变革。为了推动经济社会发展全面绿色转型,我国制定了“碳达峰”和“碳中和”的“双碳”目标。为响应国家这一战略目标,水务行业的未来新水务专家委员会发起倡议,在行业中达成了“2040 碳中和”的共识目标,并提出了管网优化、工艺革新、能源回收、余热利用、分布式能源建设等 9 大技术路线和行动建议。然而,当前水务行业在实现这一目标过程中仍然面临着诸多挑战,比如系统集成度不高、标准体系不完善、跨部门数据壁垒等问题,这就需要有各种新的合作模式,打通不同工业企业,不同管理部门间的壁垒,为区域间的利益最大化展开合作。

工业-城市共生关系(IUS)是一种城市尺度的战略合作模式。它通过协调各个生产和服务企业与企业运行系统之间的资源调配,实现区域内资源互换,提高资源利用的效率,以达到可持续发展的目的。这也是循环经济的一种新的实践模式,它打破了传统经济的生产-消费-废弃的线性模式,通过促进生产服务与城市消费间的合作,为资源循环建立一个闭环的代谢网络提供了前景广阔的框架^[1-4]。

在这样的背景下,深入研究 IUS 方法的理论基础与技术特征,并将该方法应用于我国的水务行业,利用其标准化的模式,实现区域内跨部门的利益主体有效沟通,具有重要的理论意义和实践价值。本文旨在通过系统分析 IUS 方法的产生及发展历程、技术优势与局限性,并结合我国水务行业的实际情况,提出适应性的应用策略,为复杂城市水系统循环发展提供了一个可行的科学分析和决策支持工具,也为推动我国水务行业“碳中和”与智慧化协同发

展提供科学依据。

1 IUS 方法的产生与发展

1.1 理论起源与概念演进

IUS 理论的提出最早可以追溯到 1989 年, Robert 和 Nicholas 正式提出了“工业生态学”和“工业生态系统”的概念^[5],这一理念的提出标志着工业生态学作为独立研究领域的建立。研究人员^[6]随后在“工业生态学”的旗帜下,开始探索物质和能量的循环利用,并强调工业系统也是可以如自然生态系统那样进行可持续发展的。

循环经济的理论基础始于《封闭的循环》一书,是由美国生物学家、政治家 Barry Commoner^[7]于 1971 年撰写的。随后,美国某经济学家进一步强调资源有限性和经济活动的可持续性^[8]。这些循环经济的前期理论都为之后建立工业共生体概念提供了重要的理论基础。

“工业共生”的概念是在 1990 年被正式提出的,用来描述企业之间通过废物的回收再利用实现资源的交互循环^[9]。随着理论研究的深入,工业共生概念不断演进和拓展。最初,工业共生关注的主要是材料、能源、水等物理资源的交换,因此更强调各个工业企业在空间上毗邻。随着实践的逐渐展开,研究者们认识到,工业共生不仅涉及物理资源交换,还包括知识、技术、服务等非物质资源的共享。2012 年, Lombardi 等^[10]提出了工业共生的新定义,即一种区域网络中多样化组织参与的协作模式。该模式通过创造与分享知识,促进所需资源新的获取途径,为副产品寻找增值出路,并由此产生互利交易,同时改进企业运营与技术流程。

1.2 从生态工业园区 (EIP) 到循环经济的发展脉络

工业共生的发展与 EIP 的发展密不可分。美国国家环境保护局 (EPA) 的《生态工业园区发展实地手册》中将 EIP 系统定义为一个同时包含了制造企业和服务企业的社区。园区中的各企业通过环境、资源、管理等全方位的合作,以提高环境、经济和社会效益,而通过合作提升的效益的总量将大于每个企业通过优化各自的绩效所能实现的效益总和^[11]。EIP 早期是通过企业间的自发合作逐步形成的,是典型的自组织模式。随着 EIP 概念的推广,越来越多的地区开始探索通过系统设计来创建工业共生网络。

工业共生方法的发展在循环经济的理念兴起后,得到了进一步的推动。“循环经济”的正式提出源于德国的《循环经济与废弃物管理法》,它涵盖了“减量化、再利用、再循环(3R)”的 3 种原则^[12]。随后,日本颁布的《推进形成循环型社会基本法》中也定义了“循环型社会”的概念^[12]。循环经济理念的逐步完善和相关政策法规的出台,为工业共生系统的实践提供了有力的制度支持。

2000 年以后,工业共生关系逐渐向 IUS 的方向拓展。传统的工业共生关系主要关注工业企业之间的合作,而 IUS 则将城市扩展为重要的参与主体,使资源的循环利用在工业与城市系统之间实现闭环^[9,13-14]。人们也逐步认识到,可持续发展需要统筹考虑工业、城市、社会等多个系统的协同。

1.3 在水务领域的应用发展历程

随着循环经济理念的深入,IUS 逐渐在水务领域兴起。早期的研究^[15]主要集中在工业企业内部的水资源循环利用,后来逐渐扩展到企业间的水资源统筹利用,最终发展到工业与城市系统之间的水资源协同管理与调度。

2020 年,Bauer 等^[16]提出了“工业-城市水回用”概念,其核心在于城市地区与邻近工业园区的回用水的综合利用。这标志着水资源管理领域的共生范畴,已从企业间合作延伸至工业与城市的系统协同。在我国,针对工业园区集中式污水处理厂在脱氮工艺中碳源不足的问题,有研究者^[17]提出将食品废水中的有机物作为深度处理所需的外部碳源;针对水资源有限的问题,统筹规划化工园区的给水、排水、回用水、再生水的使用,提高城市承载力^[18];这些探索其实都是工业共生系统在水务行业中的

