



文章栏目：环境生物技术

DOI 10.12030/j.cjee.202102089

中图分类号 X705

文献标识码 A

张泽, 孙亚平, 钟铭君, 等. 加挂填料种植狐尾藻提升 A/O 工艺处理猪场沼液的效果[J]. 环境工程学报, 2021, 15(8): 2770-2777.

ZHANG Ze, SUN Yaping, ZHONG Mingjun, et al. Treatment effect of piggery biogas slurry by improved A/O process with adding packing and planting myriophylla[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(8): 2770-2777.

加挂填料种植狐尾藻提升 A/O 工艺处理猪场沼液的效果

张泽, 孙亚平, 钟铭君, 崔理华*

华南农业大学资源环境学院, 广州 510642

第一作者: 张泽(1996—), 男, 硕士研究生。研究方向: 猪场废水治理。E-mail: 453655903@qq.com

*通信作者: 崔理华(1963—), 男, 博士, 教授。研究方向: 水污染控制工程等。E-mail: lihui@scau.edu.cn

摘要 为提升 A/O 工艺对猪场沼液中污染物的去除效果, 实现高效率且低成本的运行模式, 通过对 A/O 工艺加挂弹性填料种植狐尾藻来优化工艺。结果表明: 当进水 COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别为 441~948、401~1 579 和 369~1 594 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 改良 A/O 工艺系统出水 COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为 42.5%~97.4%、36.9%~88.3% 和 94.2%~99.4%, 均优于 A/O 工艺的去除效果且具有显著提升。综合考虑对污染物的去除效果以及企业运行成本, 在水力停留时间为 10 d 时, 改良 A/O 工艺出水水质达到最优, 出水 COD 平均去除率可达 75.3%, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率为 96.2%~99.5%, TN 的出水质量浓度为 70~296 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此外, 可结合多级改良 A/O 工艺和组合工艺进一步优化出水水质。除微生物同化作用以及硝化反硝化途径外, 系统含氮类物质还可通过狐尾藻植物去除。改良 A/O 工艺中狐尾藻植物能够大量生长, 含水量为 88.8%~89.0%, TP 和 TN 质量分数分别为 3.4~5.2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 51.4~53.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, TN 质量分数要远高于普通富营养化水体栽培的狐尾藻, 这说明狐尾藻在改良 A/O 工艺中能够更好的吸收污染水体中的含氮物质。以上结果可为改良 A/O 工艺对猪场沼液的优化处理提供参考。

关键词 猪场沼液; 改良 A/O 工艺; 弹性填料; 狐尾藻

近年来我国的养猪行业逐渐规模化、企业化, 猪的出栏量以达世界最多^[1]。养猪行业每年可产生大量的粪便, 但其有效资源化利用率却不足 50%^[2]。我国每年产生大量的猪粪水, 其中包括了粪便、尿液以及洗涤废水^[3-4]。猪场废水在经过处理之前大多需要经过沼气池厌氧发酵过程, 而将猪场沼液直接排放到江河中会引起水体富营养化等一系列环境问题^[5-6]。因此, 亟待研发出一种高效且低能耗的猪场沼液处理优化工艺^[7]。目前常用的生化处理工艺有 SBR 工艺^[8]、生物过滤器^[9]、厌氧氨氧化技术^[10]和缺氧/好氧工艺 A/O 工艺^[11]等。A/O 工艺前置缺氧池, 可补充硝化池所需碱度, 同时使反硝化池未完全处理的有机物得到进一步去除, 降低运行费用^[12-13]; 此外, A/O 工艺因其运行成本低, 故结合其他技术可以起到良好的处理效果, 因而被广泛应用。陈锦良^[14]基于 A/O 工艺的微电解耦合反硝化污泥深度处理猪场沼液, 出水水质中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均质量浓度分别为 42.5、2.4、9.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。LIU 等^[15]采用两级缺氧/好氧复合膜生物反应器 A/O-A/O-MBR 对垃圾填埋场产生的渗滤液进行了 81 d 的处理, 对总氮以及氨氮的去除率达 80.7% 和 99.3%。孙亚平等^[16]利

用两级 A/O 工艺以及人工湿地等工艺组合深度处理猪场废水，对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率为 76.40%~98.41%，TP 的去除率维持在 83.92%~99.84%，COD 的去除率则为 89.26%~98.62%。

