

后置反硝化 BAF 除污效能的主要影响因素研究

李 东, 刘旭林, 封 莉, 王洪杰, 张立秋
(北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 通过实验室模拟,考察了后置反硝化曝气生物滤池(BAF)工艺对污水厂尾水的脱氮效果,重点研究了外加碳源量和水力负荷对后置反硝化 BAF 除污效能的影响规律。研究发现,随着外加碳源量的减少(COD/TN 值由 10 降为 4),出水 COD 浓度由 51.9 mg/L 下降到 7.5 mg/L, TN 浓度由 3.49 mg/L 增加到 18.11 mg/L,而氨氮浓度变化较小,始终保持在 1 mg/L 以下;随着进水水力负荷由 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 逐渐增加至 $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,出水 COD 浓度由 7.44 mg/L 增加到 45.31 mg/L, TN 由 3.46 mg/L 增加到 17.18 mg/L,而出水氨氮浓度仍无明显变化,保持在较低水平。综合考虑进水水质和出水水质要求,确定后置反硝化 BAF 工艺的适宜水力负荷 $\leq 1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、外加碳源量为 COD/TN 值=7,该条件下对 COD、氨氮、总氮的去除效果均较好,去除率分别 $\geq 77.51\%$ 、 $>95\%$ 、 $\geq 87.32\%$ 。

关键词: 后置反硝化; 曝气生物滤池; 外加碳源量; 水力负荷

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0078-06

Influence of External Carbon Source Dosage and Hydraulic Loading on Pollutants Removal by Post-denitrification Biological Aerated Filter

LI Dong, LIU Xu-lin, FENG Li, WANG Hong-jie, ZHANG Li-qiu
(College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The denitrification efficiency of the post-denitrification biological aerated filter (BAF) on the effluent of a municipal wastewater treatment plant was investigated through laboratory tests. The influence of the external carbon source dosage and the hydraulic loading on the performance of the post-denitrification BAF in removing pollutants was explored in detail. The results showed that with the decrease of the external carbon source dosage (COD/TN ratio reduced from 10 to 4), the effluent COD concentration decreased from 51.9 mg/L to 7.5 mg/L, while the TN concentration increased from 3.49 mg/L to 18.11 mg/L and the concentration of ammonia nitrogen was constantly below 1 mg/L. When the influent hydraulic loading raised from $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ to $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, COD and TN concentrations in effluent increased from 7.44 and 3.46 mg/L to 45.31 and 17.18 mg/L, respectively, while no significant change in the ammonia nitrogen concentration was observed. Considering the influent quality and effluent requirements, the proper hydraulic loading of post-denitrification BAF process should be less than or equal to $1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and the external carbon source dosage should be COD/TN = 7. Under

this condition, the removal rates of COD, total nitrogen, and ammonia nitrogen were greater than or equal to 77.51%, 87.32% and above 95%, respectively.

Key words: post-denitrification; biological aerated filter; external carbon source dosage; hydraulic loading

