

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.05.012

iMLE工艺强化脱氮和节能降耗的应用实践

张翹霖^{1,2}, 邬甘霖³, 廖思帆³, 朱信超³, 李宝伟³,

WANG Jianmin⁴, 刘国强¹

(1. 暨南大学 环境学院, 广东 广州 510632; 2. 深圳市水务集团有限公司 盐田分公司, 广东 深圳 518031; 3. 深圳市深水光明水环境有限公司, 广东 深圳 518107; 4. 密苏里科技大学, 美国)

摘要: 利用间歇式缺氧-好氧工艺(iMLE)工艺,对深圳市深水光明水质净化厂一组生化系统进行了强化脱氮改造。在生产性试验中,当处理量为 $2.5\times 10^4\sim 3.15\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 时,分别在雨季、旱季和旱季高流量下,分析了iMLE工艺的脱氮效率、曝气风量消耗、碳源投加量,以及污泥硝化与反硝化活性等。在雨季(8月1日—10月8日)、旱季(10月9日—12月2日)和旱季高流量(12月3日—31日)三个阶段,进水总氮浓度分别为21.9、32.3和42.2 mg/L, BOD_5/TN 值分别为2.9、3.2和2.9,总氮容积负荷分别为45.9、61.8和92.3 $\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,表明三个阶段的进水TN浓度和负荷差异显著,而 BOD_5/TN 值差异不大。三个阶段的平均出水总氮浓度分别为4.7、5.8和8.5 mg/L,平均去除率分别为78.2%、81.7%和79.4%。试验期间,iMLE工艺未投加任何碳源,相比于平行的两级A/O工艺,节约碳源投加费用约0.15元/ m^3 。旱季高流量时,iMLE工艺去除单位COD所消耗的气量相比两级A/O工艺仍下降了41%。此外,当碳源充足时,iMLE工艺和两级A/O工艺的最大污泥反硝化速率分别为4.4和3.6 $\text{mg}/(\text{gVSS}\cdot\text{h})$,表明iMLE工艺污泥的反硝化活性更强。因此,iMLE工艺能协同提高脱氮效率、降低脱氮成本和减少碳排放量,为污水厂改造提供了新方案。

关键词: iMLE工艺; 生物脱氮; 城市污水; 生产性试验; 节能降耗

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)05-0088-07

Application and Practical Implementation of iMLE Process for Enhancing Nitrogen Removal and Energy Saving and Consumption Reduction

ZHANG Qiao-lin^{1,2}, WU Gan-lin³, LIAO Si-fan³, ZHU Xin-chao³, LI Bao-wei³,

WANG Jian-min⁴, LIU Guo-qiang¹

(1. School of Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Yantian Branch, Shenzhen Water <Group> Co. Ltd., Shenzhen 518031, China; 3. Shenzhen Shenshui Guangming Water Environment Co. Ltd., Shenzhen 518107, China; 4. Missouri University of Science and Technology, USA)

Abstract: One of the biological treatment units at Shenshui Guangming Wastewater Treatment Plant were upgraded for enhancing nitrogen removal through the implementation of intermittent modified Ludzack-Ettinger (iMLE). In the production test, when the treatment capacity was $2.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ to $3.15\times$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170035)

