



低碳污水微生物氮转化工艺研究进展

李瑞祥^{1,2,3}, 王鑫^{1,2,3}, 李田^{1,2,3}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300350; 3. 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300350)

[摘要] 由于我国污水处理厂进水碳源不足, 传统生物脱氮技术需补充碳源以满足脱氮要求, 这额外增加了碳足迹和碳排放。碳中和背景下, 低碳生物脱氮技术的发展为脱氮技术革新提供了基础。基于此, 首先系统介绍了传统生物脱氮技术的原理及对应的功能微生物, 分析了传统技术存在的问题; 针对传统生物脱氮技术, 提出添加新型碳源、调整工艺运行和挖掘内碳源等途径来提升脱氮效率。概述了几种低碳脱氮技术(短程硝化反硝化、同步硝化反硝化、厌氧氨氧化、微生物电化学技术)的工艺特点和创新原理, 并与传统工艺进行了比对。最后对目前污水厂生物脱氮技术进行了总结和展望, 以期能更好地理解我国污水厂生物氮转化工艺。

[关键词] 低碳源污水; 传统生物脱氮; 低碳脱氮技术

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)06-0022-11

Research progress on the microbial technology of nitrogen transformation from low carbon wastewater

LI Ruixiang^{1,2,3}, WANG Xin^{1,2,3}, LI Tian^{1,2,3}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, Tianjin 300350, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, Tianjin 300350, China)

Abstract: Due to the insufficient carbon source in the influent, China's wastewater treatment plants need to add extra carbon sources in traditional biological denitrification technologies, which additionally increases the carbon footprint and carbon emissions. In the context of carbon neutrality, the development of low carbon biological nitrogen removal technologies provides the basis for nitrogen removal technology innovation. Based on this, the principles of traditional biological denitrification technology and the corresponding functional microorganisms were first systematically introduced, and the existing problems of traditional technology were analyzed. In view of the traditional biological nitrogen removal technology, the methods of adding new carbon source, adjusting process operation and exploring internal carbon source were proposed to improve nitrogen removal efficiency. The process characteristics and innovative principles of several low carbon denitrification technologies (short-cut nitrification and denitrification, synchronous nitrification and denitrification, anammox, microbial electrochemical technology) were summarized and compared with traditional processes. Finally, a summary and outlook of the current biological denitrification technology in wastewater plants was presented in order to better understand the progress of biological nitrogen conversion processes in wastewater plants.

Key words: low carbon source sewage; conventional biological denitrification; low carbon denitrification technologies

随着温室效应问题加剧以及“双碳”目标的提出, 我国各行业开始密切关注 CO₂ 排放量, 并将实现

碳中和作为行业发展的目标。据调查, 我国污水处理行业的碳排放量占总排放量的 1%~2%, 是不可忽

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金项目(52100189)

视的碳排放领域^[1],这主要与污水处理厂在运行过程中各处理单元设备碳排放量过高以及额外的能量消耗有关。究其根本原因,主要是污水资源化以及能源化效果不显著,很难实现低碳运行与能源平衡。宜兴概念水厂的建成运行,为我国污水厂的技术革新提供了良好的基础。

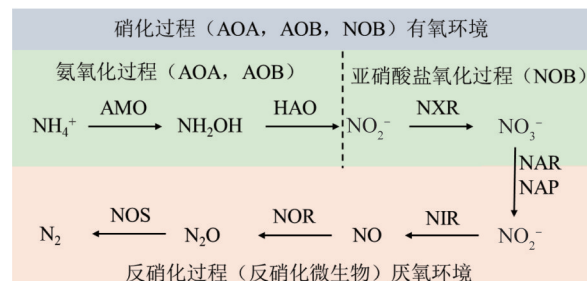
随着污水排放总量的不断增加,污水中氮、磷等营养物质对环境的影响越来越大。氮、磷的去除已经成为城市污水处理工艺的重要部分,氨氮成为我国总量控制指标和污染物削减指标之一。污水脱氮技术可以分为物理、化学和生物方法。随着微生物技术的发展,生物脱氮技术取得了长足进步并被广泛应用于污水处理厂中^[2]。污水厂大多数污水中的氮主要是氨氮和有机氮,有机氮通过异养细菌的氨化过程转化为氨氮,部分作氮源以合成新的生物质^[3],其余通过微生物的硝化和反硝化过程去除^[4]。然而,当废水中没有足够的有机碳源作为电子供体时,脱氮效率很难满足处理需求^[5]。为了提高低碳氮比污水的处理效果,我国污水处理厂大多采用外加碳源的方法,但存在处理成本和能耗增加等问题^[3]。

在碳达峰和碳中和的宏伟愿景下,制定和研发低碳源的污水生物脱氮处理技术势在必行。已经被证明有效的主流生物脱氮新技术,如短程硝化反硝化、同步硝化反硝化以及厌氧氨氧化等,将在双碳目标下发挥重要作用。因此,立足碳减排,围绕目前传统生物脱氮技术,笔者首先论述了脱氮功能菌群及其种间的互作方式,其次对其存在的不足进行了讨论,分析了国内外低碳氮比污水脱氮的最新研究进展和特点,最后对污水生物脱氮技术的发展前景进行了总结,旨在为碳中和背景下低碳污水生物脱氮技术的发展和实际应用提供参考。

1 传统生物脱氮技术概述

污水中,氮主要以无机和有机氮化合物的形式存在。无机氮化合物包括氨(NH_3)、铵根离子(NH_4^+)、亚硝酸盐(NO_2^-)和硝酸盐(NO_3^-)。有机氮化合物则包括氨基酸和蛋白质等复杂化合物,并以可溶性或颗粒形式存在^[6]。在传统污水处理系统中,氮的去除以微生物的正常生命活动为重要前提^[7],每个过程中都会有对应的酶发挥作用(图1)^[8]。不同微生物具有不同的生理特性,对不同的

环境适应能力不同,在不同脱氮过程发挥的作用和脱氮性能上也有差异。因此,为了实现不同污水的高效脱氮,必须选择合适的脱氮微生物。



AOA—氨氧化古菌;AOB—氨氧化细菌;NOB—亚硝酸盐氧化细菌;AMO—氨单加氧酶;HAO—羟胺氧化还原酶;NXR—亚硝酸盐氧化还原酶;NAR—膜结合型异化型硝酸盐还原酶;NAP—周质型异化型硝酸盐还原酶;NIR—亚硝酸盐还原酶;NOR—一氧化氮还原酶;NOS—一氧化二氮还原酶

图1 传统生物脱氮过程及对应酶

Fig. 1 Conventional biological denitrification process and corresponding enzymes

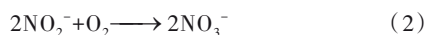
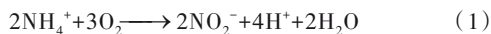
1.1 氨化作用

