

杨一夫, 夏阳光. 污水处理外加碳源与除磷药剂减量控制技术研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(11):49-56.

YANG Y F, XIA Y G. Research progress on control technology for dosage reduction of external carbon and phosphorus removal chemicals in wastewater treatment processes[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11):49-56.

污水处理外加碳源与除磷药剂减量控制技术研究进展

杨一夫^{1,*}, 夏阳光²

(1. 苏邑设计集团有限公司, 江苏南京 210012; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 211189)

摘要 针对污水处理外加碳源与除磷药剂过量投加导致资源浪费与成本增加的问题, 文中介绍了外加碳源、除磷药剂和精准化投加技术的研究现状, 分析了通过工艺流程优化提升生物脱氮除磷的技术方法, 提出了“从全流程工艺优化视角优先开展源头药剂减量, 并与基于模糊控制和神经网络控制的智能控制技术相结合”的药剂减量化整体调控策略。结果表明, 通过进水方式优化、增/改设内回流、精准曝气等工艺流程优化技术可有效提高脱氮除磷效能, 适用于大多数污水处理厂提质增效。而对于进水水质波动大、对外加药剂依赖性较强的污水处理厂, 应优先建立完整的智能控制系统。此外, 指出了在实际运行中应根据进水水质及其变化特征, 综合考虑污水处理厂工艺与运行条件, 制定出“一厂一策”的碳源与除磷药剂投加调控策略。文章可为城镇污水处理厂实现低碳化、智能化、高效化发展提供参考。

关键词 外加碳源 除磷药剂 精准化投加 智能控制技术 全流程工艺优化

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)11-0049-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.11.006

Research Progress on Control Technology for Dosage Reduction of External Carbon and Phosphorus Removal Chemicals in Wastewater Treatment Processes

YANG Yifu^{1,*}, XIA Yangguang²

(1. Suyi Design Group Co., Ltd., Nanjing 210012, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract In response to the problem of resource waste and cost increase caused by excessive addition of external carbon sources and phosphorus removal chemicals in wastewater treatment, the status of external carbon sources, phosphorus removal chemicals and precision dosing technology are introduced in this paper, and the biological nitrogen and phosphorus removal improvement through process optimization is analyzed. An overall control strategy for chemicals reduction that combines priority chemicals reduction based on the perspective of comprehensive process optimization and intelligent control technology based on fuzzy control and neural network control is proposed. It is pointed out that the process optimization technology such as influent optimization, increase/change of internal reflux and precise aeration can effectively improve the efficiency of nitrogen and phosphorus removal, which is suitable for improving the quality and efficiency of most wastewater treatment plants (WWTPs). Moreover, a complete intelligent control system should be prioritized for WWTPs with large influent quality fluctuations and strong dependence on external agents. Furthermore, the process and operating conditions of the WWTPs should be considered in accordance with the quality and change characteristics of the influent in actual operation, and therefore a "one plant, one policy" of carbon sources and phosphorus removal chemicals addition control strategy should be formulated. It provides reference for the development of low-carbon, intelligent and high efficiency WWTPs.

Keywords external carbon source phosphorus removal chemical precision dosing smart control technology whole process optimization

[收稿日期] 2021-07-06

[基金项目] 江苏省重点研发计划 (BE2021619)

[通信作者] 杨一夫 (1984—), 男, 高级工程师, 注册给排水工程师, 注册城乡规划师, 研究方向为污水处理与资源化, E-mail: 45098396@qq.com。

为满足城镇污水处理厂日益严格的氮、磷排放标准, 大量外加碳源和除磷药剂用于强化脱氮除磷^[1-2]。外加药剂通常采用定量投加方法, 容易导致投加过量, 不仅影响生化处理效果, 而且造成资

源浪费^[3]。而在线动态监测以及精确控制系统通过建模对外加药剂用量进行实时调控,能够减少外加药剂投加量,降低运行成本。此外,优化工艺流程也能实现高效脱氮除磷,节省外加药剂^[4]。因此,本文介绍了外加碳源、除磷药剂和精准化投加技术的研究现状;分析了模型建模、机理探究以及投加控制策略;探讨了通过工艺流程优化提升生物脱氮除磷的技术手段;提出了将智能控制技术与全流程工艺优化相结合的药剂减量化整体调控策略,为污水处理厂实现节能降耗提供借鉴与指导。

