

# 利用厌氧生物活性炭实现厌氧生物滤池快速启动

张浩然<sup>1</sup>, 丁慧羽<sup>1</sup>, 贾瑞琦<sup>1</sup>, 陈梦雪<sup>1</sup>, 李丹阳<sup>1</sup>, 李志远<sup>1</sup>, 朱俊伟<sup>2</sup>,  
陈东标<sup>2</sup>, 郭贤发<sup>2</sup>, 吴 军<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023;

2. 南京柯若环境技术有限公司, 江苏 南京 211100)

**摘 要:** 厌氧生物滤池通常采用接种活性污泥的方式加速启动过程,但该方法的接种生物量较低且接种的微生物要经历从好氧到厌氧、悬浮生长到附着生长的演变过程。针对上述问题,提出接种厌氧生物活性炭加速厌氧生物滤池启动的解决方案。设计不同厌氧生物活性炭接种比例(0、25%、50%和100%)的厌氧生物滤池启动试验装置,装填比为25%、50%和100%的厌氧生物滤池分别在16、13和8 d后完成启动,而未装填厌氧生物活性炭的厌氧滤池启动非常缓慢。表明接种厌氧生物活性炭可实现厌氧生物滤池的快速启动。厌氧生物活性炭可在沥干密封后采用常温运输保存,运输保存期不超过3 d基本不影响接种效果,因此该技术方案具有重要的应用价值。

**关键词:** 厌氧生物滤池; 启动; 厌氧生物活性炭; 运输保存

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)17-0029-06

## Rapid Start-up of Anaerobic Biofilter Using Anaerobic Biological Activated Carbon

ZHANG Hao-ran<sup>1</sup>, DING Hui-yu<sup>1</sup>, JIA Rui-qi<sup>1</sup>, CHEN Meng-xue<sup>1</sup>, LI Dan-yang<sup>1</sup>,  
LI Zhi-yuan<sup>1</sup>, ZHU Jun-wei<sup>2</sup>, CHEN Dong-biao<sup>2</sup>, GUO Xian-fa<sup>2</sup>, WU Jun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment,  
Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Nanjing Cross Environmental Technology Co.  
Ltd., Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Anaerobic biofilters mostly inoculate activated sludge to accelerate the start-up process. However, this method has a low inoculation mass and the microorganisms inoculated will undergo an evolution from aerobic type to anaerobic type, suspended growth type to attached growth type. In order to solve the above problems, a solution of inoculating anaerobic microorganisms by using anaerobic biological activated carbon to accelerate the start-up process of the anaerobic biofilter is proposed. Anaerobic biofilter devices with different anaerobic biological activated carbon filling ratios (0, 25%, 50% and 100%) were designed. The results showed that the anaerobic biofilters with filling ratio of 25%, 50% and 100% completed start-up process after 16 days, 13 days and 8 days, respectively. However, anaerobic biofilter without filling anaerobic biological activated carbon started very slowly. It proved that inoculation of anaerobic biological activated carbon could achieve rapid start-up of anaerobic biofilter. The anaerobic biological activated carbon could be transported and stored at room temperature after drained and

sealed. It did not influence the effect of inoculation basically when the transportation and storage period was no more than three days, so the solution had important application value.

**Key words:** anaerobic biofilter; start-up; anaerobic biological activated carbon; transportation and storage

作为厌氧生物膜反应器的典型代表,厌氧生物滤池因具有生物量大、有机负荷高、污泥停留时间长、运行简单等优点而被广泛使用<sup>[1]</sup>。然而,厌氧生物滤池的自然启动过程通常需耗时2~3个月,甚至长达6个月,且由于附着微生物增长速率缓慢,导致启动期间系统运行状态非常脆弱<sup>[2]</sup>。研究者们通过接种活性污泥的方式,大幅缩短了厌氧生物滤池的启动周期<sup>[3]</sup>。但由于该方法接种量较低,且在启动过程中接种微生物要经历从好氧到厌氧、悬浮生长到附着生长的变化过程,厌氧生物滤池仍需约45 d才能完成启动<sup>[4,5]</sup>。

