

反硝化深床滤池的菌群培养与运行条件优化

吴正双^{1,2}, 杨志宏³, 朱亮^{1,2}

(1. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 太平洋水处理工程有限公司, 江苏 南通 226001)

摘要: 以南通市某污水厂二级生化出水为原水,采用中试规模的反硝化深床滤池进行生物处理,重点考察了反硝化深床滤池夏、冬季的菌群培养条件,硝态氮去除效果及滤速对硝态氮去除率的影响,并确定了深床滤池的设计和运行参数。结果表明,以恒定滤速、连续进水的自然挂膜方式进行培菌,在水温为23℃、碳源充足的情况下,无需污泥接种,历时20d菌群培养成功。反硝化深床滤池在冬季适宜以低滤速运行,夏季则可适应高滤速运行。

关键词: 反硝化深床滤池; 二级生化出水; 硝态氮; 菌群培养; 滤速

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0055-06

Bacterial Cultivation and Operation Conditions Optimization of Deep-bed Denitrification Biofilter

WU Zheng-shuang^{1,2}, YANG Zhi-hong³, ZHU Liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes <Ministry of Education>, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Pacific Water Treatment Engineering Co. Ltd., Nantong 226001, China)

Abstract: A pilot scale deep-bed denitrification biofilter (DNBF) was used for the biological treatment of the secondary biochemical effluent of a municipal wastewater treatment plant in Nantong. The bacterial cultivation conditions of DNBF in both summer and winter as well as the effect of filtration rate on the removal of nitrate nitrogen were investigated. Additionally, the design and operation parameters of DNBF were determined. The results showed that the bacterial cultivation was successful with constant filtration rate and continuous inflow. The cultivation period was 20 days and the water temperature was 23℃. The carbon source was sufficient and sludge inoculation was not needed. The filter was run at low filtration rate in winter and could be adapt to high filtration rate in summer.

Key words: deep-bed denitrification biofilter; secondary biochemical effluent; nitrate nitrogen; bacterial cultivation; filtration rate

反硝化深床滤池(DNBF)是目前污水处理厂提标改造深度处理的主流工艺之一,其具有占地面积小、动力消耗低、脱氮效果好等特点,已成为城市污水深度处理领域研究和应用的热点^[1-3]。反硝化生物滤池处理污水的本质是利用填料上的微生物,在缺氧条件下以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为电子受体、以有机底物为电子供体,将硝态氮还原成氮气释放出去^[4]。南通

市经济技术开发区第一污水处理厂采用二级生化处理SBR工艺,出水水质暂不能达到一级A标准。经协商决定,在该污水厂现场开展深床滤池中试研究,采用污水厂二级生化出水作为中试进水,考察自主研发的深床滤池对污水厂目前出水中硝态氮的去除效果,并为未来更高的排放标准(如《地表水环境质量标准》)预留一定的提升空间,旨在为以后类似提

标改造工程的设计及实施提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 原水水质及分析方法

污水厂二级生化出水的硝态氮为 $6.8 \sim 34.5 \text{ mg/L}$ 、COD $< 10 \text{ mg/L}$ 、SS 为 $6 \sim 15 \text{ mg/L}$ 。

中试在上午和下午各采集 1 次进水、1[#]滤柱出水、2[#]滤柱出水水样,将上午和下午水样混合后作为综合水样进行测定分析。硝态氮指标采用酚二磺酸分光光度法测定。

1.2 中试装置

中试流程见图 1。中试装置由 2 个平行滤柱组成,进水(污水厂二级生化出水)由潜水泵经自动清洗过滤器后进入原水箱,由进水离心泵将水提升至滤柱上部,经滤料过滤后产水进入产水箱溢流排出。产水箱同时提供反冲洗用水,反冲洗时通过阀门切换由反冲洗水泵将水自下而上清洗滤料,污水通过排污管道排出,鼓风机提供反冲洗用空气。稀释后的甲醇通过计量泵精确投加到进水管路中,经静态混合器混合后进入滤柱补充反硝化所需碳源。

