



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.201911183

中图分类号 X382.1

文献标识码 A

王佳, 荣宏伟, 肖冠勋, 等. 深圳某水质净化厂 A/A/O 微曝氧化沟深度脱氮除磷工艺效果分析[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10): 2837-2842.

WANG Jia, RONG Hongwei, XIAO Guanxun, et al. Effect analysis of deep removal of nitrogen and phosphorus by A/A/O micro-aeration oxidation ditch process in a municipal wastewater treatment plant in Shenzhen, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(10): 2837-2842.

深圳某水质净化厂 A/A/O 微曝氧化沟深度脱氮除磷工艺效果分析

王佳^{1,2}, 荣宏伟^{2,*}, 肖冠勋¹, 喻子书¹

1. 深圳市深水龙岗污水处理有限公司, 深圳 518116

2. 广州大学土木工程学院, 广州 510006

第一作者: 王佳(1994—), 女, 硕士, 助理工程师。研究方向: 污水处理技术。E-mail: 531196696@qq.com

*通信作者: 荣宏伟(1973—), 男, 博士, 教授。研究方向: 生物脱氮。E-mail: rhwcn@139.com

摘要 为探究 A/A/O 微曝氧化沟深度脱氮除磷工艺的性能, 根据深圳市某水质净化厂长期监测数据, 分析了进水污染物浓度、生物池沿程脱氮除磷性能和微生物相。结果表明: 进水可生化性一般, 生物脱氮可行, 但生物除磷效果有限, 需借助化学除磷增强除磷效果, 投药浓度与进水 BOD₅/TP 值变化趋势呈负相关; 生物池好氧段微生物的氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率能满足硝化反应的正常进行; 但缺氧段反硝化速率较低, 是生物脱氮的限制因素, 可通过降低内回流 DO 和增加缺氧段碱度来增强微生物的反硝化速率; 生物池中有大量的累枝虫、钟虫、盾纤虫和轮虫, 且成熟期菌胶团数量较多, 结构紧密; 深度处理对 TP 和 SS 的去除率分别为 60.3% 和 33.71%。物料平衡分析结果显示, 被同化的氮含量和反硝化的氮含量各占 43% 和 57%, 通过微生物合成和吸附被去除的磷含量和与除磷药剂形成化学沉淀的磷含量各占 49.06% 和 50.94%。本研究结果为水质净化厂深度脱氮除磷提供了思路, 可为提高出水水质标准提供参考。

关键词 污水处理; A/A/O 微曝氧化沟工艺; 脱氮除磷; 生物相; 物料平衡

A/A/O 工艺是传统活性污泥工艺、生物硝化反硝化工艺和生物除磷工艺的结合体, 具有强化生物脱氮和生物除磷的双重特点^[1-2]。氧化沟工艺属于延时曝气活性污泥法, 处理效果稳定^[3]。A/A/O 微曝氧化沟分为厌氧段、缺氧段和好氧段, 3 个区以隔墙分开来, 形成较好的独立环境。池型为环形池形, 兼有推流式和完全混流式的特点。A/A/O 微曝氧化沟工艺作为一种现代化新型工艺, 采用曝气和推流相分离的方式, 具有流程简单、抗冲击能力强、出水水质稳定、能耗低和易操控等优点。同时, 随着污水排放标准的提高, 水质净化厂逐渐采用深度处理工艺, 如 V 型滤池和高效纤维滤池等, 以强化对污染物的去除。

目前, 关于水质净化厂脱氮除磷的影响因素研究相对较多, 但大多数基于实验室小试, 且分析条件与内容单一^[4-6]。同时, 针对实际水质净化厂处理工艺进行污染物全程系统分析的研究亦相

收稿日期: 2019-11-29; 录用日期: 2020-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778155); 广东省自然科学基金资助项目(2017A030313310)

对较少。本研究以深圳某水质净化厂为例, 以其 A/A/O 微曝氧化沟工艺和 V 型滤池为研究对象, 分析了沿程污染物浓度和微生物活性, 并结合物料平衡计算, 探讨了该水质净化厂去除污染物的能力, 寻找增强反应速率和水质净化厂系统稳定性的方法, 以期为同类水质净化厂的出水达标提供参考。

