

复合式厌氧折流板反应器处理垃圾渗滤液

常铭东¹, 朱彤¹, 王有昭¹, 孙志成²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

摘 要: 采用复合式厌氧折流板反应器对垃圾渗滤液的处理工艺进行研究, 主要考察了温度、水力停留时间(HRT)、进水氨氮质量浓度对反应器处理效率的单因素影响。结果表明, 当温度由 30 ℃ 降到 10 ℃ 时, 化学需氧量(COD)去除率下降了 49.11%; 随着 HRT 的缩短, 系统容积负荷逐渐提高, COD 去除率呈下降趋势; 当进水氨氮质量浓度逐渐升高, 反应器对 COD 的去除能力大幅度下降。利用响应曲面法得出最优参数: 当温度为 34.97 ℃, HRT 为 46.54 h 时, COD 去除率最高, 达到 88.57%。

关 键 词: 垃圾渗滤液; 复合式厌氧折流板反应器; 厌氧; 优化; 生物反应器

中图分类号: X 703 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)07-1039-06

Landfill Leachate Treated Using Hybrid Anaerobic Baffled Reactor(HABR)

CHANG Ming-dong¹, ZHU Tong¹, WANG You-zhao¹, SUN Zhi-cheng²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China. Corresponding author: WANG You-zhao,
E-mail: wangyz@me.neu.edu.cn)

Abstract: The disposal process of landfill leachate using hybrid anaerobic baffled reactor(HABR) was investigated to study the effect of temperature, HRT(hydraulic retention time) and ammonia concentration of inflow-water on reactor efficiency. The results showed that the chemical oxygen demand(COD) removal rate decreases by 49.11% when the temperature dropped from 30 ℃ to 10 ℃. With the shortening of HRT, the volume load increases gradually and the removal rate of COD shows a downward trend. When the influent concentration of ammonia nitrogen gradually increases, the removal capacity of COD in the reactor greatly decreases. Using the response surface method to get the optimal parameters showed that the removal rate of COD reaches the highest when the temperature is 34.97 ℃ and the HRT is 46.54 h, the removal rate peaks at 88.57%.

Key words: landfill leachate; HABR (hybrid anaerobic baffled reactor); anaerobic; optimization; bioreactors

随着生活垃圾产量的逐年增加, 传统的垃圾填埋法因具有简单方便、处理量大等特点在我国被广泛运用^[1]。垃圾填埋最棘手的问题就是垃圾渗滤液, 其成分复杂且处理困难^[2]。如今使用厌氧硝化技术处理垃圾渗滤液越来越多地引起了人们的关注。

厌氧折流板反应器(anaerobic baffled reactor, ABR)是一种新型的第三代厌氧反应器, 结构上等同于多个上流式厌氧污泥床(up-flow anaerobic sludge bed, UASB)串联而成^[3]。有研究

表明 ABR 在处理垃圾渗滤液方面具有重要意义^[4]。ABR 具有较高的生物量, 较强的抗冲击能力, 适当调节温度、水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)、碱度等参数后可以取得较理想的效果。有实验结果表明^[5], 该工艺对化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)具有较高的去除率, 且抗冲击能力较强。另有实验结果显示^[6], 当调整 HRT 为 18 h 时可以明显提高垃圾渗滤液的可生化性, COD 去除率可达到 75%。综上所述, 相对于其他技术 ABR 在处理垃圾渗滤液

方面具有一定优势. 但是 ABR 也存在一些不足, 例如反应器内易形成水沟、隔室空间利用率低、污泥容易在反应器底部堆积等. 复合式厌氧折流板反应器 (hybrid anaerobic baffled reactor, HABR) 是一种改进型 ABR, 即在 ABR 适当的位置架设填料, 充分利用无效空间增加生物总量, 并加速污泥与气泡的分离, 减少污泥流失. HABR 的另一个显著特点是无需回流, 内部填料给微生物提供了栖息场所, 不至于使污泥堆积在底部限制泥水的混合, 既节约了能耗也降低了动力损失.