应用。

近年来,智慧水务的兴起为 IUS 的发展提供了新的方向。2023 年,Wadström 等^[19]提出了一个跨学科的研究框架,通过分析循环废水管理中各个参与者的价值取向,探索这些价值取向是如何驱动参与者们进行合作的。这将 IUS 的应用从技术层面扩展到了价值理念和管理模式的层面。

1.4 方法学框架的形成与完善

IUS 方法学框架的形成经历了从简单的资源交换到复杂的系统集成的发展历程。现已形成了一个完整的方法论框架,包含理论基础、技术工具和评估方法,为 IUS 的设计和优化提供了科学依据^[18]。在水务领域,该方法正在通过与智慧水务的深度融合,成为推动水务行业向“碳中和”与智慧化转型的重要工具。

IUS 方法学框架的基础是建立一个结构化和标准化的技术目录。2020 年,Rohde-Lütje 等^[20]研究了 80 个工业共生的案例,识别出了工业共生系统中的重复模式,推导出了基本的结构单元,确定了常见的工业共生系统成员、集群和实体,总结出了一个基于现有信息的共生资源交换目录,涵盖了技术目录的基础内容。

IUS 的定量分析采用的是参数化的建模方法。2016 年,Yazan 等^[21]提出了一种基于投入产出方法的工业共生模拟方法,定义了一个“完美工业共生系统”,即当某工业区域,既无需从外部获取初级资源,也不向外部排放废物时为理论最优状态。2020 年,我国学者^[22]提出:将污水处理厂和能源设施之间建立的基础设施集成为一个共生模型,模型包含了一个高分辨率的清单,清单中涵盖了 252 个污水处理厂和 308 个能源设施,这些污水处理厂和能源设施分别属于 111 个国家级的工业园区中的。在此基础上,研究者们^[23-24]在 2024 年提出了一种参数化混合的投入产出模型,该模型整合了物理和经济层面,技术、企业、城市等所有的系统组件均通过标准化向量进行表征。这些建模方法均可用于工业共生系统的模拟和优化。

IUS 的综合评价是由一个标准的多维度评估体系构成的。2021 年,Hagman 等^[25]开发了一个用于评估每个替代方案的环境绩效、可行性和长期风险的多维度评估框架,包括了 8 个关键领域和 18 个具有明确定义的指标,环境效益、可行性和长期低风险

是该评估框架的 3 个主要标准。之后,俞辰茜等^[26]及 Bußwald 等^[23]又将环境、社会与治理(ESG)整合进评估系统。

2 IUS 方法的技术特征分析

2.1 结构化技术目录的构建

IUS 方法的核心是建立结构化技术目录,它是识别、评估和集成循环经济技术的基础工具。该技术目录围绕材料、能源和水三大核心资源维度构建,目标是通过标准化使不同技术具有可比性、可模拟性和可评估性。纳入技术目录的数据应有明确的选择标准^[1,27]。

技术目录的构建采用了一个标准化的数据表模板,每张数据表分为 6 个核心模块:用于说明技术的基本工作原理及其对循环经济贡献的一般描述(模块 1);用于示意技术及评估物理尺寸的图形表示(模块 2);以标准化单位定量描述所有相关输入和输出数据(模块 3);涵盖效率、规模、使用寿命、温度

范围等的技术参数(模块 4);涵盖了投资成本、运营成本及潜在收益的经济参数(模块 5);应用的基本要求及已建立的组合可能性的匹配参数^[23](模块 6)。数据表模板经过标准化之后,可对输入的不同技术信息进行归一化处理,从而确保了技术之间的可比性。而且,这种标准化的数据记录方式便于数据的存储、检索和分析,为基于数据的技术选择和系统优化提供了基础。通过对技术目录的分析,可以识别出最具潜力的技术组合和协同机制。另外,技术目录涵盖了材料、能源、水三大资源维度,形成了完整的技术体系。且每个技术的信息都包含了从技术原理到经济参数的多维描述,为技术选择和应用提供了充分的决策依据。纳入技术目录的主要数据指标以及可能获取该数据的部门如表 1 所示。这些数据指标既有直接指标,即用定量单位表示的绝对数字,如能源需求,也有程度性指标,即用大/中/小 3 个不同等级程度表示的。

表 1 主要数据指标及来源
Tab. 1 Main Data Indices and Sources

指标		主要数据来源部门
环境与资源类指标	人均年 CO ₂ 排放量	中华人民共和国生态环境部、国家统计局
	绿地/水域/树木覆盖率	中华人民共和国自然资源部、国家林业和草原局
	是否为生物多样性预留空间	中华人民共和国自然资源部、中华人民共和国生态环境部
	密封面积比例	中华人民共和国自然资源部、中华人民共和国住房和城乡建设部
	人均年用水量	中华人民共和国水利部、国家统计局
	技术对象消耗的淡水、工艺水、废水	企业生产部门、中华人民共和国水利部
	重复使用资源强度	中华人民共和国国家发展和改革委员会、中华人民共和国生态环境部
	循环利用投资(包括水回收)	中华人民共和国国家发展和改革委员会、中华人民共和国生态环境部
	垃圾分类建筑/区域数量	城管局、街道办事处
	包装/有机/混合/电子废物消耗与产生	企业生产部门、城管局
	技术对象消耗/产生的各类材料(金属、塑料等)	企业供应链部门、国家统计局
	技术对象消耗/产生的化学品(酸、碱、溶剂等)	企业生产部门、中华人民共和国应急管理部
	技术对象消耗/产生的气体(CO ₂ 、沼气、H ₂ 等)	企业生产部门、中华人民共和国生态环境部
	技术对象产生废气/温室气体	中华人民共和国生态环境部、企业监测部门
	技术对象对空气污染程度	中华人民共和国生态环境部(监测站)
	技术对象噪声排放	中华人民共和国生态环境部、城管局
	技术对象是否干扰景观	中华人民共和国自然资源部、中华人民共和国文化和旅游部
建筑与空间类指标	能耗类型(高耗能/节能)	中华人民共和国住房和城乡建设部、国家能源局
	空置率/使用率	中华人民共和国住房和城乡建设部、国家统计局
	平均使用面积比率	中华人民共和国住房和城乡建设部、企业物业部门
	免费公共空间/休闲设施(室内)	中华人民共和国文化和旅游部、中华人民共和国民政部

