

厌氧折流板反应器对分散养猪冲洗水有机物去除特性研究

肖 宇^{1,2,3}, 沈志强^{2,3}, 周岳溪^{2,3*}, 武福平¹

(1.兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2.中国环境科学研究院水污染控制技术研究中心, 北京 100012; 3.中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘 要:以厌氧折流板反应器(ABR)处理分散及小规模养猪冲洗废水,对比了序批进水和连续进水时的运行性能,考察了序批进水 ABR 单个进水周期内污染物的去除特性,并以三维荧光光谱和离子色谱对特征有机物进行了解析。结果表明:序批和连续进水 ABR 的 COD 去除率均大于 60%,但前者的去除率小于后者;COD 负荷为 $1.40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,序批 ABR 出水平均 COD($600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)大于连续 ABR($350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。序批进水 COD 在 ABR 第一格去除率最大,且进水后其去除速度快,经 12 h 趋于稳定。类蛋白荧光峰的变化规律与 COD 一致,有机物水解酸化主要发生在进水后 4 h 内,甲酸、乙酸和丙酸等小分子物质也主要在此期间生成。

关键词:厌氧折流板反应器;分散养猪;冲洗水;序批运行;溶解性有机物

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)10-2004-08 doi:10.11654/jaes.2015.10.024

Removal of Organics in Scattered Piggery Washing Wastewater by Anaerobic Baffled Reactor

XIAO Yu^{1,2,3}, SHEN Zhi-qiang^{2,3}, ZHOU Yue-xi^{2,3*}, WU Fu-ping¹

(1.School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Research Center of Water Pollution Control Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The present study explored treatment of washing wastewater from scattered and small-scale piggeries by anaerobic baffled reactor (ABR). The operating performances of two influent patterns --sequencing batch (SB) and continuous operation (CO) were compared. The removals of pollutants by SB-ABR in an operation cycle were investigated. The signature organics were detected by three-dimensional fluorescence spectrum and ion chromatography. The removal rates of COD by SB- and CO- ABR were greater than 60%, with CO-ABR higher than SB-ABR. The average COD in the effluent of SB-ABR was $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ at COD loading rate of $1.40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, which was greater than that of CO-ABR ($350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). The alkalinity of SB- and CO-ABR were more than $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The COD was mainly removed in the first grid of SB-ABR. The organics were reduced quickly during the early period, and reached a steady status after 12 h. In the SB-ABR, there were two fluorescence peaks at $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=275 \text{ nm}/340 \text{ nm}$ and $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=220 \text{ nm}/340 \text{ nm}$, which represents protein-like substances, with the peak intensity decreasing along the flow path. The variation trend of the protein-like fluorescence peaks was similar to that of COD. The organics were mainly hydrolyzed within the first 4 h, and small molecular organics, such as formic acid, acetic acid and propionic acid, were mainly produced during this period.

Keywords: anaerobic baffled reactor; scattered piggery; washing wastewater; batch operation; dissolved organic matter

根据《第一次全国污染源普查公报》,畜禽养殖业排放的 COD、总氮和总磷分别占全国排放量的

41.9%、21.7%和 37.9%^[1]。我国是猪肉消费大国,养猪业占畜禽养殖业的比重较大。目前,分散及小规模养猪在我国仍占有较大的比例,其排放的废水具有污染物浓度高、浊度色度高、含有大量细菌等特点。目前农村广泛存在着猪粪随意堆放、养殖废水乱排的现象,导致污染物进入附近水体,对环境危害极大。吴根义等^[2]指出,养殖布局与农地资源不匹配、技术

收稿日期:2015-04-20

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ21B01-02);中国博士后科学基金(2012M520351)

作者简介:肖 宇(1990—),男,硕士研究生,研究方向为水污染控制与资源化。E-mail:xy_love_me@sina.com

* 通信作者:周岳溪 E-mail:zhouyuxi@263.net

单一、管理体系不健全、监管不充分等,是养殖业与环境保护产生矛盾的根本原因。国内分散养猪废水处理还处于起步阶段,大部分废水只是进入沼气池,厌氧发酵之后直接排出。近年来部分研究者根据源头减排的思路,将粪、尿、冲洗水分开收集,从而在源头上对污染物进行削减^[3]。

厌氧折流板反应器(ABR)是当前研究较多的厌氧反应器,它利用中间的折流板将反应器隔成一个个相对独立的空间,便于培养出适应各自环境的微生物菌落^[4]。此外,ABR 的推流式特质使得反应器运行更加稳定,而使出水水质更优。目前 ABR 反应器已经广泛应用于各个行业,与其他工艺如人工湿地结合运行的例子屡见不鲜。针对分散养殖废水间歇产生的特点(冲洗猪舍时才会产生,通常是每天冲洗一次),采用序批进水运行方式(以连续进水运行为对照),通过考察不同水力负荷时的运行性能、沿程性能以及单个进水周期内的污染物去除特性,结合三维荧光和离子色谱分析技术,对序批 ABR 处理分散养猪冲洗水的有机物降解特性进行了研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以漏粪地板将猪粪与液体污染物(猪尿和冲洗水)进行分离,随后通过液液分离装置将猪尿和冲洗水分开收集,收集的冲洗水为试验用原水。原水的平均 COD、氨氮、总氮和总磷浓度分别为 2000、175、225、30 mg·L⁻¹。试验所用接种污泥取自长沙红星冷库 UASB 厌氧池。

