

张岩. BioWin 建模软件在城镇污水处理厂应用进展[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 13-22, 42.

ZHANG Y. Application progress of BioWin modeling software in urban WWTPs[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 13-22, 42.

BioWin 建模软件在城镇污水处理厂应用进展

张 岩*

(上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘 要 【目的】在数字化转型浪潮推动下,城镇污水处理厂正加速从传统“治理”模式向智能“智理”模式转型。我国城镇污水处理厂普遍采用活性污泥法,亟需借助数字化建模工具实现工艺管理的精细化。BioWin 软件作为基于 ASM 模型开发的模拟平台,具备支持设计优化、水质预测、节能分析等多种功能,具备推广潜力,但相关应用研究尚不系统。【方法】文章系统梳理了近十年来 BioWin 软件在污水处理领域的国内外研究进展,归纳建模流程,分类总结其在工程设计、工艺诊断、运行优化及污染物削减模拟等方面的应用特点。【结果】BioWin 软件在实现精准模拟与工艺控制方面具有较高可靠性和适用性,能够有效辅助污水处理厂开展多维度技术管理。它的功能有助于设计修改的情景分析、操作策略评估以及能源和资源节约评估。但在模型本地化、输入参数获取和长期运行中存在一定技术瓶颈(例如进水特性、动力学系数)以及确保在不同的运行机制下模型的长期稳定性。【结论】BioWin 作为辅助污水处理厂智慧化发展的重要工具,具备显著的技术优势和推广前景。未来的研究应重点聚焦于模型本地化适配,与实时监测系统的深度融合及用户操作友好性的提升,实现动态模型更新和在线决策支持;增强用户界面和自动化功能以提高污水厂运行人员和工程师的可用性。解决这些方面将拓展其在城镇污水处理厂中的应用深度与广度,从而推动该行业的数字化和智能化转型。

关键词 BioWin 污水处理厂(WWTP) 工艺模拟 优化 机器学习

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)07-0013-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.002

Application Progress of BioWin Modeling Software in Urban WWTPs

ZHANG Yan*

(Shanghai Chengtou Wastewater Treatment Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract [Objective] Driven by the digital transformation wave, municipal wastewater treatment plants (WWTPs) are evolving from traditional “treatment” mode toward intelligent “smart management” mode. In China, activated sludge is commonly used in urban WWTP, highlighting an urgent need for digital modeling tools to achieve refined process control. BioWin, a simulation platform developed on ASM foundations, offers functionalities such as process design optimization, effluent quality prediction, and energy-saving analysis, demonstrating substantial potential for broader adoption. However, systematic studies on its practical applications remain limited. [Methods] This study presents a structured review of BioWin-related research over the past decade, encompassing both domestic and international literature. The general modeling workflow is delineated, and applications are categorized across key areas: engineering design, process diagnosis, operational optimization, and pollutant reduction simulation. Typical case examples are examined to illustrate application characteristics and identify method ological trends. [Results] BioWin delivers reliable and adaptable performance for precise simulation and process control, effectively supporting multi-dimensional technical management in WWTP. Its capabilities facilitate scenario analysis for design modifications, assessment of operational strategies, and evaluation of energy and resource savings. However, there are certain technical bottlenecks in model localization, input parameter acquisition, and long-term operation (such as influent characteristics and kinetic coefficients), as well as ensuring the long-term stability of the model under different operating mechanisms. [Conclusion] As a key tool for promoting the intelligent management of WWTP, BioWin

[收稿日期] 2024-10-23

[基金项目] 上海市科学技术委员会科技计划项目:污水处理流程低碳化重塑的技术验证与应用示范(22dz1205704)

[通信作者] 张岩(1986—),男,硕士研究生,研究方向为污水处理运行管理,E-mail:zhang4882479@163.com。

exhibits clear technical advantages and promising applicability. Future research should focus on model localization adaptation, deep integration with real-time monitoring systems, and improvement of user-friendliness to achieve dynamic model updating and online decision support; enhance the user interface and automation functions to improve the availability of operation personnel and engineers in WWTPs. Addressing these aspects will further broaden BioWin's application depth and scope in WWTP contexts, thereby advancing the digital and intelligent transformation of the sector.

Keywords BioWin wastewater treatment plant(WWTP) process simulation optimization machine learning

随着我国污水处理行业不断发展,城镇污水处理厂出水标准及政府监管愈发严格,据《中国城乡建设统计年鉴》(2022 年)统计全国共有 2 894 座城市污水处理厂。2023 年 1 月 19 日上海市生态环境局等八部门联合印发《上海市减污降碳协同增效实施方案》,推进污水处理厂节能降耗,优化工艺流程,提高处理效率;优化污水处理设施能耗和碳排放管理。依托节能降耗和“双碳”目标的背景,城镇污水处理厂的运行已经从最基本的水质达标,逐步往精细化、智能化、低碳化方向转变。因此,对于污水处理工艺运行的技术和管理要求也日趋提高,而目前大部分城市污水处理厂的运行管理调控基本依靠人工传统经验去做调整。随着城市污水处理厂向着智慧化、精细化、智能化方向的发展,在复杂动态工艺条件下污水处理厂的稳定达标并减少能耗和各种化学品的使用,实现各环节节能降耗和低碳运行,达到可持续高效运行管理的要求,采用机理模型实现对污水处理厂各种工艺段进行模拟和优化,实现各种条件下对污水厂进、出水水质进行预测,逐渐成为一种主流趋势。

机理模型主要以 20 世纪 70 年代国际水协提出的活性污泥模型(ASM)模型,后续随着计算机技术的发展,多种商业水处理模型软件问世,其中相对主流的包括 BioWin、West、Gps-X。上述软件在国外有较多的案例报道,利用 BioWin 工具开展模拟应用的文献案例报道相对较多,但目前国内没有详细描述 BioWin 工具在污水处理厂应用进展的文献,文章主要介绍 BioWin 软件在城市污水处理厂建立机理模型的应用案例及国内外最新的研究进展,以期为国内污水处理厂开展模拟提供一些参考和方向。