(续表1)

	指标	主要数据来源部门
	公共场所设施配备(饮水机、厕所等)	城管局、中华人民共和国文化和旅游部
	可供公众使用区域比例	中华人民共和国自然资源部、中华人民共和国文化和旅游部
经济与就业类指标	每平方米建筑成本	中华人民共和国住房和城乡建设部、建筑单位
	技术对象是否对女士友好	中华全国妇女联合会、中华人民共和国自然资源部
	区域适当照明比例	城管局、供电公司
	技术对象干扰景观评估	中华人民共和国自然资源部、中华人民共和国文化和旅游部
	人均国内生产总值(GDP)(城市/地区)	国家统计局、中华人民共和国国家发展和改革委员会
	循环利用创造的“面包价值”(经济价值)	中华人民共和国国家发展和改革委员会、中华人民共和国生态环境部
	地区不同工作部门数量	国家统计局、中华人民共和国人力资源和社会保障部
	技术对象初始投资/运营成本	企业财务部门、中华人民共和国审计署
	技术对象使用寿命/效率	企业技术部门、国家市场监督管理总局
社会与人口类指标	居住人口数量	中华人民共和国公安部、国家统计局
	不同群体受益小时数(重复指标)	中华人民共和国民政部、国家统计局
	不同群体可访问性(年龄、性别、残疾等)	中国残疾人联合会、中华全国妇女联合会、中华人民共和国民政部
	必需品与服务可及性	中华人民共和国商务部、中华人民共和国民政部
	能力建设选择(培训、教育等)	中华人民共和国教育部、中华人民共和国人力资源和社会保障部
	技术对象吸引力	中华人民共和国文化和旅游部、国家统计局(问卷调查)
能源与公用事业类指标	技术对象消耗电能/热能	供电公司、供热公司、企业能源部门
	技术对象产生电能/热能	企业生产部门、国家能源局
	技术对象输入/输出温度	企业技术部门
	当地交通网络覆盖	中华人民共和国交通运输部、中华人民共和国自然资源部
	数字化程度	中华人民共和国工业和信息化部、国家数据局
跨领域指标	“如何考虑目标不同用途?”	需跨部门协商;中华人民共和国自然资源部牵头,征求发改、文旅、交通等部门意见
	“机器人使用技术对象时间”	企业自动化部门或中华人民共和国工业和信息化部(智能制造统计),可能需与劳动局协作(就业影响)
	关于“循环利用的价值”	可能是经济价值比喻,需国家统计局(产值)、中华人民共和国生态环境部(环境效益)联合核算
	关于“是否对女士同样友好”	需多部门数据;中华人民共和国自然资源部(公共空间设计)、中华人民共和国交通运输部(夜间照明)、中华人民共和国公安部(安全数据)

然而,技术目录也存在一些局限性。某些技术,尤其是新兴技术,可能缺乏完整的技术参数和经济数据,导致这些技术无法被充分评估。而且技术是在不断发展和改进的,技术目录也需要随之更新,才能反映最新的技术状态。此外,技术目录中的某些技术可能有特定的地理环境或产业结构的适应性,在不同地区应用时可能需要进行适应性调整。这些更新调整的过程往往会面临数据可靠性的挑战。

2.2 参数化混合投入产出模型的原理与应用

参数化的混合投入产出模型是 IUS 方法的技术

核心,它描述了系统内各组件之间物质和能量的流动关系。技术对象、工业对象和城市对象作为不同的系统组件通过标准化对象的向量表征,从物理和经济 2 个层面进行模拟^[1,28]。

技术对象定义为一个转换函数,通过一个辅助向量将输入对象进行标准化,标准化的方程表示如式(1)。

$$O_i = T_i(p) \times I_i \quad (1)$$

其中: O_i ——技术对象的标准化的输出向量;

- I_i ——技术对象的输入向量;
- p ——描述性参数,用于缩放标准化向量;
- T_i ——技术辅助向量。

企业对象和城市对象代表了系统中的实际参与方,基于经验数据构建^[23]。

共生关系中资源的循环利用通过一个匹配矩阵的形式进行记录,即某个对象输出流的多少份额可用作另一个对象的输入。利用这个匹配矩阵精确模拟系统内部资源和能源流,同时,这个矩阵还能将内部循环使用的资源与外部获取的资源区分开,这样就能实现资源效率和循环性能的差异化核算^[23]。

而共生系统的净输出就等于所有输出之和减去内部的转移量,具体如式(2)。

$$O_{\text{System, netto}} = \sum_i O_i - \sum_{x,i,j} M_{x,i-j} \quad (2)$$

- 其中: $O_{\text{System, netto}}$ ——系统的净输出;
- $\sum_i O_i$ ——所有对象的资源和能源流的输出之和;
- M ——配合矩阵;
- $\sum_{x,i,j} M_{x,i-j}$ ——内部资源和能源流的转移量。

