工业用水循环利用技术现状及节水路径探析

王汉波

（锡林郭勒盟水利局综合保障中心，内蒙古 锡林郭勒 026000）

摘　要　随着工业化的不断推进，工业用水量持续增加，水资源供需矛盾日益突出，针对工业用水循环节水路径碎片化、系统协同效率不足及影响因素作用机制不清晰等问题。本文以典型工业园区为依托，结合工业共生、生命周期评价（Life Cycle Assessment，LCA）、循环工业理念，构建基于多方位综合考虑的节水优化模型，并开展工业用水循环利用技术及节水路径研究，提出节水优化路径。结果表明，相比于传统运行模式及单一技术优化模式，该优化模型可有效提升水资源利用效率，并通过强化工业共生网络协同、提升技术适配性及引入 LCA 环境约束，实现工业用水系统的多目标协同优化，为工业节水路径优化及减污降碳协同决策提供理论参考。

关键词　工业用水循环；节水路径；工业共生；水资源优化

中图分类号：TQ085　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.023

0　引言

随着世界各国工业化程度不断提升，以及水资源分布极不平衡，使得各行业取水量和用水需求不断增加[1]。另外，在传统工业生产方式中，大量废水被直接排放到自然环境中，不仅水资源浪费严重，而且产生环境破坏。为提高水资源利用效率和响应“双碳”政策，进行了大量水处理及水循环利用技术应用研究。目前，水处理及水循环研究主要围绕工业共生、水处理评定标准及回收处理等方面开展研究[2]，虽然实现了废水资源化与梯级利用，有效降低了区域取水量与污染排放，并为水处理工艺选择与系统优化提供了环境约束依据，但是仍存在节水路径碎片化、影响因素作用机制不清晰以及缺乏统一综合分析框架等问题[3]。基于此，本文基于实际水循环技术，结合工业共生、LCA 及循环工业，提出基于多方位综合考虑的节水优化模型，为工业水资源节水路径优化及减污降碳协同决策提供理论基础。

1　工业用水循环利用技术理论基础与分析框架

为保证基于多方位综合考虑的节水优化模型科学性、系统性及适用性，本文结合工业共生理论、LCA 理论及循环工业理论，构建工业节水优化模型，如图 1 所示。并通过综合优化目标函数，将工业用水系统节水优化问题转化为多目标决策问题，表达式如下。

$$\min F=\omega_1 W+\omega_2 E+\omega_3 C+\omega_4 P \tag{1}$$

式（1）中，W 为取水量，E 为系统能耗，C 为经济成本，P 为基于 LCA 方法计算的环境影响总量，ω_1、ω_2、ω_3、ω_4 为对应目标的权重系数。为进一步保证模型结果的稳定性和准确性，引入式（2）、式（3）约束条件。

$$R\geq R_{\min},\ Q_{\text{reuse}}\leq Q_{\max} \tag{2}$$

$$C\leq C_{\text{budget}},\ P\leq P_{\text{limit}} \tag{3}$$

式（2）、式（3）中，R 为实际回用率，$R_{\min}$ 为最低允许回用率，Q_{reuse} 为实际再生水使用量，$Q_{\max}$ 为最大可利用再生水能力，C_{budget} 为可承受预算，P_{limit} 为环境允许上限。

2　工业用水循环利用技术现状分析

为提高多方位节水优化模型的求解与应用精准性，本文从技术应用与系统模式两个方面系统梳理与分析现有工业用水循环利用技术及运行模式。

2.1　典型工业用水循环技术

在典型工业用水循环技术应用中，现有工业废水处理及回用技术主要按照处理原理与功能，将处理技术划分为物理处理、化学处理、生物处理及膜分离与深度处理。其中，物理处理通过去除水中的悬浮物、大颗粒物质等实现废水处理；化学处理主要基于混凝、氧化、中和等反应，除去水中的悬浮物、不溶性有机物及酸碱性物质等；生物处理主要通过微生物分解有机物；分离与深度处理主要通过超滤、反渗透等膜法工艺，以及臭氧氧化、高级氧化等深度处理技术，开展废水处理。

