

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.002

改良型SBR工艺对奶牛场废水中抗生素的去除效果

黄晓霞^{1,2}, 邱兆富^{1,2}, 曹国民^{1,2}, 孙贤波^{1,2}, 晏广^{1,2}, 卞晓彤^{1,2}

(1. 华东理工大学 资源与环境工程学院, 上海 200237; 2. 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237)

摘要: 奶牛场废水中的有机物和抗生素对其还田利用不利,为此,采用带缺氧区的推流式SBR(简称改良型SBR)工艺处理干清粪条件下间歇产生的奶牛场废水,重点考察其对抗生素的去除效果。结果表明,当进水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP浓度分别为1 234~4 696、768~1 365、880~1 370、5.62~12.02 mg/L时,经改良型SBR工艺处理后,出水COD可降至401~544 mg/L、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 始终低于10 mg/L, TN平均损失率为22.38%, TP基本没有被去除。奶牛场废水中磺胺类和 β -内酰胺类抗生素总浓度为3.84~4.48 $\mu\text{g/L}$,改良型SBR工艺对其总去除率可达到72.97%~90.82%,且对10种较高浓度的磺胺类抗生素(每种添加浓度均为50 $\mu\text{g/L}$,共计500 $\mu\text{g/L}$)也有很好的去除效果,去除率可达95.75%~95.97%。生物降解是奶牛场废水中磺胺类和 β -内酰胺类抗生素的主要去除途径,另外,磺胺类抗生素的去除与其分子结构中S—N键的断裂有重要关系。在不影响COD去除效果的条件下,调整反应器的混合液回流量或进水量均可减少碱度投加量,从而降低运行成本。

关键词: 改良型SBR工艺; 奶牛场废水; 抗生素; 碱度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)01-0009-07

Removal of Antibiotics from Dairy Farm Wastewater by Modified SBR Process

HUANG Xiao-xia^{1,2}, QIU Zhao-fu^{1,2}, CAO Guo-min^{1,2}, SUN Xian-bo^{1,2},
YAN Guang^{1,2}, BIAN Xiao-tong^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, Shanghai 200237, China)

Abstract: Organic matter and antibiotics in dairy farm wastewater are detrimental to their return to the field. Therefore, a modified SBR (plug-flow SBR) process with anoxic zone was applied to treat the dairy farm wastewater produced intermittently under the condition of dry manure cleaning, and the removal of antibiotics by the process was investigated. When COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP concentrations in the influent were 1 234~4 696 mg/L, 768~1 365 mg/L, 880~1 370 mg/L and 5.62~12.02 mg/L respectively, after treatment by modified SBR process, the effluent COD was decreased to 401~544 mg/L, the effluent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was always less than 10 mg/L, the average loss rate of TN was 22.38%, and TP was basically not removed. The total concentration of sulfonamide and β -lactam antibiotics in the dairy farm wastewater ranged from 3.84 $\mu\text{g/L}$ to 4.48 $\mu\text{g/L}$, and the total removal efficiency of the two kinds of

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07207002-02)

通信作者: 邱兆富 E-mail: zfqiu@ecust.edu.cn

antibiotics by the modified SBR process reached 72.97%–90.82%. The modified SBR process also had good removal performances to 10 kinds of sulfonamide antibiotics with high concentrations (50 $\mu\text{g/L}$ for each, 500 $\mu\text{g/L}$ in total), and the removal efficiency reached 95.75%–95.97%. Biodegradation was the main pathway to remove sulfonamide and β -lactam antibiotics from dairy farm wastewater. In addition, the removal of sulfonamide antibiotics had an important relationship with the breaking of S—N bonds in their molecular structure. Under the condition that COD removal was not affected, the dosage of alkalinity could be reduced by adjusting the return flow of mixed liquid or the inflow of the reactor, thus reducing the operational cost.