1 概述

污水处理厂利用机理模型建模的思路基本包括工艺流程的绘制、重要模型所需水质因子的确定、参数校准与模型验证等过程。工艺流程的绘

制主要通过污水处理厂的工程设计资料和相关工艺图纸,确认相关各段构筑物的数量和种类,利用建模工具绘制工艺流程图,核心的活性污泥工艺如果采用推流式生物系统类型或者生物池分为多组的廊道,可以通过多组相同的曝气单元进行模拟,完全混合式可用一组曝气单元进行模拟^[1]。模型建立后,需要进行相关参数设置。包括各个构筑物的尺寸、水质、水温、水力停留时间(HRT)、污泥龄(SRT)、混合液悬浮固体浓度(MLSS)等主要参数进行设置,其最核心的生物系统模型通过模型选项进行设定,包括了多种活性污泥模型、厌氧消化模型、旁流处理工艺模型等^[2]。污水厂日常运行参数也需要进行设定,包括内外回流比、剩余污泥排放量、溶解氧(DO)等运行参数。进水水质组分作为重要的输入因子需要进行确定,水质因子的选取对于建模十分重要,其中对于部分常规水质参数根据模拟的污水厂日常水质监测获取,部分水质组分数据需要进行一段时间内监测后计算得出,其他水质数据可利用模型的预设值。BioWin 系统默认采用化学需氧量(COD)组分表征各种参数,因此,对于 COD 组分的确定就显得十分重要,进水 COD 根据来源、溶解程度、生物降解特性分为可生物降解 COD、不可生物降解 COD 和进水中微生物体所含有的 COD,可生物降解 COD 又可细分为快速容易生物降解 COD(RBCOD),慢速可生物降解 COD(SBCOD),不可生物降解 COD 又可细分为溶解性不可生物降解 COD,颗粒性不可生物降解 COD,RBCOD 又可细分为易降解的快速水解 COD 和易降解挥发性脂肪酸(VFAs) COD,SBCOD 又可细分为慢速可降解胶体状 COD 和慢速可降解颗粒状 COD^[3],BioWin 进水水质组分的氮类营养盐,主要包括凯氏氮(TKN)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$,其中进水中硝酸盐和亚硝酸盐的浓度较低,故可将进水的 TKN 近似等于总氮(TN),BioWin 中的 TKN 主要分为 3 类:氨氮、有机氮、进水的生物体氮,其中有机氮分为

溶解性可生物降解氮、溶解性不可生物降解氮、颗粒性可生物降解氮、颗粒性不可生物降解氮。BioWin 中磷元素细分为溶解性磷酸盐、进水生物体中的磷、颗粒性不可生物降解磷和颗粒性可生物降解磷;进水的无机悬浮物 (ISS) 值对于生物池的 MLSS 以及挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS)/MLSS 影响较大,需要通过补充监测获得,而 pH、碱度、钙、镁等值一般可以用系统预设值。

在选取主要水质组分和工艺基本设备和设施参数后,需要进一步对参数进行敏感性分析,确认主要的参数。BioWin 使用了单一矩阵模型法,可以直观地观测各变量在不同工艺的变化情况^[4],该软件包括污水处理过程超过 50 种组分 80 个生物、物化反应过程^[5],模型参数多达 400 多个。参数可通过进行系列试验进行验证,敏感度较低或者一般的参数可以使用软件的预设值或经验估值。常用的敏感度分析方法包括常规敏感度分析和均方根 (RMS) 敏感度分析^[6],其中常规敏感度分析较常用,计算如式(1)。

$$S_{i,j} = \frac{\Delta y_i / y_i}{\Delta x_i / x_i} \quad (1)$$

其中: $S_{i,j}$ ——输入参数 x 取 x_i 时输出变量 y 对 x 的灵敏度;

y_i ——输入参数 x 取 x_i 时的输出变量值;

Δy_i ——输入参数 x 取 $\Delta x_i + x_i$ 时输出变量值;

Δx_i ——输入参数 x 的变化值。

式(1)定义为当参数 x 变化一定百分比(一般为 10%)输出变量(水质指标) y 变化的相对比例。具体判定标准为 $S_{i,j} < 0.25$,输入参数对模型输出结果无显著影响; $0.25 \leq S_{i,j} < 1$,输入参数对模型的输出结果有一定影响; $1 \leq S_{i,j} \leq 2$,输入参数对模型的输出结果有较大影响; $S_{i,j} > 2$,输入参数对模型的输出结果有极大影响。

为了提高模拟结果的准确度,需要对 BioWin 所用的参数进行校准,BioWin 软件包含的参数众多,因此,需要对参数进行敏感度分析,选取敏感度较高的对模型影响较大的参数进行校准,文献^[7-9]报道,反应动力学参数中水解速率,氨氧化细菌 (AOB)、亚硝酸盐氧化菌 (NOB)、异养微生物 (OHOs) 最大比增长速率,好氧衰减速率;化学计量参数中 OHOs

缺氧、好氧产率系数参数需要在软件模型中重点手动校准。建立好的模型在输入水量、浓度参数、水质特征参数和运行参数后,通过对上述反应动力学参数的不断修订,常规水质参数的数据如果利用在线数据需要剔除异常值,模型得出的模拟值与实测值置信度一般在 0.95 的置信区间内或者一般模拟值与实际值偏差为 5%~20%即为满足要求^[10]。模型验证时需要连续多天对所模拟的构筑物进出水进行连续的水质监测,通过对比模型数据和实际数据进一步修正模型的部分主要参数,使其模拟值与实际值接近为止^[11]。

2 BioWin 的国内、外应用进展

BioWin 作为一款专业的工艺模拟软件,在污水处理厂中的应用范围非常广泛,相比其他模拟软件,BioWin 的模型精度更高,功能全面,且内置了高度完善的生物反应模型(如 ASM1、ASM2d 等),并扩展了磷回收、甲烷生成、温室气体排放等领域的动态模型。模型可以根据不同水质、气候和运行条件灵活调整,且模型精度更高,内置模型的复杂性和完备性更适合直接工程应用。文章通过收集近 10 年国内外有关 BioWin 的研究文献,发现 BioWin 的应用主要涵盖了污水厂的辅助设计、多种工艺比选、不同控制条件和工况的模拟,基于模型校正后开展各类水质、能耗预测等多个方面的工作,其领域的研究热点如图 1 所示。