氨化作用(Ammonification)是生物脱氮的初始步骤,其在厌氧或好氧条件下可以将有机氮化合物转化为氨氮,为硝化作用创造必要条件。一般氨化过程分为2步:第一步是含氮有机化合物(蛋白质、核酸等)在氨化微生物的作用下降解为多肽和氨基酸等结构简单的含氮化合物;第二步是简单的含氮化合物通过脱氨基过程转变为 NH_3 ^[9]。氨化微生物在污水处理厂中分布广泛,对含氮有机物分解能力较强的细菌主要有*Bacillus*、*Pseudomonas*、*Serratia*和*Micrococcus*等^[8],比较常见的还包括*Brevundimonas diminuta*、*Alcaligenes faecalis*和*Enterobacter aerogenes*^[10]。这些微生物能在有氧或无氧条件下,通过自身的生命活动进行含氮有机物的分解,为后续的脱氮过程提供物质基础。

1.2 硝化作用

硝化过程包括亚硝化和硝化2个连续的氧化阶段,需要在严格好氧条件下进行,该过程中的功能微生物大多属于化能自养型,利用氨/亚硝酸盐作为能源、 CO_2 作为碳源、 O_2 作为电子受体^[11]。第一阶段亚硝化是指氨氧化细菌(AOB)将氨氧化为亚硝酸盐的过程[式(1)],具体步骤为:氨首先在氨单加氧酶(AMO)的催化下被氧化成羟氨,再经羟氨氧化还原酶(HAO)的催化被氧化成亚硝酸盐。目前在不同的环境条件下已经检测到5种不同属的AOB:*Nitro-*

somonas、*Nitrosospira*、*Nitrosovibrio*、*Nitrosolobus* 和 *Nitrosococcus*, 而其中 *Nitrosomonas eutropha*、*Nitrosomonas nitrosa* 和 *Nitrosomonas vulgaris* 等在生物脱氮中较为常见^[12]。第二阶段硝化是指亚硝酸盐氧化细菌 (NOB) 将亚硝酸盐转化为硝酸盐的过程〔式 (2)〕^[13], 相关的 NOB 包括 *Nitrobacter*、*Nitrospira*、*Nitrococcus* 和 *Nitrospina*^[14], 其中污水处理厂中常见的 NOB 为 *Nitrospira defluvii*^[15]。一般情况下, 硝化细菌最适宜的 pH 范围是 7.5~8.2^[16]。



通过硝化过程的化学计量可知, 随着硝化反应的进行, 体系 pH 会降低, 而当 pH 降低到 7.0 以下时, 反应速率会迅速降低。因此, 必须通过添加化学品来补充适当的碱度, 例如 NaOH、消石灰和生石灰等。

古菌是一类在恶劣环境条件下能够进行正常生命活动的生物。氨氧化过程已经被证明除了 AOB 作用外, 还能通过古菌进行, 这类微生物被称为氨氧化古菌 (AOA)^[17]。但是针对污水厂中 AOA 的深入研究还相对较少。已经被证明能够进行硝化过程的 AOA 包括 *Nitrosopumilus maritimus* 和 *Cenarchaeum symbiosum* 等^[18-19]。AOA 进行部分硝化过程的关键酶也是 AMO^[20]。与 AOB 不同, AOA 可以在低溶解氧、强酸碱环境以及温度异常的条件下氧化氨^[21]。

随着对脱氮微生物的深入研究, 异养脱氮微生物也被证明存在于污水中^[22]。目前能够进行异养硝化过程的微生物主要包括 *Pseudomonas sputida*、*Alcaligees faecalis*、*Thiosphaera pantotropha*、*Paracoccus denitrificans* 以及 *Arthrobacter*^[23]。

1.3 反硝化作用

反硝化过程是指将硝酸盐还原为亚硝酸盐, 然后通过 NO、N₂O 等中间体连续还原为 N₂ 的过程 (图 1)。微生物反硝化是以有机和无机碳源作为电子供体和维持微生物生长的能源, 在反硝化微生物的作用下, 以硝酸盐作为终端电子受体进行的。反硝化过程中间产物的变化涉及多种酶并伴随着电子传递和能量产生等, 其中主要涉及 4 种酶: 硝酸盐还原酶 (NAR)、亚硝酸盐还原酶 (NIR)、一氧化氮还原酶 (NOR) 和一氧化二氮还原酶 (NOS)^[16]。微生物的反硝化过程需要严格厌氧, 因为当氧气存在时, 兼氧的反硝化细菌优先使用氧气作为电子受体, 从而导致硝酸盐或亚硝酸盐无法作为电子受体, 进而造成反

硝化效果显著下降^[24]。目前已经发现的反硝化菌包括 50 多个属^[25], 如 *Pseudomonas*、*Alcaligenes*、*Paracoccus* 和 *Thiobacillus*。污水处理厂中常见的反硝化菌包括 *Pseudomonas aeruginosa* F5、*Thiobacillus denitrificans* 和 *Paracoccus* sp. DB2 等^[25-26]。

除了厌氧反硝化外, 好氧反硝化也能够进行氮去除^[27]。目前大量好氧反硝化细菌已被从不同的环境中分离出来, 如 *Pseudomonas*^[28]、*Thauera*^[29]、*Zoogloea*^[30]、*Paracoccus*^[31] 和 *Thiosphaerapan*^[32] 等, 其中常见的包括 *Pseudomonas mendocina* 和 *Paracoccus denitrificans*。好氧反硝化细菌的硝酸盐还原酶位于周质中, 与其他好氧基团表现出共呼吸作用, 可以同时使用氧气和硝酸盐作为电子受体^[33]。好氧反硝化细菌的发现解决了 AO 工艺中硝化和反硝化作用必须分别在 2 个不同的反应器中进行的弊端, 降低了投资和运营成本。对于好氧反硝化, 中性和碱性环境 (pH=7.0~8.5) 更有利于生物脱氮^[34], 因此在实际应用中仍需要外加酸或碱以维持 pH 在正常范围。

目前, 对古菌的反硝化过程研究较少。以反硝化为特征的古菌包括 *Halophiles* 和 *Lithotrophic hyperthermophiles*, 可以使用硝酸盐作为电子受体。*Haloferax denitrificans* 和 *Pyrobaculum aerophilum* 这 2 种古菌已被证明能够产生 N₂ 并作为最终产物, 证实了反硝化的完整机制^[35]。

2 传统生物脱氮存在的问题

我国近 90% 的污水处理厂存在总氮去除效率不高的问题, 这与微生物生存环境、污水厂运行模式以及水源水质等有很大关系。

2.1 污水来源与环境因素

我国污水由生活污水、工业废水和雨水组成, 其中工业废水可生化比例偏低, 存在有毒有害物质, 不利于脱氮功能微生物的生长。气候和生产方式等因素一旦改变会导致水质水量的变化, 进而使生物脱氮效率受到影响^[36]。例如, 由于温度的差异, 寒冷地区生物脱氮过程中的生物活性受低温影响, 脱氮效果不理想^[37]。而生产方式的改变则会使进水质更复杂, 甚至增加有毒有害物质, 影响脱氮^[36]。因此, 针对生物脱氮必须因地制宜, 优先考察水环境因素, 根据不同的进水特性选择相应技术, 还要做到对进水的实时监控以便及时调整运行参数。

