

述评与讨论

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.001

城镇污水处理厂系统化精准诊断技术方法构建及应用

李鹏峰, 郑兴灿, 孙永利, 杨敏, 隋克俭, 郭亚琼, 李家驹,
尚巍, 陈轶

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 为落实“水十条”等国家政策要求,提升污水处理效能,改善水环境质量,我国重点流域区域已陆续制定高于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准的主要污染物地方排放限值。经大规模系统调研分析,共性难点为如何有效摸清本底,识别现状问题,形成技术可行、经济合理的技术对策。系统构建了“四位一体”精准诊断技术方法,涵盖“问题初筛—难点解析—系统诊断—应用验证”四个紧密衔接、前后依托的诊断步骤,系统提出各步骤的重点目标及实施方案,以常州江边污水处理厂三期为例进行了系统应用说明。该技术方法已收录于江苏、广东等地发布的提标政策指导文件,为我国城镇污水处理系统提标建设及精细化运行管理提供了系统技术支撑。

关键词: 城镇污水处理厂; 提标建设; 精准诊断

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0001-07

Construction and Application of Systematic and Accurate Diagnosis Technology for Urban WWTP

LI Peng-feng, ZHENG Xing-can, SUN Yong-li, YANG Min, SUI Ke-jian,
GUO Ya-qiong, LI Jia-ju, SHANG Wei, CHEN Yi

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: In order to implement the national policy requirements such as *Water Pollution Control Action Plan*, enhance the sewage treatment efficiency and improve the water environment quality, the local discharge limits of major pollutants in key basins and region of China have been formulated one after another, which are all higher than that of the first class A standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). Through large-scale systematic investigation and analysis, the common difficulties of upgrading include how to find out the background effectively, identify the current situation, and put forward the technically feasible and economically reasonable countermeasures. In this paper, the “four in one” accurate diagnosis technology method is systematically constructed, covering the four closely connected and back-to-back operation steps of “problem preliminary screening – difficulty analysis – system diagnosis – application verification”, the key objectives and implementation plan of each step are put forward systematically, and the system application

of the systematic and accurate diagnosis technology in Changzhou Jiangbian WWTP is introduced. The technical method has been included in the upgrading policy guidance documents issued by Jiangsu, Guangdong and other provinces, which provides systematic technical support for the upgrading construction and refined operation management of urban wastewater treatment system in China.

Key words: urban WWTP; upgrading construction; accurate diagnosis

为落实国家“水十条”等政策文件要求,进一步提升污水处理能力,改善水环境质量,我国大部分地区已陆续制定实施了高于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准的地方主要水污染物排放标准,重点围绕 COD、氨氮、TN 和 TP 等指标提出了更加严格的要求,全国范围的城镇污水处理厂新一轮提标改造工作如火如荼。

总结各地陆续发布的城镇污水排放新地方标准的总体要求,一般呈现时间紧、任务重、限期达标的特点,对提标改造工作的组织实施形式、资金人员到位情况提出了较高要求,共性难点为如何快速摸清本底,识别现状问题,提出技术可行、经济合理的提标对策措施。为此,结合科研团队十余年在我国城镇污水处理厂提标改造中的工程技术经验和系列研究成果,着重从城镇污水处理厂系统化精准诊断技术方法构建及应用方面进行系统阐述,为我国城镇污水处理厂提标改造工作提供系统技术支撑。