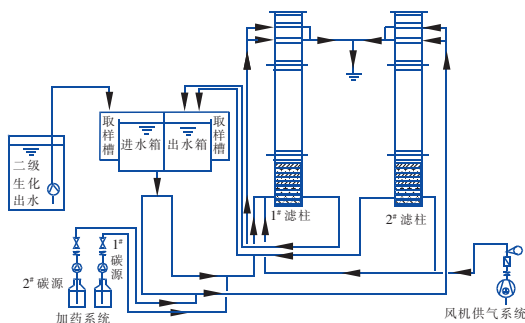


图 1 中试工艺流程

Fig. 1 Flow chart of pilot-scale experiment

1.3 运行参数

中试装置规模为 $0.84 \sim 2.52 \text{ m}^3/\text{h}$,其中单根滤柱有效面积为 0.168 m^2 ,总高为 6.03 m ,滤柱滤速为 $5 \sim 15 \text{ m/h}$ 。当对应水量为 $2.02 \sim 2.52 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,水反冲(驱氮)强度为 $12 \sim 15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;对应气量为 $9.24 \sim 18.48 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,气反冲强度为 $55 \sim 110 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。驱氮间隔为 $3 \sim 6 \text{ h}$,反冲洗间隔为 $24 \sim 48 \text{ h}$ 。

1.4 操作步骤

中试采用间歇运行模式,自动操作,运行时间为每天的 09:00—17:00。①正常运行操作:正常运行模式下,开启进水泵、出水阀;关闭反冲洗水泵、反冲

洗风机、反冲洗气水阀门。②取样分析操作:每日稳定运行状态下,上午 10:00 和下午 14:00 取进水样、出水样各 1 个,下午 15:00 送到污水厂化验室进行分析。③反冲洗操作:反冲洗频率基本为每天 1 次,可根据运行情况实时调整设定值。由于中试为间歇运行模式,每天运行 8 h ,所以实际频率为每 $2 \sim 3 \text{ d}$ 反冲洗 1 次。反冲洗风量及反冲洗水泵流量可通过变频器调节,气冲和水冲时间根据试验情况可更改设定值。④驱氮操作:驱氮频率为每 $3 \sim 6 \text{ h}$ 进行 1 次。⑤投加甲醇:反硝化的主要目的是去除污水中的硝态氮,硝态氮可被微生物作为最终电子受体,通过生物异化还原转化成气态氮从水中逸出,或通过生物同化还原转化为氨氮进入合成过程。异化作用是反硝化反应的主要过程,其去除的氮占总去除量的 $70\% \sim 75\%$ [5],因此反硝化深床滤池需要外加碳源以实现反硝化脱氮,中试选择甲醇作为外加碳源。理论上 1 g 硝态氮还原为氮气需要 2.86 g 有机物,若以甲醇作为碳源,甲醇与硝态氮的质量比为 $3:1$ 可以满足需要 [6]。投加频率为每天 1 次,每次用时 8 h 。将甲醇加入药桶,然后加水,搅拌均匀,溶液约 20 L ,通过计量泵投加。碳源投加量根据前一天进水硝态氮值确定,即通过前一天进水硝态氮减去目标出水硝态氮来确定碳源投加量。

2 结果与分析

2.1 第 1 阶段对硝态氮的去除效果

中试第 1 阶段起止时间为 2016 年 10 月 17 日—12 月 26 日,此阶段水温为 $15 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.1.1 第 1 阶段培菌期

中试采用恒定流速、连续进水的自然挂膜方式 [7-8],选用的滤料是海砂,粒径为 $1.7 \sim 3.0 \text{ mm}$,球形度为 0.7 ,滤层高度为 1.83 m 。初始水温较高,适合培养菌群,未进行污泥接种,保持低滤速运行(平均滤速为 5 m/h),持续投加 30 mg/L 的甲醇作为碳源。10 月 17 日装置正式运行,11 月 6 日菌群培养成功,共历时 20 d ,培菌期平均水温为 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