2.2 碳源和碳氮比

碳源浓度对传统生物脱氮的影响主要在反硝化阶段。由于反硝化菌绝大部分属于异养菌,因此在脱氮过程中需要利用一定的碳源以用作能源和合成细胞成分的物质,并且碳源种类及含量对反硝化过程具有限制性作用^[38],一般情况下, $BOD_5/TN > 4$ 时具有较好的脱氮效率。然而,我国仍有较多污水处理厂原水中的碳源浓度难以满足该要求,反硝化过程中脱氮动力不足,影响脱氮效率^[39]。目前,为使出水水质达标,往往会在原水中外加一些碳源,这样既增加了运行成本,积累的碳源又会使反硝化速率降低、亚硝酸盐累积,较大的生物量还会导致过滤器堵塞^[40]。因此,开发新型外加碳源、充分利用进水中的碳源或应用新生物脱氮工艺势在必行。

2.3 不同去除指标对营养物质的竞争

污水处理过程中,氮、磷和COD的去除需要不同的工艺,涉及的不同微生物会竞争营养物质。在生物脱氮除磷过程中,异养微生物的脱碳过程和自养微生物的硝化过程存在对氧气的竞争,这使得污水处理厂不得不提高曝气量以提升脱氮效率;反硝化过程对碳源量的要求极高,然而厌氧释磷过程中的微生物会竞争碳源以满足自身生长代谢,这也无形中降低了脱氮可利用的碳源^[41]。因此,必须根据出水要求对运行参数和外加物质进行准确判断。对功能微生物丰度和种类的准确判断也是提高生物脱氮的重要途径之一。

2.4 微生物之间世代差异

不同功能微生物之间不同的世代时间也会对脱氮效率造成影响。世代时间长于污泥龄的微生物在污泥中不能成为优势菌种,硝化细菌生长极其缓慢;污泥龄越长,脱氮效果越好。相反,聚磷微生物污泥龄越短,有机除磷效果越好。因此,在污水处理过程中对污泥龄的控制也至关重要^[42]。污泥龄的控制需根据处理目的加以选择,如脱氮工艺要求污泥龄大于10 d,而除磷工艺要求低于10 d。运行过程中还需根据实际条件控制污泥龄。

2.5 pH和溶解氧

在实际运行时,硝化过程微生物的最佳pH为7.5~8.2,而反硝化过程的最佳pH则下降至6.5~7.5,因此需要合理控制pH进行脱氮。由于生物脱氮过程需要在好氧环境和缺氧环境下交替进行,溶

解氧在脱氮工艺过程中也是关键参数。当溶解氧($> 2 \text{ mg/L}$)过高时,虽然能够满足硝化反应,但是反硝化反应受到抑制;同理,当溶解氧($< 0.2 \text{ mg/L}$)过低时,硝化过程受到抑制。因此必须根据实际运行工艺合理布置曝气位置,进而调整溶解氧分布。

此外,不同工艺条件以及反应器构型也是影响脱氮效率的重要因素,合理选择运行参数以及工艺可以有效地避免污泥膨胀和生物泡沫等问题的发生,保证脱氮过程的正常运行。

3 低碳生物脱氮技术

为满足现阶段污水处理技术的发展要求,基于传统生物脱氮工艺的功能微生物,调控不同功能微生物的组成和选择性富集可以实现生物脱氮技术的创新和发展。近年来,随着碳源种类的变化、碳源补充方式的改变、新工艺的问世,低碳污水脱氮技术取得了长足发展。

3.1 新型碳源补充

3.1.1 添加新型碳源

由于传统外加碳源存在的缺陷,开发新型碳源是大势所趋。固体碳源由于其碳释放速率适宜、持续时间长、易于管理和可长期运行等优点,逐渐被学者关注。常用的固体碳源可分为天然纤维素材料和合成的可生物降解聚合物^[43]。天然纤维素材料包括纤维素、农业和林业废弃物(如玉米棒、秸秆、纸板纤维、树皮和果仁等)^[40],这类碳源虽然成本低,但存在碳释放速率不稳定的缺点。目前应用于污水脱氮工艺中的合成的可生物降解聚合物包括聚乳酸^[44]、聚己内酯^[45]、聚丁二酸丁二醇酯^[46]和聚羟基链烷酸酯^[47],这类碳源解决了碳释放不可控的问题并可充当反硝化微生物生长的载体,脱氮效果极好^[48],但是它们价格昂贵且性能受温度影响强烈,应用推广受限。因此,外加碳源可以考虑将这2类碳源混合构成复合碳源,以增强废水脱氮效果^[49]。

新型液体碳源包括高浓度有机工业废水^[50]、污泥水解液^[51]和餐厨废弃物水解液^[52]等。这类物质的加入不仅具有良好的脱氮效果,而且为其自身的进一步处理提供了新的资源化路径,实现了经济效益和环境效益的兼顾。但因添加之前需要预处理、复杂的组成成分带来的危害未知等因素,这类碳源的应用依然受限。

3.1.2 调整工艺运行

污水处理厂进水中的大多数碳源会在好氧段被消耗,导致缺氧段的反硝化过程无法正常进行。除了投加新型碳源外,还可以通过调整工艺运行方式实现进水碳源的合理利用。目前,对进水的优化方式有分段多点式进水 and 周期性改变进水^[53]。分段多点式进水具有污泥浓度高和碳源利用率高等优点,该方式可以划分为空间顺序上的分段进水即缺氧好氧分段进水工艺,以及时间顺序上的分段进水即序批式活性污泥法工艺^[54]。周期性改变进水方式是指将2个相同的反应器串联,进水方向周期性地从一个反应器转换到另一个反应器,以保证充分利用进水中的有机碳源^[55]。

调整工艺运行虽然能够在低碳源下最大程度地提高污水中氮的去除效率,但是针对我国部分C/N很低的污水,该优化方式仍不能充分发挥作用。

3.1.3 挖掘内碳源

污水中存在的内碳源已经被证明能够有效地提高生物氮去除效率^[56]。内碳源主要包括污水中的可生物降解溶解性有机物,以及活性污泥中微生物死亡或破裂后自溶释放出来的可被利用的物质。污水处理厂产生的剩余活性污泥的处理和处置成本约占污水处理厂总成本的60%^[57],剩余活性污泥中含有的许多有机物质可通过厌氧发酵过程有效释放,不仅减少了污泥量,还可以为反硝化提供内部碳源,提升脱氮效率,节省运营成本^[58]。但是直接产生的污泥并不能直接利用,需要经过前处理等步骤才可以利用(例如污泥破碎和污泥水解等),而这也增加操作难度和运行成本。

某些进水中的悬浮物质也可以被当作碳源利用,但是初沉池等的设置使得后续脱氮阶段该类型碳源降低。因此,对于悬浮物浓度较低且波动不大的污水厂可以取消初沉池,其他污水厂则可以通过设置超越管或减少初沉池的水力停留时间以降低进水碳源的损耗^[59]。

3.2 短程硝化反硝化

短程硝化反硝化是将硝化反应控制在亚硝酸盐阶段,直接进行反硝化作用。其基本原理是 NH_4^+ 先在有氧条件下通过AOB生成亚硝酸盐,之后在缺氧条件下将亚硝酸盐转化成氮气(图2)。

短程硝化反硝化不仅具有更快的反硝化速率,而且可以减少硝化过程中约25%的曝气消耗、后续

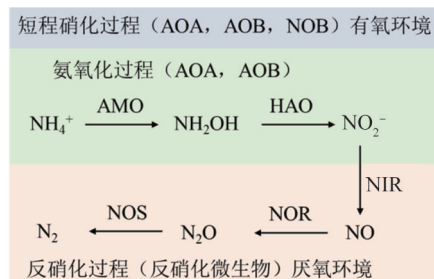


图2 短程硝化反硝化过程及对应酶

Fig. 2 Short-cut nitrification and denitrification process and corresponding enzymes