1 外加碳源与除磷药剂投加技术研究进展

1.1 外加碳源

反硝化过程是污水生物脱氮的关键步骤之一,影响因素包括污水中碳源、温度、硝化液回流比等,其中碳源是重要的影响因素。在污水处理过程中,反硝化过程对碳氮比(C/N)要求较高,当进水生化需氧量/总氮(BOD_5/TN)大于4时,认为原水中含有充足的碳源^[4]。而研究表明我国污水处理厂进水普遍存在碳源不足的问题,如郭泓利等^[5]研究发现全国127座污水处理厂进水 BOD_5/TN 的平均值为2.66,低C/N进水容易导致反硝化过程不完全,造成出水TN不达标。为满足日趋严格的TN排放标准,污水处理厂通常采取投加甲醇、乙酸钠、葡萄糖等外加碳源,并通过传统控制技术或自动控制技术来强化生物脱氮^[6]。

在实际运行过程中,污水处理厂的进水变化大、水质复杂,因此,碳源需求量变化大^[7]。定量投加碳源在增加污水处理成本的同时,并未完全消除出水TN超标排放风险,当进水C/N较高时还可能影

响出水有机物浓度。

1.2 化学除磷

目前国内外城镇污水处理厂采用的除磷方法包括生物法、化学法及两者协同处理技术。其中,传统生物除磷技术主要依赖聚磷菌厌氧释磷-好氧过量吸磷作用达到除磷的目的,其代表工艺主要有厌氧-好氧(AO)、厌氧-缺氧-好氧(AAO)、Bardenpho、序列间歇式活性污泥法(SBR)等。实际运行表明,单一的生物除磷效果受进水碳源、溶解氧(DO)等因素影响,出水总磷(TP)难以保持稳定达标^[8]。因此,添加化学除磷单元辅助强化除磷十分必要。化学除磷过程通过向污水中投加铝和铁等金属盐化学药剂,使其与水中以磷酸盐形式存在的无机磷形成不溶性物质,同时金属盐也会发生凝聚作用,将不溶性小颗粒凝聚为大颗粒后经沉淀去除^[8]。目前常用的药剂有聚合氯化铝、聚合硫酸铁、三氯化铁等。化学除磷过程受药剂反应时间、药剂种类、投加量及投加位置等诸多因素影响,其中药剂投加量影响程度最明显^[9]。

化学除磷工艺根据化学药剂投加位置可分为前置沉淀、同步沉淀及后置沉淀3种类型^[8]。由于废水中含有可与除磷药剂作用的物质,前置沉淀耗药量更高且产泥量大;后置沉淀涉及设备多且环节繁琐,费用最高。相较于前两者,同步沉淀过程优势明显,目前在实际应用中应用较为广泛,但除磷药剂的使用可能会对污泥性状产生影响。

1.3 精准化投加技术

外加碳源和除磷药剂精准化投加技术可分为传统控制、自动控制和智能控制3个发展阶段,图1为各阶段药剂精准化投加技术研究进展及特点。

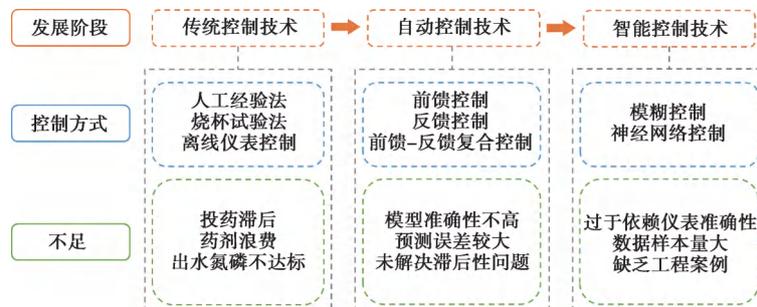


图1 药剂精准化投加技术研究进展及特点

Fig. 1 Research Progress and Characteristics of Chemicals Precision Dosing Technology

传统外加碳源及除磷药剂控制策略普遍采用定

量投加的方式,由于进水水质容易出现波动,这种投

加策略在造成药剂浪费、污泥产量增大、运行成本增加的同时并未完全消除出水氮、磷超标排放风险。因此,在实际污水处理过程中外加碳源及除磷药剂的自动控制技术研究逐渐得到重视。

目前基于前馈、反馈及数学预测模型的自动控制技术在国内的研究应用已逐渐成熟。邱勇等^[10]比较了时序、前馈、反馈 3 种控制策略,发现出水反馈控制在保证出水达标的情况下,可节约 16% 的药剂。但前馈控制在实际应用中过于依赖数学模型的准确性,无法实现出水控制;反馈控制则存在进水水质周期性变化和生化反应周期较长导致反馈滞后的问题。近年来,在线监测设备的普及使自动控制技术向前馈-反馈复合控制方向发展,前馈-反馈复合控制首先利用前馈控制进水水质变化的影响,而后针对出水水质情况运用反馈控制进行调整。虽然在一定程度上降低了污水处理厂污泥产量及运行成