有研究结果^[17]表明，沉水植物对水体中营养物质的吸收要大于漂浮植物和挺水植物。金树权等^[18]通过研究发现，水体生物修复中的微生物与植物修复效果之间存在密切联系，虽然沉水植物直接吸收氮磷比例占水质中氮磷比例不高，但通过促进植物体吸附、改善环境提高水体微生物转化等增效作用较为明显。狐尾藻是沉水植物中常见的一种，其对水体中氮磷等营养物质具有较强的吸收能力^[19]，植物根系对有机碳的释放有助于提高低 C/N 污水的总氮去除效率，收割后的狐尾藻还可作为湿地景观观赏以及作为饲料使用^[20-21]。吴晓梅等^[22]利用狐尾藻处理猪场沼液，结果表明，当水力停留时间为 40 d 时对沼液的处理效果最好，沼液中 COD 以及 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率分别为 65.99% 和 59.54%。近年来人们提出了运用填料与 A/O 工艺相结合的污水处理方法^[23]。晁雷等^[24]运用 3 种不同填料对比了强化 A/O 工艺处理炼化废水，结果表明，弹性填料对炼化废水中 COD、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 TN 的去除效果相对较好，去除率分别为 80.6%、95%、75%。弹性填料因其结构具备弹性可保持稳定性，可使填料表层吸附微生物并进行正常的新陈代谢，在好氧池中可减少了对微生物的冲击作用，因此，弹性填料的加入有助于微生物更好生长繁殖^[25]，在一定程度上可强化 A/O 工艺。

本研究中采用对 A/O 工艺进行方法的优化，在池上加挂弹性填料仿生水草的同时在表面种植狐尾藻，监测了其水质指标变化并调整了运行参数，同时设置对照组观察，对比探讨了 A/O 工艺和改良 A/O 工艺对猪场沼液常规污染物质去除能力的优化效果，以期为强化 A/O 工艺处理猪场沼液提供参考。

1 实验材料及方法

1.1 实验装置及进水

实验装置如图 1 所示。2 套实验装置均由反硝化池、硝化池组成，池与池之间由 PVC 管连接，装置均由单个容积 200 L 的塑料桶制成。运行过程中添加的沼液均为实际废水，通过水泵的作用将沼液抬升自流到反硝化池和硝化池；外接曝气装置，同时在反硝化池内安装推流器，并控制进水量、曝气量以及回流量；好氧池中溶解氧控制在 $2.0\sim 4.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，外回流比控制为 50%，硝化液回流比为 1:1，污泥龄控制为 20 d。通过添加弹性填料仿生水草强化微生物处理技术，种植狐尾藻增强对水体中污染物质的去除能力，提升植物微生物共生系统的处理效果；在硝化池与反硝化池中均悬挂弹性填料仿生水草并在池表面种植狐尾藻，仿生水草在池内的填充量为 50%，狐尾藻种植面积覆盖池表面的 75%；同时，设置空白组作为水质排放指标的对照。