曝气生物滤池(BAF)工艺具有处理效率高、占地面积小、基建及运行费用低、管理方便和抗冲击负荷能力强等优点,可使有机物去除、固体过滤和硝化过程在同一反应器中完成^[1]。随着城镇污水处理标准的提高,BAF 工艺正越来越多地应用于污水厂尾水的深度处理。根据处理目标的不同,BAF 可分为硝化生物滤池(CN 池)和反硝化生物滤池(DN 池)。目前,在城市污水厂较多采用后置 DN 池(将 DN 池设于 CN 池后)作为深度脱氮处理工艺^[2]。后置 DN 工艺不仅对氨氮和有机物具有较高的去除率,对总氮也有很好的去除效果^[3,4]。研究发现^[5,6],在后置 DN 池中碳源投加量是影响污水厂尾水中主要污染物去除的关键参数,不仅决定了总氮和 COD 的去除率,还决定了污水处理的经济成本;另一方面,投加甲醇等液态碳源较难控制其添加量,易造成出水中有机物浓度升高。因此,外加碳源量是制约后置 DN 工艺应用的主要因素^[7,8]。水力负荷是影响生物膜生长的重要因素,而生物膜生长直接关系到后置 DN 工艺的除污性能。水力负荷的增加会促进新的生物膜生长和老化生物膜脱落,但水力负荷过大会造成生物膜大量脱落,从而影响反应器除污效果^[9~13]。基于此,笔者以许昌市某城市污水厂(采用氧化沟工艺)尾水为研究对象,考察外加碳源量和水力负荷对后置 DN 工艺深度除污效能的影响。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验装置采用上向流好氧、缺氧两级圆柱形曝气生物滤池(见图 1)。柱体均采用有机玻璃制成,高为 70 cm,直径为 5 cm,柱体由上到下每隔 15 cm 设置一个取样口,共 4 个。柱体下部采用多孔隔板承载滤料,隔板下设置高为 5 cm 的布水区,在好氧池隔板处设有 1 个曝气口。好氧柱内装填改性沸石滤料,滤料直径为 3~5 mm,填料高度为 50 cm;缺氧柱内采用陶粒作为填料,填料直径为 3~5 mm,填料高度为 30 cm,两柱承托层高度均为 5 cm,采用直径为 3~5 mm 的卵石。

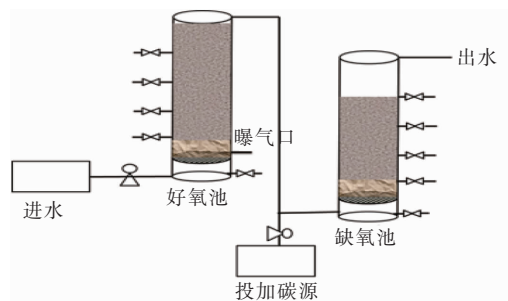


图 1 后置 DN 池装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of post-denitrification BAF

1.2 原水水质及分析方法

采用实验室配水,模拟许昌市某城市污水厂尾水水质(按出水最不利情况),配制方法如下:将自来水稳定 24 h 并加入亚硫酸钠,以减少水中 DO 含量,向其中加入燕京啤酒、氯化铵、硝酸钠、磷酸二氢钾、碳酸氢钠等多种物质。原水水质如下:COD 为 50~70 mg/L、氨氮为 15~20 mg/L、硝酸盐为 20~25 mg/L、总氮为 35~45 mg/L、温度为 $(25.0 \pm 2.0)^\circ\text{C}$ 、pH 值为 7.0~7.5、DO<0.5 mg/L。

试验期间,好氧柱中 DO 浓度控制为 3.0~4.0 mg/L,缺氧柱中 DO 浓度控制为 0.7~1.3 mg/L。COD 采用重铬酸钾法测定,氨氮采用纳氏试剂光度法测定,硝酸盐采用紫外分光光度法测定,亚硝酸盐采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定,DO 采用哈希溶氧仪测定。

1.3 系统的挂膜启动

系统挂膜启动共分 3 个阶段:

第 1 阶段为闷曝阶段。采用北京高碑店污水处理厂内回流活性污泥作为接种污泥,加入 C:N:P=100:5:1 的人工配制营养液(COD=200~300 mg/L),灌满好氧柱和缺氧柱;对好氧柱进行曝气,使 DO 浓度维持在 3.0~4.0 mg/L,缺氧柱不进行曝气;24 h 后将滤柱排空,再次将滤柱内灌满活性污泥、投加营养液,此过程重复 7 d,以完成初步挂膜。

第 2 阶段为小流量连续进水阶段。将好氧柱与缺氧柱串联,进水为人工配制的污水厂尾水,控制进水负荷为 $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,缺氧段按照 COD/TN 值

