



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201902016

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

郑效旭, 李慧莉, 徐圣君, 等. SBR 串联生物强化稳定塘处理养猪废水工艺优化[J]. 环境工程学报, 2020, 14(6): 1503-1511.
ZHENG Xiaoxu, LI Huili, XU Shengjun, et al. Process optimization of SBR-biological stabilization ponds for swine wastewater treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(6): 1503-1511.

SBR 串联生物强化稳定塘处理养猪废水工艺优化

郑效旭^{1,2}, 李慧莉¹, 徐圣君², 张宝^{1,2}, 张旭坡², 安娜², 白志辉^{2,3,*}

1. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050

2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

第一作者: 郑效旭 (1990—), 男, 博士研究生。研究方向: 水污染控制技术。E-mail: xxzheng@rcees.ac.cn

*通信作者: 白志辉 (1971—), 男, 博士, 研究员。研究方向: 环境生物技术。E-mail: zhbai@rcees.ac.cn

摘要 针对亚热带地区某规模化养猪场 SBR 处理低碳氮比 (C/N) 沼液出水不达标的问题, 研究了以乙酸钠为速效碳源时其投加量对 SBR 运行效果的影响, 并采用 4 级串联生物强化稳定塘工艺对 SBR 出水进行强化处理。结果表明: 当乙酸钠投加量为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, SBR 工艺对 COD、氨氮和总氮的平均去除率分别从 $16\% \pm 1\%$ 、 $25\% \pm 4\%$ 和 $14\% \pm 1\%$ 提高到了 $32\% \pm 1\%$ 、 $55\% \pm 2\%$ 、 $27\% \pm 4\%$; 串联生物强化稳定塘 (BSPs) 工艺对 COD、氨氮、总氮和总磷的平均去除率达到了 $65\% \pm 2\%$ 、 $80\% \pm 4\%$ 、 $79\% \pm 3\%$ 和 $83\% \pm 4\%$, 出水平均浓度分别为 (155 ± 5) 、 (67 ± 2) 、 (89 ± 2) 和 $(6 \pm 1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均可满足《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001) 的要求。以生物膜和双穗雀稗构成的前 2 级生物强化稳定塘系统对 COD、氨氮、总氮和总磷的消纳量分别占整个串联稳定塘系统消纳量的 57%、50%、51% 和 81%。进一步分析可知, 串联生物强化稳定塘工艺对养猪废水主要污染物 (COD、氨氮、总氮、总磷) 的去除效果显著, 采用此技术可实现废水的达标排放。

关键词 养猪废水; 序批式活性污泥法 (SBR); 生物强化稳定塘 (BSPs); 双穗雀稗; 生物膜

近年来, 随着我国农业产业化工作的不断推进, 规模化畜禽养殖企业得到了迅猛发展, 但养殖规模急剧扩大的同时也加剧了污染物排放与生态环境保护之间的矛盾。据 2010 年全国第一次污染源普查公报的结果显示, 畜禽养殖业对环境带来的污染已然成为我国农业面源污染之首, 其排放的化学需氧量 (COD)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 分别占农业面源污染的 95.8%、37.9% 和 56.3%^[1]。目前, 规模化养猪废水的处理模式主要有 3 种: 还田模式、工业化处理模式以及生态处理模式^[2]。传统的还田模式不仅需要大量的耕种土地进行消纳, 还存在传播人畜疾病的危险; 工业化处理模式虽占地面积小, 但是投资大, 能耗高, 且需要专门的技术人员运行维护。规模化养猪场多远离城市, 土地资源相对丰富, 高效的生态处理模式在我国南方地区具有应用推广的优势^[3]。

目前, 国内外大部分规模化养猪场多采用工业化处理模式, 其流程基本一致, 多为固液分离-厌氧消化-好氧组合工艺, 但是对于经厌氧消化后的低 C/N 沼液废水, 由于碳源不足导致好氧段工艺普遍存在脱氮效率低、出水水质难达标等问题^[4-5]。序批式活性污泥法 (sequencing batch reactor,

收稿日期: 2019-02-10; 录用日期: 2019-04-23

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (ZDRW-ZS-2016-5); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2015ZX07206006)

SBR)作为养猪废水好氧段常用生物处理技术,具有工艺简单、运行方式灵活、自动化程度高等优点,但利用该工艺对消化液的脱氮除磷问题依旧未得到很好的解决^[6-7]。相较于传统的SBR工艺,间歇曝气序批式活性污泥法(intermittently aerated SBR, IASBR)能够降低硝化过程中氧气的消耗量和反硝化过程中对碳源的需求量,但碳源不足仍然是制约短程硝化反硝化处理效果的主要因素^[8-10]。王亮等^[1]在间歇曝气序批式活性污泥法的基础上进行了改进,提出分步进水序批式活性污泥法(step-fed SBR, SFSBR),该工艺在每一次运行周期的缺氧段补充35%的原水为反硝化过程提供碳源。但相较于甲醇或乙酸钠等外加速效碳源,反硝化过程中原水利用率偏低,脱氮效率不高,并且原水中含有较高浓度的TP,使得SFSBR系统除磷工艺也不理想^[11]。因此,选择性地投加易于生物降解的有机物,可以快速有效地提高低C/N废水的脱氮效率^[12]。