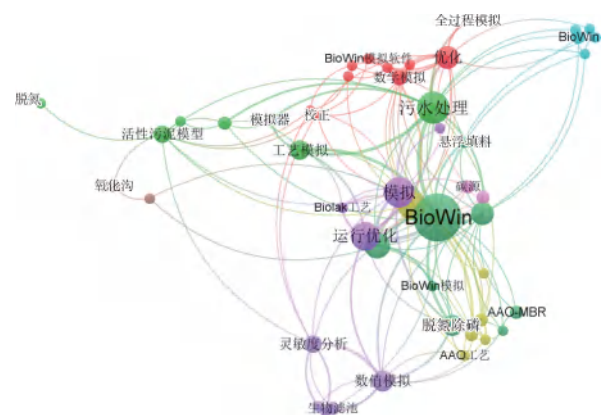


图 1 近 10 年 BioWin 模拟研究领域热点

Fig. 1 Research Hotspots in the Field of BioWin Simulation in the Last 10 Years

2.1 BioWin 在污水厂辅助设计的应用

通过检索近 10 年有关 BioWin 在污水厂辅助设计和工艺比选方面相关应用文献,如表 1 所示。

表 1 BioWin 辅助设计和不同工艺比选方面的应用案例

Tab. 1 Examples of BioWin Aided Design and Application in Comparison of Different Processes

序号 (设计)	国家	项目	处理规模/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	污水类型	核心处理工艺	报道年份	参考文献
1	克罗地亚	Koprivnica	20 000	生活污水	序批式活性污泥法(SBR)	2015 年	[12]
2	印度	Koramangala & Challaghatta	318 000	生活污水	常规活性污泥法	2021 年	[13]
3	加拿大	St. Mary+Adelaide	—	生活污水	厌氧流化床反应器(AnFBR)	2015 年	[14]
4	意大利	Lavis Landfill Leachate	300	垃圾渗滤液	SBR	2021 年	[15]
5	美国	The Mines Parks	0.8	生活污水	厌氧折流板反应器(ABR)	2022 年	[16]
6	罗马尼亚	Bucharest	89 600	生活污水	SBR	2022 年	[17]
7	澳大利亚	West Camden	21 000	生活污水	中温厌氧消化	2017 年	[18]
8	中国	—	—	生活污水	开普敦-膜生物反应器(UCT-MBR)	2021 年	[19]
9	中国	王小郢	300 000	生活污水	氧化沟	2014 年	[20]
10	澳大利亚	Central Park	114 000	生活污水	MBR	2022 年	[21]
11	埃及	El-Gouna	3 000	生活污水	移动床生物反应器(MBBR)	2023 年	[22]
12	加拿大	Western Ontario	37 854	生活污水	多种工艺	2019 年	[23]
13	乌拉圭	Uruguay	73 000	工业污水	常规活性污泥法	2021 年	[24]
14	中国	天津	450 000	生活污水	缺氧-好氧活性污泥法(AO)	2015 年	[25]
15	中国	重庆	5 000	生活污水+ 工业污水	厌氧-缺氧-好氧(AAO) 活性污泥法+氧化沟	2017 年	[26]
16	中国	同济大学/试验装置	0.02	生活污水	AAO	2018 年	[27]
17	中国	—	333 116	生活污水	AO	2022 年	[28]
18	中国	郑州某污水厂	30 000	生活污水	百乐克	2023 年	[29]
19	中国	木洞镇污水厂	5 000	生活污水	氧化沟	2020 年	[30]
20	中国	郑州某污水厂	30 000	生活污水	百乐克	2020 年	[31]
21	中国	北京某污水厂	18 000	生活污水	间歇式循环延时曝气活性污泥法 (ICEAS)	2015 年	[32]

由表 1 可知, BioWin 在污水处理厂主流工艺表现出全面的建模能力, BioWin 能模拟多种的生物和化学过程, 可实现对污水处理系统进行全面分析。Mohan 等^[13]使用 BioWin 构建了活性污泥模型/厌氧消化模型, 通过在生物系统中段新增一个缺氧区后, 通过模拟不同的工艺条件, 最终实现了氮、磷的达标排放。Shao 等^[19]通过 BioWin 建模评估改良工艺 UCT-AO 运行效果, 同时模拟了单污泥系统和双污泥系统对于脱氮的效果影响。陈建等^[26]对污水处理厂设计方案进行全流程模拟, 得出不同进水条件下对出水处理效果的影响。除了在水处理工艺模拟外, 在泥处理工艺模拟领域也表现较好。Nghiem 等^[18]利用 BioWin 评估了污泥酸相消化器模拟值与实际生物产甲烷潜力(BMP)计算值之间一致性, 可用于未来指导污泥酸相消化器的设计

和优化。Wang 等^[14]通过 BioWin 模拟评估了 AnFBR 工艺分别处理初沉污泥和浓缩污泥下 COD 和挥发性悬浮固体(VSS)的去除率, 并模拟了相同 SRT 条件下, 传统厌氧消化工艺的 VSS 去除率低于 AnFBR 工艺。BioWin 在污水处理厂提标改造或者升级扩容方面也发挥了较大的作用, Bentancur 等^[24]通过 BioWin 建模, 探讨了不同工艺路线的升级改造方案, 最终发现并采用提升污水厂总磷的去除效果的工艺。仇付国等^[32]利用 BioWin 软件模拟了该厂处理工艺, 针对出水氮、磷不达标问题, 通过对不同改造方案的模拟, 最终提出最优的改造方案。BioWin 在模拟污水和污泥处理不同工艺运行效果的前提就是对于 BioWin 模型参数的校准, 因此, 对于所获取的数据质量要求相对较高, 准确的建模需要高质量、详细的输入数

据,为此,有时需要现场连续补充监测数个月的数据,来满足模型的数据需求。尽管 BioWin 对于常规的污水和污泥工艺模拟效果较好,但可能存在一些特定的处理过程或新兴技术未得到充分支持,需要进一步开发和完善。

2.2 BioWin 用于污水厂运行优化的应用

BioWin 是基于活性污泥模型(ASM)的污水处

理建模软件,它具有直观的图形界面,简化的模型的创建和操作以及配置多种可视化工具。在污水处理领域,BioWin 对模拟不同污染物(如氨氮、总磷、有机物等)的去除机制,提供深入理解和优化依据,在模拟不同工艺参数的选择和优化、能耗和成本优化以及动态模拟和控制策略方面的研究和应用方面有较多进展,如表 2 所示。

表 2 BioWin 工艺优化和节能降耗方面的应用案例

Tab. 2 Application Cases of BioWin Process in Optimization and Energy Saving and Consumption Reduction