此阶段进水硝态氮浓度在 $12.7 \sim 27.2 \text{ mg/L}$ 之间波动,幅度比较大,平均浓度为 17.5 mg/L 。初始硝态氮去除率仅在 22% 左右,自 11 月 6 日开始,去除率开始陡然攀升至 70% ,11 月 7 日 1[#]滤柱对硝态氮的去除率为 74.8% ,2[#]滤柱对硝态氮的去除率为 83.8% ,11 月 11 日两个滤柱对硝态氮的平均去除率达到了 63.4% ,去除率的持续升高说明滤床内反

硝化菌已成为优势种群,滤柱具备了反硝化功能。

值得注意的是,中试采取间歇运行方式,若连续运行,在温度适宜情况下,无需污泥接种,预计7~10 d即可培菌成功。

2.1.2 第1阶段运行期

运行期水温逐天下降,从22.5℃逐渐下降至15℃。滤柱采取低滤速(5 m/h)运行,持续投加碳源,两组滤柱做平行试验,运行结果见图2。

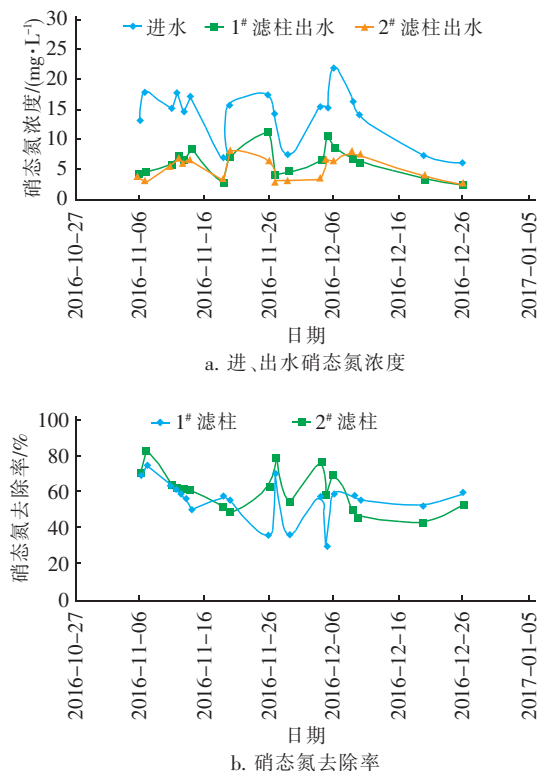


图2 第1阶段运行期的硝态氮浓度变化及其去除率

Fig. 2 Variation of nitrate nitrogen concentration and its removal rate

由图2(a)可以看出,进水硝态氮浓度波动较大,在6.8~22.1 mg/L之间,出水硝态氮基本在10.0 mg/L以下,平均为5.6 mg/L。1#滤柱出水硝态氮浓度稍微偏高,平均为6.2 mg/L,2#滤柱出水硝态氮平均浓度为5.1 mg/L。虽然进水硝态氮浓度波动较大,但出水硝态氮浓度却相对较为稳定,表明中试装置抗冲击负荷能力较强。

由图2(b)可以看出,1#滤柱对硝态氮的平均去除率为55.5%,进水水温在20℃以上时平均去除率为62.3%,进水水温在15~20℃之间时平均去除率为51.5%。2#滤柱对硝态氮的平均去除率为61.1%,进水水温在20℃以上时平均去除率为

70.2%,进水水温在15~20℃之间时平均去除率为58.0%。由此可见,水温对去除率的影响比较大^[9-10]。这是因为低温可减少生物处理系统中微生物数量,降低微生物酶的催化反应速率,影响基质的扩散速率,限制微生物的活性,从而影响生物处理系统对污染物质尤其是含氮物质的降解。研究表明:硝化细菌最适宜的生长温度为25~30℃,当温度<15℃时硝化速率明显下降^[9,11-13];反硝化作用的适宜温度为20~35℃,当温度<15℃时,反硝化速率明显下降,从而导致脱氮效果显著下降。

