

晁雷,崔东亮,赵晓光,等.溶解氧对生物转盘技术处理乳制品废水效能的影响[J].江苏农业科学,2017,45(1):249-252.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.01.069

# 溶解氧对生物转盘技术处理乳制品废水效能的影响

晁雷<sup>1,2</sup>,崔东亮<sup>1</sup>,赵晓光<sup>2,3</sup>,尤涛<sup>2</sup>,徐新阳<sup>3</sup>,李亚峰<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁沈阳 110168; 2. 辽宁省环境科学研究院,辽宁沈阳 110161;  
3. 东北大学资源与土木工程学院,辽宁沈阳 110819)

**摘要:**在不同的溶解氧浓度条件下,研究接触氧化池生物膜的状态以及乳制品废水污染物的去除效率。结果发现,水力停留时间为 10 h 时,生物转盘转速为 10 r/min,此时生物转盘出水 COD<sub>Cr</sub>、氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)含量、总磷(TP)含量分别约为 129、4.67、2.81 mg/L;当接触氧化池水力停留时间 4 h 时,溶解氧浓度在 2.5~3.0 mg/L 之间,COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量、TP 含量出水分别达到 55、4.44、1.42 mg/L。以上结果表明,乳制品废水经过处理后满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 B 标准。

**关键词:**溶解氧;生物转盘;接触氧化;乳制品废水;效能;水力;停留时间

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)01-0249-04

生物膜法与传统的污水处理方法活性污泥法相比,具有对水质水量变动较强的适应性、剩余污泥量少、运行方便等特点,是一种被广泛应用的生物处理技术<sup>[1]</sup>。其中,生物转盘技术(rotating biological contactor, RBC)别称浸没式生物滤池,是在生物滤池的基础上发展而来的,因其系统具有设计灵活可靠、安装操作简洁、无须曝气降低能耗等特点,因此成为了既传统同时又在不断研究中的生物膜技术<sup>[2]</sup>。近年来,国内外学者对生物转盘的应用范围、脱氮机理、盘片结构、盘片驱动方式作了广泛研究,并取得了大量成果<sup>[3-10]</sup>。

乳制品废水相当于原状牛奶的稀释液,主要含有的污染物是乳蛋白、乳脂、乳糖、含于原乳当中的矿物质以及用于清洗生产设备、管道、容器和车间地面的酸性和碱性洗涤剂

等<sup>[11]</sup>。乳制品废水水质主要有以下特点:废水的水质和水量有很大的波动,有机物含量高,良好的可生化性能。废水中生化需氧量(BOD)/化学需氧量(COD)大于 0.5 时,属于可生化性好的有机废水<sup>[12]</sup>。本试验采用新式盘片的生物转盘对乳制品废水运行效果进行研究。但目前,我国对于生物转盘和生物接触氧化池 2 个生物膜反应器代表的运行影响因素和运行参数研究尚不全面、深入。因此,本试验通过改变曝气量控制混合液中溶解氧的浓度,研究不同溶解氧条件下接触氧化池生物膜的状态以及污染物的去除效率,旨在获得最佳运行系统和符合实践应用所需要的经济性要求的运行参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验用水

试验采用牛奶配制的模拟乳制品工业废水(表 1)作为研究对象。本试验使用的接种活性污泥取自沈阳北部污水处理厂,主要呈现棕褐色的大块絮团,其污泥沉降比约为 42%,污泥体积指数为 87 mL/g。通过显微镜观察,污泥菌胶团絮体较好,其中丝状菌较少。

收稿日期:2015-11-13

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(编号:2012ZX07208-003);辽宁省科学技术计划(编号:2014020163);沈阳建筑大学学科培育项目(编号:XKHY-36)。

作者简介:晁雷(1978—),男,辽宁沈阳人,博士,教授,主要从事污水生态处理技术研究。E-mail:chaolei@aliyun.com。

[4]刘胜华,詹长根.基于国民经济和人口发展目标的建设用地需求规模预测研究——以武汉市黄浦区为例[J].中国人口·资源与环境,2005,15(5):47-51.

[5]邱道持,刘力,栗辉,等.城镇建设用地预测方法新探——以重庆市渝北区为例[J].西南师范大学学报(自然科学版),2004,29(1):146-150.

