

MAAO 工艺处理低碳氮比污水时流量的优化控制

李志华¹, 秋 亮¹, 吴晓婷², 张玥颖², 刘胜军³

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;
2. 西安创业水务有限公司, 陕西 西安 710086; 3. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 多段多级厌氧缺氧好氧工艺(MAAO)在实际工程中具有良好的运行效果,但在低碳氮比条件下如何优化运行策略尚不十分明确. 本研究在低碳氮比条件下($C/N < 6$),分析了在 5 组不同的进水流量和污泥分流量条件下污染物的去除效率. 结果表明:水力停留时间与同步硝化反硝化的贡献率是影响总氮去除率的关键因素,可通过加大前端进水比实现较长的水力停留时间;总磷的去除率主要依赖于第二、三、四级的厌氧池的释磷效率,该效率取决于厌氧池的水力停留时间. 综合考虑系统的脱氮除磷效能,确定进水流量分配比为 35% : 30% : 20% : 15%,污泥分流比为 10% : 19% : 29%的工况为最优工况. 本研究成果对于低碳氮比条件的脱氮除磷工艺运行具有较好的参考价值.

关键词: 多级厌氧缺氧好氧工艺;多段进水;分流比;脱氮除磷;同步硝化反硝化

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0288-06

Optimization of flow rates in a MAAO process treating low COD/TN Ratio municipal wastewater

LI Zhihua¹, QIU Liang¹, WU Xiaoting², ZHANG Yueying², LIU Shengjun³

(1. Department of Municipal and Environmental Engineering, Key Laboratory of Northwest Water Resource, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. Xi'an Capital Water Company Limited, Xi'an 710086, China;
3. CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Multilevel anaerobic/anoxic/oxic activated sludge process has been put into use with a favorable effect. However, it is not clear how to optimize the operation strategy. Under 5 different influent qualities and sludge distribution qualities without changing other operating conditions, pollutant removal efficiency about low C/N ratio wastewater ($C/N < 6$) were studied. Result shows that hydraulic retention time and simultaneous nitrification and denitrification abilities were critical factors in the total nitrogen removal. The main removal of total phosphorus remove was achieved by the 2nd, 3rd and 4th levels, the main limited factor of total phosphorus was the hydraulic retention time. After comprehensive consideration of the efficiency of nitrogen and phosphorus removal in the system and the subsequent optimization space, the best operating case was confirmed as the influent quality distribution ratio was 35% : 30% : 20% : 15%, and the sludge distribution ratio was 10% : 19% : 29%.

Key words: multilevel anaerobic/anoxic/oxic process(MAAO); step feed; distribution ratio; nitrogen and phosphorus removal; simultaneous nitrification and denitrification(SND)

传统的脱氮除磷技术由于工艺形式的限制,在处理低碳氮比污水时脱氮和除磷往往无法兼得^[1]. 分段进水突破了传统 AAO 工艺的单点进水,具有有机物去除率高、污泥浓度较高等优点^[2-3]. 国内外有很多学者从工艺设计参数和运行影响因素^[4-6]、模型模拟^[7]、性能优化^[8-11]等角度对分段进水进行了大量的研究. 在此基础上,刘

胜军^[12]等人提出了 MAAO(multilevel anaerobic/anoxic/oxic process)工艺. 该工艺有着优化利用碳源、减少曝气能耗,降低污泥产率等优点,目前已经在西安市某污水处理厂投入使用. 不过由于该工艺调节参数复杂,具体的运行机理尚不十分明确,因此本实验对该工艺的运行优化策略进行深入研究. 本研究以实验室配水模拟的污水厂进水为处理对象,

收稿日期: 2018-04-25

修改稿日期: 2019-03-12

基金项目: 西安市科技局社会发展引导计划-社会发展科技示范项目(2016063SF/SF09),陕西省水利科技项目(2017slkj-10)