1.2 试验装置

ABR 反应器结构和流程如图 1 所示。反应器整体长×宽×高=750 mm×200 mm×500 mm,共分为 3 格(从进水口至出水口依次为第一格、第二格和第三格),每格长度分别为 350、200、200 mm,有效水深为 400 mm,有效容积为 60 L 左右,材质为有机玻璃板。

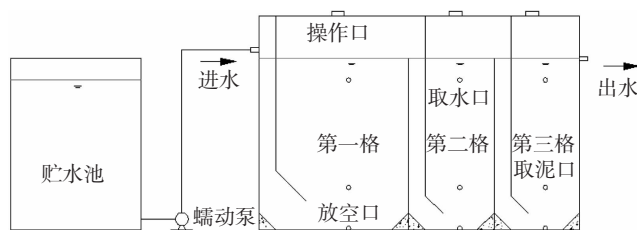


图 1 试验装置流程图

Figure 1 Flow chart of experimental facility

ABR 反应器共加工两套,其中装置 A 连续进水,装置 B 序批进水(在每天上午 9:00 左右进水 1 h,进水量 10 L·d⁻¹,其余时间静置)。二者容积负荷相同,以形成对比,考察序批进水与连续进水的运行特性。

1.3 试验方法

将新取的污泥加入反应器中,使每格污泥高度为 25 cm 左右,每个反应器中污泥体积约为 37.5 L。测得污泥 SS 为 21.65 g·L⁻¹,VSS/SS 为 65%左右。

启动时水力负荷为 10 L·d⁻¹(第一阶段,表 1),COD 容积负荷为 0.35 kg·m⁻³·d⁻¹。以 COD 去除率稳定在 60%以上为反应器启动成功的标志,之后水质参数基本保持不变,逐步提高水力负荷,使第二和第三阶段进水流量分别为 20、40 L·d⁻¹,相应的 COD 容积负荷分别为 0.70、1.40 kg·m⁻³·d⁻¹。

表 1 ABR 不同阶段运行参数

Table 1 ABR operation parameters at different phases

阶段	进水流量/ L·d ⁻¹	水力停留 时间/h	COD 容积负荷/ kg·m ⁻³ ·d ⁻¹	平均水温/ ℃
一	10	144	0.35	11.6
二	20	72	0.70	20.0
三	40	36	1.40	27.4

1.4 分析方法

水样的 COD、总氮和总磷直接测定,氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮需经 0.45 μm 膜过滤后测定。氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、总氮、总磷分别采用纳氏试剂分光光度法、紫外分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法、过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、钼锑抗分光光度法测定(UNIC UV-2100 分光光度计)^[5];COD 采用快速消解法测定(华通 CTL-12 型化学需氧量速测仪);碱度采用电位滴定法测定;VFA(挥发性有机酸)采用蒸馏法测定;小分子有机酸采用离子色谱法测定(DX-600, Dionex);污泥产甲烷活性采用发酵管-排 NaOH 法测定^[6];荧光性有机物采用三维荧光分光光度计测定(日立 FL-7000)。

