

赵双,汪翠萍,王凯军. 微氧升流柱-好氧与传统缺氧-好氧处理生活污水性能比较[J]. 环境科学研究, 2013, 26(11): 1232-1238.

ZHAO Shuang, WANG Cuiping, WANG Kaijun. Performance comparison between upflow microaerobic-oxic process (M/O) and traditional anoxic-oxic system (A/O) for domestic wastewater treatment[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(11): 1232-1238.

微氧升流柱-好氧与传统缺氧-好氧处理生活污水性能比较

赵 双^{1,2}, 汪翠萍², 王凯军^{2*}

1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083

2. 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

摘要: 采用 M/O(微氧升流柱-好氧)工艺,通过控制 M 柱(微氧升流柱) $\rho(\text{DO})$ 使其处于缺氧环境,从而代替传统 A/O 工艺的缺氧段. 在相同运行条件下对 2 种工艺处理生活污水的性能进行对比研究. 结果表明: 在 HRT(水力停留时间)为 12 h、内循环污泥回流比为 200%、外循环污泥回流比为 50% 的条件下, M/O 和 A/O 工艺对 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 的平均去除率分别为 88.0% 和 83.0%, M/O 工艺比 A/O 工艺高 6%, 出水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 均小于 50 mg/L; 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率分别为 95.0% 和 93.3%, 去除效果相差不大; 而对 TN 的去除存在明显的差异, M/O 工艺对 TN 的去除率平均值达 67.5%, 比 A/O 工艺高近 16%. 在将近 160 d 的运行过程中, M/O 工艺抗冲击负荷能力明显优于 A/O 工艺, 出水水质波动较小、运行稳定, 并且脱氮效果得到强化.

关键词: 微氧升流柱; A/O 工艺; 强化脱氮; 性能对比

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6929(2013)11-1232-07

Performance Comparison between upflow Microaerobic-Oxic Process (M/O) and Traditional Anoxic-Oxic System (A/O) for Domestic Wastewater Treatment

ZHAO Shuang^{1,2}, WANG Cui-ping², WANG Kai-jun²

1. School of Water Resource and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: An upflow microaerobic-oxic (M/O) process was proposed. During this process an upflow column was controlled under low dissolved oxygen by aeration to replace the rectangular anoxic reactor controlled by mixer. A comparative study on wastewater treatment performance was conducted using the two systems under the same operation condition. The results showed that under the condition that hydraulic retention time (HRT) lasted 12 h and the sludge recycle ratio was 200% (inner) and 50% (outer), the average COD_{Cr} removal efficiency of M/O and A/O were 88.0% and 83.0%, respectively. COD_{Cr} removal efficiencies of M/O process achieved 6% higher than that of A/O and the effluent. The COD_{Cr} contents of both systems were below 50 mg/L. The difference of ammonia removal efficiencies between M/O and A/O was not obvious and achieved at 95.0% and 93.3%, respectively. However, there was a significant difference of total nitrogen (TN) removal effect and the average removal efficiency of M/O was 16% higher than that of A/O, and the TN removal efficiency for M/O was 67.5%. During nearly 160 day's operation, M/O process appeared more stable, lower fluctuation of effluent water quality, higher resistance to shock loading than A/O, especially strengthened the TN removal.

Key words: upflow microaerobic column; A/O process; nitrogen removal strengthen; performance comparison

目前我国污水处理厂普遍采用生物法脱氮, 废水

中的氮在微生物作用下被去除^[1-3]. 活性污泥法(硝化反硝化)是城市污水生物脱氮最为经济有效的方法, 我国广泛采用的污水处理工艺有氧化沟、SBR、A/A/O、MBR、UASB、A/O 等^[4-5]. 由于 A/O 工艺具有流程简单、构筑物少、控制复杂性小等优点被国内外广泛研究与应用^[6], 但该工艺具有运行稳定性差、抗冲击负荷能力低、运行能耗高、脱氮效率低^[7]、运行维护困

收稿日期: 2013-07-19 修订日期: 2013-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(21206084)

作者简介: 赵 双 (1988 -), 女, 黑龙江哈尔滨人, zhaoshuang77282861@163.com.