通信作者: 刘国强 E-mail: gqliu@jnu.edu.cn

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, the nitrogen removal efficiency, aeration air consumption, carbon source dosage, and sludge nitrification and denitrification activities of the iMLE process were analyzed under the conditions of rainy season, dry season, and dry season with high flow, respectively. During the rainy season (from August 1 to October 8), the dry season (from October 9 to December 2), and the dry season with high flow (from December 3 to December 31), the total nitrogen of the influent was 21.9 mg/L, 32.3 mg/L, and 42.2 mg/L, respectively. The corresponding BOD_5/TN ratios were 2.9, 3.2, and 2.9. The total nitrogen volumetric load were $45.9 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, $61.8 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, and $92.3 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, respectively. These data indicated significant variations in the influent total nitrogen and volumetric load across the three periods, while the BOD_5/TN ratios remained relatively consistent. The mean total nitrogen of the effluent in the three periods were 4.7 mg/L, 5.8 mg/L, and 8.5 mg/L, respectively, with corresponding average removal efficiencies of 78.2%, 81.7%, and 79.4%. During the field experiment, the iMLE process did not require the addition of any carbon source, thereby eliminating the associated cost of approximately 0.15 yuan/ m^3 compared to the parallel two-stage A/O process. During the dry season with high flow, the air consumption for removing unit COD using the iMLE process remained 41% lower compared to that of the two-stage A/O process. Under conditions of adequate carbon sources, the maximum specific denitrification rates for the iMLE process and the two-stage A/O process were $4.4 \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ and $3.6 \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$, respectively. This indicated that the iMLE process exhibited superior denitrification activity compared to the two-stage A/O process. Therefore, the iMLE process enhances the efficiency of nitrogen removal, reduces the associated costs, and decreases carbon emissions, thereby offering a novel solution for wastewater treatment plant upgrading.

Key words: iMLE process; biological nitrogen removal; municipal sewage; production test; energy saving and consumption reduction

城市污水排放是水体氮污染的重要来源^[1-2]。为此,众多执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B排放标准的污水厂需要进行提标改造,要求出水总氮达到小于15 mg/L的一级A排放标准。而部分省市,根据当地的水污染防治要求,出台了更为严格的地方排放标准,如北京市的《水污染物综合排放标准》(DB 11/307—2013)、天津市的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015)中的A标准、《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)等。目前,污水厂常采用前置缺氧工艺去除总氮,如A/O工艺^[3-4]和A²O工艺^[5]。前置缺氧工艺需要将硝化液内回流至缺氧池完成反硝化。然而,好氧池中的硝化液理论上无法完全回流至前置缺氧池,故总氮去除率不高。在A/O或A²O工艺的末端增设后置缺氧池或反硝化滤池,通过外加碳源可以进一步提高总氮去除率,但会显著增加运行费用和碳排放量^[6-7]。此外,采用两级或多级A/O工艺,再配备分段进水,

也可以进一步提高总氮去除率^[8]。通过间歇曝气,可在同一个反应池中创造好氧/缺氧交替的环境,也能实现对总氮的去除,如改良的CASS工艺^[9]和SBR工艺^[10]。

有研究者将前置缺氧和间歇曝气结合起来,提出了iMLE (intermittent modified Ludzack-Ettinger)工艺^[11]。该工艺融合了两类脱氮手段的优点,能够减少硝化液“外溢”,同时提高对污水中原有碳源的利用效率。在处理碳源充足的城市污水时,可以将出水总氮浓度降低至3 mg/L;即使在处理碳源不足的城市污水时($\text{BOD}_5/\text{TN}=2.4$),在未投加碳源的情况下出水氨氮和总氮均值也分别达到了0.3和4.8 mg/L^[11]。

深圳市深水光明水质净化厂采用两级A/O工艺,虽然进水碳源不充足,但出水TN基本能达到国家一级A排放标准。从2019年4月起,该厂要求执行出水TN小于10 mg/L的新要求。为了稳定达到新的排放标准,需外加碳源提高TN去除率,但会显

著增加处理成本。笔者采用iMLE工艺对该厂一组生化系统进行了试验性改造,三个月的试运行结果初步论证了该新工艺在生产性规模上应用的可行性。然后进一步测试了iMLE工艺在华南地区雨季、旱季和旱季高流量下的脱氮效率和曝气节省情况,分析了iMLE工艺中脱氮微生物的活性。

1 材料与方法

1.1 工艺改造

试验在深圳市深水光明水质净化厂进行,该厂设计规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中一期为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,共有6组平行运行的生化系统(包括AN、AS、BN、BS、CN和CS,改造前均采用两级A/O工艺),每组设计处理量为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。为了满足出水总氮浓度不超过 10 mg/L 的新要求,2019年5月9日起,在缺氧池2前端投加乙酸钠溶液,见图1(a),但是显著增加了运行费用。2020年3月—4月,采用前期研发的iMLE工艺对一期BN组生化系统进行了改造^[12],见图1(b),并开展了强化脱氮生产性试验。BN组原采用厌氧+两级A/O工艺,其中厌氧池、缺氧池1、好氧池1、缺氧池2和好氧池2的容积分别为544、2 695、3 998、3 072、4 144 m^3 。改造以后的测试结果显示,iMLE工艺可在不外加碳源的情况下取得良好的脱氮效果^[11]。鉴于华南地区雨季和旱季水质差异较大,后续研究分析了改造后的BN组在雨季、旱季和旱季高流量下的脱氮效果和曝气消耗情况。