模型使用 Python 语言编辑,模拟对象的匹配数据来自 2.1 节的结构化目录文件,向量矩阵的计算

可以使用 Pandas 和 Numerical Python 数据库来处理。

共生系统被模型化后,它的净输出就可以进一步利用一个评估方法进行计算,具体的评估逻辑将在下面 2.3 节中详细介绍。每个组件,也就是需要建模评估的对象,可能是建筑、厂房,也可能是主要设备等,需要进行独立的参数化建模。模型为了要适应组件的不同规模和复杂程度,只关注输入输出关系,而不依赖于具体的技术类型。模型利用数学框架,从整体系统的角度分析资源流动,通过匹配矩阵,展示系统内的资源循环路径,识别出单个组件分析中可能被忽略的协同效应和循环机会,并定量计算如资源利用率、循环率、成本效益等性能指标。

该模型在奥地利格莱斯多夫南部的一个区域进行了测试。系统组成包括一个现代化污水处理厂、若干住宅和公共建筑以及废热回收热泵、沼气热电联产机组、光伏系统等基础设施。对区域可用资源流以及技术、城市和工业参与者之间的相互作用进行分析(图 1)后,选取如下技术,并构建了技术目录,包括:(1)废水源热泵(功率为 600 kW);(2)仅用于污水处理厂自用电供应的光伏技术;(3)污泥发酵产沼气热电联产机组;(4)用于氮回收的膜蒸馏技术;(5)从污泥中回收磷用于生产肥料;(6)污水处理厂常规的处理工艺;(7)住宅和公共建筑。

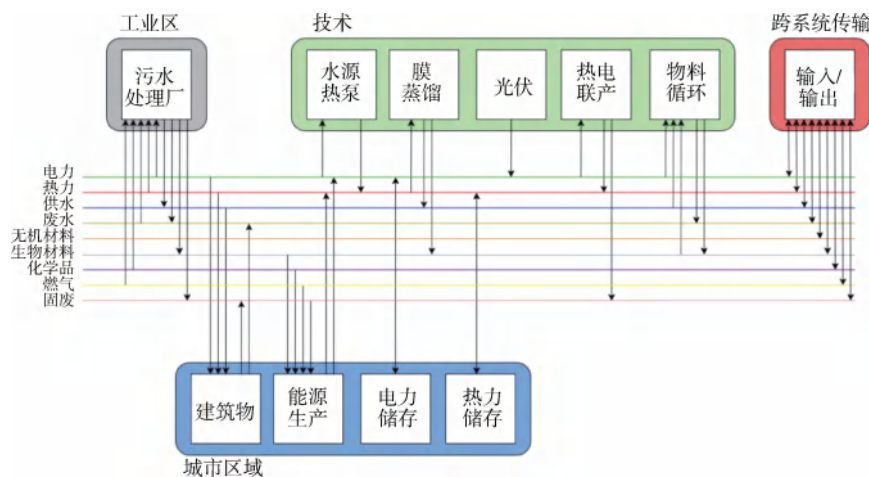


图 1 案例中的物质、能量流示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Materiality and Energy Flow in this Case

将这些技术以标准化的形式进行描述后,通过所描述的逻辑集成到系统模型中,为每种技术模拟

了 3 种规模等级(S、M、L)及其相应的效率。

这个案例将模拟区域分为几个不同的技术对

象:污水处理厂的常规处理工艺、厂区内的水源热泵供热、利用污泥发酵产沼气的热电联产、回收污泥中的磷用于生产肥料、膜蒸馏技术回收废水中的氮用于生产肥料、利用光伏技术为污水处理厂供电,以及住宅和公共建筑。分别从能源的供给和产出,包括:供电、供热和供气,物料的供给和产出;材料、化学品和固体废弃物和水,经济的投入和产出;固定资产投资、运维投资以及利润这几个方面对区域内的技术对象进行模拟。然后将这些技术进行不同的组合模拟计算,得到不同技术组合的净输出,以此作为是否要采用某种技术的决策依据之一。该案例验证了模型的有效性^[23],也证明了该模型可以评估污水处理厂、发电厂、化肥厂、住宅和公共建筑之间的协同效果,即实现了在城市层面的跨部门协同效应的识别和评估。

然而,由于数据的局限性和可用行,目前对技术集成评估的模型假设距现实情况尚有距离。此外,该模型的建立需要大量的技术参数和系统数据,包括输入输出关系、技术效率、成本数据等。当组件不断增加,模型系统的规模会随之增大,模型的复杂性也会增长,导致模型的求解变得越来越困难,这就需要强大的计算资源。

另一个缺陷是,该模型主要以静态的形式表示,难以充分反映系统的季节性变化、设备故障、需求波动等动态特性。因此本研究采用了一个评估方法,从多个维度评估模型得出的净输出,并根据项目推进的不同阶段或环境随时间的变化情况,给不同的评估维度赋予不同的权重。同时,相关利益方也可以通过问卷、访谈等方式在不同阶段参与评估。决策时,可在建设期、运营期、需求变化期等不同阶段或不同环境下对系统进行评估,从发展的角度为模型增加了一个时间维度。

2.3 多维评估指标体系的设计逻辑

IUS 方法的第 3 个核心部分是一个评估指标体系,它提供了一个综合评价的科学框架。最初, Hagman 等^[25]在 2021 年开发了一个评估框架,它涵盖了 8 个关键领域和 18 个具有明确定义的指标,采用很差、差、一般、好、很好 5 个级别进行评分,研究人员给每个指标赋予了明确的评分标准,用于评估环境效益、可行性和长期风险。随后, Bußwald 等^[23]在评估体系中引入了社会效益的维度,形成了一个多维度的评估指标体系。该指标体系涵盖 4 个评估

维度,即技术、环境、经济和社会指标。目前,这些指标的选择主要是基于欧盟循环经济监测框架^[23]。具体指标内容如下。

技术指标:热覆盖率,即区域内的供热需求占比;电力自给率,即区域内自产电力占电力总需求的比例;循环输出率,即可回收物质占总输出的比例;资源生产率,即单位投入材料的价值产出比。这些指标直接反映了评估对象的性能水平和资源利用效率,是评估系统技术可行性的重要依据。