反硝化40%的碳源需求以及33%~55%的污泥产量,因此更加适用于低碳污水的处理^[60]。从微生物的角度来看,该技术的关键在于亚硝酸盐的积累,在处理中必须消除NOB的作用,利用AOB和NOB的代谢差异,形成利于AOB优势生长的环境。然而,在正常条件下,亚硝酸盐会被迅速氧化成硝酸盐,因此必须采取措施控制亚硝酸盐的氧化,且不能影响氨氧化过程。研究表明,较高的pH、高浓度游离氨与游离亚硝酸盐、低溶解氧以及高温等均能不同程度地抑制NOB生长或使其与反应体系分隔,在促进亚硝化途径形成的同时抑制亚硝酸盐的氧化^[61]。此外,还可以考虑加入硝化抑制剂,如氯酸盐和叠氮化钠等。

因此,在该技术进行实际应用时,必须严格控制运行过程中的参数,以维持适宜的环境(pH维持在8左右,溶解氧<0.5 mg/L等)。例如,可以通过外加酸碱以及合理控制曝气量、调节曝气位点使pH和溶解氧维持在适宜范围。

3.3 同步硝化反硝化

同步硝化反硝化(SND)是指在溶解氧较低条件下,在同一个反应器中同时实现硝化与反硝化过程。基于生物膜的致密结构或者较大粒径的颗粒污泥形成的梯级溶氧环境特征,硝化菌在高溶解氧区域活跃,反硝化菌在低溶解氧区域活跃,从而实现硝化细菌和反硝化细菌同时增殖^[62]。

SND突破了既定顺序,能够很大程度减小反应器体积,缩短生物脱氮流程^[63]。与短程硝化反硝化类似,SND能够将硝化反应控制在亚硝化阶段,从而有效缓解对有机碳的需求^[64]。SND中硝化产生的 H^+ 可以中和反硝化产生的 OH^- ,为微生物的生长提供适宜的环境,同时加快2种反应的正向进行速度^[65]。

SND的效果与多种因素有关,非生物因素主要包括溶解氧和pH,生物因素则主要是生物膜中脱氮功能菌群的相对丰度和分布^[66]。SND的产生主要得益于活性污泥中存在的溶解氧梯度,而溶解氧又会直接影响絮体中缺氧区和好氧区的分布,进而影响SND的效率,因此,在应用SND脱氮时需要将供氧速率作为系统的主要控制参数,结合实际需求进行调整^[67]。对于运行过程中pH的控制,需要同时满足硝化细菌和反硝化细菌的增殖需求/功能需求,即中性或弱碱性^[68]。此外,在处理中还需要控制硝化与反硝化的反应动力学平衡才能使SND实现最大化的低碳脱氮^[63,69]。

3.4 厌氧氨氧化

厌氧氨氧化(Anammox)是一种能够以 NO_2^- 作为电子受体将 NH_4^+ 厌氧转化为氮气的新型自养生物脱氮工艺。由于具有节能和成本效益优势,厌氧氨氧化是双碳背景下脱氮的最优选择(图3)。

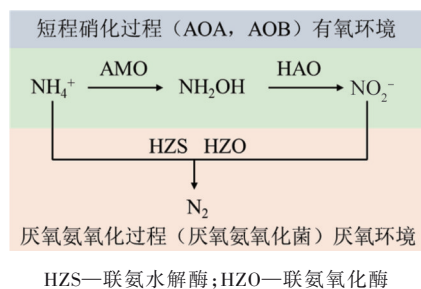
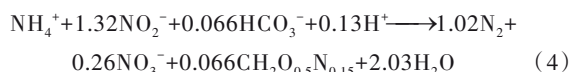
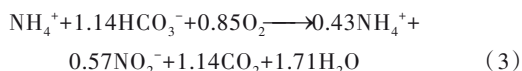


图3 厌氧氨氧化过程及对应酶

Fig. 3 Anammox process and corresponding enzymes

Anammox脱氮涉及2个步骤:第一步是约一半氨氮通过部分硝化(PN)转化为亚硝酸盐[式(3)];第二步是在厌氧条件下厌氧氨氧化菌(AnAOB)利用第一步产生的亚硝酸盐为电子受体,将89%左右的氨氮氧化为氮气,其余氨氮氧化为硝酸盐。当以 CO_2 或 HCO_3^- 为碳源时的反应如式(4),该反应被称为部分硝化和厌氧氨氧化(PN & A)^[70]。目前已发现的AnAOB主要是*Candidatus*属,其中占据优势的通常是*Candidatus Brocadia*和*Candidatus Kuenenia*^[71-73]。



基于自养生物脱氮的2个反应阶段,根据PN和Anammox反应的反应器数目,Anammox技术可以分为

单级反应系统和多级反应系统^[74]。在单级反应系统中,PN和Anammox都在一个反应器中进行,该系统需要严格控制水体中的溶解氧($<0.5 \text{ mg/L}$)^[75],并且由于多种微生物种群(AOB和AnAOB等)共存,系统中 NO_2^- 含量难以控制,不利于AnAOB的生长,系统运行不稳定。但单级反应系统具有反应器体积小、建设成本低、体积负荷大等优点,可有效避免亚硝酸盐积累而引起的抑制作用^[76]。多级反应系统指PN和Anammox存在于2个独立的反应器(例如SBR和UASB等)中,2段反应的控制因素相互独立,具有独立调节和控制能力;将2个反应阶段分离,不仅可以优化富集AOB和AnAOB,而且PN段的前置可以消除一些有毒的有机污染物,从而避免对后续Anammox阶段的影响。但多级反应系统的建设投资成本更高,而且PN段形成的亚硝酸盐容易积累,其毒性对微生物的生命活动产生抑制作用,从而导致菌群失衡,影响系统运行^[77]。因此,2段式系统需匹配PN和Anammox这2个反应阶段的反应速率以减少亚硝酸盐积累,具体来说应严格控制亚硝酸盐浓度,使AOB以适当的速度生长。在实际运行中,防止亚硝酸盐积累的策略是优化运行方式以减少溶解氧供应,即减少运行时间、降低鼓风机频率,也可以通过间歇曝气进行控制,而这也使得系统设计更为复杂^[78]。

与传统脱氮技术相比,Anammox被认为是一种更高效、节能的废水处理技术。在节约硝化反应曝气能源(需氧量降低60%)的基础上,还具有无需外加碳源(有机碳需求量降低了100%)、运行成本低等优点^[79]。此外,AnAOB属自养型微生物,生长缓慢,可大大减少工艺的污泥产量(减少了90%)^[80]。尽管如此,厌氧氨氧化在污水处理厂的主流应用仍面临诸多挑战。例如,AnAOB的世代周期长(10~22 d)且对环境因素变化敏感(pH需控制在6.7~8.3,温度需控制在35~40℃等),复杂的进水环境存在大量抑制因子(如铵、亚硝酸盐、有机物、重金属等),导致该工艺启动时间长及运行效能低,限制了其在实际废水中的应用^[81]。如何强化相关功能微生物的生长繁殖、缩短工艺启动时间以及提升系统脱氮效能,仍是当前厌氧氨氧化技术研究的热点。