第一作者: 李志华(1976—),男,博士,教授,研究方向: 污水处理理论与技术. E-mail: lizhihua@xauat.edu.cn

优化改良 MAAO 工艺的运行条件, 研究该工艺的脱氮除磷性能和各污染物的去除机制。

1 材料与方法

1.1 实验装置和实验方案

MAAO 系统由原水箱、反应器、终沉池三部分连接组成。原水箱容积 75 L。MAAO 系统由有机玻璃构成, 有效容积 14 L, 共分为 4 级, 每一级由厌氧、缺氧、好氧 3 个区域组成, 厌氧/缺氧/好氧体积比为 1:2:4, 从第一级到第四级共分为

12 个区域。二沉池为竖流式, 总体积为 9 L。系统通过反应器好氧区底部安装的砂芯曝气头进行鼓风曝气, 通过调整玻璃转子流量计来调整曝气量。各池顶部设有恒速搅拌装置。搅拌电机为 24 V 直流电机, 转速为 200 rpm。进水和分流通过小型蠕动泵控制, 污泥回流由蠕动泵控制。

如图 1 所示, 系统共有 4 级进水, 3 级分流, 进水比为本级进水量与整个系统的总进水量之比, 分流比为去往下一级厌氧池的污泥量与本级缺氧池总流出污泥量之比。

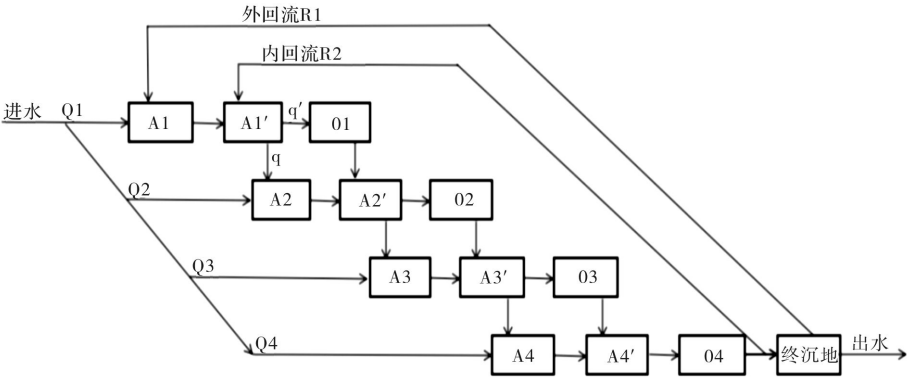


图 1 MAAO 工艺原理 (A、A'、O 分别为厌氧区、缺氧区、好氧区)
Fig. 1 Schematic diagram of MAAO step feed process
(A、A'、O means anaerobic zone, anoxic zone, aerobic zone)

1.2 接种污泥与实验用水

用于 MAAO 反应器接种的活性污泥取自西安市某处理厂二期工程 (MAAO 工艺) 的第四级好氧区污泥进行自然驯化。污水处理厂长期运行稳定, 进水为城市生活污水, 出水水质长期达到一级 A 标准。驯化三周后反应器二沉池出水悬浮物 (SS) 小于 $20\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统达到稳定。实验使用人工配水模拟生活污水, 总体上保持进水基质浓度为定值, 配水使用无水乙酸钠和葡萄糖按照提供 COD 1:1 的比例做为碳源, 以氯化铵为氮源, 磷酸二氢钾为磷源, 具体配水水质为见表 1。每升配水中添加 0.4 mL 微量元素^[13]。

1.3 分析项目与方法

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、TP 按照标准方法测定^[14], COD 由快速消解仪 (哈希, 美国) 测定。DO 由便携式溶氧仪 (HQ40 d, 哈希, 美国) 测定, 温度由酒精温度计测定。

1.4 实验条件与运行方案

MAAO 系统在室温 ($19 \sim 22\text{ }^\circ\text{C}$) 条件下运行。整个实验期间总进水流量为 $28.8\text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, 污泥龄控制为 10~12 d, 污泥回流比为 100%, 混合液回流比为 75%。具体运行条件见表 2。厌氧、缺氧段

DO 控制在 $0 \sim 0.35\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 好氧区 DO 维持在 $0.5 \sim 1.2\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 1 原水水质
Tab. 1 Raw water quality

