

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM_{2.5}中元素浓度特征及其源分析 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM_{2.5}浓度分阶段改善目标情景分析 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM_{2.5}排放特征及减排潜力估算 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗冲,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制 吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氯效能 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃ SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪光,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施氮对菜地CH₄排放的影响 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH₄和N₂O排放的影响 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜评价多环芳烃污染土壤的农用风险 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)

《环境科学》征订启事(2018) 《环境科学》征稿简则(2042) 信息(2114, 2348, 2393)

HN-AD 菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液

刘向阳¹, 张千^{1*}, 吴恒¹, 李宸¹, 唐健泓¹, 封丽², 肖芃颖¹, 赵天涛¹

(1. 重庆理工大学化学化工学院, 重庆 400054; 2. 重庆市环境科学研究院, 重庆 401147)

摘要: 针对养猪废水采用传统工艺经厌氧发酵处理后, 形成高氨氮低碳氮比沼液, 导致脱氮效果差、工艺流程复杂、启动周期较长等问题. 本研究以异养硝化-好氧反硝化(HN-AD)菌为生物强化剂, 以 PAN 活性炭纤维作为填料的生物接触氧化池(BCO)为生物膜反应器, 形成生物强化 BCO 工艺处理猪场沼液. 前期污泥驯化阶段发现, NH_4^+ -N 浓度高于 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 污染物去除率明显降低, 经 HN-AD 菌剂生物强化后, 耐受 NH_4^+ -N 浓度可高于 $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 且能保持污染物的高效去除. 采用 HN-AD 生物强化的 BCO 工艺处理真实猪场沼液, 对 NH_4^+ -N、TN 和 COD 的平均去除率分别为 86.9%、70.5% 和 74.4%, 分别高于传统处理工艺的 57.6%、50.3% 和 50.0%, 出水浓度均低于相关污染物排放标准. 采用高通量测序技术研究了功能菌富集过程中微生物群落结构的变化规律, 结果表明, 生物膜内属于 HN-AD 菌的优势菌由 *Alcaligenes* 这一种菌属增加为生物强化后的 *Diaphorobacter*、*Acinetobacter* 和 *Thauera* 等多种菌属, 且 *Acinetobacter* 菌属的相对丰度明显高于接种菌剂. 扫描电子显微镜结果也进一步证实了生物强化的存在, 紧密附着在填料上的生物膜层表面富集了以杆状和球状为主的 HN-AD 功能菌.

关键词: HN-AD 菌剂; 生物强化; 生物接触氧化(BCO)工艺; 猪场沼液; 微生物群落结构

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2349-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201811106

Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria

LIU Xiang-yang¹, ZHANG Qian^{1*}, WU Heng¹, LI Chen¹, TANG Jian-hong¹, FENG Li², XIAO Peng-ying¹, ZHAO Tian-tao¹

(1. School of Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Academy of Environmental Science, Chongqing 401147, China)

Abstract: The conventional pretreatment process for swine wastewater is anaerobic fermentation. This process leads to the formation of high ammonia nitrogen, low carbon, and piggery biogas slurry, which usually results in poor denitrification effect, complicated process flow, and long startup period for the subsequent treatment process. In this study, a novel biological enhanced Biological Contact Oxidation (BCO) process using HN-AD bacteria as microbial inoculants, and PAN activated carbon fiber filler as biofilm carrier was proposed for the treatment of piggery biogas slurry. In the early stage of sludge acclimation, it was found that when NH_4^+ -N concentration was higher than $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the nitrification and COD removal in BCO was severely inhibited. When the BCO was enhanced by HN-AD bacteria, however, the tolerance concentration of NH_4^+ -N for bacteria in BCO could reach $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and the removal efficiency of NH_4^+ -N, COD, and TN could still remain at a high level. The bio-enhanced BCO process was used to treat the piggery biogas slurry. The average removal rates of NH_4^+ -N, TN, and COD were 86.9%, 70.5%, and 74.4%, respectively, which were higher than the 57.6%, 50.3%, and 50.0% of the traditional treatment process. The concentration of the pollutants mentioned above in the effluent was below the relevant discharge standards. The changes in the microbial community structure during the enrichment process of functional bacteria were studied by high-throughput sequencing technique. The results showed that the dominant bacteria belonging to HN-AD in the biofilm during the sludge acclimation process was *Alcaligenes*. After the addition of the HN-AD agent, however, the dominant bacteria were *Diaphorobacter*, *Acinetobacter*, and *Thauer*, and the relative abundance of *Acinetobacter* was much higher than that in the microbial inoculants. The results of scanning electron microscopy further confirmed the existence of bio-enhancement. The surface of the biofilm layer tightly attached to the filler was enriched with rod-like and globular HN-AD functional bacteria.

Key words: HN-AD agent; biological enhancement; biological contact oxidation (BCO) process; piggery biogas slurry; microbial community structure

随着规模化养猪场的迅速发展, 排放量不断增加的富含有机质、N、P 等营养物及致病菌等污染物的猪场沼液会带来严重的健康和环境危害^[1-3]. 猪场沼液普遍特征为高氨氮 (NH_4^+ -N $\geq 200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、低碳氮比(C/N < 3), 其带来的两大处理技术难点为: 高氨氮具有生物毒性, 抑制微生物生长; 沼液有机物浓度较低, 可生化性差, 导致 C/N 失调, 不能为微生物提供充足的碳源, 使得废水脱

氮效果差^[4,5]. 为提高沼液的 NH_4^+ -N 去除效率, 当前研究主要采用以下几种方式: 采用氨吹脱法^[6]、磷酸铵镁结晶法^[7]等物化方法大幅度降低沼液中

收稿日期: 2018-11-15; 修订日期: 2018-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708077); 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2018jsex-msybX0134)

作者简介: 刘向阳(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生物膜反应器脱氮工艺, E-mail: liuxy@2017.cqut.edu.cn
* 通信作者, E-mail: zhangqianswu2005@163.com

NH_4^+ -N浓度;添加原水或补加碳源调整碳氮比^[8];用臭氧氧化和微电解^[9,10]等方法提高沼液可生化性能.虽然上述方法可有效降低沼液中的 NH_4^+ -N浓度,提高其C/N及可生化性,但以上方式存在工艺复杂且后续处理成本提高等实际问题.部分研究人员采用CANNON等新型脱氮工艺处理猪场沼液^[11],虽然该工艺在低C/N条件下可对高氨氮取得较好的去除效果,但由于启动时间太长(210 d),限期了其工程化应用.因此,开发新型工艺高效处理猪场沼液势在必行.