本实验在广东省惠州市某猪场内进行，系统运行前期通过接种猪场废水处理厂中的沉淀污泥

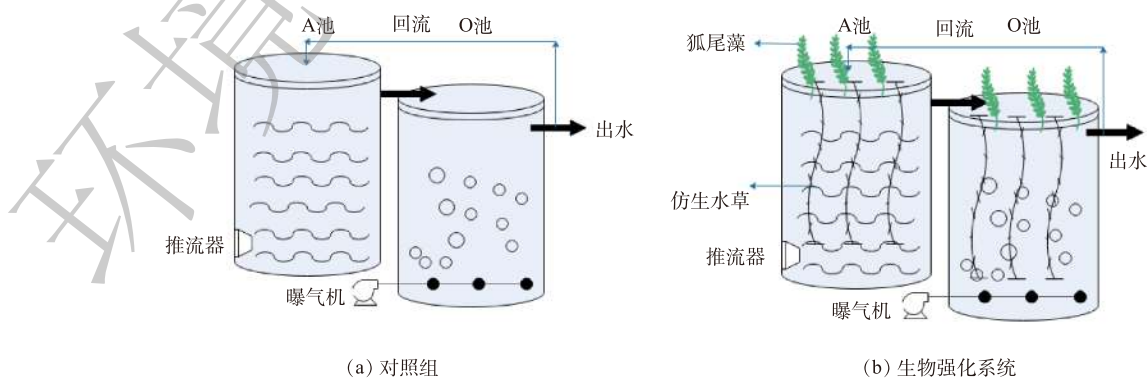


图 1 A/O 工艺装置示意图

Fig. 1 Device diagram of the A/O system

启动反应器,将沼液曝气培养驯化微生物,进水沼液各项指标参见表1。

1.2 实验方法

A/O工艺系统运行前期进行15 d污泥驯化,每日早晚各进实际废水沼液1 h,通过添加碳酸氢钠调节池中pH。水力停留时间测试分为3个时间阶段:第1~70天水力停留时间20 d,每日计划进水20 L;第70~130天水力停留时间13 d,每日计划进水30 L;第130~190天水力停留时间10 d,每日计划进水40 L。每7 d测1次水样,分别测定进水沼液、反硝化池和硝化池出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、COD、TN、SS、MLSS、DO等水质指标,通过对比A/O工艺以及改良A/O工艺中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、COD、TN的去除率以及出水的质量浓度,以此来对比两者去除效果的差异。实验结束后保留植物样本,称量狐尾藻的湿重和干重以此计算植物含水量;同时,测试植物中N、P的积累量,观察植物吸收猪场沼液中氮磷的情况。

1.3 分析方法

水质测定方法:COD采用重铬酸钾消解法;总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)采用纳氏试剂分光光度法;硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)采用酚二磺酸分光光度法;亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法;污泥质量浓度(MLSS)和挥发性污泥质量浓度(MLVSS)使用标准称量法测定;溶解氧(DO)使用便携式溶解氧仪测定;pH使用雷诺pH计测定。植物指标的测定方法:植物含水量采用烘箱法;植物中全氮(TN)采用TN- $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-奈氏比色法;植物中全磷(TP)采用TP- $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-钼锑抗比色法。

2 结果与讨论

2.1 改良A/O工艺对猪场沼液中耗氧有机污染物(以COD计)的去除效果

如图2所示,猪场沼液进水COD值为441~948 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,A/O工艺对COD的去除率为32.9%~90.3%,改良A/O工艺对COD的去除率为42.5%~97.4%,改良A/O工艺COD平均去除率较A/O工艺提升17%。A/O工艺耗氧有机污染物(以COD计)出水质量浓度为86~571 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,改良A/O工艺出水质量浓度为37~475 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。改良A/O工艺中耗氧有机污染物(以COD计)出水浓度明显低于A/O工艺出水浓度,但由于沼液进水COD值波动较大,从而导致出水浓度以及去除率的变化较大,故当沼

表1 猪场沼液中各污染物的质量浓度

Table 1 Concentrations of pollutants in biogas slurry of pig farm $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

数值类型	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$
浓度范围	441~948	369~1 594	401~1 597	0.13~8.62	0.03~2.53
平均值	676±122	672±284	699±283	2.16±1.96	0.51±0.50

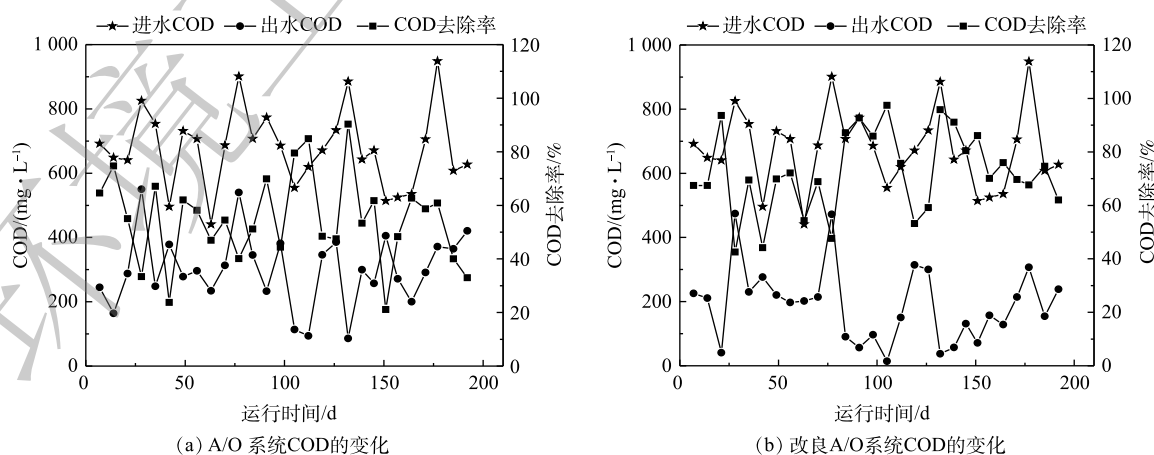


图2 对比A/O系统与改良A/O系统中COD的变化

Fig. 2 Comparison of COD changes between A/O system and improved A/O system

液进水耗氧有机污染物(以 COD 计)浓度过高时,改良 A/O 工艺未能充分将耗氧有机物分解,出水浓度未能完全满足排放标准。因此,后续应用中可设置多级改良 A/O 工艺,从而实现进一步对耗氧有机污染物(以 COD 计)的去除^[16]。A/O 工艺水力停留时间过长并不利于对猪场沼液中耗氧有机污染物的去除,而且还会增加运行成本,因此,A/O 工艺加挂弹性填料种植狐尾藻在水力停留时间为 10 d 时最符合实际运行的情况,耗氧有机污染物(以 COD 计)的平均去除率和出水质量浓度分别为 75.3% 和 162 mg·L⁻¹。