[6]王玉波,唐莹.省域建设用地需求量预测研究——以黑龙江省为例[J].科技管理研究,2009,29(12):161-165.

[7]刘金国,张希.中国城市建设用地需求量预测研究综述[J].国土与自然资源研究,2011(2):16-18.

[8]孙华芬,赵俊三,潘邦龙,等.基于 GIS 和 BP 神经网络技术的建设用地适宜性评价研究[J].国土资源信息化,2008(6):17-19.

[9]王良健,师迎春,林目轩. BP 神经网络结合小波处理在城市扩张

预测中的应用——以长沙市区为例[J].中国土地科学,2008,22(1):39-47.

[10]王增彬,迟恒智.基于 BP 神经网络的济南市建设用地规模预测[J].水土保持研究,2007(5):222-224.

[11]郭杰,欧名豪,刘琼,等.基于 BP 神经网络的南通市建设用地需求预测[J].资源科学,2009,31(8):1355-1361.

[12]段祖亮,张小雷,权晓燕.基于 BP 神经网络模型的新疆建设用地分析[J].中国科学院研究生院学报,2009,26(4):451-457.

[13]朱志洁,张宏伟,韩军,等.基于 PCA-BP 神经网络的煤与瓦斯突出预测研究[J].中国安全科学学报,2013(4):45-50.

[14]蔡红,陈荣耀.基于 PCA-BP 神经网络的股票价格预测研究[J].计算机仿真,2011,28(3):365-368.

[15]陈建宏,郑荣凯,陈浩.基于 PCA 和 BP 神经网络边坡稳定性分析[J].中国安全生产科学技术,2014(5):142-147.

表 1 试验用水水质情况

水质参数	均值
化学耗氧量(COD <sub>Cr</sub> )(mg/L)	2 000
氨态氮(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N)含量(mg/L)	22
总磷(TP)含量(mg/L)	6.6
pH 值	6

1.2 试验装置

本试验主体反应装置由水解酸化池、生物转盘、接触氧化池和二沉池构成(表 2、图 1),辅助装置系统由配电箱、溶解氧在线监测仪、气体及液体转子流量计、搅拌机、蠕动泵与曝气机组成(图 2)。

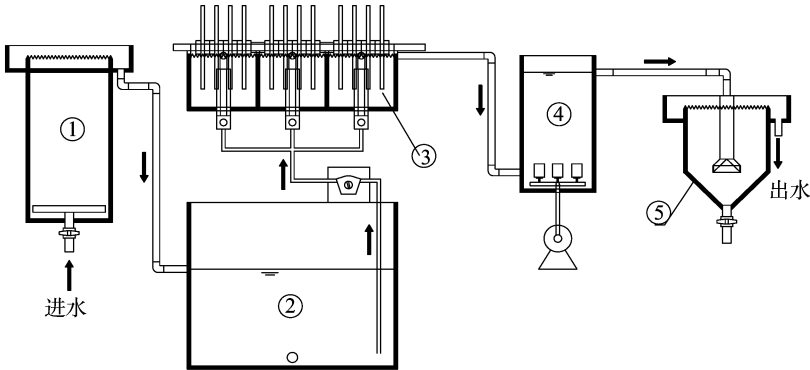
1.3 反应器运行条件

水力停留时间为 10 h 的情况下,控制温度为 20 ℃,通过

表 2 主要构成单元参数

构成单元	有效容积(L)	尺寸(cm)
水解酸化池	42	φ25×48
生物转盘	20	R15×57
接触氧化池	14	20×20×40
二沉池	8	φ25×19

调速电机改变转盘转速,研究转盘转速对生物转盘污染物去除率的影响。转盘转速分别为 6、8、10、12、16、20 r/min,主要观察在各转盘转速的条件下生物膜的状态以及 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 的去除率。当接触氧化池水力停留时间为 4 h 左右、水温 20 ℃时,由于生物接触氧化池中的溶解氧浓度会随着微生物的生长繁殖发生变化,因此溶解氧浓度分别为 0.5~1.0、2.5~3.0、4.5~5.0 mg/L。