=10(TN 为 35~45 mg/L)的比例投加甲醇作为碳源,10 d后出水水质稳定,逐步增大进水负荷。

第3阶段为设计参数下运行驯化阶段。进水负荷为 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,严格控制好氧池 DO 浓度为 $3.0 \sim 4.0 \text{ mg/L}$ 、缺氧池 DO 浓度不高于 1.3 mg/L ,反应器运行 20 d,好氧池出水稳定;反应器运行 40 d,缺氧池出水稳定,反应器启动成功。

1.4 试验方案

反应器运行稳定后,以水力负荷为 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 连续进水,按照 COD/TN 值 = 10、7 和 4(TN 为 35~45 mg/L)来投加甲醇,在每个碳源投加量下稳定运行 10 d,维持好氧柱中 DO 为 $3.0 \sim 4.0 \text{ mg/L}$ 、缺氧柱中 DO 为 $0.7 \sim 1.3 \text{ mg/L}$ 。经过上述试验,选出适宜的碳源投加量,分别在 1.0 、 1.5 和 $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的水力负荷下运行 10 d。试验期间,每天测定反应器进、出水中 COD、氨氮、总氮浓度。

2 结果与讨论

2.1 外加碳源量对后置 DN 工艺运行效能的影响

2.1.1 外加碳源量对总氮去除效果的影响

进水水力负荷为 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,不同碳源投加量对后置 DN 工艺去除总氮的影响见图 2。

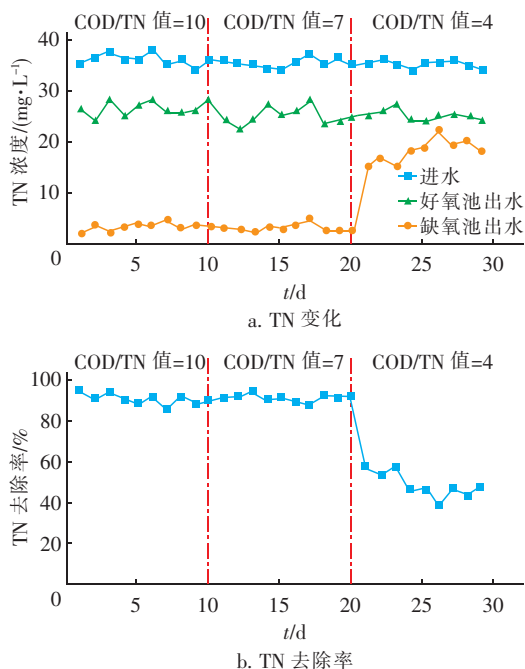


图2 外加碳源量对总氮去除效果的影响

Fig. 2 Influence of external carbon source dosage on TN removal efficiency

由图2可以看出,当外加碳源量减少时,系统

对总氮的去除率降低,当 COD/TN 值从 10 降到 7 时,系统对总氮的去除率变化很小,而 COD/TN 值继续降至 4 时,总氮去除率由 90.45% 降到 48.22%,出水总氮浓度由 3.49 mg/L 增加到 18.11 mg/L ,说明外加碳源量过低会对总氮的去除产生明显影响。在反硝化过程中,反硝化细菌需要利用碳源进行细胞合成、产生能量,同时完成总氮的去除。随着外加碳源量的减少,碳源成为反硝化作用的主要限制因素,反硝化菌生长受抑制,反硝化速率迅速下降。从图2还可以看出,COD/TN 值 < 7 时,出水 TN > 15 mg/L ,已经不能满足一级 A 标准。因此,为使后置 DN 工艺取得较好的总氮去除效果,宜控制 COD/TN 值 ≥ 7 ,此时系统对总氮的去除率在 85% 以上,出水 TN 浓度在 5 mg/L 以下。

2.1.2 外加碳源量对 COD 去除效果的影响

进水水力负荷为 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,不同外加碳源量对 COD 去除效果的影响见图 3。