2 结果与讨论

2.1 ABR 运行性能

ABR 是厌氧反应器,由于厌氧微生物的活动特性,进出水水质的变化主要体现在有机物和氨氮上。不同负荷条件下,COD 和氨氮的去除性能分别如图 2 和图 3 所示。

由图 2 可以看出,在运行的 3 个阶段,装置 A 的出水 COD 均比装置 B 的低,主要是由于装置 A 连续

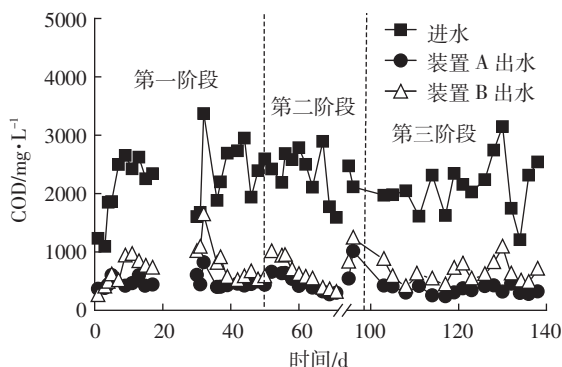


图2 COD去除性能

Figure 2 Performance of COD removal

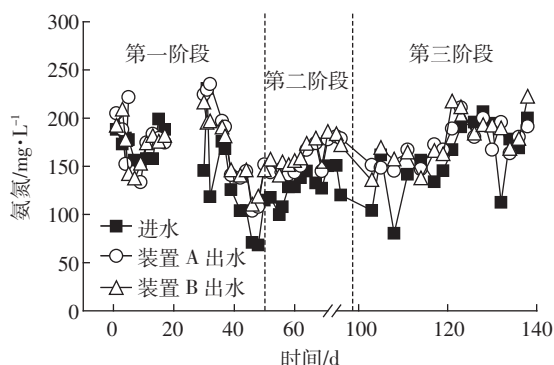


图3 氨氮去除性能

Figure 3 Performance of ammonia nitrogen removal

运行,负荷随时间均匀分布,微生物降解有机物的效率更高。尽管装置B为间歇进水,但是启动后其COD的去除率仍达60%以上(进水COD为1200~2600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),最高为87%,可能是ABR对水力冲击具有一定的适应能力,也可能是系统的负荷不高所致。在第一阶段的前20 d,平均水温为12 $^{\circ}\text{C}$,运行13 d后两个装置的出水COD均呈下降趋势,并且COD去除率均高于60%,表明即使在低温时,ABR也能快速启动。随后两个装置均静置15 d,考察ABR的恢复启动性能。恢复进水后,装置A和装置B的出水COD均有升高,但是能在两周内分别降至430、560 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。运行71 d后,中断进水1个月左右(模拟养殖户中断养殖的影响)。重新进水后,ABR对COD的去除性能很快得到恢复,表明ABR耐冲击的能力较强。在第二和第三阶段升高负荷的初期,两个装置出水的COD均有升高,但是随后都能逐渐降低并达到稳定。稳定运行时的第一(COD负荷为0.35 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)、第二(COD负荷为0.70 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)、第三阶段(COD负荷为1.40 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$),装置A出水平均COD分别为430、300、350 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右;装置B出水平均COD分别为560、350、600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。装置A出水COD随

负荷的增加先降低后略有升高,主要是因为系统的负荷较低,对有机物能保持较高的去除率。另外,3个阶段的平均水温分别为12、20、27 $^{\circ}\text{C}$,水温的升高也促进了微生物对有机物的降解。由于装置B序批进水,负荷随时间分布不均,COD负荷升高至1.40 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,出水COD有较为明显的升高,但此时COD平均去除率仍达70%。

养猪废水中总氮的主要成分为氨氮和有机氮,几乎不含硝酸盐氮和亚硝酸盐氮。在厌氧处理过程中,有机氮会经过氨化作用转化为氨氮,导致出水中氨氮浓度升高。由图3可以看出,ABR进水氨氮为68~228 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,装置A和装置B出水氨氮分别略增至103~232 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和109~234 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。微生物在降解有机物时,会摄入少量的氮以合成新的细胞,同时死亡的细菌等会释放出一定的氮。运行良好的反应器中微生物存在着稳态的增殖过程^[7]。分散养猪冲洗水经ABR处理后,总氮降低10%左右。

由于冲洗水的水质比较复杂,进水pH值在7.6~8.5之间波动。根据厌氧三阶段理论,在厌氧反应进行的过程中,pH存在着先降后升的过程。如果系统没有足够的碱度来中和所产生的有机酸,反应器将会有酸化的趋势。装置A出水pH在7.5~7.9之间,装置B出水pH在7.4~7.7之间,二者pH值均略小于进水。ABR反应器对总磷的去除幅度不大,进水总磷为21.6~68.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,装置A和装置B出水总磷分别为15.9~49.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和17.8~49.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,长期监测的平均去除率分别为17.18%和15.64%。

2.2 ABR沿程性能

碱度和VFA是厌氧反应器的重要指标,也是判断反应器运行是否正常的直接证据。由于装置A和装置B进水过程不同,二者的沿程性能也有差异。碱度和VFA的沿程变化如表2所示。

从表2可以看出,装置A和装置B在三个阶段的碱度变化不大且均在1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上。厌氧反应初期的水解酸化阶段会产酸从而消耗一定的碱度,而后续的产甲烷阶段由于产生大量的 CO_2 和 HCO_3^- 则提高了反应器内的碱度。一般认为,厌氧反应器中碱度要大于500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,才能保证反应器正常运行而不至于酸化^[8]。

VFA为糖降解的过程中产生,包括甲酸、乙酸、丙酸、丁酸等,有机酸大量累积将导致反应器酸化。从表2来看,在稳定运行的第三阶段,装置A和装置B的挥发酸含量总是沿程降低。这是由于微生物的活

表 2 装置 A 和装置 B 沿程特性比较($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 2 Comparison of unit A and unit B along ABR($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

运行阶段	进程	装置 A		装置 B	
		碱度	VFA	碱度	VFA
第一阶段	第一格	1181	813	1172	852
	第二格	1141	738	1191	897
	第三格	1061	756	1164	777
第二阶段	第一格	1129	366	1204	268
	第二格	1059	310	1136	270
	第三格	1069	264	1127	208
第三阶段	第一格	1243	504	1185	314
	第二格	1326	310	1211	208
	第三格	1191	236	1270	112

注:碱度以 CaCO_3 计,VFA 以乙酸计。

动,VFA 逐渐被消耗利用。与第一阶段相比,在第二、三阶段,VFA 含量明显降低,说明稳定运行的 ABR 能够有效去除 VFA,避免反应器酸化。

污泥厌氧活性采用污泥最大比产甲烷速率法测定。将微生物的生存环境控制在最优条件下,以排水法获得其单位时间内的最大产甲烷量,能够反映污泥产甲烷潜质,是污泥品质的重要参数^[9]。第三阶段,装置 A 沿程的最大比产甲烷量分别为 1 070.3、578.1、

504.3 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VSS}\cdot\text{h}^{-1}$,装置 B 沿程的最大比产甲烷量分别为 919.8、511.1、420.7 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VSS}\cdot\text{h}^{-1}$ 。两个 ABR 的产甲烷活性沿程依次降低,其中第一格活性最高且远大于第二、三格。与其他研究结果相比^[10-11],本试验的污泥产甲烷结果较高,说明反应器内污泥产甲烷活性较好。