1—水解酸化池; 2—调节池; 3—生物转盘; 4—接触氧化池; 5—二沉池  
图1 工艺流程图示

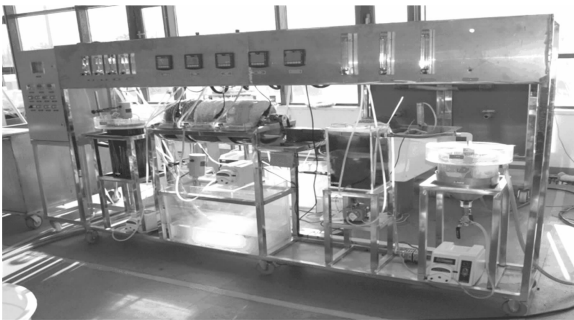


图2 试验装置图示

1.4 分析项目与测定方法

COD<sub>Cr</sub>的测定采用 HACH,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量的测定采用纳氏试剂分光光度法,总磷含量的测定采用钼锑抗分光光度法,溶解氧采用膜电极法,SV 含量的测定采用沉降法,MLSS 含量的测定采用烘干法,pH 值的测定采用 pH 计读取。

2 结果与分析

2.1 转盘转速对 COD<sub>Cr</sub>去除效果的影响

生物转盘转速对于生物转盘来说是在不曝气的情况下改变氧化池中溶解氧浓度的有效途径。合适的转盘转速可以使氧化池中的混合液均匀混合,产生良好的传质效果。同时,合理的转盘转速可以产生恰当的剪切力,生物转盘可以使新老膜良性交替,使生物膜一直处于比较好的活性状态,可以持续获得较好的污染物去除效果<sup>[13]</sup>。

在生物转盘转速从 6 r/min 增加到 12 r/min 的过程中,COD<sub>Cr</sub>去除率的变化并不是很明显,平均去除率仅从 78% 升到 87%。同时从混合液外观上来看,随着转速的增大,混合液更加均匀,混合液中溶解氧浓度随转速增大而增大,但同时混合液中悬浮污泥量也有所增加。当转盘转速增大到 16 r/min 甚至 20 r/min 时,COD<sub>Cr</sub>去除率下降明显,去除率约下降 10%(图 3),主要可能是转盘转速的增大会增强混合液的扰动程度,提升氧气溶解量,同时也会增加有机物与生物膜的接触与传递,而溶解氧浓度的增加也会促进有机物的降解。但另一方面,转速的增大导致转盘边界层变薄,底物基质传递到生物膜的时间变短,来不及被生物膜吸附吸收降解。因此,COD<sub>Cr</sub>去除率变化并没有很明显。当转速继续增大时,转盘边缘角速度逐渐增大,剪切力增大,发生生物膜的脱落,边界

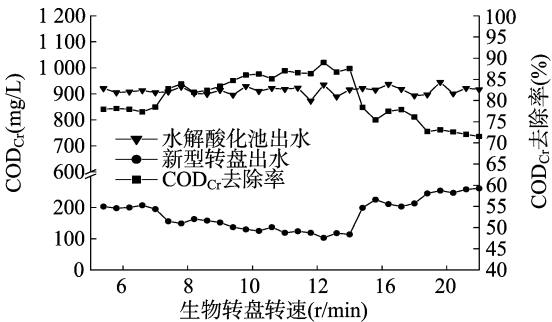


图3 转盘转速对生物转盘 COD<sub>Cr</sub>去除效率影响

层变薄以及微生物膜量减少导致生物转盘  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率的下降。

## 2.2 转盘转速对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果的影响

混合液中溶解氧的浓度与生物转盘转速成正比。当生物转盘转速当转速慢、混合不均匀时,溶解氧浓度低,此时好氧的硝化细菌在异养菌的竞争以及低溶解氧的抑制下,活性受到影响,所表现出来的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除效能不强,平均去除率仅为 52% 左右。当生物转盘转速增加到 12 r/min 时,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率高达 82% 左右。但转速超过 12 r/min 后,氨氮去除效率逐渐下降(图 4),主要原因是混合液对转盘盘片生物膜的剪切作用增强,使得部分生物膜脱落分散进入混合液中并随水流失,导致微生物量减少;此外,混合液中的悬浮污泥不适合生长繁殖慢、世代长的硝化细菌生长<sup>[14]</sup>。