* 责任作者, 王凯军(1960 -), 男, 山东定海人, 教授, 博士, 主要从事污水与污泥处理技术、环境技术管理体系研究, wjkj@tsinghua.edu.cn

难等缺点使其较难满足节能减排、提标改造的要求。

微氧体系是将 $\rho(\text{DO})$ 控制在 $0.3 \sim 1.0 \text{ mg/L}$ 之间的一种水处理工艺^[8], 它可以结合好氧及厌氧水处理的优点, 降低能耗^[8], 提高系统 COD_{Cr} 去除率^[9], 有效降解有毒有害及难降解物质^[10], 而且能够发生同步硝化反硝化^[12-13]、短程硝化反硝化^[14-15]、自养细菌反硝化^[16-17]等脱氮反应。升流柱反应器可以提高污泥停留时间、增加生物量^[18], 内部升流流态对微生物的种群结构、存在形态及分布起到了选择作用并且丰富微生物种类^[9], 而且微氧升流柱下部高浓度生物量可以提高系统抗冲击负荷能力, 上述特征为生物脱氮创造了有利条件^[20-21]。

该研究结合微氧体系与升流柱的特点, 提出并搭建了微氧升流柱反应体系, 并将微氧升流柱与曝气池组成 M/O (微氧升流柱-好氧) 新型工艺, 以城市生活污水为研究对象, 对该工艺进行参数优化及污染物去除效果研究, 并与传统 A/O 工艺进行对比, 分析 2

种工艺对实际生活污水中 NH_4^+-N 、 TN 、 COD_{Cr} 等污染物的去除情况, 并从工艺沿程各单元的污染物变化, 分析氮素可能的去除途径, 以期在低能耗条件下达到强化脱氮的效果。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示, 反应器由有机玻璃制成。2 种工艺均由缺氧段、曝气池、沉淀池组成, 其中 M/O 工艺的缺氧段为 M 柱(微氧升流柱), 底部有微孔曝气头, 通过微曝气量控制微氧环境; A/O 工艺的缺氧段(以下称 A 池)为矩形池体, 通过搅拌器装置控制缺氧环境。2 套工艺总有效体积均为 44 L , M 柱和 A 池有效体积均为 11 L ; 好氧段由 3 个同样体积的矩形池单体(O_1 、 O_2 、 O_3)组成, 单体有效体积均为 11 L , 缺氧段与好氧段的体积比为 $1:3$; 二沉池总有效体积为 6 L , 为竖流式。进水、污泥回流和硝化液回流均采用蠕动泵控制。

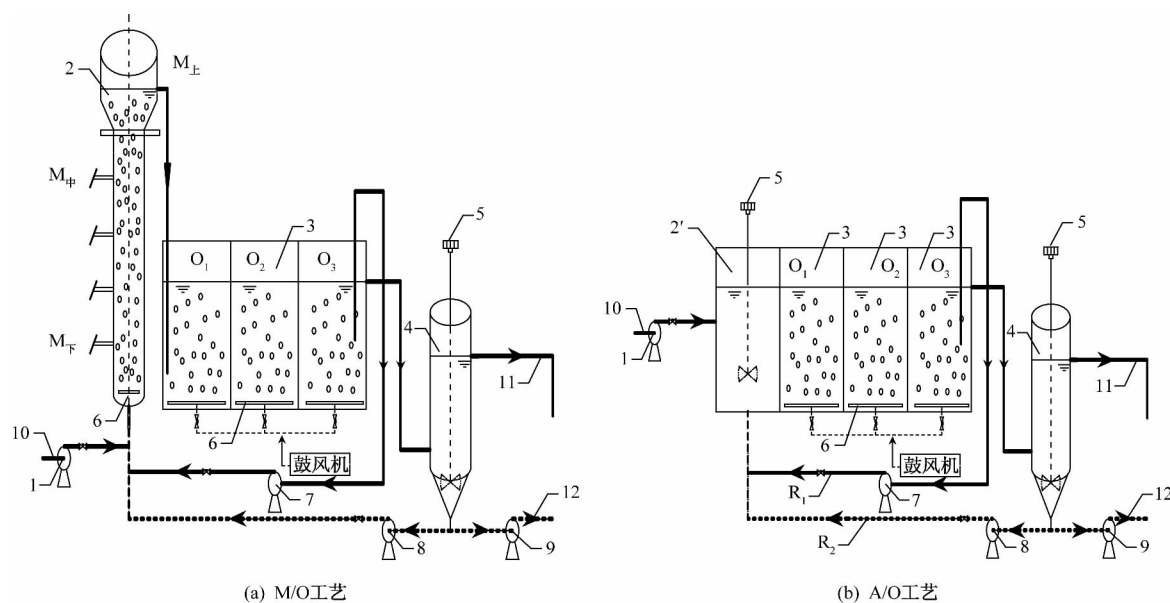


图 1 M/O 和 A/O 工艺流程
1—进水泵; 2—M 柱; 2'—A 池; 3—梯度控氧曝气池; 4—沉淀池; 5—搅拌装置; 6—微孔曝气装置; 7—硝化液回流泵;
8—剩余污泥回流泵; 9—剩余污泥排放泵; 10—进水管路; 11—排水管路; 12—污泥排放管路; R_1 —内循环通道;
 R_2 —外循环通道; $M_{\text{上}}$ 、 $M_{\text{中}}$ 、 $M_{\text{下}}$ 分别为 M 柱上、中、下部分 $\rho(\text{DO})$ 检测位置。

