

面向景观回用的污水处理厂工艺优化与水质安全保障成套技术与示范

胡洪营^{1,2} 赵文玉¹ 李 轶³ 陈亚松⁴ 文 嘉⁴

(1 清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084; 2 清华大学深圳研究生院
国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室,深圳 518055; 3 河海大学环境
学院,南京 210098; 4 北京建工环境发展有限责任公司,北京 100192)

摘要 针对工业废水和生活污水混合处理,工业废水对处理系统冲击负荷大、污水生物处理系统运行不稳定,微絮凝—砂滤深度处理药剂消耗量大等城镇污水处理厂面临的实际难题,提出了“全程控制、整体优化、减排降耗”的污水处理厂优化运行和水质安全保障原则与技术路线。研究开发出包括废水生物抑制性监控技术、 A^2/O 工艺稳定运行与强化脱氮技术、微絮凝—砂滤工艺优化和自动加药技术以及污水深度处理雾化曝气、臭氧氧化技术等在内的成套技术和关键设备。 A^2/O 工艺优化运行与强化脱氮技术和微絮凝—砂滤深度处理工艺优化技术结合,在保障污水处理厂出水水质的同时降低了能耗和药耗,关键水质指标稳定达到景观用水标准,有力地支持了污水处理厂尾水景观利用,显著改善了水环境质量。

关键词 废水生物抑制性 A^2/O 工艺 微絮凝 砂滤 雾化曝气 臭氧氧化 再生水景观利用

1 研究背景与拟解决的关键问题

高新技术产业开发区(以下简称“高新区”)是指我国在一些知识密集、技术密集地区建立的以发展高新技术产业为目标的技术经济开发区,在区域经济跨越式发展中发挥着重要的辐射和带动作用。一般来讲,“高新区”社会经济发展迅速,基础设施总体完善,生态环境条件良好,但也存在着由于规划不完善、不同历史阶段和不同管理水平企业共存、局部环境基础设施缺位等导致的水环境质量保持和持续改善压力大等问题。

“高新城区水环境质量保障技术与综合示范”课题选择昆山高新区(A区)为研究区,重点研究城市污水再生处理与景观回用、景观水体水质净化与保持、污泥减量化与资源能源高效利用等关键技术和设备,形成了面向景观回用的污水处理厂优化运行与再生水水质安全保障成套技术、基于再生水回用的河道水质修复与保持集成技术和基于污泥特性的干化与资源化关键技术和设备等创新性成果,通过综合应用与工程示范,改善了示范区水环境质量,

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07313-002)。

取得了良好的环境效益和社会效益。

2 研究思路与技术路线

经过调研和深入分析,发现本课题示范区在水环境质量改善方面面临着以下问题,这些问题也是许多“高新区”面临的共性问题。

(1) 污水管网系统总体完善,但“毛细管网”系统缺位,导致局部区域滞流型河流水质污染严重、生态系统破坏,水环境质量改善难度大。

(2) 主要河流缺少清水补水水源,水环境质量维持难度大。

(3) 工业废水和生活污水混合处理,工业废水对处理系统冲击负荷大,污水生物处理系统稳定运行难度大。

(4) 污水处理厂一级A提标改造和稳定达标压力大、能耗和药耗高。

(5) 污水处理厂尾水再生利用率低等。

针对以上问题,本课题提出了“截污清淤、再生回用、自净强化”的滞流型河流水质修复与长效保持基本技术路线,其中再生水回用和保障再生水水质是不可或缺的重要措施,也是本课题的重要研究内容之一。

本研究选择昆山市北区污水处理厂(主体工艺为: A^2/O —微絮凝—砂滤—紫外线消毒)为对象,针对工业废水和生活污水混合处理,工业废水对处理系统冲击负荷大、污水生物处理系统运行不稳定;TN 一级 A 稳定达标压力大以及微絮凝—砂滤深度处理 TP 一级 A 达标药耗高等面临的实际难题,提出了“全程控制、整体优化、减排降耗”的工艺优化运行和水质安全保障基本原则和技术路线(见图 1)。