Key words: modified SBR process; dairy farm wastewater; antibiotics; alkalinity

畜禽养殖污染已成为我国最重要的农业面源污染源之一。随着畜禽养殖业日益向集约化、规模化方向发展,抗生素被广泛用于畜禽养殖等农业生产活动中。大多数抗生素被动物摄入后并不能完全被吸收,大约75%及以上通过尿液或粪便以原药或代谢产物的形式排泄到环境中^[1-2]。抗生素及其转化产物在环境中通常具有持久性和累积性^[3],并为抗生素耐药细菌和抗生素抗性基因的维持、转移和传播提供条件,长期下来会对生态系统产生严重影响^[4-5]。

目前畜禽养殖废水的处理方法主要有物化法和生物法等,其中物化法对废水中的有机物和抗生素去除效果较好^[6],但该方法处理费用较高而且管理复杂,而生物法具有运行成本低和处理效果好的优点,而且厌氧/缺氧/好氧组合工艺往往比单独的某种工艺效果更好^[7]。畜禽养殖废水有机物浓度高,若直接还田利用会对农作物造成伤害,而且目前畜禽养殖废水大多只进行简单的厌氧处理,而厌氧处理设施对某些抗生素的去除率较低^[8-9]。此外,目前关于畜禽养殖废水处理的研究主要集中在常规污染物(COD、氮、磷等)方面^[10-11],很少关注抗生素的去除情况。

为更好地去除干清粪条件下产生的奶牛场废水中的COD和抗生素,上海市某奶牛养殖场拟将长宽比为3.5:1的厌氧池改造为SBR池。为此,笔者设计了一种长宽比为3.5:1的带缺氧区的推流式SBR反应器(简称改良型SBR),在小试规模下对干清粪条件产生的奶牛场废水进行处理,在去除有机物并尽可能保留氮、磷的同时考察其对抗生素的去除效果,并尽可能降低处理成本,以期为奶牛场废水处理后的还田利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

小试所用改良型SBR反应器由有机玻璃制作,长 \times 宽 \times 高=530 mm \times 150 mm \times 400 mm,有效容积为23 L。该反应器平均分成4格,其中第1格为缺氧区,其余3格为好氧区(见图1)。

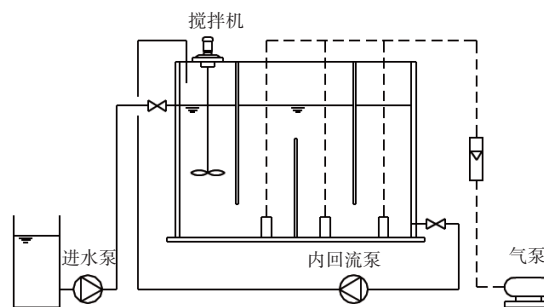


图1 改良型SBR工艺示意

Fig.1 Schematics of modified SBR process

反应器运行周期为24 h,包括:进水15 min \rightarrow 闲置30 min \rightarrow 第1格搅拌、其余3格曝气22.5 h \rightarrow 沉淀30 min \rightarrow 排水15 min。试验用水进入反应器第1格,从最后一格好氧区排水。采用电加热棒维持反应器内的水温在20~25 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 进水水质

试验用水取自采用干清粪生产工艺的上海市某奶牛养殖场原水池。每次取水样后将其置于冷库(0~4 $^{\circ}\text{C}$)储存备用。为避免原水中的固体堵塞管路,采用80目筛网过滤后使用。试验期间废水COD为1 234~4 696 mg/L, pH值为7.54~8.78, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP分别为768~1 365、880~1 370、5.62~12.02 mg/L。

1.3 分析项目及方法

COD、TN、TP采用HACH比色法测定; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、

NO_2^- -N、 NO_3^- -N分别采用纳氏试剂分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法、紫外分光光度法测定;DO采用便携式溶氧仪测定;pH值采用便携式pH计测定;MLSS、MLVSS采用重量法测定;抗生素的测定方法参考文献[12]。