生物活性炭技术是通过在活性炭上固定微生物,利用活性炭吸附与生物降解的协同作用进行废水处理。目前,好氧生物活性炭在二级出水的深度处理中已被广泛使用<sup>[6]</sup>。相比好氧生物活性炭,厌氧生物活性炭应用研究较少。Dong等<sup>[7]</sup>通过投加颗粒活性炭将UASB转变成厌氧生物活性炭反应器,用于去除前段厌氧反应器出水中的溶解性微生物代谢产物。通过附着生长的方式,厌氧微生物可随活性炭在反应器内迁移运动,类似地,厌氧微生物也可随活性炭在不同反应器之间转移。因此,可通过装填厌氧生物活性炭,将附着生长的厌氧微生物接种到待启动的厌氧生物滤池中来加速启动过程。一方面可通过增加厌氧生物活性炭的装填比来增加微生物接种量,另一方面可直接接种附着生长类型的厌氧微生物,使接种效率提高。为探究利用厌氧生物活性炭实现厌氧生物滤池快速启动的可行性,设计了不同厌氧生物活性炭装填体积比的厌氧生物滤池启动装置并进行对比研究。为保证接种厌氧微生物的生物活性,提出简单可行的厌氧生物活性炭运输保存方法,通过分析生物量和生物活性的变化趋势验证保存方法的可行性,研究运输保存期限。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置和材料

加工4套相同厌氧生物滤池装置(见图1),由模拟厌氧生物滤池系统、蠕动泵和座式发酵管组成。模拟厌氧生物滤池由内径为50 mm、高为100 mm

的PVC圆管加工而成。在滤池底部通过变径接头(内装滤网防止填料流失)连接球阀作为进(排)水口,在距顶部40 mm处开孔作为出水口。利用蠕动泵将发酵液从滤池底部进水口泵入,从出水口抽出,实现封闭循环。在滤池顶部采用管帽封堵,玻璃胶密封,管帽顶部中心开孔连管将生物气导入座式发酵管以测定甲烷体积。座式发酵管内盛3 mol/L的NaOH溶液作水封和CO<sub>2</sub>吸收剂,进入管内的CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>S可被完全吸收,吸收后的气体体积即为甲烷体积。导气管路上设置单向阀,防止发酵管中碱液倒吸。滤池装填粒径为0.5~1 mm的颗粒活性炭,由新鲜活性炭和厌氧生物活性炭(取自实验室稳定运行的射流循环厌氧生物滤池)按比例混合而成。

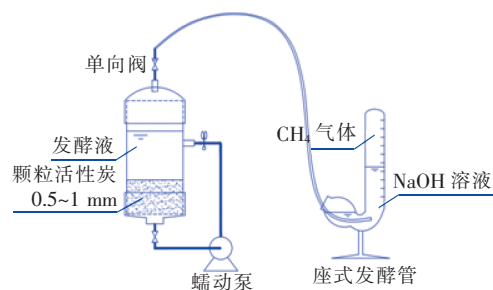


图1 厌氧生物滤池装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of anaerobic biofilter

发酵液取自实验室稳定运行的两相厌氧垃圾渗滤液处理工艺中的产酸相出水池,经稀释后使用。稀释后COD为4 615~7 556 mg/L,挥发性脂肪酸为1 995.2~3 403.1 mg/L,酸化率为39%~60%,pH值<6。为防止pH值过低而抑制产甲烷菌活性,用2 mol/L氢氧化钠调节pH值至6.5±0.2。

### 1.2 试验设计

将厌氧生物活性炭从射流循环厌氧生物滤池中取出,沥去多余的水分后装入塑封袋密封,于常温下保存(20~30℃)。定期测定厌氧生物活性炭的生物量和最大比产甲烷速率,分析厌氧生物活性炭在运输及保存过程中生物量和生物活性的变化趋势。