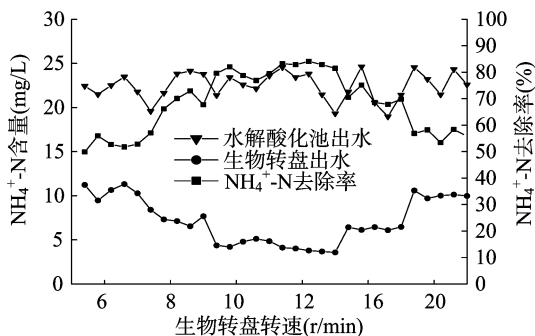


图4 生物转盘转速对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率影响

## 2.3 转盘转速对 TP 去除效果的影响

生物膜量对污染物去除效率影响很大,从外观状态可以看出,转速过大会导致生物膜变薄。总磷去除率后半段与生物膜量基本呈正相关,前半段则随转速增大而增加。在转速为 6 r/min 时,TP 平均去除率最低,为 32.35%;当转速为 12 r/min 时,平均去除率最高,接近 60%。而转速分别达到 16、20 r/min 时,去除率均出现下降,平均去除率相较最高平均去除率下降近 20% (图 5)。

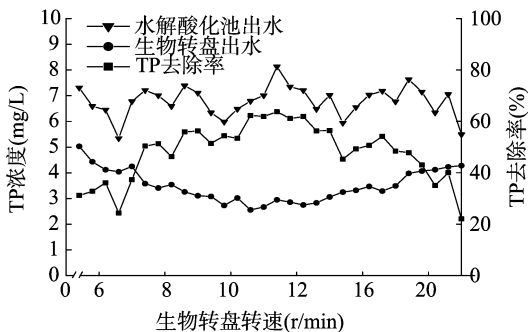


图5 生物转盘转速对总磷去除率影响

当转盘转速为 6 r/min 时,溶解氧浓度为 1.5 mg/L 左右,此时溶解氧量不充足、处于缺氧状态,好氧聚磷菌繁殖较慢,同时厌氧层增厚导致聚磷菌释磷作用增强,双重作用导致总磷去除率不高,仅为 32% 左右(图 6)。在转盘转速增大过程中,混合液搅动程度加强,促使溶解氧浓度升高,好氧聚磷菌繁殖变快,对污水中磷的吸收作用加强,同时加强的剪切作用,从而使转盘生物膜更换速度变快,内层厌氧环境到混合液中好氧环境转换周期变短,总磷的去除率有所提升<sup>[15]</sup>。转盘

转速过大时,生物膜脱落较多、较快,较强的剪切力使挂载的生物膜比较薄,生物膜量较少,导致总磷去除率下降较为明显。

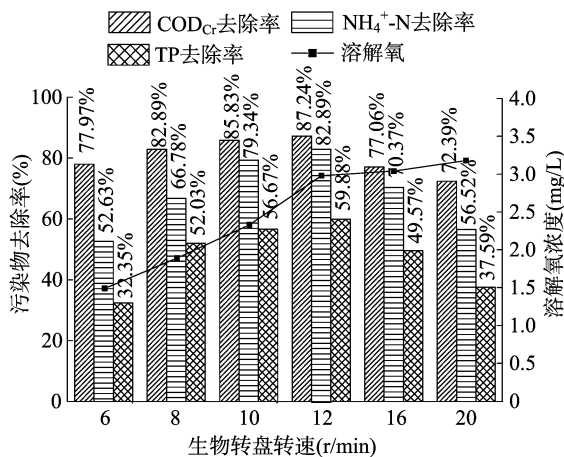


图6 生物转盘转速对各污染物平均去除率与溶解氧浓度的影响

上述关于生物转盘转速对生物转盘污染物去除效率性能的研究表明,对于不采用曝气装置的生物转盘来说,调节生物转盘转速可以有效控制混合液中的溶解氧浓度。适当增大转速会对污染物的去除有促进作用,但是过大的转盘转速会因为强的剪切作用而使生物膜无法达到,从而满意的厚度,进而影响整个系统的去除率;此外,过高的转速需要更多的能耗、增加运行成本。因此,综合考虑  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 的去除效果及运行成本,本试验最终确定转盘转速为 10 r/min。