本研究利用 HABR 处理垃圾渗滤液, 并采用响应曲面法, 通过考察温度、HRT 的单因素影响来确定反应器的优化参数.

1 实验材料和实验方法

1.1 实验材料

本研究所用的垃圾渗滤液取自沈阳老虎冲垃圾填埋场. 实验接种污泥由颗粒污泥和絮状污泥混合而成, 颗粒污泥由取自某柠檬酸厂和某淀粉厂的多种颗粒污泥混合而成, 颗粒污泥质量浓度为 100 g/L; 絮状污泥取自沈阳沈水湾污水处理厂厌氧池, 絮状污泥质量浓度为 18.62 g/L. COD 的测试按照国标 GB11914—89 中规定的方法进行测试分析.

1.2 实验装置

常用的 ABR 结构如图 1a 所示, 本文所述的 HABR 是基于此基本结构进行优化设计而成的, 如图 1b 所示.

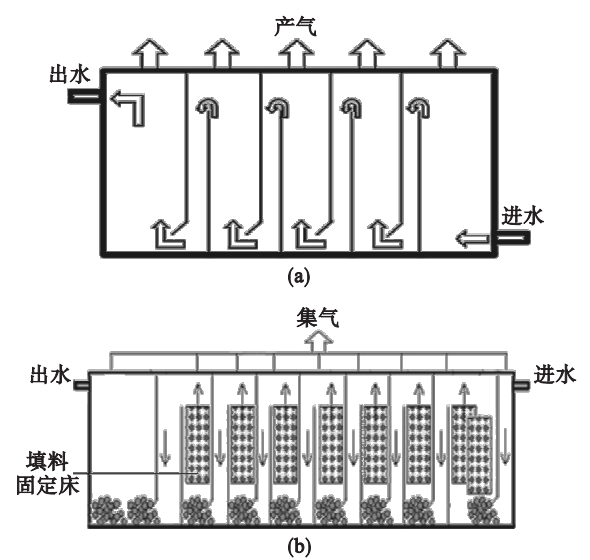


图 1 实验反应器结构

Fig. 1 Structure of experiment reactor
(a)—ABR; (b)—本文的 HABR.

该反应器的有效工作容积为 40 L, 并分成 8 个格室. 由于反应器第一格室承受的负荷远大于平均负荷^[7], 所以应适当增大第一格室的容积. 其次, 随着格室后移有机质浓度下降, 最后一个格室的关键任务不再是处理能力而是污泥沉降, 所以应适当增加第八格室的容积以降低其上升流速, 利于污泥沉降. 填料架使用 $\Phi 4$ 不锈钢焊接制造, 内部悬挂软性纤维填料, 第一格室设 2 片填料, 第八格室不设填料, 其他格室各设 1 片填料.

1.3 实验设计

由于 HABR 是厌氧生物反应器, 而处理氨氮所需的硝化细菌多数为异养细菌, 在无氧环境下数量较少, 导致 HABR 去除垃圾渗滤液中氨氮的能力有限. 所以只考察温度、HRT 和进水氨氮浓度对反应器去除 COD 效果的影响. 具体方案如下:

采用阶段实验法, 分别以温度、HRT、进水氨氮浓度 3 个影响因素作为单一自变量, 以出水 COD 质量浓度作为因变量. 原垃圾渗滤液的 COD 质量浓度范围为 9 ~ 11 g/L, 通过添加葡萄糖或加水稀释对 COD 质量浓度进行调控, 使进水 COD 质量浓度达到 10 g/L. 在反应器的运行过程中保证其他影响因素恒定不变, 阶段性控制反应器运行过程中的单一自变量因素并在实验的各个阶段检测出水 COD 质量浓度.

当以温度为自变量时, 控制温度分别为 10, 20, 30, 35, 40 $^{\circ}\text{C}$, HRT 为 24 h. 当以 HRT 和进水氨氮质量浓度作为单一自变量时反应器各阶段的运行参数分别如表 1、表 2 所示.