基质	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	平均浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
COD	260.7~326.9	295.8
NH_4^+-N	48.9~56.2	52.9
NO_2^--N	0~0.1	0.04
NO_3^--N	0~2.4	0.6
TP	4.1~5.3	4.7

1.5 系统 SND 脱氮计算方法

系统通过 SND (Simultaneous nitrification and denitrification) 途径去除的氮量和 SND 率可以通过公式 (1)~(4) 计算。

$$N_{\text{SND}} = N_{\text{in}} - N_{\text{de}} - N_{\text{ass}} - N_{\text{eff}} \quad (1)$$

$$N_{\text{de}} = N_{\text{dn1}} + N_{\text{dn2}} + N_{\text{dn3}} + N_{\text{dn4}} + N_{\text{sec}} \quad (2)$$

$$N_{\text{ass}} = MLSS_{\text{waste}} \times f_{\text{VSS/SS}} \times V_{\text{waste}} \times f_{\text{N/bio}} \quad (3)$$

$$\text{SND}_{\text{efficiency}} = \frac{N_{\text{SND}}}{N_{\text{in}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: N_{SND} 、 N_{de} 、和 N_{ass} 分别为系统每天通过同步硝化反硝化、反硝化过程和同化作用去除的氮

量, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; N_{in} 和 N_{eff} 为每天进入和排出系统的氮量, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; N_{dn1} 、 N_{dn2} 、 N_{dn3} 、 N_{dn4} 、 N_{sec} 分别为各段缺氧池和二沉池反硝化作用去除的氮量, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; $MLSS_{\text{waste}}$ 为剩余污泥浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;

$f_{\text{VSS/SS}}$ 为挥发性污泥浓度与 $MLVSS$ 与 $MLSS$ 的比值; V_{waste} 是每天的剩余污泥排放量, L ; $f_{\text{N/bio}}$ 为活性污泥中氮的含量, 取 $12.39\%^{[11]}$.

表 2 实验运行工况及运行参数
Tab. 2 Operation conditions and parameters

运行工况	进水比/% ($Q_1 : Q_2 : Q_3 : Q_4$)	分流比/% ($q_1 : q_2 : q_3$)	水力停留时间/min			总水力停留 时间/min
			厌氧区	缺氧区	好氧区	
工况一	30 : 30 : 20 : 20	17 : 25 : 44	55	41	110	206
工况二	35 : 30 : 20 : 15	10 : 19 : 29	56	46	113	216
工况三	25 : 25 : 25 : 25	10 : 19 : 30	51	44	101	196
工况四	25 : 25 : 25 : 25	19 : 19 : 28	51	42	101	193
工况五	50 : 30 : 13 : 7	19 : 19 : 28	62	44	125	231

2 结果与讨论

2.1 MAAO 系统脱氮特性

各种工况条件下进出水氮浓度和去除率见图 2. 5 种工况下的平均出水氨氮浓度分别为 $4.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $9.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $8.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率分别为 91.4%、99.2%、81.0%、84.9%、98.6%. 其中工况一、工况二和工况五的出水氨氮较低, 符合国家一级 A 标准, 而工况二和工况五的氨氮去除率最高, 出水氨氮量接近于零, 硝化反应彻底. 对比表 2 可以看出, 从工况五到工况二, 总好氧区 HRT 变化为从 125 ~ 113 min, 实际出水氨氮浓度相差不大, 系统可以实现对氨氮的高效去除, 说明工况五浪费了一定的剩余硝化容量. 而工况三和工况四的总好氧区 HRT 则下降至 101 min, 由于水力停留时间的限制, 使得好氧区微生物没有足够的时间对进水中的氨氮进行完全的氨化作用, 导致出水氨氮浓度较高.