4套模拟厌氧生物滤池启动装置分别装填40 mL新鲜活性炭、30 mL新鲜活性炭+10 mL厌氧生

物活性炭、20 mL 新鲜活性炭 + 20 mL 厌氧生物活性炭和 40 mL 厌氧生物活性炭,对应厌氧生物活性炭装填体积比分别为 0、25%、50% 和 100%,均置于 35 ℃ 恒温培养箱中。每套厌氧生物滤池每天一次性泵入 120 mL 发酵液,并以 4 mL/min 的流量在系统内循环,运行 24 h 后将发酵液从滤池底部排出(从出水口利用氮气将发酵液排出,要确保滤池处于厌氧环境),测定运行前后发酵液的 COD 浓度,记录甲烷产量。

### 1.3 分析方法

用扫描电子显微镜(S-3400N II)观察并比较新鲜活性炭和厌氧生物活性炭的微观形貌差异,具体方法如下:取适量活性炭样品用去离子水清洗数次后离心,用含 2.5% 戊二醛的 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH 值 = 7.3)于 4 ℃ 下固定 12 h。固定后用 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液浸泡冲洗 3 次,用浓度为 50%、70%、80%、90%、95% 和 100% 的乙醇溶液梯度脱水,冻干后进行扫描电镜测定。

厌氧生物活性炭的生物量使用脂磷法进行测定;以最大比产甲烷速率表征厌氧生物活性炭的生物活性,参照厌氧污泥最大比产甲烷速率的间歇试验法测定,具体如下:取约 40 mL 待测厌氧生物活性炭样品置于 100 mL 血清瓶中,加入 60 mL 发酵液(COD 约为 4 500 mg/L,用氢氧化钠调节 pH 值至 7.0),用橡胶塞封口后于 35 ℃ 恒温条件下振荡培养,在橡胶塞上设置导管将生物气导入座式发酵管,从而测定累积产甲烷体积,通过绘制累积产甲烷曲线计算最大比产甲烷速率。

在厌氧滤池启动试验中,发酵液的 COD 采用密封消解法测定<sup>[8]</sup>,甲烷产量采用座式发酵管排液法测定,用 3 mol/L 的 NaOH 吸收生物气中的 CO<sub>2</sub>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 新鲜活性炭与厌氧生物活性炭微观形貌比较

图 2 是新鲜活性炭与厌氧生物活性炭的扫描电镜照片。可见,新鲜活性炭表面存在多孔结构,有利于微生物的附着生长;而厌氧生物活性炭表面存在较厚的生物膜,多孔结构已被完全覆盖。在图 2(d)中可观察到大量直径在 1 μm 左右的杆状和球状菌附着在活性炭表面,相比悬浮生长的微生物,这些附着生长的微生物对环境的变化适应性更强<sup>[9]</sup>。在厌氧滤池启动中,这些微生物以厌氧生物活性炭为载体接种到滤池中,通过快速富集和驯化来加快厌