2 结果分析与讨论

2.1 反应器的启动

改良型SBR工艺的接种污泥取自上海某城市污水处理厂(主体工艺为 A^2/O),具备生物脱氮除磷功能。将该污水处理厂好氧池末端的泥水混合液置于30 L的塑料桶中静置沉降30 min后排掉上清液,浓缩后的污泥浓度约为9 g/L,随后将污泥带回实验室进行接种,接种污泥的体积为反应器有效容积的1/3。

启动初期(1~44 d),反应器的4个格室均为好氧,容积负荷为 $0.109 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。经过约20 d的适应期,反应器出水COD稳定在550 mg/L左右,而且即使平均进水COD从1 500 mg/L增加到3 000

mg/L,出水COD浓度也几乎不受影响。前30 d左右主要是氨氮的亚硝化过程,之后亚硝酸盐氧化菌(NO_B)开始增殖,亚硝酸盐逐渐被NO_B氧化为硝酸盐。因硝化作用导致反应器从第15天起出水pH值有所下降,第32天起则需要向反应器投加碳酸氢钠以补充硝化过程所消耗的碱度。为了尽可能地减少碳酸氢钠投加量,本试验想通过缺氧反硝化产碱来实现这一目的,于是从第45天起将反应器的第1格改为缺氧区,后3格仍为好氧区。启动后期(45~85 d)反应器的容积负荷为 $0.233 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。第59天起 NO_2^- -N浓度出现快速下降趋势,表明NO_B快速增殖。第85天起出水中基本检测不到 NO_2^- -N, NO_3^- -N逐渐占据优势地位,此时COD和氨氮的去除率分别达到80%和95%以上,可以认为反应器启动成功。

2.2 稳定运行阶段各指标的变化情况

改良型SBR工艺启动成功后,详细考察了不同工况条件下(见表1)对COD和抗生素的去除效果。

表1 稳定运行阶段各工况运行条件

Tab.1 Operating conditions during stable operation stage

运行阶段	运行时间/d	容积负荷/ ($\text{kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	进水COD/ TN	进水量/ ($\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$)	混合液回流 量/ ($\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$)	污泥负荷/ ($\text{kgCOD} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{MLSS} \cdot \text{d}^{-1}$)	MLSS/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	碳酸氢钠添 加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	抗生素添加 量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
A	86~99	0.233	3.24	1.64	32.80	0.065	3.5	2 134	未添加
B	100~132	0.304	3.34	1.64	4.92	0.060	5.0	1 829	未添加
C	133~150	0.456	3.34	2.46	5.90	0.078	6.0	935	未添加
D	151~173	0.162	1.59	2.46	5.90	0.034	5.2	2 439	50×10
E	174~187	0.216	1.59	3.27	7.85	0.036	5.6	1 988	50×10

2.2.1 COD去除效果

稳定运行阶段改良型SBR工艺对奶牛场废水中COD的去除效果如图2所示。可见,COD去除率与其进水浓度有一定的关系,当COD进水浓度较高时,其去除率也较高。当进水COD在3 076~4 696 mg/L之间时(阶段A~C),COD去除率比较稳定,为83.48%~90.46%,出水COD在417~544 mg/L之间。当进水COD在1 286~2 208 mg/L之间时(阶段D、E),COD去除率有一定程度的下降,为65.86%~81.61%,出水COD在401~470 mg/L之间,该阶段COD去除率降低,除了与进水COD浓度较低有关,还可能是因为进水中抗生素的人为投加对反应器中COD降解菌的生长产生了一定的抑制作用。虽然奶牛场废水的水质变化大,但该反应器对COD去除效果一直较好,且耐负荷冲击能力很强。

