

# 厌氧/缺氧/好氧体积比对分段进水 $A^2/O$ 除磷的影响

王伟<sup>1</sup>, 彭永臻<sup>2</sup>, 刘丽娜<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>, 邵纯红<sup>1</sup>, 赫海灵<sup>1</sup>

(1. 黑龙江工程学院 土木与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150050; 2. 北京工业大学  
北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 采用三段式分段进水  $A^2/O$  工艺处理低 C/N 值生活污水, 重点研究了第 1 段的厌氧/缺氧/好氧体积比对系统除磷及反硝化除磷的影响。试验采用 3 种运行工况, 其厌氧/缺氧/好氧体积比分别为 (1:3:4)、(2:2:4) 和 (3:2:3)。结果表明, 在好氧区体积能够保证硝化顺利完成的情况下, 适当地提高厌氧/缺氧区体积, 可改善脱氮除磷性能。随厌氧区体积的增大, 系统对 TP 的去除率由工况 1 的 38.75% 提高到工况 3 的 80.39%, 对 TN 的去除率由 76.29% 提高到 82.33%, 且工况 3 发生了一定程度的反硝化除磷现象。基于试验所采用的 3 种运行工况, 第 1 段较为优化的厌氧/缺氧/好氧体积比为 3:2:3。

**关键词:**  $A^2/O$  工艺; 分段进水; 低碳源污水; 脱氮; 除磷; 反硝化除磷

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2014)13-0010-05

## Effects of Volume Ratios of Anaerobic/Anoxic/Oxic Zones on Phosphorus Removal in Step-feed $A^2/O$ Process

WANG Wei<sup>1</sup>, PENG Yong-zhen<sup>2</sup>, LIU Li-na<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, SHAO Chun-hong<sup>1</sup>,  
HE Hai-ling<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China; 2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The three-stage step-feed  $A^2/O$  process was used to treat domestic sewage with low C/N ratio. Effects of the volume ratios of anaerobic/anoxic/oxic zones in the first stage on phosphorus removal and denitrifying phosphorus removal were mainly investigated. Three different volume ratios of anaerobic/anoxic/oxic zones were adopted, which were 1:3:4, 2:2:4 and 3:2:3 respectively. The results showed that when the complete nitrification was achieved in the aerobic zone, the nitrogen and phosphorus removal efficiencies could be improved by increasing the volumes of anaerobic/anoxic zones. With the increasing of anaerobic zone volume, the TP removal efficiency increased from 38.75% in mode 1 to 80.39% in mode 3 and TN removal efficiency increased from 76.29% to 82.33%, respectively. In mode 3, some denitrifying phosphorus removal phenomenon was observed. Based on the three different modes, the optimum volume ratio of anaerobic, anoxic and oxic zones in the first stage was 3:2:3.

**Key words:**  $A^2/O$  process; step-feed; sewage with low C/N ratio; nitrogen removal;

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51208185); 黑龙江省青年科学基金资助项目(QC2011C018); 黑龙江省普通高等学校青年学术骨干支持计划项目(1251G053)

phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal

水体富营养化问题的日益严重,使得污水排放标准也更加严格,将生物脱氮与生物除磷合二为一的生物营养物去除(BNR)工艺的研发正得到人们越来越多的关注。分段进水 A<sup>2</sup>/O 工艺(SFA<sup>2</sup>/O)是在分段进水 A/O 工艺的基础上发展起来的一种同步脱氮除磷新工艺<sup>[1-2]</sup>,其不仅可以为聚磷菌创造良好的厌氧环境,也同时具备分段进水工艺的优势,如节省内回流设施、可充分利用原水中的碳源等<sup>[3-5]</sup>。

在 SFA<sup>2</sup>/O 工艺中,厌氧段的主要功能是合成 PHA,同时聚磷菌水解胞内聚磷并以磷酸盐的形式释放到混合液中。为达到此目的,需要为厌氧段提供充足的停留时间。由于普通异养菌同聚磷菌竞争有机底物,若厌氧停留时间较短,释磷效率将降低,进而影响系统整体的除磷效果。但是,如果厌氧段停留时间太长,则会出现无效释磷,不利于随后的缺氧和好氧吸磷。而缺氧区体积的大小,对除磷也有重要影响。缺氧停留时间过短,则碳源不能得到充分利用,反硝化不能完成,同时随内循环进入厌氧区的硝酸盐氮还会对释磷造成负面影响;而缺氧停留时间过长,反硝化程度大幅度提高,硝酸盐氮被完全去除,则可能形成厌氧环境,造成二次释磷。针对以上问题,以低 C/N 值实际生活污水为研究对象,对 SFA<sup>2</sup>/O 工艺第 1 段的厌氧/缺氧/好氧体积比进行研究,以期达到充分利用原水碳源,强化系统脱氮除磷的目的。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示。