本,但仍未彻底解决复杂生化反应的滞后性问题。

污水处理过程内部机理复杂,具有多变量、高度非线性、滞后性、复杂性等特点,为精准加药模型的建立带来了极大挑战。随着数据监测采集技术的发展,智能控制技术开始成为主要的探索方向。其中,模拟生物神经的神经网络控制系统、以模拟数学为基础进行模糊推理的模糊控制系统以及将专家经验知识与计算机程序智能化结合的专家控制系统目前研究较为普遍^[11-14]。

智能控制技术的优化研究主要集中于算法优化、模型前后处理以及模型结合等方面,出水氮、磷保持达标且药耗明显减少,同时具有相对较高的精准度及通用性。但目前大多数工程案例仍处在将模糊控制和神经网络控制的建模方法同前馈、反馈等自动控制技术相结合的发展阶段,一些具有代表性药剂精准化投加工程案例如表 1 所示。

表 1 药剂精准化投加技术实施案例

Tab. 1 Application Cases of Chemicals Precision Dosing Technology

投加技术	控制策略	药剂种类	工程案例	运行效果	参考文献
自动控制技术	前馈控制	碳源	某焦化厂废水处理厂	出水化学需氧量(COD)与硝酸盐浓度保持稳定	[15]
	反馈控制	碳源	青岛市委山河污水处理厂	出水达标,药剂单耗降幅为 12%~34%	[16]
	反馈控制	除磷药剂	北京市吴家村污水处理厂	出水达标,投药量节约 20%	[17]
	前馈-反馈复合控制	除磷药剂	苏州市某污水处理厂	出水达标,投药量节约 25%	[18]
	前馈-反馈复合控制	除磷药剂	山东省某污水处理厂	出水达标,投药量节约 21.2%	[19]
智能控制技术	反向传播(BP)神经网络	碳源	循环式活性污泥法(CAST)污水处理装置	碳源投加预测模型,相对误差平均值低于 4%	[20]
	BP 神经网络	碳源	连续流 AO 生物脱氮系统	碳源投加预测模型,相对误差值最低为 0.75%	[21]
	模糊控制	除磷药剂	义乌市义亭污水处理厂	出水 TP 稳定达标,吨水药耗节约 2.7%~8.3%	[22]
	模糊神经网络+专家经验	除磷药剂	北京市某污水处理厂	智能控制较自动加药频率变化曲线更平稳	[23]

为进一步提高智能控制技术的精准性和可行性,国内外学者不断对碳源及除磷药剂动态投加机理模型进行研究和创新。Iacopozzi 等^[24]引入硝化过程两步法 ASM3-2N 模型,在 Matlab/Simulink 平台上实现了外加碳源模型化精准控制。Kim 等^[25]使用了一种带有在线实时电荷分析系统和滴定仪的中试设备,利用胶体电荷滴定实时控制药剂投加量,平均药剂投加量减少 14%,装置 TP 去除率增加 5%。上述对实际污水处理脱氮除磷机理模型的研究,在

提高碳源及除磷药剂使用效率的同时,也为提高模型预测精准度提供了理论依据。但目前基于模糊控制和神经网络控制的智能控制策略仍处在小试和中试阶段,有待进一步研究和应用。

2 优化工艺流程提升生物脱氮除磷效果

外加碳源与除磷药剂精准化投加能够在一定程度上降低外加药剂的用量,节约运行成本。然而仅依靠控制外加药剂投加量并不能从根本上实现外加药剂的减量化,通过合理优化污水处理厂生物脱氮

除磷工艺和运行条件,有望从源头上减少外加药剂的用量。

2.1 生物脱氮工艺优化

常见的生物脱氮强化措施包括优化进水方式、调节回流比、控制好氧段 DO 浓度等。

优化进水方式是从充分利用碳源角度出发,提高脱氮效率,进而减少外加碳源投加量;调节回流比

是从优化各段反应池氮素配比角度出发,控制缺氧池中碳源利用率以及出水硝态氮(NO_3^- -N)浓度,进而影响缺氧池反硝化脱氮效率;控制污水处理工艺好氧段 DO 浓度则有助于实现多途径脱氮,减少外加碳源需求量。其对应的工艺优化措施如表 2 所示。

