

流离球填料强化低温脱氮及填充率优化

王帆^{1,2}, 李军¹, 边德军², 王秀杰¹, 聂泽兵², 张莉²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 长春工程学院 吉林省城市污水处理重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 为探究低温条件下流离球填料的最佳内部填充率, 采用同一规格的流离球, 选取 18.3%、24.4%、30.5%、36.6%、42.7% 等 5 种内部填充率, 构建 SBBR 反应器, 并控制水温为 $(10 \pm 1)^\circ\text{C}$, 在外部填充率、曝气量、进水水质等都相同的条件下运行。结果表明, 投加内部填充率为 30.5% 及 36.6% 流离球填料的 SBBR 反应器对氮的去除效果较好, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及 TN 平均去除率分别达到了 65% 和 62% 以上, 同时两者的系统总生物量以及生物活性均相近。综合考虑资源节约以及降低能耗, 确定低温下流离球最佳内部填充率为 30.5%。

关键词: 流离球填料; 生物脱氮; 低温; 内部填充率优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)11-0009-06

Flow-separated Ball Filler for Enhanced Nitrogen Removal under Low Temperature and Its Internal Filling Rate Optimization

WANG Fan^{1,2}, LI Jun¹, BIAN De-jun², WANG Xiu-jie¹, NIE Ze-bing², ZHANG Li²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Jilin Key Laboratory of Urban Sewage Treatment, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to investigate the optimal internal filling rate of flow-separated ball filler under low temperature, the same size of flow-separated ball was used. Five internal filling rates of 18.3%, 24.4%, 30.5%, 36.6%, and 42.7% were selected. The SBBR reactor was constructed and the water temperature was controlled at $(10 \pm 1)^\circ\text{C}$. The operation was performed under the same conditions as the external filling rate, aeration rate, and influent quality. The results showed that the SBBR reactors with internal filling rates of 30.5% and 36.6% had better removal effect for $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN, and the average removal rates reached above 65% and 62%, respectively. At the same time, their total biomass and biological activity were similar. Considering resource conservation and reducing energy consumption, the optimal internal filling rate of the ball under low temperature was determined to be 30.5%.

Key words: flow-separated ball filler; biological nitrogen removal; low temperature; optimization of internal filling rate

生物处理工艺是当前城市污水处理厂应用最广泛的方法,但生物处理中的微生物对生存环境比较敏感,尤其易受温度变化的影响。我国北纬 40° 以上地区冰冻期长达3~6个月,此时的污水平均温度一般低于 10°C ^[1]。低温严重影响微生物的生长和活性,其中也包括了硝化细菌,这对脱氮非常不利,影响出水 NH_4^+-N 和TN浓度的达标^[2]。同时随着城市污水处理厂出水排放标准越来越严格,我国大多数污水厂都面临升级改造的问题^[3]。

由于污水厂在升级改造工程中受到原有生物池容积的限制,通常的做法是向生物池中投加悬浮填料^[4]。填料的加入,一方面能够提高系统的生物量,延长污泥停留时间,可以使低温弱势菌种硝化菌的浓度得到提高,进而促进硝化作用;另一方面,附着于填料表面的生物膜内部为厌氧或缺氧状态,可以进行反硝化作用^[5],因此可以达到强化生物脱氮的目的。

悬浮填料中较为常见的是流离球填料,它是利用流离的特点,将微生物分解加入到固液分离的过程中,从而使污水得到净化^[6]。流离球内部填充的有火山岩填料以及聚乙烯/聚氨酯组合填料等。本试验所进行优化的为内部填充柱状高密度聚乙烯材质的K3型填料以及立方体聚氨酯海绵填料的流离球。选择该种流离球填料进行优化的原因是柱状K3型填料具有良好的通气性和过水性、填料内部不易堵塞或结团等优点^[7];而聚氨酯填料孔隙率较高,能有效促进微生物固定化过程,更为重要的是,微生物能快速高效稳定地附着在聚氨酯填料表面,相比传统的填料更适宜微生物的附着生长^[8]。因此填充了上述两种填料的流离球在快速挂膜、成熟生物膜的通透性以及强化脱氮等方面更具优势。