1 “四位一体”精准诊断技术方法

该方法是针对某区域开展城镇污水处理厂提标建设共性问题识别及对策分析构建的系统诊断评估方法,包括问题初筛、难点解析、系统诊断和应用验证四个步骤,具体见图 1。

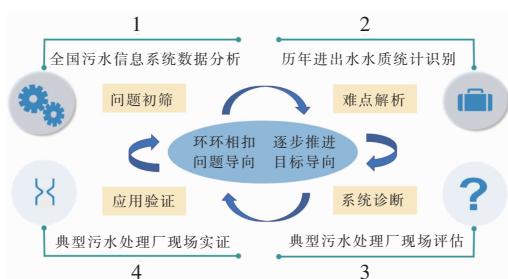


图1 “四位一体”城镇污水处理厂系统化精准诊断技术方法

Fig. 1 “Four in one” systematic and accurate diagnosis technology for urban WWTP

问题初筛是建立在全国污水信息系统大数据分析基础之上,通过大数据概率统计分析模型完成问题初步筛查;难点解析是在问题初步筛查基础之上,

进一步结合污水厂日报进出水数据,识别达标影响因素及达标难点;系统诊断是在难点解析基础之上,构建“四步法”系统评估方法模型,将进出水水质问题识别与系统运行效能评估相结合,形成系统评估诊断结果;应用验证是在系统诊断基础上,通过典型污水处理厂的模拟试验、运行优化、潜力挖掘等研究,形成提标改造整体策略。四步前后相依、逐步递进,实现提标问题逐步逼近及改造策略靶向应对。

1.1 问题初筛

问题初筛目标是用较短的时间对待提标污水处理厂运行现状总体摸底和问题识别。依托全国城镇污水处理管理信息系统上报的进出水月报数据,对区域污水水质特征、达标主要影响因素进行初步研判。采用规模权重分析法,以污水处理规模为权重,通过分析3年以上主要污染物指标进、出水月均值,判断本区域污水总体水质特征;通过 SS/BOD₅ (或 SS/COD)、BOD₅/TN (或 COD/TN)、BOD₅/TP (或 COD/TP) 等比值型指标分析,初步研判污水处理达标影响因素,支撑后续目标城镇污水厂难点解析。

1.2 难点解析

难点解析是在问题初筛的基础上,对水质特征及达标影响因素的进一步确认和系统分析。

① 基于进水分析的达标主要影响因素

对进水 COD、氨氮、TN、TP 等主要污染物指标日报数据开展概率统计分析,以 90% 以上概率值确认区域污水水质特征,为后续提标技术对策提供依据。

对进水 BOD₅/COD、SS/BOD₅ (或 SS/COD)、BOD₅/TN (或 COD/TN)、BOD₅/TP (或 COD/TP) 等比值型指标开展概率统计分析,以 90% 以上概率指标值作为达标影响因素判断限值,对达标影响因素进一步确认。

② 基于出水分析的达标主要影响因子

对 COD、氨氮、TN、TP 等主要污染物的出水指标开展概率统计分析,以 90% 以上概率的出水浓度对应值与新排放标准限值做比对,两者差值超过 20% 时,作为主要达标影响因子考虑,为后续系统诊

断时出水组分解析提供依据。如出水 TN 现有值为 13.5 mg/L,新排放标准限值为 10 mg/L,差值占比为 25.9%,确认 TN 为主要达标影响因子。

1.3 系统诊断

系统诊断是污水处理运行效能的现场测试分析,构建基于出水组分测试的达标难点解析、基于功能分区的沿程布点测试、基于速率测定的模型分析和基于模拟试验的潜力挖掘的“四步”效能测定法,完成污水处理厂全过程系统诊断评估,完成一厂一案式的提标对策。系统诊断总体原则为测试简易性、评估针对性和对策实用性。

1.3.1 出水组分解析

通过难点解析可大致判断达标主要影响因素,为后续提出具体可行的提标对策、需进一步开展的出水组分测试,以及完成达标因素的细化解析。例如,当确定 TP 是主要达标影响因素时,无法判断是

正磷酸盐,还是悬浮态、胶体类含磷物质导致。COD、TN、TP 简易组分解析方法如下:①通过检测溶解性 COD 浓度,推算出水中难生物降解 COD 的浓度;②不可氨化有机氮_(溶解性) = TN_(溶解性) - 氨氮 - 硝酸盐氮 - 亚硝酸盐氮;③难化学沉淀 TP_(溶解性) = TP_(溶解性) - 正磷酸盐。各指标测试均为污水处理厂出水 24 h 混合样。

1.3.2 功能单元沿程布点测试

生物系统是由泥龄、功能单元分布、水力流态、设备和构筑物形式等要素在时间、空间和实施方式上的不同组合构成的污水处理系统^[1]。生物处理系统构成方式不局限于空间上的功能单元组合如 A²/O 系列、氧化沟系列,以及时间上的功能单元组合如 SBR 系列工艺等。基于以上理念,沿程布点测试重点针对功能单元开展,以传统 A²/O 为例阐述主要功能单元的共性评估内容,具体如表 1 所示。