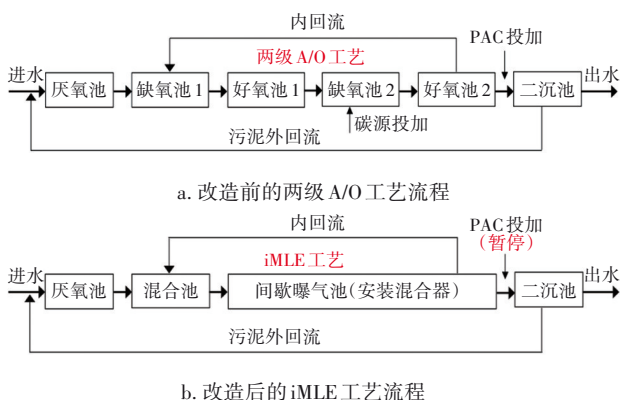


图1 两级A/O工艺与iMLE工艺对比

Fig.1 Comparison of two-stage A/O and iMLE processes

1.2 工艺运行与优化

分析新工艺在雨季(8月1日—10月8日)、旱季(10月9日—12月2日)和旱季高流量(12月3日—31日)三个阶段的脱氮效果。改造前BN组的设计量为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (试验期间实际处理量为 $2.5 \times 10^4 \sim$

$3.15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),上述三个阶段的实际平均流量分别为 2.96×10^4 、 2.66×10^4 和 $3.05 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据前期研究结果,BN组按iMLE工艺的DO控制模式运行,即通过间歇曝气池末端的DO浓度控制曝气设备的开停。曝气时,当 $\text{DO} \geq 2 \text{ mg/L}$ 时,延迟曝气15~25 min关闭曝气电动阀;关停曝气后,当DO降至 0.5 mg/L 以下时,再延迟30~40 min开启曝气电动阀。试验期间未外加碳源。

生产性试验期间,每日测定进水混合样的COD、 BOD_5 、TN和氨氮,以及上午出水瞬时样的COD。鉴于出水氮浓度波动较大,出水TN、氨氮和硝酸盐在上、下午各测一次。同时,记录BN组每日的空气消耗量,以及相邻两级A/O系统的外加碳源量。

1.3 周期性试验

为了探究生化系统中氨氮、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 在一个曝气/混合周期内的变化规律,于稳定运行的状态下分析了iMLE工艺间歇曝气池中DO、氨氮、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 的变化规律。当iMLE工艺曝气时段转入混合时段后,每隔10 min采集一次水样,分析上述指标的变化。

1.4 污泥脱氮能力的测定

当系统稳定运行后,通过批式试验测定了两级A/O工艺和iMLE工艺中活性污泥的最大硝化和反硝化速率。当测定污泥最大硝化速率时,首先向量筒中加入2 L相同浓度的活性污泥,然后启动增氧泵,使 $\text{DO} > 2 \text{ mg/L}$,再每隔15 min收集一次反应器中的样品,用于分析氨氮浓度的变化。当测定最大反硝化速率时,首先向装置中加入1.5 L相同浓度的活性污泥,然后通过气袋不断向其中充入氮气,确保DO低于 0.5 mg/L 后,再每隔15 min收集一次反应器中的样品,用滤膜过滤后分析硝酸盐浓度的变化。当测定碳源充足下污泥的最大反硝化速率时,需先加入足量的醋酸钠补充碳源。

1.5 分析项目及方法

COD采用重铬酸盐法测定, BOD_5 采用接种稀释法测定,TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定, NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定, NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定,TP采用连续流动-钼酸铵分光光度法测定,污泥浓度(MLSS)采用重量法测定,pH采用pH计测定,DO采用实时监测溶氧仪测定。