表 2 生物脱氮工艺优化措施

Tab. 2 Optimization Measures for Biological Nitrogen Removal Process

强化生物脱氮措施	工艺措施	工程案例	运行效果	参考文献
优化进水方式	分段进水多级 AO	天津市某污水处理厂	在 C/N 为 4~7 时,出水 COD 与 TN 满足一级 A 标准	[26]
	分段进水 AAO	邯郸市某污水处理厂	缺氧单元反硝化脱氮贡献率提高 46.52%, TN 去除率升高 9.95%	[27]
	改良 AAO	西安市第四污水处理厂	预缺氧池配水比为 10% 时,出水有 80% 以上概率达到一级 A 标准	[28]
调节回流比	Bardenpho 内回流控制	南方某污水处理厂	出水 TN 质量浓度低于 10 mg/L, 甲醇投加量为固定投加量的 1/2	[29]
	总回流比控制	北京工业大学家属区污水处理设施	碳源投加量恒定时,出水 TN 浓度随总回流比的增大先降低后升高	[30]
控制好氧段 DO 浓度	四段进水工艺 DO 控制	扬州市某污水处理厂	出水 COD_{Cr} 、TN 平均质量浓度分别为 33.05、9.26 mg/L	[31]
	同步硝化反硝化-序批式生物膜法(SND-SBBR)限氧曝气	鄂尔多斯市某污水处理厂	脱氮效率提高 63%, 碳源需求量降低 40%	[32]

多种工艺的组合调控是目前污水处理厂普遍采用的优化方法,优化进水方式耦合内回流比控制策略有着较强的抗冲击负荷能力,并且能够实现节能降耗,因此,适用于大多数污水处理厂。

2.2 生物除磷工艺优化

生物除磷强化措施包括侧流污泥回流技术、侧流磷回收工艺以及污泥回流控制技术。

侧流污泥回流技术通过提高碳源浓度,从而提高聚磷菌厌氧释磷效果,进而促进好氧吸磷过程;侧流磷回收工艺通过降低生物处理过程中的磷负荷,从而提高碳磷比(COD/TP),进而提高生物除磷效果;污泥回流控制技术则能够缓解反硝化过程与厌氧释磷过程之间的碳源竞争问题,提高生物除磷效果。各技术对应的工艺优化措施如表 3 所示。

表 3 生物除磷工艺优化措施

Tab. 3 Optimization Measures for Biological Phosphorus Removal Process

强化生物除磷措施	工艺措施	试验案例	运行效果	参考文献
侧流污泥回流技术	侧流强化生物除磷(EBPR)	South Cary 污水处理厂	出水 TP 质量浓度 < 0.5 mg/L	[33]
	分流式侧流厌氧系统	人工配水	维持出水 TP 质量浓度在 0.5 mg/L	[34]
侧流磷回收工艺	侧流化学除磷	人工配水	出水 TP 质量浓度 < 0.5 mg/L, PO_4^{3-} -P 质量浓度 < 0.1 mg/L	[35]
	SBR 侧流除磷	人工配水	出水 PO_4^{3-} -P 质量浓度 < 0.5 mg/L	[36]
污泥回流控制技术	设置两段污泥回流	安宁市某污水处理厂	TP 平均去除率为 56.99%	[37]
	回流污泥增设缺氧池	人工配水	TP 去除率达到 83.62%	[38]

工程实践表明,侧流污泥回流技术与侧流磷回收工艺需增设构筑物,而污泥回流控制技术所需成本较低,并且可以实现脱氮除磷同步优化。此外,反硝化除磷技术能够有效地解决碳源竞争问题,实现同步脱氮除磷,然而目前该工艺实际应用案例较少,是未来的重点研究方向。

3 药剂减量化整体调控策略与案例分析

目前我国污水处理厂水质监测虽然已开始进行工艺全流程监测和药剂精准化投加,但当出水水质超标时,仍通过增大外加药剂投加量来保障水质达标,这种将污水系统割裂的处理方式很难在保障处理效果最优的同时兼顾运营成本。

在污水处理厂工艺流程优化过程中,应着重关注各构筑物的进出水和沿流程水质。结合仪表、控制和自动化技术精细化管理各道工艺及设备的运行情况,各段进出水水质波动范围较大时可实时调节进水量、回流量、DO 浓度等参数,从而达到节能降耗的目的。同时,引入如模糊控制、人工神经网络等智能控制系统,进一步提高预测精准度,降低自动控制技术的滞后性局限^[39-40]。此外,将药剂精准化投加与全流程工艺优化措施相结合,协同提升整体处理效果和能源药剂利用效率是药剂减量化控制策略的发展方向,其代表性工程案例如表 4 所示。