另外,由于进、出水硝态氮浓度不能实时测定,只能上午、下午取混合样每天测定1次,导致碳源投加量不能随进、出水硝态氮浓度实时调整,每天投加的碳源量依据前一天的进、出水硝态氮浓度进行确定,这也间接导致了硝态氮去除率偏低^[5]。

2.2 第2阶段对硝态氮的去除效果

中试第2阶段起止时间为2017年5月5日—9月17日,此阶段水温在21~29.5℃之间。

2.2.1 第2阶段培菌期

第2阶段从2017年5月5日开始运行,到5月16日硝态氮去除率开始大于50%,并开始持续上升,此时认为培菌成功。此次培菌水温与第1阶段基本相同,在21~25℃之间,平均为23.6℃,未进行污泥接种,滤速为5 m/h,持续投加适量的甲醇作为碳源。此阶段1#和2#滤柱对硝态氮的初始去除率平均为30%左右,从5月16日去除率开始陡然攀升至53.8%,经历周末两天的停止运行后,5月19日去除率为54.1%,5月21日去除率为68.6%,硝态氮去除率的保持和升高说明滤料表层已经形成生物膜,滤柱具备了反硝化功能。

2.2.2 第2阶段运行期

在第2阶段,5月16日—8月15日采取白天8 h间歇人工运行,8月18日—29日采取白天8 h自动运行,9月1日—17日采取24 h全自动运行。在第2阶段运行期,设置不同的滤速,考察滤柱在5~15 m/h滤速下对硝态氮的去除情况。

首先考察滤速均为5 m/h时,1#滤柱和2#滤柱对硝态氮的去除情况,结果如图3所示。从图3(a)可以看到,此阶段进水硝态氮浓度不高,在10.0~20.0 mg/L之间,通过投加适量的碳源可控制出水硝态氮浓度低于10.0 mg/L。后期当进水硝态氮浓度低于15.0 mg/L时,通过投加适量的碳源可以将

出水硝态氮浓度控制在 5.0 mg/L 以下。从图 3(b) 可以看出,此阶段中,当进水硝态氮浓度在 15.0 mg/L 以上时,1[#]滤柱对硝态氮的平均去除率为 55.4%,2[#]滤柱对硝态氮的平均去除率为 56.1%。当进水硝态氮浓度在 15.0 mg/L 以下时,1[#]滤柱对硝态氮的平均去除率为 75.4%,2[#]滤柱对硝态氮的平均去除率为 76.3%。

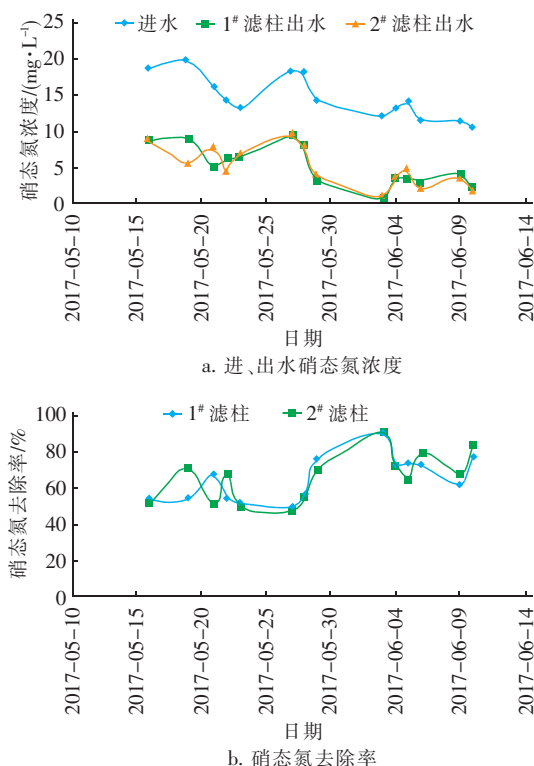


图3 1[#]和2[#]滤柱的滤速均为5 m/h时硝态氮的去除效果

Fig. 3 Nitrate nitrogen removal of 1[#] and 2[#] filter column at filtration rate of 5 m/h