2 结果与讨论

2.1 iMLE工艺对COD的去除效果

雨季和旱季时段iMLE工艺进水COD和BOD₅以及出水COD浓度的变化如图2所示。可以看出,试验期间进水COD和BOD₅浓度范围分别为93~484和31~185 mg/L。在雨季、旱季和旱季高流量阶段,进水COD均值分别为173、274和352 mg/L,而进水BOD₅均值分别为64、102和123 mg/L,可见雨季和旱季进水COD浓度差异较大。然而,三个阶段的平均出水COD浓度均为17~20 mg/L,平均去除率均稳定达到了90%以上,表明采用间歇曝气的iMLE工艺能实现稳定高效的COD去除效果。在生物脱氮污水处理系统中,为了维持良好的硝化活性,污泥龄和水力停留时间一般较长^[13],因此采用间歇曝气也能实现良好的有机质去除效果。另一方面,由于渗漏、化粪池代谢、管网代谢等原因^[14],南方污水厂进水中COD浓度往往较低,采用间歇曝气也能实现良好的COD去除效果。

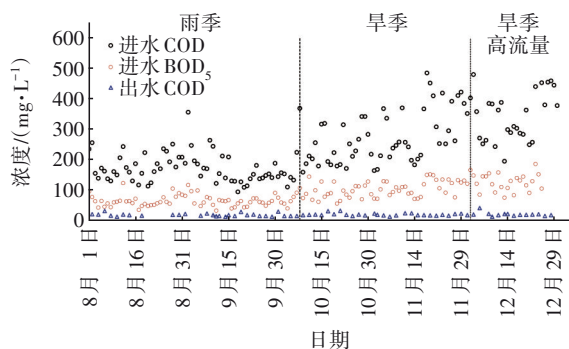


图2 雨季和旱季阶段iMLE工艺进水COD和BOD₅以及出水COD浓度的变化

Fig.2 Variation of influent COD and BOD₅ concentrations as well as effluent COD concentration of iMLE process during the rainy and dry seasons

2.2 iMLE工艺对氨氮的去除效果

生产性试验期间的进出水氨氮浓度如图3所示。可以看出,进水氨氮浓度为9.4~39.9 mg/L,在雨季、旱季和旱季高流量阶段,进水氨氮浓度的均值分别为17.3、24.9和32.3 mg/L,可见雨季和旱季进水氨氮浓度存在明显差异。在雨季和一般旱季(12月3日前),出水氨氮浓度比较稳定,基本低于1.5 mg/L的排放标准。在旱季高流量阶段(12月3日—31日),出水氨氮浓度出现了波动,甚至出现了高于排放标准的情况,这是由高负荷下曝气量不足

引起的。3个试验阶段的平均出水氨氮浓度分别为0.37、0.61和0.86 mg/L,平均去除率均高于97%,表明采用间歇曝气的iMLE工艺+精准的DO控制能稳定去除氨氮。

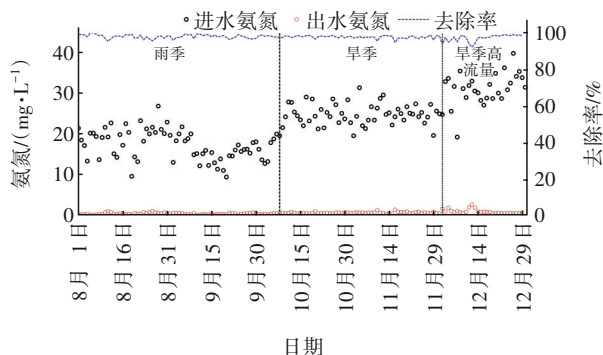


图3 雨季和旱季阶段iMLE工艺氨氮浓度的变化

Fig.3 Variation of ammonia nitrogen concentration of iMLE process during the rainy and dry seasons