表 1 以 HRT 为变量
Table 1 Taking HRT as variable

阶段	时间/d	温度 $^{\circ}\text{C}$	HRT/h	容积负荷 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$
1	1 ~ 7	30	48	5
2	8 ~ 17	30	36	6.7
3	18 ~ 29	30	24	10
4	30 ~ 43	30	16	15
5	44 ~ 58	30	12	20

2 结果与讨论

2.1 温度的影响

温度对 COD 去除率的影响如图 2 所示. 当实验温度范围为 10 ~ 40 $^{\circ}\text{C}$ 时, 出水 COD 去除率分别为 33.12%, 67.43%, 82.36%, 86.53%,

80.21%。可以发现,当温度由 35℃ 升高到 40℃ 时,COD 的去除率有所降低,但在 10~35℃ 的范围内,随着温度的上升 COD 的去除率有明显升高^[8-9]。这是因为微生物适宜的生长温度是其固有特性,一般不能通过驯化的方式改变。本实验是在中温(30℃)的条件下进行启动、驯化,故培养和驯化而来的菌种更适应中温的条件。由图 2 中 COD 去除率的变化可知,温度的上升增强了微生物细胞内酶的活性,加快了微生物的生长和代谢速率,并提高了 COD 的去除率。在低温条件下(10~15℃),COD 去除率曲线先下降而后稍有回升的原因可能是由于微生物逐渐适应了温度的变化,在低温生存的菌种更好地发挥了作用。

表 2 以进水氨氮质量浓度为变量

Table 2 Taking NH₄⁺-N concentration as variable

阶段	时间/d	温度/℃	HRT/h	ρ(氨氮)/mg·L ⁻¹
1	1~7	30	24	1 500
2	8~15	30	24	2 000
3	15~23	30	24	2 500
4	24~36	30	24	800
5	37~42	30	24	3 000
6	43~51	30	24	3 500
7	52~64	30	24	800

实验发现,实验运行温度越低对反应器的冲击越大,在温度恢复后处理效果恢复越慢。所以当出现突发性温度降低的情况时,应适当降低容积负荷来减少对系统的损伤。

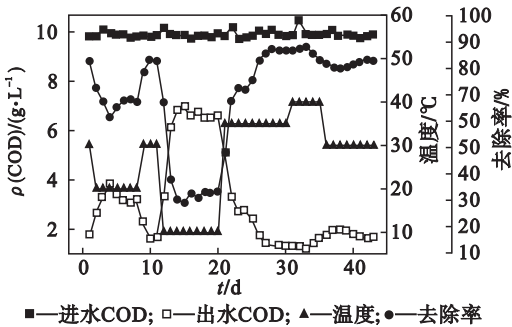


图 2 温度对 COD 去除率的影响

Fig. 2 Effect of temperature on removal rate of COD

2.2 HRT 的影响

HRT 对进水中 COD 的去除率的影响如图 3 所示。当 HRT 范围为 48~12 h 时,稳定运行后 COD 的去除率分别为 87.56%, 84.21%, 82.34%, 75.52%, 61.23%。可以发现,随着 HRT 的缩短,容积负荷逐渐增大,反应器的 COD 去除

率逐渐降低。如表 1 所示,在实验的前 3 个阶段,COD 的容积负荷在 10 kg/(m³·d) 以下,在改变条件的初期 COD 的去除率明显降低,但稳定后 COD 的去除率逐渐上升。比较各个阶段的稳定期,第 2,3 阶段的 COD 去除率较前一阶段分别降低了 3.34%, 1.92%, 降低幅度不大。当 COD 的容积负荷继续增大至 15, 20 kg/(m³·d) 时,即在实验的第 4,第 5 阶段,COD 去除率下降明显。虽然当反应器运行稳定后 COD 去除率会逐渐升高,但相比于其他阶段,第 4,第 5 阶段的 COD 去除率较前一阶段分别降低了 6.81%, 14.33%, 降低幅度较大。分析认为,这应该是由 HRT 过短,进水中的有机物不能被充分降解所导致的。

由图 3 可知,HRT 越长反应器的处理效果越好,分析认为,HRT 越长,进水中有机物与污泥接触越充分,越有利于厌氧菌和兼性菌去除有机物^[10]。实验还发现在一定容积负荷范围内,反应器有较好的抗负荷变化能力,分析认为较长的 HRT 有利于系统内微生物群落活性的提高。