1 水质净化厂概况与分析方法

1.1 水质净化厂概况

该水质净化厂位于深圳市坪山区, 进水以生活污水为主, 设计总规模 $2 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。生活污水经一级处理(粗格栅、细格栅、曝气沉砂池)后, 进入二级处理系统(A/A/O 微曝氧化沟工艺), 流经二沉池再进入深度处理系统(V 型滤池), 出水经紫外消毒后排入坪山河, 工艺流程如图 1 所示。

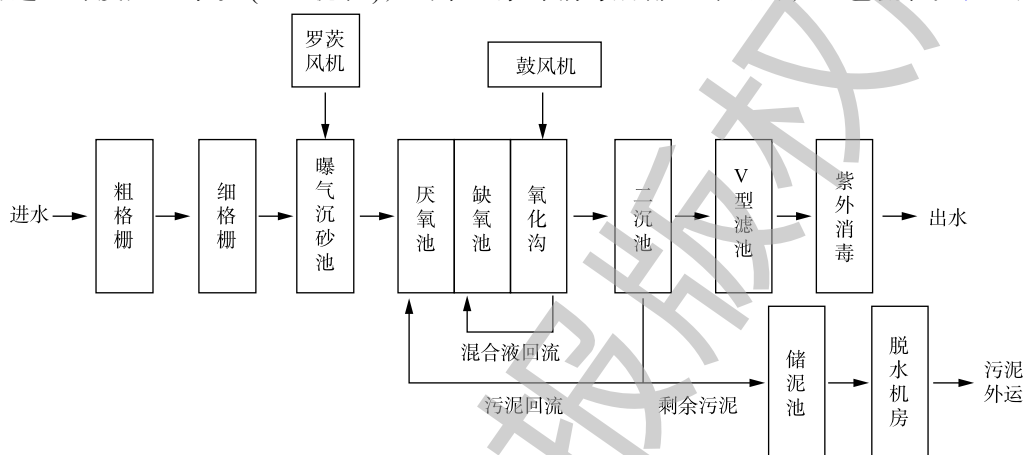


图 1 深圳市某水质净化厂工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of a municipal wastewater treatment plant in Shenzhen

1.2 水质分析方法

常规水质分析采用国家标准方法^[7]: COD 采用重铬酸钾法; BOD₅ 采用稀释与接种法; TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法; NH₄⁺-N 采用纳氏分光光度法; TP 采用钼酸铵分光光度法; SS 采用滤膜法; DO 和 Eh 采用哈希 DO 仪和哈希 Eh 仪测定。上述指标及处理水量每天检测至少一次, 各指标以每月平均值和年平均值统计。

2 结果与讨论

2.1 水质净化厂的水质情况

该水质净化厂 2018 年 1—12 月的进水水量和进、出水水质如表 1 和表 2 所示。2018 年的年平均水量为 $15.57 \times 10^4 \text{ m}^3$; 年平均进水 COD 为 $200.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 年平均进水 BOD₅ 为 $64.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 年平均进水 NH₄⁺-N 为 $16.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 年平均进水 TN 为 $24.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 年平均进水 TP 为 $3.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。全年范围内进水水量波动较大, 丰水季水量较大。枯水季进水 COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN 和 TP 浓度较大。年平均进水 BOD₅/COD 为 0.32, 丰水季 BOD₅/COD 偏低, 可生化性一般; 年平均进水 BOD₅/TN 为 2.67, 丰水季 BOD₅/TN 偏低, 生物脱氮可行, 基本不用外加碳源; 年平均进水 BOD₅/TP 为 17.54, 丰水季 BOD₅/TP 偏低, 生物除磷效果一般, 需借助化学除磷增强除磷效果。

2018 年年平均出水 COD 为 $16.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 年平均出水 BOD₅ 为 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 年平均出水 NH₄⁺-N 为 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 年平均出水 TN 为 $10.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 年平均出水 TP 为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。各出水指标均达到一级 A 标准, COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN 和 TP 的去除率分别为 91.80%、96.12%、97.62%、56.36% 和 93.21%。由此可知, 该工艺对 COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 TP 的去除效果明显, 但对 TN 的去除效果较差, 还有优化和提升的空间。

表 1 2018 年 1—12 月某水质净化厂进水水量与污染物浓度

Table 1 Wastewater inflow and pollutant concentration in the municipal wastewater treatment plant from January to December, 2018