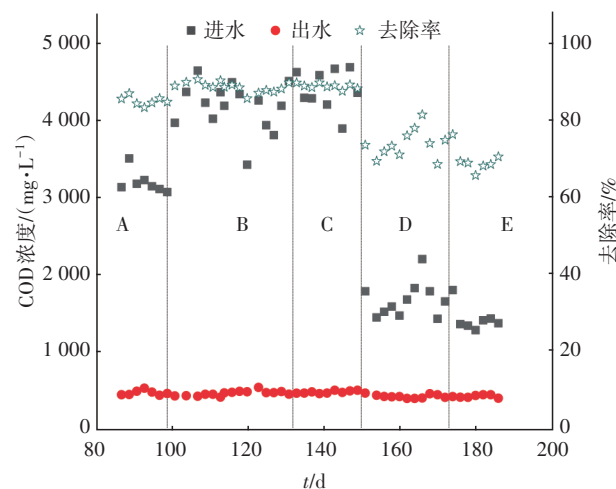


图2 稳定运行阶段改良型SBR工艺中COD浓度的变化

Fig.2 Change of COD concentration in modified SBR process during stable operation stage

2.2.2 抗生素去除效果

磺胺类和 β -内酰胺类抗生素因抗菌谱广、抗菌活性好,对治理细菌性感染疾病有很好的作用,因此在畜禽养殖业中被广泛使用^[13]。本试验选取畜禽养殖废水中较常见的11种磺胺类抗生素[磺胺嘧啶(SDZ)、磺胺噻唑(STZ)、磺胺甲基嘧啶(SMR)、甲氧苄啶(TMP)、磺胺二甲嘧啶(SMZ)、磺胺甲噻二唑(SMT)、磺胺甲氧基嘧啶(SMP)、磺胺氯嘧啶(SCP)、磺胺甲恶唑(SMX)、磺胺间二甲氧嘧啶(SMD)、磺胺间甲氧嘧啶(SMM)]和7种 β -内酰胺类抗生素[普鲁卡因青霉素(PPG)、头孢喹肟(CEFQ)、氨苄西林(AMP)、头孢噻肟(CEFT)、青霉素G钾盐(PCG)、氯唑青霉素钠水合物(C LX)、苄星青霉素G(BPG)]为目标物,在反应器对COD去除效果相对稳定时(即稳定运行阶段),开始对进出水中的这些抗生素浓度进行检测分析,以期对奶牛场废水中抗生素的去除提供一定的数据支持。

① 原水中抗生素的去除效果

分别在第98天(阶段A)、第122天(阶段B)、第128天(阶段B)、第142天(阶段C)和第150天(阶段C)对改良型SBR工艺进出水中的18种目标抗生素进行了检测分析,结果如图3所示(每种抗生素5次检测结果的平均值)。

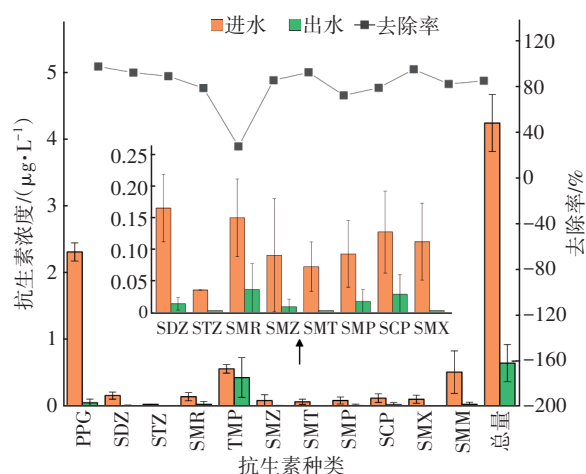


图3 改良型SBR工艺对低浓度抗生素的去除效果

Fig.3 Removal effect of antibiotics with low concentration by modified SBR process

由图3可知,奶牛场废水中共检出了10种磺胺类和1种 β -内酰胺类抗生素即PPG,且PPG浓度占所检出抗生素总浓度的50%以上,其他6种 β -内酰胺类抗生素在反应器进出水中均未检出,这可能是

因为 β -内酰胺类抗生素易水解,所以在环境中不易被检出^[14]。改良型SBR工艺对TMP的去除效果不佳,且在第128天出现了出水浓度高于进水浓度的现象,其他研究也有类似的结果^[15-16]。出现该现象的原因可能是进水中TMP的一部分以络合物形式进入反应器,在生物处理过程中由于活性酶组分的存在使得这部分TMP解离出来,造成最终出水表现TMP浓度升高^[17-18];另外,TMP的主要代谢产物是具有活性的N⁴-乙酰化合物,而这种化合物在生物处理过程中有转化成母体物质的风险,所以也有可能造成反应器出水TMP浓度高于进水浓度^[14]。