当前有关流离球填料的报道多是处理生活污水以及工业废水等的研究^[9-11],但鲜见流离球内部填充率优化的报道。为此,选用同一规格的流离球,在保证两种填料的配比不变的前提下改变其内部填充率,并构建序批式生物膜反应器(SBBR),控制水温为 $(10 \pm 1)^{\circ}\text{C}$,进行小试研究。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图1所示,采用5个有效容积为5L的柱形反应器,分别向其中投加内部填充率不同的流离球填料,流离球内部填充的海绵填料和K3填

料的数量以及内部填充率的详细情况如表1所示。填充完毕后将反应器按内部填充率由小到大编为1~5号。

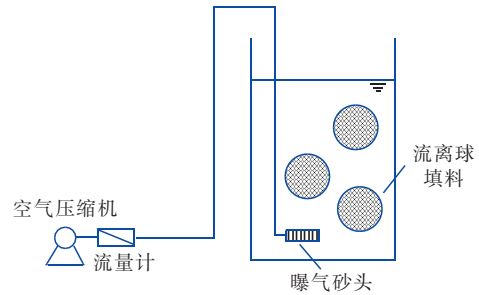


图1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBBR device

表1 5种流离球填料填充情况

Tab. 1 Filling scheme of five kinds of flow-separated ball fillers

反应器	海绵填料/个	K3 填料/个	内部填充率/%
1 号	3	3	18.3
2 号	4	4	24.4
3 号	5	5	30.5
4 号	6	6	36.6
5 号	7	7	42.7

各反应器外部填充率均为31.38%。海绵填料材质为亲水性聚氨酯,为边长30mm的立方体,密度为 $16 \sim 17 \text{ kg/m}^3$,比表面积为 $3.8 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{m}^3$;网泡内孔结构形式为多边形,大孔、小孔、微孔互穿共布。K3填料的材质为高密度聚乙烯,尺寸为 $\Phi 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,密度为 0.95 g/cm^3 ,比表面积 $> 560 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。流离球网罩尺寸为 $\Phi 100 \text{ mm}$,材质为聚丙烯。试验在低温控制室内运行,控制风机启停温度分别为 9.5°C 及 12°C ,实测水温为 $(10 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 。使用空气压缩机进行鼓风曝气,并以空气转子流量计对曝气量进行控制。

1.2 试验水质

运行期间配水水质见表2。

表2 配水水质

Tab. 2 Test water quality

项 目	范围	平均值
$\text{COD}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	165.5 ~ 206.2	180
$\text{TN}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	13.25 ~ 16.65	15
$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	9.86 ~ 13.18	12
$\text{NO}_3^--\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.97 ~ 4.45	3
$\text{TP}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.95 ~ 2.88	2.5
pH 值	6.98 ~ 7.53	7.13

试验用水为人工配制的模拟城市污水,配制前

需将存有自来水的储水桶放置在低温控制室内曝气2 h,避免自来水中残留的氯气以及水温对试验产生影响。配水所使用的药剂为葡萄糖、氯化铵、硝酸钾、磷酸二氢钾、碳酸氢钠,其中碳酸氢钠用于调节pH值。药剂均为分析纯,购自天津市光复科技发展有限公司。

1.3 分析检测方法

常规指标: COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP、SOUR、MLVSS等参照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定;pH值采用雷磁 PHSJ-4A 酸度计测定;溶解氧(DO)采用德国 WTW 的 Oxi3310 便携式溶解氧仪检测; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用离子色谱检测。

生物量的测定:随机选取一个流离球填料,拆开后将海绵及 K3 填料分别浸泡在超纯水中,洗去可逆附着成分,然后在 70~80 °C 条件下烘干 6 h,称得质量为 M_1 ;然后将填料置于 0.1 mol/L 的 NaOH 碱液中超声波洗脱 30 min,再机械剥离处理,用超纯水反复洗净,同样再次烘干 4 h,称得质量为 M_2 ; M_1 与 M_2 之差除以填料的个数即为单个海绵或 K3 填料上的生物量^[12]。将第 1 次烘干温度降低并延长烘干时间是由于 K3 型悬浮填料的材质为高密度聚乙烯塑料,长时间高温处理易变形分解。

脱氢酶活性(TTC):采用常温萃取法检测^[13]。

1.4 装置运行

本试验的目的是选取低温条件下流离球填料的内部填充率,因此需要保证除内部填充率外的其他条件均一致,包括曝气量、进水水质、运行周期以及水温等。全套装置均放置于低温控制室内,控制风机启停温度分别为 9.5 及 12 °C,实测水温为 (10 ± 1) °C。