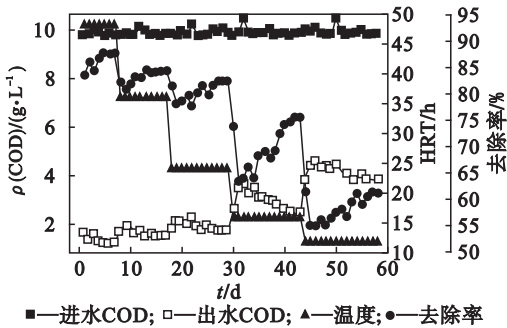


图 3 HRT 对 COD 去除率的影响

Fig. 3 Effect of HRT on removal rate of COD

2.3 氨氮质量浓度的影响

氨氮质量浓度对 COD 去除率的影响如图 4 所示。当进水氨氮质量浓度范围为 0.8~3.5 g/L 时,COD 的去除率分别为 82.3%, 80.1%, 77%, 72%, 61.9%, 48.3%。当氨氮质量浓度小于 2.5 g/L 时对反应器系统的影响较小,但当氨氮质量浓度大于 3 g/L 时,对反应器的处理能力有很大影响。分析原因认为,由于反应器中异养菌的产率比硝化细菌要高,而且异养菌的生存能力要强于硝化细菌,所以异养菌保持了较高的代谢活力。随着进水氨氮质量浓度的升高,高浓度游离氨对异养菌产生的抑制和毒害作用加大,使得其活性降低。

实验发现,进水氨氮质量浓度越高,对反应器的冲击越大,待进水氨氮质量浓度下降后反应器的处理效果也越难恢复。

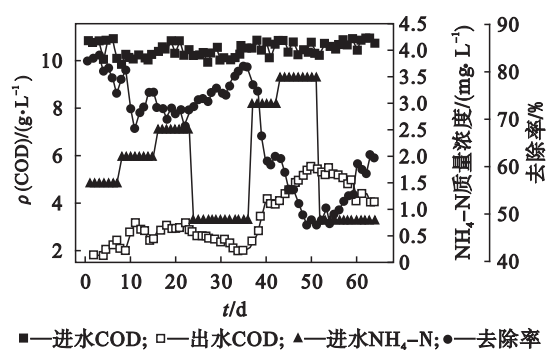


图 4 氨氮浓度对 COD 去除率的影响
Fig. 4 Effect of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration on removal rate of COD

2.4 运行参数优化

2.4.1 模型显著性检验

由于进水中氨氮质量浓度属于不可人为控制的因素,且垃圾渗滤液中氨氮质量浓度范围为 0.5 ~ 1.0 g/L. 故本实验使进水氨氮质量浓度保持在 0.8 g/L,在上述单因素实验的基础上,以温度(A)和HRT(B)作为实验影响因素,应用Design

expert 8.06 软件,以 COD 去除率(u)为检测指标进行响应面优化设计,对工艺参数进行优化. 采用二阶经验模型对变量的响应进行表征,对结果进行回归分析,得到三次回归方程:

$$u = 84.39 + 11.15A - 0.59B - 4.51AB - 9.5A^2 - 7.39B^2 - 0.18A^2B + 4.97AB^2 - 7.18A^3 + 11.18B^3.$$

对该回归模型的方差分析结果见表 3,显著性分析结果见表 4.

由表 3 回归模型的方差分析结果可知,实验所得模型 $P=0.000\ 3$,模型显著($P<0.05$ 视为模型显著)^[11],表明温度和 HRT 对 u 均有显著影响. 模型决定系数 R^2 为 0.998 9,校正后的复相关系数 $R^2_{\text{adj}}=0.995\ 7$,表明影响响应值(u)变化的因素有 99.57% 来自选定的温度和 HRT;模型的信噪比为 58.619. 因此该回归模型对实验拟合情况较好,实验的可信度和精确度高,能很好地模拟两个自变量(温度和 HRT)对响应值(u)的影响,可应用于 u 的分析和预测.