近年来,以稳定塘为代表的生态处理工艺得到广泛应用。稳定塘作为一种天然的或经过人为修整构建的生态池塘,通过对塘内的废水进行稀释和沉淀作用,水生植物的吸收作用、微生物代谢作用以及浮游生物作用使得污染物得以降解^[13]。传统的稳定塘处理技术按照工作原理可分为好氧塘、兼性塘、厌氧塘和曝气塘。随着塘工艺运行设计的不断改进和完善,生物滤塘、藻类沉降塘、水生植物塘和高效复合厌氧塘等新型塘处理工艺逐渐解决了传统塘工艺占地面积大、水力停留时间长以及塘泥堆积严重等问题^[14-16]。在实际的工程应用中,单一的塘处理工艺很难对高浓度的养殖废水进行高效处理,通常是将不同类型的塘处理工艺进行优化组合来提高养殖废水的处理效果,以此实现达标排放^[17]。

本研究主要针对规模化养猪场经厌氧消化后的低C/N废水(沼液)在SBR段脱氮效率低和出水不达标的问题,在SBR段投加碳源强化脱氮的基础上,结合生态处理技术的特点,依据猪场周边实际情况,提出并构建了串联生物强化稳定塘处理工艺;通过现场检测分析该组合工艺对养殖废水主要污染物(COD、氨氮、总氮、总磷)的去除效果,实现减控去污的目的,以期为规模化养猪场的废水达标处理提供参考。

1 材料与方法

1.1 废水治理工程概况与技术简介

某规模化养猪场所处位置为湖南省株洲市,该养殖场现存栏种猪5000余头,养殖废水的每日排放量约120 m³(夏季),主要为猪栏冲洗水和猪粪尿水。该地年平均气温17.8℃,无霜期292 d,年降水量约1410 mm,属典型的亚热带地区。养殖场原采用固液分离-厌氧消化-SBR组合工艺处理养殖废水,经该处理后的废水出水水质无法满足《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)排放要求,原进、出水水质与排放标准如表1所示。

针对该养殖场原废水处理工艺(厌氧消化+SBR)出水不达标问题,提出了向SBR段投加速效碳源(乙酸钠)的方法。同时,结合养殖场周围环境和地形特征,设计了4级串联生物强化稳定塘系统,该生态处理系统仅对原废水处理工艺二沉池出水进行处理,总工艺流程如图1所示。

原废水处理工艺SBR池尺寸($L \times B \times H$)为10 m \times 8 m \times 4 m,半地下式钢砼结构,池底设搅拌系

表1 原进、出水水质与排放标准

Table 1 Original quality of influent and effluent standard

水质及标准	pH	COD/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
原进水	6~9	3 500~6 000	2 000~4 000	620~960	100~280
原出水	6~9	300~540	450~600	300~510	30~40
排放标准	6~9	≤400	≤200	≤80	≤8

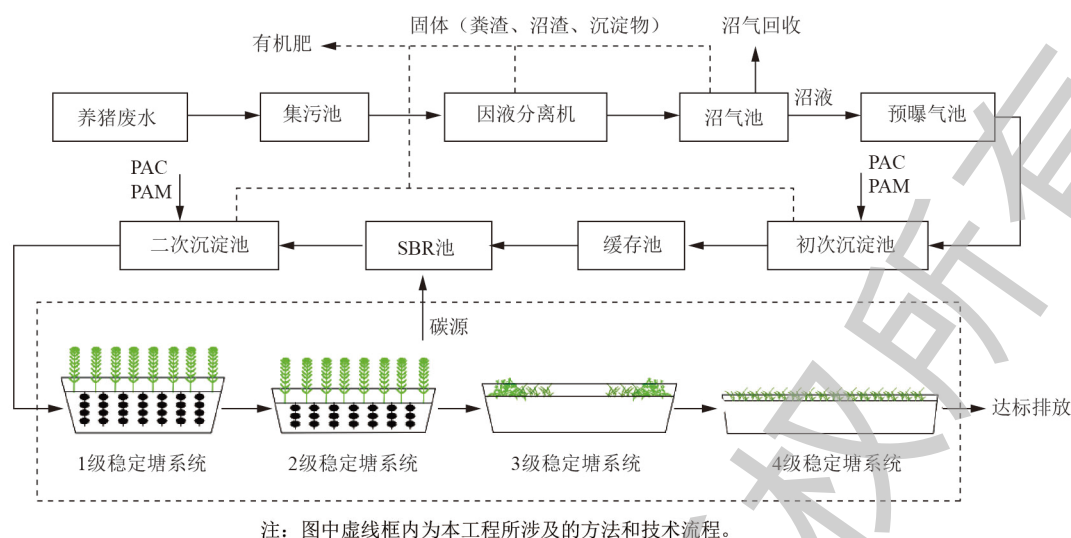


图1 养猪废水处理工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of pig wastewater treatment