试验开始时,用城市污水接种硝化细菌,即向装填完填料的 5 个反应器中分别倒入 5 L 城市污水,连续曝气 2 d 后开始换水。初期为加快挂膜,采用连续曝气,每隔 12 h 换水,排水比为 50%。经过 20 d 培养后,生物膜的颜色从浅黄色逐渐变为棕黄色,挂膜均匀,填料无裸露,可认为生物膜培养成功^[14]。反应器开始正式运行后,改变运行参数为曝气 10 h、闲置 2 h、隔 12 h 换水,采用完全置换的方式运行。两阶段的曝气量均控制在 0.2 L/min。正式运行期间每 3 d 选取 1 个周期的进出水进行检测,检测指标包括 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP,并定期检测水中悬浮物浓度。

2 结果与分析

2.1 对污染物的去除效果

2.1.1 对 COD 的去除效果

正式运行期间 1~5 号反应器出水 COD 分别为 (28.87 ± 4.92) 、 (29.99 ± 5.82) 、 (31.85 ± 8.51) 、 (30.12 ± 6.20) 、 (31.63 ± 7.80) mg/L,去除率分别为 $(83.88 \pm 2.89)\%$ 、 $(83.23 \pm 3.35)\%$ 、 $(82.29 \pm 4.39)\%$ 、 $(83.18 \pm 3.50)\%$ 、 $(82.46 \pm 3.70)\%$ 。经过 42 d 的运行,各反应器对 COD 的去除效果十分稳定,平均去除率都达到了 80% 以上,说明低温下各反应器中生物膜生长良好且都较为稳定。

2.1.2 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

图 2 给出了正式运行期间进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度以及各反应器的去除率。可以看出,3 号和 4 号反应器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率都达到了 65% 以上,说明这两个反应器对硝化菌的富集效果良好。从去除率上看,1 号及 5 号对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果明显要低于 3 号和 4 号反应器。

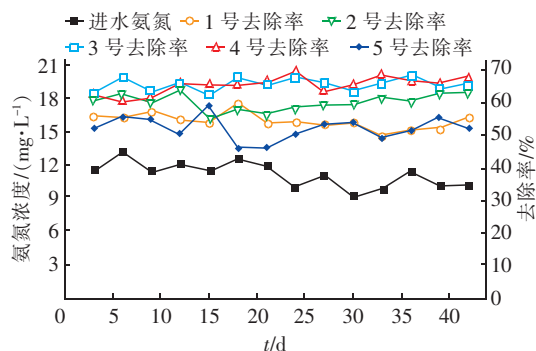


图 2 各反应器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ by each reactor

1 号反应器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果较差,分析原因是内部填充率低,系统为微生物提供生长的载体有限,导致其总体生物量少,致使硝化菌的浓度偏低。相关试验已证明,硝化反应进程与硝化菌的浓度呈正相关^[15],因此在低温条件下,保证硝化菌的浓度是系统能否顺利进行硝化反应乃至顺利脱氮的前提之一。

对于 5 号反应器,分析原因是在一定的曝气强度下,较高的内部填充率使流离球填料内部氧的转移效率偏低,从而使缺氧区域过大,最终使得硝化菌适宜生存的空间偏小,从而影响系统的硝化反应进程。需要说明的是对于海绵填料 DO 浓度梯度不仅仅限于生物膜中,其填料内部也存在 DO 浓度梯

度^[16]。2号在试验中期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率一直在缓慢上升,在试验结束前趋于稳定,但其去除率依旧不及3号和4号。因此,从 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果来看,流离球内部填充率既不能太低,也不能过高,最佳填充率应从3号和4号中选取。

2.1.3 对TN的去除效果

图3给出了正式运行期间进水TN浓度及各反应器对TN的去除率。可以看出,TN的去除规律与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 大体相同,不同的是TN在正式运行前期的去除率不如 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 稳定。从去除效果上看,同样是3号和4号的去除效果明显优于1号、2号和5号,分析原因是1号和5号由于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果较差影响了反硝化的进程,而2号虽然满足硝化要求,但其内部填充率偏低,导致缺氧区域不足。因此,从TN的去除效果来看,最佳内部填充率也应选取3号或4号的。