图 3 为沿程各种存在形式的氮在工艺中的沿程浓度变化, 表 3 为五种工况下的氮元素物料衡算结果. 工况三和工况四的第一级和最后一级进水量均为 25%, 从图 3(c)~(d)可以看出, 最后一级的好氧区无法氧化较多的氨氮, 导致出水氨氮含量较高, 而硝氮含量比起其他工况则没有很大的变化, 所以出水总氮含量偏高是由于系统最后一级硝化能力不足引起的. 同时工况三的总氮去除率也明显高于工况四, 这说明在第一级的分流比增大时, 对于 MAAO 系统的总体脱氮是有负面影响的. 当第一级进水量上升为 30%, 第四级进水

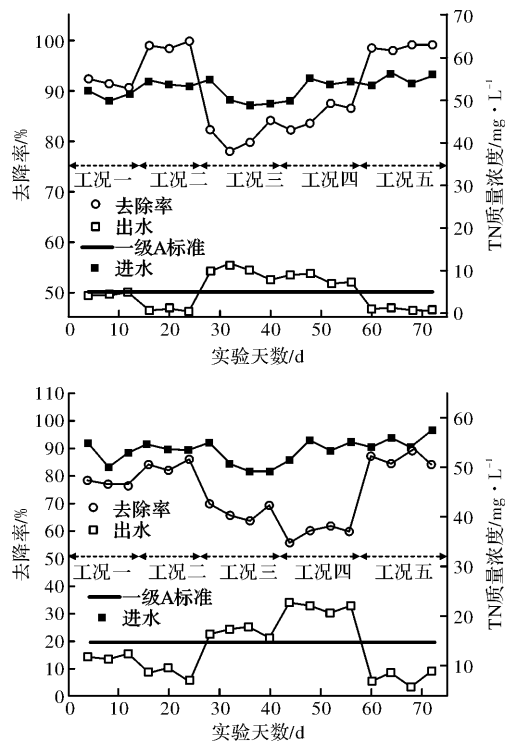


图 2 5 种工况下的氮元素变化趋势
Fig. 2 Variation profiles of nitrogen element with five conditions

量下降为 20% (工况一) 时, 分流比相对于工况三和工况四也提高了, 此时, 系统硝化效果和总氮去除性能均得到加强, 出水氨氮和总氮分别为 $4.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $11.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 继续提高首段进水比例到 35%, 末端降至 15% (工况二). 此时, 好氧 HRT 和缺氧 HRT 都有较大提升, 硝化能力和反硝化能力继续上升, 总氮去除率达到 84.2%. 然而当首段进水比例过高 (50%), 即在工况五时, 虽然总好氧 HRT 极大增加, 但是从图 3(e)可以看

出, 第四级出水中的氨氮含量接近于零, 系统浪费了一定的硝化余量, 同时由于第一级厌氧池和缺氧池并不能完全消耗掉 50% 进水中的 COD, 进水碳源也没有被有效利用, 所以, 虽然从氮的去除角度来说, 该工况处于最佳工况, 但是会有

大量的 COD 没有被有效利用, 对系统的其他功能有严重影响. 对于多段进水工艺来说, 在其他运行条件不变的情况下, 各段的进水量比例和缺氧池分流比例将直接影响系统的脱氮除磷效率^[7,15].

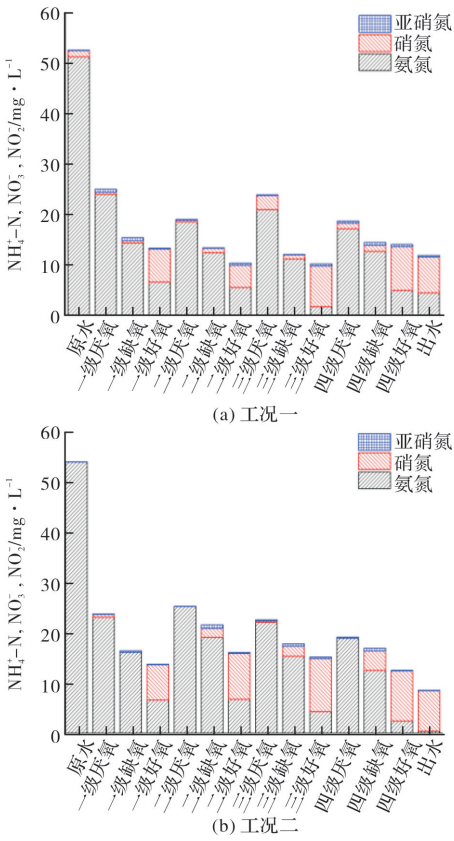
表 3 五种工况下的氮元素物料衡算结果
Tab. 3 Results of nitrogen element material balance under different condition