统及膜片式曝气器,采用2台鼓风机,1用1备,鼓风机流量为 $3.2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。第1级生物强化稳定塘是由生物膜软性填料和水生植物构成的稳定塘,总面积约 1500 m^2 ,塘深 $1.8\sim 2.0\text{ m}$,水深 $1.2\sim 1.5\text{ m}$,水力停留时间 $10\sim 18\text{ d}$,生物强化控氮稳定塘照片如图2所示。水面以下悬挂生物膜软性填料,材质为合成纤维,平均悬挂长度 1.0 m ,间距 300 mm ,悬挂面积 1300 m^2 ;水面以上培植本土优势植物-双穗雀稗(*Paspalum distichum*),植物覆盖面积占塘总面积约 $70\%\sim 80\%$ 。第2级生物强化稳定塘系统也是由生物膜软性填料和水生植物构成的稳定塘,塘总面积约 1300 m^2 ,塘深 $1.8\sim 2.0\text{ m}$,水深 $1.0\sim 1.5\text{ m}$,水力停留时间 $8\sim 15\text{ d}$ 。水面以下悬挂生物膜软性填料,悬挂面积 1100 m^2 ,平均悬挂长度 0.8 m ,间距 300 mm ;水面以上培植双穗雀稗,植物覆盖面积占塘总面积约 $80\%\sim 90\%$ 。第3级稳定塘总面积约 4500 m^2 ,塘深 $2\sim 3\text{ m}$,水深 $1\sim 1.5\text{ m}$,水力停留时间 $40\sim 60\text{ d}$;水面以下不悬挂生物膜填料,水面以上自然生长多种本土水生植物,如双穗雀稗、莲花、水花生等,植被总覆盖面积约 $30\%\sim 40\%$ 。第4级稳定塘为植物塘,塘总面积约 2000 m^2 ,塘深 $0.6\sim 1.0\text{ m}$,水深 $0.3\sim 0.5\text{ m}$,水力停留时间 $5\sim 8\text{ d}$,塘内双穗雀稗种植覆盖面积达 90% 以上。



图2 微生物膜和双穗雀稗组成的生物强化控氮稳定塘

Fig. 2 BSPs being consisted of biofilm fillers and *Paspalum distichum*

串联生物强化稳定塘工程于2018年3月开始建设,施工周期为 40 d 。工程施工前,首先将第1级和第2级塘系统中原储存的废水抽至周边茶园和林地进行水肥一体化土地消纳。施工结束后,系统开始启动,将原废水处理系统二沉池出水排放至第1级生物强化稳定塘系统,同时向SBR池投加乙酸钠(碳源),SBR池运行工况如图3所示。系统稳定运行3个月以后,塘内栽种的双穗雀稗生长情况良好,膜填料大量附着优势菌群,废水中氮、磷等污染物在串联塘系统中逐步得到降解,并从第4级塘系统出水口达标排放。

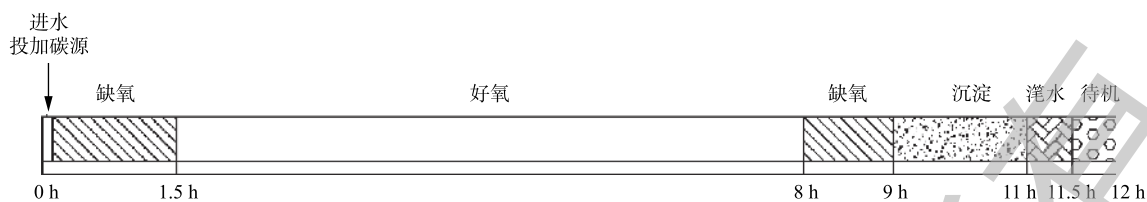


图3 SBR运行工况

Fig. 3 Operating conditions of SBR system

1.2 样品采集与分析方法

该串联生物强化稳定塘系统于2018年4月中旬建成并开始运行,运行期间每隔12h(1个运行周期)对SBR工艺的进、出水进行取样,并于2018年8月起,每3d对串联塘系统的每一级进、出水口采集水样。各营养盐指标的测定主要依据文献中的方法^[18],消解和分析仪器均产自美国哈希(HACH)公司,型号分别为DRB200和DR3900,COD的测定采用消解比色法,氨氮的测定采用水杨酸法,总氮的测定采用过硫酸盐氧化法,总磷的测定采用消解-钼锑抗分光光度法。

1.3 污染物去除率计算方法与数据分析

污染物(COD、氨氮、总氮、总磷)消纳量采用式(1)计算。

$$W = \frac{c_0 Q_0 - c_1 Q_1}{1000} \quad (1)$$

式中: W 为某处理单元或生态塘系统对污染物的消纳量, $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$; Q_0 为某处理单元或生态塘系统进水流量, $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$; Q_1 为某处理单元或生态塘系统出水流量, $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

容积负荷采用式(2)计算。

$$P = 1000 \frac{W}{V} \quad (2)$$

式中: P 为某处理单元或生态塘系统单位容积对污染物的消纳量, $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; V 为某处理单元或生态塘系统有效容积, m^3 。