2.3 iMLE工艺对TN的去除效果

iMLE工艺在雨季和旱季时进出水总氮的变化如图4所示。

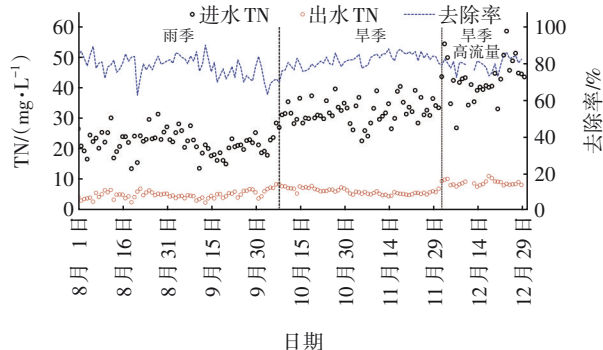


图4 iMLE工艺在雨季和旱季时进出水总氮的变化

Fig.4 Variation of influent and effluent TN concentrations of iMLE process during the rainy and dry seasons

从图4可以看出,进水TN浓度在13.3~58.5 mg/L。在雨季、旱季和旱季高流量阶段,进水TN均值分别为21.9、32.3和42.2 mg/L,而每日进水总氮负荷分别为638、859和1284 kg/d,旱季高流量阶段的总氮负荷是雨季的2倍。在雨季和一般旱季阶段,出水TN浓度比较稳定,始终低于10 mg/L的排放标准。在旱季高流量阶段,出水TN出现了波动,且很多时候超出了排放标准,这说明已达到了iMLE工艺的脱氮极限。三个试验阶段的平均出水总氮浓度分别为4.7、5.8和8.5 mg/L,平均去除率分别为78.2%、81.7%和79.4%。可见,在旱季高流量

时,虽然出水总氮有所升高,但TN的平均去除率与雨季和旱季差异不大。试验期间,iMLE工艺一直未投加碳源,但在雨季和一般旱季阶段出水TN的浓度和去除率与前期测定的配备了碳源投加的两级A/O工艺相当(见表1)。

表1 TN和氨氮的去除效果对比

Tab.1 Comparison of removal effects of TN and ammonia nitrogen

项 目	TN				NH ₃ -N		
	进水/ (mg·L ⁻¹)	负荷/ (kg·d ⁻¹)	出水/ (mg·L ⁻¹)	去除 率/%	进水/ (mg·L ⁻¹)	出水/ (mg·L ⁻¹)	去除 率/%
两级A/O(未加碳源) ^[12]	33.6±15	769	10.3±2.3	69.0	14.2±6.1	0.4±0.2	97
两级A/O(加碳源) ^[12]	27.9±5.8	673	5.6±1.4	80.0	20.8±6.2	0.2±0.1	99
iMLE(雨季)	21.9±3.8	638	4.7±1.3	78.2	17.3±3.6	0.4±0.2	98
iMLE(旱季)	32.3±4.2	859	5.8±1.0	81.7	24.9±2.5	0.6±0.2	98
iMLE(旱季高流量)	42.2±6.4	1 284	8.5±0.9	79.4	32.3±4.0	0.9±0.6	97

进水TN容积负荷和C/N值均会影响出水TN浓度和TN去除率,为此分析了iMLE工艺出水TN浓度和去除率与TN容积负荷和进水BOD₅/TN值的相关性。试验期间,进水TN容积负荷在29~133 g/(m³·d)范围内变化,在雨季、旱季和旱季高流量条件下,平均值分别为45.9、61.8、92.3 g/(m³·d)。进水BOD₅/TN值的变化范围为1.5~5.7,均值分别为2.9、3.2、2.9。分析结果表明,出水TN浓度与TN容积负荷相关性明显(见图5),而受进水BOD₅/TN值的影响不显著。此外,TN去除率与进水TN容积负荷和BOD₅/TN值的相关性均不显著。