氧滤池的启动。

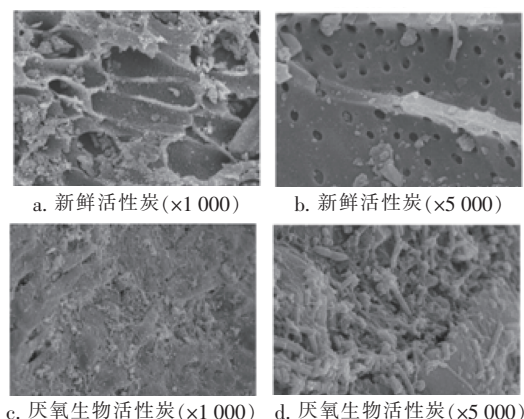


图 2 新鲜活性炭与厌氧生物活性炭扫描电镜照片

Fig. 2 SEM of raw activated carbon and anaerobic biological activated carbon

### 2.2 运输保存过程中生物量和生物活性变化

厌氧生物活性炭在运输保存过程中脂磷生物量的变化趋势见图 3。常温密封保存 0.75 d (18 h) 后,厌氧生物活性炭的生物量为 139.40 nmolP/g 填料,相当于  $1.39 \times 10^{10}$  个 *E. coli* 大小的细胞。在保存时间增长到 2.75 d 之前,厌氧生物活性炭的生物量呈现逐渐增加的趋势。说明活性炭上附着的微生物仍可利用溶解于间隙水和吸附在活性炭上的有机质进行增殖。随着保存时间继续增加,厌氧生物活性炭上的微生物进入内源呼吸阶段,生物量逐渐减少,变化规律符合衰减方程  $y = \exp(-0.0708x + 5.3432)$ ,相关系数  $R^2$  为 0.9778,生物量衰减系数  $K_d$  为 0.0708 d<sup>-1</sup>。密封保存至第 5.75 天,生物量为 140.83 nmolP/g 填料,仍处于相对较高水平。

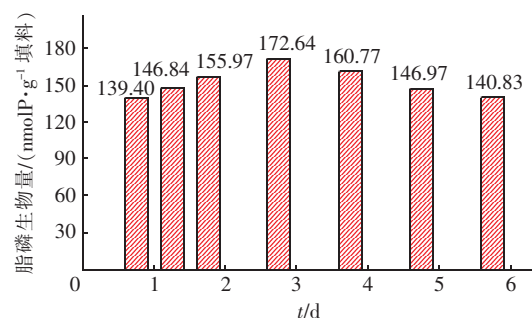


图 3 保存过程中厌氧生物活性炭脂磷生物量变化趋势

Fig. 3 Variation of lipid phosphorus biomass of anaerobic biological activated carbon during storage

取密封保存 0.75、2.75 和 4.75 d 的厌氧生物活性炭测定最大比产甲烷速率,每组测定 3 个平行样。密封保存 0.75 和 2.75 d 的厌氧生物活性炭产

甲烷过程没有明显的迟滞期(见图4和图5);在前4 h,累积甲烷产量以较为恒定的速率增加,曲线为线性增加的直线段;23 h后,累积甲烷产量增加缓慢,平均值分别达到84.1和77.8 mL。密封保存至4.75 d,厌氧生物活性炭产甲烷过程出现了约2 h的迟滞期(见图6);2 h后,曲线呈线性增加;23 h后,累积甲烷产量平均值达到64.9 mL。