2.3 序批式 ABR 运行周期内污染物去除特性

序批式 ABR(装置 B)每天仅在上午 9:00 进水 1 h,其余时间静置,在运行管理上具有周期性,其在单个运行周期内的负荷随时间分配不均匀,因此有必要考察反应器在进水周期内的污染物降解特性。不同阶段(每个阶段运行参数见表 1)稳定运行后,单个运行周期内装置 B 的污染物去除特性如图 4 至图 7 所示(以进水完成作为时间零点)。

由图 4 可以看出,COD 在 ABR 反应器的各格内均随时间降低,且在第一格内降低最为明显。进水后 COD 降低的速度较快,随后逐渐减低并趋于稳定。第三阶段时,由于进水期的 COD 负荷较高($33.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$),导致部分有机物浓度较高的水依次进入至 ABR 的第二格和第三格(即第二格和第三格零时刻的进水不完全是第一格和第二格处理 24 h 后的水),

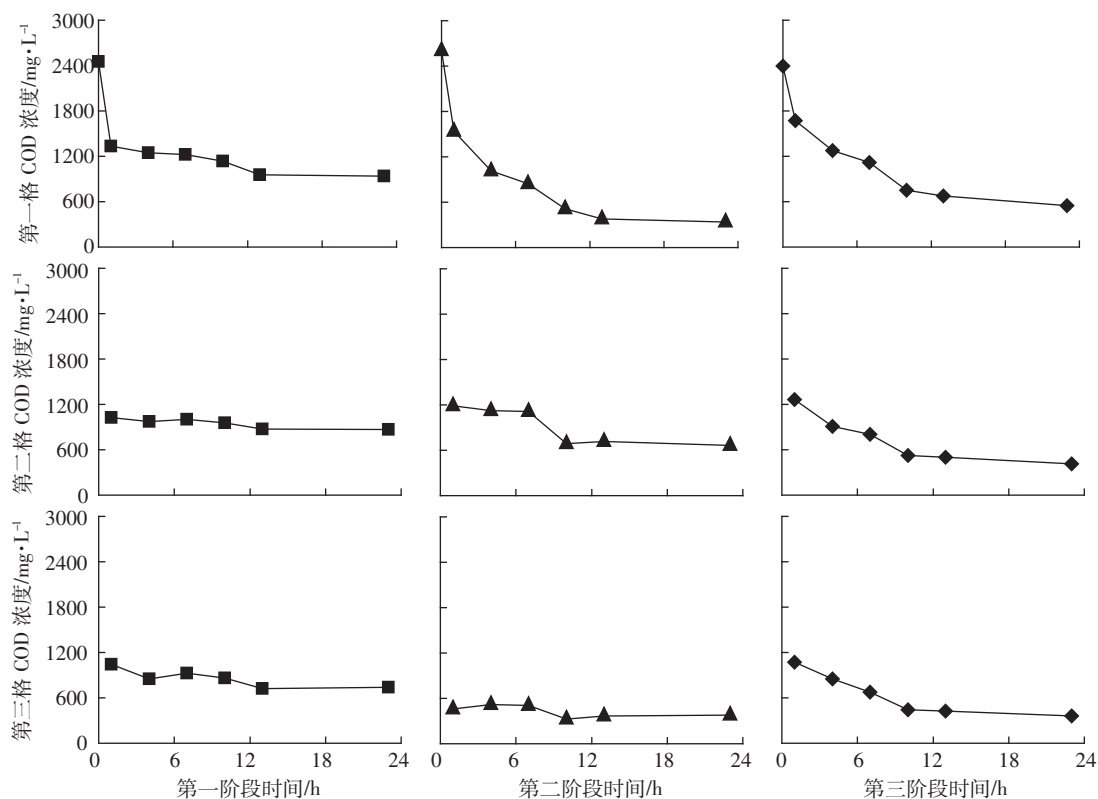


图 4 进水周期内各格 COD 变化情况

Figure 4 Changes of COD in different compartments

所以在第二格和第三格内 COD 随时间降低的速度要比第一阶段和第二阶段的大。另外,第三阶段进水后 12 h,水中 COD 已趋于稳定,且已达常规厌氧反应器的下限($400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),表明序批式 ABR 有缩短水力停留时间、提高 COD 负荷的空间。

由图 5 可以看出,在第一阶段,由于污泥未驯化完成,氨氮在 ABR 的 3 格内随时间有一定的波动。在第二阶段和第三阶段,进水完成后 1 h,氨氮在第一格有明显的增加,随后基本保持稳定,表明 ABR 内有机氮的氨化过程很快,且主要在第一格内发生。由图 6 和图 7 可知,在厌氧处理过程中,总氮和总磷的去除不明显。第三阶段时总氮和总磷在 ABR 的 3 格内基本保持稳定。

2.4 三维荧光图谱解析

三维荧光法被广泛应用于水质分析测定,可用来评价水溶性有机质的结构和组分,能够快速揭示有机污染物的分类及其含量信息^[12]。序批式 ABR(装置 B)进水周期内荧光图谱情况和沿程荧光图谱分别见图 8 和图 9。