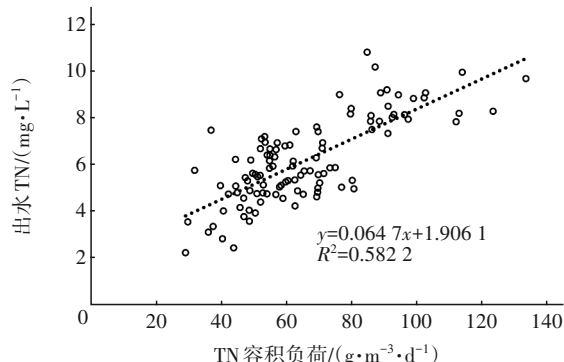


图5 出水TN浓度与TN容积负荷的相关性

Fig.5 Correlation between effluent TN concentration and TN volumetric load

2.4 iMLE工艺的碳源节省量和曝气量消耗

试验期间,iMLE工艺一直没有投加碳源,而该厂其他组采用两级A/O工艺的系统仍保持了碳源投加。表2为处理相同水量、水质的其他组两级A/O工艺的同期碳源投加量,试验期间总共节省了碳源492.48 t,节约费用约63万元。经计算,每处理10 000 m³污水,采用iMLE工艺可以节约碳源投加量1.14 t,节省费用1 460元,即水节约药剂投加费用约0.15元/m³。

表2 试验期间iMLE工艺每月节省的碳源投加量和费用

Tab.2 Monthly savings for external carbon source dosage and cost in iMLE process during the field experiment

时间	平均流量/ (m ³ ·d ⁻¹)	节省碳源 量/t	节省碳源 费用/元
2020年8月	28 657	97.45	124 731
2020年9月	31 002	90.45	115 778
2020年10月	26 251	119.54	153 006
2020年11月	27 313	88.53	113 321
2020年12月	30 582	96.51	123 527

此外,iMLE工艺还可降低曝气量。以两级A/O工艺为例,1 m³水消耗的气量和去除单位COD消耗的气量分别为3.6 m³/m³和19.8 m³/kg^[12]。在雨季、旱季和旱季高流量情况下,iMLE工艺处理1 m³水消耗的气量分别为1.9、2.5和4.1 m³,见表3。旱季高流量时,虽然消耗的气量相对两级A/O工艺有所升高,但是去除单位COD消耗的气量仍然降低了41%。可见,iMLE工艺不仅能提高总氮去除率,还能降低曝气量,进一步节能和降低碳排放。

表3 试验期间iMLE工艺的曝气消耗

Tab.3 Aeration consumption for iMLE process during the field experiment

项 目	空气消耗量/ (m ³ ·d ⁻¹)	1 m ³ 水消 耗的气量/ m ³	去除单位COD 消耗的气量/ (m ³ ·kg ⁻¹)
两级A/O(加碳源) ^[12]	107 625±14 948	3.6	19.8
iMLE(雨季)	57 642±9 786	1.9	11.2
iMLE(旱季)	66 268±12 241	2.5	9.1
iMLE(旱季高流量)	124 349±12 604	4.1	11.6

2.5 DO、氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的周期性变化

iMLE工艺一个曝气/混合周期内氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和DO浓度的变化如图6所示。由于采用了间歇曝气,间歇曝气池中DO呈先升高后降

低的趋势。当曝气开启时,DO升高,处于好氧状态,间歇曝气池中累积的氨氮被转化为硝酸盐氮。当曝气停止后,硝酸盐氮被外源反硝化或内源反硝化转化成氮气,因此硝酸盐氮浓度下降。在iMLE工艺中,内回流的硝酸盐氮也将前置缺氧池中被去除。因此,在前置反硝化和间歇曝气反硝化的共同作用下,增加了反硝化时间和空间,因而在不外加碳源的情况下也能维持良好的总氮去除率。

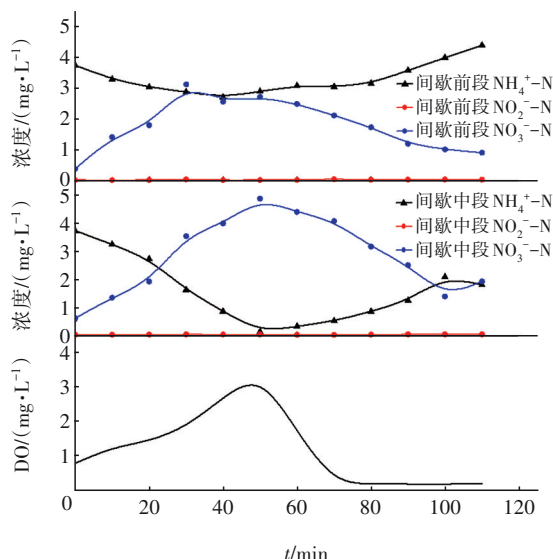


图6 iMLE工艺中一个曝气/混合周期内氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和DO浓度的变化