序号 (设计)	国家	项目	处理规模/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	污水类型	核心处理工艺	报道年份	参考 文献
1	美国	Falkenburg	35 086	生活污水	氧化沟	2015 年	[33]
2	埃及	Helwan	3 680	工业污水	生物脱氮除磷工艺(BNR)	2018 年	[34]
3	加拿大	Western Ontario	37 854	生活污水	改良脱氮除磷工艺(MLE)	2024 年	[35]
4	埃及	Gabal Elasfar	100 000	生活污水	普通活性污泥法	2019 年	[36]
5	加拿大	Adelaide	-	生活污水	-	2013 年	[37]
6	澳大利亚	悉尼科技大学/试验装置	0.005	生活污水	MBR	2024 年	[38]
7	中国	王小郢	300 000	生活污水	氧化沟	2014 年	[39]
8	中国	常州某污水厂	500 000	生活污水	AAO	2015 年	[40]
9	中国	哈尔滨工业大学/试验项目	0.094	生活污水	三级 AO	2022 年	[41]
10	中国	郑州新区污水厂	650 000	生活污水	倒置 AAO	2023 年	[42]
11	中国	昆明市某污水厂	300 000	生活污水	AAO	2017 年	[43]
12	中国	华南理工大学/试验项目	37.5	生活污水	AAO+MBR	2022 年	[44]
13	中国	汤逊湖污水厂	60 000	生活污水	AAO	2020 年	[45]
14	中国	北京某污水厂	30 000	生活污水	AAO+MBR	2016 年	[46]
15	中国	深圳某污水厂	200 000	生活污水	AAO	2019 年	[47]
16	中国	广东某生活垃圾焚烧发电厂	220	生活污水	厌氧+AO	2023 年	[48]
17	中国	西安某污水站	240	生活污水	AAO	2015 年	[49]
18	中国	碧水污水厂	45 000	生活污水	多级 AO	2020 年	[50]
19	中国	河南某污水厂	60 000	生活污水	AAO	2021 年	[51]
20	丹麦	Ejby Mølle	-	生活污水	巴顿普(Bardenpho)工艺	2015 年	[52]
21	美国	九泉污水处理厂	189 300	生活污水	强化除磷工艺(EBPR)	2023 年	[53]

BioWin 模拟帮助优化关键操作参数(如曝气量、污泥龄、回流比等),以提高处理效果和能效。研究通过模拟不同参数设置的影响,找到最佳操作参数^[42-45]。通过 BioWin 模拟,可以提供详细的工艺性能数据,支持决策者在工艺选择时考虑多种因素,如污染物去除效率、操作稳定性、运行成本和环境影响。通过模拟分析能源使用和成本结构,研究^[33,39,47,49]人员可以识别并优化能耗和运行成本,寻找能耗最低、成本最优的操作方案。BioWin 支持

污水处理工艺的动态模拟,研究者^[41,46,50]可以模拟处理系统在不同负荷条件下的动态响应,开发并验证先进的控制策略,如实时控制(RTC)系统,以应对负荷波动和提高系统稳定性。BioWin 被用于新型处理工艺如厌氧膜生物反应器^[3]、厌氧氨氧化^[14]、同步硝化反硝化(SND)^[15]等的模拟和验证,改进脱氮除磷工艺,评估其在不同工况下的表现和优化潜力。除此之外,BioWin 还被用于污泥处理和资源回收;研究通过 BioWin 模拟污泥厌氧消化处理工

艺^[37]和磷资源回收^[53],优化处理条件,提高资源回收率 and 经济效益。

尽管文献已报道诸多工艺优化的案例,然而大部分案例聚焦于单一的生物处理工艺,尤其是 AAO 工艺进行模拟,鲜有对组合工艺的联动模拟的相关报道。同时,现有模型通常假定设施和处于理想运行状态,诸如水量分配均匀、曝气均匀、回流泵效率稳定等,但在实际情境中,设备性能的波动对工艺效果有着显著影响,此类问题却尚未得到充分探讨。再者,在多数案例中,污水处理厂实际运行过程中常常面临动态变化,如流量波动、负荷突增等情况,而理论模拟通常基于稳态或简化的动态条件,难以全面反映非稳态过程,相关文献在这方面的研究仍有待完善。

BioWin 作为一种强大的污水处理建模工具,在工艺选择和优化方面具有显著优势,提供了全面的模拟能力和强大的优化功能,能够详细模拟生化 and 化学过程,如有机物降解、氮和磷的去除等,为工艺优化提供数据支持,同时具有友好的图形化界面、可视化工具和高级分析功能包括敏感性分析、参数校准和不确定性分析等,可以帮助用户更加深入地理解和优化工艺。然而,其高成本、学习的难度和复杂性也可能成为一些用户的挑战,同时对于一些新兴技术以及微污染物支持不够全面,需要额外地定制和开发。尽管如此,对于有足够资源和技术支持的组织,BioWin 无疑是进行污水处理工艺设计和优化的有力工具。

2.3 BioWin 用于污水厂部分指标预测的应用

BioWin 在污水处理厂预测水质、预测各单元能耗和预测厌氧消化产沼气等方面有较多报道,说明 BioWin 在预测方面也具有较大的应用价值。BioWin 能够模拟基于校正后的水质模型模拟多种水质参数[如五日生化需氧量(BOD_5)、COD、总悬浮固体(TSS)、氨氮、TN、总磷等],提供精确的水质预测^[54-57];通过动态模拟功能,可以预测在不同工况条件下生物系统的水质变化,帮助优化处理工艺和运行策略^[58-60]。BioWin 能够详细模拟各单元能耗,能够识别能耗较高的环节,通过模拟不同参数对能耗的影响,优化能耗配置,实现节能减排,降低碳排放量,结合预测结果,评估处理工艺的能效,寻找能效提升的空间和措施,基于能耗预测,开发并应用节能策略,如优化曝气系统、改进搅拌设备等,降低能

源消耗,多个污水处理厂通过 BioWin 模拟实现了能耗优化,案例研究^[61]表明节能效果显著,节能率可达 10%~30%。BioWin 能够模拟厌氧消化过程,预测有机物降解和沼气产量,为厌氧消化系统的设计和优化提供支持,通过模拟不同进料条件和操作参数,预测厌氧消化系统的沼气产量,优化操作参数以提高产气效率^[62-63]。结合沼气产量预测,优化沼气的收集和利用方案,如用于发电、供热等,提高资源利用效率^[64]。通过上述文献报道的成果可以看出,BioWin 在离线模拟方面具有较多报道,能够体现出 BioWin 强大的应用潜力和实际价值。但是在与在线监测系统集成,利用实时数据进行模拟和预测,提高预测的及时性和准确性方面以及参与 RTC,基于实时水质预测,开发和应用先进的控制策略,优化处理效果,减少污染物排放等方面鲜有报道。