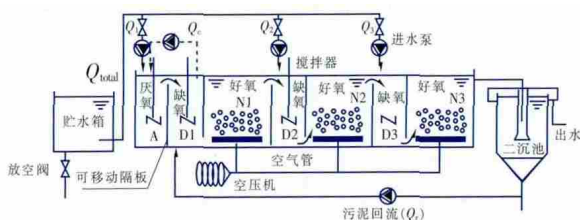


图 1 SFA<sup>2</sup>/O 工艺示意

Fig. 1 Schematic diagram of SFA<sup>2</sup>/O process

主体反应器容积为 320 L,各反应区通过可移动隔板进行分割,二沉池容积为 90 L。第 1 段的总体积为 128 L,厌氧/缺氧/好氧体积随工况而改变;第

2 段、第 3 段的体积均为 96 L,缺氧/好氧体积比均为 1:2。原水通过进水泵分别由第 1 段的厌氧区 A、第 2 段缺氧区 D2 和第 3 段缺氧区 D3 进入反应器,流量分别为  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ ,系统总进水量  $Q_{total}$  恒定为 960 L/d,相应的系统总水力停留时间(HRT)为 8 h。第 1 段缺氧区 D1 末端设置内回流设施,将混合液回流至厌氧区首端,流量为  $Q_c$ ;二沉池污泥回流至第 1 段缺氧区的首端,流量为  $Q_r$ 。厌氧区和各缺氧区设置机械搅拌装置,好氧区设置曝气装置。

试验设置 3 个工况即工况 1~3,其厌氧/缺氧/好氧体积比分别为(1:3:4)、(2:2:4)、(3:2:3),各运行 11 d,其他运行参数均相同: $Q_c/Q_{total} = 0.3$ , $Q_r/Q_{total} = 0.6$ , $Q_1:Q_2:Q_3 = 0.4:0.3:0.3$ ,好氧区 DO 为 1.8~3.0 mg/L,平均 MLSS 为(3 500 ± 100) mg/L,温度为(20 ± 1) °C,pH 值为 7.14~7.67。

### 1.2 原水水质及分析方法

原水为某家属区的生活污水,水质见表 1。原水 C/N 值为 2.87~4.14(平均为 3.58),C/P 值为 30.76~47.38(平均为 38.26),属于低碳源污水。

表 1 试验水质

Tab. 1 Characteristics of experimental wastewater

		mg · L <sup>-1</sup>						
项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	TN	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N	TP	碱度
最小值	228.5	110.7	53.42	59.21	0.08	0.05	5.67	289
最大值	307.6	150.5	70.70	76.47	0.19	1.42	7.15	376
平均值	273.4	124.3	62.13	66.26	0.14	0.74	6.58	341.5

试验过程中,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P、COD、TN、TP、MLSS 等指标均采用标准方法进行测定;DO、pH 值、温度采用仪器进行测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对有机物的去除效果

图 2 为不同工况下,系统对 COD 的去除效果。在 3 个工况下,系统均取得了较高的 COD 去除率,平均为 87.51%,且厌氧/缺氧/好氧体积比对去除 COD 的影响较小。但是,随着厌氧区体积的增大,其出水 COD 浓度呈现逐步下降的趋势。分析原因,主要是由于厌氧区水力停留时间的延长,使得易降解有机物的产生量大大提高,聚磷菌合成 PHA 的量

增多,故混合液中的 COD 浓度降低。

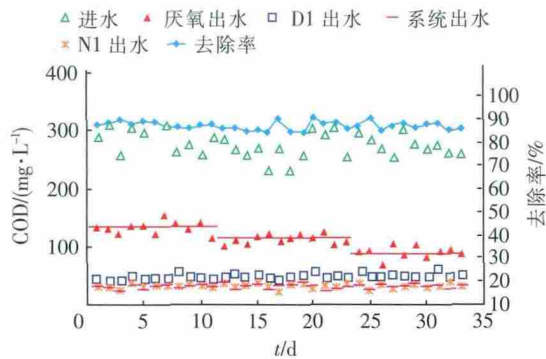


图 2 不同工况下系统对 COD 的去除效果

Fig. 2 COD removal performance of system under different operation modes

图 3 为不同工况下系统各反应区对 COD 的去除速率。可以看出,随着厌氧区体积的加大,厌氧区单位时间内去除的 COD 量明显提高。这表明,厌氧水力停留时间的加大,使得系统对 COD 的利用效率提高,对于碳源受限制的系统,这势必会增强系统的脱氮除磷性能。