Fig.6 Changes in ammonia nitrogen, nitrite, nitrate and DO concentrations during one cycle of aeration/mixing in iMLE process

在停曝阶段,由于停曝的时间不长,而且推流式的间歇曝气池具有良好的缓冲能力,因此在停曝末期累积的氨氮浓度也不高。此外,后置曝气能进一步去除间歇曝气池中溢出的氨氮,使二沉池出水氨氮浓度稳定达标。间歇曝气也作为新型脱氮路径的实现手段,如短程硝化-反硝化、短程硝化-厌氧氨氧化等,但在iMLE工艺的前段和中段,均未发现亚硝酸盐累积现象。

2.6 iMLE工艺污泥的硝化和反硝化性能

iMLE工艺采用了间歇曝气,与采用连续曝气的两级A/O相比,具有不同的硝化反硝化活性。研究结果表明,两级A/O工艺和iMLE工艺污泥的最大硝化速率分别为2.3和1.7 mg/(gVSS·h),表明A/O工艺的污泥具有更高的硝化能力。无论是初始污泥,还是碳源充足时,iMLE工艺污泥的反硝化能力均高

于两级A/O工艺污泥。当无额外碳源投加时,两级A/O工艺和iMLE工艺污泥的反硝化速率分别为0.75和0.93 mg/(gVSS·h);当额外投加碳源后,两种污泥的反硝化速率分别为3.6和4.4 mg/(gVSS·h)。采用间歇曝气的iMLE工艺压缩了硝化反应的时间与空间,但增加了反硝化的时间与空间,这可能是该工艺污泥具有更低硝化能力和更高反硝化能力的原因。

3 结论

① 在雨季、旱季和旱季高流量阶段,进水总氮浓度分别为21.9、32.3和42.2 mg/L,进水总氮容积负荷分别为45.9、61.8和92.3 g/(m³·d),可见三个阶段的TN负荷差异显著。然而,三个试验阶段的平均出水总氮浓度分别为4.7、5.8和8.5 mg/L,平均去除率分别为78.2%、81.7%和79.4%,TN去除率差异不大。

② 试验期间,iMLE工艺未投加任何碳源,相比平行运行的两级A/O工艺,可节约碳源投加费用约0.15元/m³。此外,相比两级A/O工艺,iMLE工艺去除单位COD所消耗的气量下降了41%。

③ 相比两级A/O工艺,iMLE工艺污泥的硝化能力更弱,但反硝化能力更强,iMLE和两级A/O工艺的最大污泥反硝化速率分别为4.4和3.6 mg/(gVSS·h)。

④ iMLE工艺能协同提高脱氮效率、降低处理成本和减少碳排放,为污水厂改造提供了新方案。

参考文献:

- [1] 洗超凡,潘雪莲,甄泉,等.城市生态系统污染氮足迹与灰水足迹综合评价[J].环境科学学报,2019,39(3):985-995.
XIAN Chaofan, PAN Xuelian, ZHEN Quan, et al. Integrated assessments of nitrogen pollution footprints and grey water footprints in the urban ecosystem [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(3): 985-995 (in Chinese).
- [2] PREISNER M, NEVEROVA-DZIOPAKE, KOWALEWSKI Z. Analysis of eutrophication potential of municipal wastewater [J]. Water Science and Technology, 2020, 81(9): 1994-2003.
- [3] 罗晓,郑向阳,赵丛丛,等. A/O工艺中污泥浓度对微生物群落结构的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(1): 275-283.