干清粪奶牛场废水中磺胺类和 β -内酰胺类抗生素总浓度为3.84~4.48 μg/L,总体上改良型SBR工艺能够很好地去掉奶牛场废水中的磺胺类抗生素和PPG,且去除效果相对稳定,总去除率在72.97%~90.82%之间,平均值为84.97%。

污泥吸附和生物降解是该系统中磺胺类抗生素得以去除的重要原因^[19],其中生物降解是主要途径^[4]。对于 β -内酰胺类抗生素来说,生物降解同样是其得以去除的重要机制,污泥吸附作用较小^[20-21]。抗生素的生物降解机制主要包括共代谢作用(此时抗生素不作为系统中微生物生长的碳源和能源)和混合基质生长作用(此时抗生素作为系统中微生物生长的碳源和能源)^[22-23]。共代谢作用主要是系统生化处理过程中非特异性分解酶(如氨单加氧酶AMO)把抗生素分解转化为中间产物;混合基质生长作用则可以实现抗生素的矿化^[20,22],这两种作用均可以使系统中的抗生素浓度降低。

② 原水中添加抗生素的去除效果

由于进水中磺胺类抗生素浓度较低,为了研究改良型SBR工艺对较高浓度的磺胺类抗生素是否也有很好的去除效果,自第154天开始,每天向进水中添加原水中检测到的10种磺胺类抗生素,每种添加浓度均为50 μg/L,并分别在第173天(阶段D)和第187天(阶段E)考察反应器对抗生素的去除效果,结果见图4(每种抗生素2次检测结果的平均值)。可见,改良型SBR工艺能很好地去掉浓度较高的10种磺胺类抗生素,且去除效果非常稳定,总去除率在95.75%~95.97%之间,平均值为95.86%。一般来说,实际废水中的抗生素浓度比较低,系统对抗生素的去除以共代谢作用为主,但当进水中抗生素浓度较高时(如本试验中人为添加10种磺胺类

抗生素),则系统对抗生素的去除为共代谢和混合基质生长共同作用的结果。

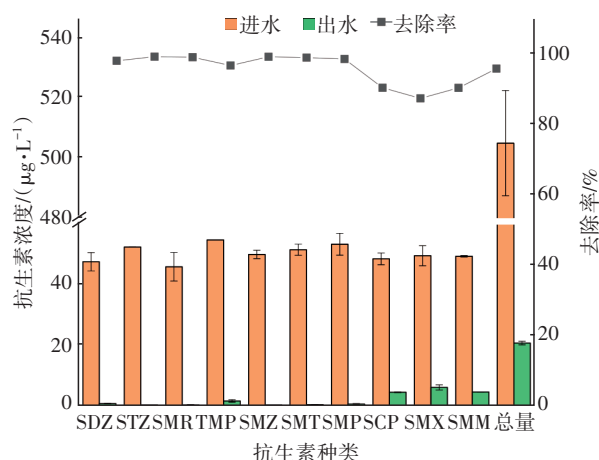


图4 改良型SBR工艺对较高浓度抗生素的去除效果

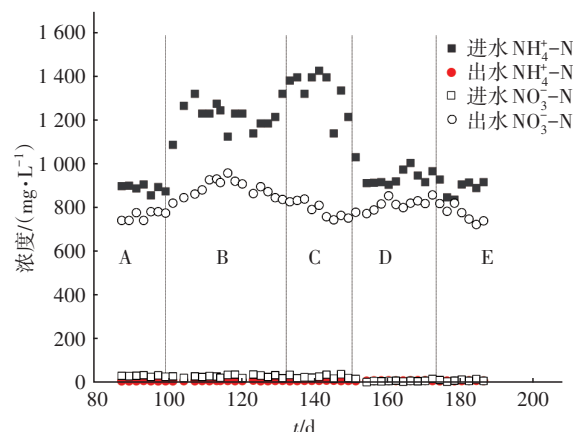
Fig.4 Removal effect of antibiotics with higher concentration by modified SBR process

