

反硝化生物膜滤池脱氮影响因素分析

蒋柱武¹, 张仲航², 陈礼洪¹, 魏忠庆³, 颜丽红¹, 王 晟¹,
郭娜妹¹, 武江南¹

(1. 福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350018; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 3. 福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

摘 要: 采用反硝化生物膜滤池(DNBF)模拟装置处理城市污水厂的出水,并分析脱氮效能。在水温为14.3~22.8℃、pH值为6.7~7.4的条件下,通过单因素试验和正交试验,考察C/N值、温度、HRT、DO等因素对反硝化生物膜滤池脱氮效果的影响。试验结果表明,C/N值由0.89上升到12.46过程中,COD去除率呈现先上升后下降的变化趋势,且在C/N值为5.91时COD去除率达到最大;TN和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率分别在C/N值为5.04和3.65时达到最高。当C/N值 ≤ 3.65 时,碳源不足导致TN去除率较低和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的累积;当C/N值 ≥ 5.91 时,碳源过量条件下,TN去除率未明显下降,DNBF脱氮率仍高达96%。当平均水温由22℃(夏季)降低至15℃(冬季)时,平均脱氮率由96%降低至83%。正交试验结果表明,对于COD、TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率而言,HRT的极差均最大,即HRT是DNBF脱氮性能的主要影响因素。

关键词: 生物膜滤池; 脱氮; 反硝化; 影响因素

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)07-0101-06

Analysis of Influencing Factors of Nitrogen Removal in a Denitrification Biological Filter

JIANG Zhu-wu¹, ZHANG Zhong-hang², CHEN Li-hong¹, WEI Zhong-qing³,
YAN Li-hong¹, WANG Sheng¹, GUO Na-mei¹, WU Jiang-nan¹

(1. School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350018, China; 2. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 3. Fuzhou City Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: The effluent from a municipal wastewater treatment plant was treated by a simulated denitrification biological filter (DNBF), and the nitrogen removal efficiency was analyzed. The influences of C/N ratio, temperature, hydraulic retention time (HRT) and dissolved oxygen (DO) on denitrification were investigated through single factor test and orthogonal test when the water temperature and pH were 14.3–22.8℃ and 6.7–7.4. The results showed that the COD removal rate increased first and then decreased when the C/N ratio increased from 0.89 to 12.46, and the maximum COD removal rate was detected when the C/N ratio was 5.91. The removal rates of TN and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ were the highest when the C/N ratio was 5.04 and 3.65, respectively. When the C/N ratio was no more than

3.65, the low TN removal rate and the accumulation of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ was observed due to the lack of carbon source. However, the removal rate of TN did not decrease significantly due to excessive carbon source when the C/N ratio was no less than 5.91, and the nitrogen removal rate of DMBF was still 96%. The average removal rate of nitrogen decreased from 96% to 83% when the average water temperature decreased from 22 °C in summer to 15 °C in winter. Results of the orthogonal test indicated that the range of HRT of COD, TN and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ removal rates was always the largest, which further proved that HRT was the main influencing factor of nitrogen removal in the DMBF.

Key words: biological filter; nitrogen removal; denitrification; influencing factor

目前我国大多数城市污水处理厂出水 TN 浓度均偏高^[1],不能全面达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 要求。因此,进一步去除城市污水厂出水中的 TN 是传统活性污泥法面临的挑战^[2]。反硝化生物膜滤池(DMBF)因占地面积省、水力负荷大、相对投资少、对城市污水厂出水 TN 的去除效果好等优点,已成为城市污水深度处理领域研究和应用的热点^[3]。目前,国内外学者对反硝化生物膜滤池的碳源类型、C/N 值和 HRT 等影响因素^[4]的研究较多。但采用单因素试验法无法揭示多因素交互作用下可能的最佳 C/N 值和 HRT,而正交试验是以最优的因素组合和最佳试验结果为目标的方法,具有效率高、准确、经济等优点^[5]。

因此,笔者以城市污水处理厂出水总氮为主要去除目标,以乙酸钠作为外加碳源,采用单因素试验和正交试验分析不同 C/N 值下反硝化生物膜滤池的脱氮效能,并确定多因素交互作用下的最佳 C/N 值和 HRT,以期优化反硝化生物膜滤池的工艺参数,旨在为反硝化生物膜滤池脱氮的工程设计和应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