3.5 微生物电化学脱氮技术

典型的微生物电化学系统(MES)由阳极、阴极和外电路组成,系统中电活性微生物消耗底物并产生电子和质子,电子通过外部电路从阳极转移到阴极,然后与转移到阴极的质子共同参与阴极表面发

生的化学反应。MES 去除污水中氮的原理主要包括生物阳极氨氧化与生物阴极还原硝态氮。

生物阳极氨氧化指以氨为电子供体在微生物或活泼金属的作用下将自身氧化为 N_2 的过程。然而,氨能否在阳极被直接转化仍无定论,因为该过程的化学反应速率常数极低^[82]。除此之外,氨氮还可以在阳极通过厌氧氨氧化途径被直接转化为氮气,这是阳极氨氧化的主要途径^[83]。反硝化可以在 MES 的阴极室中进行,与传统反硝化不同,MES 中的反硝化由能直接从阴极接受电子的反硝化细菌进行。通过调节阴极室内溶解氧还可以实现硝化、异养反硝化、厌氧氨氧化以及异化硝酸盐还原为铵等途径^[84]。MES 的脱氮性能主要取决于微生物群落以及电极与微生物的转移效率。目前,可以通过修饰电极等方法提高电子转移效率进而提高脱氮性能^[85]。pH 和溶解氧等也会对微生物活性产生影响进而影响脱氮效率,MES 系统用于脱氮时 pH 控制在

碱性偏中性为宜。由于阳极可能会发生过酸或过碱现象,在系统中加入缓冲溶液或将阴阳极溶液循环是维持整个系统 pH 稳定的重要方式^[86]。

除了在单个电极室内脱氮,阳极室的氨还会在电场或者浓度梯度作用下迁移至阴极室,反应过程中阴极室内溶液 pH 的升高为氨的去除创造了良好的环境。在外加电压的条件下,系统产生的 H_2 也可以对产生的 NH_3 进行吹脱和回收。

MES 有效地将生物技术和电化学技术结合起来,具有高效、低耗和稳定的优势,在低碳污染治理领域的优势愈发凸显。MES 还可以将有机/无机废弃物中的化学能转化为电能,同步实现废物处理与能源回收,并且具有多途径除氮的优点。然而,由于电极材料以及膜材料带来的问题仍未被彻底解决(例如成本高和内阻大等),MES 目前仍处于实验室规模的运行,很少被应用于实际污水处理中。

新型脱氮技术与传统脱氮技术的比较见表 1。

表 1 新型脱氮技术与传统脱氮技术的比较

Table 1 Comparison of novel and conventional denitrification technologies

技术名称	传统硝化反硝化	短程硝化反硝化 ^[87]	同步硝化反硝化 ^[88]	厌氧氨氧化 ^[89]	微生物电化学系统脱氮 ^[84]
主要反应	$NH_4^++2O_2\longrightarrow NO_3^-+2H^++H_2O;$ $6NO_3^-+5CH_3OH+CO_2\longrightarrow 3N_2+6HCO_3^-+7H_2O$	$2NH_4^++3O_2\longrightarrow 2NO_2^-+4H^++2H_2O;$ $6NO_2^-+3CH_3OH+3CO_2\longrightarrow 3N_2+6HCO_3^-+3H_2O$	$NH_4^++2O_2\longrightarrow NO_3^-+2H^++H_2O;$ $6NO_3^-+5CH_3OH+CO_2\longrightarrow 3N_2+6HCO_3^-+7H_2O$	$NH_4^++1.14HCO_3^-+0.85O_2\longrightarrow 0.43NH_4^++0.57NO_2^-+1.14CO_2+1.71H_2O;$ $NH_4^++1.32NO_2^-+0.066HCO_3^-+0.13H^+\longrightarrow 1.02N_2+0.26NO_3^-+0.066CH_2O_{0.5}N_{0.15}+2.03H_2O$	阳极: $NH_4^++1.32NO_2^-+0.066HCO_3^-+0.13H^+\longrightarrow 1.02N_2+0.26NO_3^-+2.03H_2O+0.066CH_2O_{0.5}N_{0.15};$ $8NO_3^-+5CH_3COO^-\longrightarrow 4N_2+10CO_2+13OH^-+H_2O;$ 阴极: $NH_4^++2O_2\longrightarrow NO_3^-+2H^++H_2O;$ $C_6H_{12}O_6+3NO_3^-+6H^+\longrightarrow 6CO_2+3NH_4^++3H_2O$
运行条件	分段好氧+缺氧	好氧+缺氧	缺氧	缺氧	视污染物而定
电子供体	碳源	碳源	碳源	氨氮	氨氮/电极
碳源降低程度	—	降低 40%	降低 35%	降低 80%	不需额外添加
能耗降低程度	—	降低 40%	降低 30%	降低 60%	—
剩余污泥产量	高	降低 30%	降低 30%	降低 90%	—
主要参与微生物	AOB, NOB, 异养菌	AOB, 异养菌	AOB, NOB, 异养菌	厌氧氨氧化菌	电活性微生物, 厌氧氨氧化菌
缺点	碳源需求较高	工艺参数和环境条件影响要求高	工艺参数和环境条件影响要求高	微生物的生长环境要求较高	多为实验室规模, 电极和膜材料成本高

4 结语及展望

针对我国污水处理厂低碳源进水影响传统生物脱氮效率的问题,通过对传统生物脱氮工艺的原理和涉及的微生物进行深入研究和分析,笔者从 2 个方面对提高低碳污水脱氮效率的方法进行了讨论,

一是为传统生物脱氮工艺补充碳源,通过寻找新型碳源以及充分利用进水中的碳源,实现高效脱氮;二是应用新工艺,减少脱氮过程中需要的碳源。

尽管外部新型碳源的增加避免了传统外加碳源产生的问题,但是长期投加仍然会增加运行成本和管理难度。调整工艺运行涉及现有污水处理厂的改

造问题,建设成本增加。通过应用新技术从根本上降低工艺所需的碳源是实现高效脱氮、降低碳足迹的有效途径,但目前对脱氮新工艺的研究仍存在很多不足,从工艺到实际工程应用仍有很长的路要走。

污水处理厂内碳源的挖掘是碳中和背景下的最佳方法之一,内碳源的利用不仅能够提高脱氮效率,还可以降低污水处理厂的能耗及剩余污泥产量,CO₂排放也会有大幅的削减。污水处理厂应根据进水水质特征和现有处理设施,选择适宜的脱氮技术,耦合不同工艺实现优势互补。获得高效的脱氮微生物也是至关重要的,除了从原有污水中筛选,还可以通过合成生物技术对现有微生物进行基因改造。通过工程手段调控微生物群落结构和污染物浓度以更大程度地适应微生物生命活动也是提高低碳脱氮效果的途径之一。在工艺革新与应用中,实现资源回收与能量自给是污水处理厂发展的最终目标,以符合碳中和要求,污水处理厂要力争实现污水处理低碳、零碳甚至负碳运行。

