



引用格式:梁瑜海,肖咏茵. 养猪废水处理技术的研究进展[J]. 轻工学报,2020,35(4):67-80.

中图分类号:X703 文献标识码:A

DOI:10.12187/2020.04.010

文章编号:2096-1553(2020)04-0067-14

养猪废水处理技术的研究进展

The advance of swine wastewater treatment technology

梁瑜海,肖咏茵

LIANG Yuhai, XIAO Yongyin

华南农业大学 资源环境学院,广东 广州 510642

College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

关键词:

养猪废水; 废水处理技术; 资源化利用; 脱氮

Key words:

swine wastewater; wastewater treatment technology; utilization of resources; nitrogen removal

摘要:综述了不同养猪废水处理技术的基本原理和优缺点,发现,传统处理技术多侧重于对废水中污染物的去除,但未考虑总氮的控制,难以实现节能降耗和资源的回收利用;新型处理技术不仅可以减少总氮去除过程中的能耗、物耗,还可以实现资源的回收利用.为了实现可持续发展战略,未来达到更高的出水排放标准,现有处理技术还需在优化运行条件、增加预处理措施、组合多技术处理等方面做出相应改进;而未来养猪废水处理新技术也会朝着低耗、高效和高质的方向发展.

收稿日期:2020-04-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51708229);广东省珠江人才计划“青年拔尖人才”项目(2017GC010157)

作者简介:梁瑜海(1986—),男,广西壮族自治区崇左市人,华南农业大学首聘副教授,博士,主要研究方向为污水处理新技术.

Abstract: By reviewing the basic principle, advantages and disadvantages of different swine wastewater treatment technologies, it was found out that traditional treatment technologies mainly focused on the removal of pollutants from wastewater, but did not consider the control of total nitrogen, which was difficult to achieve energy saving and resource recycling. New treatment technologies not only reduced the energy and material consumption in the process of total nitrogen removal, but also realized the recycling of resources. So these technologies had a broad application prospect in the future swine wastewater treatment. In order to realize sustainable development strategy and achieve higher effluent discharge standards in the future, existing treatment technologies can be improved in optimizing operating conditions, adding pretreatment measures, and combining multi-technology treatment. In the future, new technologies of swine wastewater treatment will develop towards low consumption, high efficiency and high quality.

0 引言

随着人们生活水平的提高,猪肉食品的需求量不断增加,生猪养殖业也因此越发集中,并逐渐实现规模化,而这种规模化养殖却带来了严重的环境污染问题^[1]. 2010年,全国污染源普查公报显示,畜牧养殖业的粪便产生量为 2.43×10^8 t,尿液产生量为 1.63×10^8 t. 其中,总氮和总磷的排放量可达 1.02×10^6 t和 1.60×10^5 t^[2]. 生猪养殖作为畜牧业的重要组成部分,其产生的废水污染问题不容忽视. 养猪废水主要由猪的粪便和尿液组成,臭味很重,但同时富含有机物、营养物质(氮、磷)和未消化的饲料^[3]. 其中,高质量浓度的氮、磷等营养物质进入水体后,会导致水体富营养化,水生生物大量死亡,从而破坏水体的生态平衡^[4]. 但如果能将养猪废水中的有机物、氮、磷等污染物进行高效处理,不仅可以降低养猪废水对环境的污染,还能实现资源的回收利用. 因此,如何对养猪废水进行科学的处理和利用已成为当前生态环境保护领域的重要研究课题.

目前,养猪废水的处理以生物方法为主,物理方法和化学方法为辅. 本文拟在对比分析传统养猪废水处理技术的基本原理和优缺点的基础上,重点阐述养猪废水的资源化利用和新型处理技术,并对未来养猪废水处理技术的发展趋势进行展望.

1 传统养猪废水处理技术

1.1 厌氧生物处理技术

厌氧生物处理技术是指在厌氧条件下,通过厌氧菌和兼性菌的代谢作用,对废水中的有机物进行生化降解. 该技术具有能耗低、有机负荷高、剩余污泥少、抗冲击负荷强、生物能源可再利用等优点,在畜禽养殖废水处理领域中较为常用^[5].

沼气池是养猪废水处理中应用较多的厌氧生物处理装置,具有施工方便、工艺流程简单、所产沼气可以用于发电等优点,具有良好的环境效益和社会效益^[6-7],但其在应用过程中也存在发酵原料不足、沼气池产气率低等问题. 因此,部分学者将研究重点集中在优化沼气池处理效果方面. 已有研究表明,玉米秸秆与猪粪混合、酒糟与猪粪混合、香菇与猪粪混合都可明显提高沼气的产气率^[8-10]. 此外, Y. Liu等^[11]还发现,采用两步加热的方式可提高养猪废水厌氧消化过程中甲烷的产量,与一步加热方式相比,当环境温度降低到 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其甲烷产率可提高14.74%.

上流式厌氧污泥床 UASB (up-flow anaerobic sludge bed) 是厌氧生物处理技术中的常见工艺之一,其主要处理过程为:待处理的污水从反应器底部进入,与反应器内呈膨胀状态的污泥充分反应后进入沉淀区;混合液流经三相分

分离器,产生的沼气从其上部进入集气系统,污泥靠重力再返回反应区.该工艺具有处理效率高、结构紧凑、费用少等优点,但同时也存在耐冲击力差、进水中的悬浮物不宜过高等问题.UASB已成功应用于食品加工、酿造、医药化工等诸多行业 and 高质量浓度的废水处理领域.赵青玲等^[12]发现,根据化学需氧量 COD(chemical oxygen demand)去除率的情况适时提高进水质量浓度,不仅可以促进污泥的颗粒化,还可以避免污泥结构松散.郑仁宏^[13]研究发现,UASB反应器运行的适宜温度为 35 ℃左右,适宜 pH 值为 7.0 左右,当容积负荷为 10 kgCOD/(m³·d)时,对畜禽养殖业废水的处理效果较理想.万莉等^[14]利用电增强零价铁-升流式厌氧污泥床 EEZVI-UASB(electrical field and zero-valent iron enhanced up-flow anaerobic sludge bed)处理实际养猪废水时发现,EEZVI-UASB 对废水中氮素的去除率较高.Z. Zeng 等^[15]在 UASB 中使用驯化的外源颗粒污泥处理养猪废水,第 10 d COD 的去除率为 85%,去除效果明显优于使用土著厌氧污泥的对比组.