2.4 BioWin 用于药剂投加控制的应用

投加药剂是一部分城镇污水处理厂实现稳定达标的关键措施,除磷药剂包括铁盐、铝盐等金属离子成分的混凝剂;脱氮碳源包括乙酸钠、甲醇、葡萄糖等。随着商业化模型软件 BioWin 的出现,比较多的学者借助 BioWin 开展了药剂投加的优化和精细化控制。陈珺等^[65]采用 BioWin 模拟了慈溪东部污水厂的化学除磷工艺段,通过参数校正后,BioWin 可准确模拟基于较新的表面络合机理的化学除磷过程。李晓昕等^[66]利用 BioWin 模拟不同加药点位投加铁盐药剂进行化学除磷的过程,结果显示,前置加药化学强化生物除磷方案最优,其所形成的铁羟基氧化物(HFO)高活性表面+($H_2PO_4^-$)组分占比是其他投加方式的 2 倍,约 61.5%的“P-正磷酸盐”被 HFO 通过共沉淀、吸附作用转变为“(HFO+P)”。王骞等^[67]对重庆永川污水处理厂利用 1 年半时间的数据建立 BioWin 工艺模型,在进水水质特性、出水水质稳定达标的前提下,模拟了平均状态、极端条件、历时波动等情境下的碳源投加定量评估,结果显示,甲醇年投加量可减少 60%~80%。Tolentino 等^[68]利用 BioWin 建立了 BNR 工艺模型,通过模拟增大缺氧池容积,延长缺氧池停留时间以及利用响应曲面法(RSM)优化甲醇的不同投加点位的分配比例,实现 TN 去除效率提高 16%,运行成本降低了 4.12%,甲醇用量减少了 8.96%。

通过对近 10 年国内外文献的调研得出,BioWin 主要被用于对污水处理厂的辅助工艺设计、工艺优

化,水质预测、节能降耗等方面,除上述应用领域较多研究案例以外,BioWin 被用于污水厂竣工验收的功能性测试^[69],开展某些药物在污水系统的降解预测^[70]等,在碳排放和碳足迹核查相关领域鲜有报道。

3 结论与展望

BioWin 虽然具有应用领域较广,建模能力较强,界面友好等优点,但是工程技术人员在实际应用过程 BioWin 过程中也存在一些问题,主要包括以下几点内容。

(1) BioWin 内置的模型对理论基础有着高度的依赖性,以 ASM 模型为例,对其核心参数的认识与理解乃是构建模型的根基。面对不同性质、不同季节以及不同工况下的污水,微生物动力学参数与进水组分均会出现变化。操作人员需依据各异场景合理选取各参数数值,这对其专业素养有着较高要求。与此同时,复杂的模拟及优化过程离不开高性能计算机的支持,对辅助计算的硬件设施同样存在一定要求。

(2) 包括 BioWin 在内的水处理建模软件,在被用于指导现场运行时,呈现出偏重理想化与理论化的问题。一方面,项目现场的整体水力高程、配水情形、设备运行状况以及各设施内水的流态等不尽相同,现场工况极为繁杂;另一方面,在复杂的实际工况下,此类软件可能暴露出适用性欠佳的问题。例如:高浓度工业废水中的特殊污染物反应动力学与模型不相契合,非标工艺(如组合工艺、自然处理工艺)的模拟精度欠佳。在实践过程中发现,在为模型制定出水控制目标后,模型给出的具体调控方案与实际现场条件存在冲突,以生物池出水氨氮模拟为例,模型给出的曝气量过低,曝气区无法达到理想的混合效果,不得不为模型设置保底值来实现正常运行。

(3) BioWin 在线模拟时,对于现场的在线传感器的数量和维护水平也提出更高要求,这进一步增加了污水厂的运行成本。当前,诸多污水厂的现有数据难以直接用于模型校验工作,需要对现有的数据进行清洗或者补充监测。此外,针对不同地区的污水厂,均需要采集水样以重新标定进水水质组分,但目前针对进水组分的测定方法尚未形成统一标准的监测方法,当务之急,需要尽快

形成对于进水组分测定的一套标准监测方法。同时对于过程参数进行重新率定,前期整体工作量投入较大。

未来,BioWin 需要进一步与其他自动化控制系统和实时监测系统集成,实现污水处理厂的全面智能化管理,通过与实时控制系统结合,动态调整处理工艺参数,提高处理效果和能效。随着人工智能的快速发展,BioWin 可通过结合大数据和机器学习技术,开发基于机器学习的预测模型,与 BioWin 模拟结果进行融合,提供更准确和及时的预测,提高 BioWin 模拟和预测的精准性和效率。未来数字化模拟是污水处理厂数字化升级的重要工具与手段之一。因此,未来在机理模型与大数据模型的相互融合,可提高模拟的质量层次。

尽管 BioWin 在污水处理厂的应用面临一些挑战,但随着技术的不断进步和集成化、智能化的发展,其应用前景依然广阔。

参考文献

- [1] 熊天煜. 污水处理厂工艺设计优化及改造的模拟方法与应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
XIONG T Y. Study on process simulation and design optimization for municipal wastewater treatment plants[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [2] 胡志荣, CHAPMAN K, DOLD P, 等. 全污水处理厂数学模拟的 BioWin 模型[J]. 给水排水, 2008, 34(s1): 159-166.
HU Z R, CHAPMAN K, DOLD P, et al. BioWin model for whole wastewater treatment plant process modeling[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(s1): 159-166.
- [3] 张代钧, 卢培利. 城市污水 COD 组分划分、测试与标准化表征[C]//中国环境科学学会. 2005 年中国环境保护优秀论文集(上册). 北京: 中国环境科学学会, 2005: 1017-1024.
ZHANG D J, LU P L. Classification testing and standardized characterization of COD fractions in municipal wastewater [C]// Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of Excellent Papers on Environmental Protection in China in 2005 (Volume One). Beijing: Chinese Society of Environmental Sciences, 2005: 1017-1024.
- [4] BARKER P S, DOLD P L. General model for biological nutrient removal activated-sludge systems: Model presentation[J]. Water Environment Research, 1997, 69(5): 969-984.
- [5] 杭晨, 牛涛, 孙立柱, 等. 基于 BioWin 的城市污水处理厂全流程处理工艺模拟与优化[J]. 给水排水. 2018, 44(7): 134-140.
HANG C, NIU T, SUN L Z, et al. BioWin-based whole process simulation and optimization of the municipal wastewater treatment