此外,磺胺类抗生素的有效分解与其分子结构中S—N键的断裂有重要关系^[24-25],由本试验结果可以推测,间歇型缺氧好氧交替运行的环境有利于磺胺分子中S—N键的断裂,从而实现了对磺胺类抗生素较高的去除率。而TMP分子结构中不含S—N键,这可能也是低浓度抗生素条件下TMP去除效率不高,甚至出现负去除的原因之一。值得注意的是,抗生素的去除效率与其初始浓度也有一定的关系^[4],当进水中的抗生素浓度较高时,其相应的去除率也较高。图4表明,当进水TMP提高到50 μg/L时,与低浓度情况下相比,其去除率得到了明显提高,其原因除了进水中TMP的初始浓度提高以外,还可能是因为进水中的TMP只有极少量以络合物形式进入反应器,且反应器中只有极少量的TMP代谢产物转化为TMP。

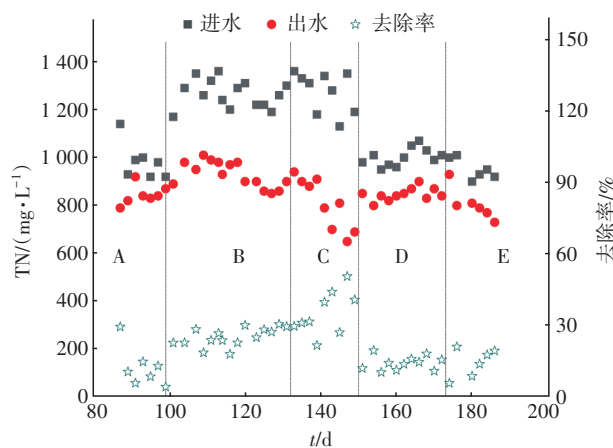
2.2.3 氮、磷的变化情况

稳定运行阶段改良型SBR工艺中氮浓度的变化情况如图5所示。可见,奶牛场废水中的总氮主要为氨氮,说明进水中有机氮较少。在反应器稳定运行阶段,出水氨氮始终稳定在10 mg/L以下,去除率≥99%;而硝态氮和总氮浓度的变化较为同步,反应器出水中的总氮大都以硝态氮形式存在。在整个试验阶段,反应器内发生了一定程度的反硝化脱氮,总氮平均损失率为22.38%。当然,本试验的目的不在于脱氮,系统中反硝化作用的存在是为了减

少外加碱度的投加。由试验结果可以看出,改良型SBR工艺较好地保留了系统中的氮元素,有利于实现出水还田的目标。



a. 氨氮、硝态氮浓度



b. 总氮浓度

图5 稳定运行阶段改良型SBR工艺中氮浓度的变化情况

Fig.5 Change of nitrogen concentration in modified SBR process during stable operation stage

奶牛场废水中的总磷浓度为5.62~12.02 mg/L。反应器出水总磷浓度略高于进水,整个处理过程中磷元素基本没有去除。该系统很大程度地保留了奶牛场废水中的磷,有利于废水的还田利用。

2.2.4 碱度投加

由表1、图2和图5(a)可知,在进水量相同、进水水质相近的情况下,混合液回流量并非越大越好,通过调整混合回流量可显著减少碱度投加量。当混合液回流量由32.80 L/d降为4.92 L/d后,碳酸氢钠的投加量由2134 mg/L降至1829 mg/L,同时COD和氨氮的去除效果并未受到明显影响。在进水水质相近的情况下,通过调整进水量也可显著减少碱度投加量。当进水量由1.64 L/d增至2.46 L/d后,