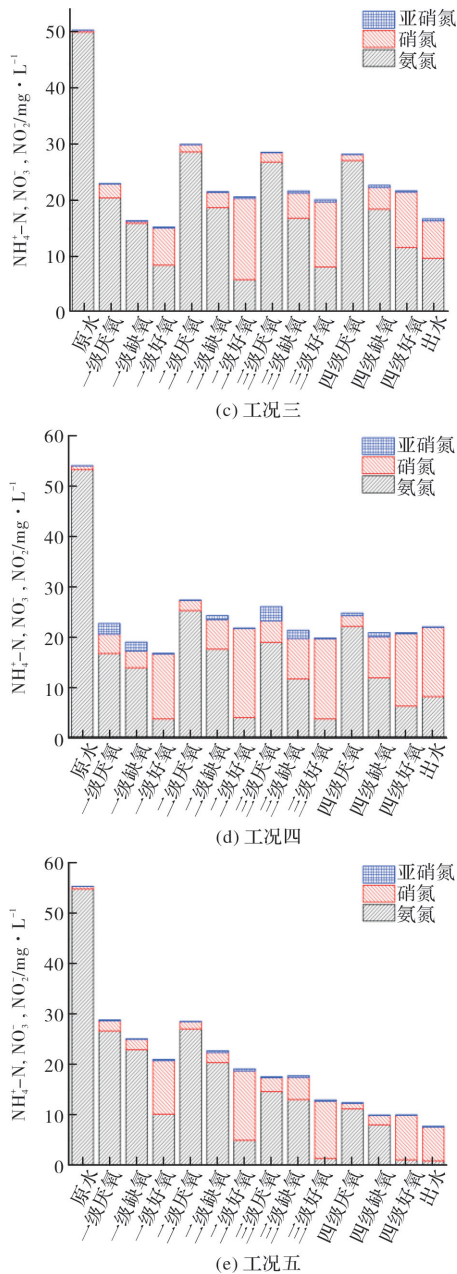
工况		进入系统量	去除量			
			反硝化	SND	出水	同化作用
工况一	质量/ $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$	1.48	0.33	0.41	0.33	0.40
	百分比/%	100	22	28	23	27
工况二	质量/ $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$	1.55	0.46	0.38	0.25	0.46
	百分比/%	100	30	25	16	30
工况三	质量/ $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$	1.47	0.43	0.15	0.48	0.41
	百分比/%	100	29	10	33	28
工况四	质量/ $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$	1.56	0.33	0.11	0.63	0.49
	百分比/%	100	21	7	41	32
工况五	质量/ $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$	1.60	0.62	0.47	0.22	0.29
	百分比/%	100	39	29	14	18

从图 3 中可以看出, MAAO 系统中除了传统的硝化反硝化过程和微生物的同化作用脱氮以外, 在好氧区存在明显的总氮损失, 好氧区氨氮的氧化量远远大于硝氮的产生量, 因此 MAAO 系统存在一定的同步硝化反硝化现象. 如表 3 所示, 系统通过传统的硝化反硝化过程去除的氮量在 21%~39%, 5 种工况条件下的 SND 作用去除的氮含量占进水总氮比例依次为 28%、25%、10%、7%、29%. 即在各个工况下, 系统均出现明显的 SND 现象, 而且在 SND 效率较高时, 系统的总氮去除量也较高, 可见 SND 在一定程度上有利于总氮的去除. 同时本研究发现, 同化作用在 MAAO 系统中占比也比较大, 分别为 27%、30%、28%、32%、18%.

目前对 SND 理论有宏观缺氧理论、微观缺氧理论和生物学理论. 而本研究中出现 SND 现象的原因可能有以下 2 点: (1) 由于好氧池物理外形为长条形, 在单点曝气的情况下, 存在曝气不均匀现象, 这会在一定的程度上使得好氧池存在局部区域 DO 较低甚至处于缺氧状态, 而且还会导致污泥絮体内部出现 DO 的梯度变化, 由外到内 DO 浓度依次减少, 絮体内部可能会处于缺氧环境;

(2) 系统中可能存在好氧反硝化细菌, 这会导致好氧池同步硝化反硝化现象的发生^[16].