2.2 改良 A/O 工艺对猪场沼液中氮素的去除效果

如图 3 所示,猪场沼液 NH₄⁺-N 的进水质量浓度为 369~1 594 mg·L⁻¹,波动范围较大。A/O 工艺对 NH₄⁺-N 的去除率为 39.2%~99.2%,改良 A/O 工艺对 NH₄⁺-N 的去除率为 94.2%~99.4%,平均去除率提升至 97.2%。A/O 工艺和改良 A/O 工艺 NH₄⁺-N 的出水质量浓度分别为 4~523 mg·L⁻¹ 和 2~49 mg·L⁻¹,改良 A/O 工艺 NH₄⁺-N 的出水质量浓度均小于 50 mg·L⁻¹,满足国家排放标准。改良 A/O 工艺中因悬挂仿生水草,因而强化了微生物对 NH₄⁺-N 的去除效果^[24],仿生水草表面的生物膜能够提高系统硝化菌的数量;狐尾藻对一定浓度的沼液中 NH₄⁺-N 具有较强的吸收作用,同时,植物结合微生物对 NH₄⁺-N 去除能力具有增强效果^[18]。综上所述,改良 A/O 工艺对沼液中 NH₄⁺-N 去除能力显著。改良 A/O 工艺在水力停留时间 20 d 时对 NH₄⁺-N 的去除效果较差,平均去除率和出水质量浓度分别为 94.6% 和 48 mg·L⁻¹;在水力停留时间为 10 d 时,平均去除率和出水质量浓度分别为 98.4% 和 7 mg·L⁻¹,去除效果较优于水力停留时间 13 d 的 98.3% 和 10 mg·L⁻¹。当水力停留时间为 20 d 时,O 池对 NH₄⁺-N 的去除能力大大减弱,水力停留时间过长导致 A 池和 O 池的 NH₄⁺-N 出水浓度均有所增加,对 O 池中硝化作用去除 NH₄⁺-N 能力的削弱尤为明显。由于水力停留时间过长,导致负荷过小,仅为 0.3 m³·(m²·d)⁻¹,远低于傅金祥等^[26]在 A/O 工艺运用中的最佳负荷 1 m³·(m²·d)⁻¹,而污泥自身发生氧化导致污泥越来越少从而降低硝化反硝化途径处理效果,进而削弱了好氧硝化细菌将 NH₄⁺-N 转化为 NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 的能力。综上可知,改良 A/O 工艺对 NH₄⁺-N 的去除效果更优,并随着水力停留时间的减少,对 NH₄⁺-N 去除能力不断增强,且在水力停留时间为 10 d 时去除效果达到最佳。这与李海华等^[27]的研究结果相近。