月份	水量/(10 ⁴ m ³)	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /COD	BOD ₅ /TN	BOD ₅ /TP
1	10.62	308.5	111.1	19.3	28.3	4.59	0.36	3.93	24.20
2	8.90	287.6	94.9	17.6	25.7	4.18	0.33	3.69	22.70
3	11.34	338.3	109.4	20	29.2	5.82	0.32	3.74	18.80
4	11.42	228.2	78.1	20.9	29.9	5.11	0.34	2.61	15.28
5	13.32	216.1	72.6	16.5	27.1	4.18	0.34	2.67	17.37
6	20.02	131.4	46.2	23.1	31.5	2.86	0.35	1.46	16.15
7	22.16	155.7	45.3	12.4	19.2	3.27	0.29	2.35	13.85
8	20.09	136.2	33.6	10.1	15.9	2.66	0.25	2.11	12.63
9	18.24	104.9	25.9	10.9	14.2	1.61	0.25	1.82	16.09
10	16.52	178.4	56.1	17.1	21.7	3.76	0.31	2.58	14.92
11	16.63	167.2	47.2	16.7	23.4	3.39	0.28	2.01	13.92
12	17.54	153.1	54	17.3	24.3	2.78	0.35	2.22	19.42

2.2 工艺中的沿程脱氮除磷性能与生物相分析

为分析工艺中沿程脱氮除磷效果，对水质净化厂的指标进行了长期监测。监测结果如下：生物池厌氧段 DO 为 0.1 mg·L⁻¹，Eh 为 -265 mV；缺氧段 DO 为 0.4 mg·L⁻¹，Eh 为 -105 mV；好氧段 DO 为 3.5 mg·L⁻¹，Eh 为 68 mV。生物池内回流比为 100%，外回流比为 50%，混合液悬浮固体浓度 MLSS 为 4 348 mg·L⁻¹，混合液挥发性悬浮固体浓度 MLVSS 为 1 261 mg·L⁻¹，污泥体积指数 SVI 为 21 mL·g⁻¹，泥龄 SRT 为 15.78 d，有机负荷率 (以 BOD₅ 计) 为 0.024 kg·(kg·d)⁻¹ (以 MLSS 计) (有机负荷率 F/M 指单位重量的混合液悬浮固体浓度在单位时间内承受的有机物的数量)。沿程污染物浓度监测如图 2 所示。大部分有机物在厌氧段和缺氧段被去除，厌氧段和缺氧段对有机物的去除率分别为 60.67% 和 18.20%，在好氧段中变化较小，可能的原因是，厌氧池和缺氧池生物代谢较快，大部分易降解的有机物被去除^[8]。厌氧段、缺氧段和好氧段对 NH₄⁺-N 的去除率分别为 20.2%、15.13% 和 61.13%，所以好氧段对 NH₄⁺-N 的去除起主要作用。NO₃⁻-N 浓度在缺氧段中有小幅度增加，在好氧段逐渐增加且趋于稳定，说明内回流和外回流比正常，生物池沿程脱氮效果良好。NO₂⁻-N 浓度较小且沿程变化不大。厌氧池和好氧池对 TP 的去除率分别为 23.8% 和 21.5%，缺氧池没有去除磷的能力，生物除磷效果明显低于郭玉梅等^[9]研究的厌氧池和好氧池对磷的去除率。这说明生物系统中没有活性较强的聚磷菌，需要借助化学除磷手段进一步降低 TP 浓度，所以在生物池出水端和滤池前端投加化学除磷药剂。如图 3 所示，化学除

表 2 2018 年 1—12 月某水质净化厂出水水质

Table 2 Analysis of effluent quality in the municipal wastewater treatment plant from January to December, 2018

月份	COD	BOD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
1	21.73	3.50	0.68	12.60	0.33
2	17.19	3.51	0.63	11.83	0.29
3	19.33	2.83	0.46	12.91	0.34
4	19.90	2.52	0.54	11.82	0.27
5	15.44	2.31	0.36	12.00	0.26
6	13.41	2.33	1.00	14.90	0.17
7	14.28	2.18	0.14	7.27	0.21
8	14.42	2.03	0.20	6.37	0.20
9	13.84	2.19	0.17	6.32	0.14
10	17.51	2.13	0.16	9.30	0.26
11	15.62	2.32	0.27	11.10	0.25
12	14.45	2.18	0.23	10.27	0.28