表 1 工艺系统功能单元评估

Tab.1 Function unit evaluation of process system

功能单元		特征污染物	理化指标	沿程布点	评估内容		诊断方法	
					特征污染物	理化指标	特征污染物	理化指标
生物处理	预缺氧区	NO ₃ ⁻ - N	DO ORP	出口	NO ₃ ⁻ - N:缺氧环境	DO:缺氧环境 ORP:缺氧环境	NO ₃ ⁻ - N:≤1.5 mg/L	DO: < 0.2 mg/L ORP: < -50 mV
	厌氧区	NO ₃ ⁻ - N PO ₄ ³⁻ - P	DO ORP	进口 出口	NO ₃ ⁻ - N:厌氧环境 PO ₄ ³⁻ - P:释磷效果	DO:厌氧环境 ORP:厌氧环境	NO ₃ ⁻ - N:≤1.5 mg/L PO ₄ ³⁻ - P:核算释磷量	DO: < 0.2 mg/L ORP: < -250 mV
	缺氧区	NO ₃ ⁻ - N	DO ORP	进口 出口	NO ₃ ⁻ - N:反硝化 脱氮效果	DO:缺氧环境 ORP:缺氧环境	NO ₃ ⁻ - N: 核算反硝化脱氮量	DO: < 0.2 mg/L ORP: < -50 mV
	好氧区	NH ₃ - N	DO	进口 出口	NH ₃ - N:硝化效果	DO:好氧环境	NH ₃ - N: 核算氨氮去除能力	DO: ≥2 mg/L
	泥水分离区	NH ₃ - N NO ₃ ⁻ - N	DO	进口 出口	NH ₃ - N:硝化效果 NO ₃ ⁻ - N:反硝化 脱氮效果	DO:好氧环境	NH ₃ - N:硝化效果 NO ₃ ⁻ - N:反硝化 脱氮效果	DO: ≥2 mg/L
深度处理	强化脱氮区	NO ₃ ⁻ - N TN COD	DO ORP	进口 出口	NO ₃ ⁻ - N:反硝化 脱氮效果	DO:缺氧环境 ORP:缺氧环境	NO ₃ ⁻ - N:反硝化 脱氮效果 TN:达标能力 COD:是否增加	DO: < 1.5 mg/L ORP: < -50 mV
	强化除磷区	PO ₄ ³⁻ - P TP STP	—	进口 出口	PO ₄ ³⁻ - P:除磷效果 TP:除磷效果 STP:除磷效果	—	PO ₄ ³⁻ - P:正磷酸盐 去除能力 TP:达标能力 STP:溶解性总磷去除 能力	—

需要特别说明的是:

① 功能单元的效能评估,包括功能环境的判断和功能效果的核算。功能环境的判断以理化指标为主,功能效果的核算公式如下:

$$C_w = \frac{C_{进口} + R \cdot C_{外回流} + r \cdot C_{内回流}}{1 + R + r} - C_{出口} \quad (1)$$

式中: C_w 为某功能单元特征污染物去除能力, mg/L; C_{进口}、C_{出口} 分别为某功能单元入口、出口特征污染物浓度, mg/L; C_{外回流} 为某功能单元外回流特征污染物浓度, mg/L; C_{内回流} 为某功能单元内回流特征污染物浓度, mg/L; R 为外回流比; r 为内回流比。

② 沿程布点依据功能单元在时间或空间上的

组合方式不同而采用不同的取样方法,如 A^2/O 工艺等沿空间流程布点, SBR 工艺沿时间流程布点。

③ 结合功能单元前后衔接特性取样,某功能单元的出口即为下一个功能单元进口,某功能停止时间为下一个功能的起始时间,充分利用功能单元时间或空间的连续性。

④ 采用权重分析法核算功能单元污染物去除能力。

⑤ 功能单元污染物去除能力可用于核算功能单元污染物去除贡献率。

1.3.3 基于速率测定的模型分析

在沿程布点测试的基础上,进一步开展活性污泥性能测试,包括活性污泥速率测定和效能速率耦合分析,支撑功能单元的污染物去除能力核算。

① 活性污泥速率测定

活性污泥速率测定目标是评估活性污泥性能,是核算功能单元污染物去除能力的基础,包括比硝化速率、比反硝化速率、比释磷速率、比耗氧速率等。速率测定内容及目标如表 2 所示。