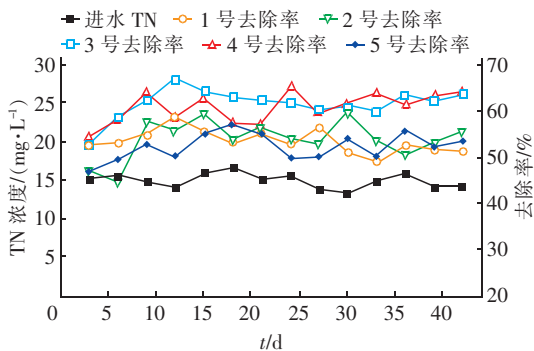


图3 各反应器对TN的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of TN by each reactor

2.1.4 对TP的去除效果

在正式运行期间1~5号反应器出水TP分别为 (1.58 ± 0.19) 、 (1.73 ± 0.27) 、 (1.72 ± 0.20) 、 (1.89 ± 0.21) 、 (1.93 ± 0.35) mg/L,去除率分别为 $(37.97 \pm 7.70)\%$ 、 $(31.96 \pm 10.17)\%$ 、 $(32.50 \pm 8.72)\%$ 、 $(25.45 \pm 11.65)\%$ 、 $(23.92 \pm 15.52)\%$ 。可见,系统对TP的去除效果较差,平均去除率在20%~40%之间。并且随着流离球内部填充率的增加,系统对TP的去除能力逐步降低。分析原因可能与生物膜老化及脱落快慢有关,相同条件下内部填充率越低,生物活性越高,生物膜新陈代谢快,吸收较多磷的生物膜老化脱落,同时新的生物膜生成,通过排除老化生物膜的方式,可以在一定程度上达到提高除磷效率的目的。另外,对水中悬浮固体的检测结果显示,1号的悬浮固体含量最高(如图4所

示),从一定程度上验证了上述说法。因此就TP的去除而言,1号的效果最好,同时3号的除磷效果优于4号。

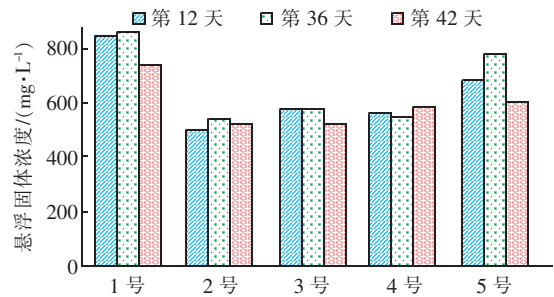


图4 悬浮固体检测结果

Fig.4 Suspended solids test results

2.2 生物膜分析

2.2.1 生物活性检测结果

选用比耗氧速率(SOUR)以及脱氢酶活性(TTC)两项指标来表征系统的生物活性,结果如图5所示。可以看出1号的SOUR及TTC值均最大,表明其生物膜活性最好,同时也印证了1号对COD去除效果稍好的结果。然而当前低温城市污水处理的难点并非在于有机物,而在于低温对硝化反应的影响以及低C/N值对反硝化的影响^[17]。此前的分析发现1号对硝化细菌的积累能力偏弱,而且活性偏高会在一定程度上加快对有机物的降解,这样会导致反硝化碳源不足问题更加严重。5号的SOUR及TTC值均最小,结合生物量的检测结果来看很可能是发生了老化生物膜的积累;同时由于内部填充率大,使得其氧传质效率降低,从而内部缺氧和厌氧微生物较多,这可能也是其活性偏低的原因之一。2号、3号、4号的生物活性检测结果则较为接近。

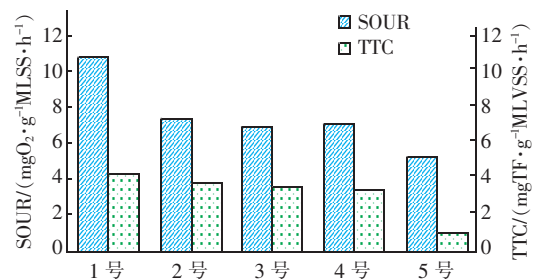


图5 SOUR、TTC检测结果

Fig.5 SOUR and TTC test results

2.2.2 生物量检测结果

经测定,1~5号反应器中的生物量分别为909、1072、1330、1383、2184 mg/L。尽管1号反应器中

的生物量最低,但是其单个海绵或 K3 填料上附着生长的生物膜相对来说却是最多的(见图6),分析原因是其内部填充率小,流离球内部较为松散,使得所有填料都能与污水充分接触,为生物膜的生长创造了良好的条件。然而在实际污水处理中重要的并非是单个填料的效果,而是整个系统共同作用的结果。依据之前的试验结果来看,1号反应器并非是最合适的选择。