生物接触氧化(biological contact oxidation, BCO)工艺由于对高氨氮具有一定的耐受性、抗冲击负荷能力强等特点^[12],被广泛应用于处理畜禽养殖沼液等低碳氮比有机废水^[13,14],但受碳源不足, NH_4^+ -N浓度高的影响,脱氮及有机物去除效果不理想^[15].鉴于此,本研究采用课题组前期筛选的异养硝化-好氧反硝化菌(heterotrophic nitrification-aerobic denitrification, HN-AD)对BCO工艺进行生物强化,前期研究发现,该HN-AD菌能高效处理低碳氮比高氨氮废水.采用HN-AD菌生物强化的BCO工艺用于猪场沼液的脱氮处理,借助BCO内载体较大的比表面积实现菌剂的固定,并在好氧环境下,通过运行条件优化实现系统内功能菌的富集和优势化构建,强化氨氮和有机物的去除.前期研究表明HN-AD菌可耐高氨氮且Yang等^[16]和Ren等^[17]发现在低C/N条件下也能高效脱氮,打破了人们对HN-AD菌只有在高碳氮比条件下才能获得高效脱氮的固有观念.此外,采用生物强化的BCO工艺启动时间短、工艺流程简单(一个反应器同时实现有机物和“三氮”的同步去除),有望成为经济、简洁、高效的新型生物脱氮工艺.

目前,国内外HN-AD菌的工程化应用较少,以HN-AD菌生物强化的BCO工艺进行猪场沼液处

理的研究更是鲜见报道^[18].本研究采用逐步增大 NH_4^+ -N负荷的策略启动BCO工艺,稳定运行后接种HN-AD菌剂对BCO进行生物强化,启动生物强化的BCO工艺后,通过高通量测序技术分析生物强化前后微生物多样性的变化规律,并结合扫描电镜(SEM)考察了填料表面生物膜的微观形态.同时考察了生物强化的BCO工艺对猪场沼液的实际脱氮效果,以期为该技术的优化和实际应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 BCO系统实验装置

BCO工艺流程图如图1所示.系统中采用10 mm厚的长方体有机玻璃池体作为生物接触氧化池的主体,池长500 mm,池宽300 mm,池高850 mm,反应器有效容积为90 L. BCO工艺采用上流式进水、曝气、停留、出水的间歇循环运行方式.

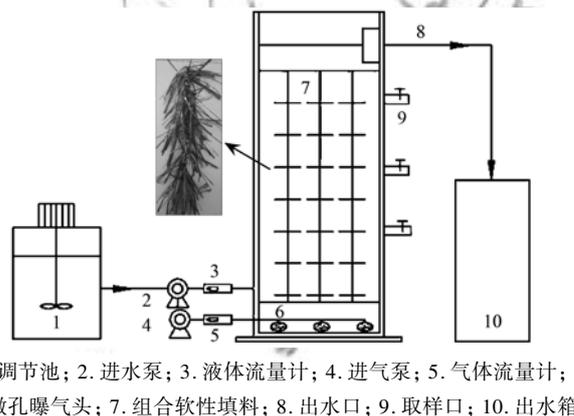


图1 BCO工艺流程示意

Fig. 1 BCO process flow chart

1.2 实验材料

生物接触氧化池内所用载体为PAN活性炭纤维填料,购置于南通森友碳纤维有限公司,其主要技术参数如表1所示^[19].填料层在BCO系统中的填充高度为750 mm.

表1 PAN活性炭纤维填料主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of PAN activated carbon fiber packing

项目	单丝直径/ μm	束间距/mm	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	堆积密度/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	挂膜时间/d
参数	11~18	100	900~1600	0.03~0.07	7~10

在启动前期向反应器中接种取自重庆巴南区某生活污水处理厂曝气池中的活性污泥,污泥浓度为 $5\ 887\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

实验用水分为人工配水和猪场沼液原水.在反应器启动运行阶段的模拟废水中,COD浓度为 $400 \sim 2\ 500\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N浓度为 $80 \sim 500\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.其COD:TN=(5~8):1,以无水乙酸钠为碳源,以硫酸铵为氮源,以磷酸氢二钾为磷源,同时添加微量元素以保证菌液的正常生长,其中微量元素成分为:

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}\ 2\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}\ 0.1\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{CaCl}_2\ 1.5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}\ 0.1\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.在处理过滤后的猪场沼液阶段,沼液中的COD、 NH_4^+ -N和TN的平均浓度分别为 855.4 、 314.8 和 $466.7\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.3 实验方法

初期向BCO反应器中接种 $15\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的活性污泥.连续闷曝2 d后,采取间歇进水并逐渐提高进水 NH_4^+ -N浓度方式启动反应器. NH_4^+ -N浓度梯度分别为 80 、 100 、 160 、 300 、 400 和 $500\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,经过90 d

的活性污泥驯化培养后,向反应器中接种课题组前期从养猪废水中分离筛选得到具有耐高 NH_4^+-N 、耐高 COD、生长周期短和易于培养等性能的 HN-AD 菌剂,同时添加营养物质以供菌剂生长.在经 HN-AD 菌生物强化的 BCO 系统间歇运行 12 d 后,对系统及及时采取排泥措施.启动过程中通过实时监测废水中有机物和含氮污染物的去除率及对填料表面的微生物进行显微镜检测.在 BCO 系统分别经活性污泥驯化和 HN-AD 菌剂生物强化前后,选取填料上的生物膜样品提取 DNA 后进行多样性测序分析.同时对原始填料和 HN-AD 菌生物强化后 BCO 系统中的填料进行扫描电镜表征分析.待经 HN-AD 菌生物强化后的 BCO 系统启动成功并稳定运行后,用该反应器序批式处理重庆市巴南区某生猪养殖场沼液,运行参数与启动运行时保持一致.