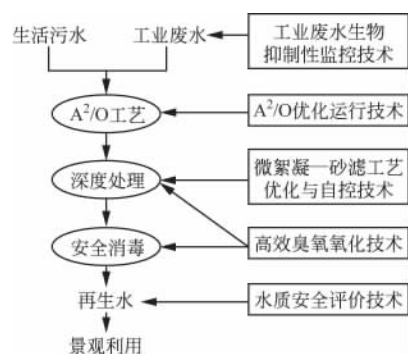


图 1 工艺优化与再生水水质保障原则和研究技术路线

“全程控制”是指污水处理厂从进水对生物处理系统的抑制性的主动监控,到出水水质安全的全过程控制;“整体优化”是指将二级处理、深度处理及消毒单元作为一个整体,明确上游单元处理效果对后续单元的影响以及保障下游单元运行效果对上一单元的水质要求,以保障处理效果和出水水质;“减排降耗”是指保障处理效果和出水水质的同时,降低处理费用和药剂消耗。

根据以上原则和技术路线,研究开发了包括废水生物抑制性监控技术、 A^2/O 工艺优化运行与强化脱氮技术、微絮凝—砂滤工艺优化和自动加药技术以及污水深度处理雾化曝气臭氧氧化技术等在内的污水处理厂工艺优化运行与再生水水质安全保障成套技术,并开展了工程应用示范。

3 主要研究成果与工程应用示范

3.1 废水生物抑制性监控技术与设备

针对工业废水中有毒有害物质对污水处理厂生物处理单元中微生物活性产生的抑制问题,研发出基于活性污泥呼吸速率的生物抑制性在线监控技术和设备(见图 2)。

该技术采用污水处理厂曝气池的活性污泥为检

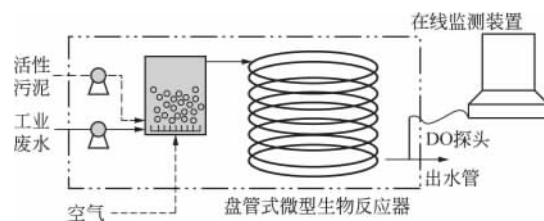


图 2 废水生物抑制性在线监测系统

测对象,以活性污泥呼吸速率为监测指标,综合评价废水对微生物处理系统中生物活性的抑制程度^[1],与同类技术相比,具有以下突出特点:

(1) 针对性强。突破了以往以单一微生物(如发光细菌、硝化菌等)检测生物毒性的预警方式,以污水处理厂曝气池中的活性污泥为监测微生物,能真实地反映进水中毒性物质对活性污泥的抑制作用,针对性和实用性强。

(2) 操作性好。直接利用曝气池的污泥,不需培养及定时更换细菌或活性生物,操作简便易行。

(3) 稳定性好。活性污泥呼吸速率法属于微生物种群预警方式,避免了个体生物差异造成的测量误差;同时由于污水处理厂污泥中的微生物组成及结构相对稳定,对毒性物质响应也很稳定。

在优化关键技术参数的基础上,研制了废水生物抑制性实时监控设备,在昆山市北区污水处理厂得到验证性应用。采用该厂的活性污泥为检测生物,在污水中添加毒性物质,研究该系统和设备的运行性能。该系统对污水中常见毒性物质铜(示例)的响应情况如图 3 所示。研究结果表明,该系统能够在短时间(≤ 5 min)内对污水中常见的铜离子和铬离子等毒性物质进行预警。与国内外相关在线监测系统相比,本研究成果具有预警速度较快、造价较低的优点。