从图 8 可以看出,主要荧光峰有两处:Peak A ($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=275 \text{ nm}/340 \text{ nm}$)和 Peak B ($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=220 \text{ nm}/$

340 nm),二者均为类蛋白荧光峰(Protein-like),其中 Peak A 为类色氨酸荧光区,Peak B 为色氨酸的一处远紫外峰^[13-14]。类蛋白质荧光可能来自一系列溶解性氨基酸或其他具有类似荧光信号的混合物^[15]。有研究者认为,类色氨酸荧光峰可能代表完整的蛋白质或降解程度较低的多肽^[16]。在单个进水周期内,不同时间水样的荧光峰位置类似,强度不同。进水后 1 h 荧光强度最大,随着反应的进行,荧光强度逐渐减弱,主要峰面积逐渐减小,表明水中的类蛋白质在反应器运行过程中逐渐被分解转化,与 COD 的降解趋势一致。

如图 9 所示,装置 B 第三阶段进水后 23 h 时,反应器中主要的荧光峰仍为 Peak A 和 Peak B。ABR 反应器第一格的水依次进入第二格、第三格,因此从处理结果看,这三格的主要荧光峰强度沿程降低,表明类蛋白质被逐级去除。从降低幅度来看,第一格丰度下降幅度最大,说明第一格承受了较高的负荷,类蛋白质物质主要在第一格内降解。装置 B 第三阶段进水后 23 h 这三格的荧光峰 Peak A 和 Peak B 最大峰强分别为 1891、1350、1206 和 1692、1284、1152,装置 A 三格的主要荧光峰 Peak A 和 Peak B 最大峰强分别为 2646、1497、1247 和 2473、1675、1317,均体现了沿