但是,厌氧生物处理技术也面临一定的挑战.例如,难降解的膳食纤维是猪饲料中的主要物质,它们进入养猪废水后,可能会严重阻碍废水进行厌氧消化反应^[16].同时,该技术还存在出水难以达到现有养猪废水的排放标准等问题,因此,一般都需要与好氧生物处理技术或其他技术组合运行使用.

1.2 好氧生物处理技术

好氧生物处理技术是指在好氧条件下,通过好氧微生物的代谢作用,去除废水中的有机物、氮、磷等污染物^[5].该技术具有处理性能稳定、易于操作和管理、去除污染物能力强等优点.

在养猪废水处理中,多级 AO 工艺和 A²/O 工艺是应用较好的好氧生物处理技术^[17-18].郑

志彬^[19]采用“预处理/沼气池/两级 AO”工艺,陈凤祥^[20]采用 UASB + 两级 AO 工艺,陈威等^[21]采用 EGSB-A/O-MBR 工艺,曾哲伟^[22]采用 A²/O 混凝组合工艺处理养猪废水,都实现了良好的处理效果,出水中各项污染物指标也都优于排放标准.

序批式反应器 SBR(sequencing batch reactor)也是一种常用的养猪废水好氧生物处理装置,改变其运行模式可以在一定程度上提高养猪废水的处理效果.X. Wu 等^[23]发现,在间歇曝气的条件下,SBR 可更高效地去除养猪废水中的污染物.J. Liu 等^[24]则发现,在 SBR 中采用间歇曝气运行模式,可快速实现好氧污泥的颗粒化.X. L. Sheng 等^[25]和 X. Y. Song 等^[26]发现,与传统 SBR 连续曝气运行模式相比,采用间歇曝气运行模式的 SBR 具有较高的反硝化细菌丰度,且在脱氮方面效果更好.

上流式微好氧反应器 UMSR(upflow microaerobic sludge reactor)也能较好地同步去除养猪废水中的 COD、总磷和总氮 TN(total nitrogen).J. Z. Li 等^[27]采用 UMSR 处理养猪废水时发现,COD 的平均去除率为 74.5%,总磷的平均去除率为 52.5%,TN 的平均去除率为 75.4%;同时发现,反应器中不同类型菌群的竞争协同关系会对污染物的去除产生重要影响.J. Meng 等^[28]研究发现,在 UMSR 中,氨氧化菌、异养反硝化菌、自养反硝化菌与聚磷菌间的协同作用对 COD、氨氮、TN、磷酸盐等污染物的去除起重要作用.但 UMSR 中氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌和异养菌对氧的竞争却又限制了养猪废水中氮素的去除^[29].

除上述工艺外,施云芬等^[30]在移动床生物膜反应器中进行不同悬浮填料的对比实验时发现,碳纤维球填料不仅挂膜速度快,且在不同运行条件下对 COD、氨氮、TN、总磷等的去除效果均好于聚乙烯塑料填料.J. Meng 等^[31]研究发

现,向 UMSR 反应器中加入聚氯乙烯填料后,可增强硝化细菌、反硝化细菌、厌氧细菌等生长缓慢细菌的富集,氨氮、TN 的去除率分别达到 93.1% 和 89.9%。万莉^[32]采用生物接触氧化池和序批式生物膜反应器处理养猪沼液,出水再经过人工湿地处理,可使出水水质优于排放标准。

由此可见,好氧生物处理是养猪废水处理技术的核心之一。但好氧生物处理技术也存在剩余污泥量多、能耗较高等问题。在养猪废水的实际处理中,好氧工艺一般会与厌氧工艺结合以降低能耗,再与其他深度处理工艺结合进一步提高出水水质。

1.3 人工湿地处理技术

人工湿地系统是模拟湿地生态系统建造的一种污水处理系统,其作用原理主要是,在一定的填料上种植湿地植物,当污水通过人工湿地时,可利用湿地中填料的物理、化学作用和植物与微生物的生物协同作用降解污染物。人工湿地系统具有总体投资低、运行费用少等优点^[33],多种类型的人工湿地系统均可对养猪废水进行有效处理。混合潜流人工湿地系统对养猪废水中大部分污染物均具有较好的去除效果^[34];多级表面流人工湿地系统对养猪废水不仅具有良好的处理效果,而且湿地基质中还具有较丰富的细菌群落^[35];沼泽-池塘-沼泽人工湿地系统可以降低养猪废水中的 TN、氨氮、总磷和 PO_4^{3-} 的平均质量浓度^[36];潮汐流人工湿地在厌氧消化后的养猪沼液处理中,具有良好的脱氮效果^[37]。

植物种植可改善人工湿地系统中养猪废水的处理效果。其中,种植浮萍的人工湿地对溶解性有机物的平均去除率提高了 28%,但废水中的氨氮质量浓度会对浮萍的处理效果产生一定的影响^[38]。W. Wang 等^[39]以 *Spirodela polyrrhiza* 浮萍为模型物种进行养猪废水处理实验时发

现,氨氮质量浓度的升高会延缓浮萍的生长、降低固碳和能量的产生速率。除浮萍外,绿狐尾藻也是一个研究热点。P. Luo 等^[40]研究发现,种植有绿狐尾藻的表面流人工湿地能有效地去除养猪废水中的磷。X. Li 等^[41]发现,绿狐尾藻净化系统可以提高养猪废水中的溶解氧 DO (dissolved oxygen),从而促进硝化过程。

此外,为了阐明人工湿地的污染物去除机理,部分研究者将目光转向了人工湿地中微生物的种群结构。X. Li 等^[42]研究发现,在养猪废水处理实验中,DO 对反硝化菌的种群分布有负面影响。L. Chen 等^[43]分析表明,厌氧氨氧化菌的活性和丰度与人工湿地中沉积物的 pH 值、氨氮含量和 NO_2^- -N 含量密切相关。X. Huang 等^[44]研究表明,在垂直流动人工湿地中,基质类型对细菌种群的变化有显著影响。

将人工湿地处理技术应用于养猪废水处理,不仅可以获得稳定的出水水质,还可以美化周边环境^[45]。但人工湿地处理技术也存在不足之处,如易受气候、温度、污染负荷的影响,易发生堵塞等^[46],这些都阻碍了其更广阔的应用前景。