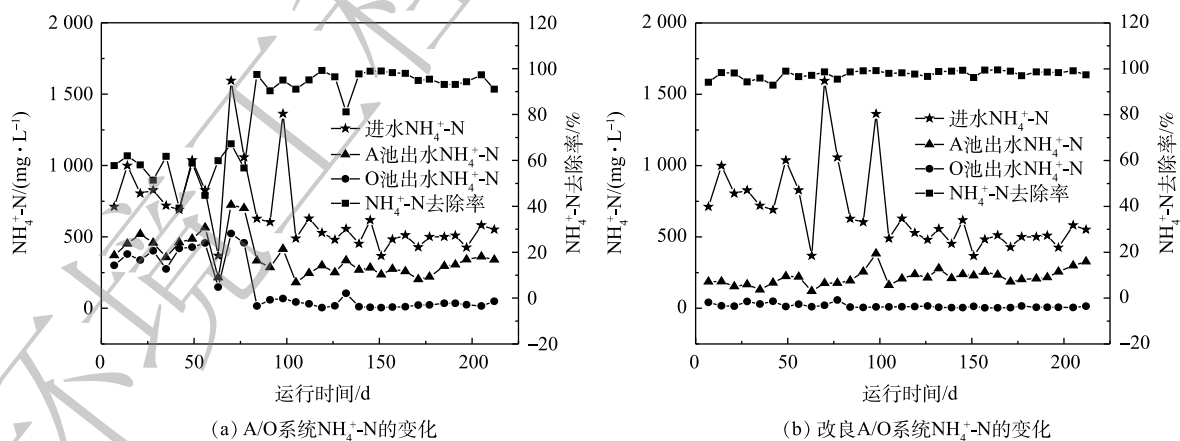


图 3 对比 A/O 系统与改良 A/O 系统中 NH₄⁺-N 的变化

Fig. 3 Comparison of NH₄⁺-N changes between A/O system and improved A/O system

如图 4 所示,当进水沼液 NO₃⁻-N 质量浓度为 0.1~9 mg·L⁻¹ 时,改良 A/O 工艺 A 池 NO₃⁻-N 出水质量浓度在 1~98 mg·L⁻¹,O 池出水的 NO₃⁻-N 质量浓度为 27~310 mg·L⁻¹。可见,改良 A/O 工艺平均出水质量浓度比 A/O 工艺平均出水质量浓度低 78 mg·L⁻¹,有明显改善。O 池出水质量浓度波动较大

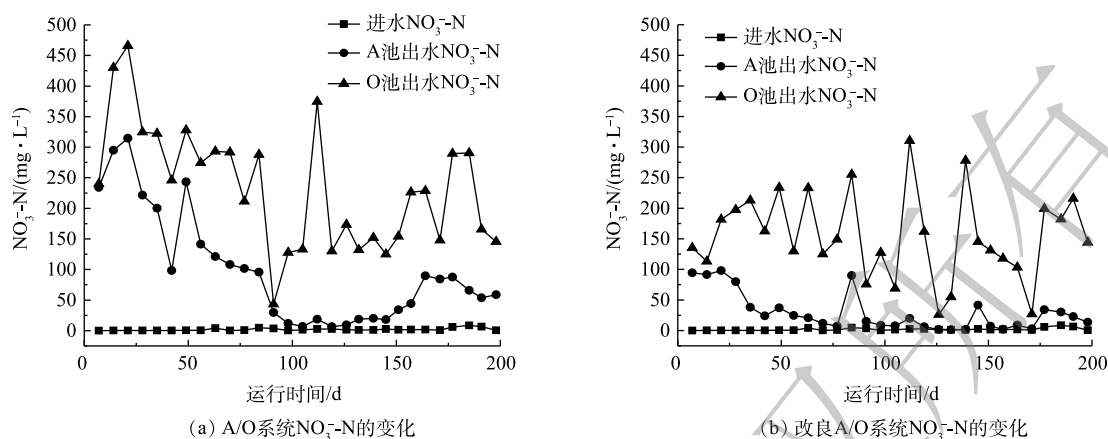


图4 对比A/O系统与改良A/O系统中 NO_3^- -N的变化

Fig. 4 Comparison of NO_3^- -N changes between A/O system and improved A/O system

的原因是，由于进水沼液污染物浓度波动较大，当进水沼液 NH_4^+ -N质量浓度过高时， NH_4^+ -N在O池中硝化菌作用下转化为 NO_3^- -N的质量浓度也随之升高。在水力停留时间20 d时A池和O池中 NO_3^- -N浓度过高，水力停留时间过长导致营养物质缺乏不利于硝化池和反硝化池中微生物的生长，降低反硝化菌将 NO_3^- -N转化为 N_2 的效率。此外，低C/N比废水也会降低脱氮的效率，导致A池中 NO_3^- -N浓度过高，进而影响O池中的 NO_3^- -N出水浓度。当减少水力停留时间时，A池与O池中 NO_3^- -N浓度均有不同程度的下降，改良A/O工艺在水力停留时间为13 d时，排放质量浓度均值最低，达到 $135 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

如图5所示，沼液进水TN质量浓度为 $401 \sim 1597 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，波动范围较大。A/O工艺TN的出水质量浓度为 $115 \sim 502 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，TN的去除率为 $22.3\% \sim 88.3\%$ ；改良A/O工艺TN的质量浓度为 $70 \sim 402 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，TN的去除率为 $36.9\% \sim 89.0\%$ ，TN平均去除率提升至 67.1% ，去除效果具有明显改善。受进水沼液中TN浓度的影响，导致改良A/O工艺出水的TN的质量浓度和去除率波动较为明显，后续可通过多级改良A/O工艺结合组合工艺进一步降低TN的出水浓度。改良A/O工艺TN的出水质量浓度在水力停留时间20、13和10 d时的均值分别为 281 、 175 和 $183 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可见，水力停留时间过长同样不利于TN的去除， NH_4^+ -N和 NO_3^- -N出水质量浓度的增加影响TN的变化，负荷过小不利于植物微生物结合的共生系统对污染物质的去除。当水力停留时间在13 d时，改良A/O工艺