表 4 药剂减量化整体调控策略

Tab. 4 Overall Control Strategy for Chemicals Reduction

工艺流程	调控策略	运行效果	参考文献
开普敦大学(UCT)工艺	优化碳源投加点; 厌氧区改为消氧区; 前馈控制除磷药剂投加	碳源投加量降低 18%; 除磷药剂投加量降低 85%; 节省运行电费 2.4 万元/月	[41]
AAO 工艺	调节内回流比; 前馈控制碳源投加	碳源投加量减少约 30%	[42]
AAO 工艺	调节内回流比; 控制好氧区 DO; 反馈控制碳源投加	碳源投加量减少约 74%; 曝气量降低 50%	[43]
分段进水多级 AO 工艺	优化碳源投加点; 控制好氧区 DO; 前馈控制碳源投加	吨水运行成本节省 0.39 元	[44]
分段进水倒置 AAO 工艺	优化除磷药剂投加点; 控制好氧区 DO; 设置消氧区	碳源投加量降低 50%; 除磷药剂投加量降低 58%; 鼓风机吨水电耗降低 44%	[45]

工程实践表明,采用全流程工艺优化和前馈/反馈控制药剂投加量是药剂减量化的主要工程措施,均不同程度地降低了外加药剂的投加量和运行能耗。考虑到不同地域城镇污水处理厂进水水质特征及波动特征差异性,精准化投加技术与工艺流程优化技术结合策略应根据实际情况略有侧重。进水水质波动大、对外加药剂依赖性较强的污水处理厂,应当优先建立完整的智能控制系统;而对于进水水质稳定、外加药剂投加量变化幅度小或主要依靠主体工艺实现出水达标排放的污水处理厂,则重点关注全流程工艺优化改造措施。各个污水处理厂还需做好数据记录与分析,需要提高脱氮除磷效率的污水处理厂应首要关注生化反应段,根据季节性运行数

据,制定“一厂一策”的工艺运行方案。

4 结语

外加药剂减量化控制技术的研究与发展为我国城镇污水处理厂实现外加药剂精准投加提供了可行途径,将促进污水处理厂向低碳、智能、高效化方向发展。针对药剂减量化投加控制技术研究现状分析,提出以下建议与展望。

(1) 外加碳源与除磷药剂精准化投加技术应用正向智能化控制技术方向发展,大部分智能控制技术与自动控制技术相结合的案例已被初步证明有效,但基于模糊控制和神经网络控制的智能化控制技术仍停留在数值模拟及小试、中试阶段,缺乏大规模处理工程实际运行数据。因此,应进一步将模糊

控制、神经网络控制、遗传算法优化相结合,进一步降低智能控制误差,并开展示范工程以考察外加药剂智能控制策略减量化效果。

(2)采用全流程工艺优化可以从源头提高氮、磷处理效果,减少外加药剂投加。目前药剂减量化技术主要集中在智能控制技术研究,应优先从工艺运行与调控的视角进行源头药剂减量。通过进水方式优化、增/改设内回流、精准曝气等工艺流程优化技术可有效提高脱氮除磷效能,适用于大多数污水处理厂提质增效。而对于进水水质波动大、对外加药剂依赖性较强的污水处理厂,应优先建立完整的智能控制系统;进水水质稳定、外加药剂投加量变化幅度小或依靠主体工艺可实现出水稳定达标的污水处理厂,则应重点关注全流程工艺优化改造措施。

(3)将全流程工艺优化和智能控制技术相结合的整体调控策略是污水处理厂药剂减量化的主要发展方向。同时,应根据污水处理厂进水水质特征、波动特征及运行特征制定出“一厂一策”的药剂减量化整体调控方案。