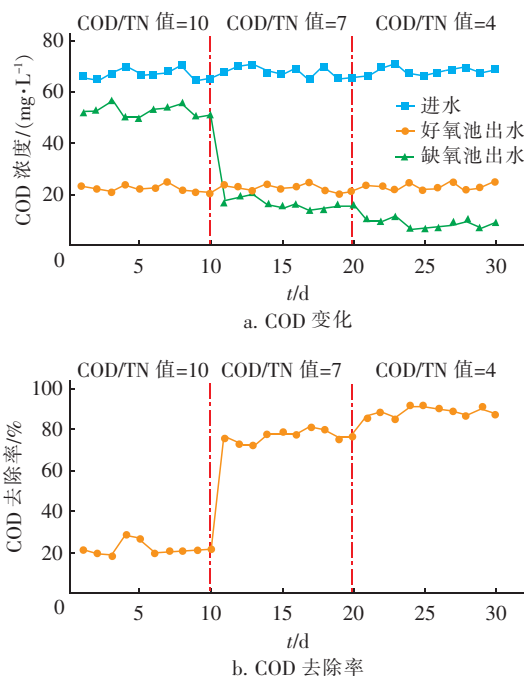


图3 外加碳源量对 COD 去除效果的影响

Fig. 3 Influence of external carbon source dosage on COD removal efficiency

由图3可知,当外加碳源量逐渐减少时(COD/TN 值从 10 降到 4),系统对 COD 的去除率呈增大趋势,由 21.2% 增加到 88.9%,出水 COD 浓度由 51.9 mg/L 降到 7.5 mg/L 。分析认为,在后置 DN 池中外加碳源量主要用于异养反硝化菌脱氮作用,

过量的外加碳源不能被微生物全部利用,而随出水排出,导致出水 COD 浓度超标。从图 2 中外加碳源量对总氮去除效果的影响已知,外加碳源量不足,虽然出水 COD 浓度可以降到 10 mg/L 以下,但反硝化作用不理想,可能导致出水硝酸盐浓度过高,致使出水总氮难以达到出水水质要求,如图 3 中 COD/TN 值=4 时,出水 COD 浓度较低,但出水总氮浓度不能达到一级 A 标准,而 COD/TN 值=10 时,系统对总氮的去除率较高,但出水 COD 浓度相对较高,且外加碳源量过大使得经济成本增加,因此宜控制 COD/TN 值=7 左右,此时系统对 COD 的去除率在 75% 以上,出水 COD 浓度在 20 mg/L 以下。

2.1.3 外加碳源量对氨氮去除效果的影响

在 COD/TN 值从 10 降到 4 的整个过程中,系统对氨氮的去除率都在 95% 以上,出水氨氮浓度在 1 mg/L 以下。氨氮的去除主要以好氧池中硝化细菌的硝化作用为主,试验中好氧池又以改性沸石为填料,增强了对进水中氨氮的离子交换和吸附能力,从而保证了对氨氮的高效去除^[14]。

综上,确定较为适宜的外加碳源量为 COD/TN 值=7 左右。

2.2 水力负荷对后置 DN 工艺运行效能的影响

2.2.1 水力负荷对总氮去除效果的影响

在 COD/TN 值=7 的条件下,进水水力负荷对后置 DN 工艺去除总氮的影响如图 4 所示。可以看出,当进水水力负荷从 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 增加到 $1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,总氮去除率略有降低,从 90.32% 降至 87.32%;当水力负荷继续从 $1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 增加到 $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,出水总氮浓度从 4.48 mg/L 增加到 17.18 mg/L,总氮去除率由 87.32% 降低到 50.96%。由此可知,当水力负荷 $\leq 1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,系统对总氮的去除效果较好,去除率在 87.32% 以上,出水 TN 在 4.48 mg/L 以下。这是因为,水力负荷过大会导致好氧池硝化作用减弱,使得进入反硝化池的硝酸盐减少;另一方面,水力负荷的增加还会造成缺氧池内 HRT 缩短,影响反硝化脱氮效果。试验过程中发现,随着水力负荷的增加,好氧池内生物膜生长速度加快,底部生物膜不断增厚,导致生物膜内供氧不足,生物膜颜色出现变黑现象,而且随着水力负荷的增加,生物膜发黑现象明显向上延伸,影响了好氧池内硝化反应和后续缺氧池内反硝化脱氮反应的进行,最终影响总氮去除效果。