- plant[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(7): 134–140.
- [6] AGATHOS A N, REINEKE W. *Biotechnology for the environment: Wastewater treatment and modeling, waste gas handling*[M]. Cham: Springer Netherlands, 2003.
- [7] 董进波, 张磊, 陈恒宝, 等. BIOLAK 工艺的 BioWin 稳态模拟及优化研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(11): 96–101.
- DONG J B, ZHANG L, CHEN H B, et al. Steady-state simulation and optimization of biolac process via BioWin software[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(11): 96–101.
- [8] 隋军, 李洁, 张发根. 过程模拟对污水处理工艺设计与运行的优化[J]. *中国给水排水*, 2015, 30(11): 111–115.
- SUI J, LI J, ZHANG F G. Optimization of design and operation of sewage treatment process by process simulation system[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 30(11): 111–115.
- [9] 张琛玥. 基于 BioWin 模拟的 AAO-MBR 工艺运行优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- ZHANG C Y. Operation optimization of AAO-MBR process based on BioWin simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [10] MELCER H, MELCER H, DOLD P L. *Methods for wastewater characterization in activated sludge modelling*[M]. London: IWA Publishing, 2003.
- [11] 沈童刚, 邱勇, 应启锋, 等. 污水处理厂模拟软件 BioWin 的应用[J]. *给水排水*. 2009, 35(s1): 459–462.
- SHEN T G, QIU Y, YING Q F, et al. Application of simulation software BioWin in wastewater treatment plant[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(s1): 459–462.
- [12] AIKIĆ T, WELLES L, RUBIO-RINCÓN F J, et al. Assessment of enhanced biological phosphorus removal implementation potential in a full-scale wastewater treatment plant in Croatia[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2019, 13(6): 1005–1013.
- [13] MOHAN T R, CHANAKYA H N, MOHAN K M S, et al. Achieving biological nutrient removal in an old sewage treatment plant through process modifications—a simulation and experimental study[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 45: 102461. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102461.
- [14] WANG Z, KIM M, NAKHLA G, et al. Anaerobic fluidized bed digestion of primary and thickened waste activated sludges[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284: 620–629. DOI: 10.1016/j.cej.2015.08.155.
- [15] LANZETTA A, MATTIOLI D, CAPUA F D, et al. Anammox-based processes for mature leachate treatment in SBR: A modelling study[J]. *Processes*, 2021, 9(8): 1443.
- [16] CALLAHAN J L, PFLUGER A R, FIGUEROA L A, et al. BioWin® modeling of anaerobic sludge blanket treatment of domestic wastewater[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2022, 20: 101231. DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101231.
- [17] ROBESCU L D, BONDREA A D, RADOSAVLEVICI I, et al. Comparative study on sequential batch reactor and granular sequencing batch reactor[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2022(1): 020021. DOI: 10.1063/1.5060701.
- [18] NGHIEM L D, WICKHAM R, OHANDJA D. Enhanced biogas production and performance assessment of a full-scale anaerobic digester with acid phase digestion[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 124: 162–168. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.04.001.
- [19] SHAO Q, WAN F, DU W, et al. Enhancing biological nitrogen removal for a retrofit project using wastewater with a low C/N ratio—a model-based study[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(38): 53074–53086.
- [20] OLEYIBLO O J, CAO J, FENG Q, et al. Evaluation and improvement of wastewater treatment plant performance using BioWin[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33(2): 468–476.
- [21] BADETI U, JIANG J, ALMUNTASHIRI A, et al. Impact of source-separation of urine on treatment capacity, process design, and capital expenditure of a decentralised wastewater treatment plant[J]. *Chemosphere*, 2022, 300: 134489. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134489.
- [22] OSAMA A, KINNAWY M A, MOUSSA M S, et al. Mathematical modelling and comparative analysis of treatment technologies for upgrading wastewater treatment plants: A case study of biofilm reactors in El-Gouna, Egypt[J]. *Environmental Research*, 2023, 238: 117008. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117008.
- [23] KIM M, NAKHLA G, KELEMAN M. Modeling the impact of food wastes on wastewater treatment plants[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 237: 344–358. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.02.065.
- [24] BENTANCUR S, LÓPEZ-VÁZQUEZ C M, GARCÍA H A, et al. Modelling of a pulp mill wastewater treatment plant for improving its performance on phosphorus removal[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 146: 208–219. DOI: 10.1016/j.psep.2020.08.029.
- [25] JIN Y, YOU X, JI M. On intensive process of quantity and quality improvement of wastewater treatment plant under rainfall conditions[J]. *Desalination & Water Treatment*, 2015, 53(2): 330–339.
- [26] 陈建, 周谐, 李萍, 等. BioWin 数学模型在污水处理厂辅助工艺设计中的应用[J]. *环境影响评价*, 2017, 39(6): 79–86.
- CHEN J, ZHOU X, LI P, et al. Application of BioWin mathematical model in auxiliary process design of wastewater