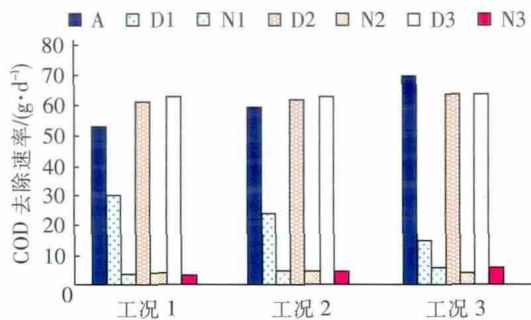


图 3 不同工况下各反应区对 COD 的去除速率

Fig. 3 Removal rates of COD in different zones of system under different operation modes

## 2.2 对磷的去除效果

工况 1 对总磷的平均去除率为 38.75%,其中,最大去除率为 44.52%,最小去除率为 33.78%。工况 1 对总磷的去除率较低,主要是由于厌氧停留时间过短,聚磷菌来不及将进入厌氧区的易降解 COD 转化成 PHA,这必然导致后续好氧区的吸磷动力不足,无法实现过量吸磷。工况 2 对总磷的去除率范围为 40.38%~58.26%,平均达到 50.66%,与工况 1 相比提高了 11.91%。工况 3 的厌氧/缺氧体积比达到 3:2,在改变运行工况的第二天,系统对总磷的去除率便出现明显提高,最高达到 84.16%,平均去除率为 80.39%。由于是短期影响的研究,对于

不同工况下系统除磷效率的变化,可将生物因素即菌种变化的影响排除,认为主要是由于系统结构变化所导致。

不同工况下系统各反应区出水磷酸盐浓度如图 4 所示。可以看出,增大厌氧区体积后,其出水磷酸盐浓度明显升高,即释磷量大幅增加,工况 1~3 的出水磷酸盐平均浓度分别为 7.53、12.33、17.49 mg/L。对于一般的城市污水而言,COD 由溶解性可快速生物降解 COD 和颗粒性慢速降解 COD 组成,且大部分为颗粒性慢速降解 COD。在厌氧区,微生物菌胶团表面的胞外水解酶将颗粒性慢速降解 COD 水解成溶解性可快速降解 COD,再由产酸菌吸收分解为乙酸等低分子物质。厌氧停留时间的增加有助于产生易降解基质,从而提高了聚磷菌体内 PHA 的合成量,促进后续吸磷效率的提高。

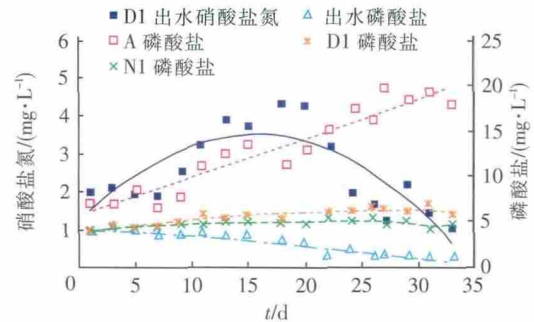


图 4 不同工况下系统内磷酸盐和硝酸盐氮浓度的变化

Fig. 4 Variations of phosphate and nitrate in system under different operation modes

以往对分段进水 A<sup>2</sup>/O 工艺的研究发现,系统存在一定程度的反硝化除磷现象<sup>[6,7]</sup>。在厌氧段,反硝化除磷菌吸收易降解 COD 合成体内 PHA,在缺氧段利用 PHA 作为电子供体,以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 作为电子受体,同时完成吸磷和反硝化。通常认为,缺氧段反硝化吸磷的多少与厌氧段的释磷量及合成的 PHA 量密切相关。在工况 1 下,D1 的出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度最低,平均为 2.11 mg/L;在工况 2 下,D1 的出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度有所上升,平均为 3.91 mg/L;而在工况 3 下,D1 的出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度又有较大幅度下降,平均为 1.60 mg/L。分析认为,在工况 1 下,D1 的体积最大,而 A 的体积较小,大部分的 COD 来不及在厌氧区降解便以外碳源的形式进入 D1,强化了异养反硝化反应,进而使得 D1 出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度较低。有研究表明<sup>[8]</sup>,反硝化菌利用外碳源作为电子供体的反硝化速率明显高于利用内碳源(PHA)