1.4 分析方法

本实验的水质指标均采用国家规定的标准方法测定^[20],DO 使用 HQ-30d 便携式溶解氧测定仪直接检测;COD 指标使用 LH-16K 型标准化学需氧量消解仪,采用重铬酸钾法测定; NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法、 NO_3^--N 采用酚二磺酸分光光度法测定;TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定.

填料表面上的生物样品先采用冷冻干燥做脱水

预处理^[21],然后采用 TESCAN MIRA3 热场发射扫描电镜观察生物膜表面微观形态结构. DNA 提取和高通量测序分别选取污泥挂膜和菌剂生物强化后的生物样品,离心弃去上清液后于 -80°C 保藏用于多样性测序分析.用购自天根生化科技(北京)有限公司的细菌基因组 DNA 提取试剂盒(TANamp Bacteria DNA Kit)提取样品的基因组 DNA^[22]. MiSeq 平台对 16S rRNA 基因高变区序列进行测序,测序区域选择 V3 + V4 区,测序片段为 468 bp,测序引物为 338F-806R,使用 Trimmomatic、FLASH 软件对 MiSeq 测序数据进行处理获得干净数据.在 Usearch 软件平台中使用 uparse 方法将序列按照彼此相似性为 97% 分归为许多小组,一个小组为一个 OTU,从而得到 OTU 的代表序列.然后,使用 uchime 检测 PCR 扩增中产生的嵌合体序列并从 OTU 中去除,再用 usearch_global 方法将优化序列 map 比对回 OTU 代表序列,最终得到 OTU 各样品序列丰度统计表^[23],相关性利用 SPSS Statistics 21 软件分析,多样性数据采用 i-sanger 平台(<http://www.i-sanger.com/>)分析.

2 结果与讨论

2.1 驯化阶段 BCO 工艺对有机物及含氮污染物的去除效果

如图 2 所示,向反应器中接种好氧污泥后,以

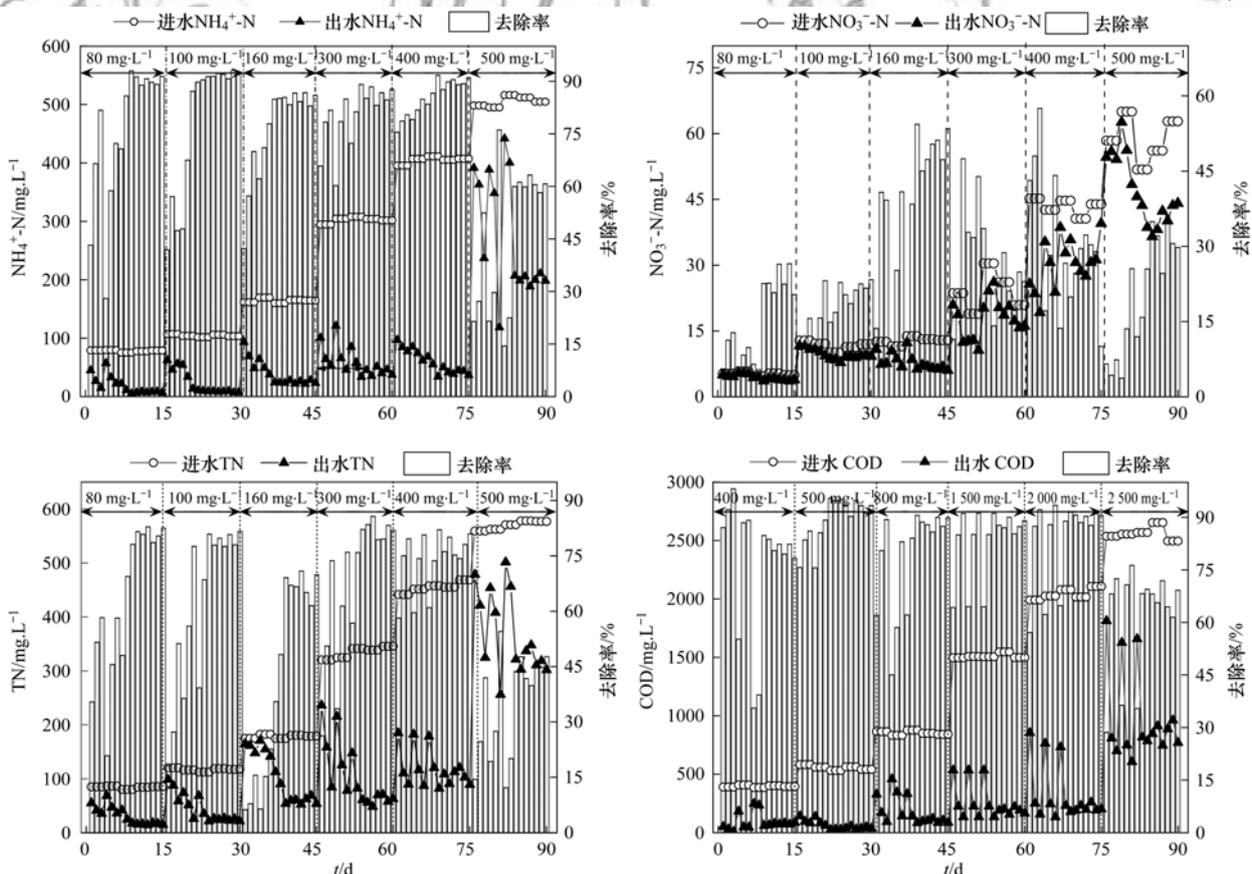


图2 BCO 工艺驯化过程对 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN 和 COD 去除率的变化情况