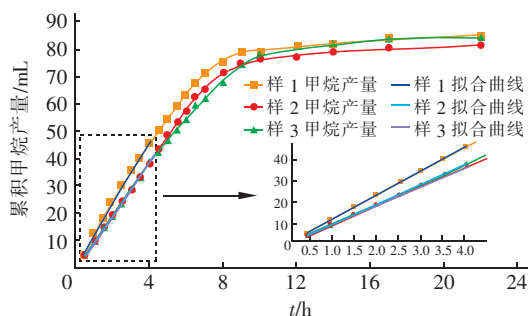


图4 密封保存0.75 d后的累积产甲烷曲线

Fig. 4 Cumulative methane production curve after 0.75 days of sealed storage

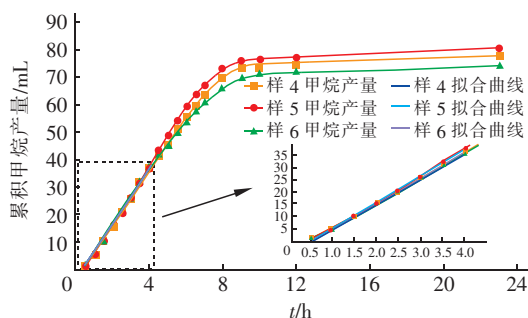


图5 密封保存2.75 d后的累积产甲烷曲线

Fig. 5 Cumulative methane production curve after 2.75 days of sealed storage

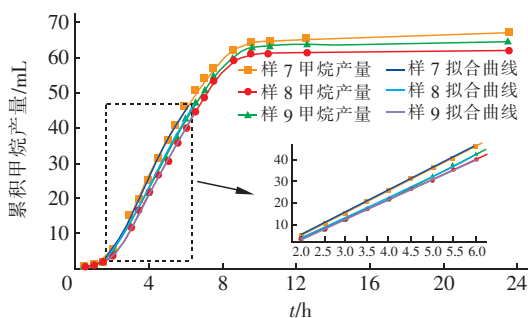


图6 密封保存4.75 d后的累积产甲烷曲线

Fig. 6 Cumulative methane production curve after 4.75 days of sealed storage

对累积产甲烷曲线的直线段进行线性拟合,得到3种厌氧生物活性炭的最大比产甲烷速率均值分别为8.541、8.143和7.681 mL/(g 填料·d)。相比

0.75 d、4.75 d的最大比产甲烷速率仅减小10%,其生物活性仍维持在相对较高水平,表明厌氧生物活性炭可采用沥干后常温密封运输。考虑到产甲烷迟滞期的出现,建议将运输保存时间控制在3 d以内。

## 2.3 厌氧生物滤池的快速启动

取密封保存0.75 d的厌氧生物活性炭按照不同装填体积比进行模拟厌氧生物滤池快速启动试验。试验最初9 d除了100%装填比例的第4套装置保持稳定的COD去除率,其他3套装置的去率均呈下降趋势,反映新鲜活性炭通过吸附作用去除COD并随吸附容量的减少而呈现出下降趋势(见图7)。装填比为25%、50%和100%的厌氧生物滤池对COD的去除率分别在第9天、第11天和第6天开始上升,并分别于第16天、第13天和第8天达到最大值,分别稳定在94.9%、83%和95.4%左右,证明厌氧生物降解作用逐渐主导了COD的去除。而未装填厌氧生物活性炭的模拟厌氧生物滤池运行14 d后COD去除率仍在30%左右波动,说明在没有接种厌氧微生物的条件下生物量增长非常缓慢。

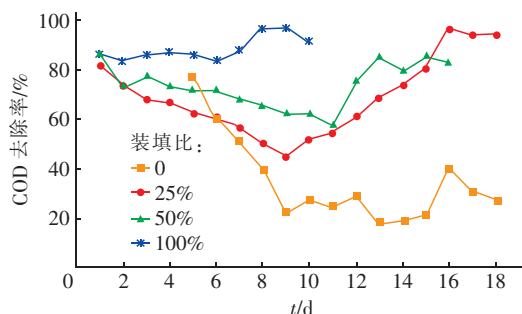


图7 不同厌氧生物活性炭装填比条件下启动装置时COD去除率的变化

Fig. 7 Variation of COD removal rate during start-up of devices with different anaerobic biological activated carbon filling ratios

厌氧生物活性炭装填比为25%、50%和100%的厌氧生物滤池甲烷产量和产率从启动开始即表现为快速上升趋势(见图8、9),其中,装填比为25%和50%的模拟厌氧生物滤池甲烷产率在第9天分别上升到0.156和0.168 L/gCOD后增长速率放缓,装填比为100%的厌氧生物滤池甲烷产率在第8天就基本达到最大值,并稳定在0.184 L/gCOD左右。未装填厌氧生物活性炭的模拟厌氧生物滤池甲烷产量低下,其产率始终在0.05 L/gCOD以下波动,说明在不接种的条件下产甲烷菌很难富集导致