碳酸氢钠投加量由 1 829 mg/L 降至 935 mg/L, 同时 COD 和氨氮的去除效果并未受到明显影响。由图 3 可知, 减少碱度投加量也可以使磺胺类和 β -内酰胺类抗生素的去除率维持在 72% 以上。

3 结论

① 改良型 SBR 工艺适用于处理干清粪条件下间歇产生的奶牛场废水, 其抗负荷冲击能力强, COD 去除效果较好, 稳定运行阶段该工艺的总氮平均损失率为 22.38%, 总磷基本没有被去除, 其出水有利于还田利用。

② 干清粪奶牛场废水中磺胺类和 β -内酰胺类抗生素的总浓度为 3.84 ~ 4.48 $\mu\text{g/L}$, 改良型 SBR 工艺对这两类抗生素的总去除率达到 72.97% ~ 90.82%。当向反应器进水中人为添加 10 种磺胺类抗生素(每种的添加浓度均为 50 $\mu\text{g/L}$)时, 改良型 SBR 工艺能很好地去除这些抗生素, 且去除效果较稳定, 总去除率在 95.75% ~ 95.97% 之间。

③ 奶牛场废水中磺胺类和 β -内酰胺类抗生素的去除与污泥吸附和生物降解有关, 其中生物降解是主要机制。另外, 系统中磺胺类抗生素的去除与其分子结构中 S—N 键的断裂有重要关系。

④ 在不影响 COD 去除的条件下, 调整反应器的混合液回流量或进水量均可减少碱度的投加量, 从而降低运行成本, 并且即使减少了碱度投加量, 也可以使系统中磺胺类和 β -内酰胺类抗生素的总去除率维持在 72% 以上。

参考文献:

- [1] ZHANG M, LIU Y S, ZHAO J L, *et al.* Occurrence, fate and mass loadings of antibiotics in two swine wastewater treatment systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 1421-1431.
- [2] ZHANG R L, PEI J Y, ZHANG R J, *et al.* Occurrence and distribution of antibiotics in mariculture farms, estuaries and the coast of the Beibu Gulf, China: bioconcentration and diet safety of seafood [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 154: 27-35.
- [3] WALLACE J S, GARNER E, PRUDEN A, *et al.* Occurrence and transformation of veterinary antibiotics and antibiotic resistance genes in dairy manure treated by advanced anaerobic digestion and conventional treatment methods [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 236: 764-772.
- [4] CHEN J F, XIE S G. Overview of sulfonamide biodegradation and the relevant pathways and microorganisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640/641: 1465-1477.
- [5] ZHANG Y P, NIU Z G, ZHANG Y, *et al.* Occurrence of intracellular and extracellular antibiotic resistance genes in coastal areas of Bohai Bay (China) and the factors affecting them [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 236: 126-136.
- [6] 王志刚. 电化学法对养殖废水中污染物去除研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.
WANG Zhigang. Study on the Removal of Pollutants in Aquaculture Wastewater by Electrochemical Method [D]. Chongqing: Southwest University, 2013 (in Chinese).
- [7] ARIAS A, ALVARINO T, ALLEGUE T, *et al.* An innovative wastewater treatment technology based on UASB and IFAS for cost-efficient macro and micropollutant removal [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 359: 113-120.
- [8] CHEN J, LIU Y S, ZHANG J N, *et al.* Removal of antibiotics from piggery wastewater by biological aerated filter system: treatment efficiency and biodegradation kinetics [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 70-77.
- [9] CHEN Y S, ZHANG H B, LUO Y M, *et al.* Occurrence and dissipation of veterinary antibiotics in two typical swine wastewater treatment systems in East China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184 (4): 2205-2217.
- [10] 张寅丞, 梅翔, 郭慧, 等. 移动床生物膜反应器处理奶牛场废水的性能研究 [J]. *水处理技术*, 2013, 39 (10): 80-84.
ZHANG Yincheng, MEI Xiang, GUO Hui, *et al.* Performances of moving bed biofilm reactor for the treatment of dairy farm wastewater [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(10): 80-84 (in Chinese).
- [11] 李姗姗. 物化-生化组合工艺处理完达山奶牛场废水的实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
LI Shanshan. Experiment Research on Treatment of Dairy Cattle Wastewater of Wandashan with Integrated Technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [12] 韩跃飞. 养猪场废水中抗生素去除技术研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2019.
HAN Yuefei. Research on Treatment Technology of