- treatment plant [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2017, 39(6): 79–86.
- [27] 曹特特, 王林, 李咏梅. AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 219–226.
- CAO T T, WANG L, LI Y M. Operation of the AAO process under low dissolved oxygen conditions and its simulation [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 219–226.
- [28] 马昭, 李鹏, 吴林杰. ASDM 模型对 AO 工艺的模拟改造[J]. *净水技术*, 2022, 41(5): 67–75.
- MA Z, LI P, WU L J. Simulation reconstruction of AO process by ASDM mode [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(5): 67–75.
- [29] 李政, 刘志伟, 柳振铎, 等. 基于 BioWin 软件的郑州某污水处理厂 AO-MBBR 工艺模拟优化与设计[J]. *给水排水*, 2023, 49(s1): 888–894.
- LI Z, LIU Z W, LIU Z D, et al. Optimization and design of AO-MBBR process simulation of a sewage plant in Zhengzhou based on BioWin software [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(s1): 888–894.
- [30] 陈佳, 唐燕秋, 周谐, 等. BioWin 在三峡库区污水处理厂升级改造中的应用[J]. *人民长江*, 2020, 51(9): 39–44.
- CHEN J, TANG Y Q, ZHOU X, et al. Upgrading and regeneration of sewage treatment plants by using BioWin in Three Gorges Reservoir area [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(9): 39–44.
- [31] 付森磊. BioWin 在污水处理厂改造工程设计优化中的应用研究——以郑州某污水处理厂扩建工程为例[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- FU M L. Application research on design optimization of sewage treatment plant reconstruction project by BioWin—Take sewage treatment plant expansion project in Zhengzhou as an example [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [32] 仇付国, 张行, 高红伟. 基于 BioWin 软件的 ICEAS 工艺模拟与升级改造探讨[J]. *给水排水*, 2015, 41(9): 100–105.
- QIU F G, ZHANG X, GAO H W, et al. Discussion on ICEAS process simulation and upgrading based on biowin software [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(9): 100–105.
- [33] KNAPP L, SAGER A, IRANIPOUR G, et al. Modeling process control strategies for simultaneous nitrification denitrification in an oxidation ditch [C]//New Orleans: Proceedings of the Water Environment Federation, 2015.
- [34] ELAWWAD A. Optimized biological nitrogen removal of high-strength ammonium wastewater by activated sludge modeling[J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2018, 8(3): 393–403.
- [35] ISMAIL A, ELBESHISHY E, NAKHLA G. Thermal hydrolysis pretreatment of wastewater biosolids modelling the impact of the aerobic sludge age[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 60: 105114. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105114.
- [36] ELAWWAD A, MATTA M, ABO-ZAID M, et al. Plant-wide modeling and optimization of a large-scale WWTP using BioWin ASDM model[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 31: 100819. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100819.
- [37] DHAR B R, ELBESHISHY E, HAFEZ H, et al. Assessing the optimum SRT for anaerobic digester with sludge pretreatment for sulfide control [C]//New Orleans: Proceedings of the Water Environment Federation, 2013.
- [38] BADETI U, JIANG J, KUMARASINGHAM S, et al. Source separation of urine and treatment: Impact on energy consumption, greenhouse gas emissions, and decentralised wastewater treatment process [J]. *Desalination*, 2024, 583: 117633. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117633.
- [39] JAMES O O, CAO J, KABO-BAH A T, et al. Assessing the impact of solids retention time (SRT) on the secondary clarifier capacity using the state point analysis[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, 19(5): 1265–1270.
- [40] CAO J, OLEYIBLO O J, XUE Z, et al. Achieving low effluent $\text{NO}_3\text{-N}$ and TN concentrations in low influent chemical oxygen demand (COD) to total kjeldahl nitrogen (TKN) ratio without using external carbon source[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33(4): 1039–1052.
- [41] 周大鹏. 分段进水多级 A/O 泥膜复合工艺处理城镇生活污水[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- ZHOU D P. Multi-stage A/O mud membrane composite process for urban domestic wastewater treatment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [42] 陈伟. 基于 BioWin6.0 的 AAO 工艺模型构建与模拟评价[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
- CHEN W. AAO process model construction and simulation evaluation based on BioWin6.0 [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2023.
- [43] 李帅帅. AAO 污水处理厂的数值模拟及运行参数优化研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2017.
- LI S S. Numerical simulation and optimization of operating parameters of AAO wastewater treatment plant [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2017.
- [44] 何春求, 周少奇. 改良 AAO-MBR 工艺仿真模拟及运行优化[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(15): 90–97.
- HE C Q, ZHOU S Q. Simulation of modified AAO-MBR process and its operation optimization [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(15): 90–97.
- [45] 张芸蓓. 基于 BioWin 的 A/A/O 污水处理工艺模拟及优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- ZHANG Y B. Simulation and optimization of A/A/O process based on BioWin [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [46] 张行. 基于 BioWin 的污水厂运行优化及达标改造技术研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.

- ZHANG X. Study on the optimization and modification of sewage treatment plant using BioWin software [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.
- [47] 房婷婷, 马之光, 黄鹄, 等. 基于 BioWin 的污水处理厂在不同工况下的工艺模拟及运行优化[J]. 市政技术, 2019, 37(3): 201-206.
- FANG T T, MA Z G, HUANG H, et al. Process simulation and operation optimization of wastewater treatment plant in different conditions based on BioWin [J]. Municipal Engineering Technology, 2019, 37(3): 201-206.
- [48] 邢梦娇, 安瑾, 曾宪勇, 等. 基于 BioWin 软件的垃圾渗滤液 AO 工艺模拟与优化[J]. 环境工程, 2023, 41(s1): 207-210.
- XING M J, AN J, ZENG X Y, et al. BioWin-based simulation and optimization of A/O process for leachate treatment [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(s1): 207-210.
- [49] 马昭, 刘玉玲, 杨侃. 基于 BioWin 软件对 A²/O 工艺的模拟与优化[J]. 环境工程学报, 2015, 9(10): 4803-4810.
- MA Z, LIU Y L, YANG K. Simulation and optimization of A²/O process based on BioWin software [J]. Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(10): 4803-4810.
- [50] 陈浩林, 彭轶, 安东, 等. 基于 BioWin 软件对多级 A/O 工艺的运行优化[J]. 中国给水排水, 2020, 36(19): 60-66.
- CHEN H L, PENG Y, AN D, et al. Operation optimization of multi-stage A/O process based on BioWin software [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(19): 60-66.
- [51] 胡小珊, 徐铁良, 徐志勇. 应用 BioWin 模拟预测及优化某城市污水处理厂运行管理[J]. 山东化工, 2021, 50(19): 279-280.
- HU X S, XU T L, XU Z Y. Application of BioWin simulation to predict and optimize the operation and management of a municipal wastewater treatment plant [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(19): 279-280.
- [52] HOUWELING D, CONSTANTINE T, SANDINO J, et al. Low energy and no external carbon nitrogen removal using optimized process control strategies[C]//New Orleans: Proceedings of the Water Environment Federation, 2015.
- [53] VINEYARD D, KARTHIKEYAN K G, BARAK P. BioWin modeling of calprex phosphorus recovery from wastewater predicts substantial nuisance struvite reduction [J]. Environments (Basel, Switzerland), 2024, 11(3): 48.
- [54] SOLIMAN M, ELDYASTI A. Long-term dynamic and pseudo-state modeling of complete partial nitrification process at high nitrogen loading rates in a sequential batch reactor (SBR) [J]. Bioresource Technology, 2017, 233(1): 382-390.
- [55] REFAAT O A, HAMODA M F. Modelling of a wastewater-treatment plant for process reliability and effluent reuse [J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2023, 19(2): 111-119.
- [56] ELAWWAD A, ZAGHLOUL M, ABDEL-HALIM H. Simulation of municipal-industrial full scale WWTP in an arid climate by application of ASM3 [J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2017, 7(1): 37-44.
- [57] 马昭, 刘玉玲, 白戈, 等. 基于 BioWin3.1 软件对 Orbal 氧化沟中 4 种组分的模拟研究[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(4): 481-487.
- MA Z, LIU Y L, BAI G, et al. Simulation of four components based on biowin software in the orbal oxidation ditch [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(4): 481-487.
- [58] VITANZA R, COLUSSI I, CORTESI A, et al. Implementing a respirometry-based model into biowin software to simulate wastewater treatment plant operations [J]. Journal of Water Process Engineering, 2016, 9: 267-275. DOI: 10.1016/j.jwpe.2015.02.007.
- [59] LANZETTA A, MATTIOLI D, CAPUA F D, et al. Modeling complete and shortcut simultaneous nitrification and denitrification coupled to phosphorus removal in moving bed biofilm reactors [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 59: 105022. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105022.
- [60] SHENG Z, MOHAMMED A, LIU Y. Stability of full-scale engineered ecosystem under disturbance: Response of an activated sludge biological nutrient removal reactor to high flow rate condition [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 109: 88-95. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.01.003.
- [61] BURGER G, SIGMON C, MARKS C, et al. Modeling aeration performance for energy reduction [C]//New Orleans: Proceedings of the Water Environment Federation, 2019.
- [62] YANG W, YOUNG S, MUNOZ A, et al. Dynamic modeling of a full-scale anaerobic mesophilic digester start-up process for the treatment of primary sludge [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, 7(3): 103091. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103091.
- [63] VINEYARD D, KARTHIKEYAN K G, DAVIDSON C, et al. Modeling an acid-phase digester in BioWin with parameter optimization from site data [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 54: 103971. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103971.
- [64] HUIRU Z, YUNJUN Y, LIBERTI F, et al. Technical and economic feasibility analysis of an anaerobic digestion plant fed with canteen food waste [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 938-948. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.11.045.
- [65] 陈珺, 赵荣生, 杨廷光, 等. 慈溪东部污水处理厂化学除磷工艺模拟与实时控制[J]. 给水排水, 2022, 58(4): 56-60.
- CHEN J, ZHAO R S, YANG T G, et al. Chemical phosphorus removal simulation and realtime control at Cixi eastern WWTP [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(4): 56-60.