参考文献

- [1] 戴晓虎,张辰,章林伟,等.碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J].给水排水,2021,57(3):1-5.
DAI Xiaohu, ZHANG Chen, ZHANG Linwei, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(3): 1-5.
- [2] VAN LOOSDRECHT M C M, BRDJANOVIC D. Anticipating the next century of wastewater treatment[J]. Science, 2014, 344(6191): 1452-1453.
- [3] NGUYEN H D, BABEL S. Insights on microbial fuel cells for sustainable biological nitrogen removal from wastewater: A review[J]. Environmental Research, 2022, 204: 112095.
- [4] MCCARTY P L. What is the best biological process for nitrogen removal: When and why?[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(7): 3835-3841.
- [5] CAO Shenbin, DU Rui, PENG Yongzhen, et al. Novel two stage partial denitrification (PD)-Anammox process for tertiary nitrogen removal from low carbon/nitrogen (C/N) municipal sewage[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 362: 107-115.
- [6] HU Haidong, SHI Yuanji, LIAO Kewei, et al. Effect of temperature on the characterization of soluble microbial products in activated sludge system with special emphasis on dissolved organic nitrogen[J]. Water Research, 2019, 162: 87-94.
- [7] THAKUR I S, MEDHI K. Nitrification and denitrification processes for mitigation of nitrous oxide from waste water treatment plants for biovalorization: Challenges and opportunities[J]. Bioresource Technology, 2019, 282: 502-513.
- [8] KUYPERS M M M, MARCHANT H K, KARTAL B. The microbial nitrogen-cycling network[J]. Nature Reviews Microbiology, 2018, 16(5): 263-276.
- [9] SATO Y, TANAKA E, HORI T, et al. Efficient conversion of organic nitrogenous wastewater to nitrate solution driven by comammox *Nitrospira*[J]. Water Research, 2021, 197: 117088.
- [10] 芮传芳. 脱氮微生物的筛选及其脱氮性能研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2011.
RUI Chuanfang. Screening of nitrogen removal microorganism and study of its characteristics[D]. Hefei: Anhui University, 2011.
- [11] MANU M K, LI Dongyi, LUO Liwen, et al. A review on nitrogen dynamics and mitigation strategies of food waste digestate composting[J]. Bioresource Technology, 2021, 334: 125032.
- [12] AHN Y H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(8): 1709-1721.
- [13] ROUT P R, SHAHID M K, DASH R R, et al. Nutrient removal from domestic wastewater: A comprehensive review on conventional and advanced technologies[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 296: 113246.
- [14] WANG Xiaohui, WEN Xianghua, CRIDDLE C, et al. Community analysis of ammonia-oxidizing bacteria in activated sludge of eight wastewater treatment systems[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(4): 627-634.
- [15] RAHIMI S, MODIN O, MIJAKOVIC I. Technologies for biological removal and recovery of nitrogen from wastewater[J]. Biotechnology Advances, 2020, 43: 107570.
- [16] SONG Tao, ZHANG Xiaolei, LI Ji, et al. A review of research progress of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification microorganisms (HNADMs)[J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149319.
- [17] OFFRE P, SPANG A, SCHLEPER C. Archaea in biogeochemical cycles[J]. Annual Review of Microbiology, 2013, 67: 437-457.
- [18] KÖNNEKE M, BERNHARD A E, DE LA TORRE J R, et al. Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon[J]. Nature, 2005, 437(7058): 543-546.
- [19] HALLAM S J, KONSTANTINIDIS K T, PUTNAM N, et al. Genomic analysis of the uncultivated marine crenarchaeote *Cenarchaeum symbiosum*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(48): 18296.
- [20] LIMPIYAKORN T, SONTIPHAND P, RONGSAYAMANONT C, et al. Abundance of amoA genes of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in activated sludge of full-scale wastewater treatment plants[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(4): 3694-3701.
- [21] ERGUDER T H, BOON N, WITTEBOLLE L, et al. Environmental factors shaping the ecological niches of ammonia-oxidizing archaea[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2009, 33(5): 855-869.
- [22] VERSTRAETE W, ALEXANDER M. Heterotrophic nitrification

- by *Arthrobacter* sp.[J]. Journal of Bacteriology, 1972, 110(3): 955-961.
- [23] 牛晓倩, 周胜虎, 邓禹. 脱氮微生物及脱氮工艺研究进展[J]. 生物工程学报, 2021, 37(10): 3505-3519.
- NIU Xiaoqian, ZHOU Shenghu, DENG Yu. Advances in denitrification microorganisms and processes[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(10): 3505-3519.
- [24] VAN RIJN J, TAL Y, SCHREIER H J. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications[J]. Aquacultural Engineering, 2006, 34(3): 364-376.
- [25] 肖晶晶, 郭萍, 霍炜洁, 等. 反硝化微生物在污水脱氮中的研究及应用进展[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(12): 97-102.
- XIAO Jingjing, GUO Ping, HUO Weijie, et al. Application of denitrifying microbes to wastewater denitrification[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(12): 97-102.
- [26] 车林, 金文标, 陈洪一, 等. 反硝化微生物菌剂提升 A²/O 工艺 TN 去除效果[J]. 化工学报, 2021, 72(S1): 467-474.
- CHE Lin, JIN Wenbiao, CHEN Hongyi, et al. Denitrifying microbial agents improving TN removal of A²/O process[J]. CIESC Journal, 2021, 72(S1): 467-474.
- [27] XI Haipeng, ZHOU Xiangtong, ARSLAN M, et al. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification process: Promising but a long way to go in the wastewater treatment[J]. Science of the Total Environment, 2022, 805: 150212.
- [28] ZHAO Bin, CHENG Dan yang, TAN Pan, et al. Characterization of an aerobic denitrifier *Pseudomonas stutzeri* strain XL-2 to achieve efficient nitrate removal[J]. Bioresource Technology, 2018, 250: 564-573.
- [29] SCHOLTEN E, LUKOW T, AULING G, et al. *Thauera mecherichensis* sp. nov., an aerobic denitrifier from a leachate treatment plant[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 1999, 49(3): 1045-1051.
- [30] 周石磊, 黄廷林, 白士远, 等. 贫营养好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 238-248.
- ZHOU Shilei, HUANG Tinglin, BAI Shiyuan, et al. Isolation, identification, and nitrogen removal characteristics of oligotrophic aerobic denitrifiers[J]. China Environmental Science, 2016, 36(1): 238-248.
- [31] MEDHI K, SINGHAL A, CHAUHAN D K, et al. Investigating the nitrification and denitrification kinetics under aerobic and anaerobic conditions by *Paracoccus denitrificans* ISTOD1 [J]. Biore-source Technology, 2017, 242: 334-343.
- [32] DALSGAARD T, DE ZWART J, ROBERTSON L A, et al. Nitrification, denitrification and growth in artificial *Thiosphaera pantotropha* biofilms as measured with a combined microsensor for oxygen and nitrous oxide[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1995, 17(2): 137-147.
- [33] HUANG H K, TSENG S K. Nitrate reduction by *Citrobacter diversus* under aerobic environment[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, 55(1): 90-94.
- [34] 丁钰, 张婷月, 黄民生, 等. 好氧反硝化菌及其在污水处理和环境修复中的研究进展[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2018(6): 1-11.
- DING Yu, ZHANG Tingyue, HUANG Minsheng, et al. Aerobic denitrifiers and the state of research in their use for sewage treatment and environmental remediation[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2018(6): 1-11.
- [35] DE VRIES S, SCHRÖDER I. Comparison between the nitric oxide reductase family and its aerobic relatives, the cytochrome oxidases[J]. Biochemical Society Transactions, 2002, 30(4): 662-667.
- [36] 朱家亮, 蔡美芳, 贾滨洋, 等. 基于污染物受纳量的城镇生活污水处理率指标研究[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 3130-3136.
- ZHU Jialiang, CAI Meifang, JIA Binyang, et al. Use the indicator of received pollutant to evaluate domestic sewage treatment status[J]. China Environmental Science, 2019, 39(7): 3130-3136.
- [37] 孟露, 王正平, 郑一江. 我国寒冷地区污水厂的污水处理现状及脱氮除磷技术探讨[J]. 当代化工研究, 2021(10): 119-120.
- MENG Lu, WANG Zhengping, ZHENG Yijiang. Present situation of sewage treatment and discussion on denitrification and phosphorus removal technology of sewage treatment plants in cold area of China[J]. Modern Chemical Research, 2021(10): 119-120.
- [38] 朱佳轩, 万雨轩, 王鑫. 不同碳源下硫还原地杆菌对反硝化过程的影响机制探讨[J]. 环境科学学报, 2019, 39(10): 3247-3255.
- ZHU Jiaxuan, WAN Yuxuan, WANG Xin. The influential mechanism of *Geobacter sulfurreducens* on anaerobic denitrification under different carbon sources[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(10): 3247-3255.
- [39] 郭泓利, 李鑫玮, 任钦毅, 等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 54(6): 12-15.
- GUO Hongli, LI Xinwei, REN Qinyi, et al. Analysis on characteristics of influent water quality of typical municipal sewage treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(6): 12-15.
- [40] GÓMEZ M A, GONZÁLEZ-LÓPEZ J, HONTORIA-GARCÍA E. Influence of carbon source on nitrate removal of contaminated groundwater in a denitrifying submerged filter[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 80(1/2/3): 69-80.
- [41] 李亚峰, 杨嗣靖, 于耀滢. 基于倒置 A²/O 工艺脱氮除磷存在问题的优化措施[J]. 工业水处理, 2019, 39(8): 15-18.
- LI Yafeng, YANG Sijing, YU Yaofu. Optimization measures for denitrification and phosphorus removal based on inverted A²/O process[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(8): 15-18.
- [42] 蒙小俊, 王秋利, 龚晓松. 城镇污水生物脱氮除磷工艺存在问题的调控措施[J]. 工业水处理, 2020, 40(8): 17-22.
- MENG Xiaojun, WANG Qiuli, GONG Xiaosong. Control measures for biological nitrogen and phosphorus removal processes of municipal wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(8): 17-22.
- [43] ZHANG Feifan, MA Chengjin, HUANG Xiangfeng, et al. Re-