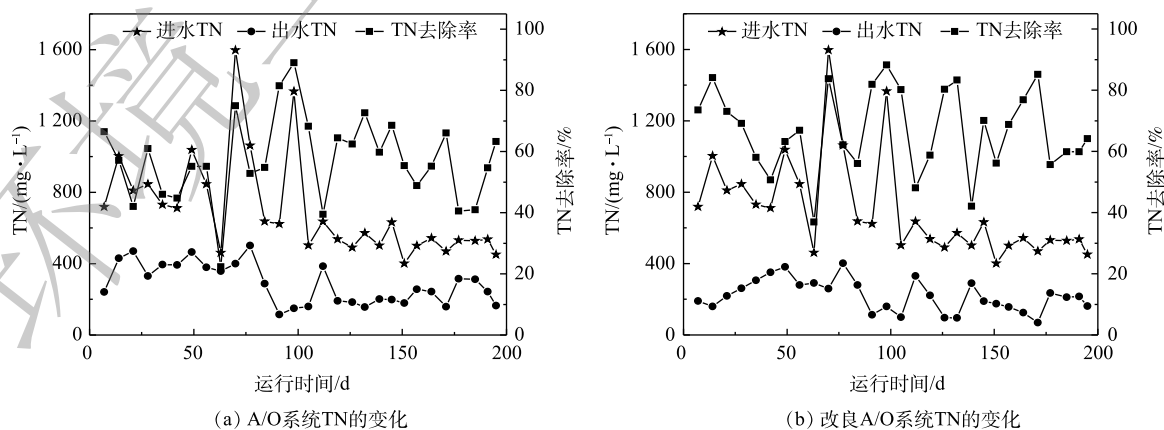


图5 对比A/O系统与改良A/O系统中TN的变化

Fig. 5 Comparison of TN changes between A/O system and improved A/O system

TN 的出水质量浓度达到最低值, 为 95~330 mg·L⁻¹, 同时 TN 去除率达到最高值, 为 72.2%。

2.3 改良 A/O 工艺中狐尾藻植物中的含水量以及氮、磷积累量

改良 A/O 工艺中测得狐尾藻各项指标结果见表 2。一般而言, 改良 A/O 工艺中种植狐尾藻的含水量要略低于常规富营养化水体中生长狐尾藻的含水量^[28]。本实验中, A 池和 O 池种植狐尾藻 TN 的含量远高于常规富营养化水体环境下种植狐尾藻 10.5~20.7 g·kg⁻¹ 的 TN 含量, TP 含量则略高于常规富营养化水体中 1.7~3.4 g·kg⁻¹ 的 TP 含量^[29]。有研究表明, 沉水植物净化增效作用大于本身直接吸收作用^[30], 在一定浓度范围内, 水生植物的净化率随水体中氮、磷等物质的含量增加而加大^[31], 这说明狐尾藻在改良 A/O 工艺中能够更好的吸收水体中的含氮物质。此外, A 池中狐尾藻的湿质量和干质量都远大于 O 池, 且 A 池中狐尾藻的 TN、TP 和含水量含量也高于 O 池中的含量。由此可知, A 池中的狐尾藻要比 O 池中的狐尾藻生长更加旺盛, 更有利于对猪场沼液中污染物的去除, 这可能是由于 A 池中的共生环境更利于狐尾藻的生长。以上结果均表明, 在一定条件下改良 A/O 工艺种植狐尾藻能够大量生长且能充分吸收其中的含氮物质。

表 2 A/O 工艺中狐尾藻植物的各项指标
Table 2 Indexes of myriophylla in A/O process

不同池中狐尾藻	湿质量/g	干质量/g	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	含水量/%
A池中狐尾藻	560.2	61.4	53.8	5.2	89.1
O池中狐尾藻	95.1	10.7	51.4	3.4	88.8