- LUO Xiao, ZHENG Xiangyang, ZHAO Congcong, *et al.* Effects of sludge concentration on microbial community structure in A/O process [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38 (1): 275-283 (in Chinese).
- [4] 白婧平, 金明姬, 齐书亭. A/O工艺在污水处理厂的运行性能及经济性评价[J]. *水处理技术*, 2016, 42 (10): 125-128.
- BAI Jingping, JIN Mingji, QI Shuting. The performance and economic evaluation of the A/O process in sewage treatment plant [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(10): 125-128 (in Chinese).
- [5] 李瞳, 郝瑞霞, 刘峰, 等. A/A/O工艺脱氮除磷运行效果分析[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(8): 1729-1734.
- LI Tong, HAO Ruixia, LIU Feng, *et al.* Analysis on running effect for biological nitrogen and phosphorus removal of A/A/O technology [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5 (8): 1729-1734 (in Chinese).
- [6] 周政, 李怀波, 王燕, 等. 低碳氮比进水AAO污水处理厂低碳运行[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(11): 5088-5099.
- ZHOU Zheng, LI Huaibo, WANG Yan, *et al.* Research on low-carbon operation mode in AAO-based wastewater treatment plants with low C/N influent [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42 (11): 5088-5099 (in Chinese).
- [7] 张玲丽, 顾敦罡, 陆嘉麒, 等. MBBR用于某CAST工艺污水处理厂提标改造的效能及碳排放分析[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(2): 679-686.
- ZHANG Lingli, GU Dungan, LU Jiaqi, *et al.* Performance and carbon emission of applying CAST embedded with MBBR to retrofit a wastewater treatment plant [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(2): 679-686 (in Chinese).
- [8] 闫冬, 何争光, 韩艳萍, 等. 内回流比对分段进水循环A/O工艺系统性能的影响研究[J]. *工业水处理*, 2015, 35(6): 27-30.
- YAN Dong, HE Zhengguang, HAN Yanping, *et al.* Research on the influence of internal reflux ratio on the step-feed cycle A/O process system performance [J]. *Industrial Water Treatment*, 2015, 35 (6): 27-30 (in Chinese).
- [9] 马永鹏, 何争光, 宋宏杰, 等. 不同曝气方式对M-CASS处理酒精废水的影响[J]. *水处理技术*, 2010, 36(9): 110-113.
- MA Yongpeng, HE Zhengguang, SONG Hongjie, *et al.* Influence of different aeration modes on M-CASS process alcohol wastewater [J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(9): 110-113 (in Chinese).
- [10] 魏桃员, 陈玉婷, 何培弘, 等. SBR工艺处理早期垃圾渗滤液的试验研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39 (4): 107-113.
- WEI Taoyuan, CHEN Yuting, HE Peihong, *et al.* Experimental treatment of initial landfill leachate by SBR system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(4): 107-113 (in Chinese).
- [11] LIU G Q, WANG J M. Enhanced removal of total nitrogen and total phosphorus by applying intermittent aeration to the modified Ludzack-Ettinger (MLE) process [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166: 163-171.
- [12] ZHANG Q L, HUANG R X, JIANG L G, *et al.* Enhancing nitrogen removal and reducing aeration energy for wastewater treatment with intermittent modified Ludzack-Ettinger process: a field demonstration [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 43: 102303.
- [13] 孙月鹏, 王火青, 孙广垠, 等. 不同污泥龄条件下多级AO工艺强化生物脱氮性能研究[J]. *水处理技术*, 2014, 40(10): 47-52, 57.
- SUN Yuepeng, WANG Huoqing, SUN Guangyin, *et al.* Characteristics of enhanced biological nitrogen removal in multiple anoxic and aerobic processes under different sludge retention times [J]. *Technology of Water Treatment*, 2014, 40(10): 47-52, 57 (in Chinese).
- [14] 熊鸿斌, 夏晓宇, 王玉芳, 等. 低C/N值城市污水处理厂出水达标的运行条件优化[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(1): 92-96.
- XIONG Hongbin, XIA Xiaoyu, WANG Yufang, *et al.* Optimization of operating conditions of low C/N ratio municipal sewage treatment plant for meeting discharge standard [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29 (1): 92-96 (in Chinese).

作者简介: 张翹霖(1997-), 男, 广东梅州人, 硕士, 主要研究方向为污水生物处理技术。

E-mail: zhang199707777@163.com

收稿日期: 2023-01-05

修回日期: 2023-04-12

(编辑: 任莹莹)