由于每天污水厂进水硝态氮浓度不稳定,而碳源投加量是根据前一天的进水硝态氮来确定的,有一定的滞后性,当进水硝态氮浓度突然升高时,依据前一天的进水硝态氮浓度确定的碳源投加量必定会偏少,满足不了去除增加的硝态氮的要求,从而导致对硝态氮的去除率偏低^[5]。根据每天实际投加的碳源计算理论去除率,得到1[#]滤柱对硝态氮的实际去除率比理论去除率平均低了15.7%,2[#]滤柱的实际去除率比理论去除率平均低了13.5%。可见,由于实际运行中其他因素也消耗一部分碳源,导致实际去除率较理论去除率低。但碳源投加过量也并不能完全去除硝态氮,反而会导致出水COD增加。因此,碳源投加要适量,控制出水硝态氮在设定值以下

即可,同时要保证出水COD仍然符合排放标准。

由图3还可知,两个滤柱对硝态氮的去除效果有很好的-致性,因此后续试验中两个滤柱采用不同的硝态氮负荷进行并列试验。

将1[#]滤柱滤速调整为6 m/h,2[#]滤柱滤速调整为7 m/h。此段时间中试装置进水硝态氮浓度偏高且不稳定,除最开始两天外,其余时间进水浓度均超过15.0 mg/L,最高达到32.8 mg/L,平均为22.4 mg/L。试验周期为36 d,进水硝态氮浓度超过20.0 mg/L的时间达到24 d,占到2/3。试验结果见图4。

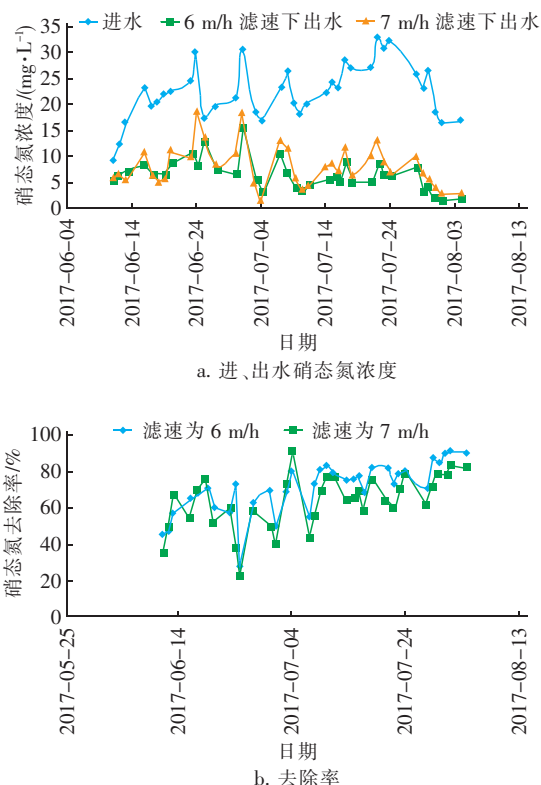


图4 滤速分别为6、7 m/h时硝态氮的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of nitrate nitrogen at filtration rate of 6 m/h and 7 m/h

从图4(a)可知,当滤速为6 m/h(正常设计负荷)时,中试初期,当进水硝态氮异常升至30.0 mg/L及以上时,碳源投加量偏低,导致出水硝态氮浓度会升至10.0 mg/L以上,后期当进水硝态氮浓度在25.0~32.8 mg/L之间波动时,及时增加了碳源投加量,可以很好地将出水硝态氮浓度控制在10.0 mg/L以下,平均值为6.3 mg/L。当滤速为7 m/h(略高于设计负荷)时,36 d试验中有11 d出水硝态氮浓度超过10.0 mg/L,基本均超过滤速为6 m/h时的出水硝态氮,出水硝态氮平均为8.1 mg/L。