参考文献

- [1] CAO S, DU R, ZHOU Y. Development of a denitrification system using primary sludge as solid carbon source-Potential to couple with anammox process [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 140315. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140315.
- [2] CARREY R, RODRÍGUEZ-ESCALES P, SOLER A, et al. Tracing the role of endogenous carbon in denitrification using wine industry by-product as an external electron donor; Coupling isotopic tools with mathematical modeling [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 207: 105 - 115. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.10.063.
- [3] 王玥, 秦帆, 唐燕华, 等. 农业废弃物作为反硝化脱氮外加碳源的研究[J]. *林业工程学报*, 2019, 4(5): 146-151.
- WANG Y, QIN F, TANG Y H, et al. Agricultural wastes as additional carbon sources for denitrification [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2019, 4(5): 146-151.
- [4] 邹吕熙, 李怀波, 郑凯凯, 等. 太湖流域城镇污水处理厂进水水质特征分析[J]. *给水排水*, 2019, 55(7): 39-45.
- ZOU L X, LI H B, ZHENG K K, et al. Analysis on the characteristics of influent water quality from wastewater treatment plants in Taihu Basin [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55(7): 39-45.
- [5] 郭泓利, 李鑫玮, 任毅敏, 等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. *给水排水*, 2018, 54(6): 12-15.
- GUO H L, LI X W, REN Q Y, et al. Analysis on characteristics of influent water quality of typical municipal sewage treatment plants in China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 54(6): 12-15.
- [6] 刘宇航, 司亚楠. 生物脱氮外加碳源发展趋势研究[J]. *广东化工*, 2015, 42(10): 113-114.
- LIU Y H, SI Y N. Study on directions of external carbon source for biological denitrification[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2015, 42(10): 113-114.
- [7] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹. SBR法反硝化过程模糊控制器的设计和碳源投加方式的选择[J]. *环境科学学报*, 2003(6): 733-737.
- GAO J F, PENG Y Z, WANG S Y. The construction of fuzzy controller of denitrification in SBR process and the choice of carbon addition method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003(6): 733-737.
- [8] 侯艳玲. 城市污水处理厂化学除磷工艺优化运行与控制系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- HOU Y L. Municipal WWTP of the chemical phosphorus removal in optimal operation and automatic control [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [9] 陈广. 城镇污水处理厂化学除磷研究[J]. *中国市政工程*, 2015(3): 33-35.
- CHEN G. Research on chemical phosphorus removal in wastewater treatment plants [J]. *China Municipal Engineering*, 2015(3): 33-35.
- [10] 邱勇, 李冰, 刘垚, 等. 污水处理厂化学除磷自动控制系统优化研究[J]. *给水排水*, 2016, 52(7): 126-129.
- QIU Y, LI B, LIU Y, et al. Optimal control of chemical precipitation of phosphorous in wastewater treatment plants [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 52(7): 126-129.
- [11] LEE M W, PARK Y J, PARK J M, et al. Control of external carbon addition in biological nitrogen removal process for the treatment of coke-plant wastewater [J]. *Water Environment Research*, 2001, 73(4): 415-425.
- [12] 林佳敏, 陈金良, 林晶晶, 等. BP神经网络和ARIMA模型对污水处理厂出水总氮浓度的模拟预测[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(5): 573-578.
- LIN J M, CHEN J L, LIN J J, et al. The simulation and prediction of TN in wastewater treatment effluent using BP neural network and ARIMA model [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(5): 573-578.
- [13] 贾丽杰, 李文静, 乔俊飞. 基于神经元特性的径向基函数神经网络自组织设计方法[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(12): 2618-2626.
- JIA L J, LI W J, QIAO J F. Self-organizing design of radial basis function neural network based on neuron characteristics [J]. *Control Theory and Applications*, 2020, 37(12): 2618-2626.
- [14] 朱仁官. 智能控制在污水处理中的有效运用[J]. *科学技术*