Fig. 2 Changes in removal rates of NH_4^+-N , NO_3^--N , TN, and COD upon adoption of the BCO process

模拟废水通过逐渐提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 浓度驯化生物接触氧化系统. 驯化过程中 C/N 保持为 5, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度从 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高至 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 如图 2, 在提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度驯化系统过程中, 在梯度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下, 系统的去除率均呈现升高的趋势. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度从 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 阶段, 经过 75 d 的驯化之后, 72 h 内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 和 COD 的平均去除率分别为 84.3%、30.0%、70.7% 和 89.6%, 但在高氨氮 ($>500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 条件下, 由于生活污水处理工艺中的活性污泥耐氨氮能力较差, 高浓度氨氮对活性污泥产生高毒性, 系统中微生物的生长受到严重抑制, 导致去除率出现下降且波动幅度较大. 由此可见, 需要对生物接触氧化池进行生物强化, 使得系统中的微生物能耐高浓度氨氮, 从而实现高效处理高氨氮猪场沼液.

2.2 HN-AD 菌生物强化对 BCO 工艺处理性能的影响

为了提高生物接触氧化池系统对高浓度氨氮的处理效率, 向反应器中接种 HN-AD 菌, 菌剂通过在 BCO 填料上的负载及固定, 并在好氧环境下, 通过观察填料表面生物膜的生长变化, 及时采取排泥措施以实现污染物的高效稳定去除, 最终优化运行

参数实现 HN-AD 菌剂在 BCO 反应器中的富集与优势化构建, 达到以 HN-AD 菌剂生物强化加强 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 的去除.

如图 3 所示, 当在第 90 d 高氨氮驯化后接种 HN-AD 菌剂, 反应器内的污染物去除率均缓慢回升, 在接种菌剂后的 12 d 内, 系统 72 h 的去除率逐渐上升, 其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 和 COD 的平均去除率分别从接种前的 60.5%、30.5%、44.5% 和 67.3% 升高至接种后的 79.0%、49.9%、63.0% 和 73.5%. 同时在接种后 12 d 时观察到反应器底部沉积了较多的污泥及从填料上脱落的大量生物膜, 为了抑制沉积污泥对反应器系统的影响, 对生物强化后的 BCO 系统及时排泥. 系统排泥后, 系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 和 COD 的去除率分别上升至 90.2%、43.5%、80.5% 和 83.2%, 污染物去除效果均较明显且能保持污染物高效稳定去除.

2.3 HN-AD 菌生物强化 BCO 系统处理猪场沼液效果

在经过接种污泥驯化和生物强化阶段后, 向 BCO 反应器系统内序批式通入重庆市巴南区某生猪养殖场沼液, 连续观察 30 d, 其对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、COD 的处理效果如图 4 所示, 在 HRT