采用Excel 2013和SPSS Statistics 25软件进行数据处理和分析,采用OriginPro 2017进行作图。

2 结果与分析

2.1 投加碳源后SBR工艺处理效果

SBR工艺对污染物的去除效果随乙酸钠投加量的变化情况如图4所示。当乙酸钠投加量为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SBR工艺进水COD、氨氮、总氮、总磷的进水浓度分别为 (530 ± 19) 、 (416 ± 23) 、 (453 ± 15) 和 $(34 \pm 1) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水浓度分别为 (445 ± 14) 、 (310 ± 5) 、 (389 ± 8) 和 $(23 \pm 4) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 进水C/N很低,其平均值只有1.2左右。由于碳源严重不足且原有SBR池设计容积较小,且进水碳源严重不足,C/N比仅为1.2左右,难以满足污染物的降解要求。SBR工艺对COD、氨氮、总氮和总磷的去除率仅为16%、25%、14%和32%左右。

如图4(a)所示,COD的去除率随乙酸钠投加量的增加逐渐增加,并在乙酸钠投加量为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值 $32\% \pm 3\%$ 。COD去除率上升的原因可能是投加的乙酸钠为水中微生物细胞的合成提供了所需的能源物质,增强了微生物代谢活动。如图4(b)和图4(c)所示,随着乙酸钠投加量的增加,氨氮和总氮的去除率呈现先大幅升高后微弱降低的趋势,并在乙酸钠投加量为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值。说明投加的乙酸钠提升了废水的可生化性,好氧段大量积累的硝酸盐在缺氧段被反硝化菌还原成 N_2 而得到释放,提高了TN的去除率。废水中硝酸盐和亚硝酸盐的浓度通过反硝化过程的顺利进行有了大幅度的降低,很好的解决了好氧段累计的亚硝酸盐抑制微生物活性而导致氨氮去除率低的问题^[19-20]。当乙酸钠投加量为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,氨氮和总氮的去除率开始下降,可

能是因为好氧段内其他异养型微生物利用投加过量的乙酸钠大量消耗水中的溶解氧，进而抑制亚硝化细菌和硝化细菌的代谢活动，影响脱氮效果。此外，总磷的进出水浓度在监测期间波动较大，去除率低，乙酸钠的投加对总磷出水浓度几乎没有影响，如图 4(d) 所示。