反硝化生物反应器的材质为有机玻璃,该反应器由两根串联运行的滤柱组成,其外形尺寸均为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 1\,200 \text{ mm}$ (见图1)。第1根滤柱(一柱)和第2根滤柱(二柱)分别采用上向流和下向流的方式运行。进水区高度为 150 mm,内部设有进水管、反冲洗气管和反冲洗水管,管路上分别安装了气、水流量计。滤柱内填充轻质陶粒滤料,单柱滤料层厚度为 700 mm,滤层空隙率为 27%,滤层容积为 1.377 L。实际工程中,反硝化生物滤池水力负荷一般为 $115.2 \sim 184.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,HRT 为 0.28 ~

0.38 h,滤料层厚度为 $1.83 \sim 2.44 \text{ m}$ ^[6-7]。有研究发现,反硝化生物膜滤池高效脱氮段较短,其沿水流方向主要集中在滤层 0 ~ 200 mm^[8]或 0 ~ 600 mm^[9]范围内。因此,本试验以 600 mm 高效段为基础,增加 100 mm 的耐水质冲击负荷高度,将滤层厚度设计为 700 mm。进水区与滤料区用滤板隔开,滤板上均匀布置 9 个 5 mm 的滤孔。以滤板为起点在滤柱壁 300 和 600 mm 处各设一个取样口。滤柱顶端设置三角溢流口,出水流入排水槽。

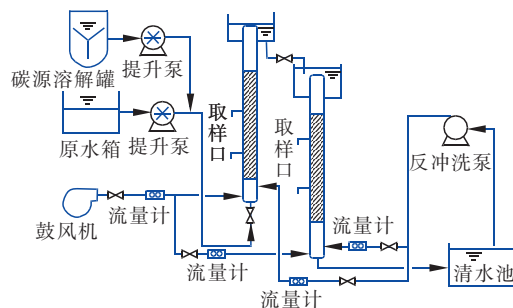


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of test device

1.2 原水水质

本试验以城市污水经 SBR 工艺处理后的出水作为原水。具体水质如下:COD、TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、氨氮、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、DO 浓度分别为 7.0 ~ 29.5、11.8 ~ 26.7、11.4 ~ 24.3、0.2 ~ 0.3、0 ~ 2.5、3.4 ~ 7.2 mg/L,平均值分别为 13.9、20.4、20.2、0.2、0.5、5.3 mg/L;pH 值为 6.7 ~ 7.4,平均值为 7.1;温度为 14.3 ~ 22.8 °C,平均值为 20.3 °C。

1.3 检测项目及方法

COD 采用快速消解分光光度法测定, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用酚二磺酸分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定,TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,pH 值采用 pH 计测定,溶解

氧采用便携式溶解氧仪测定。

2 结果与分析

2.1 C/N 值对污染物去除效果的影响

在 HRT 为 0.7 h 的条件下,分析 C/N 值(0.89、1.37、3.10、3.19、3.65、4.27、5.04、5.91、6.84、7.48、8.24、9.81、11.82 和 12.46)对 DNBF 工艺脱氮效能的影响,每个 C/N 值下运行 4 d,试验数据取平均值,结果如图 2 所示。可知,C/N 值对 COD、TN、 NO_3^- -N 去除率的影响可以分为 3 个阶段(I、II、III),各阶段 C/N 值依次为 0.89~3.65、4.27~5.91 和 6.84~12.46。

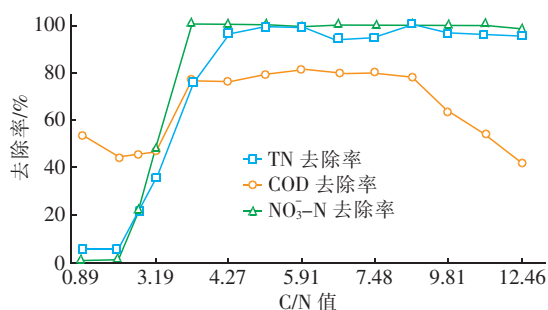


图2 不同 C/N 值条件下 COD、TN、 NO_3^- -N 去除率的变化

Fig.2 Removal rates of COD, TN and NO_3^- -N at different C/N ratios

第 I 阶段:由图 2 可知,随着 C/N 值增加,TN 和 NO_3^- -N 的平均去除率呈上升趋势,分别由 5% 和零上升到 76% 和 100%,说明 DNBF 系统内微生物发生了反硝化作用。同时发现,原水在经过一柱后出水 pH 值均出现升高现象,而 DO 则明显降低,DO 平均值为 0.57 mg/L,满足反硝化反应条件,见图 3(a)。 NO_2^- -N 出现累积现象,且随着 C/N 值增加,累积现象越明显,并在 C/N 值为 3.65 时累积量达到最高值 4.59 mg/L,说明此阶段由于碳源不足,导致反硝化不彻底。当 C/N 值由 3.65 上升到 4.27 时, NO_2^- -N 累积现象开始缓解,降低到 1.98 mg/L,但 NO_2^- -N 的累积仍然表明碳源不足。