Fig. 1 Flow chart of M/O and A/O process

1.2 进水水质

试验进水为北京市某污水处理厂经过初沉池沉淀之后的污水, 由于受时间、天气、季节等因素的影响, 进水水质波动较大, C/N [$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/\rho(\text{TN})$] 平均值为 $3 \sim 6$, 进水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 变化较大, 具体指标见表 1。

1.3 分析方法

$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 采用哈希微回流比色法测定, $\rho(\text{TN})$ 采用过硫酸氧化-紫外分光光度法测定, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 采用纳氏试剂分光光度法测定, $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 采用 ICS-1100 的离子色谱(Thermo-Dionex)测定, $\rho(\text{DO})$ 和 pH 采用哈希公司的 HQ30d 测定, $\rho(\text{MLSS})$ 采用重量法测定。

表 1 进水水质
Table 1 Influent characteristics

指标	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$	$\rho(\text{BOD}_5)$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	$\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$
范围	122.0~334.0	160.0~192.0	40.0~57.0	32.0~57.0	0.4~2.4	0~0.4
平均值	206.5	177.6	51.8	44.6	1.4	0.1

1.4 反应器运行参数

试验共分为 3 个阶段运行, $\rho(\text{MLSS})$ 保持在 2 000~3 000 mg/L, 污泥龄为 20~30 d. 每个阶段稳定运行 10 d 后进行测试, 总运行时间近 160 d. 试验运行参数见表 2.

表 2 试验运行条件
Table 2 Experiment operation conditions

试验阶段	HRT/h	进水流量/(L/d)	内循环污泥回流比/%	外循环污泥回流比/%	运行时间
I	8	139.2	125	30	第 0~30 天
II	8	126.8	200	50	第 40~106 天
III	12	84.6	200	50	第 117~157 天

注: HTR 为水力停留时间.

2 结果与讨论

2.1 COD_{Cr} 整体去除效果的对比

M/O 工艺和 A/O 工艺对 COD_{Cr} 去除率的平均值分别为 88.0% 和 83.0%, 均有较好的去除效果, 出水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 在 20~50 mg/L 之间, 出水水质比较稳定. 由图 2 可见, M/O 工艺和 A/O 工艺在 3 个运行阶段出水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 平均值分别为 (31.1 ± 14.0) 、 (28.5 ± 15.0) 、 (22.8 ± 12.5) mg/L 和 (39.8 ± 14.5) 、 (33.4 ± 16.0) 、 (28.1 ± 18.0) mg/L, M/O 工艺出水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 波动范围小于 A/O 工艺出水, 即 M/O 工艺抗冲击负荷能力高于 A/O 工艺. 随着 HRT 的延长和污泥内、外回流比的增加, 2 种工艺对 COD_{Cr} 的去除效果均明显提高, 并且 M/O 工艺对 COD_{Cr} 的去除能力及出水稳定性明显优于 A/O 工艺.