表 3 回归模型的方差分析
Table 3 Variance analysis for regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性
模型	2 034.26	9	226.03	309.52	0.000 3	显著
残差	2.19	3	0.73	—	—	—
失拟项	2.19	2	1.10	—	—	—
纯误差项	0.000	1	0.000	—	—	—

由表 4 回归模型系数显著性分析结果可得,模型的一次项 A 达到显著水平($P<0.05$),温度对 COD 去除率的线性效应显著,与前文研究结果相近;二次项 A^2 和 B^2 都达到极显著水平($P<0.01$),说明温度和 HRT 对 COD 去除率的曲面效应极其显著;交互项 AB 和 AB^2 均达到极显著

水平($P<0.01$),说明温度和 HRT 对 COD 去除率的影响的交互作用非常显著. 由此可知,在实验设计范围内,温度和 HRT 两个因素对 COD 去除率的线性效应和曲面效应都显著,并且温度和 HRT 两个因素对 COD 去除率影响的交互作用显著.

表 4 回归模型系数显著性分析
Table 4 Significance analysis for coefficient of regression model

因素	回归系数	自由度	标准误差	95% 置信下限	95% 置信上限	<i>F</i>	<i>P</i>
截距	84.39	1	0.55	82.63	86.15	309.52	0.000 3
<i>A</i>	11.15	1	2.53	3.09	19.22	19.36	0.021 8
<i>B</i>	-0.59	1	1.46	-5.25	4.07	0.16	0.712 0
<i>AB</i>	-4.51	1	0.41	-5.83	-3.19	118.56	0.001 7
A^2	-9.5	1	0.56	-11.28	-7.72	288.01	0.000 4
B^2	-7.39	1	0.73	-9.73	-5.06	101.53	0.002 1
A^2B	-0.18	1	0.82	-2.77	2.42	0.048	0.841 0
AB^2	4.97	1	0.85	2.27	7.66	34.34	0.009 9
A^3	-7.18	1	2.65	-15.63	1.62	7.33	0.073 3
B^3	11.18	1	1.71	5.73	16.62	42.72	0.007 3

2.4.2 响应面法优化分析

应用 Design expert 8.06 设计实验得到的温度和 HRT 交互影响 u 的响应曲面和等高线如图 5 所示,考察响应曲面的性状和等高线的趋势来分析 HRT 和温度对 COD 去除率的影响.

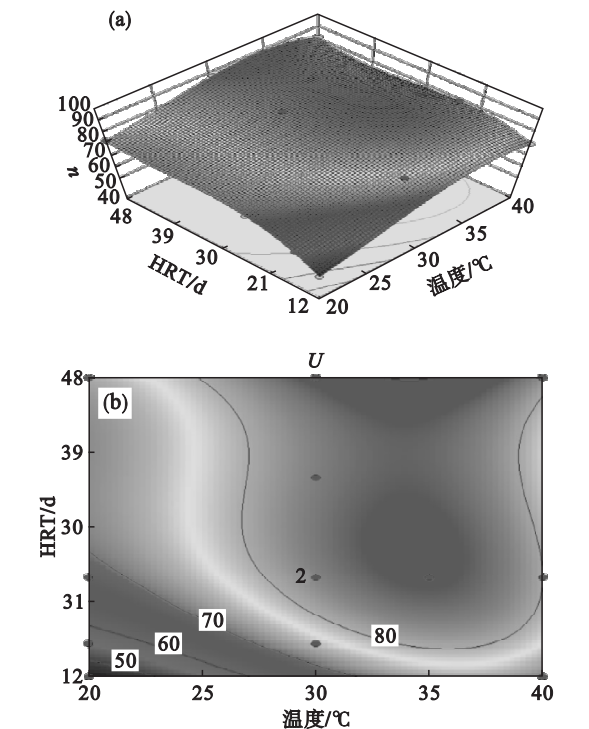


图 5 温度和 HRT 两个因素对 u 的交互影响
Fig. 5 Interactive effects of temperature and HRT on u
(a)—响应曲面; (b)—等高线图.