第 II 阶段:随着 C/N 值增加,一柱出水亚硝态氮浓度呈降低趋势,如图 3(b) 所示。在 C/N 值由 4.27 增加到 5.91 过程中, NO_2^- -N 浓度由 1.98 mg/L 逐渐降低至 0.22 mg/L,相比第 I 阶段 C/N 值为 3.19 和 3.65 时 NO_2^- -N 浓度降低明显。第 II 阶段 TN 和 NO_3^- -N 的去除率变化比较稳定,平均去除率分别为 96% 和 99%。COD 的去除率由 76% 升

高至 81%,变化较小。一柱出水 pH 值由 8.86 升高至 9.34。 TN 、 NO_3^- -N 和 COD 去除率上升是因为 DNBF 系统内陶粒滤料的微孔结构形成了缺氧环境,抑制了好氧异养菌的生长繁殖及活性;同时充足的碳源为反硝化细菌提供电子供体,使 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 在缺氧区完成脱氮。第 I 阶段,碳源不足导致了 NO_2^- -N 累积,且 TN 去除率较低。而在第 II 阶段,碳源充足, NO_2^- -N 累积现象消失,且 TN 平均去除率达到 96%,证明碳源不足是引起 TN 去除率不高和 NO_2^- -N 累积的主要原因。

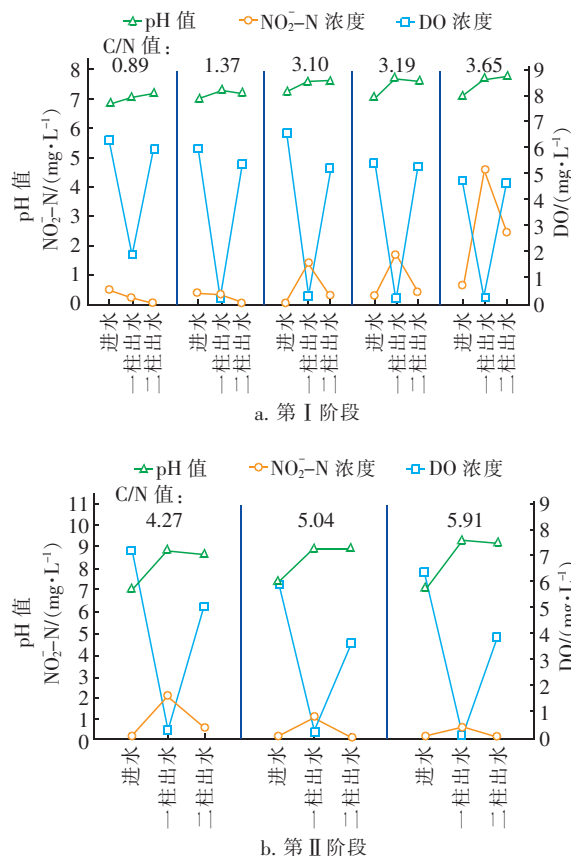


图3 第 I、II 阶段 pH 值、DO 和 NO_2^- -N 的沿程变化

Fig.3 Variation of pH, DO and NO_2^- -N concentration at different C/N ratios

第 III 阶段:当 C/N 值由 6.84 增加至 12.46 时,COD 去除率由 80% 降低至 42%。 TN 和 NO_3^- -N 去除率却没有明显的变化,平均去除率分别为 96% 和 99%。针对 COD 去除率明显下降而 NO_3^- -N 和 TN 去除率无明显变化的现象,分析其原因:理论上去除一定浓度的氮所需要的碳源是固定的,随着进水 C/N 值的增加,需要脱除的氮的比例越来越小,因此 COD 的去除率大幅降低;但过量的碳源并未对