综上,在实际应用中,养猪废水的传统处理工艺一般都是厌氧-好氧-人工湿地系统的组合工艺(见图 1)^[47-48]。其主要步骤为:首先,待处理的污水先通过格栅井,去除粗大的悬浮物或漂浮物;接着,进入厌氧处理系统,通过厌氧菌和兼性菌降解有机物,同时产生沼气和沼渣;然后,厌氧系统出水再进入好氧处理系统,污染物被好氧微生物进一步降解;最后,好氧处理系统出水进入人工湿地系统,进行深度处理,进一步提高出水的水质。目前,传统工艺多侧重于对污染物的去除,大多没有考虑到 TN 的控制,难以达到节能降耗和资源回收利用的目的。为了缓解日趋恶化的水污染问题,增加 TN 的控制指标,提高养猪废水的排放标准势在必行。若使

用现有工艺实现 TN 的去除,还需增强反硝化脱氮.然而,养猪废水中碳氮含量比较低,废水中的有机物难以满足氮素反硝化需求,只有投加大量外加碳源才能实现控制 TN 的目标,这会导致废水处理成本大幅增加.因此,研发低耗、高效的养猪废水资源回收和处理新工艺迫在眉睫.

2 养猪废水的资源回收利用和新型处理技术

2.1 养猪废水的资源回收利用技术

2.1.1 磷酸铵镁结晶法回收养猪废水中的氮磷

目前,养猪废水中的 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 可通过与 Mg^{2+} 结合形成沉淀的方法去除,其沉淀物为磷酸铵镁 MAP (magnesium ammonium phosphate),英文俗名为 struvite,中文俗称为鸟粪石^[49],可作为氮肥和磷肥使用.该方法也称 MAP 结晶法,其反应原理见图 2.影响 MAP 结晶法回收效率的因素较多.H. Huang 等^[50]研究发现,海藻酸钠和牛血清白蛋白的存在可轻微抑制 MAP 的结晶.D. Kim 等^[51]研究发现,当 $n(\text{Mg}^{2+}) : n(\text{NH}_4^+) : n(\text{PO}_4^{3-}) = 1.2 : 1.0 : 1.0$ 时,MAP 结晶效果最佳.Z. Wu 等^[52]研究发现,正渗透可促进 MAP 的原位生成和牲畜养殖废水的养分回收.Z. Luo 等^[53]研究发现,在 MAP 预处理中,与添加磷肥相比,添加发酵过的磷酸可得到更高的氨氮去除率和 MAP 回收率.

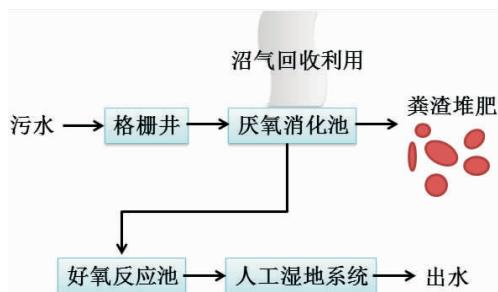


图 1 厌氧-好氧-人工湿地系统的组合工艺

Fig. 1 Combined process of anaerobic-aerobic-constructed wetland system

2.1.2 膜技术回收养猪废水中的氨氮

养猪废水中的氨氮可以通过膜接触器加以回收,其回收原理(见图 3)是:通过提高废水的 pH 值或温度,使得 NH_4^+ 转化为 NH_3 ; NH_3 通过膜孔向通有 H_2SO_4 侧扩散,使得 NH_3 转化为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.采用膜接触器回收氨氮不仅可以达到 90% 的氨氮去除率,而且回收产物 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 还可作为农业肥料进行销售.目前,如何提高氨氮回收率是该技术的研究重点.赵倩倩等^[54]使用 PVDF 膜接触器处理经预处理的垃圾渗滤液,通过提高料液的 pH 值、温度,控制合适的吸收液流量,提高了氨氮的回收率.张宗阳等^[55]研究发现,双套膜接触器可以克服传统膜接触器中由于壳程非理想流动导致的传质阻力.刘芮等^[56]通过比较分析发现,错流式膜组件比平流式膜组件更易获得较高的氨

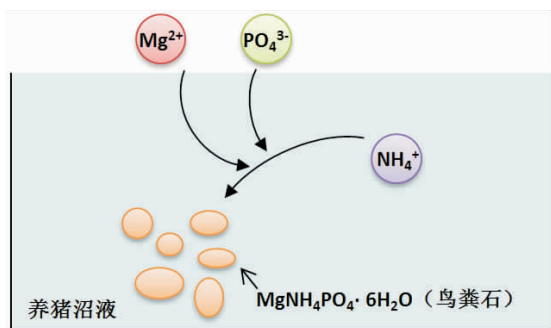


图 2 MAP 结晶法的反应原理

Fig. 2 Reaction principle of MAP crystallization

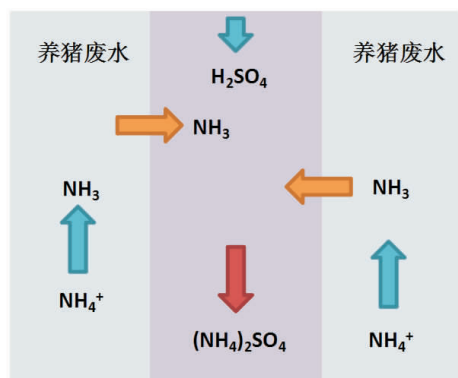


图 3 膜接触器的回收原理

Fig. 3 The recycling principle of membrane contactor

氮总传质系数.膜接触器回收氨氮技术具有高效、经济等特点,但在处理养猪废水时,应进行相应的预处理,避免养猪废水中其他污染物对膜组件和回收率的影响.

2.1.3 电化学法回收养猪废水中的氨氮

目前,应用于养猪废水处理的电化学处理技术主要有电渗析技术和微生物电化学技术.