3.2 A^2/O 工艺优化运行与强化脱氮技术

针对污水处理厂脱氮困难、达标不稳定等问题,围绕问题识别、诊断、工艺调控、示范工程验证等方面开展了深入研究。

3.2.1 进水高浓度 TP 冲击负荷下稳定运行对策

针对污水处理厂进水 TP 严重超标的问题,根据“全程控制、整体优化”的原则,提出了多点物化辅助除磷和生物调控等措施,建立了总磷稳定达标运行的应急处理方法和常态运行对策,即多点物化除

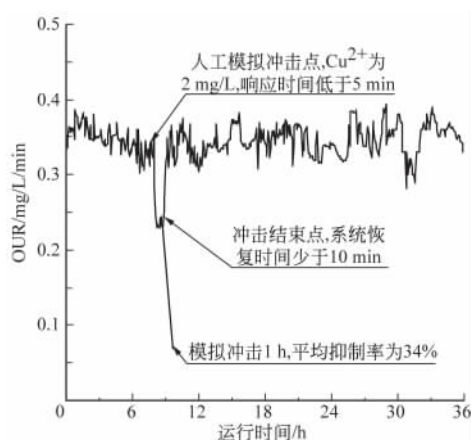


图3 废水生物抑制性监控设备对水中铜离子的响应曲线

磷措施:首先在进水口设置物化除磷系统,其次在二沉池出水处进行物化除磷,第三是在进入深度处理砂滤池前进行物化除磷。

不同混凝剂强化除磷会对生物系统的活性污泥造成不同程度的影响,混凝剂的种类对除磷效果影响较大。研究确定的优化混凝剂种类为进水口处投加聚铁盐(PFC)、中间及末端投加聚氯化铝(PAC)。这些技术措施有效降低了深度处理部分的负荷,增加了处理工艺的稳定性。

3.2.2 开发了 A^2/O 工艺脱氮诊断方法和调控技术

通过对工艺设计、设备状况、运行状况的系统研究,结合长期大量的调控运行数据统计分析^[2],建立了 A^2/O 脱氮诊断的方法,并提出了基于关键控制因子 F_A 、 FN_1 和 FN_2 (见图4)的优化运行策略^[3]。保证脱氮效果的关键控制因子和最优取值范围如下:回流点处氨氮浓度(F_A):1~3 mg/L;前置区出口硝酸盐氮浓度(FN_1):<1.5 mg/L;缺氧出口硝酸盐氮浓度(FN_2):1~2 mg/L。表1给出了不同情况下 A^2/O 工艺运行调控策略,实际运行中,根据关键控制因子的动态变化,针对不同环境条件采取动态的措施及时调整工艺(见表1),确保其在最佳的取值范围。

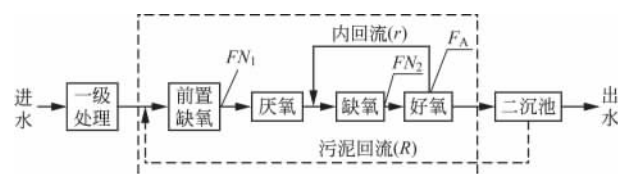


图4 A^2/O 工艺优化运行调控节点和调控因子

表1 A^2/O 工艺诊断与优化运行调控策略

控制指标	控制目标	大于控制目标值		小于控制目标值	
		原因/现象	调控措施	原因/现象	调控措施
FN_1	<1.5 mg/L	污泥反硝化不完全	优化进水分配、污泥回流比 R		
FN_2	1~2 mg/L	反硝化效果差	降低 r , 补充碳源, 控制 DO、ORP	反硝化完全	提高内回流比 r
F_A	1~3 mg/L	硝化效果差	提高泥龄, 控制 DO、碱度	硝化效果好, 能耗高	减少曝气量, 降低内回流比 r

以昆山北区污水处理厂升级改造为依托,通过脱氮问题识别、诊断、调控和强化脱氮,对处理工艺进行了系统优化,显著提高了总氮去除率,瞬时样一级 A 达标率达到 95% 以上(见图5)。