表 2 活性污泥速率测定内容及目标

Tab. 2 Content and target of activated sludge rate measurement

测定内容	速率单位	测定目标
比硝化速率	$\text{mgNH}_3 - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$	活性污泥硝化性能
比反硝化速率	$\text{mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$	活性污泥反硝化性能
比释磷速率	$\text{mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$	活性污泥释磷性能
比耗氧速率	$\text{mgO}_2/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$	活性污泥耗氧性能

② 效能分析

效能分析是综合沿程布点测试结果及活性污泥速率测定结果开展的功能单元效能综合分析,通过速率测定结果结合功能单元实测 MLVSS 及实际水力停留时间(HRT),核算功能单元的污染物去除能力,与沿程布点测试核算的功能单元污染物实测去除效果比对,判断功能单元的污染物去除潜力,支撑后续基于模拟试验的潜力挖掘。

1.3.4 基于模拟试验的潜力挖掘

结合效能分析结果,以功能单元潜力挖掘为目标,重点围绕脱氮除磷功能提升,开展硝化能力提升、反硝化能力提升、释磷能力提升等对策分析。

① 硝化能力提升

结合活性污泥硝化效果影响因素,以曝气池混合液为研究对象,开展基于活性污泥浓度提升、溶解氧优控的硝化能力提升模拟试验。当无法满足要求时,可采取扩容或投加填料方式,扩容量核算参考硝化速率测定结果;填料投加量参考填料硝化速率具体参数。需要注意的是,均应采用冬季低温条件下的活性污泥或填料的硝化速率。

② 反硝化能力提升

结合活性污泥反硝化效果影响因素,重点开展外加碳源反硝化、内源反硝化模拟试验,外加碳源反硝化模拟试验目的是核算单位外碳源的硝酸盐氮去除量,结合实际脱氮需求核算外加碳源量,外碳源一般选用乙酸或乙酸钠。内源反硝化模拟试验是核算进水中内碳源反硝化能力,结合测试结果可将传统的预缺氧区改造为内源反硝化区(仅有外回流),或降低内回流比,延长缺氧区的实际水力停留时间,提升内碳源反硝化能力。

经大量工程实测,内回流液 DO 一般为 $2 \sim 5 \text{ mg/L}$,而内回流点一般设置于缺氧区前端,高 DO 回流液与进水混合直接导致碳源的无效消耗,理论上 1 mg/L 的 DO 对应 0.35 mg/L 的硝酸盐氮去除量,按内回流比为 300% 核算,内回流 DO 导致硝酸盐氮理论削减量减少 $2 \sim 5 \text{ mg/L}$ 。为此,以好氧池末端混合液为研究对象,开展耗氧速率测定,核算消氧所需时间,提出合理的硝化区池容建议。

③ 除磷能力提升

结合前续出水 TP 组分分析结果,判断影响 TP 达标的主要影响因素,辅助开展化学除磷试验,建立不同药剂不同投加量的对应磷酸盐去除量模型曲线,以指导实际工程运行优化。需注意传统协同化学除磷对生物除磷的影响,大量工程测试发现长期过量投加除磷药剂严重影响生物除磷。同时化学除磷药剂对设备管道的腐蚀作用明显,对曝气头、仪表的污堵现象严重,建议以后置化学除磷为宜。

1.4 应用验证

应用验证分两个层面:一个层面是现场评估,立行立改;另一个层面是实施必要的工程措施。当采取现场评估、立行立改无法达到提标需求时,通过系统诊断提出技术对策,实施必要的工程措施。现场评估、立行立改的技术对策一般包括投加外碳源强化反硝化、调整污泥浓度、调整曝气量、调整回流比、调整进水分配比例等。工程措施一般包括增加工艺

单元、增加池容、投加悬浮填料等。

2 应用案例

2.1 工程概况

常州江边污水处理厂三期工程于2012年9月投入运行,设计处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分两组工艺系列,采用水解酸化+改良 A^2/O +高效沉淀池+V型滤池组合工艺(见图2),出水水质执行GB 18918—2002一级A标准。基于《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)的主要污染物指标要求,应用“四位一体”精准诊断技术方法,开展了系统评估。