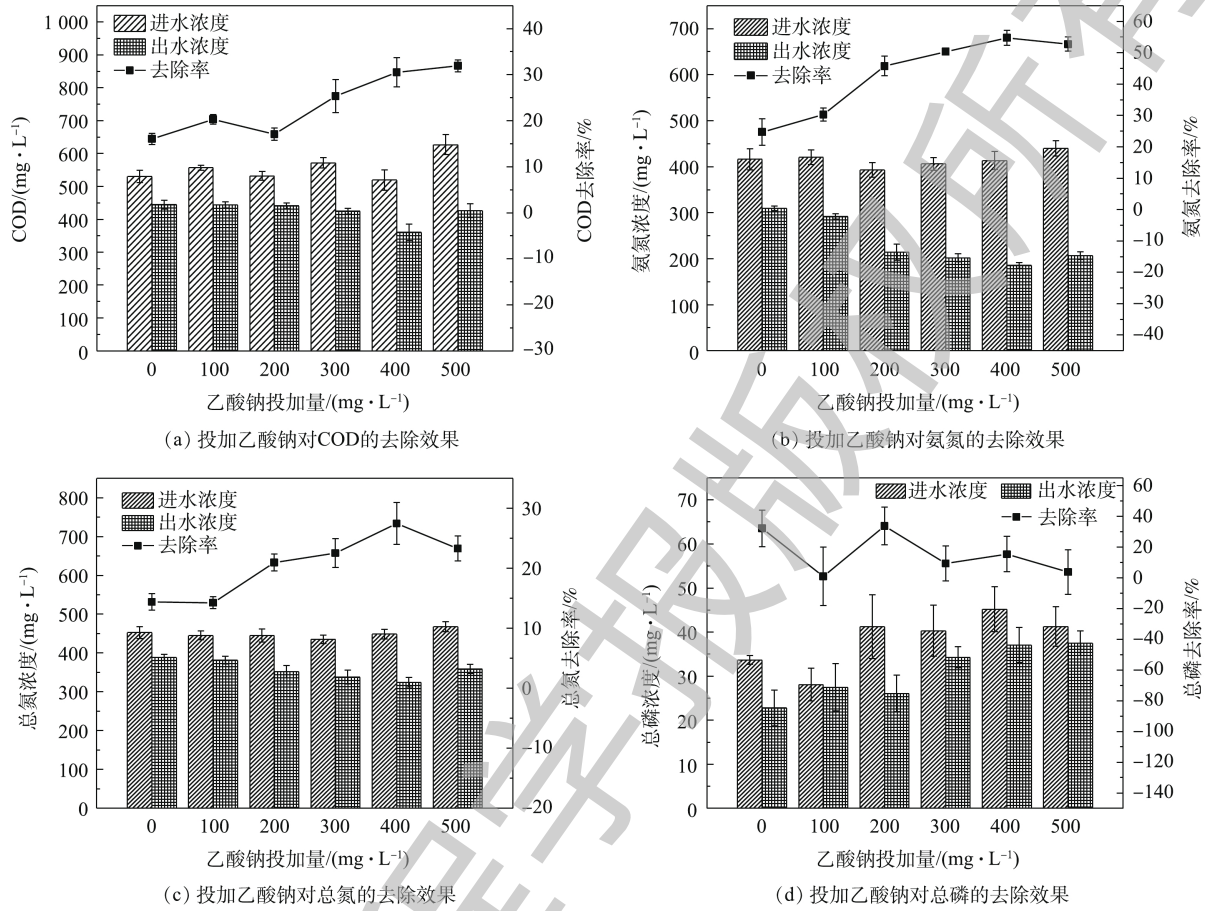


图 4 投加乙酸钠对 SBR 工艺的影响

Fig. 4 Effect of sodium acetate dosage on SBR process

由上面的分析可知，投加碳源后，除总磷以外，SBR 工艺对 COD、氨氮、总氮的去除率分别从 16% ± 1%、25% ± 4%、14% ± 1% 提高到了 32% ± 1%、55% ± 2%、27% ± 4%。虽然 SBR 工艺对污染物的去除效果有所提升，但仍无法达到《畜禽养殖业污染物排放标准》的排放要求，需要后续工艺对尾水进行深度处理。

2.2 串联生物强化稳定塘处理工艺对污染物的去除效果

1) 串联生物强化稳定塘处理工艺对 COD 的去除效果。串联生物强化稳定塘关于 COD 进出水浓度和去除率在监测期间的变化如图 5 所示。监测结果表明，COD 的平均进水浓度为 (450±10) mg·L⁻¹，进水 COD 在 305~540 mg·L⁻¹ 之间变化。由图 5 可以看出，虽然系统进水 COD 浓度波动较大，但经过串联塘系统处理

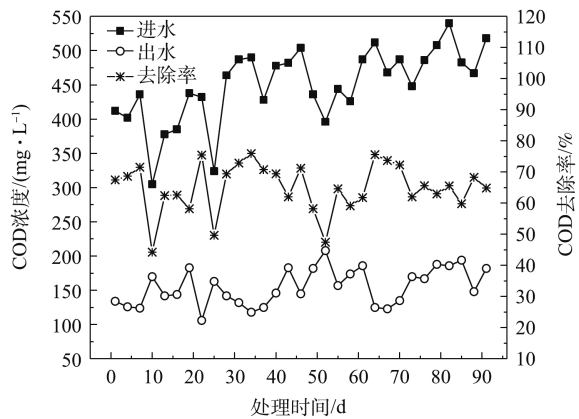


图 5 BSPs 对 COD 的去除

Fig. 5 Removal of COD in BSPs

过的出水浓度较低。观测期内 COD 的平均去除率为 $65\% \pm 2\%$ ，平均出水浓度为 $(155 \pm 5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，浓度在 $106 \sim 208 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化，远低于国家《畜禽养殖业污染物排放标准》中所要求的排放阈值。

2) 串联生物强化稳定塘处理工艺对氮的去除效果。串联生物强化稳定塘关于氮的进、出水浓度以及去除率随时间变化如图 6 所示。监测结果(图 6(a))表明，总氮的平均进水浓度为 $(406 \pm 5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，进水浓度在 $349 \sim 438 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化，进水浓度波动较大。观测期内总氮的平均去除率为 $79\% \pm 3\%$ ，出水平均浓度为 $(89 \pm 2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，浓度在 $72 \sim 103 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化，说明该系统对总氮的脱除效果较好；如图(图 6(b))所示，氨氮的平均进水浓度为 $(338 \pm 5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，进水浓度在 $281 \sim 385 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化。氨氮的进水浓度也存在着较大的波动，但出水比较稳定，观测期内氨氮的平均去除率为 $80\% \pm 4\%$ ，出水平均浓度为 $(67 \pm 2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，出水浓度在 $52 \sim 78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化，低于国家《畜禽养殖业污染物排放标准》中所要求的排放阈值，说明该串联生物强化稳定塘系统对氨氮具有高效的去除能力。