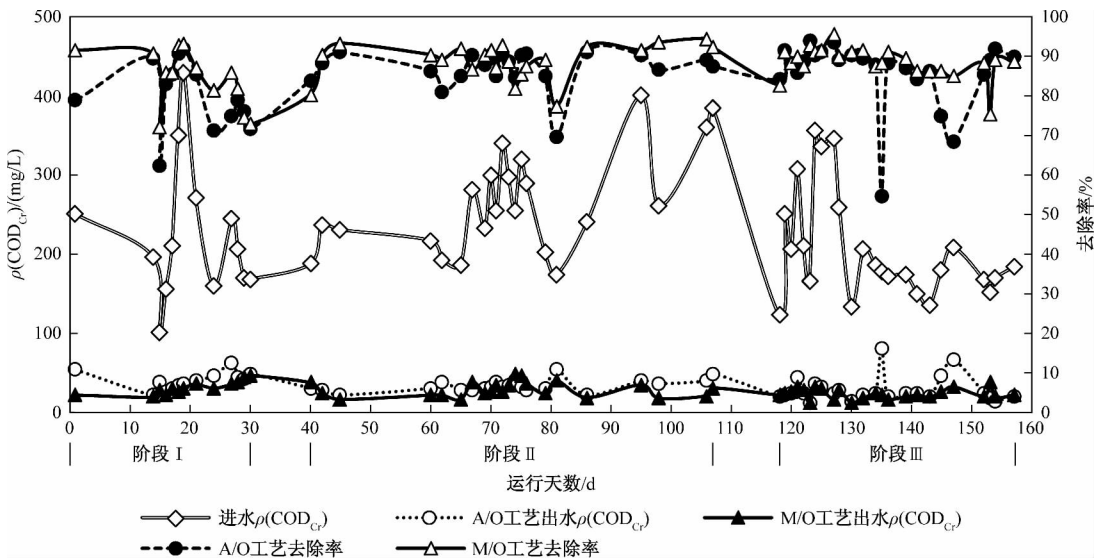


图 2 M/O 和 A/O 工艺 COD_{Cr} 去除效果对比

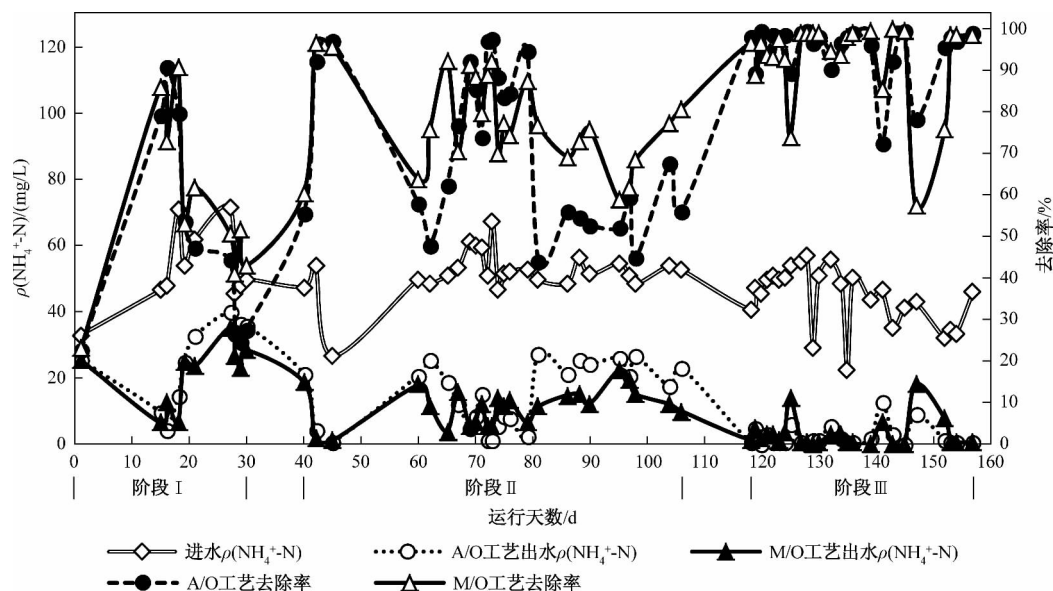
Fig. 2 Comparison of COD_{Cr} removal efficiencies between M/O and A/O reactors

2.2 对氮素去除效果的对比

2.2.1 对 NH_4^+-N 的去除效果

M/O 工艺和 A/O 工艺在不同运行阶段对 NH_4^+-N 的去除效果如图 3 所示. 由图 3 可见, 阶段 I 和阶段 II 的 HRT 相同, 随着污泥回流比的升高, M/O 工艺和 A/O 工艺对 NH_4^+-N 的去除率分别由 57.6% 和 49.8% 升至 78.0% 和 71.2%, 这主要是由于污泥回流比的升高促进了反硝化菌对碳源的消耗, 从而减少

了有机质对自养硝化菌的抑制作用^[2], 促进了 NH_4^+-N 的氧化^[3]. 阶段 II 和阶段 III 回流比相同, 好氧段 HRT 由 6 h 延至 9 h, M/O 工艺和 A/O 工艺对 NH_4^+-N 的去除率分别提高到 95.0% 和 93.3%, 出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 平均值分别为 2.3、3.1 mg/L, 这是由于好氧段 HRT 为 6 h 时 NH_4^+-N 并未得到充分的氧化, 延长 HRT, 硝化反应更充分、更彻底, 从而保障了 NH_4^+-N 的良好去除效果.

图 3 M/O 和 A/O 工艺 NH_4^+-N 去除效果对比Fig. 3 Comparison of NH_4^+-N removal efficiencies between M/O and A/O reactors

2.2.2 TN 去除效果

M/O 工艺和 A/O 工艺在不同运行阶段对 TN 的去除效果如图 4 所示。由图 4 可见,在阶段 I、阶段 II 相同 HRT 条件下,随着污泥回流比的升高,M/O 和 A/O 工艺对 TN 的去除率分别由 41.2% 和 41.6% 升至 62.0% 和 51.9%; 阶段 II 到阶段 III,好氧段 HRT

由 6 h 延长到 9 h,M/O 和 A/O 工艺对 TN 的去除率分别由 62.0% 和 51.9% 提高到 67.5% 和 58.0%,出水 $\rho(\text{TN})$ 平均值分别为 16.8、21.9 mg/L,与 ZHANG 等^[24] 研究结果相似。M/O 工艺脱氮效率比 A/O 工艺脱氮效率高约 16%,充分显示了 M/O 工艺脱氮的优势。