环境指标:材料足迹,单位是 t/人;废弃物产生量,单位是 t/人;温室气体排放量,单位是 t CO₂/a;温室气体减排量,单位是 t CO₂/a;水资源消耗,单位是 m³/a^[23]。环境指标体系的设计考虑了生命周期评价的要求,关注的是评估对象对环境的影响和可持续性,既包括直接影响,也包括间接影响。

经济指标:投资成本(CAPEX)、运营成本(OPEX)、节约额(系统内通过循环利用减少的能源成本)^[23]。经济指标是利用生命周期成本计算,用于计算评估对象经济可行性和成本效益,为投资决策提供参考。

社会指标:人均就业岗位,单位是个/人;用户群体多样性,单位是人·h/d;人员使用强度,单位是人·h/d;硬化面积,单位是 m²^[23]。社会指标反映了评估对象对社会发展的贡献和影响。

评估体系的设计遵循了系统性原则和可量化原则。系统性原则,是指评估体系应完整地涵盖技术、环境、经济、社会 4 个维度的指标,以确保评估的全面性,避免因单一维度可能带来的偏差。可量化原则,是指评估体系大部分指标采用定量指标,仅对于个别难以量化的指标采用分级的方式来描述。

在水务领域的应用案例中,该评估体系展现出了良好的适用性。在我国的某研究案例^[17]中,该评估体系被用于评价污水处理系统的优化方案,结果显示工业共生模式不仅能够降低成本,还能实现显著的环境效益。

虽然该评估体系提供了一个多维度的评价方法,但如何确定各指标的权重,需要根据不同利益相关者的参与方式和对不同指标的重视程度综合确定。而其中某些指标的数据可能不容易获得,不同地区和行业可能有不同的指标定义和计算方法,这些都可能导致评估结果的不完整

或偏差。

2.4 整合 ESG 评估方法

传统的可持续性评估往往聚焦于环境友好和经济可行,但在 IUS 方法中整合了 ESG 评估框架,将评估从二维扩展到三维(环境、社会、治理)。这种方法的创新在于将“用户”,即利益相关方的收益作为重要权重和评估标准^[23]。

ESG 评估内容包括决策机制的透明度、利益相关者参与度、风险管理体系、合规性等方面。在中国水务行业的背景下,治理维度特别关注国有企业的管理体制、政府监管机制、公众参与程度等因素。纳入 ESG 评估后,多维评估将用户的需求和满意度作为重要考量。在水务领域,用户包括居民、工业企业、水的生产者等不同群体,他们对水质、水量、价格、服务质量等方面有不同的要求。评估体系需要综合考虑各类用户的需求,评估社会可接受程度。例如,华东师范大学的研究团队采用 ESG 加经济效益(E)的评估框架,对我国水务企业的可持续发展绩效进行了综合评价^[26],体现了该评估方法在决策中的指导意义。

此外,随着项目的推进和外部环境的变化,ESG 评估的权重可能需要调整,例如,在项目前期,技术可行性和投资回报率可能是关注重点;而项目建成后的运营阶段,环境效益和社会满意度则可能变得更加重要。这就使得评估具有了动态发展的特性,这在一定程度上解决了投入产出模型只能静态反映某一时期或某一状态的弊端。而区域内的利益相关者则可以通过问卷调查、访谈、研讨会等方式在不同的阶段参与评估。

IUS 方法中采用的基础评估权重分别如下:环境维度的权重值为 40%,评估关注的重点是碳排放强度和减排潜力、水资源利用效率、污染物排放控制和生态环境影响;社会维度的权重值为 25%,评估重点包括供水服务的公平性和可及性,水质安全保障水平,就业创造、社区发展、公众满意度和参与度;治理维度的权重值为 20%,评估重点是决策机制的科学性和透明度,监管体系的完善程度,利益相关者协调机制、信息公开和公众监督;经济维度的权重值为 15%,评估的内容有投资回报率,运营成本效益,资源价值的创造和经济上的可持续性。

3 IUS 方法在我国水务行业应用的适应性分析

3.1 技术适应性

在我国水务行业“碳中和”与智慧化转型的关键时期,IUS 方法在技术层面展现出了其应用潜力与前景。在资源循环利用方面,2023 年依托于全国城市污水处理率已超过 98% 的庞大产业规模^[29],全国规模以上工业用水重复利用率达到了 93%^[29]。从污水余热回收,污水中的氮的回收,到污泥回收磷,污泥厌氧消化与沼气发电,以及工业废水中的化学原料回收,食品废水有机物作为碳源等营养物等,这些回用技术不仅有巨大的资源基础与发展空间,而且已经在我国形成具体的应用路径,兼具环境与经济效益。更为关键的是,我国快速发展的智慧水务技术为上述共生关系的实现提供了技术支撑,包括水资源监测网络,大数据分析赋能用水预测与调度,数字孪生技术助力工艺模拟与优化,人工智能(AI)技术在水质预测、故障诊断等方面的应用。这些技术都可以作为 IUS 方法应用于我国水务系统减碳与增效的技术基础。

当然,IUS 方法在我国水务行业的应用,也面临着技术适应性与系统性集成挑战。以污水余热回收为例,我国南北方气候差异导致南方地区供暖需求有限,余热回收的经济驱动力不足;同时,现有污水处理厂的工艺设计缺少大规模余热回收的改造空间,余热输送距离对城市规划布局也提出了前置性要求。更为根本的是系统集成所面临的障碍:比如,技术标准不统一,使区域内不同系统间的互联互通存在障碍;经济欠发达地区对智慧化改造投资成本较为敏感;环境工程、信息技术、经济管理等领域的复合型跨学科人才不足等。随着技术集成度提升,系统复杂性也会呈指数级的增长,如何确保该方法的稳定运行同样是一项持续的管理与技术的挑战。