启动困难。启动9 d后,装填比为25%和50%的厌氧生物滤池甲烷产率在0.15~0.22 L/gCOD之间波动较大,可能与进水COD浓度波动较大有关。

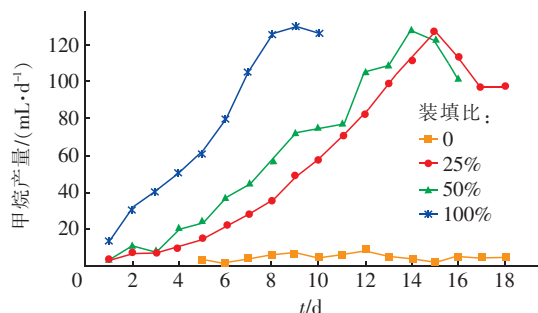


图8 不同厌氧生物活性炭装填比下装置甲烷产量的变化

Fig. 8 Variation of methane production during start-up of devices with different anaerobic biological activated carbon filling ratios

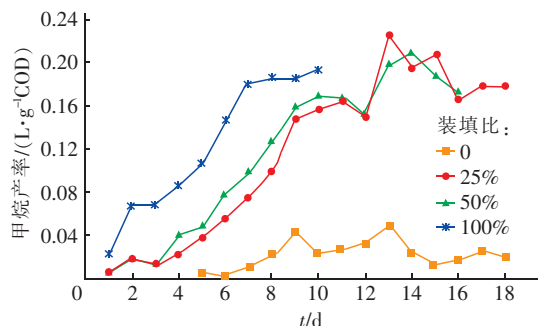


图9 不同厌氧生物活性炭装填比下装置甲烷产率的变化

Fig. 9 Variation of methane yield during start-up of devices with different anaerobic biological activated carbon filling ratios

从COD去除率和甲烷产率两方面综合考虑,装填比为25%、50%和100%的厌氧生物滤池分别在运行16、13和8 d后完成启动,而未装填厌氧生物活性炭的厌氧生物滤池启动非常缓慢。表明接种厌氧生物活性炭可实现厌氧生物滤池的快速启动。在25%的厌氧生物活性炭接种体积比下启动周期缩短至16 d,较相关文献报道的接种活性污泥法的启动周期(30~45 d)明显缩短<sup>[10]</sup>,说明利用厌氧生物活性炭接种的效率更高,启动速度更快。

### 3 结论

① 厌氧生物活性炭可在沥干后采用常温密封运输,保存方法简便,运输效率提高。厌氧生物活性炭的脂磷生物量在密封保存第5.75天为140.83 nmolP/g填料,仍处于较高水平,最大比产甲烷速率在保存第4.75天的均值为7.681 mL/(g填料·

d),相比第0.75天,仅减小了10%,说明运输保存期不超过3 d基本不影响接种效果。

② 利用厌氧生物活性炭接种可实现厌氧生物滤池的快速启动。接种25%的厌氧生物活性炭时厌氧生物滤池启动周期为16 d,甲烷产率在第9天达到0.156 L/gCOD,并趋于稳定,COD去除率在第16天达到最大值,并稳定在94.9%左右,比接种活性污泥法的启动周期(30~45 d)明显缩短,证明利用厌氧生物活性炭接种效率更高,启动速度更快。