TN 的去除产生明显影响,主要是因为陶粒滤料表面及内部具有许多微孔结构,阻碍了溶解氧的传递,抑制了好氧异养菌的生长,对反硝化系统起到了保护作用。所以,对于 DNBf 系统而言,过高的 C/N 值不会引起 TN 去除率降低,这与崔延瑞等^[10]的研究结果一致。

综上所述,当 HRT 为 0.7 h、C/N 值为 5.04 和 5.91 时,TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率均较高,且 COD 去除率和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积量总体相差不大,从经济可行性方面考虑,最适 C/N 值确定为 5.04,这与李文龙等^[11]确定的最佳 C/N 值为 5 相近,此时 DNBf 系统对 TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率分别为 96% 和 99%,COD 去除率为 81%。

2.2 水温对污染物去除效果的影响

在 C/N 值为 5.04、HRT 为 0.7 h 的条件下,分析夏季(平均水温为 22 ℃)和冬季(平均水温为 15 ℃)时 DNBf 系统对 TN 和 COD 的去除效果,如图 4 所示。

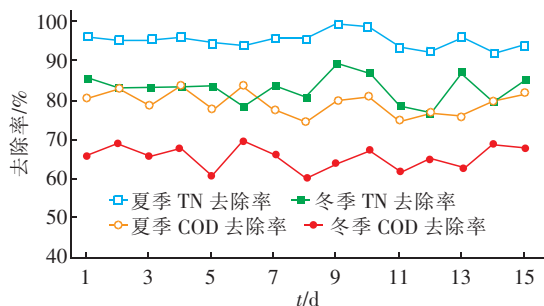


图4 夏季和冬季时 TN 和 COD 去除率的变化

Fig. 4 Change of removal rates of TN and COD in summer and winter

由图 4 可以看出,夏季时 DNBf 系统对 TN 和 COD 的去除率均高于冬季,TN 平均去除率在夏季时为 96%,冬季则降低至 83%,下降了 13%。COD 平均去除率由夏季时的 81% 下降至冬季时的 65%。分析原因,反硝化细菌对温度比较敏感,张焕杰等^[12]认为,反硝化细菌在 20~40 ℃ 时活性较高,当水温降低至 15 ℃ 时,导致反硝化细菌体内的酶活性受到抑制,限制了反硝化过程,从而降低了 TN 和 COD 的去除率。

2.3 正交试验

根据 2.1 节可知,在第 II 阶段中 COD、TN 和硝态氮的去除率变化较小,为了更好地确定最佳 C/N 值并探究 HRT 和 DO 对污染物去除效果的影响,采用正交试验进行分析。

试验因素选定为 HRT(A)、C/N 值(B)和 DO(C),选用 $L_9(3^3)$ 正交表(见表 1),分析结果如表 2 所示。

表1 正交试验设计

Tab. 1 Design of orthogonal test

序号	HRT/h	C/N 值	DO/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除率/%		
				COD	TN	$\text{NO}_3^- - \text{N}$
1	0.7	4.27	5.5~6.0	76	95	99
2	0.7	5.04	5.0~5.5	78	96	100
3	0.7	5.91	4.5~5.0	78	96	99
4	0.47	4.27	5.0~5.5	83	71	86
5	0.47	5.04	4.5~5.0	80	80	87
6	0.47	5.91	5.5~6.0	82	96	100
7	0.35	4.27	4.5~5.0	53	70	95
8	0.35	5.04	5.5~6.0	63	73	99
9	0.35	5.91	5.0~5.5	61	73	98

表2 直观分析结果

Tab. 2 Calculation results of visual analysis

项 目	COD 去除率			TN 去除率			$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
均值 1/%	77.33	70.67	74.00	95.67	78.67	80.00	99.33	93.33	94.67
均值 2/%	81.67	73.67	73.67	82.33	83.00	88.00	91.00	95.33	99.33
均值 3/%	59.00	73.67	70.33	72.00	88.33	82.00	97.33	99.00	93.67
极差/%	22.67	3.00	3.67	23.67	9.67	8.00	8.33	5.67	5.67
最优水平	A2	B2	C1	A1	B3	C2	A1	B3	C2

由表 2 可知,对于 COD、TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率而言,HRT 的极差均最大,说明 HRT 对 DNBf 系统的处理效果具有决定性作用,是去除有机物和脱氮的主要影响因素。同时还可以看出,当 HRT 由 0.35 h 延长至 0.7 h 时(均值 3 至均值 1 各污染物