3.2 政策匹配性

我国已明确提出了 2030 年实现“碳达峰”、2060 年实现“碳中和”的目标,这也是水务行业发展的新机遇。我国水务行业虽然被归入“自愿性减排”领域,但为了更好地配合“双碳”目标,水务行业也正积极布局,形成了“能源结构优化、全流程能效提升、资源化协同利用”的清晰路径^[30],地方政府、行业协会或龙头企业开始探索制定区域性或团体性

的减排路径及核算指南,如北京市某大型水务集团发布的《碳中和规划》明确了碳排放的分阶段目标和实施路径^[31],中国城镇供水排水协会发布的《中国城镇水行业碳核算与减排路径指南》^[32],提出了水务行业的碳排放核算标准和减排路径。今后还将逐步建立相关监测体系、出台行业“碳减排”激励政策、纳入全国“碳排放”权交易市场。这些好的政策环境均为 IUS 方法的应用提供了有力支持。

自 2004 年中央经济工作会议明确提出“大力发展循环经济”起,我国循环经济已经历了基础研究 with 试点探索、示范引路、全面总结推广、全面深化提升 4 个发展阶段。《“十四五”循环经济发展规划》围绕提高资源利用效率的主线,部署了三大主要任务、五大重点工程和六大重点行动^[33]。这些任务、工程和行动倡导通过系统工程整体优化资源配置,其实施路径依赖于跨主体的协同合作和资源共享,这使得 IUS 方法天然契合我国的循环经济战略。而且,我国在循环经济方面已经探索出了诸多的成功模式,这为 IUS 方法的落地提供了宝贵的依据与实践参照。

我国智慧水务的发展获得了国家层面的战略引领,顶层规划清晰明确。《“十四五”水安全保障规划》将智慧水务列为关键任务^[34];《“十四五”全国城市基础设施建设规划》则同步部署了“加快新型城市基础设施建设,推进城市智慧化转型发展”与“完善城市生态基础设施体系,推动城市绿色低碳发展”两大重点方向^[35];《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》更是设定了 90% 以上的大型、特大型污水处理厂具体数字化改造的目标^[36]。这一系列政策共同构成了智慧水务发展的框架,也为 IUS 方法的推广带来了机遇,同时,已建成的示范城市、示范园区也积累了一批可复制、可推广的实践经验。

3.3 数据可获得性

获得高质量的数据是实施 IUS 方法的基础。当前,我国水务数据基础设施建设已取得一定进展;通过整合遥感、地面监测等多源数据,构建了涵盖水资源、水环境、水生态的水资源数据地图^[37]。水利部及各省开始建设水利水资源相关的大数据中心^[38]。部分城市建立了相关的水务数据中心^[39],行业团体和龙头企业牵头制定了智慧水务标准规范体系^[40-42]。越来越多的企业开始部署地理信息系统

(GIS) 服务平台、各级管理平台,实现数据统一接入和共享^[43]。这些都为 IUS 的应用提供了数据基础。

然而,IUS 如何有效利用这些数据仍存在瓶颈。数据存在“孤岛效应”,水利、环保、气象等不同部门间存在数据壁垒。数据的质量参差不齐,数据标准化程度低,部门与地区间标准不一,历史数据缺失或数据格式各异,难以整合^[44]。数据碎片化,数据获得滞后^[44],部分权威数据的获取和使用受到行政壁垒的限制^[44]等问题也同样使得必需的数据难以获得。随着我国行政部门、工业企业数字化基础设施建设的逐步完善,有望通过建立一个核心算法的数据库,与我国主流的智慧水务平台、数字孪生平台深度融合,且符合我国技术成本、资源价格与碳排放因子的核心参数,从而降低 IUS 方法的使用门槛。

4 结论

IUS 方法整合了结构化技术目录、参数化混合投入产出模型、多维度评估指标体系和 ESG 评估,形成了一套完整方法论框架。本研究分析了 IUS 方法的理论渊源和技术特征,以及在我国工业生态园建设中的实际应用案例,探索了 IUS 方法框架在我国水务行业中的能源优化、资源循环利用、智慧化集成等本土化的拓展方向,从技术、政策和数据 3 个角度分析了 IUS 方法的可行性,为我国水务行业现阶段实现的可持续发展目标,为复杂城市水系统循环发展提供了一个可行的科学分析和决策支持工具。它打破了传统水务行业的产水-供水-用水-排水的线性模式,通过促进水的生产服务与整个城市的生产消费间的合作,为包括水资源在内的城市资源循环建立一个闭环的代谢网络。

本文还指出 IUS 方法的进一步发展还需要结合我国实际情况,从跨部门协作、打破数据共享壁垒、完善数据生态、建立统一标准等方向进行优化。作为一种系统性的分析框架与决策工具,为我国水务行业提供一条整合智慧运营与低碳管理的科学可行的路径,推动水务行业从传统的末端治理向循环共生型系统演进,为我国水务行业实现绿色低碳与智慧升级提供一个系统性解决方案。

尽管 IUS 方法作为一套可操作的系统分析工具,要在我国较为复杂的管理体系中实现应用,仍有许多问题需要进一步研究:一是如何提高模型的动态性和适应性,更好地处理时间变化和不确定性;二