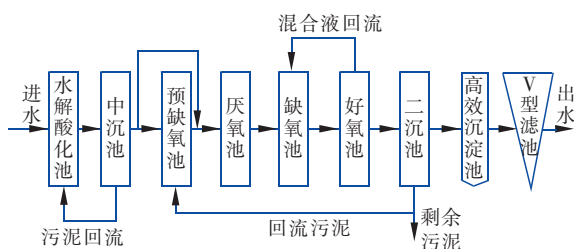


图2 江边污水处理厂三期工艺流程

Fig. 2 Process flow of Jiangbian WWTP phase III

2.2 问题初筛

基于全国城镇污水处理管理信息系统,对江边污水厂三期2014年进水 BOD_5/TN 、 BOD_5/TP 、 SS/BOD_5 等关键指标的月变化特征开展分析,结果表明,月均 BOD_5/TN 值为2.03~3.48,均值仅为2.50,进水碳氮比偏低。

2.3 难点解析

① 达标主要影响因素

为进一步确认达标影响因素,分析了进水 BOD_5/TN 、 BOD_5/TP 等关键指标的日变化特征及累积频率。结果表明,进水 $\text{BOD}_5/\text{TN} < 4$ 的累积频率高达95.3%,确认进水碳氮比偏低是TN达标的主要影响因素;进水 $\text{BOD}_5/\text{TP} < 20$ 的累积频率为45.3%,碳源不足同步影响生物除磷。

② 达标主要影响因子

统计出水TN、COD、TP等主要指标累积频率,出水TN $> 10 \text{ mg/L}$ 的累积频率为31.7%,出水TP $> 0.3 \text{ mg/L}$ 的累积频率仅为4.7%,出水COD $< 40 \text{ mg/L}$ 的累积频率近100%,进一步确认TN为达标主要影响因子。

2.4 系统诊断

① 预处理单元跌水复氧

跌水复氧导致进水碳源直接和间接损耗,预处理单元沿程DO浓度变化如图3所示。由图3可以看出,复氧点主要为提升泵出口及沉砂池出口,仅沉砂池出口跌水导致生物池进水DO高达 3.7 mg/L ,将直接导致进水碳源损耗 3.7 mg/L 。

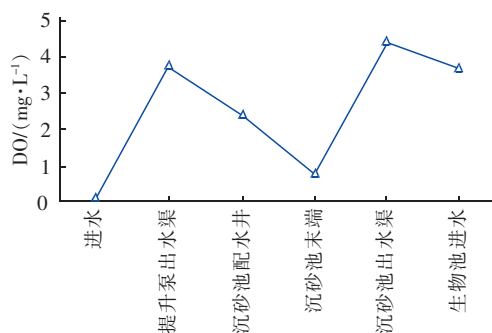


图3 预处理单元沿程主要节点DO浓度变化

Fig. 3 DO concentration variation of main nodes along pretreatment unit

② 内回流混合液DO控制

生产性测试发现内回流混合液DO会直接导致碳源无效损耗,实测内回流点DO变化范围 $2.55 \sim 2.81 \text{ mg/L}$,均值为 2.68 mg/L ,结合实际内回流比(约150%),理论核算内回流混合液DO导致缺氧池碳源损耗 4.02 mg/L 。

③ 缺氧池具有反硝化除磷功能

为诊断系统生物除磷性能,对江边污水厂三期生物系统沿程主要节点 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度开展生产性测试。结果(见图4)表明,厌氧池 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 6.6 mg/L ,生物释磷能力较强,同时发现 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 在缺氧区明显下降,存在反硝化除磷现象。进一步开展了缺氧池反硝化除磷模拟试验,结果(见图5)表明,1h内 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别下降 1.84 mg/L 和 2.95 mg/L ,结合污泥浓度,核算污泥反硝化除磷速率为 $1.13 \text{ mgPO}_4^{3-}-\text{P}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。

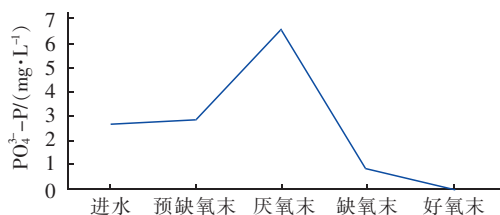


图4 生物系统沿程主要节点 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度

Fig. 4 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ concentration of the main nodes of biological system