## 2.4 接触氧化池水力停留时间对运行效果的影响

曝气装置是生物接触氧化池重要的装置之一,扮演着提供充足溶解氧以及充分搅拌混合均匀氧化池内液体的双重角色<sup>[16]</sup>。同时,搅拌混合作用可以有效提高污水中污染物与接触氧化池生物膜接触效率,并且产生合适的剪切力促进生物膜的新老更替。生物接触氧化池中需要适当的溶解氧浓度,浓度过低会使反应器缺氧,进而抑制好氧菌种的生长繁殖,降低污染物的去除率;同时较低浓度的溶解氧意味着搅拌作用不足,液体混合不均匀,容易产生混合死角,污泥堆积易腐败,水质变差产生恶臭。而曝气过大、溶解氧浓度过高会导致生物膜的老化,造成微生物细胞的自体分解<sup>[17]</sup>。

由于生物接触氧化池中的溶解氧浓度会随着微生物的生长繁殖发生变化,因此对于溶解氧的研究只能控制在一定浓度范围内。当溶解氧浓度为 0.5 ~ 1.0 mg/L 时,此时反应器内处于缺氧状态,所有的好氧微生物生长均受到抑制、生物活性降低,尤其是对好氧自养微生物的硝化细菌抑制作用更为严重,同时厌氧环境下微生物膜释磷作用更加明显<sup>[18]</sup>。当溶解氧浓度增加到 2.5 ~ 3.0 mg/L 时,相对于  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率的变化,铵态氮和总磷去除率波动更加明显,尤其是铵态氮平均去除率从 45% 增加到 66%,总磷也略有增加。污染物整个去除率的变化不仅是因为反应器中溶解氧的增加,同时通过增加曝气量增加溶解氧的方式促使混合液搅动强度更大、混合更加均匀,增加了污水中污染物与生物膜的接触效率,这也是污染物去除率增加的一个原因。当溶解氧浓度升到 4.5 ~ 5.0 mg/L 时,污染物去除效率增加不明显,主要是因为溶解

氧浓度过高时,好氧微生物大量消耗污水中的污染物,底物浓度减少,微生物营养不充足,部分微生物老化自体分解,导致微生物膜厚度减小。另外,曝气过强导致对载体上的生物膜剪切力太大,生物膜纷纷脱落,进而流失,也是生物膜量减少的原因(图7、图8)。因此,污染物去除率增加不明显,实际上严重时会导致出水水质变差、去除率骤降,甚至反应器停止运行。