是如何建立更加完善的数据共享机制,提高数据质量和可靠性;三是如何创新商业模式,实现项目的可持续运营。

参考文献

- [1] Daniotti S, Hartog M, Neffke F. The coherence of US cities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2025, 122(37): e2501504122.
- [2] Kennett C. Identifying potential industrial and urban symbiosis opportunities [D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2024.
- [3] Martin M, Harris S. Prospecting the sustainability implications of an emerging industrial symbiosis network [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 138: 246 – 256. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.07.026.
- [4] Daddi T, Nucci B, Iraldo F. Using life cycle assessment (LCA) to measure the environmental benefits of industrial symbiosis in an industrial cluster of SMEs [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 147: 157–164. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.090.
- [5] 张金屯. 应用生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Zhang J T. Applied ecology[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [6] Ausubel J H. Industrial Ecology: A coming-of-age story [J]. Resources Winter, 1998(130): 14–16.
- [7] Commoner B. The closing circle[M]. 1rd ed. New York: Knopf Publishing Group, 1971.
- [8] 马学禄. 用“宇宙飞船式低碳经济模式”积极应对后经济危机[J]. 中国高新区, 2010(4): 24–25.
Ma X L. Actively respond to the post-economic crisis with "spaceship-style low-carbon economic model" [J]. Science & Technology Industry Parks, 2010(4): 24–25.
- [9] 王元亮. 基于产业共生的园区循环经济发展模式研究[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2019.
Wang Y L. Research on the development model of circular economy in park based on industrial symbiosis [M]. Beijing: Social Sciences Literature Publishing House, 2019.
- [10] Lombardi D R, Laybourn P. Redefining industrial symbiosis: Crossing academic-practitioner boundaries [J]. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(1): 28–37.
- [11] Wang J, Zeng Q K, Zhao J L, et al. Eco-transformation strategy for traditional industrial parks in China: Perspectives from system engineering theory [J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2015, 14(10): 2309–2317.
- [12] 范连颖. 日本循环经济的发展与理论思考[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2008.
Fan L Y. Development and theoretical thinking of Japan's circular economy [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2008.
- [13] 张璇. 基于投入产出的工业园区循环经济评价体系研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2013.
Zhang X. Research on the circular economy evaluation system of industrial parks based on input-output analysis [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2013.
- [14] 吴凯伦. 区域产业生态经济系统中的产业关联效应及共生优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
Wu K L. Research on the industrial association and symbiosis optimization in regional industry eco-economic system [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [15] Chertow M R, Lombardi D R. Quantifying economic and environmental benefits of co-located firms [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(17): 6535–6541.
- [16] Bauer S, Linke H J, Wagner M. Combining industrial and urban water-reuse concepts for increasing the water resources in water-scarce regions[J]. Water Environment Research, 2020, 92(7): 1027–1041.
- [17] Hu W Q, Tian J P, Li X, et al. Wastewater treatment system optimization with an industrial symbiosis model: A case study of a Chinese eco-industrial park [J]. Journal of Industrial Ecology, 2020, 24(6): 1338–1351.
- [18] 吴捷, 代兴兰, 吕文斌, 等. 珠江源头化工园规划水资源论证分析[J]. 人民珠江, 2024, 45(s1): 96–100.
Wu J, Dai X L, Lü W B, et al. Analysis of water resources planning of chemical industrial parks at the source of the Pearl River[J]. Pearl River, 2024, 45(s1): 96–100.
- [19] Wadström C, Södergren K, Palm J. Exploring total economic values in an emerging urban circular wastewater system [J]. Water Research, 2023, 233: 119806. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119806.
- [20] Rohde-Lütje A, Wohlgenuth V. Recurring patterns and blueprints of industrial symbioses as structural units for an IT tool [J]. Sustainability, 2020, 12(19): 8280.
- [21] Yazan D M, Romano V A, Albino V. The design of industrial symbiosis: An input-output approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 129: 537–547. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.160.
- [22] Hu W Q, Guo Y, Tian J P, et al. Energy and water saving potentials in industrial parks by an infrastructure-integrated symbiotic model [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 161: 104992. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104992.
- [23] Bußwald P, Spinadel L P, Besse V, et al. ICERI2024 Proceedings: Urban menus: Enhancing decision-making in early-stage projects [C]// 17th Annual International Conference of Education, Research and Innovation, 11–13 November, Seville, Spain, 2024: 8770–8779.
- [24] Trokanas N, Cecelja F, Raafat T. Semantic input/output matching for waste processing in industrial symbiosis [J]. Computers & Chemical Engineering, 2014, 66: 259–268. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2014.02.010.