- 创新, 2019(22): 183-184.
- ZHU R G. Application of intelligent control in wastewater treatment[J]. Science and Technology Innovation, 2019(22): 183-184.
- [15] 李若飞, 达尔仁·阿斯哈提, 王振豪, 等. 人工智能应用于水污染控制过程的研究进展[J]. 智能城市, 2019, 5(20): 9-10.
- LI R F, ASHATI D, WANG Z H, et al. Research progress of artificial intelligence applied to water pollution control process [J]. Intelligent City, 2019, 5(20): 9-10.
- [16] 安泳, 柯崇宜, 陈飞. 青岛娄山河污水处理厂自动加药系统研究[J]. 工业水处理, 2018, 38(2): 102-105.
- AN Y, KE C Y, CHEN F. Research on the automatic dosing control system in Qingdao Loushanhe sewage treatment plant[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(2): 102-105.
- [17] 马伟芳, 郭浩, 姜杰, 等. 城市污水厂化学除磷精确控制技术研究与工程示范[J]. 中国给水排水, 2014, 30(5): 92-95.
- MA W F, GUO H, JIANG J, et al. Research and demonstration on precise control technology for chemical phosphorus removal in urban sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(5): 92-95.
- [18] 孙立柱, 王成琦, 沈永, 等. 城市污水厂化学除磷自动控制运用[J]. 广东化工, 2020, 47(3): 143-144.
- SUN L Z, WANG C Q, SHEN Y, et al. Application of automatic control of chemical phosphorus removal in urban sewage treatment plants [J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(3): 143-144.
- [19] 贾玉柱, 赵月来, 刘成钰, 等. P-RTC 化学除磷智能实时控制系统在污水厂的应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(8): 87-90.
- JIA Y Z, ZHAO Y L, LIU C Y, et al. Study on operation effect of P-RTC automatic dosing device [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(8): 87-90.
- [20] 李蕾, 陈倩, 薛安. 基于 BP 和 RBF 神经网络的外加碳源量模型研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(11): 4788-4794.
- LI L, CHEN Q, XUE A. Model based on BP and RBF neural network for predicting external carbon dosage [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(11): 4788-4794.
- [21] 彭永臻, 王之晖, 王淑莹. 基于 BP 神经网络的 A/O 脱氮系统外加碳源的仿真研究[J]. 化工学报, 2005(2): 296-300.
- PENG Y Z, WANG Z H, WANG S Y. Simulation of external carbon addition to anoxic-oxic process based on back-propagation neural network [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005(2): 296-300.
- [22] 王明锋, 何康, 吴晓倩. 模糊控制在污水处理厂化学除磷加药控制系统中的应用[J]. 净水技术, 2018, 37(s2): 63-66.
- WANG M F, HE K, WU X Q. Application of fuzzy control in dosing control system for chemical phosphorus removal in WWTP [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(s2): 63-66.
- [23] 张会清, 李泽锋. 基于规则自适应校正的化学除磷控制方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(2): 18-23.
- ZHANG H Q, LI Z F. Study on the control method of chemical phosphorus removal based on rule adaptive correction [J]. Techniques of Automation and Applications, 2020, 39(2): 18-23.
- [24] IACOPOZZI I, INNOCENTI V, GIUSTI E, et al. A modified activated sludge model No. 3 (ASM3) with two-step nitrification-denitrification [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(6): 847-861.
- [25] KIM W K, SUNG Y K, YOO H S, et al. Optimization of coagulation/flocculation for phosphorus removal from activated sludge effluent discharge using an online charge analyzing system titrator (CAST) [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 21: 269 - 277. DOI: 10.5004/dwt.2019.23698.
- [26] 李权, 王少坡, 王舜和, 等. 不同碳氮比下分段进水多级 A/O 耦合 MBR 工艺的脱氮除磷性能研究[J]. 天津城建大学学报, 2018, 24(4): 298-302.
- LI Q, WANG S P, WANG S H, et al. The nitrogen and phosphorus removal of multilevel A/O step-feed process combine with membrane bioreactor under the different C/N ratio [J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2018, 24(4): 298-302.
- [27] 徐宇峰, 王让, 唐锋兵, 等. 分配比对分段进水 A²/O 工艺脱氮除磷的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(4): 761-768.
- XU Y F, WANG R, TANG F B, et al. Affection of distribution ratio of influent on nitrogen and phosphorus removal of step feed-A²/O process [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(4): 761-768.
- [28] 王攀, 彭党聪. 预缺氧池配水比对 Johannesburg 工艺脱氮除磷效果的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(4): 1645-1650.
- WANG P, PENG D C. Effect of influent distribution ratios in pre-denitrification tank on nitrogen and phosphorus removal in Johannesburg process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(4): 1645-1650.
- [29] 孙月娣. Bardenpho 工艺内回流与碳源投加耦合控制动态模拟[J]. 中国给水排水, 2017, 33(23): 66-70.
- SUN Y D. Dynamic simulation of coupled control between internal reflux and carbon source dosing in Bardenpho process [J]. China Water Supply and Drainage, 2017, 33(23): 66-70.
- [30] 王之晖, 王淑莹, 彭永臻, 等. 前置反硝化脱氮系统外加碳源在线控制基础[J]. 环境科学, 2004, 25(3): 73-77.
- WANG Z H, WANG S Y, PENG Y Z, et al. On-line control of