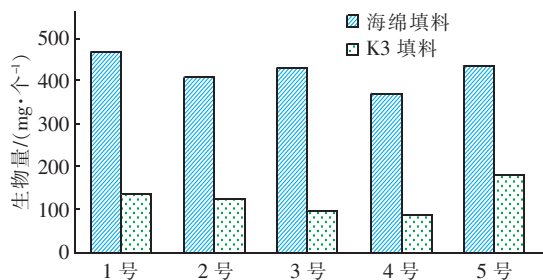


图6 单个填料上的生物量检测结果

Fig.6 Biomass detection results on individual filler

在试验条件下5号反应器的生物量最多,分析原因是其内部填充率最大,能够为微生物提供较大的附着面积;同时由于曝气量的限制导致5号容易出现老化生物膜积累的现象。而且运行至后期,5号的流离球旋转速度变缓,同时偶尔还发生沉底现象。旋转是流离球的一个重要特点,它可以使内置填料与污水充分接触,因此这种现象对于其处理污水十分不利。从1号至3号生物量均稳步增加,增幅分别为17.93%和24.07%,而从3号到4号填料数量增加了20%,生物量却仅增加3.98%,同时其处理能力基本相同。因此,无论是从生物膜系统处理效率上考虑还是从资源节约上考虑,都应选择3号,即在使用上述两种填料且它们个数比为1:1的前提下,流离球最佳内部填充率为30.5%。

3 结论

选取同一规格流离球,控制水温为 $(10 \pm 1)^\circ\text{C}$,并在各参数相同的条件下运行,当内部填充率为18.3%时生物活性虽高,但生物量不足,不能达到低温下对硝化菌的富集;内部填充率为42.7%时发生老化生物膜的积累,同时系统活性偏低;内部填充率为24.4%时虽然满足硝化的要求,但是反硝化效果较差;而内部填充率为30.5%、36.6%时,两者的污染物去除效果、系统总生物量以及生物活性均相差甚微。因此综合考虑资源的节约,确定低温下流离

球最佳内部填充率为30.5%。

参考文献:

- [1] 艾胜书,田曦,任之敏,等. 低温对城市污水处理厂活性污泥特性影响的研究进展[J]. 长春工程学院学报:自然科学版,2013,14(3):41-43,74.
Ai Shengshu, Tian Xi, Ren Zhimin, et al. The research progress on performance of activated sludge in urban sewage by low temperature[J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Sciences Edition, 2013, 14(3):41-43,74(in Chinese).
- [2] 金羽. 温度对A²/O系统的影响特征及脱氮除磷强化技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
Jin Yu. Effecton of Temperature on the Performance of an A²/O Process and Enhancement of Nitrogen and Phosphorus Removal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013(in Chinese).
- [3] 杨敏,孙永利,郑兴灿,等. 悬浮填料强化硝化及其最佳填充率研究[J]. 中国给水排水,2012,28(11):79-81.
Yang Min, Sun Yongli, Zheng Xingcan, et al. Study on enhanced nitrification and optimum filling rate of suspended filler[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(11):79-81(in Chinese).
- [4] 张鹭. 西安市第五污水处理厂升级改造工艺研究及运行效果分析[D]. 西安:长安大学,2014.
Zhang Lu. Analysis and Research on Running Effect of the Upgrading and Reconstruction in Xi'an Fifth Sewage Treatment Plant[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014(in Chinese).
- [5] 李雅婕,潘峰,葛红光,等. 好氧移动床动态膜生物反应器中填料投加量的影响研究[J]. 水处理技术,2009,35(5):57-59,71.
Li Yajie, Pan Feng, Ge Hongguang, et al. Study of the adding amount of carriers in the dynamic membrane-moving bed biofilm reactor[J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(5):57-59,71(in Chinese).
- [6] 王秀荣. 流离生化技术在生活废水处理中的应用[J]. 环境工程,2009,27(S1):106-108.
Wang Xiurong. The application of flow-separating biochemical technique in domestic wastewater treatment[J]. Environmental Engineering, 2009, 27(S1):106-108(in Chinese).
- [7] 董滨,金波,何群彪,等. 关于污水处理领域悬浮填料产品的探讨[J]. 净水技术,2008,27(3):57-60,64.