- Antibiotic in Swine Wastewater [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2019 (in Chinese).
- [13] 李超. 新疆地区典型污染源抗生素抗性基因的污染分布的研究分析[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
- LI Chao. Distribution and Contamination Levels of ARGs from Typical Pollution Sources in Xinjiang [D]. Shihezi: Shihezi University, 2016 (in Chinese).
- [14] 阿丹. 人工湿地对14种常用抗生素的去除效果及影响因素研究[D]. 广州: 暨南大学, 2012.
- A Dan. The Removal Efficiency and Impact Factors of 14 Antibiotics in Constructed Wetlands [D]. Guangzhou: Jinan University, 2012 (in Chinese).
- [15] ALVARINO T, SUAREZ S, LEMA J M, *et al.* Understanding the removal mechanisms of PPCPs and the influence of main technological parameters in anaerobic UASB and aerobic CAS reactors[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 278: 506-513.
- [16] GURKE R, ROESSLER M, MARX C, *et al.* Occurrence and removal of frequently prescribed pharmaceuticals and corresponding metabolites in wastewater of a sewage treatment plant[J]. Science of the Total Environment, 2015, 532: 762-770.
- [17] 殷小伟, 强志民, 贲伟伟, 等. 污水厂不同生物处理工艺对抗生素的去除效果[J]. 中国给水排水, 2012, 28(22): 22-26.
- YIN Xiaowei, QIANG Zhimin, BEN Weiwei, *et al.* Removal of antibiotics by different biological processes in municipal sewage treatment plants[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(22): 22-26 (in Chinese).
- [18] LINDQVIST N, TUHKANEN T, KRONBERG L. Occurrence of acidic pharmaceuticals in raw and treated sewages and in receiving waters[J]. Water Research, 2005, 39(11): 2219-2228.
- [19] YANG S F, LIN C F, WU C J, *et al.* Fate of sulfonamide antibiotics in contact with activated sludge—sorption and biodegradation [J]. Water Research, 2012, 46(4): 1301-1308.
- [20] 张翔宇, 李茹莹, 季民. 污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5276-5288.
- ZHANG Xiangyu, LI Ruying, JI Min. Mechanisms and influencing factors of antibiotics removal in sewage biological treatment [J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 5276-5288 (in Chinese).
- [21] LI B, ZHANG T. Biodegradation and adsorption of antibiotics in the activated sludge process [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(9): 3468-3473.
- [22] LUO Y L, GUO W S, NGO H H, *et al.* A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2014, 473/474: 619-641.
- [23] 崔迪, 邓红娜, 庞长洸, 等. 生物法去除水环境中磺胺甲恶唑的研究进展[J]. 中国给水排水, 2019, 35(24): 32-38.
- CUI Di, DENG Hongna, PANG Changlong, *et al.* Progress in the study of the removal of sulfamethoxazole by biological methods in water environment [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(24): 32-38 (in Chinese).
- [24] QIAN M C, YANG L Y, CHEN X K, *et al.* The treatment of veterinary antibiotics in swine wastewater by biodegradation and Fenton-like oxidation[J]. Science of the Total Environment, 2020, 710: 136299.
- [25] NOMURA Y, FUKAHORI S, FUKADA H, *et al.* Removal behaviors of sulfamonomethoxine and its degradation intermediates in fresh aquaculture wastewater using zeolite/TiO₂ composites[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 340: 427-434.

作者简介: 黄晓霞(1995-), 女, 山西运城人, 硕士, 研究方向为畜禽养殖废水处理。

E-mail: hxxqaz120@163.com

收稿日期: 2020-05-06

修回日期: 2020-05-28

(编辑: 刘贵春)