### 参考文献:

- [1] 薛倩,林娜,张玉宝,等. 厌氧生物滤池技术研究及应用进展[J]. 北京水务,2016,(2):12-15.  
Xue Qian, Lin Na, Zhang Yubao, et al. Research and application progress of anaerobic biofilter technology[J]. Beijing Water, 2016, (2): 12-15 (in Chinese).
- [2] Jauregui-Jauregui J A, Mendez-Acosta H O, Gonzalez-Alvarez V, et al. Anaerobic treatment of tequila vinasses under seasonal operating conditions: Start-up, normal operation and restart-up after a long stop and starvation period[J]. Bioresour Technol, 2014, 168: 33-40.
- [3] 王凡,魏伟,董晓楠. 屠宰废水厌氧生物滤池启动试验研究[J]. 民营科技, 2016, (8): 221-222.  
Wang Fan, Wei Wei, Dong Xiaonan. Experimental study on start-up of slaughter wastewater anaerobic biofilter[J]. Non-state Running Science & Technology Enterprises, 2016, (8): 221-222 (in Chinese).
- [4] Han W, Yue Q Y, Wu S Q, et al. Application and advantages of novel clay ceramic particles (CCPs) in an up-flow anaerobic bio-filter (UAF) for wastewater treatment[J]. Bioresour Technol, 2013, 137: 171-178.
- [5] 韩薇. 基于超轻污泥陶粒的厌氧生物滤池在废水处理方面的应用[D]. 济南: 山东大学, 2014.  
Han Wei. Application of the Anaerobic Bio-filter Filled with Ultra-lightweight Sludge Ceramics in Wastewater Treatment[D]. Jinan: Shandong University, 2014 (in Chinese).
- [6] 刘锐,程家迪,余彬,等. O<sub>3</sub>/BAC工艺深度处理某工业园区废水的效果[J]. 中国给水排水, 2012, 28(15): 16-20.  
Liu Rui, Cheng Jiadi, Yu Bin, et al. Effects and mechanisms of ozone/biological activated carbon process for advanced treatment of industrial park wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(15): 16-20 (in Chinese).

- [7] Dong X, Zhou W, He S. Removal of anaerobic soluble microbial products in a biological activated carbon reactor[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(9):1745-1753.
- [8] 师祥洪, 王志强. 密封消解法测定高盐废水 COD 时的最佳实验条件选择[J]. 环境工程, 2003, 21(5):51-54.  
Shi Xianghong, Wang Zhiqiang. The best testing conditions of determining COD in high salinity wastewater with the method of seal digestion[J]. Environmental Engineering, 2003, 21(5):51-54(in Chinese).
- [9] 曾涛涛, 廖伟, 谢水波, 等. 柠檬酸废水厌氧颗粒污泥微生物菌群结构解析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(8):115-120.  
Zeng Taotao, Liao Wei, Xie Shuibao, et al. Analysis of bacterial community in anaerobic granular sludge for citric acid wastewater treatment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(8):115-120(in Chinese).
- [10] 吴茹星, 呼世斌, 赵玉娇. AF+SBR 工艺对屠宰废水处理效果的实验研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(7):173-176.

Wu Ruxing, Hu Shibin, Zhao Yujiao. Treatment effect of the experimental research on AF+SBR technics to the slaughterhouse wastewater[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(7):173-176(in Chinese).



作者简介:张浩然(1992-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染治理。

E-mail:471034261@qq.com

收稿日期:2018-05-04

(上接第28页)

- 11-15.  
Lai Houwei, Li Jingshi, Pang Zhihua, et al. The contamination characteristics of first-flush in large industrial district of Shenzhen[J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(3):11-15(in Chinese).
- [3] 李明远, 魏杰, 张武强, 等. 深圳市初期雨水特征分析及控制对策研究[J]. 广东化工, 2017, 44(10):43-46.  
Li Mingyuan, Wei Jie, Zhang Wuqiang, et al. First-flush rainfall in Shenzhen City[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(10):43-46(in Chinese).
- [4] 曾彦君. 分流制雨水系统旱流污水截留效果及改善对策研究[D]. 上海:同济大学, 2008.  
Zeng Yanjun. Dye-weather Sewage Interception Effect and Countermeasures of Separate Storm Sewer Systems in Shanghai[D]. Shanghai:Tongji University, 2008(in Chinese).
- [5] 刘臻. 初期雨水径流多功能塘-梯级人工湿地高标准处理技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.  
Liu Zhen. Standard Processing Technology of Multi-function Pond-Terraced Constructed Wetland System for Ini-

tial Rainfall Runoff[D]. Chongqing:Chongqing University, 2016(in Chinese).



作者简介:黎京士(1986-), 男, 广东广州人, 硕士, 工程师, 主要从事环境工程、给排水工程设计以及水质净化与水污染控制技术研究与应用工作。

E-mail:kingshili@163.com

收稿日期:2018-03-07