等高线的分布性状反映交互影响的显著性,椭圆形代表两个因素交互影响显著,而圆形则相反^[12]. 由图5b可看出,等高线分布呈典型的椭

圆形^[13];由图 5a 可看出,响应曲面为典型的马鞍面,表明反应器运行过程中温度和 HRT 两个因素对 u 影响的交互作用显著. 如图 5 所示,当温度小于 30 ℃,HRT 小于 21 h 时,等高线更密集,拟合曲面坡度较大,说明在此范围内两个因素对 COD 去除率的影响更大;当温度降低时,若在保证 COD 去除率不变,必须增大 HRT,且 COD 去除率越大,HRT 增幅越大;同样,当 HRT 降低时,若在保证 COD 去除率不变,需升高温度,且 HRT 越小时温度的增幅越大;当温度升高到 30 ℃ 以上时,反应器在较大的 HRT 范围内有较好的处理效果.

通过回归方程求得最优条件为:当温度为 34.97 ℃,HRT 取 46.54 h,此时 COD 的去除率最高,为 88.57% .

3 工艺对比

垃圾渗滤液的处理工艺有很多种,如序批式活性污泥法 (sequencing batch reactor, SBR)、上流式厌氧污泥床法 (up-flow anaerobic sludge bed, UASB)、上流式污泥床-过滤器 (up-flow blanket filter, UBF)、厌氧序批式反应器法 (anaerobic sequencing batch reactor, ASBR) 等,通过选取一些典型的垃圾渗滤液处理工艺实例与本实验中的 HABR 工艺进行对比. 为分析几种工艺对垃圾渗滤液的处理效果,通过测定 COD 去除率、容积负荷两个主要参数以及实验温度来进行对比. 垃圾渗滤液处理工艺的比较如表 5 所示.

表 5 不同生物工艺处理垃圾渗滤液的比较
Table 5 Comparison of different biological processes for the treatment of landfill leachate

处理方法	COD 去除率/%	COD 容积负荷/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	实验温度/℃	参考文献
SBR	85.48	8.87	室温	文献[14]
UASB	85	8.4	35	文献[15]
PAC-UASB	70.7	6.0	15	文献[16]
ABR	61	2.4	室温	文献[17]
UBF	80	1.16	30	文献[18]
HABR	82.3	10.0	30	本文

本实验数据表明,在 30 ℃ 温度条件下,当 COD 的容积负荷为 10 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,HABR 反应器的 COD 去除率达到 82.31%. 通过与表 5 中其他处理工艺的两个主要参数进行综合比较,发现 HABR 工艺在处理垃圾渗滤液方面具有其特有的优势. 且 HABR 属于厌氧生物处理技术,相比于好氧生物处理技术,其更适于对高浓度废水

进行处理,且产泥量小,基本无动力损耗.

4 结 论

1) 温度和 HRT 对反应器的处理效能有较大影响. 在一定范围内较高的温度更适合反应器的运行,且温度越低对反应器的冲击越大,升温后处

理效果也越难恢复;系统的 HRT 越长,反应器的处理效果越好,在一定容积负荷范围内反应器具 有较好的抗冲击能力.

2) 进水中的氨氮会对微生物产生毒害作用,降低反应器的处理效率,且浓度越高影响越大,反 应器的处理效果也越难恢复.

3) 结合回归模型,考虑对废水的处理效果,以 COD 去除率(u)为指标,对温度和 HRT 两个条件的优化结果为:当温度为 34.97℃,HRT 取 46.54 h,此时 COD 去除率为 88.57%.

参考文献:

[1] Brennan R B, Clifford E, Devroedt C, et al. Treatment of landfill leachate in municipal wastewater treatment plants and impacts on effluent ammonium concentrations[J]. *Journal of Environmental Management*,2016,188(1):64 – 72.

[2] Kumar S, Chiemchaisri C, Mudhoo A. Bioreactor landfill technology in municipal solid waste treatment; an overview [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*,2011,31(1):77 – 97.