磷药剂投加浓度为 25.46~68.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 投药浓度与进水 BOD_5/TP 值变化趋势呈负相关, 即进水 BOD_5/TP 值较低时, 需加大投药浓度, 同时投加除磷药剂还起到吸附污泥颗粒加速沉淀作用从而使出水更清澈。

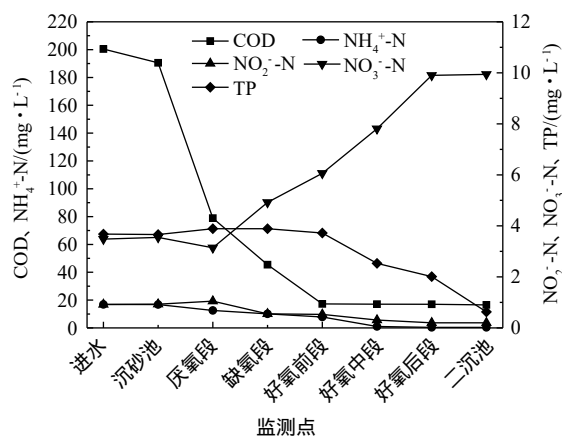


图2 沿程污染物浓度的变化

Fig. 2 Change of pollutant concentrations along treatment stream

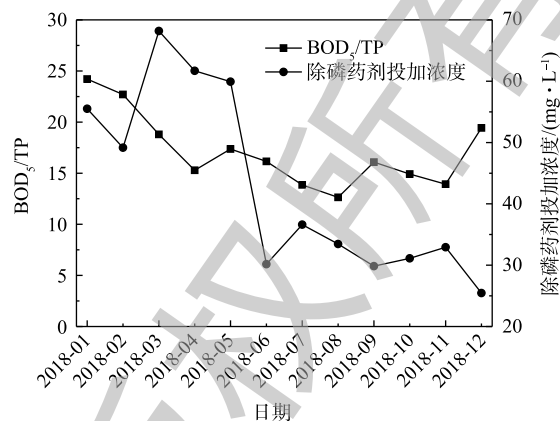


图3 2018年1—12月某水质净化厂 BOD_5/TP 值与除磷药剂投加浓度

Fig. 3 BOD_5/TP and PAFC dosing concentration in the municipal wastewater treatment plant from January to December, 2018

由功能菌活性实验可以看出, 厌氧段单位重量的混合液挥发性悬浮固体浓度在单位时间内微生物释磷速率为 $1.83 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ (以 MLVSS 计), 明显低于许德超等^[10] 得出的释磷速率 $12.86 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 这进一步说明生物除磷效果较差, 与沿程分析结果一致; 缺氧段单位重量的混合液挥发性悬浮固体浓度在单位时间内微生物的反硝化速率为 $3.87 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; 好氧段单位重量的混合液挥发性悬浮固体浓度在单位时间内微生物的氨氧化速率为 $1.83 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 、亚硝酸盐氧化速率 $1.03 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。经计算, 假设硝化反应仅是在好氧段进行, 将进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (浓度为 $16.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 完全转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 所需的时间为 7.29 h, 该反应时间小于好氧段的水力停留时间 (HRT 为 8.44 h), 说明该水质净化厂能够满足硝化反应所需的水力停留时间。将 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 完全反硝化 (假设 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 全转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 所需时间为 4.96 h, 因此, 反硝化速率较低是反硝化脱氮的限制因素, 可通过降低内回流 DO 和增加缺氧段碱度来提高微生物的反硝化速率。

对生物池的活性污泥进行生物相镜检, 结果如图4所示。生物池中有大量的累枝虫、钟虫、盾纤虫和轮虫, 说明固着型纤毛虫数量较多, 活性污泥正常, 出水水质良好。轮虫是活性污泥处理污水效果较好的指示性生物, 但有污泥老化的趋势, 应适当排泥, 降低有机负荷率 F/M 。活性污泥成熟期菌胶团数量较多, 结构紧密。