图3 各工况下 NH_4^+-N 、 NO_3^- 、 NO_2^- 沿程变化规律Fig. 3 NH_4^+-N 、 NO_3^- 、 NO_2^- concentration in different level under different operational conditions

2.2 MAAO 系统除磷特性

图4为系统进出水TP浓度和TP去除率变化情况。5个工况下的平均出水TP浓度分别为 $0.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，平均去除率分别为 91.2%、96.5%、49.9%、58.1%、75.6%。

图5为不同工况下TP沿程变化和各池净去除量，从中可以看出，第一级厌氧池的TP释磷量从工况一到工况五并无明显变化，这是因为第一级厌氧池承接了来自二沉池的回流污泥导致HRT太小。第一级厌氧池的厌氧HRT分别是19.08 min，

18.52 min，20.00 min，20.00 min，16.67 min，而厌氧释磷量较高的厌氧池，其HRT都在25 min以上，所以第一级厌氧池的释磷效率低是由回流污泥量过大，HRT不足引起的。

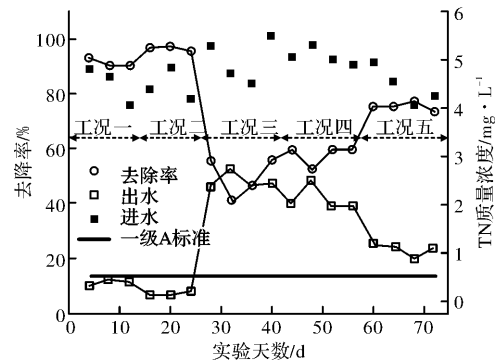


图4 5种工况下TP变化趋势

Fig. 4 Variation profiles of TP with five conditions

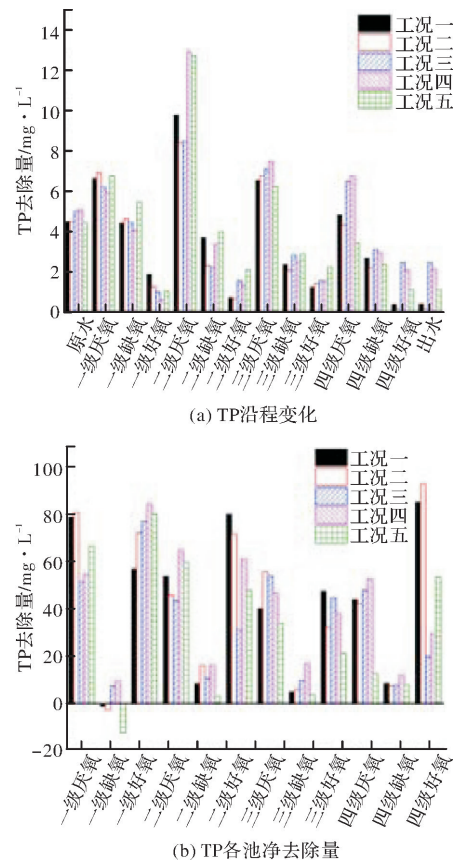


图5 5种工况下TP沿程变化和净去除量

Fig. 5 Change along the way of TP and net removal with five conditions

工况三和工况四的第四级厌氧池的TP量较高，从图5(a)可以看出，工况三和工况四的第四级厌氧池释磷量没有很大提升，所以第四级厌氧池TP升高是由厌氧池进水TP太多引起的，有大量的TP没有经过处理就直接排出，导致工况三和工况四出水远远不达标，而工况五在系统前端进