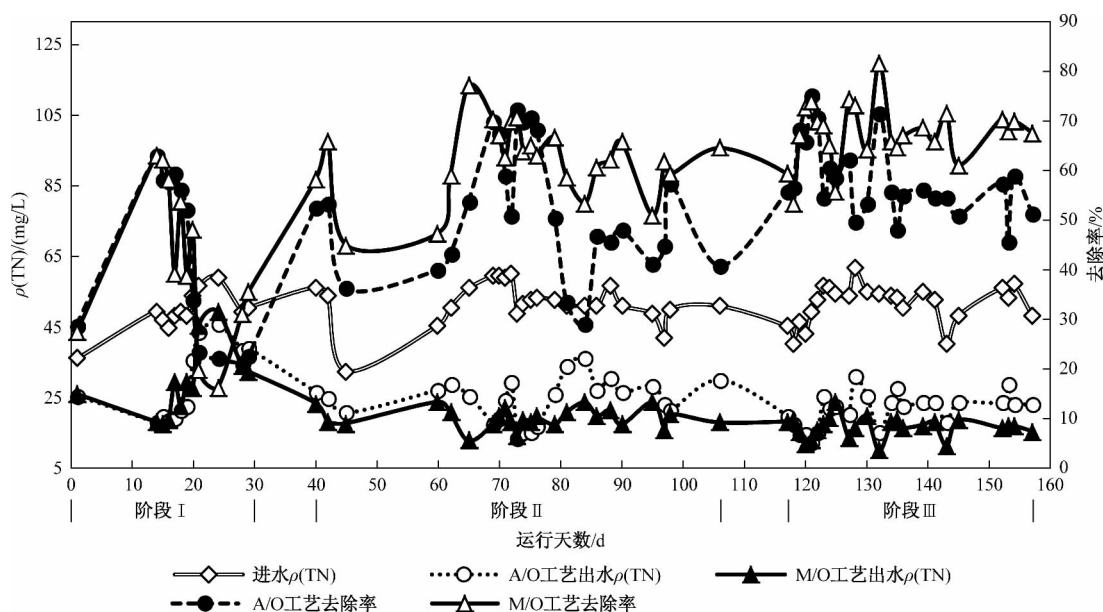


图 4 M/O 和 A/O 工艺 TN 去除效果对比

Fig. 4 Comparison of TN removal efficiencies between M/O and A/O reactors

系统的脱氮和硝化性能存在一定的相关性,提高污泥回流比及 HRT 可以增加反应器内部的流动性、

使反应器中污水和污泥均匀混合,增加微生物降解时间,降低系统游离氨浓度,减轻了对硝化细菌的抑制

作用,从而促进硝化反应的进行,为反硝化提供了足够的可以充当电子受体的 NO_3^- [23],促进反硝化的进行,降低了出水 $\rho(\text{TN})$.

污水中 TN 最终主要通过反硝化反应转化为 N_2 及 N_2O 等气体而被去除 [24]. 为进一步研究 M/O 工艺和 A/O 工艺脱氮效率的差异性,该研究对阶段Ⅲ中 2 种工艺各反应器对 TN 的去除效果进行了分析,结果见表 3. 由表 3 可见,2 种工艺对 TN 去除率的差异主要体现在缺氧段(M 柱和 A 池),去除率相差约 47%;好氧段对 TN 的去除率相差则不足 22%. 造成该差异的主要原因:①传统 A 池内 $\rho(\text{DO})$ 在 0.4 mg/L 左右,而 M 柱内 $\rho(\text{DO})$ 自底部到顶部由 0.1 mg/L 逐渐升高至 0.4 mg/L,从而形成了适合不同微生物生长的环境,丰富了微生物种群,有利于氮的多途径去除;②传统 A 池的 $\rho(\text{MLSS})$ 为 3 000 ~ 4 000 mg/L,而 M 柱自上而下 $\rho(\text{MLSS})$ 由 3 000 mg/L 逐渐升至 8 000 mg/L 左右,污泥浓度的提高为反硝化细菌数量的增加提供了可能;③相对于 A 池的完全混合式,M 柱内下部进水,柱内整体呈推流流态,而且污泥悬浮液中颗粒大的固体逆流回到底部与刚进入反应器的气体反混形成微弱内循环流动 [25],增加固液接触面

积,进一步促进脱氮反应进行.

表 3 M/O 和 A/O 工艺沿程 TN 去除率和贡献率

Table 3 The contribution ratios and removal efficiencies of TN along different units of M/O and A/O process %

工艺	总去除率	缺氧段		好氧段	
		去除率	贡献率	去除率	贡献率
M/O	70.5	53.8	76.3	16.7	23.7
A/O	57.3	36.7	64.1	21.5	35.9

注: 贡献率 = 单池去除率/总去除率 $\times 100\%$.