作者简介：王汉波（1989-），男，本科，工程师，研究方向：水资源管理。

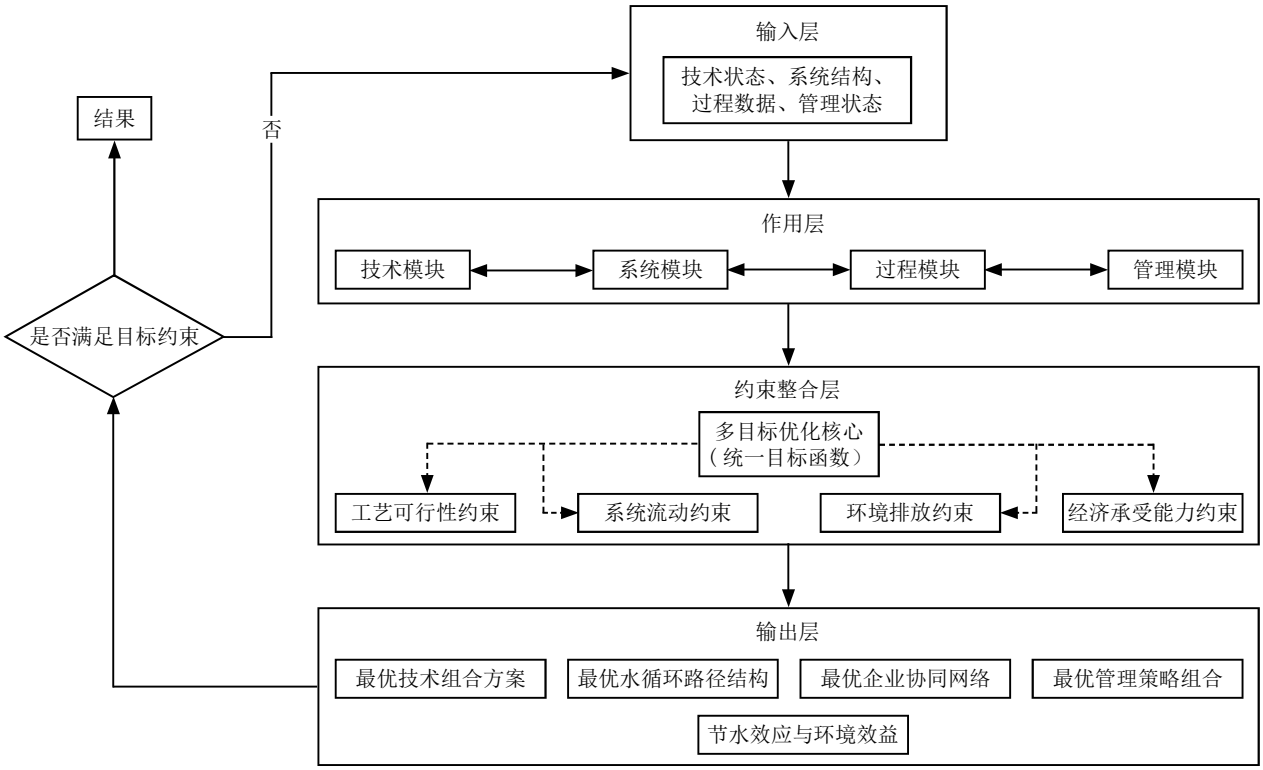


图1 节水优化模型流程图

2.2 工业共生型水循环模式

为进一步提高水资源利用效率，随着水循环应用研究开展，工业用水循环主要从单一企业内部水循环模式转向跨企业、跨系统协同利用演化。因此，本文基于工业共生理论，按照资源配置范围与系统组织结构不同，将工业共生型水循环模式划分为企业间水交换模式与园区级集中循环用水模式。

1. 企业间水交换模式。该模式适用于具有上下游关系的分散企业，水质要求不高的一方接收其上游企业排放符合要求的工业废水，经简易处理后使用，点对点供水方式，操作简便，适合中小企业。

2. 园区级循环用水模式。该模式中的工业园区建立集中式污水处理及再生水厂，收集园区内各企事业单位产生的工业废水，集中处理后，根据各企事业单位不同水质及水量要求，利用专用管道进行分配，形成整个园区内的水循环系统，便于大规模节水减排。

2.3 工业用水循环利用现存问题

在工业用水循环利用技术及模式运行过程中，虽然单一技术优化与局部系统构建研究效果显著。但是，在实际工程应用过程中仍存在多维度制约因素。因此，本文按照工业用水系统运行机制与影响因素的差异，从技术水平、系统协同、经济约束与管理机制四个维度探究工业用水循环[4]。

1. 技术水平。在工业用水循环利用中，由于各种污水处理方法对污染物去除机理及处理程度不同，在实际工程中单一技术无法解决高变异性废水处理问题。目前整个技术体系表现为局部高效但是整体适应性较差特点。

2. 系统协同。工业用水循环系统运行过程中，由于生产工艺、水质需求及用水节奏等因素影响，水资源主要以企业为依托，进行独立配置，导致再生水分配效率低下。另外，受限于输配管网体系不完善及调度能力不足，系统整体难以形成稳定闭环的水循环结构。

3. 经济约束。在废水处理中，尽管膜分离、高级氧化等高效技术可以大幅改善出水水质，但是这些技术需要较大的设备投入、大量的药品消耗以及不断产生的运营费用，使得企业更多考虑使用低成本、简单易操作的传统工艺。