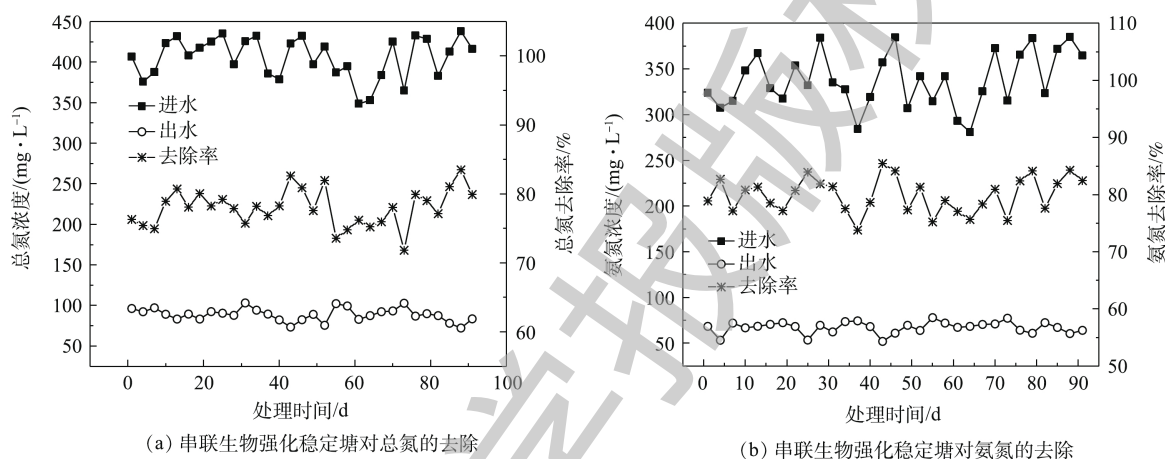


图 6 BSPs 的脱氮效果

Fig. 6 Denitrification effect in BSPs

3) 串联生物强化稳定塘处理工艺对磷的去除效果。如图 7 所示，总磷的平均去除率为 $83\% \pm 4\%$ ，平均进水浓度为 $(35 \pm 1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，进水浓度在 $28 \sim 49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化，平均出水浓度为 $(6 \pm 1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，浓度在 $3 \sim 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化，低于国家《畜禽养殖业污染物排放标准》中所要求的排放阈值，说明该串联稳定塘处理系统对总磷的去除效果明显。

2.3 串联生物强化稳定塘处理工艺各处理单元对污染物的去除效果

串联生物强化稳定塘工艺各处理单元对污染物的日平均消纳量和容积负荷如表 2 所示。

可以看出，每一级处理单元对输入的 COD、总氮、氨氮、总磷均具有去除效果，并且各处理单元对不同类型污染物的消纳量和去除能力也不同。从污染物的消纳量来看，由双穗雀稗和生物膜共同构成的前 2 级生物强化塘对输入的污染物均能够表现出较强的消纳能力，尤其是对总磷的去除效果最好，前 2 级生物强化塘对总磷的消纳量占整个串联系统消纳量的 90%。

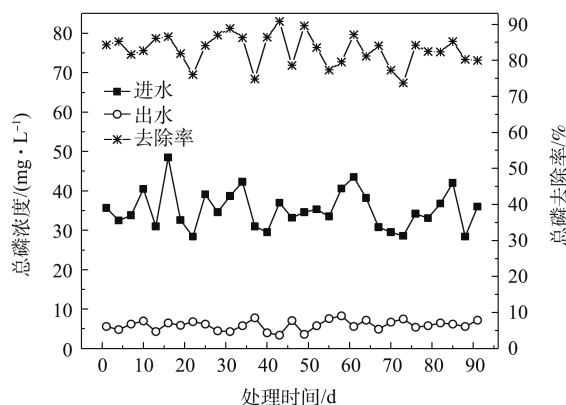


图 7 BSPs 对总磷的去除

Fig. 7 Removal of total phosphorus in BSPs

表2 各处理单元对污染物的消纳量与容积负荷
Table 2 Amount of pollutants reduction and volumetric loading in each treatment unit

处理单元	消纳量/(kg·d ⁻¹)				容积负荷/(g·(m ³ ·d) ⁻¹)			
	COD	氨氮	总氮	总磷	COD	氨氮	总氮	总磷
第1级稳定塘	10.4±1.0	9.2±0.8	9.6±0.7	1.8±0.1	5.2±0.5	4.5±0.4	4.7±0.3	0.9±0.1
第2级稳定塘	9.8±1.1	6.9±0.7	9.8±0.5	1.1±0.1	6.3±0.7	4.4±0.5	6.3±0.3	0.7±0.1
第3级稳定塘	10.5±0.8	12.8±0.5	13.5±0.5	0.3±0.1	1.9±0.1	2.3±0.1	2.4±0.1	0.1±0.0
第4级稳定塘	4.7±0.7	3.6±0.3	5.1±0.3	0.3±0.1	5.9±0.9	4.4±0.3	6.4±0.3	0.4±0.0

3 讨论

邓良伟等^[21]分别通过SBR工艺、厌氧-SBR工艺以及厌氧-加原水-间隙曝气(Anarwia)工艺对猪场废水的处理效果进行了分析比较。其结果表明:相较于其他2个工艺,以厌氧-SBR工艺为代表的常规厌氧-好氧组合工艺对猪场养殖废水的处理效果不明显,不适用于猪场养殖废水的处理。近年来,出现的一些新的养殖废水处理技术在技术层面上解决了大部分养猪场普遍采用厌氧-好氧组合工艺去除率低的问题,取得了比较好的治理效果。金海峰等^[22]采用UASB+A/O+Fenton工艺对猪场养殖废水进行处理,并在A/O段采用MBR工艺代替二沉池进行固液分离,经处理后的废水COD从8 000 mg·L⁻¹降至100 mg·L⁻¹以下,氨氮从600 mg·L⁻¹降至15 mg·L⁻¹以下。王亮等^[1]采用UASB-SFSBR-MAP(磷酸铵镁结晶)组合工艺实验了对养殖废水的高效去除,该技术对COD、氨氮和总磷的去除率分别达到了95.1%、92.7%和88.8%,其中MAP对磷的回收率达到了83.8%。以上技术处理效果较好,但工程投资和运行成本较高。因此,对于有土地资源的养殖场来说,以稳定塘为基础的低成本生态处理技术可以为养殖废水的末端处理提供参考。