从图4(b)可以看出,当滤速为6 m/h时,对硝态氮的平均去除率为70.8%,滤速为7 m/h时平均去除率为64.0%。

将1[#]、2[#]滤柱的滤速再分别调整为8、9、10、11、12、13、15 m/h,每种滤速运行3~6 d不等,模拟滤池经历反冲洗或者进水异常(大于设计负荷)时硝态氮的去除情况。结果表明,滤柱具有良好的抗冲击能力。滤速在9~15 m/h之间时,对硝态氮的去除率在60%左右波动,平均值为61.0%,其中滤速为8 m/h时平均去除率能达到74.8%。

此试验周期内的进水硝态氮浓度并不低,在15.8~34.5 mg/L之间波动,平均为24.7 mg/L。在各种滤速下出水硝态氮均值基本在12.0 mg/L以下,平均为10.0 mg/L。此阶段进水水温在25~29.5℃之间,平均为27.7℃,所以在冲击负荷下仍能取得平均为61%的高去除率除了与碳源投加充足有关,也与试验期间水温较高有关。

因间歇运行不能完全模拟水厂正常的运行状态,故9月1日—17日,中试装置全天24 h运行(因为碳源投加问题,周末不运行)。滤速分别为5、6、7、8、9、10 m/h,每个滤速运行3~5 d,取平均值进行数据分析。此阶段进水水温比较稳定,在25~27℃之间,平均温度为26℃。进水硝态氮浓度为25.2~31.2 mg/L,波动幅度不大,使得碳源投加比较稳定,运行期间反硝化所需碳源比较充足。结果表明,以滤速为5~10 m/h运行时,随着滤速的增加,在滤床内停留时间缩短,出水硝态氮的平均浓度逐渐增加。滤速为5 m/h时对硝态氮的平均去除率可以达到79.3%,滤速为8 m/h时平均去除率为70.9%。

3 结论

① 中试分别在5月份和10月份进行了两次培菌,平均进水水温为23℃,历时20 d培菌成功。中试采取间歇运行方式(白天运行8 h),若连续运行,在温度适宜情况下,无需污泥接种,给予适当碳源,预计7~10 d即可培菌成功。

② 中试冬季运行期间水温从22.5℃逐渐下降至15℃,滤柱采取低滤速(5 m/h)运行,持续投加碳源,进水硝态氮浓度在6.8~22.1 mg/L之间,中试出水硝态氮浓度基本在10.0 mg/L以下,平均为5.6 mg/L。夏季因水温较高,硝态氮去除效果良好,滤速小于8 m/h时,出水硝态氮浓度均在10.0 mg/L以下;即使滤速高达9~15 m/h,对硝态氮的

平均去除率仍可达到61%,说明滤柱可适应冲击负荷。因夏季污水厂生化处理出水的氨氮浓度很低,基本在1.0 mg/L以下,因此即使在高滤速、高进水硝态氮的情况下,出水TN仍可达到一级A标准。

参考文献:

- [1] 栾晓男,田云飞,郑力,等. 丝瓜络填料反硝化滤池对生活污水的净化[J]. 环境工程学报,2016,10(7): 3471-3476.
Luan Xiaonan, Tian Yunfei, Zheng Li, et al. Sewage purification by loofah denitrification filler[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3471-3476(in Chinese).
- [2] Dong W Y, Zhang X B, Wang H J, et al. Enhanced denitrification with external carbon sources in a biological anoxic filter[J]. Water Sci Technol, 2012, 66(10): 2243-2250.
- [3] Chen F Y, Liu Y Q, Tay J H, et al. Alternating anoxic/oxic condition combined with step-feeding mode for nitrogen removal in granular sequencing batch reactors (GSBRs)[J]. Sep Purif Technol, 2013, 105(5): 63-68.
- [4] Parastar S, Nasser S, Borji S H, et al. Application of Ag-doped TiO₂ nanoparticle prepared by photodeposition method for nitrate photocatalytic removal from aqueous solutions[J]. Desalination and Water Treatment, 2013, 51(37/39): 7137-7144.
- [5] 石东,丁磊,董良飞. 反硝化生物滤池脱氮的中试研究[J]. 中国给水排水,2017,33(1): 43-47.
Shi Dong, Ding Lei, Dong Liangfei. Pilot study on denitrification biofilter for nitrogen removal[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(1): 43-47(in Chinese).
- [6] 李新凯,郑春华. 双层填料反硝化深床滤池脱氮的研究[J]. 中国给水排水,2017,33(7): 94-96.
Li Xinkai, Zheng Chunhua. Denitrification of dual packing denitrification deep bed filter[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(7): 94-96(in Chinese).
- [7] 周永刚. 反硝化生物滤池在污水厂升级改造中的应用[J]. 中国给水排水,2014,30(24): 49-52.
Zhou Yonggang. Application of denitrification biofilter in upgrading of sewage treatment plants[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(24): 49-52(in Chinese).
- [8] 韩剑宏,刘燕,朱浩君,等. 反硝化生物滤池的自然挂膜启动研究[J]. 中国给水排水,2015,31(3): 1-4.
Han Jianhong, Liu Yan, Zhu Haojun, et al. Biofilm