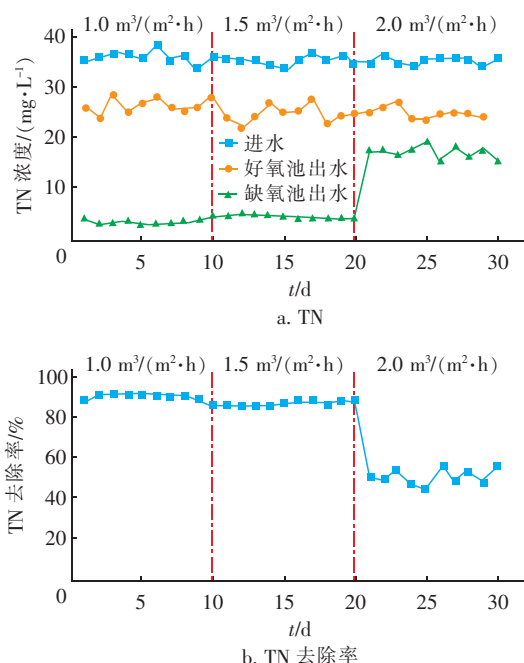


图 4 水力负荷对总氮去除效果的影响

Fig. 4 Influence of hydraulic loading on TN removal efficiency

2.2.2 水力负荷对 COD 去除效果的影响

当 COD/TN 值=7 时,进水水力负荷对 COD 去除效果的影响如图 5 所示。

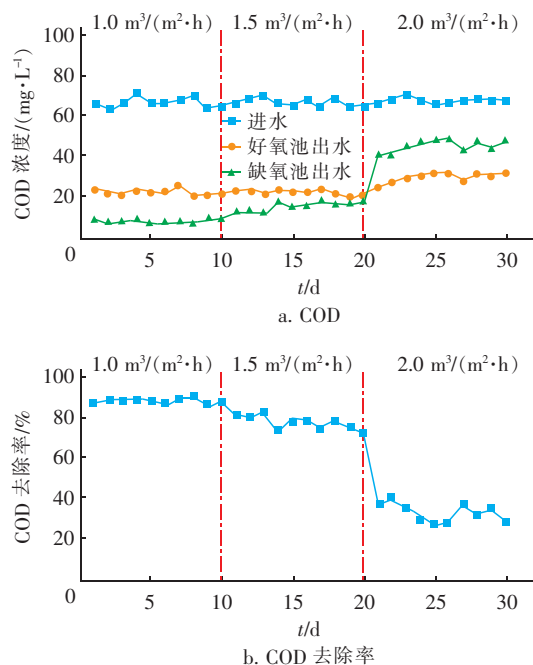


图 5 水力负荷对 COD 去除效果的影响

Fig. 5 Influence of hydraulic loading on COD removal efficiency

从图 5 可以看出,随着水力负荷的增加,COD

去除率呈现下降趋势,当水力负荷从 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 增加到 $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,出水 COD 浓度从 7.44 mg/L 逐步增加到 45.31 mg/L ,COD 平均去除率从 88.78% 降到 32.95% 。分析认为,提高水力负荷会缩短污水在系统中的 HRT,使得有机物尚未被微生物完全降解便随水流排出;另一方面,提高水力负荷加大了滤层间的过滤速度和水力剪切力,使得生物膜容易被冲掉,进而影响了有机物的去除效果。