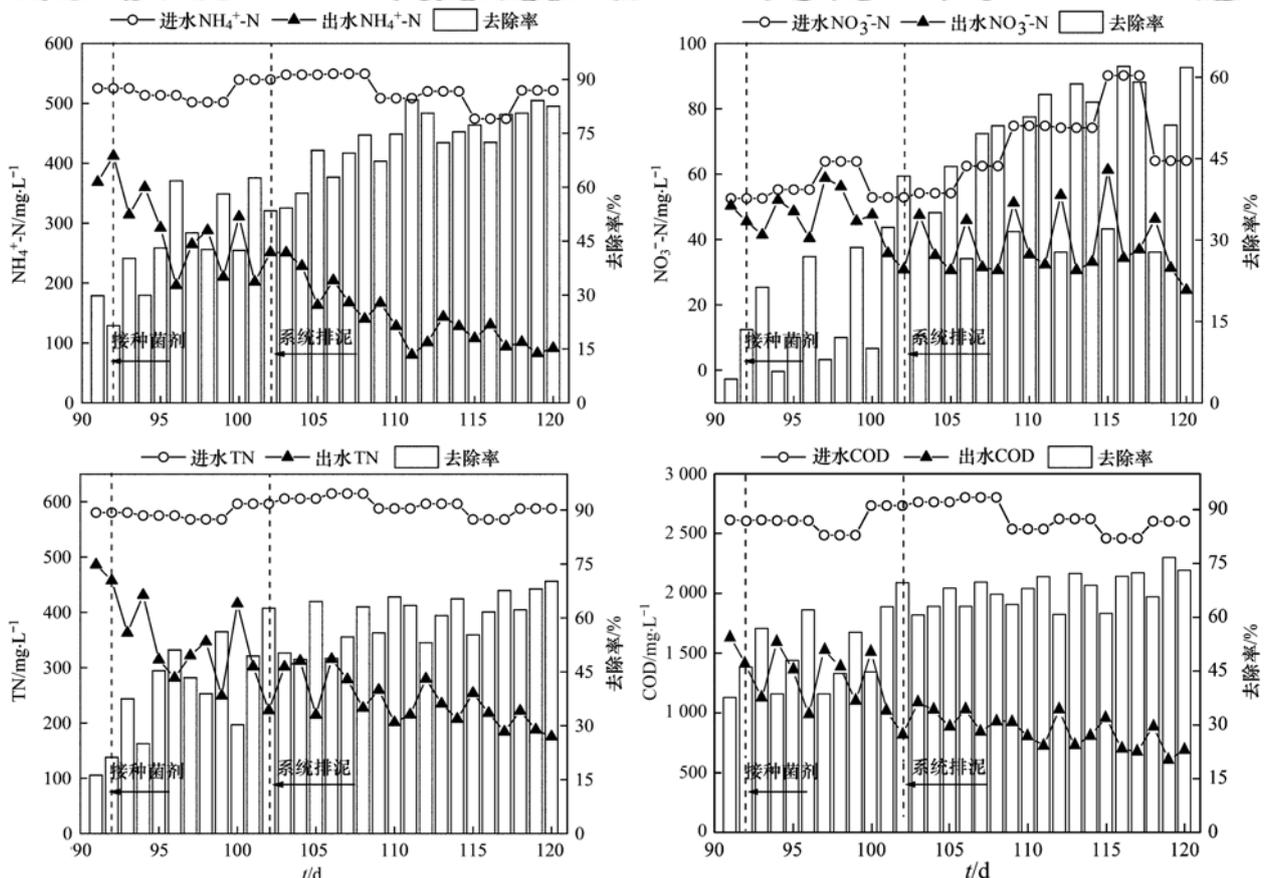


图 3 HN-AD 菌剂生物强化对 BCO 工艺处理性能的影响

Fig. 3 Effect of biological enhancement of HN-AD microbial agents on the treatment performance of BCO process

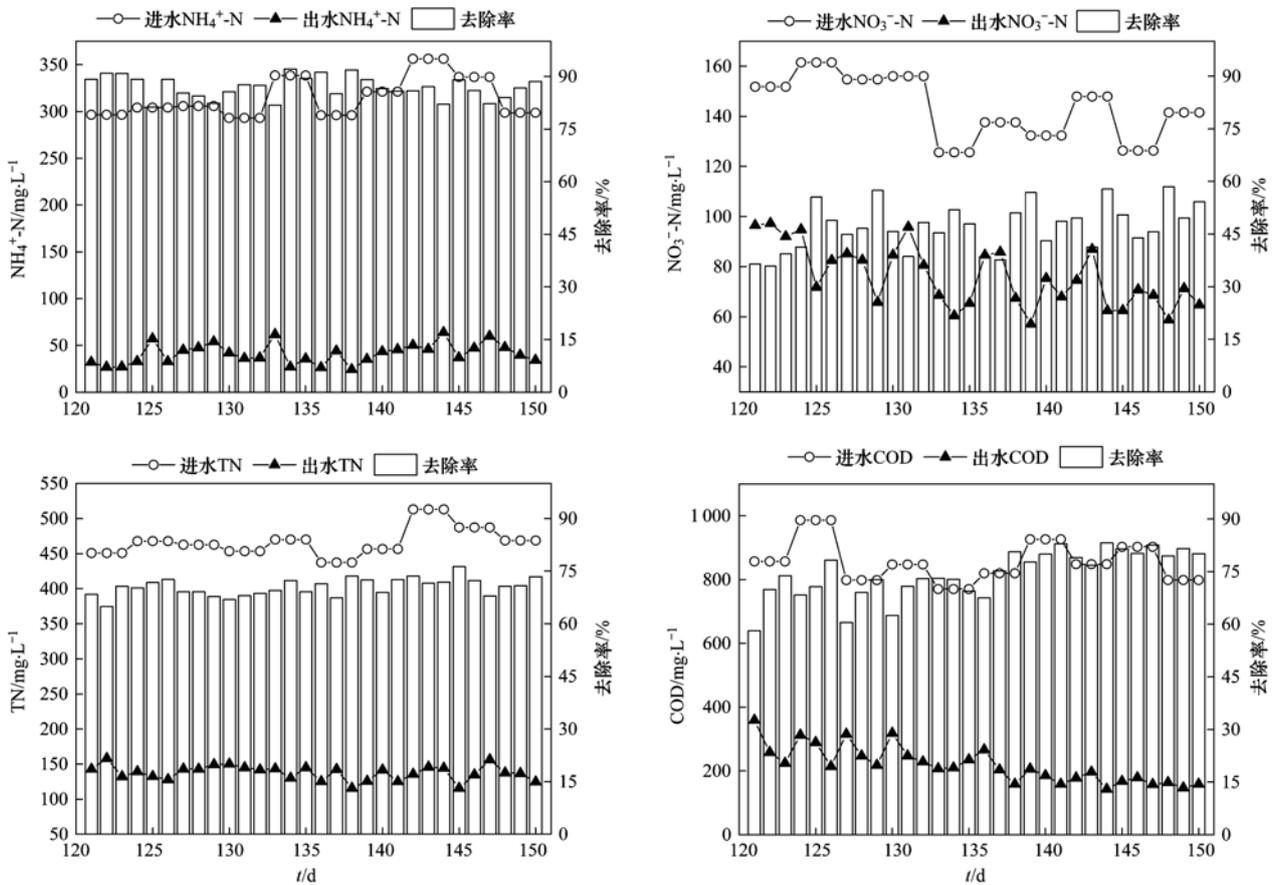


图4 BCO 工艺处理猪场沼液效果

Fig. 4 BCO process treatment of pig farm biogas slurry

=24 h 条件下, 沼液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 和 COD 的平均浓度可分别从 314.8、143.5、466.7 和 $855.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低至 41.3、76.1、137.7 和 $218.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 其平均去除率可分别保持稳定在 86.9%、47.0%、70.5% 和 74.4%, 可在很大程度上实现污染物浓度的削减. 出水浓度均低于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)^[24] 限值 (COD $\leq 400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N} \leq 80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