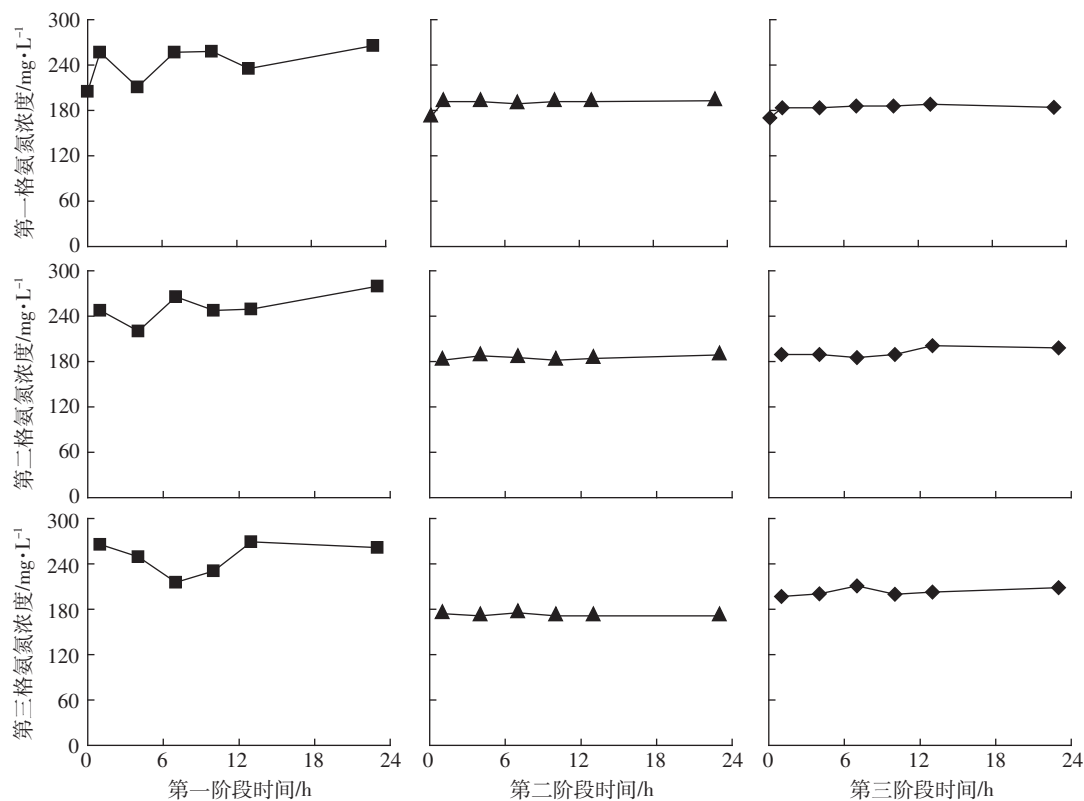


图 5 进水周期内各格氨氮变化情况

Figure 5 Changes of $\text{NH}_3\text{-N}$ in different compartments

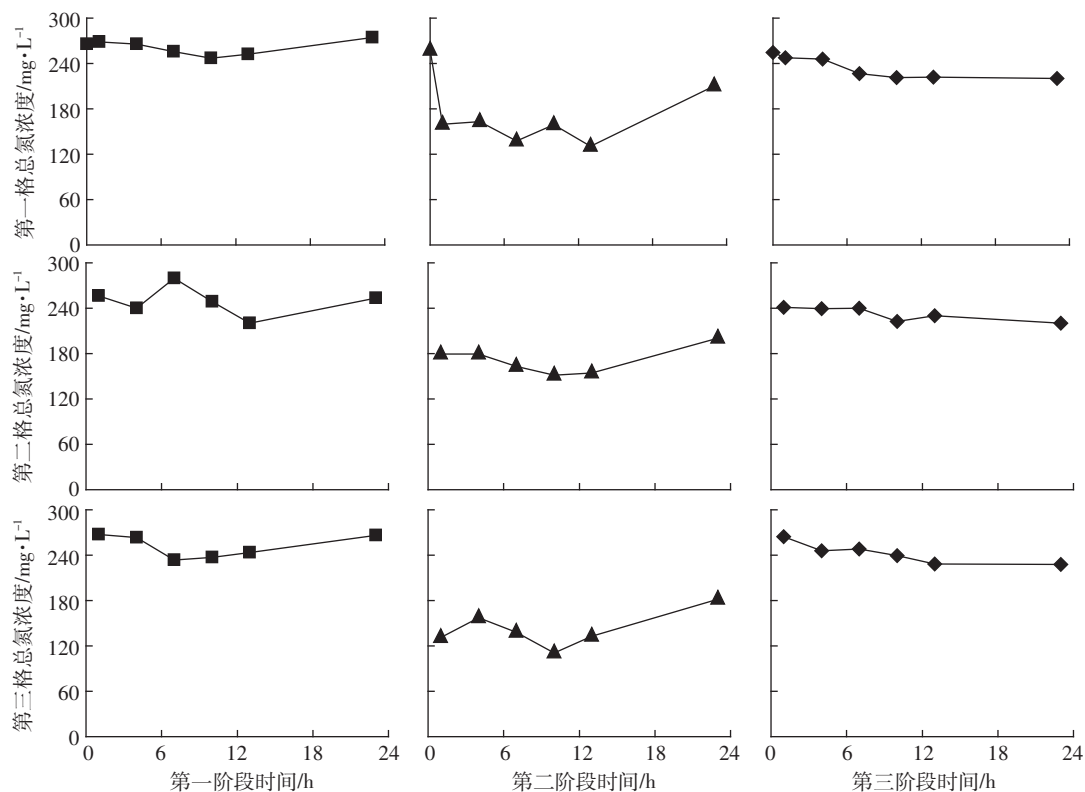


图 6 进水周期内各格总氮变化情况

Figure 6 Changes of TN in different compartments

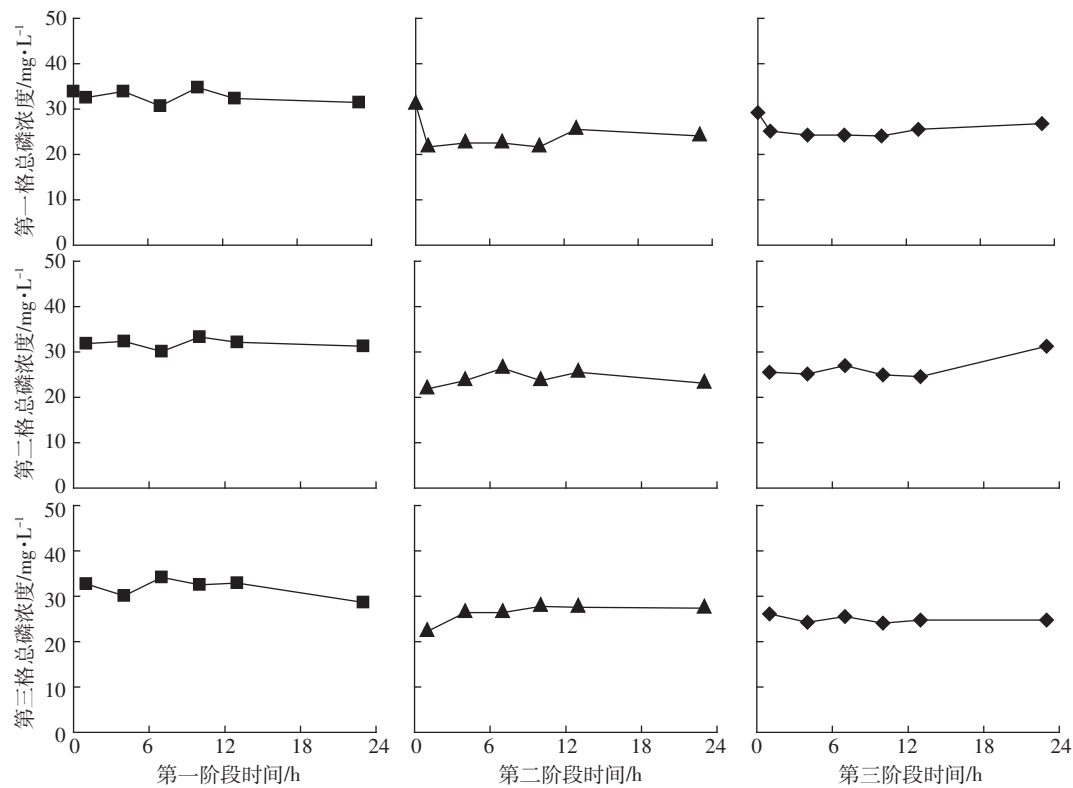


图 7 进水周期内各格总磷变化情况

Figure 7 Changes of TP in different compartments

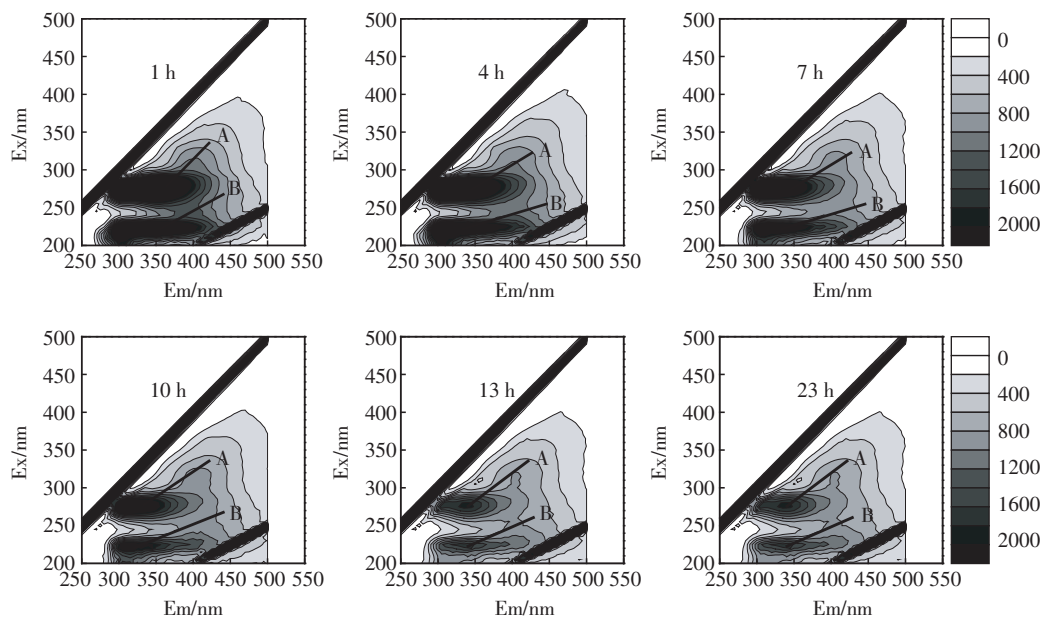


图 8 装置 B 第三阶段第二格不同进水时间荧光特性图

Figure 8 Fluorescence characteristics of influent wastewater in compartment two of phase three at different time

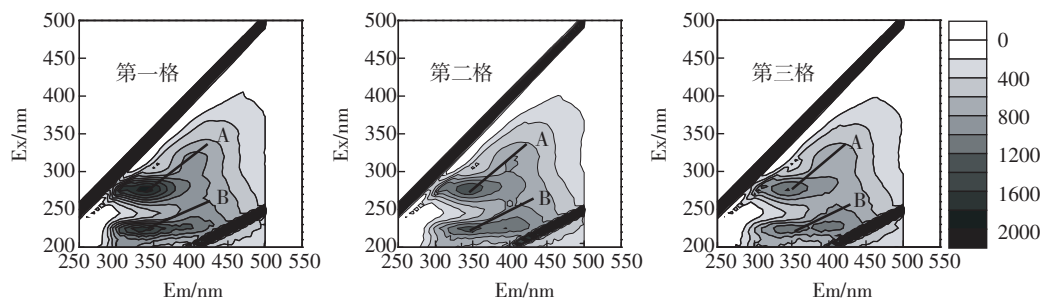


图 9 装置 B 第三阶段沿程荧光特性图

Figure 9 Fluorescence characteristics of influent wastewater along Unit B

程逐级去除的特性。

2.5 序批式 ABR 离子色谱解析