入较多原水,第四级只有7%的进水。通过图5(b)可以看出,工况五的第四级厌氧池有很多的释磷潜力没有发挥,所以它的释磷效率低于工况一和工况二。对于活性污泥法除磷工艺来说如果厌氧时无法完成大量释磷,那么在后续的工艺处理中,即使在非常符合好氧吸磷的环境下,也是无法完成聚磷菌好氧大量吸磷的^[17]。在图5(b)中,我们设定厌氧池TP上升取正值,缺氧池TP浓度上升取负值,下降取正值,好氧池TP下降为负值。大多缺氧池都发生了TP下降,这说明MAAO系统中发生了反硝化除磷。

3 结论

(1)当MAAO脱氮效率优先时,可以采用前端进水,同时减少分流量的策略,增加好氧和缺氧HRT,整个系统偏向多段AO工艺,此时的脱氮效率较高。但是从TP的去除来说,第一级进水量不能太高,进水最好分配在第二级和第三极。所以本工艺在参数设定上无法同时达到TN和TP的理论最高去除效率。因此,对于一个固定水质的系统,需要根据进水水质有所选择。

(2)交替运行的缺氧好氧运行方式和进水流量的合理分配对于硝化反应的顺利进行和总氮的高效去除有着非常重要的作用,MAAO工艺中除了通过好氧硝化、缺氧反硝化之外,同步硝化反硝化和污泥的同化作用也对氮元素的去除贡献了非常大的作用,使得系统能够进行深度脱氮。

(3)MAAO工艺除了通过传统的厌氧释磷、好氧吸磷来完成除磷之外,还在各个缺氧区通过反硝化除磷去除了一部分的TP。

参考文献 References

[1] 曹贵华,黄勇,潘杨. 常规生物脱氮除磷工艺中问题及对策[J]. 水处理技术, 2009, 35(3):102-106.
CAO Guihua, HUANG Yong, PAN Yang. The problem and the solutions of conventional biological nitrogen and phosphorus removal processes[J]. Technology Of Water Treatment, 2009, 35(3):102-106.

[2] 祝贵兵,彭永臻,王淑莹,等. 分段进水生物脱氮工艺稳态模型的开发与试验评价[J]. 中国化学工程学报(英文版), 2007, 15(3):411-417.
ZHU Guibing, PENG Yongzhen, WANG Shuying et al. Development and Experimental Evaluation of a Steady-state Model for the Step-feed Biological Nitrogen Removal Process[J]. Chinese Journal of Chemical

Engineering, 2007(3):411-417.

[3] 王伟,王淑莹,彭永臻,等. 改进型分段进水厌氧/缺氧/好氧工艺强化营养物去除[J]. 中国化学工程学报(英文版), 2009, 17(5):136-144.
WANG Wei, WANG Shuying, PENG Yongzhen, et al. Enhanced biological nutrients removal in modified step-feed anaerobic/anoxic/oxic process [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, 17 (5): 136-144.

[4] LIANG H, GAO M, LIU J, et al. A novel integrated step-feed biofilm process for the treatment of decentralized domestic wastewater in rural areas of China. [J]. Environment Science, 2010, 22(3):321-327.

[5] Fujii S. Theoretical analysis on nitrogen removal of the step-feed anoxicoxic activated sludge process and its application for the optimal operation[J]. Water Science & Technology, 1996, 34(34):459-466.

[6] 王伟,王淑莹,孙亚男,等. 流量分配对分段进水A/O工艺脱氮性能的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(1):96-101.
WANG Wei, WANG Shuying, SUN Yanan, et al. Effects of influent flow distribution ratio on nitrogen removal in step-feed A/O process. Environment Science, 2009, 30(1):96-101.

[7] FUNAMIZU N, YAMAMOTO S, KITAGAWA Y, et al. Simulation of the operational conditions of the full-scale municipal wastewater treatment plant to improve the performance of nutrient removal[J]. Water Science & Technology, 1997, 36(12):9-18.

[8] 葛士建,彭永臻. 连续流分段进水工艺生物脱氮除磷技术分析及优化控制[J]. 环境科学学报, 2009, 29(12):2465-2470.
GE Shijian, PENG Yongzhen. Analysis and optimization control of the continuous step-feed biological nitrogen and phosphate removal process[J]. Acta Scientiae Circum Stantiae, 2009, 29(12):2465-2470.