作为电子供体时的反硝化速率。对于工况 3 ,厌氧区体积较大 ,聚磷菌合成的 PHA 较多 ,D1 中的碳源大部分以 PHA 的形式存在。虽然内碳源作为电子供体的反应速率较低 ,但能够持续供给能量 ,在普通异养菌和反硝化聚磷菌的竞争中 ,反硝化聚磷菌更容易发挥作用 ,从而使得大量的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在缺氧区作为反硝化除磷的电子受体而被去除。不同运行工况下 ,系统对磷的去除性能见表 2。可知增加厌氧区的体积能够提高反硝化除磷的比率。工况 3 反硝化除磷比率的提高除了与厌氧区合成的 PHA 较多强化了缺氧反硝化吸磷有关外 ,也与系统工艺形式、回流及内循环的设置有关。

表 2 不同工况下系统的除磷性能

Tab.2 Phosphorus removal performances under different operation modes

项 目	工况 1	工况 2	工况 3
平均 TP 去除率/%	38.75	50.66	80.39
厌氧区比释磷速率/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{VSS} \cdot \text{h}^{-1}$ )	0.21	0.52	0.87
比缺氧吸磷速率/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{VSS} \cdot \text{h}^{-1}$ )	0.18	0.63	1.3
比好氧吸磷速率/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{VSS} \cdot \text{h}^{-1}$ )	0.02	0.03	0.06
缺氧/好氧吸磷速率比	9.0	21.0	21.7
系统比吸磷速率/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{VSS} \cdot \text{h}^{-1}$ )	0.15	0.34	0.58

### 2.3 对氮的去除效果

在 3 种工况下 ,系统对 TN 的去除率分别为 76.29%、79.28% 和 82.33% ,呈明显的上升趋势。分析原因是 随着厌氧区体积的增大 ,厌氧水力停留时间延长 ,会产生更多容易被微生物利用的低分子有机酸 ,其一方面有利于聚磷菌合成体内 PHA ,另一方面 ,进入缺氧区会提高缺氧区的反硝化效率。

3 种工况下 , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的沿程变化见图 5。不同工况下 ,系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率均较高 ,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度均小于 1 mg/L ,平均去除率为 98.21% ,出水中的氮主要以  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的形式存在。工况 3 的 D1 对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除量较工况 1 有所提高 ,同时磷酸盐也得到一定去除。这主要是因为厌氧区水力停留时间的延长 ,使得聚磷菌体内储存了大量的 PHA ,在缺氧区可作为反硝化和反硝化除磷的内碳源。而在反硝化和反硝化除磷同时发生时 ,缓慢降解的内源基质更有利于反硝化除磷菌发挥作用 ,使得很大一部分的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  作为反硝化除磷的电子受体被去除。由于实现了“一碳两用” ,对于低 C/N 值生活污水 ,系统的脱氮和除磷性

能会同时得到提升。

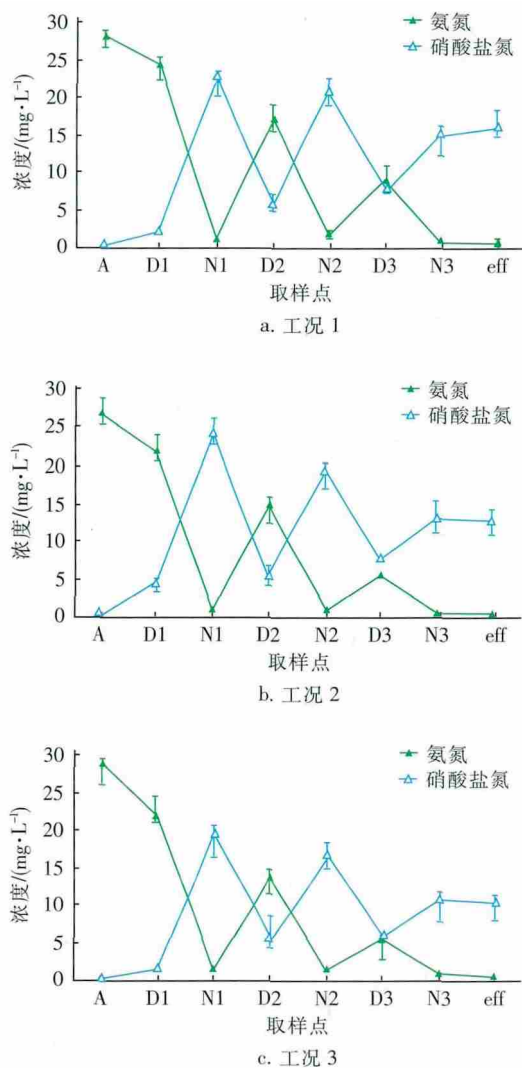


图 5 不同工况下氨氮、硝酸盐氮浓度的沿程变化  
Fig.5 Variations of ammonia and nitrate in system under different operation modes