离子色谱法可简便快速地测定短链有机酸浓度，是反映水质情况的有效手段。序批式 ABR 第三阶段不同时间点各格有机酸(甲酸、乙酸、丙酸)含量检测结果如表 3 所示。

从表 3 可知,进水后 1 h 左右各格有机酸总量最高,随着反应时间的推移,小分子有机酸含量逐渐降低,进水 10 h 后有机酸已经检测不到。小分子有机酸是糖类厌氧降解过程的中间产物,包括甲酸、乙酸、丙酸、丁酸等。不同产物代表不同的糖降解类型。ABR 沿程各格内有机酸的组成与反应器的运行参数及其所处的状态密切相关^[7]。试验结果表明 ABR 反应器处理分散养殖废水主要发生甲酸型糖代谢。小分子有

表 3 装置 B 第三阶段不同时间点各格有机酸含量(mg·L⁻¹)

Table 3 Content of organic acids in compartments at stage three in Unit B at different time(mg·L⁻¹)

取样时间	取样点	甲酸	乙酸	丙酸
进水后 1 h	第一格	—	7.39	—
	第二格	46.77	4.03	4.59
	第三格	43.78	5.07	3.81
进水后 4 h	第一格	37.63	6.34	5.23
	第二格	12.07	—	0.67
	第三格	27.00	—	3.66
进水后 7 h	第一格	14.54	—	0.63
	第二格	—	—	—
	第三格	—	—	0.52

注:“—”为未检出;进水后 10 h 有机酸含量已经检测不到,故未列出。

机酸在进水1h左右大量累积说明水解反应主要发生在这个时段,此外亦可说明,在厌氧的三个阶段中,水解酸化阶段进行得非常快(4h内),然后再发生的产甲烷反应缓慢而持续进行,并成为整个厌氧反应的控制环节。