电渗析技术的基本原理是利用电场使废水中不同电荷的离子透过不同选择性离子交换膜,使废水得到净化,向电极迁移的离子可以进一步回收利用(见图4).电渗析技术在养猪废水处理领域有一定的应用潜力.例如,两段双极膜电渗析系统被用于猪粪水解物养分的回收,通过控制运行条件,可以达到较好的处理效果^[57].S. Lim 等^[58]研究发现,电流密度对养猪废水脱氮有显著影响,当电流密度为 1.09 A/m²时,TN 的去除率最大,可达 75%.H. Huang 等^[59]研究发现,在废水中加入白云石可提高废水的电解性能,进而提高氨氮的去除率.由此可见,通过电渗析技术可有效回收养猪废水中的氮素,但多种污染物并存时,回收产物的纯度会受到影响.

微生物电化学技术的基本原理是利用固定在电极上的微生物之间的电化作用来降解废水中的污染物,它是一种能量自给的废水处理

技术,可以应用于养猪废水的处理,其作用原理见图5.H. M. Wang 等^[60]研究发现,连续搅拌的微生物电化学系统耦合潮汐式生物阴极微生物电化学系统可以同时实现发电和养猪废水处理.W. J. Ding 等^[61]采用单室空气阴极微生物燃料电池处理养猪废水时发现,该系统可去除废水中的氮和有机物.M. Cerrillo 等^[62-63]研究发现,与厌氧消化结合的生物电化学系统有利于养猪废水中氨的回收;厌氧消化-微生物电解槽联合系统不仅可以提高养猪废水的出水水质,还可回收其中的营养物质.

2.1.4 耦合好氧-缺氧氮分解工艺回收氧化养猪废水中的氮素

耦合好氧-缺氧氮分解工艺 CANDO (coupled aerobic-anoxic nitrous decomposition operation)是一种新型的废水氮回收工艺(见图6),它的主要目的是将废水中的氮素转化成 N₂O 气体^[64],而产生的 N₂O 气体又可作为助燃剂、火箭氧化剂、食品加工助剂等进行回收利用.在 CANDO 工艺中,一般先将 NH₄⁺ 氧化成 NO₂⁻,然后再将 NO₂⁻ 还原为 N₂O 气体,所以,CANDO 工艺可对富氨废水进行脱氮处理和能量的回收^[65-66].随着研究的不断深入,发现 CANDO 工艺对废水的处理效果受多种因素影响.M. Meissbach 等^[67]研究发现,聚丙烯微孔中空纤维膜接触器具有增强回收 N₂O

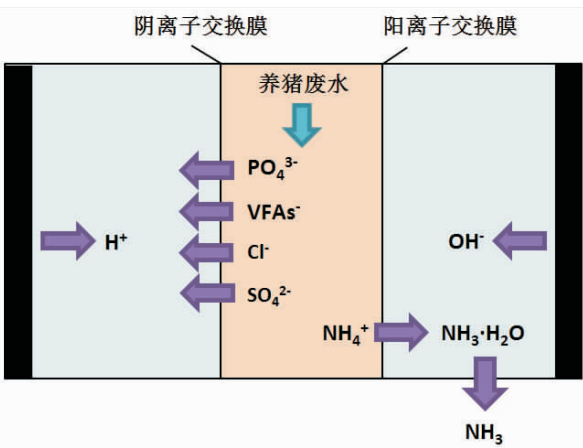


图4 电渗析技术的基本原理

Fig. 4 The principle of electrodialysis technology

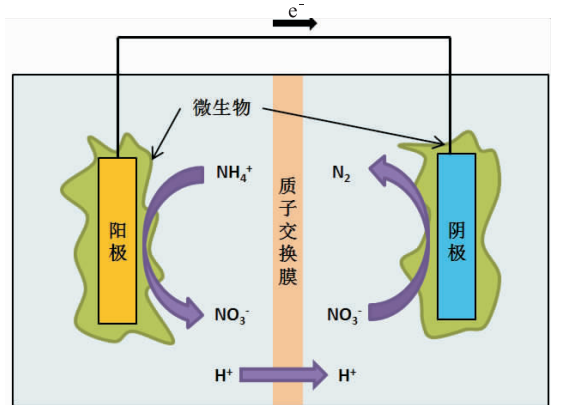


图5 微生物电化学技术的作用原理

Fig. 5 Action principle of microbial-electrochemical technology

气体的潜力.此外,缺氧反应期的亚硝酸盐质量浓度也会影响 N_2O 气体的产量^[68]. J. Mayung 等^[69]研究发现,在 II 型甲烷氧化过程中可以通过将聚 3-羟基丁酸酯氧化与 NO_2^- 还原偶联,从而介导 NO_2^- 还原为 N_2O 气体. H. Gao 等^[70]证明了反硝化聚磷菌本身也可以产生 N_2O . 由此可见,将废水中的氮素转化成 N_2O 气体,已经成为废水资源回收的一个新方向,而 CANDO 工艺有望应用于富含氮素的养猪废水处理中.

2.1.5 藻类反应器回收养猪废水中的生物质

藻类反应器是一种利用微藻处理废水的新型反应器,多种藻类反应器已应用于养猪废水的处理.研究发现,*Chlorella vulgaris* JSC-6 藻能有效利用经过稀释的养猪废水中的营养物质和有机物,合成细胞物质^[71]; *Chlorella* sp. MM3 藻可去除养猪场和酿酒厂混合废水中的养分,并产生脂类物质^[72]; MBFJNU-1 藻(小球藻的一种)可高效去除养猪废水中的 TN 和总磷^[73]. 将微藻处理工艺与其他工艺相结合也可产生类似的处理效果,如微藻-细菌共生光生物反应器,可有效降解养猪废水中的污染物^[74];耦合生物炭的藻类-细菌系统可提高养猪废水中养分的回收率^[75];真菌-微藻颗粒可同时去除养猪沼液中的营养元素和沼气中的 CO_2 ^[76];将物理化学预处理措施与藻类反应器结合起来,可明显提高养猪废水的处理效果^[77]. 但采用藻类反应器处理养猪废水也存在一些问题.例如,大多数微藻不易在未经稀释的养猪废水中存活,高质量

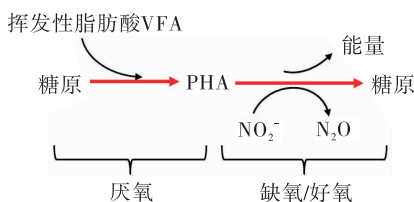


图 6 CANDO 工艺的基本原理

Fig. 6 The principle of coupled aerobic-anoxic nitrous decomposition operation

浓度的污染物会抑制它们的生长.对此, M. Wang 等^[78]开发了一种两阶段方法,即经紫外线照射和逐渐驯化后,所选微藻可在未经稀释的养猪废水中正常生长.由此可见,藻类反应器不仅可以有效去除养猪废水中的污染物,还可以将藻类作为生物柴油的原料,实现资源的回收利用.