本研究介绍的原有SBR工艺的处理效率过低,污水污染负荷仍然很高,这就对串联稳定塘的处理能力提出了较高要求。以生物膜+双穗雀稗为核心的前2级生物强化稳定塘,其主要治污机理在于以下3个方面:1)悬挂在水面以下的微生物膜填料具有机械强度高、比表面积大的特点,不仅能够很好的起到固定微生物的作用,也为水生动物提供良好的栖息场所,有利于提高环境中生物种群的丰度和密度,形成复杂的食物链系统;2)本工程所筛选的水体修复植物双穗雀稗具有根系发达、耐污能力强等优势,其根系不仅能够从水体中大量地吸收氮、磷等营养元素,还能够向水体中分泌可供微生物利用的O₂和有机酸等代谢产物,促进根系与微生物膜填料之间形成丰富的微生物群落,提高生物强化塘系统的脱氮除磷效果^[23]。通过对双穗雀稗进行定期收割和饲料化加工,可同时实现较高的水质净化效果和经济收益;3)栽种于生物膜填料中的双穗雀稗,其发达的根系与生物膜填料在空间上相互交叉缠绕,形成复杂的立体式空间结构。生物膜填料可以为双穗雀稗的稳定生长提供结构上的支撑,而双穗雀稗分泌的代谢产物又可以为附着在生物膜填料表面的微生物群落提供必需的养分,二者相互作用,充分发挥各自的优势,从而实现高效去除氮磷等污染物的目的^[24]。

实际上,由生物膜和双穗雀稗构成的前2级生物强化稳定塘系统已经将绝大部分污染物质进行了吸收和降解。可能是由于前2级生物强化塘系统中双穗雀稗覆盖率较高、根系发达,使得截留在根系和生物膜上的污染物能够充分的被植物和微生物所利用,从而实现高效的去污效果。第3级塘系统对COD、氨氮和总氮的消纳量也比较高,其主要的原因是该塘占地面积大、水深较深,废水能够在塘内停留很长的时间而被水体中的植物和微生物所吸收利用。相对于其他几个塘处理单元,第3级塘系统未经较多的人工修饰和强化,水环境中微生物的种类和密度相较于前2级塘系统较少,塘中的莲花、水花生等植物多为自然生长,植被的覆盖率也较低,因此该塘系统

虽然能够大量的消纳污染物质,但单位容积内对污染物的消纳量偏少,消纳能力较差。经过前3级塘系统的消纳,废水中绝大部分污染物已被降解和去除,再经过第4级植物塘的强化作用,使得废水中的污染物浓度能够在串联生物强化稳定塘系统中逐级递减,系统出水最终能够达到并优于国家《畜禽养殖业污染物排放标准》中的排放要求。

通过对原SBR工艺进行优化以及在原废水处理工艺之后增设串联生物强化稳定塘系统,虽然能够使处理后的养殖废水达标排放,但还需要持续跟踪和研究该系统的长期运行效果和维护方法。此外,现阶段国家《畜禽养殖业污染物排放标准》对污染物浓度的限值较高,若按照此标准向环境中排放养殖废水,仍然存在一定的污染风险。建议养殖企业加强与种植行业的合作,开发种养结合的生态循环技术模式,实现养分的资源化利用^[20]。

4 结论

1) 向SBR工艺缺氧段投加乙酸钠,可以有效提高猪场沼液废水中COD和氮的去除率。当乙酸钠投加量为 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,COD、氨氮、总氮的去除率可以提高约1倍。

2) 增设串联生物强化稳定塘系统对原处理工艺排放的尾水进行深度处理,该系统对COD、氨氮、总氮和总磷的去除率分别可达到65%、80%、79%和83%,出水水质满足《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)中所要求的排放限值。