去除率中 A 的变化),COD 平均去除率由 59.00% 增加至 77.33%,TN 平均去除率由 72.00% 增加至 95.67%, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均去除率由 97.33% 增加至 99.33%,可见 DNBf 系统对污染物的去除效果随 HRT 的延长而提高,与文献[13]的结果一致。分析

原因,一方面延长 HRT 后,滤速降低,水流紊动剪切作用造成滤料上生物膜大量脱落的现象减少,水中污染物被微生物及时处理后流出反应系统,使反硝化作用顺利进行,脱氮率上升;另一方面,滤速的降低缓解了滤池中 DO 浓度过大的现象,有利于生物反硝化脱氮作用。

试验还分析了 HRT 对 COD 去除率和 TN 去除率的影响,结果表明在 HRT 由 0.7 h 延长至 1.4 h 过程中,当 C/N 值分别为 4.27 和 5.04 时,COD 去除率均呈上升趋势,COD 平均去除率分别提高 5.7% 和 1.3%。当 C/N 值为 5.91 时,COD 平均去除率下降了 8.4%。另外,当 C/N 值分别为 4.27、5.04 和 5.91 时,TN 去除率均呈现下降趋势,分别下降了 6.0%、22.7% 和 25.4%。上述现象说明,延长 HRT 对提高污染物的去除率不一定有利,这与苑泉等^[14]的结论相同。当 HRT 为 0.7 h 时,出水 COD < 23 mg/L、TN < 3.7 mg/L,远低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准限值。

综上所述,该试验最适 HRT 为 0.7 h。在该 HRT 条件下,当 C/N 值为 5.04 和 5.91 时,对 COD 和 TN 的去除率差别不大,从经济可行性考虑,确定最适 C/N 值为 5.04。

分析各项评价指标的次要影响因素,从表 2 还可以看出,对 COD 去除率的次要影响因素为 DO,对 TN 去除率的次要影响因素为 C/N 值,C/N 值和 DO 对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率的极差相等,说明两者对硝态氮去除率的影响程度相同。因此,DO 和 C/N 值对各项评价指标没有明显一致的影响趋势,均不能作为次要影响因素。

3 结论

① 当 C/N 值 ≤ 3.65 时,碳源不足造成 TN 去除率不高,使 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积;当 C/N 值 ≥ 5.91 时,碳源过量,反硝化生物膜滤池中滤料表面微孔结构对反硝化作用具有保护作用,TN 去除率没有明显下降,DNBF 系统对 TN 的去除率为 96%。

② 水温对 DNBF 系统的脱氮性能有明显影响,平均水温由 22 ℃ (夏季)下降至 15 ℃ (冬季)时,DNBF 系统的 TN 平均去除率由 96% 下降至 83%,COD 平均去除率由 81% 下降至 65%。

③ 正交试验结果表明,对于 COD、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN 去除率而言,HRT 的极差均最大,即 HRT 是

DNBF 脱氮性能的主要影响因素。

④ 综合分析经济成本和试验结果,本试验采用反硝化生物膜滤池处理二级出水,在最佳 C/N 值为 5.04、最佳 HRT 为 0.7 h 条件下,出水 TN 浓度低于 3.7 mg/L,远低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 排放限值。

参考文献:

- [1] 李金波,陶虎春,李绍峰. BAC - FB 与传统活性污泥法处理生活污水的对比研究[J]. 东北农业大学学报,2010,41(4):59-63.
Li Jinbo, Tao Huchun, Li Shaofeng. Comparative study on biological activated carbon fluidized bed and conventional activated sludge treating domestic sewage [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(4):59-63 (in Chinese).
- [2] 邹高龙,张健君,杨淑芳,等. 传统活性污泥法新增脱氮除磷功能的成功改造实例[J]. 中国给水排水,2014,30(6):81-84.
Zou Gaolong, Zhang Jianjun, Yang Shufang, et al. Reconstruction of traditional activated sludge process by adding nitrogen and phosphorus removal function [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(6):81-84 (in Chinese).
- [3] 高建锋,杨碧印,赵建树,等. 反硝化生物滤池用于再生水脱氮效能及动力学研究[J]. 环境工程学报,2016,10(1):199-204.
Gao Jianfeng, Yang Biyin, Zhao Jianshu, et al. Nitrogen removal and denitrification kinetics of denitrification biological filter for reclaimed water treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1):199-204 (in Chinese).
- [4] 孙迎雪,胡银翠,孙云祥,等. 反硝化生物滤池深度脱氮机理[J]. 环境工程学报,2012,6(6):1857-1862.
Sun Yingxue, Hu Yincui, Sun Yunxiang, et al. Denitrification biological filter as tertiary treatment for nitrogen removal [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(6):1857-1862 (in Chinese).
- [5] 张崑,王卫,张佳敏,等. 响应面法和正交试验对骨素酶解工艺优化的比较[J]. 食品研究与开发,2012,33(7):53-56.
Zhang Yin, Wang Wei, Zhang Jiamin, et al. Comparison of the optimized hydrolysis processing for bone extract obtain by orthogonal and response surface design experiments [J]. Food Research and Development,