2.2 新型养猪废水处理技术

为了适应更为严格的养猪废水排放标准,特别是考虑废水中 TN 的控制需求,新型处理技术的关键是在已有工艺的基础上强化 TN 的去除.但养猪废水的碳氮比较低,新型技术应着重考虑有机碳源需求较少或有替代碳源的脱氮工艺.

2.2.1 短程硝化反硝化工艺 短程硝化反硝化工艺(见图 7)是将硝化反应控制在亚硝酸盐阶段,随后直接进行反硝化反应的工艺^[79],可节省硝化阶段的部分曝气能耗和反硝化阶段的有机碳源.该工艺的关键是短程硝化的控制,目前多用 SBR 反应器来实现.而大量研究表明,进水氨氮质量浓度、温度、运行调控等可对 SBR 短程硝化反硝化的效果产生影响:在 SBR 反应器中,过高的进水氨氮质量浓度或氨氮负荷会降低氨氮的去除率^[80];温度降低对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的活性均有影响,但对氨氧化菌的影响要大于亚硝酸盐氧化菌^[81];采用两段 SBR 法处理有机物和氮含量较高的废水,可有效提高氮素的去除率^[82];过度曝气容易引起短程硝化向全程硝化转变^[83].

2.2.2 甲烷反硝化工艺 目前,以甲烷作为反

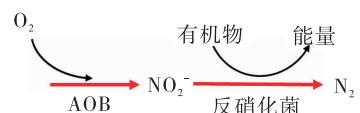


图 7 短程硝化反硝化工艺的基本原理

Fig. 7 The principle of short-cut nitrification and denitrification

硝化碳源的主要工艺有好氧甲烷氧化耦合反硝化工艺、厌氧甲烷氧化耦合反硝化 DAMO (denitrifying anaerobic methane oxidation) 工艺、甲烷氧化耦合同步硝化反硝化工艺^[84]。对于好氧甲烷氧化耦合反硝化工艺而言,体积分数为 21% 的 O₂ 可以促进甲烷的氧化^[85]。近年来, DAMO 工艺成为了研究热点,该工艺是指在厌氧条件下,以甲烷作为电子供体,以 NO₂⁻/NO₃⁻ 作为电子受体的反硝化过程(见图 8)^[86]。 DAMO 工艺多在膜生物反应器中实现。此外,将厌氧氨氧化与 DAMO 反应相结合,可实现更高效的脱氮反应^[87]。S. Fan 等^[88]采用一种新型膜颗粒污泥反应器,实现了厌氧氨氧化与 DAMO 的耦合,获得了较好的脱氮效果。同时, DAMO 工艺中甲烷分压的变化也会影响微生物的活性^[89-90]。以上研究表明,甲烷也可作为反硝化脱氮的有机碳源,而养猪废水传统处理工艺中的厌氧产甲烷阶段会产生大量的甲烷,可为后续的甲烷反硝化脱氮提供充足的碳源,大大减少养猪废水脱氮中外加碳源的消耗,降低养猪废水的处理成本。

2.2.3 自养脱氮工艺 自养脱氮工艺是指通过短程硝化和厌氧氨氧化两个反应去除废水中的氮素(见图 9)。该工艺不仅能节省曝气能耗,还不需要有机碳源,尤其适合处理低碳氮比的养猪废水^[91-93]。已有研究表明,部分无机物、有

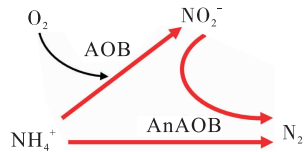


图 9 自养脱氮工艺的基本原理
Fig. 9 The principle of autotrophic nitrogen removal process

机物、重金属和抗生素会抑制自养脱氮工艺中的厌氧氨氧化反应。例如,何占飞^[94]研究发现,过量的亚硝酸盐和有机机会抑制厌氧氨氧化反应。张正哲^[95]研究发现,当废水中 Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 的质量浓度分别为 16.3 mg/L 和 20.0 mg/L 时,联合抑制厌氧氨氧化的作用最强。李晶^[96]研究发现,含量较高的抗生素诺氟沙星和左氧氟沙星可抑制厌氧氨氧化菌的活性。此外,温度、pH 值、水力停留时间等因素对自养脱氮工艺处理效果也有较大影响。赵楠婕等^[97]研究发现,在序批式厌氧氨氧化反应器中,厌氧氨氧化的适宜温度为 (35 ± 1) °C,适宜 pH 值为 7.5 ~ 8.0。荀方飞等^[98]通过多因素试验得出,在 pH 值为 (7.5 ± 0.1),温度为 (33 ± 1) °C,水力停留时间为 1.2 d 的情况下,厌氧氨氧化反应达到最佳运行状态。S. Wang 等^[99]使用自养脱氮工艺处理养猪沼液,通过逐渐缩短水力停留时间,使 TN 去除负荷达到 3.9 kgN/(m³ · d)。由此可见,在应用自养脱氮工艺时,应综合考虑养猪废水中其他污染物和工艺运行参数的影响。

3 结语

本文综述了不同养猪废水处理技术的基本原理和优缺点,指出传统处理技术多侧重于废水中污染物的去除,但未考虑 TN 的控制,难以实现节能降耗和资源的回收利用,随着养殖业向集约化和工厂化方向的发展,传统处理技术已经无法满足可持续发展的要求。而新型处理技术的关键是在已有工艺的基础上强化 TN 的

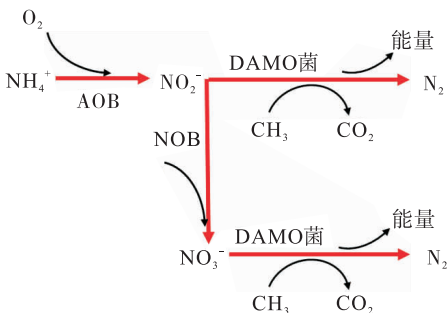


图 8 厌氧甲烷氧化耦合反硝化工艺的基本原理
Fig. 8 The principle of denitrifying anaerobic methane oxidation

去除,不仅可以减少总氮去除过程中的能耗、物耗,还可实现资源的回收利用,在未来的养猪废水处理中具有广阔的应用前景.可以预见,为实现可持续发展战略,实现更严格的出水排放标准,现有处理技术还需在优化运行条件、增加预处理措施、组合多技术处理等方面做出相应的改进;而未来还会涌现出更多的新型养猪废水处理技术,促进养猪废水处理向低耗、高效和高质方向发展.