2.3 含氮化合物和 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 沿程变化对比研究

图 5 为阶段Ⅱ中 M/O 和 A/O 工艺中各形态氮质量浓度和 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 沿工艺流程的变化趋势. 由图 5 可见,随着反应的进行,水中含氮化合物的组成逐步发生变化,在缺氧段均以 NH_4^+-N 为主,到曝气池以后通过硝化反应 NH_4^+-N 逐步转化为 NO_x--N ,通过内循环作用回流到缺氧段被反硝化细菌利用得以去除. 2 种工艺出水中 TN 均以 NO_3--N 为主,说明整个反应体系中硝化反应进行得比较充分. 但是 M/O 工艺 M 柱中的 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 与 A/O 工艺 A 池中几乎一样,而 $\rho(\text{NO}_2--\text{N})$ 及 $\rho(\text{NO}_3--\text{N})$ 均比 A 池低,说明 M 柱中发生的反硝化反应比 A 池中充分,进而导致了 M/O 工艺脱氮效果优于 A/O 工艺.

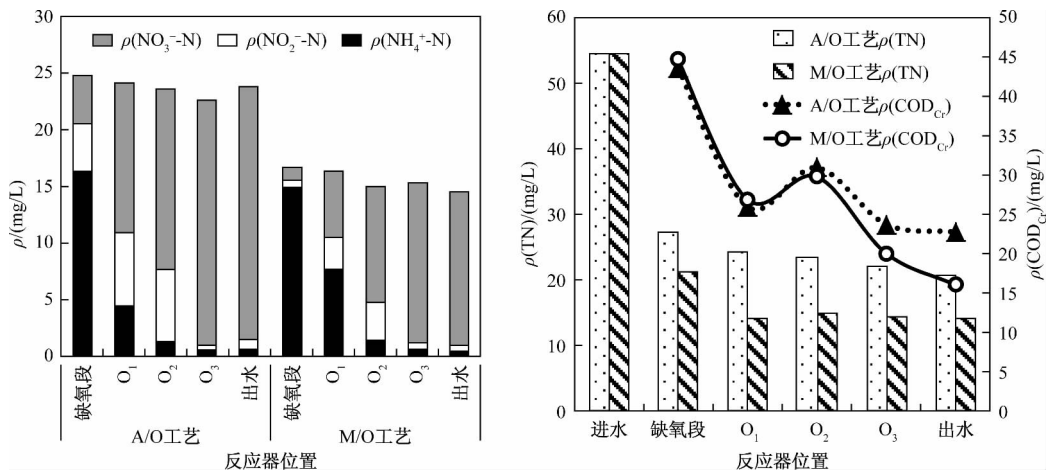


图 5 M/O 和 A/O 工艺沿程含氮化合物质量浓度和 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 变化

Fig. 5 Changes of nitrogenous compounds concentration and COD_{Cr} along M/O and A/O process

在 M 柱内 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 略高于 A 池,说明 M 柱中 COD_{Cr} 消耗低,可能在 M 柱内发生了短程硝化反硝化反应 [23],降低了碳源消耗 [29]. M/O 工艺曝气段及出水中的 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 低于 A/O 工艺,也没有发现 NO_2--N 的滞留,说明在 M/O 工艺的曝气段中可能发生了同步硝化反硝化反应 [30],把硝化反应的产物及时通过反硝化作用去除,这一过程以有机物为电子供体从而降低了 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$. 这也说明了 M/O 工艺更适合处理

低 C/N 生活污水.

2.4 M/O 工艺及 A/O 工艺中 $\rho(\text{DO})$ 及气水比沿程变化

$\rho(\text{DO})$ 是反应器运行的重要控制参数之一 [31], $\rho(\text{DO})$ 过低会引起丝状菌膨胀 [32],降低系统脱氮能力甚至直接导致系统崩溃. 为曝气段提供充足的 DO 可以促进有机物的降解及氨氮的转化 [33],但是曝气量过大,内循环作用会导致缺氧段 $\rho(\text{DO})$ 升高并影

响系统的反硝化效果,降低脱氮效率,并且造成能源的浪费. 表 4 反映了 M/O 工艺和 A/O 工艺各在不同运行参数下 $\rho(\text{DO})$ 平均值沿工艺流程的变化情况. 由表 4 可见,M 柱与 A 池内 $\rho(\text{DO})$ 均在 0.4 mg/L 以

下,但 M 柱内由下到上 $\rho(\text{DO})$ 逐步升高,最底部 $\rho(\text{DO})$ 在 0.2 mg/L 以下; M 柱从下到上污泥浓度梯度可以很好地缓冲 $\rho(\text{DO})$ 对反硝化的影响,从而提高脱氮效率.