2.4 HN-AD 菌生物强化后对 BCO 系统微生物群落结构的影响

对系统进行污泥驯化和 HN-AD 菌生物强化前

后的微生物群落结构进行了多样性分析, 结果如图 5 所示. 在污泥驯化过程中, 通过不断提高氨氮浓度, 系统中微生物多样性发生一定的变化, 接种污泥中的 HN-AD 菌为 *Thauera* 18.4%、*Diaphorobacter* 9.1%、*Nitrosomonas* 2.4%^[25] 和 *Pseudomonas* 1.0%^[26], 在对污泥进行驯化后, 由于高氨氮的抑制作用, 系统内的主要 HN-AD 菌变为 *Diaphorobacter* 2.6%、*Thauera* 0.7% 和 *Acinetobacter* 1.7%^[17], 可见, 高浓度氨氮对活性污泥系统中的优势菌具有毒性作用, 活性污泥中属于 HN-AD 菌的 *Thauera* 和 *Diaphorobacter* 相对丰度急剧减少且

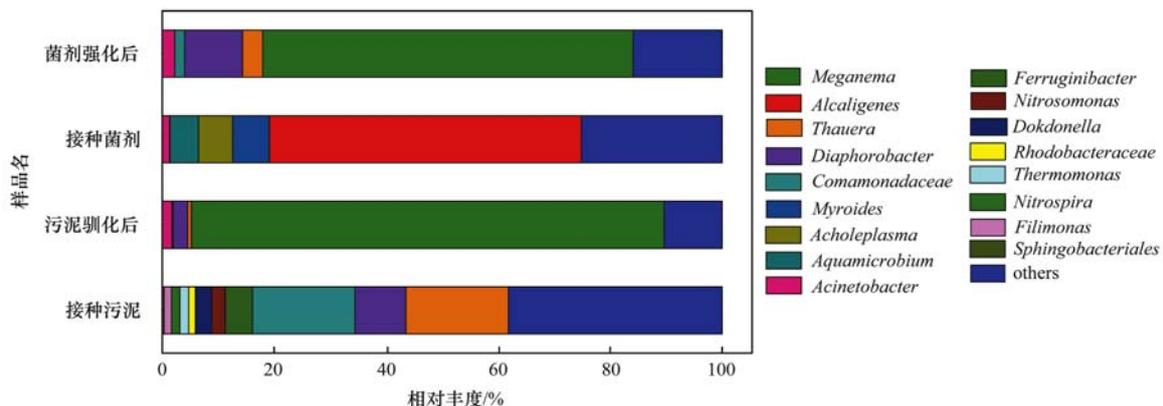


图5 HN-AD 菌剂生物强化后微生物群落结构对比

Fig. 5 Comparison of microbial community structure after bio-enhancement of HN-AD microbial agents

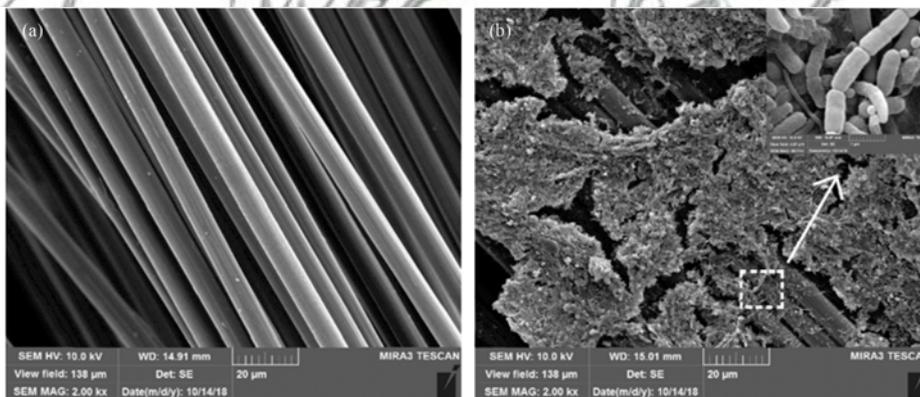
部分硝化菌出现消亡,同时伴随着其他新的 HN-AD 菌如 *Acinetobacter* 的出现,同时结合图 2 可知,随着污泥驯化过程的继续,系统内污染物的去除率随之得到缓慢提升,驯化后新出现的 HN-AD 菌逐渐成为系统内的优势菌。

当驯化氨氮浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,污染物去除率出现急剧下降的趋势,此时向反应器中接种 HN-AD 菌剂对 BCO 系统进行生物强化,接种菌剂中的主要 HN-AD 菌为 *Alcaligenes* 55.6%^[27]、*Myroides* 6.5%^[28,29]、*Acholeplasma* 6.1%^[30] 和 *Acinetobacter* 1.3%^[31],经过 HN-AD 菌剂的生物强化后,系统内主要的 HN-AD 菌分别为 *Diaphorobacter* 10.3%、*Thauera* 3.6% 和 *Acinetobacter* 2.2%,生物强化后系统优势菌由接种菌剂中的 *Alcaligenes* 变为生物强化后的 *Diaphorobacter* 和 *Thauera*,而 *Acinetobacter* 的相对丰度明显高于接种菌剂。国内外研究表明,上述菌属均为 HN-AD 菌。其中 Zhang 等^[32] 发现 *Diaphorobacter* 菌属为 HN-AD 菌,孙英杰等^[33] 和 Yang 等^[16] 也证明了 *Thauera* 菌属和 *Acinetobacter* 菌属均为 HN-AD 菌,且都在系统中发挥了主要的异