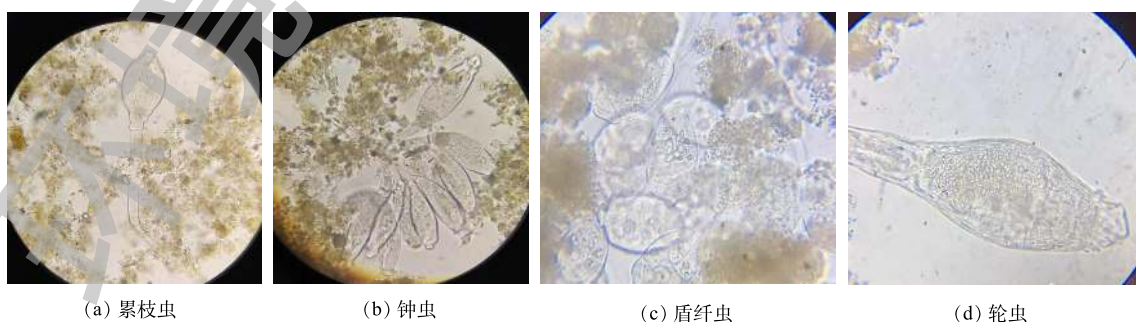


图4 生物相镜检图

Fig. 4 Biological phase micrograph

2.3 工艺中 V 型滤池的运行状况

二级出水和深度出水各项指标如表 3 所示。二级出水和深度出水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 COD 相差不大, 而深度处理后的 TP(滤池混合并投加除磷药剂) 和 SS 浓度有明显降低, 说明深度处理对有机物和氮素基本没有去除效果, 对 TP 和 SS 的去除率分别为 60.3% 和 33.71%。除磷效果明显高于郑育毅^[11]用改性硅藻土深度处理城市污水厂出水的效果。其主要原因是, 除磷药剂中 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 与 PO_4^{3-} 生成沉淀物, 从而降低了 TP。V 型滤池对 SS 的去除效果略低于郭强^[12]利用纤维转盘滤布滤池对 SS 的去除效果。

表 3 二级出水和深度出水水质
Table 3 Effluent quality of secondary and advanced treatment processes $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

水质来源	SS	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP
进水	217.78	200.47	16.83	24.2	3.68
二级出水	6.11	16.52	0.40	10.93	0.63
深度出水	4.05	16.43	0.40	10.56	0.25

2.4 物料平衡计算

2018 年平均处理水量为 $15.57\times 10^4 \text{ m}^3$, 污泥生成量为 $22.3 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。生物池混合液悬浮固体浓度 MLSS 为 $4\ 348 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 混合液挥发性悬浮固体浓度 MLVSS 为 $1\ 261 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。1 mg 混合液挥发性悬浮固体浓度中氮含量为 0.098 mg、磷含量为 0.03 mg。经计算, 该水质净化厂去除的总氮量为 $2.07 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$, 其中被微生物同化的氮含量为 $0.893 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$, 被同化的氮含量占 43%, 另外 57% 的氮通过反硝化作用被去除。磷主要通过剩余污泥的排放而得以去除^[13]。该水质净化厂去除的总磷量为 $0.53 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$, 通过微生物合成和吸附被去除的磷含量和与除磷药剂形成化学沉淀的磷含量各占 49.06% 和 50.94%。

2.5 增强系统脱氮除磷的解决方案

综上所述, 总氮去除率较低是水质净化厂存在的常见问题, 可通过降低内回流 DO、增加缺氧段碱度以及投加碳源等方式增加总氮的去除率。当生物除磷难以满足除磷要求时, 应及时采用化学除磷方式, 投药浓度与进水 BOD_5/TP 变化趋势呈负相关, 即进水 BOD_5/TP 较低时需加大投药浓度, 确保出水 TP 达标排放。

3 结论

1) 该水质净化厂进水水量有一定的季节变化, 进水可生化性一般, 生物脱氮可行, 生物除磷效果有限, 需借助化学除磷增强除磷效果。

2) 大部分有机物在厌氧段和缺氧段被去除; 好氧段微生物的氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率能满足硝化反应的正常进行; 但缺氧段反硝化速率较低, 是生物脱氮的限制因素, 可通过降低内回流 DO 和增加缺氧段碱度来增强微生物的反硝化速率。生物池中有大量的累枝虫、钟虫、盾纤虫和轮虫, 且成熟期菌胶团数量较多, 结构紧密。

3) 深度处理对有机物和氮素基本没有去除效果, 对 TP 和 SS 的去除率分别为 60.3% 和 33.71%。通过物料平衡计算, 被同化的氮含量和反硝化的氮含量各占 43% 和 57%。通过微生物合成和吸附被去除的磷含量和与除磷药剂形成化学沉淀的磷含量各占 49.06% 和 50.94%。