由图 5 还可知,控制水力负荷 $\leq 1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,COD 去除率 $\geq 77.51\%$,出水 COD $\leq 15.43 \text{ mg/L}$,可以达到一级 A 标准。

2.2.3 水力负荷对氨氮去除效果的影响

水力负荷增加时,系统对氨氮的去除率基本没有变化,去除率始终维持在 95% 以上,出水氨氮浓度在 1 mg/L 以下。

综上,确定适宜的水力负荷 $\leq 1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

3 结论

① 外加碳源量对后置 DN 工艺的除污效能有较大影响。确定最佳外碳源投加量为 COD/TN 值 $=7$,此时系统出水 COD、氨氮、总氮平均浓度分别在 20 、 1 、 5 mg/L 以下,去除率分别在 75% 、 95% 、 85% 以上。

② 水力负荷也是影响后置 DN 工艺除污效能的重要因素。试验条件下,确定较为适宜的水力负荷 $\leq 1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,此时出水中 COD、氨氮和总氮浓度分别 ≤ 15.43 、 <1 、 $\leq 4.48 \text{ mg/L}$,平均去除率分别 $\geq 77.51\%$ 、 $>95\%$ 、 $\geq 87.32\%$ 。

参考文献:

- [1] 马军,邱立平. 曝气生物滤池及其研究进展[J]. 环境工程,2002,20(3):7-11.
Ma Jun, Qiu Liping. Biological aerated filter and its research progress[J]. Environmental Engineering, 2002, 20(3):7-11(in Chinese).
- [2] 王兴戡,李宏斌,裴铁夫,等. 温州南片污水处理厂曝气生物滤池工艺调试[J]. 中国给水排水,2017,33(11):112-115.
Wang Xingjian, Li Hongbin, Xi Tiefu, et al. Commissioning of biological aerated filter(BAF) in Wenzhou South Wastewater Treatment Plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(11):112-115(in Chinese).
- [3] 王志祥,白宇,甘一萍,等. 前置反硝化生物滤池的启动研究[J]. 中国给水排水,2012,28(1):20-23.
Wang Zhixiang, Bai Yu, Gan Yiping, et al. Study on start-up of pre-denitrification biofilter[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(1):20-23(in Chinese).
- [4] 郭俊元,杨春平,曾龙云,等. 回流比水力负荷对前置反硝化生物滤池工艺处理污水的影响研究[J]. 环境科学学报,2010,30(8):1615-1621.
Guo Junyuan, Yang Chunping, Zeng Longyun, et al. Influence of reflux ratio and hydraulic loading on the performance of pre-denitrification BAF in wastewater treatment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(8):1615-1621(in Chinese).
- [5] 李军,王静萱,刘伟岩,等. 水力负荷对缺氧生物滤池脱氮效能的影响[J]. 中国给水排水,2012,28(11):82-84.
Li Jun, Wang Jingxuan, Liu Weiyan, et al. Influence of hydraulic loading rates on denitrification efficiency of anoxic biofilter[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(11):82-84(in Chinese).
- [6] 廖建胜,林元昆,吴亨,等. 低碳源污水的奥贝尔氧化沟脱氮除磷影响因素分析[J]. 中国给水排水,2017,33(11):27-32.
Liao Jiansheng, Lin Yuankun, Wu Heng, et al. Analysis of TN and TP removal efficiency in orbal oxidation ditch process with low carbon source [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(11):27-32(in Chinese).
- [7] 杨敏,孙永利,郑兴灿,等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 给水排水,2010,36(11):125-128.
Yang Min, Sun Yongli, Zheng Xingcan, et al. Denitrification efficiency and techno-economic analysis of different exotic additional carbon source[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(11):125-128(in Chinese).
- [8] 袁敏,周琪,杨殿海,等. 甲醇为碳源时生物滤池去除二级出水中氮、磷的研究[J]. 中国给水排水,2007,23(11):36-38.
Yuan Min, Zhou Qi, Yang Dianhai, et al. Study on removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent in biofilter using methanol as external carbon source[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(11):36-38(in Chinese).
- [9] 邱立平,马军,张立昕. 水力停留时间对曝气生物滤池处理效能及运行特性的影响[J]. 环境污染与防治,2004,26(6):433-436.
Qiu Liping, Ma Jun, Zhang Lixin. Effect of hydraulic retention time on the treatment efficiency and operational