- search progress in solid carbon source-based denitrification technologies for different target water bodies[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 782: 146669.
- [44] FAN Zhenxing, HU Jun, WANG Jianlong. Biological nitrate removal using wheat straw and PLA as substrate[J]. *Environmental Technology*, 2012, 33(21): 2369-2374.
- [45] LI Peng, ZUO Jiane, WANG Yajiao, et al. Tertiary nitrogen removal for municipal wastewater using a solid-phase denitrifying biofilter with polycaprolactone as the carbon source and filtration medium[J]. *Water Research*, 2016, 93: 74-83.
- [46] WANG Jianlong, CHU Libing. Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process[J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34(6): 1103-1112.
- [47] LOPARDO C R, URAKAWA H. Performance and microbial diversity of bioreactors using polycaprolactone and polyhydroxyalkanoate as carbon source and biofilm carrier in a closed recirculating aquaculture system[J]. *Aquaculture International*, 2019, 27(5): 1251-1268.
- [48] ZHANG Qian, JI Fangying, XU Xiaoyi. Effects of physicochemical properties of poly- ϵ -caprolactone on nitrate removal efficiency during solid-phase denitrification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 283: 604-613.
- [49] SHEN Zhiqiang, ZHOU Yuexi, HU Jun, et al. Denitrification performance and microbial diversity in a packed-bed bioreactor using biodegradable polymer as carbon source and biofilm support[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 250/251: 431-438.
- [50] CARREY R, RODRÍGUEZ-ESCALES P, SOLER A, et al. Tracing the role of endogenous carbon in denitrification using wine industry by-product as an external electron donor: Coupling isotopic tools with mathematical modeling[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 207: 105-115.
- [51] GAO Yongqing, PENG Yongzhen, ZHANG Jingyu, et al. Biological sludge reduction and enhanced nutrient removal in a pilot-scale system with 2-step sludge alkaline fermentation and A²O process[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(5): 4091-4097.
- [52] TANG Jialing, WANG X C, HU Yisong, et al. Nutrients removal performance and sludge properties using anaerobic fermentation slurry from food waste as an external carbon source for wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 271: 125-135.
- [53] 黄力彦, 王志宏, 陈大志, 等. 低碳源城市污水生物处理方法研究进展[J]. *工业用水与废水*, 2012, 43(3): 4-7.
- HUANG Liyan, WANG Zhihong, CHEN Dazhi, et al. Research progress of biological treatment of low carbon source municipal sewage[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2012, 43(3): 4-7.
- [54] 彭永臻, 马斌. 低 C/N 比条件下高效生物脱氮策略分析[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2): 225-230.
- PENG Yongzhen, MA Bin. Review of biological nitrogen removal enhancement technologies and processes under low C/N ratio[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 225-230.
- [55] RYU H D, KIM D, LIM H E, et al. Nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen wastewater in four-stage biological aerated filter system[J]. *Process Biochemistry*, 2008, 43(7): 729-735.
- [56] WANG Huacai, JIANG Cancan, WANG Xu, et al. Application of internal carbon source from sewage sludge: A vital measure to improve nitrogen removal efficiency of low C/N wastewater[J]. *Water*, 2021, 13(17): 2338.
- [57] MA Bin, PENG Yongzhen, WEI Yan, et al. Free nitrous acid pretreatment of wasted activated sludge to exploit internal carbon source for enhanced denitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179: 20-25.
- [58] LIU Shugen, WANG Qunchao, GUAN Qingqing, et al. Rapid release of internal carbon source from excess sludge with synergistic treatment via thermophilic microaerobic digestion and microcurrent[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 374: 637-647.
- [59] 司文曦, 李辰, 马庆. 污水处理厂强化生物脱氮措施探析[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(16): 21-25.
- SI Wenxi, LI Chen, MA Qing. Discussion and analysis of enhanced biological denitrification measures in wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(16): 21-25.
- [60] WANG Qilin, YE Liu, JIANG Guangming, et al. A free nitrous acid (FNA)-based technology for reducing sludge production[J]. *Water Research*, 2013, 47(11): 3663-3672.
- [61] LEMAIRE R, MARCELINO M, YUAN Zhiguo. Achieving the nitrite pathway using aeration phase length control and step-feed in an SBR removing nutrients from abattoir wastewater[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, 100(6): 1228-1236.
- [62] CHIU Y C, LEE Liling, CHANG Chengnan, et al. Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor[J]. *International Biodegradation & Biodegradation*, 2007, 59(1): 1-7.
- [63] BHATTACHARYA R, MAZUMDER D. Simultaneous nitrification and denitrification in moving bed bioreactor and other biological systems[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2021, 44(4): 635-652.
- [64] BONASSA G, BOLSAN A C, HOLLAS C E, et al. Organic carbon bioavailability: Is it a good driver to choose the best biological nitrogen removal process? [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 786: 147390.
- [65] SUN Shengpeng, NÀCHER C P I, MERKEY B, et al. Effective biological nitrogen removal treatment processes for domestic wastewaters with low C/N ratios: A review[J]. *Environmental Engineering Science*, 2010, 27(2): 111-126.
- [66] 蒙小俊, 郭楠楠. 低 C/N 比条件下生物脱氮工艺研究进展[J]. *安康学院学报*, 2020, 32(4): 109-115.
- MENG Xiaojun, GUO Nannan. On the progress of biological nitrogen removal process under low C/N ratio[J]. *Journal of Ankang University*, 2020, 32(4): 109-115.
- [67] XIANG Yu, SHAO Zhiyu, CHAI Hongxiang, et al. Functional microorganisms and enzymes related nitrogen cycle in the biofilm performing simultaneous nitrification and denitrification[J]. *Biore-*