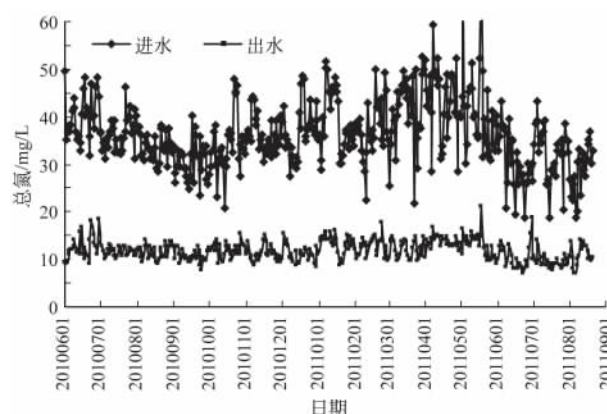


图5 优化运行实施后的总氮去除效果

3.3 微絮凝—砂滤工艺优化和自动加药技术

微絮凝—砂滤是常用的城市生活污水深度处理工艺之一,在出水水质要求达到一级 A 的前提下,面临着进水(污水处理厂二级出水)水质、水量波动大,出水水质难以稳定达标;系统运行过程中缺乏自动控制,采用人工加药方式,存在滞后性和不精确性等问题。针对以上实际问题,本课题对微絮凝—砂滤工艺进行了优化,并开发了自动加药技术。通过对絮凝剂的絮凝机理分析,结合现场多年运行数据分析以及微絮凝—砂滤试验,对混凝剂、反应时间等操作条件进行了优化^[4]。在以上研究成果的基础上,得到了进水水质(TP 和 SS)、水量与絮凝剂投加量之间的动态响应关系,并得到絮凝过程所需药剂计算见式(1):

$$Q_{PAC} = \frac{KQL(P-0.5)^a(S-10)^b}{\lambda N} \quad (1)$$

式中 Q_{PAC} ——液态 PAC 投加量, m^3/h ;

K ——修正系数, $0.5 \sim 1.5$;

Q ——进水流量, m^3/h ;

L ——液态 PAC 浓度, g/m^3 ;

P ——在线监测 TP 浓度, mg/L ;

S ——在线监测 SS 浓度, mg/L ;

a ——修正指数, $0.8 \sim 1.2$;

b ——修正指数, $0 \sim 0.2$;

λ ——药液密度, 在 5% 内可为 1;

N ——药液百分比, $0 \sim 100\%$ 。

以式(1)为依据, 开发出微絮凝工艺自动加药系统, 并成功应用于昆山市北区污水处理厂^[5]。系统响应时间为 30 min, 每 30 min 根据进水的水质水量变化自动调整加药量。

该技术的主要特点如下:

(1) 建立了加药量随进水 TP、SS 与水量的实时变化关系, 在保证水质稳定的前提下, 最大限度地降低絮凝剂的投加量。

(2) 具有广泛的适用性, 可在新建污水处理厂和已建污水处理厂工艺改造中应用, 且基本无需改动原有工艺结构, 费用低。

(3) 出水水质受进水水质、水量的干扰小, 提高出水水质稳定性, 可延长滤池的反冲洗周期和滤料的使用寿命, 提高产水率, 经济效益显著。

3.4 污水深度处理雾化曝气臭氧氧化技术

臭氧氧化技术具有脱色去味和微量有毒有害污染处理效果好、副产物少等优点, 在污水再生处理领域具有广阔的应用前景。但是, 臭氧氧化系统工程造价和运行成本均高, 限制了其在污水再生处理领域的应用。雾化曝气臭氧氧化是利用微米气泡发生技术将高浓度臭氧气体溶解到水中的一种新型工艺, 该工艺可显著提高臭氧的溶解速率和利用效率。微米气泡发生器产生的气泡直径 $< 50 \mu m$, 远小于微孔曝气产生的气泡(直径一般为 $0.1 \sim 2 mm$)。雾化曝气臭氧氧化技术的特点和优势有以下几点:

(1) 气泡比表面积大, 在水中的滞留性好, 气液接触时间长, 传质效率提高。气泡上升速度与气泡

直径的关系如图 6 所示。气泡直径越小, 上升流速越小, 气液接触时间越长, 则传质效率越高。

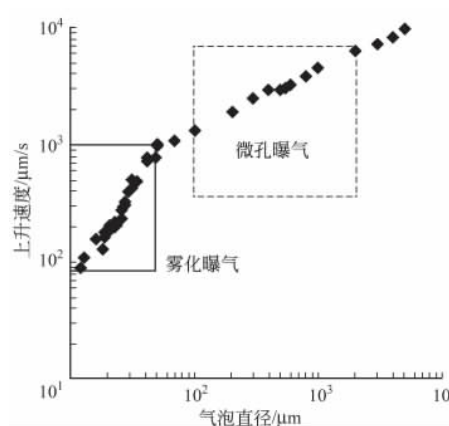


图 6 气泡上升速度与气泡直径的关系

(2) 反应速度快。反应器高度比传统微孔曝气器降低 $2/3$, 可实现推流式操作, 提高反应效率。

(3) 微米气泡具有气浮效果, 在氧化反应的同时, 提高 SS 的去除率。

本课题研发出微米气泡发生系统及优化运行技术、雾化曝气臭氧氧化新型反应器。在此基础上, 将高浓度臭氧发生单元、微米气泡发生单元、臭氧反应器、臭氧尾气处理单元有机集成, 形成了雾化曝气臭氧氧化成套设备, 并开发出工艺自动控制关键参数与系统。该系统产生的气泡主要分布在直径小于 $50 \mu m$ 的微米气泡(见图 7)^[6]。

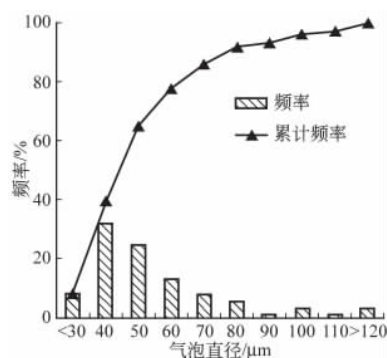
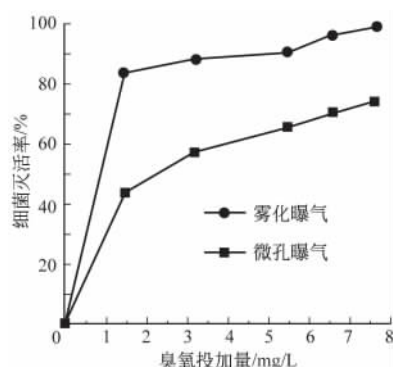


图 7 雾化曝气臭氧氧化系统气泡直径分布

建成处理能力为 $300 \sim 1000 m^3/d$ 的雾化曝气臭氧氧化系统。运行结果表明, 雾化曝气臭氧氧化工艺对细菌的灭活率明显优于微孔曝气臭氧氧化工艺(见图 8)^[6]; 同时, 雾化曝气臭氧氧化工艺具有气浮效果, 对 SS 具有较好的去除效果, 而微孔曝气对 SS 无去除效果(见图 9)。



8 雾化曝气和微孔曝气臭氧氧化细菌灭活效果比较

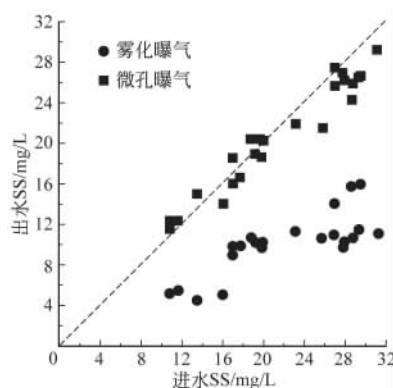


图9 雾化曝气和微孔曝气臭氧氧化系统SS去除效果比较

臭氧氧化工程造价和运行费用分析结果表明^[7,8],在高浓度臭氧(>150 mg/L)条件下,通过反应器优化设计和系统优化运行,雾化曝气臭氧氧化系统在处理效果及经济上均有一定的优势。