- characteristics of biological aerated filter[J]. Environmental Pollution & Control, 2004, 26(6): 433 - 436 (in Chinese).
- [10] 王先涛, 李易, 黄韬, 等. 水力负荷对反硝化滤池深度脱氮效能的影响[J]. 中国给水排水, 2016, 32(21): 12 - 16.
Wang Xiantao, Li Yi, Huang Tao, *et al.* Effect of hydraulic loading on advanced nitrogen removal in denitrification biofilter[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(21): 12 - 16 (in Chinese).
- [11] 杨威, 张雷坤, 余华荣, 等. 前置反硝化曝气生物滤池的挂膜启动研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(11): 4701 - 4706.
Yang Wei, Zhang Leikun, Yu Huarong, *et al.* Study on start-up and film formation of pre-denitrification biological aerated filter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(11): 4701 - 4706 (in Chinese).
- [12] 邱立平, 马军. 曝气生物滤池的生物膜及其微生物种群特征[J]. 中国环境科学, 2005, 25(2): 214 - 217.
Qiu Liping, Ma Jun. Characters of biofilm and its micro-organism population in biological aerobic filter[J]. China Environmental Science, 2005, 25(2): 214 - 217 (in Chinese).
- [13] Corsino S F, Capodici M, Morici C, *et al.* Simultaneous nitrification-denitrification for the treatment of high-strength

nitrogen in hypersaline wastewater by aerobic granular sludge[J]. Water Res, 2016, 88: 329 - 336.

- [14] 江乐勇, 林海, 赵志英, 等. 盐热改性沸石去除氨氮的性能研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(8): 25 - 28.
Jiang Leyong, Lin Hai, Zhao Zhiying, *et al.* Performance study of NH_4^+ - N removal by using salt and thermal modified zeolite [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(8): 25 - 28 (in Chinese).



作者简介: 李东(1990 -), 男, 黑龙江肇东人, 硕士研究生, 研究方向为水环境污染控制与生态修复技术。

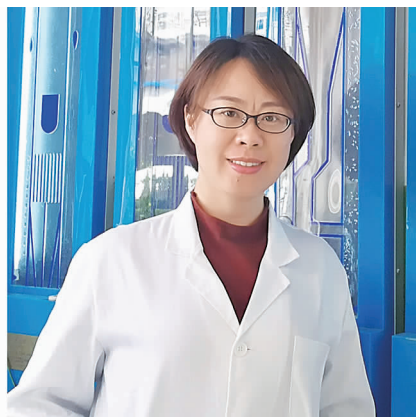
E-mail: 468037644@qq.com

收稿日期: 2017 - 11 - 12

(上接第 77 页)

- Xu Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(4): 482 - 488 (in Chinese).
- [4] 李佳音, 李伟芳, 孟洁, 等. 天津市中心城区黑臭河流评价及判定标准[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 90 - 95.
Li Jiayin, Li Weifang, Meng Jie, *et al.* Evaluation and categorization of black and odorous rivers in central urban area of Tianjin [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19): 90 - 95 (in Chinese).
- [5] 王旭, 王永刚, 孙长虹, 等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1331 - 1340.
Wang Xu, Wang Yonggang, Sun Changhong, *et al.* Formation mechanism and assessment method for urban black and odorous water body: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1331 - 1340 (in Chi-

nese).



作者简介: 柳超(1979 -), 女, 山东聊城人, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为城市水系统优化理论与技术。

E-mail: liuchao_hy@163.com

收稿日期: 2017 - 12 - 23