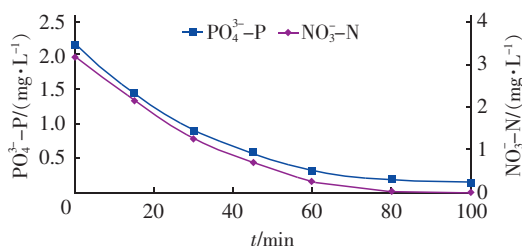


图5 缺氧池反硝化除磷模拟试验结果

Fig. 5 Simulation experiment result of denitrifying phosphorus removal of anoxic tank

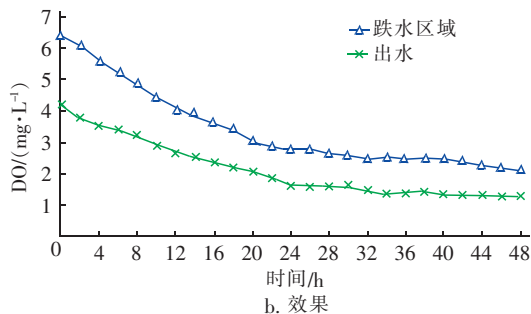
2.5 应用验证

① 预处理单元跌水复氧控制

针对预处理单元跌水复氧问题,创新提出了跌水复氧加盖控制技术^[2],并在江边污水厂三期预处理单元成功开展了工程应用(见图6)。对进水提升泵出水渠实施了加盖控氧改造,进水提升泵出水渠污水 DO 均值由加盖前的 4.15 mg/L 降至加盖后的 1.25 mg/L,降幅达 70%。



a. 实景



b. 效果

图6 进水泵房出水渠加盖控氧实景及效果

Fig. 6 Real scene and effect of reoxygenation control by covering the outlet canal of inlet pump room

② 内碳源开发利用

通过反硝化速率测试,发现活性污泥的内源反硝化能力较强,结合预缺氧池设计 HRT 为 1.5 h 的现状,预缺氧池调整为仅回流污泥的内源反硝化模式,回流污泥 NO₃⁻-N 平均为 8 mg/L,预缺氧池出

水 NO₃⁻-N 降至 1 mg/L 以下,利用内碳源脱氮,节省进水碳源 20 mg/L 以上用于后续缺氧区。

③ 内回流混合液 DO 控制

针对内回流混合液高 DO 损耗碳源难题,提出消氧区策略^[3],利用缺氧池与好氧池之间的三角形缓冲区(HRT 为 10 min)作为消氧区(见图7),实施好氧池曝气量优化调控+消氧区综合策略。调控后好氧池回流点 DO 均值从 2.62 mg/L 降至 1.65 mg/L,通过后续消氧区,DO 均值从 1.65 mg/L 降至 0.63 mg/L,结合内回流比(300%),节省碳源 6 mg/L。



图7 江边污水厂三期消氧区实景

Fig. 7 Scene of oxygen elimination area of Jiangbian WWTP phase III

2.6 综合效益分析

通过在常州江边污水处理厂系统化精准诊断与运行优化调控,有效识别运行现状问题,并结合生产性试验测试和模拟试验研究,制定运行优化策略,实施后形成以下综合效益:

① 通过预处理系统跌水复氧控制,进水 DO 均值由加盖前的 4.15 mg/L 降至加盖后的 1.25 mg/L,相应节省碳源 2.9 mg/L。

② 通过实施好氧池曝气量优化调控+消氧区策略,内回流 DO 均值由调控前的 2.62 mg/L 降至 0.63 mg/L,结合内回流比(300%),节省碳源 6 mg/L。

③ 通过将预缺氧池调整为仅回流污泥的内源反硝化模式,回流污泥 NO₃⁻-N 平均为 8 mg/L,预缺氧池出水 NO₃⁻-N 降至 1 mg/L 以下,结合外回流比(100%),利用内碳源反硝化脱氮节省碳源 20 mg/L 以上。

综上所述,优化措施不仅提升了系统的脱氮除磷效能,同时节省了碳源,按 10 × 10⁴ m³/d 规模核算,共节省碳源 28.9 t/d,按乙酸钠价格为 3 000 元/t 核算,节省碳源费用 8.67 万元/d,经济效益显著。

(下转第 13 页)