3) 由双穗雀稗和生物膜构成的前2级生物强化稳定塘能够大量削减废水中COD和氮磷等污染物,表现出较高的容积负荷。

参考文献

- [1] 王亮,陈重军,陈英旭,等. 规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 979-985.
- [2] 段妮娜,董滨,何群彪,等. 规模化养猪废水处理模式现状和发展趋势[J]. 净水技术, 2008, 27(4): 9-15.
- [3] 高春芳,刘超翔,王振,等. 人工湿地组合生态工艺对规模化猪场养殖废水的净化效果研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 154-159.
- [4] SU J J, LIU Y L, SHU F J, et al. Treatment of piggery wastewater by contact aeration treatment in coordination with the anaerobic fermentation of three-step piggery wastewater treatment (TPWT) process in Taiwan[J]. Journal of Environmental Science & Health Part A, 1997, 32(1): 55-71.
- [5] BORTONE G. Integrated anaerobic/aerobic biological treatment for intensive swine production[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5424-5430.
- [6] 董宝刚,宋小燕,刘锐,等. 间歇曝气SBR与传统SBR处理养猪沼液的比较研究[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4309-4316.
- [7] 邓良伟,郑平,李淑兰,等. 添加原水改善SBR工艺处理猪场废水厌氧消化液性能[J]. 环境科学, 2005, 26(6): 107-111.
- [8] 宋小燕,刘锐,税勇,等. 间歇曝气SBR处理养猪沼液的短程脱氮性能[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1873-1879.
- [9] LI J, ELLIOTT D, NIELSEN M, et al. Long-term partial nitrification in an intermittently aerated sequencing batch reactor (SBR) treating ammonium-rich wastewater under controlled oxygen-limited conditions[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, 55(3): 215-222.
- [10] 王欢,裴伟征,李旭东,等. 低碳氮比猪场废水短程硝化反硝化-厌氧氨氧化脱氮[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 815-821.
- [11] OBAJA D, MACE S, MATA-ALVAREZ J. Biological nutrient removal by a sequencing batch reactor(SBR) using an internal organic carbon source in digested piggery wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(1): 7-14.
- [12] 邵留,徐祖信,尹海龙. 污染水体脱氮工艺中外加碳源的研究进展[J]. 工业水处理, 2007, 27(12): 10-14.
- [13] 张巍,许静,李晓东,等. 稳定塘处理污水的机理研究及应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(8): 1396-1401.

- [14] 潘涌璋, 唐纪进, 张临苏. 高级综合稳定塘处理养猪场废水[J]. *环境工程*, 2004, 22(5): 12-13.
- [15] COSTA R H R D, MEDRI W. Modelling and optimisation of stabilisation ponds system for the treatment of swine wastes: Organic matter evaluation[J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2002, 45(3): 385-392.
- [16] CRUDDAS P, WANG K, BEET D, et al. Diagnosis of an anaerobic pond treating temperate domestic wastewater: An alternative sludge strategy for small works[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 63: 64-71.
- [17] FORBES D A, REDDY G, HUNT P G, et al. Comparison of aerated marsh-pond-marsh and continuous marsh constructed wetlands for treating swine wastewater[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2010, 45(7): 803-809.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] 张兰河, 丘晓春, 张宇, 等. 碳源投加方式对SBR工艺脱氮速率的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(2): 731-736.
- [20] 郑效旭. 规模化养猪废水处理技术与工艺优化[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [21] 邓良伟, 郑平, 陈子爱. Anarwia工艺处理猪场废水节能效果的研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12): 172-175.
- [22] 金海峰, 佟晨博, 朱永健, 等. UASB+A/O+Fenton组合工艺处理生猪养殖废水工程实例[J]. *资源节约与环保*, 2015(12): 54-55.
- [23] 莫负恩, 顾洪如, 沈益新, 等. 双穗雀稗对猪场污水的净化效果[J]. *草地学报*, 2010, 18(3): 469-472.
- [24] 杨清海, 李秀艳, 赵丹, 等. 植物-水生动物-填料生态反应器构建和作用机理[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(6): 852-857.
- (本文编辑: 郑晓梅, 张利田)

Process optimization of SBR-biological stabilization ponds for swine wastewater treatment

ZHENG Xiaoxu^{1,2}, LI Huili¹, XU Shengjun², ZHANG Bao^{1,2}, ZHANG Xupo², AN Na², BAI Zhihui^{2,3,*}

1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author, E-mail: zhbai@rcees.ac.cn

Abstract In order to solve the problem not up to the regulatory standards for sequencing batch reactor (SBR) effluent during treating the low C/N ratio swine wastewater from a large-scale pig farm in a subtropical area, the influence of sodium acetate dosage on the SBR treatment of swine wastewater was studied. In addition, a four-stage biological stabilization ponds (BSPs) was used to strengthen the SBR effluent treatment. The results showed that at sodium acetate dosage of 400 mg·L⁻¹, the average removal rates of COD, ammonia nitrogen, and total nitrogen in the SBR were improved from 16%±1%, 25%±4%, 14%±1% to 32%±1%, 55%±2%, 27%±4%, respectively. The average removal rates of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus in the four-stage BSPs were 65%±2%, 80%±4%, 79%±3% and 83%±4%, respectively, and their corresponding average effluent concentrations were (155±5), (67±2), (89±2) and (6±1) mg·L⁻¹, respectively, all of which met the requirements of the Discharge Standards of Pollutants for Livestock and Poultry Breeding(GB 18596-2001). The first two stages of the BSPs, which consisted of biofilms and *Paspalumdistichum*, could account for 57%, 50%, 51% and 81% of the total reduction of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus along the entire BSPs, respectively. These results indicated that SBR-biological stabilization ponds could achieve the significant removal effects on the main pollutants in swine wastewater, such as COD, ammonia nitrogen, and total nitrogen and total phosphorus, and realize the discharge standard.

Keywords swine wastewater; sequencing batch reactor (SBR); biological stabilization ponds(BSPs); *Paspalumdistichum*; biofilm