3.5 成果推广应用

通过开发污水处理厂脱氮诊断和调控技术,集成进水高TP冲击条件下强化除磷稳定运行技术,形成了A²/O工艺优化运行与强化脱氮技术,依托昆山北区污水处理厂二期扩建工程(规模5万m³/d)开展应用示范,明显提高了生化系统脱氮除磷的稳定性。经过6个月以上的连续运行,脱氮效果明显,TN出水稳定达到一级A标准,瞬时样达标率>95%。

利用研究开发的微絮凝—砂滤深度处理工艺优化技术和自动加药系统,依托昆山北区污水处理厂尾水深度处理工程,开展了工艺优化运行应用示范(规模10万m³/d),显著提高了该工艺对TP和SS的处理能力,既保障了水质又节省了药剂费用(节约加药量15%~20%),同时减少污泥产生量。

A²/O工艺优化运行与强化脱氮技术和微絮

凝—砂滤深度处理工艺优化技术结合,保障了污水处理厂出水水质,关键水质指标稳定达到景观用水标准,有力地支持了尾水景观利用。以昆山同心中心河综合治理工程为依托,实施了再生水景观回用工程,显著改善了水体质量、恢复了河道的景观功能。

本研究提出的先进理念、技术路线和研发的成套技术已成功应用于宜兴市清源、徐舍等污水处理厂以及昆山市团结河等河道的综合治理。

4 结语

城镇污水处理厂工艺优化与再生水水质安全保障成套技术研究及示范,有力地保障了示范区水环境质量的改善和保持,示范工程效果良好,社会和环境效益明显。示范工程评估专家和课题验收专家均一致表示,本课题研发的废水生物抑制性实时监控技术和设备、A²/O工艺强化脱氮稳定运行优化技术、微絮凝—砂滤优化与自动加药控制技术、再生水景观利用技术等具有良好的推广应用前景。

参考文献

- 1 Zhao W Y, Chen Y F, Zhang K S, et al. Study on impact factor of specific oxygen uptake rate of activity sludge in a wastewater treatment plant in Jiangnan. In: The International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2011), 2011, 4476~4478
- 2 陈亚松, 颜孜佳, 文嘉, 等. 改良型A²/O工艺的脱氮诊断分析. 中国给水排水, 2010, 26(18): 23~27
- 3 陈亚松, 李书鹏, 颜孜嘉, 等. 前置缺氧A²/O工艺脱氮贡献的定量研究. 广州化工, 2010, 38(7): 168~170
- 4 刘志刚, 李轶, 陈琛, 等. 微絮凝—砂滤工艺在城市生活污水中的深度处理研究. 见: 城市水污染控制与水环境综合整治技术与示范论文集(上册), 2009, 633~638
- 5 刘志刚, 虞静静, 马天, 等. 污水深度处理微絮凝—砂滤工程实例. 环境工程, 2011, 29(4): 15~17
- 6 张逢, 赵文玉, 胡洪营, 等. 微气泡臭氧氧化处理城市污水处理厂二级出水的效果研究. 城镇供水, 2010, 9(增刊): 39~43
- 7 赵文玉, 张逢, 胡洪营, 等. 污水再生处理臭氧氧化系统运行费用分析. 环境科学与技术, 2011, 34(9): 126~129
- 8 赵文玉, 马邦定, 张逢, 等. 污水再生处理雾化曝气臭氧氧化系统工程造价分析. 水处理技术, 2012, 38(6): 26~28

✉ E-mail: hyhu@tsinghua. edu. cn

收稿日期: 2012-08-17