[9] 王伟,彭永臻,孙亚男,等. 分段进水A/O工艺流量分配方法与策略研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(1):89-92.
WANG Wei, PENG Yongzhen, SUN Yanan et al. Study of influent flow distribution methods and strategies in step-feed A/O process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(1):89-92.

[10] 王伟,陈强,汪传新,等. 改良分段进水工艺处理低C/N值污水内循环比优化[J]. 中国给水排水, 2015(19):48-52.
WANG Wei, CHEN Qiang, WANG Chuanxin, et al. Optimization of inner cycle ratio in modified step feed process in treating municipal sewage with low C/N ratio[J]. China Water & Wastewater, 2015(19):48-52.

- nese Journal of Underground Space and Engineering, 2011(4):633-636.
- [5] 刘慧慧,孙剑,李飞飞. 城市地下综合管廊应用 PPP 模式的 VFM 评价[J]. 土木工程与管理学报, 2016(4): 122-126.
- LIU Huihui, SUN Jian, LI Feifei. VFM evaluation of underground comprehensive utility tunnel application PPP model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016(4):122-126.
- [6] 李芊,赵雪婷. 综合管廊全寿命周期风险分析[J]. 价值工程, 2017(10):240-242.
- LI Qian, ZHAO Xueting. Life cycle risk analysis of underground comprehensive utility tunnel[J]. Value Engineering, 2017(10): 240-242.
- [7] 韦海民,刘武岩. 城市综合管廊施工过程中的风险识别过滤研究[J]. 建筑技术, 2017(9):927-930.
- WEI Haimin, LIU Wuyan. Study on risk identification and filtering in construction of underground comprehensive utility tunnel [J]. Architecture Technology, 2017(9):927-930.
- [8] 王曦,祝付玲. 基于博弈分析的城市综合管廊收费对策研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1):197-203.
- WANG Xi, ZHU Fuling. Research on countermeasures of underground comprehensive utility tunnel charge based on game analysis[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1):197-203.

(编辑 沈 波)

(上接第 293 页)

- [11] 葛士建,彭永臻,曹旭,等. 改良 UCT 分段进水工艺处理生活污水性能优化研究[J]. 环境科学, 2011, 32(7):2006-2012.
- GE Shijian, PENG Yongzhen, CAO Xu, et al. Optimization of a modified UCT step feed process treating municipal wastewater[J]. Environmental Science, 2011, 32(7):2006-2012.
- [12] 刘胜军,黄宇,邹仲勋,等. 多级厌氧缺氧好氧活性污泥法新工艺研究[J]. 环境工程, 2013(s1):66-69.
- LIU Shengjun, HUANG Yu, ZOU Zhongxun, et al. Study on the multilevel anaerobic/anoxic/oxic activated sludge process[J]. Environmental Engineering, 2013(s1): 66-69.
- [13] 马智博,李志华,杨成建,等. 低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析[J]. 环境科学, 2017, 38(9):3801-3806.
- MA Zhibo, LI Zhihua, YANG Chengjian, et al. Analysis of respirogram characteristics of filamentous bulking caused by low dissolved oxygen[J]. Environmental Science, 2017, 38(9):3801-3806.
- [14] American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]//Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington: American Public Health Association, 1985.
- [15] VAIPOULOU E, AIVASIDIS A. A modified UCT method for biological nutrient removal: configuration and performance. [J]. Chemosphere, 2008, 72(7):1062.
- [16] JOO H S, HIRAI M, SHODA M. Piggery wastewater treatment using *Alcaligenes faecalis* strain No. 4 with heterotrophic nitrification and aerobic denitrification [J]. Water Research, 2006, 40(16):3029-3036.
- [17] 姜安玺,郑朔方,时双喜,等. 厌氧-好氧活性污泥法除磷机理及动力学探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997(2):64-70.
- JIANG Anxi, ZHENG Shuofang, SHI Shuangxi et al. Mechanism and Kinetics of Phosphorus Removal by Anaerobic-Aerobic Activated Sludge Process[J]. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture, 1997(2):64-70.

(编辑 沈 波)