### 3 结论

对于分段进水 A<sup>2</sup>/O 工艺 ,系统对 TP 的去除效率受厌氧区体积的影响较大。厌氧停留时间的延长使得释磷更加充分 ,也有助于原水中的颗粒性碳源水解为易降解基质 ,提高系统可利用碳源的比例并强化反硝化除磷性能。随厌氧区体积的增大 ,系统对 TP 和 TN 的平均去除率均呈上升趋势 ,对 TP 的去除率由工况 1 的 38.75% 提高到工况 3 的 80.39% ,对 TN 的去除率由工况 1 的 76.29% 提高到工况 3 的 82.33%。试验结果表明 ,在好氧区体积能够保证硝化顺利完成的情况下 ,适当地提高厌氧/缺氧区体积 ,可强化低 C/N 值生活污水的脱氮

除磷性能。基于本研究所采用的3种工况,三段式分段进水A<sup>2</sup>/O工艺第1段较为优化的厌氧、缺氧、好氧体积比为3:2:3。

#### 参考文献:

- [1] 王伟,彭永臻,殷芳芳,等.改进分段进水A/O生物脱氮工艺强化生物除磷[J].环境科学,2009,30(10):2968-2974.
- [2] 葛士建,彭永臻.改良UCT分段进水脱氮除磷工艺的性能分析[J].中国给水排水,2011,27(21):31-35.
- [3] Johnson B R, Goodwin S, Daigger G T *et al.* A comparison between the theory and reality of full-scale step-feed nutrient removal system[J]. Water Sci Technol, 2005, 52(10/11):587-596.
- [4] 王伟,王淑莹,孙亚男,等.分段进水A/O工艺流量分配专家系统的建立与应用[J].化工学报,2008,59(10):2608-2615.
- [5] 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.
- [6] Wang W, Wang S Y, Peng Y Z *et al.* Enhanced biological nutrients removal in modified step-feed anaerobic/anoxic/oxic process[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, 17(5):840-847.
- [7] Ge S J, Zhu Y P, Lu C C *et al.* Full-scale demonstration of step feed concept for improving an anaerobic/anoxic/aerobic nutrient removal process[J]. Bioresour Technol, 2012, 120(6):305-313.
- [8] 王晓莲,王淑莹,于德爽,等.强化A<sup>2</sup>/O工艺反硝化除磷性能的运行控制策略[J].环境科学学报,2006,26(5):722-727.



作者简介:王伟(1979-),女,黑龙江鸡西人,博士,副教授,主要从事污水生物处理及过程控制的研究。

E-mail: wang\_weibjut@163.com

通讯作者:彭永臻

收稿日期:2014-02-10

(上接第9页)

- [4] 李诚,黄廷林,何文杰,等.超滤膜前强化混凝预处理微污染原水的试验研究[J].中国给水排水,2013,29(5):59-61.
- [5] 陈蓓蓓,高乃云,刘成,等.粉末活性炭去除原水中阿特拉津突发污染的研究[J].给水排水,2007,33(7):9-13.
- [6] 乔春光,魏群山,王东升,等.典型南方水源溶解性有机物分子量分布变化及去除特性[J].环境科学学报,2007,27(2):195-200.
- [7] 董艳红,王立军,闰钰,等.臭氧/生物活性炭工艺深度处理微污染原水中试[J].中国给水排水,2013,29(9):45-48.
- [8] 吕炳南,张金松,朱佳.用臭氧-生物活性炭法深度处理饮用水[J].中国给水排水,1993,9(2):13-19.
- [9] 杨家轩,马军,时玉龙,等.气浮/复合滤料生物滤池工艺处理低温、高氨氮原水[J].中国给水排水,2013,29(21):5-10.
- [10] 陈志真,李伟光,乔铁军,等.臭氧-生物活性炭工艺去除饮用水中AOC的研究[J].中国给水排水,

2008,24(3):72-78.



作者简介:李探平(1987-),男,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为饮用水安全保障技术。

E-mail: liushuiwuqing2014@163.com

通讯作者:白晓慧

收稿日期:2014-03-17