养硝化与好氧反硝化作用。

2.5 BCO 系统生物强化后的 SEM 表征分析

接种 HN-AD 菌剂前后填料表面的 SEM 表征如图 6 所示,在原始填料上[图 6(a)]可明显看到整齐排列的细丝状填料,每根填料上呈凹凸交替的沟状条纹,此结构增大了填料表面的比表面积和吸附性能,使大量微生物能在填料上固定生长。接种 HN-AD 菌剂后填料表面的微观结构如图 6(b),在具有异养硝化-好氧反硝化功能的 HN-AD 菌固定在填料上后,可在填料表面形成比表面积较大的生物膜层,生物膜层通过局部放大后,明显可见较多的杆状菌和球状菌在填料表面富集。结合图 5 分析,接种 HN-AD 菌剂生物强化后,填料表面形成紧密相连且牢固的生物膜层,局部放大图也进一步显示,生物膜层中的 HN-AD 菌主要以杆状菌和球状菌为主。结合图 5 进一步推测填料表面的杆状菌和球状菌为系统生物强化后的 HN-AD 优势菌,主要为 *Diaphorobacter*、*Thauera* 和 *Acinetobacter*,成功实现了系统内优势菌的富集和优势化构建。



(a)原始填料; (b)接种 HN-AD 菌剂后

图 6 原始填料与生物强化后 BCO 系统中填料的 SEM 对比

Fig. 6 SEM comparison of the original filler and the filler in the BCO system after bio-enhancement

3 结论

(1)投加 HN-AD 菌剂对 BCO 进行生物强化,仅需 12 d BCO 系统实现稳定、高效运行。

(2)高氨氮 ($> 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 养殖废水对 BCO 系统具有抑制作用。HN-AD 菌生物强化可显著提高 BCO 系统耐高氨氮性能及脱氮效果。

(3)HN-AD 菌生物强化 BCO 工艺对真实猪场沼液中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (86.9%)、TN (70.5%) 和 COD (74.4%) 具有高效去除效果,出水浓度均低于《畜禽养殖业污染物排放标准》限值。

(4)高通量测序结果表明,生物强化后实现了系统内 HN-AD 菌的富集且 HN-AD 菌优势化构建明

显。SEM 观察结果也进一步证实,BCO 工艺生物强化后,填料上的优势菌主要以杆状和球状的 HN-AD 菌为主。

参考文献:

- [1] Meng J, Li J L, Li J Z, et al. Nitrogen removal from low COD/TN ratio manure-free piggery wastewater within an upflow microaerobic sludge reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **198**: 884-890.
- [2] 车建刚. 臭氧/微电解耦合-生物接触氧化组合工艺处理猪场沼液的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
Che J G. Study on treatment of piggery digestate wastewater with a ozone/micro-electrolysis coupled-bio-contact oxidation combined process[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [3] 李文英, 彭智平, 于俊红, 等. 珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3963-3968.