参考文献:

- [1] 马彦涛,薛金凤. 养猪废水处理技术进展[J]. 环境与可持续发展,2009,34(5):29.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国污染源普查公报[J]. 新华月报,2010(6):65.
- [3] 潘庆. 养猪场的废水污染及防治对策[J]. 环境污染治理技术与设备,2002(9):66.
- [4] 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.
- [5] 欧阳婷,王涛,樊华. 养猪废水深度治理技术研究进展[J]. 安徽农业科学,2016,44(35):81.
- [6] 张德林. 养猪养殖户沼气池的建设[J]. 现代农村科技,2012(15):78.
- [7] 韦成乔. 生态养猪沼气池的建设和管理研究[J]. 畜禽业,2018,29(11):59.
- [8] 李轶,刘雨秋,张镇,等. 玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵产沼气工艺优化[J]. 农业工程学报,2014,30(5):185.
- [9] 孙全平,邱凌,李自林,等. 酒糟与猪粪混合厌氧发酵产沼气的研究[J]. 西北农业学报,2013,22(3):199.
- [10] 邓媛方,邱凌,孙全平,等. 蘑菇废弃菌棒及其与猪粪混合发酵对沼气产量及质量的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(3):613.
- [11] LIU Y, MA S C, HUANG L, et al. Two-step heating mode with the same energy consumption as conventional heating for enhancing methane production during anaerobic digestion of swine wastewater [J]. Journal of Environmental Management,2018,209:301.
- [12] 赵青玲,杨世关,张百良. UASB 处理养猪废水条件下进水浓度对污泥颗粒化的影响[J]. 可再生能源,2005(5):38.
- [13] 郑仁宏. UASB 处理畜禽养殖废水的启动研究[D]. 雅安:四川农业大学,2007.
- [14] 万莉,邹义龙,弓晓峰,等. 电增强零价铁强化厌氧氨氧化处理高氮养猪废水[J]. 环境科学研究,2015,28(8):1302.
- [15] ZENG Z, ZHANG M, KANG D, et al. Enhanced anaerobic treatment of swine wastewater with exogenous granular sludge: Performance and mechanism [J]. Science of the Total Environment,2019,697:1.
- [16] ZHOU Z, PING Z, CHENG S, et al. A challenge in anaerobic digestion of swine wastewater: Recalcitrance and enhanced-degradation of dietary fibres [J]. Biodegradation,2019,30(5/6):389.
- [17] CHEN J L, XU Y B, LI Y X, et al. Effective removal of nitrate by denitrification re-enforced with a two-stage anoxic/oxic (A/O) process from a digested piggery wastewater with a low C/N ratio [J]. Journal of Environmental Management,2019,240:19.
- [18] 夏经纬. 倒置 A²/O² 与人工湿地处理猪场废水的试验研究[D]. 广州:华南农业大学,2016.
- [19] 郑志彬. 预处理/沼气池/两级 AO 工艺处理养殖废水[J]. 资源节约与环保,2018(4):88.
- [20] 陈凤祥. UASB/两级 AO 工艺处理养猪废水的应用研究[J]. 广州化工,2014,43(4):89.
- [21] 陈威,施武斌,龚松,等. EGSB-A/O-MBR 工艺处理规模化猪场废水[J]. 给水排水,2014,40(3):45.

- [22] 曾哲伟. A²/O - 混凝工艺处理养猪场废水 [J]. 广州化工, 2016, 44(11): 185.
- [23] WU X, ZHU J, CHENG J H, et al. Optimization of three operating parameters for a two-step fed sequencing batch reactor (SBR) system to remove nutrients from swine wastewater [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 175(6): 2857.
- [24] LIU J, LI J, WANG X D, et al. Rapid aerobic granulation in an SBR treating piggery wastewater by seeding sludge from a municipal WWTP [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 51(1): 332.
- [25] SHENG X L, LIU R, SONG X Y, et al. Comparative study on microbial community in intermittently aerated sequencing batch reactors (SBR) and a traditional SBR treating digested piggery wastewater [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, 11(3): 8.
- [26] SONG X Y, LIU R, CHEN L J, et al. Advantages of intermittently aerated SBR over conventional SBR on nitrogen removal for the treatment of digested piggery wastewater [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, 11(3): e13.
- [27] LI J Z, MENG J, LI J L, et al. The effect and biological mechanism of COD/TN ratio on nitrogen removal in a novel upflow microaerobic sludge reactor treating manure-free piggery wastewater [J]. Bioresource Technology, 2016, 209: 360.
- [28] MENG J, LI J L, LI J Z, et al. Efficiency and bacterial populations related to pollutant removal in an upflow microaerobic sludge reactor treating manure-free piggery wastewater with low COD/TN ratio [J]. Bioresource Technology, 2016, 201: 166.
- [29] MENG J, LI J L, LI J Z, et al. The role of COD/TN ratio on the start-up performance and microbial mechanism of an upflow microaerobic reactor treating piggery wastewater [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 217: 825.
- [30] 施云芬, 魏冬雪. MBBR 两种填料对养猪废水脱氮除磷效果对比 [J]. 化学通报, 2014, 77(6): 562.
- [31] MENG J, LI J L, LI J Z, et al. Enhanced nitrogen removal from piggery wastewater with high NH₄⁺ and low COD/TN ratio in a novel upflow microaerobic biofilm reactor [J]. Bioresource Technology, 2018, 249: 935.
- [32] 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.
- [33] 宋承谋, 蔡映红, 吴正杰, 等. 规模化养猪废水处理问题及对策 [J]. 中国猪业, 2016, 11(2): 66.
- [34] ZHANG X, INOUE T, KATO K, et al. Performance of hybrid subsurface constructed wetland system for piggery wastewater treatment [J]. Water Science and Technology, 2016, 73(1): 13.
- [35] LI X, LI Y Y, LI Y, et al. Diversity and distribution of bacteria in a multistage surface flow constructed wetland to treat swine wastewater in sediments [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102: 10755.
- [36] DONG X, REDDY G. Soil bacterial communities in constructed wetlands treated with swine wastewater using PCR-DGGE technique [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(4): 1175.
- [37] HAN Z, DONG J, SHEN Z, et al. Nitrogen removal of anaerobically digested swine wastewater by pilot-scale tidal flow constructed wetland based on in-situ biological regeneration of zeolite [J]. Chemosphere, 2019, 217: 364.
- [38] LI L, LIU M, WU M, et al. Effects of duckweed