3 结论与建议

分散养猪冲洗水具有间歇产生的特点,采用间歇处理工艺运行时,可结合猪舍和处理设施间的高程差,实现冲洗废水在处理设施中的自流而无需提升成本。ABR以序批进水方式运行可以稳定去除分散养猪冲洗水中的有机物,COD负荷为 $1.40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,序批ABR可将COD由 $2000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右稳定降至 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,虽比连续ABR出水($350\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右)的高,但是COD的去除率仍达60%以上。序批和连续ABR沿程碱度均大于 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,无过度酸化风险。序批ABR单个运行周期内,COD在第一格的去除最明显,并且降解主要发生在进水后12h内;冲洗水中的荧光性物质为类蛋白,其变化规律与COD一致;产酸阶段主要发生甲酸型糖代谢,进水后1h左右各格有机酸总量最高,10h后则检测不到。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 北京:2010. Environmental Protection Department of China, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture. The first national pollution census bulletin[R]. Beijing:2010.
- [2] 吴根义,廖新伟,贺德春,等. 我国畜禽养殖污染防治现状及对策[J]. 农业环境科学学报,2014,33(7):1261-1264. WU Gen-yi, LIAO Xin-di, HE De-chun, et al. Current situation and countermeasures of livestock industry pollution control in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1261-1264.
- [3] 万风,王海燕,周岳溪,等. 养猪废水处理技术研究进展[J]. 农业灾害研究,2012,2(1):25-29. WAN Feng, WANG Hai-yan, ZHOU Yue-xi, et al. Research progress on the processing technology of piggery wastewater[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2012, 2(1):25-29.
- [4] Letinga G, Field J, Van Lier J, et al. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(10):5-12.
- [5] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京:中国环境科学出版社,2002. State Environmental Protection Administration. Methods for the monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [6] 洪育才. 一种简便实用的厌氧污泥活性测定法[J]. 中国给水排水, 1990, 6(4):56-58. HONG Yu-cai. A Simple and practical method for anaerobic sludge activity determination[J]. *China Water & Wastewater*, 1990, 6(4):56-58.
- [7] 孙蔚旻. 厌氧折流板反应器启动及其微生物群落研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005:42-51. SUN Wei-min. The startup of anaerobic baffled reactor and research of microbial ecology in ABR[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology, 2005:42-51.
- [8] 邓遵. 厌氧折流板反应器的酸积累及恢复对策研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2012:35-48. DENG Zun. Study on acid accumulation and recovery in anaerobic baffled reactor[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2012:35-48.
- [9] 董慧峪,季民. 厌氧污泥产甲烷活性与产甲烷菌多样性的研究[J]. 环境科学学报,2014,34(4):857-863. DONG Hui-yu, JI Min. Comparative study on biological methane potential and methanogen biodiversity of anaerobic sludge[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(4):858-863.
- [10] 何仕均,王建龙,赵璇. 氨氮对厌氧颗粒污泥产甲烷活性的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(9):1294-1296. HE Shi-jun, WANG Jian-long, ZHAO Xuan. Effect of ammonium concentration on the methanogenic activity of anaerobic granular sludge[J]. *Tsinghua Univ:Sci & Tech*, 2005, 45(9):1294-1296.
- [11] 赵金安,雷英春. ABR反应器处理畜禽养殖废水中厌氧污泥颗粒化的研究[J]. 中北大学学报:自然科学版,2015,36(1):75-79. ZHAO Jin-an, LEI Ying-chun. Granulation of anaerobic sludge in anaerobic baffled reactor treating livestock wastewater[J]. *Journal of North University of China:Natural Science Edition*, 2015, 36(1):75-79.
- [12] Patel-Sorrentino N, Mounier S, Benaim J Y. Excitation-emission fluorescence matrix to study pH influence on organic matter fluorescence in the Amazon basin rivers[J]. *Water Research*, 2002, 36(10):2571-2581.
- [13] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of river waters impacted by a tissue mill effluent[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(7):1377-1382.
- [14] Wolfe A P, Kausal S S, Fulton J R, et al. Spectrofluorescence of sediment humic substances and historical changes of lacustrine organic matter provenance in response to atmospheric nutrient enrichment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(15):3217-3223.
- [15] Jaffé R, McKnight D M, Maie N, et al. Spatial and temporal variations in DOM composition in ecosystems: The importance of long-term monitoring of optical properties[J]. *Journal Geophysical Research*, 2008, 113:G04032.
- [16] 甘淑钗. 三维荧光技术对溶解有机质迁移转化的指示初探[D]. 上海:华东师范大学,2013:16-18. GAN Shu-chai. The transportation and transformation of dissolved organic matter characterized by 3-D fluorescence spectroscopy[D]. Shanghai:East China Normal University, 2013:16-18.
- [17] 王立媛,宿程远,李思敏,等. 厌氧折流板反应器处理制糖废水的启动试验研究[J]. 工业水处理,2014,32(1):36-39. WANG Li-yuan, SU Cheng-yuan, LI Si-min, et al. Study on the start-up technology of treating sugar wastewater in ABR[J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, 32(1):36-39.