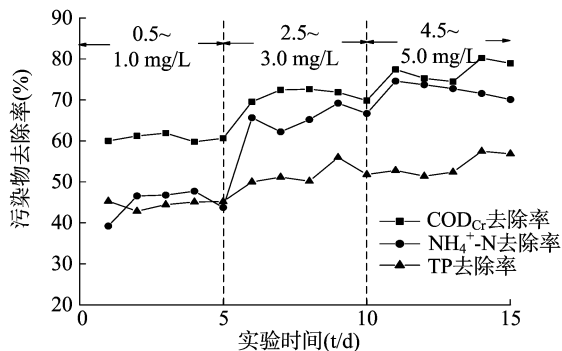


图7 不同 DO 浓度下污染物去除率变化

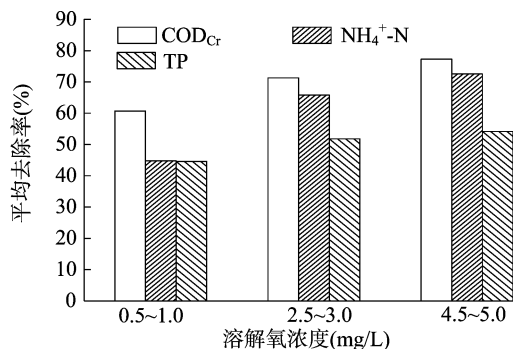


图8 不同 DO 浓度下污染物平均去除率

### 3 结论

本试验主要利用单因素分析法,分别通过改变生物转盘转速与生物接触氧化池反应器水力停留时间来控制溶解氧浓度。通过观察生物膜状态以及监测  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量、TP 含量等污染物指标,得到如下结论:(1)在水力停留时间为 10 h 时,控制温度在 20 ℃ 的情况下,结合污染物的去除效率以及生物转盘转动能耗,试验确定生物转盘转速为 10 r/min,此时生物转盘对乳制品工业废水中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 的平均去除率分别达到 85.83%、79.34%、56.67%,生物转盘出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量、TP 含量分别约为 129、4.67、2.81 mg/L。生物转盘处理废水过程中保持了较好的去除率,维持了适宜的生物膜厚度和良好的微生物活性。(2)针对生物接触氧化池运行特征,确定水力停留时间为 4 h,挑选溶解氧浓度为研究变量。遵循去除率与能耗相结合原则,溶解氧浓度在 2.5~3 mg/L 之间为最佳运行条件。在试验确定的最优运行条件下,接触氧化池对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 的平均去除率分别为 71.27%、65.8%、51.82%,接触氧化池出水分别达到 55、4.44、1.42 mg/L,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 B 标准。

### 参考文献:

- [1] 高延耀,顾国维,周琪. 水污染控制工程[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2007:84-85.
- [2] 李莎,王凯,王优魁. 生物转盘技术的应用现状及其研究进展[J]. 山西建筑,2010,36(14):164-166.
- [3] Kaewsuk J, Thorasampan W, Thanuttamavong M, et al. Kinetic development and evaluation of membrane sequencing batch reactor (MSBR) with mixed cultures photosynthetic bacteria for dairy wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Management, 2010,91(5):1161-1168.
- [4] Bick A, Plazas T J G, Yang F, et al. Immersed membrane bioreactor (IMBR) for treatment of combined domestic and dairy wastewater in an isolated farm: an exploratory case study implementing the facet analysis (FA)[J]. Desalination, 2009, 249(3):1217-1222.
- [5] Pakshirajan K, Kheria S. Continuous treatment of coloured industry wastewater using immobilized *Phanerochaete chrysosporium* in a rotating biological contactor reactor[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 101:118-123.
- [6] Mukherji S, Chavan A. Treatment of aqueous effluents containing non-aqueous phase liquids in rotating biological contactor with algal bacterial biofilm[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 200:459-470.
- [7] Sahinkaya E, Dilek F B. Biodegradation of 4-CP and 2,4-DCP mixture in a rotating biological contactor (RBC)[J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, 31(2):141-147.
- [8] Duque A F, Bessa V S, Varvolho M F, et al. Bioaugmentation of a rotating biological contactor for degradation of 2-fluorophenol[J]. Bioresource Technology, 2011, 102:9300-9303.
- [9] Egli K, Bosshard F, Werlen C, et al. Microbial composition and structure of a rotating biological contactor biofilm treating ammonium-rich wastewater without organic carbon[J]. Microbial Ecology, 2003, 45(4):419-432.
- [10] Wyffels S, Pynaert K, Boeckx P, et al. Identification and quantification of nitrogen removal in a rotating biological contactor by  $N-15$  tracer techniques[J]. Water Research, 2003, 37(6):1252-1259.
- [11] 晁雷,赵晓光,李晓东,等. 国内外乳制品工业废水生物处理技术研究进展[J]. 江苏农业科学,2014,42(1):1-4.
- [12] 李平,洗萍,邓慧,等. MICR 反应器处理乳品废水的运行特性研究[J]. 工业水处理,2012,32(1):40-43.
- [13] 张倩倩,魏维利,王俊安等. 生物转盘技术研究进展[J]. 中国水运,2014(2):182-185.
- [14] 林燕,孔海南,王茸影等. 异养硝化作用的主要特点及其研究动向[J]. 环境科学 2008(11):108-111.
- [15] 金文标,王建芳,赵庆良,等. 好氧-沉淀-厌氧工艺剩余污泥减量性能和机理研究[J]. 环境科学,2008,29(3):726-732.
- [16] 丁晓玲,贾春宁. 生物接触氧化工艺处理难降解有机废水的研究[J]. 水处理技术,2005,31(7):20-24.
- [17] 陈建发,陈艺敏,黄慧珍,等. 新型填料曝气生物滤池处理抗生素类废水[J]. 环境工程学报,2014,8:223-227.
- [18] 李亚峰,张晓宁,刘洪涛,等. DO 的质量浓度和温度对配合厌氧氨氧化的亚硝化反应的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,09:191-194.