- external carbon addition to predenitrification process [J]. *Environmental Science*, 2004, 25(3): 73-77.
- [31] CAO G, WANG S, PENG Y, et al. Biological nutrient removal by applying modified four step-feed technology to treat weak wastewater[J]. *Bioresour Technology*, 2013, 128: 604-611. DOI:10.1016/j.biortech.2012.09.078.
- [32] MA W, HAN Y, MA W, et al. Enhanced nitrogen removal from coal gasification wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) in an oxygen-limited aeration sequencing batch biofilm reactor [J]. *Bioresour Technology*, 2017, 244: 84-91. DOI:10.1016/j.biortech.2017.07.083.
- [33] 刘智晓. 生物除磷理论与实践新突破——从主流 EBPR 到侧流 EBPR[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(24): 19-25.
LIU Z X. A new breakthrough in the theory and practice of biological phosphorus removal; From mainstream EBPR to side-stream EBPR [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(24): 19-25.
- [34] 雒海潮, 郭婉茜, 樊星, 等. 低温条件下分流式侧流-AAO 工艺污水处理及同步污泥减量效果研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(10): 3284-3290.
LUO H C, GUO W Q, FAN X, et al. Performance on simultaneously nutrients removal and sludge reduction in AAO combined distributary side-stream anaerobic reactors under low-temperature [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(10): 3284-3290.
- [35] 陈奇. 侧流磷回收强化主流脱氮除磷工艺——试验与模拟 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
CHEN Q. Main-stream nutrient removal enhanced by side-stream P-recovery: Experiments and modeling [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [36] 赵倩, 赵剑强, 王莎, 等. SBR 侧流除磷强化同步亚硝化反硝化除磷效率[J]. *水处理技术*, 2020, 46(8): 22-28.
ZHAO Q, ZHAO J Q, WANG S, et al. Simultaneous partial nitrification and denitrification phosphorus removal efficiency by SBR side-stream phosphorus removal [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(8): 22-28.
- [37] 孟凡凡, 丁志磊, 杨琴, 等. 污泥含量与回流方式对低负荷污水除氮磷的影响[J]. *水处理技术*, 2019, 45(7): 119-121.
MENG F F, DING Z L, YANG Q, et al. Effect of sludge content and reflux mode on nitrogen and phosphorus removal efficiency in low load sewage[J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(7): 119-121.
- [38] 余宏刚, 袁林江. 回流污泥缺氧时间对 A²O 系统脱氮除磷的影响[J]. *水处理技术*, 2018, 44(2): 63-67.
YU H G, YUAN L J. Effect of returned sludge anoxia time on nitrogen and phosphorus removal in A²O system[J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(2): 63-67.
- [39] 郑怀礼, 李俊, 孙强, 等. 城镇污水处理自动控制策略研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(1): 126-134.
ZHENG H L, LI J, SUN Q, et al. Automatic control strategies of urban wastewater treatment: A review [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(1): 126-134.
- [40] 吴宇行, 王晓东, 朴恒. 过程控制技术在污水处理中的应用[J]. *净水技术*, 2020, 39(7): 71-76.
WU Y X, WANG X D, PU H. Application of process control technology in wastewater treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(7): 71-76.
- [41] 杨敏, 郭兴芳, 孙永利, 等. 某园区污水处理厂问题诊断与优化运行措施[J]. *给水排水*, 2020, 46(2): 57-62.
YANG M, GUO X F, SUN Y L, et al. Optimization operation measures and problem diagnosis of a WWTP in an industrial park [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(2): 57-62.
- [42] 支雨玲, 郑凯凯, 王燕, 等. 全流程分析 AAO 工艺碳源投加减量控制研究[J]. *水处理技术*, 2021, 47(2): 119-121.
ZHI L L, ZHENG K K, WANG Y, et al. Research on addition and decrease control of carbon source in AAO process based on whole process analysis [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(2): 119-121.
- [43] 冯红利, 赵梦月, 丁舒喆. 城市污水厂 A²/O 工艺生物脱氮过程优化控制[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(6): 102-106.
FENG H L, ZHAO M Y, DING S Z. Optimal control of biological nitrogen removal in A²/O process of WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(6): 102-106.
- [44] 王拓, 严冰. 多级 A/O 工艺协同精确控制系统用于低 C/N 进水污水厂[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(12): 65-69.
WANG T, YAN B. Application of multi-stage A/O process collaborative precise control system in wastewater treatment plant with low C/N influent [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(12): 65-69.
- [45] 郭亚琼, 李鹏峰, 孙永利, 等. 某工业园区污水处理厂工艺诊断和优化运行研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(2): 16-21.
GUO Y Q, LI P F, SUN Y L, et al. Study on the process diagnosis and optimizing operation of a WWTP in industrial park [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(2): 16-21.