(下转第 42 页)

- ZHAO R Y, GU L, WEN H F, et al. Combined complex-breaking and Fenton oxidation for electroless nickel plating wastewater and reclamation of phosphate[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(4): 2097–2102.
- [35] 迟浩远. Fe 基超稳矿化材料的设计及其处理含镍废水和资源回收再利用的探索[D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
- CHI H Y. Design of Fe-based superstable mineralization materials and exploration on treatment of nickel-containing wastewater and recycling of resources [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [36] 付丹, 程象. 电镀含镍废水现场回收技术[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(1): 22–26.
- FU D, CHENG X. On-site recovery technology of nickel containing electroplating wastewater [J]. Plating & Finishing, 2018, 40(1): 22–26.
- [37] 刘永胜. 改性氯球树脂对电镀废水中镍离子的吸附及电沉积回收镍的研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2023.
- LIU Y S. Adsorption of nickel ions from electroplating wastewater by modified chlorine ball resin and recovery of nickel by electrodeposition [D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University, 2023.
- [38] 赵瑾, 曹军瑞, 谢宝龙, 等. 含镍电镀废水在线循环处理工程实例[J]. 工业水处理, 2020, 40(10): 116–119.
- ZHAO J, CAO J R, XIE B L, et al. Engineering example of nickel-containing electroplating wastewater treatment by online circulation[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(10): 116–119.
- [39] 徐智超. 化学镀镍废水中镍离子的回收及其在电催化析氢中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- XU Z C. Treatment of nickel ion from electroless nickel plating wastewater and its application in electrocatalytic hydrogenation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [40] 晋瑞杰. 电化学联合工艺实现含镍废水的资源化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- JIN R J. Recovery of nickel and water from nickel containing wastewater using electrochemical combination process [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [41] 王望龙. 含铜含镍污泥资源化利用技术研究[J]. 中国高科技, 2023(18): 95–97.
- WANG W L. Research on the resource utilization technology of copper and nickel containing sludge[J]. Zhong Guo Gao Xin Ke Ji, 2023(18): 95–97.
- [42] 刘玉兵, 蒋小友. 从电镀含镍污泥中回收硫酸镍的工艺[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(13): 720–723.
- LIU Y B, JIANG X Y. Process for reclaiming nickel sulfate from nickel-containing electroplating sludge [J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(13): 720–723.
- [43] 程劼. SWRO+MCR 工艺处理电镀废水零排放工程研究[J]. 绿色科技, 2024, 26(4): 166–171.
- CHENG R. Study on zero discharge engineering of electroplating wastewater treated by SWRO+MCR process[J]. Journal of Green Science and Technology, 2024, 26(4): 166–171.
- [44] 张汝嘉. 微滤-反渗透-蒸发集成设备处理电镀园含镍废水的工程实例[J]. 节能与环保, 2020(6): 54–55.
- ZHANG R J. Engineering example of nickel wastewater treatment in electroplating park by integrated microfiltration reverse osmosis evaporation equipment [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2020(6): 54–55.

(上接第 22 页)

- [66] 李晓昕, 李绍生. 除磷工艺优化的 BioWin 数值模拟研究——以不同加药点的铁盐除磷为例[J]. 四川环境, 2023, 42(3): 21–27.
- LI X X, LI S S. Research on phosphorus removal process based on BioWin numerical simulation taking the removal of phosphorus with ferric salt at different dosing scenarios as an example[J]. Sichuan Environment, 2023, 42(3): 21–27.
- [67] 王骞, 邓巧斯, 吴畏, 等. 基于机理模型的永川污水处理厂运行诊断与碳源优化[J]. 环境工程, 2022, 40(6): 219–225.
- WANG Q, DENG Q S, WU W, et al. Operation diagnosis and carbon source optimization of Yongchuan wastewater treatment plant using process modeling[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(6): 219–225.
- [68] TOLENTINO A C, CHENG H, LIN C, et al. Optimization of step-feed anoxic-oxic-membrane bioreactor (AO-MBR) with methanol addition for biological nitrogen removal in wastewater using BioWin and response surface methodology (RSM) [J]. E3S Web of Conferences, 2024, 514: 1002. DOI: 10.1051/e3sconf/202451401002.
- [69] JOHNSON B R, CULP G, NEETHLING J, et al. Use of dynamic modeling for wastewater treatment plant acceptance testing[C]//New Orleans: Proceedings of the Water Environment Federation, 2013.
- [70] DEVILLERS J, PANDARD P, RICHARD B. External validation of structure-biodegradation relationship (SBR) models for predicting the biodegradability of xenobiotics [J]. SAR and QSAR Environmental Research, 2013, 24(12): 979–993.