- Li W Y, Peng Z P, Yu J H, *et al.* Wastewater pollution characteristics from typical intensive pig farms in the pearl river delta and its ecological risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3963-3968.
- [4] Rico C, Montes J A, Rico J L. Evaluation of different types of anaerobic seed sludge for the high rate anaerobic digestion of pig slurry in UASB reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **238**: 147-156.
- [5] 何佳敏, 孟佳, 张永, 等. 温度降低对 UMSR 处理高氨氮低碳氮比养猪废水效能的影响 [J]. *化工学报*, 2017, **68**(5): 2074-2080.
- He J M, Meng J, Zhang Y, *et al.* Effect of lower temperature on performance of upflow microaerobic sludge reactor treating manure-free piggery wastewater with high NH_4^+ -N and low COD/TN ratio [J]. *CIESC Journal*, 2017, **68**(5): 2074-2080.
- [6] 隋倩雯. 氨吹脱与膜生物反应器组合工艺处理猪场厌氧消化液研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- Sui Q W. Combined of ammonia stripping and membrane bioreactor processes for anaerobically digested swine wastewater treatment [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [7] 聂丽君, 李德豪, 何京东, 等. ABR-MAP-MBR 组合工艺处理高浓度养殖废水研究 [J]. *化工学报*, 2018, **69**(6): 2722-2729.
- Nie L J, Li D H, He J D, *et al.* Treatment of high concentration piggery wastewater by ABR-MAP-MBR process [J]. *CIESC Journal*, 2018, **69**(6): 2722-2729.
- [8] 张强强. 一种高含氮废水处理工程设计与运行 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- Zhang Q Q. Design and operation of a high nitrogen containing wastewater treatment engineering [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [9] 曾鑫, 呼世斌, 屈广周, 等. 臭氧氧化处理养猪场厌氧沼液 [J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(7): 3332-3338.
- Zeng X, Hu S B, Qu G Z, *et al.* Treatment of swine farm anaerobic biogas slurry by ozone oxidation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(7): 3332-3338.
- [10] 潘碌亭, 吴锦峰, 罗华飞. 微电解-UASB-接触氧化处理羧甲基纤维素废水 [J]. *化工学报*, 2010, **61**(5): 1275-1281.
- Pan L T, Wu J F, Luo H F. Microelectrolysis-UASB-contact oxidation process for treatment of carboxymethyl cellulose production wastewater [J]. *CIESC Journal*, 2010, **61**(5): 1275-1281.
- [11] 王子凌, 信欣, 王锶, 等. CANON 工艺处理猪场沼液的启动及微生物种群结构分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(10): 3945-3953.
- Wang Z L, Xin X, Wang L, *et al.* Start-up and microbial communities analysis of CANON process for the treatment of anaerobic digester liquor of swine wastewater (ADLSW) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(10): 3945-3953.
- [12] 龚松. EGSB + 生物接触氧化 + MBR 处理规模化猪场废水的试验研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- Gong S. Experimental study of EGSB + bio-contact oxidation + MBR in swine wastewater treatment [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.
- [13] 万莉. 规模化养猪场废水(沼液)BCO + SBBR 好氧处理新工艺研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- Wan L. Study on the new technology of BCO + SBBR aerobic treatment for scaled pig farms wastewater (Biogas slurry) [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.
- [14] 赵秋菊, 马兴冠, 姜维. 生物接触氧化工艺处理奶牛养殖废水参数优化研究 [J]. *水处理技术*, 2015, **41**(8): 115-120.
- Zhao Q J, Ma X G, Jiang W. Study on parameters optimization of cows breeding wastewater by biological contact oxidation process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, **41**(8): 115-120.
- [15] Zheng T L, Li P, Ma X Y, *et al.* Pilot-scale multi-level biological contact oxidation system on the treatment of high concentration poultry manure wastewater [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, **120**: 187-194.
- [16] Yang L, Ren Y X, Liang X, *et al.* Nitrogen removal characteristics of a heterotrophic nitrifier *Acinetobacter junii* YB and its potential application for the treatment of high-strength nitrogenous wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **193**: 227-233.
- [17] Ren Y X, Yang L, Liang X. The characteristics of a novel heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium, *Acinetobacter junii* YB [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **171**: 1-9.
- [18] 金羽, 李建政, 任南琪, 等. 耐冷氨氧化功能菌群的富集及其对 A^2/O 系统的生物强化 [J]. *化工学报*, 2013, **64**(9): 3367-3372.
- Jin Y, Li J Z, Ren N Q, *et al.* Domestication of a cold-adapted ammonia-oxidizing functional flora and its bioaugmentation on A^2/O wastewater treatment process at low temperature [J]. *CIESC Journal*, 2013, **64**(9): 3367-3372.
- [19] 吴云, 杜小磊, 宋凯, 等. 生物接触氧化池悬浮填料流动特性数值模拟分析 [J]. *化工学报*, 2018, **69**(7): 3242-3248.
- Wu Y, Du X L, Song K, *et al.* Numerical simulation analysis of flow characteristics of suspended packing in biological contact oxidation tank [J]. *CIESC Journal*, 2018, **69**(7): 3242-3248.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [21] 符波, 廖满逸, 丁丽丽, 等. 环境扫描电镜对废水生物样品形态结构的表征研究 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(1): 93-98.
- Fu B, Liao X Y, Ding L L, *et al.* Application of ESEM in the visualization of microbial community of granule sludge and suspended carrier biofilm [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(1): 93-98.
- [22] 吴鹏, 陈亚, 张婷, 等. 基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4636-4643.
- Wu P, Chen Y, Zhang T, *et al.* Microbial community characteristics of shortcut nitrification start-up in different MBR-inoculated sludges [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4636-4643.
- [23] 高艳辉, 赵天涛, 邢志林, 等. 铜离子对混合菌群降解三氯乙烯的影响与机制分析 [J]. *生物工程学报*, 2016, **32**(5): 621-634.
- Gao Y H, Zhao T T, Xing Z L, *et al.* Effects of copper on biodegradation mechanism of trichloroethylene by mixed microorganisms [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2016, **32**(5): 621-634.
- [24] 宿程远, 刘凡凡, 钟余, 等. 生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4271-4278.
- Su C Y, Liu F F, Zhong Y, *et al.* Efficiency and microecology of a soil infiltration system with high hydraulic loading for the treatment of swine wastewater [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4271-4278.
- [25] Yang N, Zhan G Q, Li D P, *et al.* Performance and microbial

- community of a novel non-aeration-based up-flow bioelectrochemical filter (UBEF) treating real domestic wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **348**: 271-280.
- [26] 喻涌泉, 黄魏魏, 董建江, 等. 硝基还原假单胞菌吸附重金属镉的机理研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2232-2238.
Yu Y Q, Huang W W, Dong J J, *et al.* Study on the removal of Cd(II) by *Pseudomonas nitroreducens*: biosorption characteristics and mechanism [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2232-2238.
- [27] 黄翔峰, 朱其玮, 申昌明, 等. 剩余污泥超声提取液培养生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 424-430.
Huang X F, Zhu Q W, Shen C M, *et al.* Cultivation of demulsifying bacteria *Alcaligenes* sp. S-XJ- I using ultrasonic pretreated excess sludge [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 424-430.
- [28] 李亚平. 入滇池河口沉积物中反硝化细菌的多样性及其脱氮性能的研究[D]. 昆明: 云南大学, 2015.
Li Y P. Diversity and nitrogen removal characteristic of denitrifying bacteria in the sediments of estuary around Dianchi Lake[D]. Kunming: Yunnan University, 2015.
- [29] Jeong D, Cho K, Lee C H, *et al.* Effects of salinity on nitrification efficiency and bacterial community structure in a nitrifying osmotic membrane bioreactor [J]. *Process Biochemistry*, 2018, **73**: 132-141.
- [30] 丁阿强. 生物电极脱氮及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Ding A Q. Bio-cathode denitrification technology and its mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [31] 杨婷, 杨娅, 刘玉香. 异养硝化-好氧反硝化的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2017, **44**(9): 2213-2222.
Yang T, Yang Y, Liu Y X. Research progress and challenges of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification [J]. *Microbiology China*, 2017, **44**(9): 2213-2222.
- [32] Zhang S S, Sun X B, Wang X M, *et al.* Bioaugmentation with *Diaphorobacter polyhydroxybutyrativorans* to enhance nitrate removal in a poly (3-hydroxybutyrate-co- 3-hydroxyvalerate)-supported denitrification reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **263**: 499-507.
- [33] 孙英杰, 杨强, 卞荣星, 等. 矿化垃圾生物反应器中的细菌多样性分析[J]. *环境工程*, 2016, **34**(3): 142-146.
Sun Y J, Yang Q, Bian R X, *et al.* Analysis on the bacterial diversity in a bioreactor for aged refuse [J]. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(3): 142-146.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)