[3] Liu R R, Tian Q, Yang B, et al. Hybrid anaerobic baffled reactor for treatment of desizing wastewater[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*,2010,7(1): 111 – 118.

[4] Reynaud N, Buckley C A. The anaerobic baffled reactor (ABR) treating communal wastewater under mesophilic conditions; a review[J]. *Water Science & Technology*,2016, 73(3):463 – 478.

[5] Yuan C, Wang Y, Zhu T, et al. Multistage biological contact oxidation for landfill leachate treatment; optimization and bacteria community analysis [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*,2017,125:200 – 207.

[6] Boopathy R. Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactors [J]. *Bioresource Technology*, 1998,64(1):1 – 6.

[7] Boopathy R, Tilche A. Anaerobic digestion of high strength molasses wastewater using hybrid anaerobic baffled reactor [J]. *Water Research*,1991,25(7):785 – 790.

[8] Lin Y, Yin J, Wang J, et al. Performance and microbial community in hybrid anaerobic baffled reactor-constructed wetland for nitrobenzene wastewater [J]. *Bioresource Technology*,2012,118(4):128 – 135.

[9] Yin Z, Xie L, Cui X, et al. Effective carbon and nitrogen

removal with reduced sulfur oxidation in an anaerobic baffled reactor for fresh leachate treatment[J]. *Journal of Bioscience & Bioengineering*,2017,123(1):84 – 90.

[10] Phukingnam D, Chavalparit O, Somchai D, et al. Anaerobic baffled reactor treatment of biodiesel-processing wastewater with high strength of methanol and glycerol: reactor performance and biogas production [J]. *Chemical Papers*, 2011,65(5):644 – 651.

[11] Jensen D L E, Ledin A, Christensen T H. Speciation of heavy metals in landfill-leachate polluted groundwater [J]. *Water Research*,1999,33(11):2642 – 2650.

[12] Montgomery D C. Design and analysis of experiments [M]. New York: Wiley,1997:156 – 177.

[13] Huang P, Xie M Y, Nie S P, et al. Study on microwave-assisted extraction of polysaccharides from spores of ganoderma atrum with response surface analysis [J]. *Food Science*,2007,28(10):200 – 203.

[14] 魏桃员,陈玉婷,何培弘.等. SBR 工艺处理早期垃圾渗滤液的试验研究[J]. *环境科学与技术*,2016,39(4):107 – 113.
(Wei Tao-yuan, Chen Yu-ting, He Pei-hong, et al. Experimental treatment of initial landfill leachate by SBR system[J]. *Environmental Science & Technology*,2016,39(4):107 – 113.)

[15] 方程冉,吴征宇,龙於洋.等. UASB 反应器处理垃圾渗滤液的启动研究[J]. *浙江科技学院学报*,2007,19(2):125 – 128.
(Fang Cheng-ran, Wu Zheng-yu, Long Yu-yang, et al. Start-up method of UASB for landfill leachate treatment [J]. *Journal of Zhejiang University of Science and Technology*, 2007,19(2):125 – 128.)

[16] 袁志宇,杨珍珠,代华军. 常温下强化 UASB 处理垃圾渗滤液的试验研究[J]. *武汉理工大学学报*,2008,30(2):97 – 100.
(Yuan Zhi-yu, Yang Zhen-zhu, Dai Hua-jun. Experimental research on UASB technology treating the leachate of landfill under normal temperature condition [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*,2008,30(2):97 – 100.)

[17] 邓一荣,肖荣波,李义纯.等. ABR/MBR/纳滤工艺处理城市垃圾渗滤液[J]. *中国给水排水*,2014,30(2):58 – 61.
(Deng Yi-rong, Xiao Rong-bo, Li Yi-chun, et al. ABR/MBR/NF process for treatment of urban landfill leachate[J]. *China Water & Wastewater*,2014,30(2):58 – 61.)

[18] 曹占平,张景丽. UBF 处理垃圾渗滤液的中试研究[J]. *天津工业大学学报*,2006,25(2):44 – 47.
(Cao Zhan-ping, Zhang Jing-li. Pilot experiment study of landfill leachate using UBF process [J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*,2006,25(2):44 – 47.)