3 结论

1) 在 A/O 工艺中加挂弹性填料以及种植狐尾藻均对猪场沼液中 COD 和氮素均有明显的去除效果。其中, COD 的去除率为 42.5%~97.4%, 较对照组中 COD 平均去除率提升了 17%; NH₄⁺-N 的去除率为 97.2%, 较对照组平均去除率提升了 16%, 满足排放标准; A 池中 NO₃⁻-N 出水质量浓度为 1~98 mg·L⁻¹, O 池出水的 NO₃⁻-N 质量浓度为 27~310 mg·L⁻¹; 改良 A/O 工艺中 TN 的去除率为 36.9%~89.0%, 较 A/O 工艺具有明显改善。后续可通过多级改良 A/O 工艺结合组合工艺进一步优化出水水质。

2) 当改良 A/O 工艺水力停留时间为 10 d 时, 出水水质最符合实际排放要求。其中, 耗氧有机污染物 (以 COD 计) 的排放质量浓度为 57~307 mg·L⁻¹, 去除率可达 75.3%; NH₄⁺-N 排放质量浓度为 2~15 mg·L⁻¹, 去除率为 96.2%~99.5%, 平均去除率可高达 98.4%; TN 的排放质量浓度为 70~296 mg·L⁻¹, 平均去除率可达 70% 以上。

3) 狐尾藻植物含水率为 88.8%~89.1%, 在 A 池中狐尾藻 TN 和 TP 含量分别为 53.8 g·kg⁻¹ 和 5.2 g·kg⁻¹, O 池中 TN 和 TP 含量分别为 51.4 g·kg⁻¹ 和 3.4 g·kg⁻¹。改良 A/O 工艺狐尾藻 TN 的含量要远高于常规富营养化水体中狐尾藻 TN 的含量, 且狐尾藻净化增效作用大于本身直接吸收作用。因此, 狐尾藻在改良 A/O 工艺中能够更好的吸收去除污染水体中的含氮物质。

参 考 文 献

- [1] 涂敏. 规模化养猪场粪污处理与综合利用综述[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(15): 139-143.
- [2] ZHANG M M, LUO P, LIU F, et al. Nitrogen removal and distribution of ammonia-oxidizing and denitrifying genes in an integrated constructed wetland for swine wastewater treatment[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 104: 30-38.
- [3] MIYOKO W, TOMOKO Y, YASUYUKI F, et al. Treatment of swine wastewater in continuous activated sludge systems under different dissolved oxygen conditions: Reactor operation and evaluation using modelling[J]. *Bioresource Technology*,

- 2018, 250: 574-582.
- [4] ZHANG D, WANG X X, ZHOU Z G. Impacts of small-scale industrialized swine farming on local soil, water and crop qualities in a hilly red soil region of subtropical China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(12): 1524.
- [5] XU Z C, SONG X Y, LI Y, et al. Removal of antibiotics by sequencing-batch membrane bioreactor for swine wastewater treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 684: 23-30.
- [6] LI X, LI Y Y, LI Y, et al. Enhanced nitrogen removal and quantitative analysis of removal mechanism in multistage surface flow constructed wetlands for the large-scale treatment of swine wastewater[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 575-582.
- [7] LUO P, LIU F, ZHANG S N, et al. Nitrogen removal and recovery from lagoon-pretreated swine wastewater by constructed wetlands under sustainable plant harvesting management[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 258: 247-254.
- [8] 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.
- [9] MCKIE M J, BERTOIA C, EDMONDS L T, et al. Andrews. Pilot-scale comparison of cyclically and continuously operated drinking water biofilters: Evaluation of biomass, biological activity and treated water quality[J]. *Water Research*, 2019, 149: 488-495.
- [10] 王欢, 李旭东, 曾抗美. 猪场废水厌氧氨氧化脱氮的短程硝化反硝化预处理研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 114-119.
- [11] JIA S J, CHEN X Q, SUENAGA T, et al. Spatial and daily variations of nitrous oxide emissions from biological reactors in a full-scale activated sludge anoxic/oxic process[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2019, 127(3): 333-339.
- [12] WANG Q B, CHEN Q W. Simultaneous denitrification and denitrifying phosphorus removal in a full-scale anoxic-oxic process without internal recycle treating low strength wastewater[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 39(1): 175-183.
- [13] 晏广, 邱兆富, 曹国民, 等. A/O系统处理低C/N奶牛场废水中的抗生素[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(7): 1817-1826.
- [14] 陈锦良. 基于A/O工艺的微电解耦合反硝化污泥深度处理猪场沼液研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [15] LIU J B, ZHANG P Y, TIAN Z Y, et al. Pollutant removal from landfill leachate via two-stage anoxic/oxic combined membrane bioreactor: Insight in organic characteristics and predictive function analysis of nitrogen-removal bacteria[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 317: 69-76.
- [16] 孙亚平, 林运通, 梁瑜海, 等. 组合工艺对高浓度猪场废水的深度处理[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(S2): 169-174.
- [17] 张洪刚, 洪剑明. 人工湿地中植物的作用[J]. *湿地科学*, 2006, 4(2): 146-154.
- [18] 金树权, 周金波, 包薇红, 等. 5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 156-161.
- [19] LIU F, ZHANG S N, LUO P, et al. Purification and reuse of non-point source wastewater via Myriophyllum-based integrative biotechnology: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 3-11.
- [20] 钟爱文, 曹特, 张萌, 等. 光照和黑暗条件下苦草和穗花狐尾藻对铵态氮的吸收[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(2): 289-294.
- [21] 孙宏, 李宁, 汤江武, 等. 狐尾藻在养殖污水净化中的作用原理及相关应用进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2020, 56(3): 37-42.
- [22] 吴晓梅, 叶美锋, 吴飞龙, 等. 狐尾藻净化生猪养殖场沼液的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(4): 796-803.
- [23] 赵宪章, 董文艺, 王宏杰, 等. 组合填料强化多级AO工艺处理低温污水脱氮效果[J]. *环境工程*, 2018, 36(3): 49-53.
- [24] 晁雷, 孟佳, 王焕书, 等. 三种填料改良A/O工艺处理炼化废水的对比研究[J]. *水处理技术*, 2019, 45(8): 103-107.
- [25] FENG L J, YANG G F, ZHU L, et al. Enhancement removal of endocrine-disrupting pesticides and nitrogen removal in a biofilm reactor coupling of biodegradable *Phragmites communis* and elastic filler for polluted source water treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 187: 331-337.
- [26] 傅金祥, 陈东宁, 李微, 等. 水力负荷对A/O生物滤池处理生活污水的影响[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2008,