表 4 M/O 和 A/O 工艺 $\rho(\text{DO})$ 及气水比沿工艺流程变化
Table 4 Changes of $\rho(\text{DO})$ to gas-water ratios along M/O and A/O process

工艺	试验阶段	$\rho(\text{DO}) / (\text{mg/L})$				气水比			
		厌氧段	O_1	O_2	O_3	厌氧段	O_1	O_2	O_3
A/O	I	0.25	1.80	1.44	1.71	—	—	—	—
	II	0.36	2.52	1.90	2.38	—	5.42:1	5.44:1	4.32:1
	III	0.30	2.18	1.58	2.37	—	5.48:1	4.18:1	2.33:1
M/O	I	0.27	—	—	1.63	1.87	1.32	—	—
	II	0.34	0.18	0.15	1.98	2.63	2.19	1:11	5.78:1
	III	0.27	0.14	0.10	2.01	2.46	2.08	1:14	5.91:1

注: —为数据未测; M/O 工艺中厌氧段 $\rho(\text{DO})$ 分别为 M 柱上、中、下的 $\rho(\text{DO})$.

2 个工艺中好氧段气水比在 2:1 ~ 6:1 之间,从第一个好氧反应池到最后一个好氧反应池气水比逐渐降低. M 柱在阶段 II 和阶段 III 的气水比分别为 1:11 和 1:14,与孙艳玲等^[34]研究的微氧水处理工艺的气水比相比降低了 60% 左右,说明 M 柱内 DO 有效利用率高,有利于节能降耗.

3 结论

a) HRT 为 12 h、内循环污泥回流比为 200%、外循环污泥回流比为 50% 的条件下,M/O 工艺和 A/O 工艺对 COD_{Cr} 均有较好的去除效果,但 M/O 工艺的去氮能力略优于 A/O 工艺;在进水水质波动较大的情况下,M/O 工艺表现出良好的抗冲击负荷能力.

b) 在最优条件下 M/O 工艺和 A/O 工艺出水 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 平均值分别为 2.3 和 3.1 mg/L,出水 $\rho(\text{TN})$ 平均值分别为 16.8 和 21.9 mg/L,M/O 工艺的去氮率比 A/O 工艺高 16% 左右,该差异主要产生于缺氧段,即 M 柱对 TN 的去除率比 A 池高约 47% .

c) 与 A/O 工艺相比,M/O 工艺更适合处理低 C/N 的生活污水; M 柱内的 $\rho(\text{MLSS})$ 及 $\rho(\text{DO})$ 的梯度变化,为丰富的微生物群落的形成提供了条件. M 柱从下至上 $\rho(\text{MLSS})$ 在 8 000 ~ 3 000 mg/L、 $\rho(\text{DO})$ 在 0.1 ~ 0.4 mg/L 范围内时脱氮效果良好.

参考文献(References):

[1] ZHU Guibing, PENG Yongzhen, LI Baikun, *et al.* Biological removal of nitrogen from wastewater [J]. *Reviews of Environment Contamination and Toxicology*,2008,211(1/2/3/4): 159-195.

[2] SCHMIDT I, SLIEKERS O, SCHMID M, *et al.* New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater [J]. *Fems Microbiology Reviews*,2003,27(4): 481-492.

[3] 王杜平,彭党聪,朱海荣,等. 城市污水分段进水 A/O 脱氮工艺

试验研究 [J]. *环境科学研究*,2006,19(3): 75-80.

[4] 李亚新. 活性污泥法理论与技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2007: 238-322

[5] QIU Yong, SHI Hanchang, HE Miao. Nitrogen and phosphorous removal in municipal wastewater treatment plants in China: a review [J]. *International Journal of Chemical Engineering*,2010,55(11): 1-10.

[6] 陈中颖,刘爱萍,刘永,等. 中国城镇污水处理厂运行状况调查分析 [J]. *环境污染与防治*,2009,31(9): 99-102.

[7] 彭永臻,王晓莲,王淑莹. A/O 脱氮工艺影响因素及其控制策略的研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*,2005,37(8): 1053-1057.

[8] 高立杰,肖羽堂,高冠道,等. 微氧水处理技术的特性及应用研究进展 [J]. *工业用水与废水*,2007,38(2): 5-8.

[9] GUO Jianhua, PENG Yongzhen, WANG Shuying, *et al.* Long-term effect of dissolved oxygen on partial nitrification performance and microbial community structure [J]. *Bioresource Technology*,2009,100(11): 2796-2802.

[10] 李刚,周兴求,伍健东. 微氧条件下厌氧折流板反应器运行特性研究 [J]. *环境工程学报*,2009,3(7): 1263-1267.