- (*Spirodela polyrrhiza*) remediation on the composition of dissolved organic matter in effluent of scale pig farms [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 55(5):247.
- [39] WANG W, YANG C, TANG X, et al. Carbon and energy fixation of great duckweed *Spirodela polyrrhiza* growing in swine wastewater [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(20):15804.
- [40] LUO P, LIU F, LIU X, et al. Phosphorus removal from lagoon-pretreated swine wastewater by pilot-scale surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum* [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576:490.
- [41] LI X, ZHANG M, LIU F, et al. The significance of *Myriophyllum elatinoides* for swine wastewater treatment: Abundance and community structure of ammonia-oxidizing microorganisms in sediments [J]. *PLOS ONE*, 2015, 10(10):e0139778.
- [42] LI X, ZHANG M, LIU F, et al. Abundance and distribution of microorganisms involved in denitrification in sediments of a *Myriophyllum elatinoides* purification system for treating swine wastewater [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(22):17906.
- [43] CHEN L, LIU F, JIA F, et al. Anaerobic ammonium oxidation in sediments of surface flow constructed wetlands treating swine wastewater [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, 101(3):1301.
- [44] HUANG X, ZHENG J, LIU C, et al. Performance and bacterial community dynamics of vertical flow constructed wetlands during the treatment of antibiotics-enriched swine wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 316:727.
- [45] 敖子强,付嘉琦,桂双林,等. 处理养猪废水的人工湿地植物筛选综述 [J]. *家畜生态学报*, 2016, 37(7):87.
- [46] 许惠英,朱新富,王志荣. 人工湿地技术在养猪废水处理中的应用 [J]. *浙江树人大学学报(自然科学版)*, 2010, 10(4):15.
- [47] 童凯,李俊斌. 养猪废水处理工程实例介绍 [J]. *北方环境*, 2011, 23(7):179.
- [48] 万莉,章洪涛,弓晓峰,等. 鄱阳湖流域养猪废水治理概况与进展 [J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(4):798.
- [49] 邓玉君,叶志隆,叶欣,等. 流化床造粒法回收猪场废水中氮磷:鸟粪石颗粒的形貌与组成 [J]. *环境工程学报*, 2016, 10(6):2933.
- [50] HUANG H, LIU J, WANG S, et al. Nutrients removal from swine wastewater by struvite precipitation recycling technology with the use of $Mg_3(PO_4)_2$ as active component [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 92:111.
- [51] KIM D, MIN K, LEE K, et al. Effects of pH, molar ratios and pre-treatment on phosphorus recovery through struvite crystallization from effluent of anaerobically digested swine wastewater [J]. *Environmental Engineering Research*, 2017, 22(1):12.
- [52] WU Z, ZOU S, ZHANG B, et al. Forward osmosis promoted in-situ formation of struvite with simultaneous water recovery from digested swine wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 342:274.
- [53] LUO Z, WANG D, YANG J, et al. Nitrogen removal from digested piggery wastewater using fermented superphosphate within the pretreatment stage and an MAP fertilizer pot test [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212:372.
- [54] 赵倩倩,顾玲. PVDF膜接触器脱除回收垃圾渗滤废液中的氨氮 [J]. *天津化工*, 2014, 28(1):53.
- [55] 张宗阳,郝兴阁,赵建敏,等. 双套型中空纤维

- 膜接触器用于脱除水溶液中氨氮[J]. 高校化学工程学报, 2016, 30(5): 1213.
- [56] 刘芮, 陆军, 李保, 等. 错流式中空纤维膜接触器脱除水中氨氮的实验研究[J]. 工业水处理, 2015, 35(3): 52.
- [57] SHI L, HU Y, XIE S, et al. Recovery of nutrients and volatile fatty acids from pig manure hydrolysate using two-stage bipolar membrane electrodialysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 334: 134.
- [58] LIM S, KIM T, KIM J, et al. Enhanced treatment of swine wastewater by electron beam irradiation and ion-exchange biological reactor[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 157: 72.
- [59] HUANG H, ZHANG D, GUO G, et al. Dolomite application for the removal of nutrients from synthetic swine wastewater by a novel combined electrochemical process[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 335: 665.
- [60] WANG H M, MIAO Z, LI Y F, et al. Energy self-sustained treatment of swine wastewater in a microbial electrochemical technology-centered hybrid system [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2020, 6(3): 747.
- [61] DING W J, CHENG S A, YU L L, et al. Effective swine wastewater treatment by combining microbial fuel cells with flocculation[J]. Chemosphere, 2017, 182: 567.
- [62] CERRILLO M, OLIVERAS J, VINAS M, et al. Comparative assessment of raw and digested pig slurry treatment in bioelectrochemical systems [J]. Bioelectrochemistry, 2016, 110: 69.
- [63] CERRILLO M, VINAS M, BONMATI A. Overcoming organic and nitrogen overload in thermophilic anaerobic digestion of pig slurry by coupling a microbial electrolysis cell [J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 362.
- [64] SCHERSON Y, WELLS G, WOO S, et al. Nitrogen removal with energy recovery through N_2O decomposition [J]. Energy Environ Sci, 2013, 6(1): 241.
- [65] SCHERSON Y, WOO S, CRIDDLE C. Production of nitrous oxide from anaerobic digester centrate and its use as a co-oxidant of biogas to enhance energy recovery [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(10): 5612.
- [66] WESSBACH M, THIEL P, DREWES J, et al. Nitrogen removal and intentional nitrous oxide production from reject water in a coupled nitrification/nitrous denitrification system under real feed-stream conditions [J]. Bioresource Technology, 2018, 255: 58.
- [67] MEISSBACH M, GOSSLER F, DREWES J, et al. Separation of nitrous oxide from aqueous solutions applying a micro porous hollow fiber membrane contactor for energy recovery [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 195: 271.
- [68] WEISSBACH M, DREWES J, KOCH K. Application of the oxidation reduction potential (ORP) for process control and monitoring nitrite in a coupled aerobic-anoxic nitrous decomposition operation (CANDO) [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 343: 484.
- [69] MAYUNG J, WANG Z, YUAN T, et al. Production of nitrous oxide from nitrite in stable type ii methanotrophic enrichments [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(18): 10969.
- [70] GAO H, LIU M, GRIFFIN J, et al. Complete nutrient removal coupled to nitrous oxide production as a bioenergy source by denitrifying polyphosphate-accumulating organisms [J]. American Chemical Society, 2017(8): 4531.
- [71] WANG Y, GAO W, YEN H, et al. Cultivation of *Chlorella vulgaris* JSC-6 with swine wastewater