- source Technology, 2020, 314: 123697.
- [68] MAI Wenning, CHEN Jiamin, LIU Hai, et al. Advances in studies on microbiota involved in nitrogen removal processes and their applications in wastewater treatment[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 746293.
- [69] DING Shuai, HE Jian, LUO Xingzhang, et al. Simultaneous nitrogen and carbon removal in a packed A/O reactor: Effect of C/N ratio on microbial community structure[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2020, 43(7): 1241-1252.
- [70] ALI M, OKABE S. Anammox-based technologies for nitrogen removal: Advances in process start-up and remaining issues[J]. Chemosphere, 2015, 141: 144-153.
- [71] STROUS M, PELLETIER E, MANGENOT S, et al. Deciphering the evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome[J]. Nature, 2006, 440(7085): 790-794.
- [72] PRADHAN N, THI S S, WUERTZ S. Inhibition factors and kinetic model for anaerobic ammonia oxidation in a granular sludge bioreactor with *Candidatus Brocadia* [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 389: 123618.
- [73] XU Xiaochen, QIU Linyuan, WANG Chao, et al. Achieving mainstream nitrogen and phosphorus removal through simultaneous partial nitrification, anammox, denitrification, and denitrifying phosphorus removal (SNADPR) process in a single-tank integrative reactor[J]. Bioresource Technology, 2019, 284: 80-89.
- [74] 赵杰俊, 刘祖文, 蔡晓媛, 等. 短程硝化-厌氧氨氧化工艺控制方法与机理分析[J]. 工业水处理, 2021, 41(10): 36-43.
ZHAO Jiejun, LIU Zuwen, CAI Xiaoyuan, et al. Control method and mechanism analysis of partial nitrification-anammox process[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(10): 36-43.
- [75] CHO S, KAMBEY C, NGUYEN V. Performance of anammox processes for wastewater treatment: A critical review on effects of operational conditions and environmental stresses[J]. Water, 2019, 12(1): 20.
- [76] JOSS A, SALZGEBER D, EUGSTER J, et al. Full-scale nitrogen removal from digester liquid with partial nitritation and anammox in one SBR[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(14): 5301-5306.
- [77] LILJA E E, JOHNSON D R. Metabolite toxicity determines the pace of molecular evolution within microbial populations[J]. BMC Evolutionary Biology, 2017, 17(1): 52.
- [78] MAO Nianjia, REN Hongqiang, GENG Jinju, et al. Engineering application of anaerobic ammonium oxidation process in wastewater treatment[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2017, 33(8): 153.
- [79] JETTEN M S M, WAGNER M, FUERST J, et al. Microbiology and application of the anaerobic ammonium oxidation ('anammox') process[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2001, 12(3): 283-288.
- [80] GU Jun, YANG Qin, LIU Yu. Mainstream anammox in a novel A-2B process for energy-efficient municipal wastewater treatment with minimized sludge production[J]. Water Research, 2018, 138: 1-6.
- [81] JIN Rencun, YANG Guangfeng, YU Jinjin, et al. The inhibition of the anammox process: A review[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 197: 67-79.
- [82] DESLOOVER J, WOLDEYOHANNIS A A, VERSTRAETE W, et al. Electrochemical resource recovery from digestate to prevent ammonia toxicity during anaerobic digestion[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(21): 12209-12216.
- [83] ZHAN Guoqiang, ZHANG Lixia, TAO Yong, et al. Anodic ammonia oxidation to nitrogen gas catalyzed by mixed biofilms in bio-electrochemical systems[J]. Electrochimica Acta, 2014, 135: 345-350.
- [84] 陈嘉瑾, 徐汉, 张志浩, 等. 生物电化学系统废水脱氮机理及影响研究进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(3): 23-32.
CHEN Jiajin, XU Han, ZHANG Zhihao, et al. Research progress on the mechanism and influence of nitrogen removal by bioelectrochemical systems in wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(3): 23-32.
- [85] YANG Qiuyu, ZHAO Nan, WANG Han, et al. Electrochemical and biochemical profiling of the enhanced hydrogenotrophic denitrification through cathode strengthening using bioelectrochemical system (BES)[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 381: 122686.
- [86] REN Yueping, LÜ Ying, WANG Yue, et al. Effect of heterotrophic anodic denitrification on anolyte pH control and bioelectricity generation enhancement of bufferless microbial fuel cells[J]. Chemosphere, 2020, 257: 127251.
- [87] 罗博, 黄安寿, 陈海龙. 短程硝化反硝化氨氮脱除技术研究进展[J]. 环境与发展, 2020, 32(1): 130-131.
LUO Bo, HUANG Anshou, CHEN Hailong. Research progress of short-range nitrification and denitrification ammonia nitrogen removal technology[J]. Environment and Development, 2020, 32(1): 130-131.
- [88] 贾艳萍, 贾心倩, 刘印, 等. 同步硝化反硝化脱氮机理及影响因素研究[J]. 东北电力大学学报, 2013, 33(4): 19-23.
JIA Yanping, JIA Xinqian, LIU Yin, et al. The study on nitrogen removal mechanism and affecting factors of simultaneous nitrification and denitrification[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2013, 33(4): 19-23.
- [89] 杜睿, 彭永臻. 城市污水生物脱氮技术变革: 厌氧氨氧化的研究与实践新进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51. DOI: 10.1360/SST-2020-0407.
DU Rui, PENG Yongzhen. Technical revolution of biological nitrogen removal from municipal wastewater: Recent advances in anammox research and application[J]. Scientia Sinica Technologica, 2021, 51. DOI: 10.1360/SST-2020-0407.

[作者简介] 李瑞祥(1999—), 在读硕士研究生。E-mail: RuixiangL1998@163.com。通讯作者: 李田, 博士, 助理研究员。E-mail: tianli1@nankai.edu.cn。

[收稿日期] 2022-03-16(修改稿)