4) 通过对深圳某水质净化厂的深度脱氮除磷工艺效果分析, 发现可通过降低内回流 DO、增加缺氧段碱度以及投加碳源等方式增加总氮的去除率。同时, 可采用化学除磷的方法增强总磷的去除率, 投药浓度与进水 BOD_5/TP 变化趋势呈负相关。

参考文献

- [1] 刘章富, 熊杨, 侯铁, 等. 同步生物除磷脱氮的几种实用新工艺[J]. 中国给水排水, 2002, 18(9): 65-68.
- [2] 李斯亮. A²O 工艺处理东北小城镇污水的优化运行及效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [3] 冀宝友. Orbal 氧化沟在小城镇污水处理厂中的调试运行研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

- [4] 赵维妍. SBR工艺处理生活污水同步脱氮除磷的效能研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [5] POGNANI M, BARRENA R, FONT X, et al. A complete massbalance of a complex combined anaerobic/aerobic municipal source-separated waste treatment plant[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(7): 4646-4653.
- [6] 杨洋. 城市污水厂A²O工艺效能优化与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [8] 郑兴灿, 张昱. 城镇污水处理厂微量污染物的来源与控制途径[J]. *给水排水*, 2018, 54(2): 1-3.
- [9] 郭玉梅, 李志平, 王莹莹, 等. A²O与V型滤池组合工艺强化脱氮除磷性能分析[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(5): 11-15.
- [10] 许德超, 陈洪波, 李小明, 等. 静置/好氧/缺氧序批式反应器(SBR)脱氮除磷效果研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(1): 152-159.
- [11] 郑育毅. 改性硅藻土深度处理城市污水厂尾水的实验研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(7): 1527-1531.
- [12] 郭强. 城市污水处理厂升级改造工艺及运行研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2018.
- [13] 夏雪, 邵明非, 吕小梅, 等. 不同碳源驯化除磷污泥的除磷效果及菌群结构分析[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(8): 936-942.
- (本文编辑: 郑晓梅)

Effect analysis of deep removal of nitrogen and phosphorus by A/A/O micro-aeration oxidation ditch process in a municipal wastewater treatment plant in Shenzhen, China

WANG Jia^{1,2}, RONG Hongwei^{2*}, XIAO Guanxun¹, YU Zishu¹

1. Shenzhen Shenshui Longgang Wastewater Treatment Co. Ltd., Shenzhen 518116, China

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

*Corresponding author, E-mail: rhwcn@139.com

Abstract In order to investigate the performance of A/A/O micro-aeration oxidation ditch process on deep nitrogen and phosphorus removal, based on the long-term monitoring data of a municipal wastewater treatment plant in Shenzhen, the concentration of influent pollutants, the performance of nitrogen and phosphorus removal along the A/A/O, and the biological phase were analyzed. The results showed the general biochemical properties for the influent, and feasible biological nitrogen removal effect, while the limited biological phosphorus removal effect. This indicated that the chemical phosphorus removal was needed to enhance the phosphorus removal effect. There are negative correlation between concentration of PAFC dosage and the BOD₅/TP of influent. The ammonia oxidation rate and nitrite oxidation rate of the microorganisms in the aerobic section of A/A/O could meet the normal progress of the nitrification reaction. However, the low denitrification rate in the anoxic section of A/A/O was a limiting factor for biological denitrification. The denitrification rate of the microorganism could be enhanced by reducing the internal return DO and increasing alkalinity in this anoxic section. There were a large number of epistylis, vorticellas, aspidiscas and rotifers in the biological pool, and lots of bacterial micelles at the mature stage with compact structure. The removal rates of TP and SS by deep treatment process could reach 60.3% and 33.71%, respectively. Through the material balance analysis, the assimilated nitrogen content and denitrified nitrogen content accounted for 43% and 57%, respectively. The percent of phosphorus removed by microbial uptake and adsorption was 49.06%, and the percent of phosphorus formed as chemical precipitate of phosphorus and PAFC was 50.94%. The case provides ideas for deep nitrogen and phosphorus removal in municipal wastewater treatment plant, and provides reference for improving effluent water quality standards.

Keywords municipal wastewater treatment; A/A/O micro-aeration oxidation ditch process; nitrogen and phosphorus removal; biological phase; mass balance