- Dong Bin, Jin Bo, He Qunbiao, *et al.* Discussion of suspended carriers used in wastewater treatment field [J]. *Water Purification Technology*, 2008, 27(3): 57 – 60, 64 (in Chinese).
- [8] 徐文娟, 江霜英. 方形与球形聚氨酯填料用于 MBBR 处理混合污水的研究[J]. *水处理技术*, 2013, 39(9): 61 – 64.
- Xu Wenjuan, Jiang Shuangying. Study on cubic and round polyurethane foam carriers for mixed sewage treatment in MBBR process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(9): 61 – 64 (in Chinese).
- [9] 郑威, 单舒曼, 尹波. 药厂污泥制备水处理用多孔流离球填料[J]. *化学工程师*, 2007(12): 49 – 51.
- Zheng Wei, Shan Shuman, Yin Bo. Preparation of porous flow-separated ball filler made from pharmaceutical plant sludge [J]. *Chemical Engineer*, 2007(12): 49 – 51 (in Chinese).
- [10] 黄谦, 孔刚. 流离生化法在污水处理中的应用[J]. *市政技术*, 2011, 29(4): 100 – 104.
- Huang Qian, Kong Gang. Application of flow-separation biological treatment technology in sewage treatment [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2011, 29(4): 100 – 104 (in Chinese).
- [11] 朱绍盛, 贾晓琼, 刘扬. 皮革后整理加工废水处理 [J]. *广东化工*, 2012, 39(12): 112 – 113.
- Zhu Shaosheng, Jia Xiaoqiong, Liu Yang. The leather postprocessing waste water treatment [J]. *Guangdong Chemical*, 2012, 39(12): 112 – 113 (in Chinese).
- [12] 刘媛. MBBR 处理城镇污水的基础研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- Liu Yuan. Study on Moving Bed Biofilm Reactor Application in Town Wastewater Treatment Plant [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007 (in Chinese).
- [13] 王帆, 任庆凯, 田曦, 等. 低温城市污水活性污泥脱氢酶活性变化的实验研究[J]. *长春工程学院学报: 自然科学版*, 2014, 15(3): 58 – 61.
- Wang Fan, Ren Qingkai, Tian Xi, *et al.* Experimental research on dehydrogenase activity in activated sludge of low temperature urban sewage [J]. *Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Sciences Edition*, 2014, 15(3): 58 – 61 (in Chinese).
- [14] 郭艳君, 魏伟, 何义亮, 等. A/O 生物膜法处理低碳源污水挂膜启动研究[J]. *应用化工*, 2016(10): 1816 – 1819.
- Guo Yanjun, Wei Wei, He Yiliang, *et al.* Biofilm formation and startup in A/O biofilm reactor for low carbon source sewage [J]. *Applied Chemical Industry*, 2016(10): 1816 – 1819 (in Chinese).
- [15] 李晓亮. 低温硝化细菌的筛选及其在低温污水处理中的初步应用研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2017.
- Li Xiaoliang. Low Temperature Screening of Nitrifying Bacteria and Its Preliminary Application in the Low Temperature Sewage Treatment Research [D]. Qingdao: Qingdao University, 2017 (in Chinese).
- [16] 付昆明, 周厚田, 左早荣, 等. 水力停留时间对海绵填料 CANON 反应器性能的影响[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(7): 1 – 5.
- Fu Kunming, Zhou Houtian, Zuo Zaorong, *et al.* Effect of hydraulic retention time on performance of CANON reactor with sponge as carrier [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(7): 1 – 5 (in Chinese).
- [17] 马秀兰, 田娇, 王有贤. 低温低碳氮比城市污水处理的研究进展[J]. *科技信息*, 2010(35): 10, 16.
- Ma Xiulan, Tian Jiao, Wang Youxian. Research progress of municipal sewage treatment under low temperature and low C/N [J]. *Science & Technology Information*, 2010(35): 10, 16 (in Chinese).



作者简介: 王帆(1989 –), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 从事污水处理技术研究。

E-mail: ccwangfan@163.com

收稿日期: 2018 – 11 – 11