- for simultaneous nutrient/COD removal and carbohydrate production[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 198:619.
- [72] VIMALKUMAR G, SURESH S, DHARMARJAN R, et al. Use of mixed wastewaters from piggery and winery for nutrient removal and lipid production by *Chlorella* sp. MM3 [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 256:254.
- [73] WEN Y, HE Y, JI X, et al. Isolation of an indigenous *Chlorella vulgaris* from swine wastewater and characterization of its nutrient removal ability in undiluted sewage[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243:247.
- [74] LEE Y, HAN G. Complete reduction of highly concentrated contaminants in piggery waste by a novel process scheme with an algal-bacterial symbiotic photobioreactor [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 177:202.
- [75] YU J, HU H, WU X, et al. Coupling of biochar-mediated absorption and algal-bacterial system to enhance nutrients recovery from swine wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701:1.
- [76] GUO G, CAO W, SUN S, et al. Nutrient removal and biogas upgrading by integrating fungal-microalgal cultivation with anaerobically digested swine wastewater treatment [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2017, 29(6):2857.
- [77] KIM H, CHOI W, CHAE A, et al. Evaluating integrated strategies for robust treatment of high saline piggery wastewater [J]. *Water Research*, 2016, 89:222.
- [78] WANG M, YANG Y, CHEN Z, et al. Removal of nutrients from undiluted anaerobically treated piggery wastewater by improved microalgae [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 222:130.
- [79] 袁林江, 彭党聪, 王志盈. 短程硝化-反硝化生物脱氮 [J]. *中国给水排水*, 2000(2):29.
- [80] 于德爽, 彭永臻, 张相忠, 等. 中温短程硝化反硝化的影响因素研究 [J]. *中国给水排水*, 2003(1):40.
- [81] 尚会来, 彭永臻, 张静蓉, 等. 温度对短程硝化反硝化的影响 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(3):516.
- [82] 曾薇, 彭永臻, 王淑莹, 等. 两段 SBR 法去除有机物及短程硝化反硝化 [J]. *环境科学*, 2002(2):50.
- [83] 高大文, 彭永臻, 杨庆, 等. 应用实时控制实现和稳定短程硝化反硝化 [J]. *中国给水排水*, 2003(12):1.
- [84] 董文艺, 赵志军, 李继. 甲烷作为反硝化气体碳源的研究进展 [J]. *安全与环境工程*, 2011, 18(4):64.
- [85] 王东豪, 廖方成, 邓正栋, 等. 氧气浓度对好氧甲烷氧化耦合反硝化过程的影响 [J]. *净水技术*, 2019, 38(7):101.
- [86] 范秋香, 吴箐, 常佳丽, 等. 反硝化型甲烷厌氧氧化的研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(6):1747.
- [87] XIE G, LIU T, CAI C, et al. Achieving high-level nitrogen removal in mainstream by coupling anammox with denitrifying anaerobic methane oxidation in a membrane biofilm reactor [J]. *Water Research*, 2018, 131:196.
- [88] FAN S, XIE G, LU Y, et al. Granular sludge coupling nitrate/nitrite dependent anaerobic methane oxidation with anammox: From proof-of-concept to high rate nitrogen removal [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(1):297.
- [89] HU Z, RU D, WANG Y, et al. Optimization of a nitrite-dependent anaerobic methane oxidation (n-damo) process by enhancing methane availability [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 275:101.
- [90] CAI C, HU S, CHEN X, et al. Effect of methane

- partial pressure on the performance of a membrane biofilm reactor coupling methane-dependent denitrification and anammox[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639:278.
- [91] BEATRIZ M, CRUZ G, DIMITAR K, et al. Anammox for ammonia removal from pig manure effluents: Effect of organic matter content on process performance [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(7):2171.
- [92] ZHANG Z, ZHANG Q, XU J, et al. Long-term effects of heavy metals and antibiotics on granule-based anammox process: Granule property and performance evolution [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(5):2417.
- [93] NI S, YANG N. Evaluation of granular anaerobic ammonium oxidation process for the disposal of pre-treated swine manure [J]. *PeerJ*, 2014, 2(1):e336.
- [94] 何占飞. 厌氧氨氧化处理养殖废水启动实验研究[D]. 西安:西南交通大学, 2008.
- [95] 张正哲. 重金属离子对厌氧氨氧化颗粒污泥的影响及其修复策略研究[D]. 杭州:杭州师范大学, 2016.
- [96] 李晶. 氟喹诺酮抗生素对厌氧氨氧化菌活性抑制研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
- [97] 赵楠婕, 解庆林, 游少鸿, 等. 厌氧氨氧化工艺处理猪场废水沼液的试验研究[J]. *四川环境*, 2012, 31(5):4.
- [98] 荀方飞, 何占飞, 葛亚军, 等. 厌氧氨氧化处理猪场养殖废水最佳运行工艺研究[J]. *广东农业科学*, 2010, 37(7):174.
- [99] WANG S, WANG L, DENG L W, et al. Performance of autotrophic nitrogen removal from digested piggery wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241:465.

本刊数字网络传播声明

本刊已许可中国知网, 万方数据资源系统, 维普网, 国家科技学术期刊开放平台, 博视网, 超星, 中国科技论文在线, 中教数据库, EBSCOhost, CA, Ulrichs, FSTA 等在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文. 其相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付. 作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明.