24(3): 447-450.

- [27] 李海华, 金艳艳, 刘保, 等. HRT及有机负荷对厌氧+好氧UF组合工艺处理养猪场粪污的试验研究[J]. *河南农业大学学报*, 2012, 46(6): 691-694.
- [28] 李倩, 全天秀, 李祖明, 等. 狐尾藻营养活性成分的研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(11): 318-322.
- [29] 余红兵, 肖润林, 杨知建, 等. 五种水生植物生物量及其对生态沟渠氮、磷吸收效果的研究[J]. *核农学报*, 2012, 26(5): 798-802.
- [30] XU W W, HU W P, DENG J C, et al. Effects of harvest management of *Trapa bispinosa* on an aquatic macrophyte community and water quality in a eutrophic lake[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 120-129.
- [31] 郑焕春, 周青. 微生物在富营养化水体生物修复中的作用[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 197-202.
- (责任编辑: 曲娜)

Treatment effect of piggery biogas slurry by improved A/O process with adding packing and planting myriophylla

ZHANG Ze, SUN Yaping, ZHONG Mingjun, CUI Lihua*

School of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

*Corresponding author, E-mail: lihui@scau.edu.cn

Abstract In order to improve the removal efficiency of pollutants from piggery biogas slurry by traditional A/O system and realize the operation mode of high efficiency and low cost, the process was optimized by adding elastic packing to A/O system and planting myriophylla. The results showed that when the influent COD, TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were 441~948, 401~1 597 and 369~1 594 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the removal rates of COD, TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were 42.5%~97.4%, 36.9%~88.3% and 94.2%~99.4% respectively, which were better than those of A/O system and had a significant improvement. In addition, the effluent quality can be further optimized by combining multi-stage improved A/O system and combined system. Considering the removal efficiency of pollutants and the operation cost of the enterprise, the HRT of 10 d was most suitable for the actual operation of the improved A/O system, the average removal rate of COD in the effluent was 75.3%, the average removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was 96.2%~99.5%, and the effluent concentration of TN was 70~296 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. In addition to microbial assimilation and nitrification and denitrification, nitrogen-containing substances in the system could also be removed by myriophylla. In the improved A/O system, myriophylla could grow in large quantities with water content of 88.8%~89.0%, TP and TN contents of 3.4~5.2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 51.4~53.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, and the concentration of TN was much higher than that of myriophylla in eutrophic water, which showed that myriophylla in the improved A/O system had better absorption performance toward nitrogen in the polluted water. The above results provide a reference for the optimization of piggery biogas slurry treatment by improved A/O system.

Keywords piggery biogas slurry; improved A/O system; elastic packing; myriophylla