- 2012,33(7):53-56(in Chinese).
- [6] 于跃,李渊博. A^2O 氧化沟-混凝沉淀-反硝化深床滤池工艺在大型经开区污水处理中的应用[J]. 工业用水与废水,2016,47(3):1-5.
Yu Yue, Li Yuanbo. Application of A^2O oxidation ditch-coagulation sedimentation-deep bed denitrification filter process in treatment of wastewater from large economic-technological development area[J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47(3):1-5(in Chinese).
- [7] 陈爱朝,王海峰,周继,等. 七格污水处理厂提标改造工程设计[J]. 中国给水排水,2016,32(24):118-121.
Chen Aichao, Wang Haifeng, Zhou Ji, et al. Design of upgrading and reconstruction project of Qige Wastewater Treatment Plant[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(24):118-121(in Chinese).
- [8] 杨碧印,李文龙,许仕荣,等. 不同外加碳源反硝化滤池的挂膜与启动特性研究[J]. 水处理技术,2015,41(4):104-107.
Yang Biyin, Li Wenlong, Xu Shirong, et al. Biofilm culturing and start-up properties of denitrification biological filter with different external carbon sources [J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(4):104-107(in Chinese).
- [9] 王波,梅峰,李旭宁,等. 反硝化生物滤池用于白酒废水深度脱氮处理研究[J]. 中国给水排水,2014,30(17):120-122,127.
Wang Bo, Mei Feng, Li Xuning, et al. Denitrifying biofilter for advanced nitrogen removal treatment of liquor wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(17):120-122,127(in Chinese).
- [10] 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,等. 生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响[J]. 环境科学,2016,37(11):4296-4301.
Cui Yanrui, Qiu Xin, Zhang Qingrong, et al. Influence of biological activated carbon on simultaneous nitrification and denitrification in inflow with different C/N ratios [J]. Environmental Science, 2016, 37(11):4296-4301(in Chinese).
- [11] 李文龙,杨碧印,陈益清,等. 不同外加碳源反硝化滤池的深度脱氮特性研究[J]. 水处理技术,2015,41(11):82-85.
Li Wenlong, Yang Biyin, Chen Yiqing, et al. Study on denitrification biological filter depth processing characteristics with different external carbon source[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(11):82-85(in Chinese).
- [12] 张焕杰,余璐,朱文颖,等. 固定化反硝化菌在低污染水处理中脱氮性能研究[J]. 生态环境学报,2016,25(5):857-863.
Zhang Huanjie, Yu Lu, Zhu Wenying, et al. Nitrogen removal characteristics of immobilized denitrifying bacteria for treatment of slightly-polluted water [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(5):857-863(in Chinese).
- [13] 石明岩,冯兆继,余建恒,等. 垃圾渗滤液与城市污水同步脱氮除碳正交试验[J]. 水处理技术,2010,36(9):69-72.
Shi Mingyan, Feng Zhaoji, Yu Jianheng, et al. Simultaneous nitrogen and carbon removal of landfill and urban wastewater by orthogonal experiment [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(9):69-72(in Chinese).
- [14] 苑泉,王海燕,刘凯,等. HRT 对城市污水厂尾水反硝化深度脱氮的影响[J]. 环境科学研究,2015,28(6):987-993.
Yuan Quan, Wang Haiyan, Liu Kai, et al. Effects of HRT on denitrification for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(6):987-993(in Chinese).



作者简介:蒋柱武(1975-),男,湖南永州人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为水污染控制与资源化。

E-mail:jiangzhuwu@126.com

收稿日期:2018-10-02