[11] ZITOMER D H, SHROUT J D. Feasibility and benefits of methanogenesis under oxygen-limited conditions [J]. *Waste Manage*,1998,18(2): 107-116.

[12] HOCAOGLU S M, INSEL G, COKGOR E U, *et al.* Effect of low dissolved oxygen on simultaneous nitrification and denitrification in a membrane bioreactor treating black water [J]. *Bioresource Technology*,2011,102(6): 4333-4340.

[13] LIU Yanchen, SHI Hanchang, XIA Lan, *et al.* Study of operational conditions of simultaneous nitrification and denitrification in a carrousel oxidation ditch for domestic wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*,2010,101(3): 901-906.

[14] GUO Jianhua, PENG Yongzhen, YANG Xiong, *et al.* Combination process of limited filamentous bulking and nitrogen removal via nitrite for enhancing nitrogen removal and reducing aeration requirements [J]. *Chemosphere*,2013,91(1): 68-75.

- [15] WANG Shaopo, YU Jingjie, LIU Yanhui, *et al.* Achieving and maintaining of short-cut nitrification in a cyclic activated sludge system [J]. *Water Sci Technol*, 2011, 64(10) : 2016–2022.
- [16] 胡林林, 王建龙, 文湘华, 等. 低溶解氧条件下生物脱氮研究中的新现象 [J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(4) : 444–447.
- [17] KWAK W, MCCARTY P L, BAE J, *et al.* Efficient single-stage autotrophic nitrogen removal with dilute wastewater through oxygen supply control [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123: 400–405.
- [18] LAZAROVA V, MANEM J. Biofilm characterization and activity analysis in water and wastewater treatment [J]. *Water Res*, 1995, 29(10) : 2227–2245.
- [19] BEYENAL H, TANYOLAC A. The effects of biofilm characteristics on the external mass transfer coefficient in a differential fluidized bed biofilm reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 1998, 1(1) : 53–61.
- [20] WANG Bing, WANG Wei, HAN Hongjun, *et al.* Nitrogen removal and simultaneous nitrification and denitrification in a fluidized bed step-feed process [J]. *J Environ Sci*, 2012, 24(2) : 303–308.
- [21] MOURA R B, DAMIANOVIC M H R Z, FORESTI E. Nitrogen and carbon removal from synthetic wastewater in a vertical structured-bed reactor under intermittent aeration [J]. *J Environ Manage*, 2012, 98: 163–167.
- [22] 王晓莲, 彭永臻. A^2/O 法污水生物脱氮除磷处理技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 42–43.
- [23] 杨高华, 章北平, 杨群, 等. 生活污水脱氮的 $A/O/N$ 工艺和 A/O 工艺对比试验研究 [J]. *工业用水与废水*, 2012(3) : 24–27.
- [24] ZHANG Peng, QI Zhou. Simultaneous nitrification and denitrification in activated sludge system under low oxygen concentration [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2007, 1(1) : 49–52.
- [25] 王建龙, 彭永臻, 高永青. 内循环对 A^2/O 工艺脱氮的影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34(5) : 539–543.
- [26] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 310–311.
- [27] BAI D, SHIBUYA E, MASUDA Y, *et al.* Distinction between upward and downward flows in circulating fluidized-beds [J]. *Powder Technology*, 1995, 84(1) : 75–81.
- [28] 马斌, 张树军, 王俊敏, 等. A/O 工艺实现城市污水半亚硝化与生物除磷 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(2) : 70–74.
- [29] BERNAT K, KULIKOWSKA D, ZIELINSKA M, *et al.* Nitrogen removal from wastewater with a low COD/N ratio at a low oxygen concentration [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(7) : 4913–4916.
- [30] GONG Lingxiao, JUN Li, YANG Qing, *et al.* Biomass characteristics and simultaneous nitrification-denitrification under long sludge retention time in an integrated reactor treating rural domestic sewage [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 119: 277–284.
- [31] 彭永臻, 王晓莲, 王淑莹. A/O 脱氮工艺影响因素及其控制策略的研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(8) : 1053–1057.
- [32] 白璐, 王淑莹, 彭永臻, 等. 低溶解氧条件下活性污泥沉降性的研究 [J]. *工业水处理*, 2006, 26(5) : 54–56.
- [33] 谢文玉, 沈豪祥, 钟华文, 等. 一体化 A/O 工艺对生活污水除碳脱氮效果研究 [J]. *环境工程学报*, 2011, 5(7) : 1576–1580.
- [34] 孙艳玲, 杜兵, 司亚安, 等. 城市污水水解 – 厌氧 – 微氧联合处理工艺 [J]. *环境科学*, 2000, 21(6) : 77–79.

(责任编辑: 郑朔方)