- formation and startup in denitrification biofilter [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (3): 1 - 4 (in Chinese).
- [9] Randall C W, Buth D. Nitrite build-up in activated sludge resulting from temperature effects [J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1984, 56(9): 1039 - 1044.
- [10] 胡友彪, 张文涛, 黄州满. 温度对 MBBR 和 A/O 工艺中污染物去除效果的比较 [J]. 环境科学与技术, 2012, 35(2): 178 - 181.
- Hu Youbiao, Zhang Wentao, Huang Zhouman. Comparison of effect of temperature on MBBR and A/O process for sewage treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(2): 178 - 181 (in Chinese).
- [11] Head M A, Oleszkiewicz J A. Bioaugmentation for nitrification at cold temperatures [J]. Water Res, 2004, 38(3): 523 - 530.
- [12] Mauret M, Paul E, Puech-Costes E, et al. Application of experimental research methodology to the study of nitrification in mixed culture [J]. Water Sci Technol, 1996, 34(1/2): 245 - 252.
- [13] 游佳, 吴金香, 郑兴灿. A²/O 型氧化沟工艺中硝化速率的变化特征研究 [J]. 中国给水排水, 2011, 27

(19): 75 - 77.

You Jia, Wu Jinxiang, Zheng Xingcan. Study on variation characteristic of nitrification rate of activated sludge in A²/O type oxidation ditch process [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27 (19): 75 - 77 (in Chinese).



作者简介: 吴正双(1993 -), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 研究方向为工业水处理技术。

E-mail: wzshhu@qq.com

收稿日期: 2018 - 07 - 12

(上接第 54 页)

- precursors of DBPs during three advanced water treatment processes including ultrafiltration, biofiltration, and ozonation [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(16): 16641 - 16652.
- [15] 吉立, 刘晶, 李志威, 等. 2011—2015 年我国水污染事件及原因分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(9): 775 - 782.
- Ji Li, Liu Jing, Li Zhiwei, et al. Accidents of water pollution in China in 2011 - 2015 and their causes [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(9): 775 - 782 (in Chinese).
- [16] 陈锋, 孟凡生, 王业耀, 等. 地表水环境污染物受体模型源解析研究与应用进展 [J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 32 - 37.
- Chen Feng, Meng Fansheng, Wang Yeyao, et al. Research and application progress of source apportionment in receptor model for surface water pollutant [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14 (2): 32 - 37 (in Chinese).
- [17] 赵晶, 赵和平, 许良峰, 等. 复合人工湿地对水源库区水质净化效果分析 [J]. 环境工程学报, 2013, 7

(12): 4816 - 4822.

Zhao Jing, Zhao Heping, Xu Liangfeng, et al. Analysis of water purification efficiency of integrated constructed wetland in drinking water supply reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7 (12): 4816 - 4822 (in Chinese).



作者简介: 张孝忠(1992 -), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: 1403691909@qq.com

收稿日期: 2018 - 07 - 12