- [25] Hagman L, Feiz R. Advancing the circular economy through organic by-product valorisation: A multi-criteria assessment of a wheat-based biorefinery [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, 12(11): 6205–6217.
- [26] 俞辰茜, 张翔宇, 韦政, 等. 基于 ESG+E 的城镇污水处理厂评价体系研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2025(2): 132–140.
Yu C X, Zhang X Y, Wei Z, et al. Performance evaluation system of urban wastewater treatment plants based on ESG + E [J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2025(2): 132–140.
- [27] Zhang Y, Qiao Q, Yao Y. Study of eco-industrial park concept and connotation [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 737: 974 – 979. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.737.974.
- [28] Fraccascia L, Yazan D M, Albino V, et al. The role of redundancy in industrial symbiotic business development: A theoretical framework explored by agent-based simulation [J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 221: 107471. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.08.006.
- [29] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
National Bureau of Statistics. *China statistical yearbook 2024* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.
- [30] 刘然彬, 于文波, 张梦博, 等. 城镇水务系统碳核算与减碳/降碳规划方法[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(8): 1–10.
Liu R B, Yu W B, Zhang M B, et al. Carbon accounting and reduction planning in urban water sector [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(8): 1–10.
- [31] 姚大伟, 张建新, 张荣兵, 等. 北京市某大型水务集团碳中和规划与实践[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(14): 19–24.
Yao D W, Zhang J X, Zhang R B, et al. Carbon neutrality plan and practice of a large water group in Beijing [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(14): 19–24.
- [32] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
China Urban Water Supply and Drainage Association. *Technical guide for carbon accounting and emission reduction pathways in urban water systems* [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [33] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于印发“十四五”循环经济发展规划的通知 [EB/OL]. (2021–07–01) [2025–12–19]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/content_5623077.htm.
National Development and Reform Commission. Notice of the National Development and Reform Commission on Issuing the 14th five-year plan for circular economy development [EB/OL]. (2021 – 07 – 01) [2025 – 12 – 19]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/content_5623077.htm.
- [34] 国家发展改革委. “十四五”水安全保障规划 [EB/OL]. (2021–12–22) [2025–12–19]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18623>.
National Development and Reform Commission. Water security assurance plan for the 14th five-year plan period [EB/OL]. (2021–12–22) [2025–12–19]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18623>.
- [35] 住房和城乡建设部, 国家发展改革委. 住房和城乡建设部 国家发展改革委关于印发“十四五”全国城市基础设施建设规划的通知 [EB/OL]. (2022–07–07) [2025–12–19]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/31/content_5703690.htm.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, National Development and Reform Commission. Notice of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development and the National Development and Reform Commission on issuing the national urban infrastructure construction plan for the 14th five-year plan period [EB/OL]. (2022–07–07) [2025–12–19]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/31/content_5703690.htm.
- [36] 国家发展改革委, 住房和城乡建设部. 国家发展改革委 住房和城乡建设部关于印发《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》的通知 [EB/OL]. (2021–06–06) [2025–12–19]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202106/t20210611_1283168.html.
National Development and Reform Commission, Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Notice of the National Development and Reform Commission and the Ministry of Housing and Urban-Rural Development on Issuing the 14th Five-Year Plan For Urban Sewage Treatment And Resource Utilization Development [EB/OL]. (2021–06–06) [2025–12–19]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202106/t20210611_1283168.html.
- [37] Sheng D, Lou Y, Sun F F, et al. Reengineering and its reliability: An analysis of water projects and watershed management under a digital twin scheme in China [J]. *Water*, 2023, 15(18): 3203.
- [38] 乐伊雄, 李成易, 瑜王. 智慧水利大数据平台建设 [J]. *服务科学和管理*, 2024, 13(4): 409–13.
Le Y X, Li C Y, Yu W. Construction of a Big Data Platform for Smart Water Management [J]. *Service Science and Management*, 2024, 13(4): 409–13.
- [39] 何俊仕, 尉成海, 王教河. 流域与区域相结合水资源管理理论与实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
He J S, Yu C H, Wang J H. Theory and practice of water resources management combining basin and region [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006.

(下转第 122 页)

- [6] Yu H R, Wang Y, Li T, et al. Calibrating activated sludge models through hyperparameter optimization: A new framework for wastewater treatment plant simulation[J]. *npj Clean Water*, 2025, 8: 80. DOI: 10.1038/s41545-025-00513-y.
- [7] 翟海涛, 罗淑葱, 李慧赞, 等. 蒙特卡洛算法在水动力水质模型(DYRESM-CAEDYM)参数优选中的应用[J]. *生态科学*, 2014, 33(1): 38-45.
Zhai H T, Luo L C, Li H B, et al. Application of Monte-Carlo Method in parameter optimization of hydrodynamice-water quality model (DYRESM-CAEDYM) [J]. *Ecological Science*, 2014, 33(1): 38-45.
- [8] 祝嘉禄, 白海梅, 夏四清. 合流制大型污水处理厂全流程工艺建模模拟实践[J]. *净水技术*, 2024, 43(s1): 184-191.
Zhu J L, Bai H M, Xia S Q. Modeling and simulation practice of the full-scale treatment process for a large-scale combined system WWTP [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43 (s1): 184-191.
- [9] Hauduc H, Rieger L, Ohtsuki T, et al. Activated sludge modelling: Development and potential use of a practical applications database[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(10): 2164-2182.
- [10] 陈宁, 王晓东, 吴宇行. 活性污泥模型变量与参数的律定及改进应用研究[J]. *给水排水*, 2022, 48(s2): 230-240.
Chen N, Wang X D, Wu Y X. Study on the law determination and improved application of activated sludge model variables and parameters [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48 (s2): 230-240.
- [11] Iordanis I, Koukouvinos C, Silou I. On the efficacy of conditioned and progressive Latin hypercube sampling in supervised machine learning [J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2025, 208: 256-270. DOI: 10.1016/j.apnum.2023.12.016.
- [12] Zhu J. Detailed modelling of the treatment performance of the future full-scale biofiltration lane of the Seine Aval wastewatertreatment plant [D]. Compiègne: Université de Technologie de Compiègne, 2020.

(上接第 113 页)

- [40] T/CI 470—2024 工业企业智慧水务管理系统建设技术导则[S].
T/CI 470—2024 Technical guidelines for construction of industrial enterprises intelligent water management system[S].
- [41] A II /017—2023/017—2023 城镇智慧供水数据治理 元数据标准[S].
A II /017—2023 Metadata specification for water big data [S].
- [42] T/CSUS 69—2024 智慧水务技术标准[S].
T/CSUS 69—2024 Technical standard for smart water[S].
- [43] 彭骞. 基于 SaaS 的 GIS 服务平台在智慧水务中的应用 [J]. *计算机科学与应用*, 2024, 14(5): 108-114.
Peng Q. Application of SaaS-based GIS service platform in smart water management [J]. *Computer Science and Applications*, 2024, 14(5): 108-114.
- [44] Lin J Y, Bryan B A, Zhou X D, et al. Making China's water data accessible, usable and shareable[J]. *Nature Water*, 2023, 1(4): 328-335.