4. 管理机制。工业水循环管理过程中，由于企业用水主体分散、管理层级复杂以及信息共享机制不完善等因素，水资源统筹管理难以形成统一协调机制。另外，水质检测、用水计量及全过程监管体系与系统运行数据完整性、实时反馈息息相关。因此，管理机

制与制度体系在一定程度上制约了工业用水系统的高效协同与优化运行。

3 工业用水循环利用关键影响因素分析

为了进一步探究工业用水循环系统中影响因素的作用机制及其对水资源利用效率的影响路径。本文基于工业用水循环利用技术现状及存在问题，结合工业共生理论与 LCA 方法，从技术、系统、经济、管理与政策及环境五个方面开展关键影响因素分析研究。首先，基于工业共生理论分析工业用水系统的资源流动关系与结构特征，实现系统内部水资源交换与协同机制构建。其次，引入 LCA 方法，对水处理全过程能源消耗与环境负荷进行约束分析，进一步识别环境维度的关键影响边界。在此基础上，对影响工业用水系统运行效率的关键因素进行识别与提取。最后，从技术水平、系统结构、经济约束、管理与政策以及环境约束五个维度分析各因素对工业用水循环效率的作用路径与传导机制[5]。

4 工业用水循环利用优化模型验证分析

4.1 案例概述与研究设计

为保证优化模型的精准性与适用性，基于典型工业园区，结合以上各种因素对技术水平、系统结构、经济约束、管理和政策以及环境约束进行评估。然后将其转化为模型中的参数约束或权值，实现定性因素向定量变量的统一映射。其中，该园区以多行业混合用水系统为特征，涵盖化工、制造及能源相关企业，用水结构复杂且波动性较强，具有典型的工业共生水循环特征。

4.2 验证分析

为验证多因素优化模型在工业用水循环中水处理的有效性与适用性，基于指标映射体系，将技术水平、系统结构、经济约束及管理环境等因素统一转化为模型输入参数，并结合典型工业园区历史运行数据与水系统清单数据进行对比分析。另外，统一采用功能单位对指标进行归一化处理，选取传统运行模式与单一技术优化模式作为对照基准，从取水量（W）、回用率（R）、系统能耗（E）、运行成本（C）及环境影响（P）五个维度进行综合评估。由表 1 可知，相比于传统运行模式与单一技术优化模式，多方位节水优化模型使取水量降至 0.70，同时回用率提升至 78%，表明该模型有效提高再生水循环性能。另外，将系统能耗、运行成本及环境影响指标分别降至 0.88、0.82 及 0.8，在多重约束耦合作用下，实现了工业用水系统的整体协同优化。即通过提升工艺适配性与多技术组合性能，有效提高水循环整体处理稳定性与回用性能。然后，基于工业共生网络结构优化，强化企业间水资源流动与再生水调度能力。另外，通过引入经济成本约束与 LCA 环境约束，实现水资源利用效率、经济性与环境影响之间的动态平衡。

表 1 不同方案工业用水系统运行效果对比

指标	传统运行模式	单一技术优化模式	节水优化模型
W（相对值）	1	0.85	0.7
R（%）	45	60	78
E（相对值）	1	0.95	0.88
C（相对值）	1	0.9	0.82
P（相对值）	1	0.92	0.8

5 结论

针对节水路径碎片化、影响因素作用机制不清晰及系统协同不足等问题，本文提出了多方位综合考虑的工业用水节水优化模型。结合工业共生理论、LCA 方法及循环工业理念，并通过典型工业园区案例开展验证分析。结果表明：（1）节水优化模型能够有效实现取水量、能耗、经济成本与环境影响的协同优化。（2）相比于传统运行模式与单一技术优化模式，节水优化模型在技术、系统、经济、管理及环境多重约束耦合作用下，有效解决了传统方法中局部优化明显、整体效率不足的问题。（3）该模型在取水量降低、回用率提升、能耗下降、成本优化及环境保护方面影响显著，进一步验证了模型的有效性与适用性。本文的研究实现了工业共生、LCA、循环工业理论与工业用水紧密结合，在促进企业提高水资源利用效率的同时，可进一步促使工业生产走向循环、低碳，推动行业的绿色发展。

参考文献：

[1] 李圣.辽宁省用水结构与水资源承载力分析[J].东北水利水电,2026,44(06):16-20,29.

[2] 史发辉.民乐县农业水资源循环利用模式实践分析与优化路径[J].农业技术与装备,2026(05):52-53,56.

[3] 周海炜,王洪飞.节水视域下企业可持续水管理动因及路径研究[J].软科学,2024,38(02):88-94.

[4] 高磊,魏垒垒,何良信,等.区域再生水循环利用系统的优化设计与实践应用[J].中国资源综合利用,2025,43(09):140-142.

[5] 严亚,王连锐,商崇菊,等.长江流域农业、工业用水效率区域差异及影响因素分析[J].长江科学院院报,2026,43(01):18-24.