

# 低碳源城市污水脱氮处理方法研究进展

张义悦<sup>1</sup>, 韦伟<sup>1, 2, 3</sup>, 朱曙光<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽省智慧城市工程技术研究中心, 安徽 合肥 230601; 3. 安徽省绿色建筑先进技术研究院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 当前城市污水厂普遍存在碳源不足情况, 对总氮处理效果造成不利因素, 影响了污水处理排放的稳定达标, 低碳源污水处理的新工艺成为研究热点。本文针对低碳源污水处理现状, 分析了低碳源污水处理的特点, 比较了外加碳源和改变工艺进水方式等低碳源污水处理方案特点, 总结分析了基于减少碳源消耗和提高脱氮效率的生物脱氮技术及脱氮新工艺的原理和特点, 并结合污水处理发展, 提出了对生物脱氮新工艺的展望。

**关键词:** 低碳源污水; 生物脱氮; 短程硝化反硝化; 同步硝化反硝化; 厌氧氨氧化工艺

中图分类号: R123.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2021)04-058-06

## Research Progress on Denitrification of Low Carbon Source Municipal Wastewater

ZHANG Yiyue<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1, 2, 3</sup>, ZHU Shuguang<sup>1, 2, 3</sup>

(1. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Engineering and Technology Research Center of Smart City, Hefei 230601, China; 3. Anhui Advanced Technology Research Institute of Green Building, Hefei 230601, China)

**Abstract:** At present, the lack of carbon source in municipal wastewater treatment plants is a disadvantage factor to the total nitrogen treatment effect, which affects the stable discharge standard of sewage treatment. The new technology adapting to low carbon source sewage treatment has become a research hotspot. According to the current situation of low carbon source wastewater treatment, this paper analyzes the characteristics of low carbon source sewage treatment, compares the characteristics of low carbon source sewage treatment schemes such as adding carbon source and changing process water inlet mode, summarizes and analyzes the principles and characteristics of biological nitrogen removal technology and new denitrification process based on reducing carbon source consumption and improving nitrogen removal efficiency, and puts forward new biological nitrogen removal technology combined with the development of sewage treatment. The prospect of technology.

**Keywords:** Low carbon source sewage; New process of biological nitrogen removal; Shortcut nitrification-denitrification; Simultaneous nitrification and denitrification; Anammox process

城市生活污水中含氮物质超标排放是导致河流、湖泊等水体富营养化和水环境恶化的重要原因之一。我国近 90% 的污水处理厂存在含氮污染物

去除效率不高的问题, 这意味着水厂尾水中 TN 浓度较高 (>15 mg/L)<sup>[1-2]</sup>。随着城市生活水平的不断提高, 常规城市生活污水中往往有机物浓度越

收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0408505); 安徽省重点研究与开发计划项目(201904a07020070); 安徽省重大科技专项(18030801106); 安徽建筑大学引进人才及博士启动基金项目(2018QD08); 安徽省高校省级自然科学基金项目(KJ2019A0756); 安徽省自然科学基金(1908085QE249)

作者简介: 张义悦(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水污染控制与资源化利用。

来越低、氨氮营养物越来越高,出现污水的 C/N 持续降低的现象,加大了污水处理难度。对于低碳氮比城市污水来说,传统污水脱氮工艺不能达到预期处理效果,通常需要消耗大量的氧气和能量等手段来提高处理效果。

低碳源污水的生物脱氮处理技术逐渐成为研究焦点和热点。目前,主流的生物脱氮新技术主要有短程硝化反硝化、同步硝化反硝化以及厌氧氨氧化等。本文对国内污水厂处理低碳源污水的问题进行总结,解析了各种低碳源污水生物脱氮技术的原理和特点,对未来的技术发展趋势进行了展望分析,以期为低碳源水体生物脱氮技术的成熟推广和应用提供参考建议。

## 1 低碳源污水处理现状及存在问题

### 1.1 低碳源污水特性及现状

我国各地区普遍存在原水碳源不足、碳氮比低的情况。如,常见的南方城市污水属于典型低碳源污水,有机物浓度低(COD < 200 mg/L)、碳氮比较低<sup>[3]</sup>。郭泓利<sup>[4]</sup>等对国内 127 座污水处理厂的进水水质进行分析,发现 80% 的污水处理厂 BOD<sub>5</sub>/TN 比值小于 3.6,只有 10% 的污水处理厂大于 4。住建部城镇污水处理系统的水质数据分析显示:我国 70% 左右的城镇污水处理厂进水 BOD<sub>5</sub>/TN 比值小于 4,其中北方城市污水厂进水 BOD<sub>5</sub>/TN 比值为 4,南方城市污水厂进水 BOD<sub>5</sub>/TN 比值为 3,碳源不足的情况在全国范围内均有存在<sup>[5]</sup>。

### 1.2 低碳源污水处理存在的问题

我国污水厂多采取的是传统生物/化学工艺处理低碳源污水,虽然可以满足城镇污水排放标准,但是污水厂运行成本较高,同时进水方式复杂、操控困难,也给污水厂处理低碳源污水增加了难度,主要存在以下几个问题:

#### (1) 污水厂的运行成本高

由于传统硝化反硝化工艺需要消耗大量有机物,为了满足反硝化,需要投加大量碳源,提高 C/N。污水厂通常选择乙酸、乙醇、葡萄糖等有机物作为外加碳源,其市场均价在 2 500 元以上<sup>[6]</sup>。近年来,以天然的固体有机物为主,无毒、价格低廉的外加碳源成为热点。裴廷权等<sup>[7]</sup>采用稻壳、玉米芯和陈米作为外加碳源,研究不同天然有机碳源对生物脱

氮的影响。张立秋等<sup>[8]</sup>采用玉米芯固体碳源生物反应器,研究 SND 工艺处理低碳氮比污水的脱氮效果。如果能减少氮的价态转换过程,就可以从理论上减少碳源的消耗,从而降低有机物的浪费<sup>[9]</sup>。

#### (2) 进水方式复杂

为了提高生物脱氮效率,大多数污水处理厂采用分段进水和周期性改变进水的方法。一方面改良分段进水拥有充分利用碳源、脱氮效率高、运行管理方便等优点<sup>[10]</sup>;另一方面也存在分段进水工艺操作复杂,运行调控困难的不足<sup>[11]</sup>。此外该工艺需要多个反应器串联运行,占地面积大,运行成本也相应增加。

## 2 低碳源污水生物脱氮技术

### 2.1 投加外部碳源

基于为细菌提供足够的电子供体需求,反硝化过程需要一定量的易降解有机物作为外加碳源<sup>[12]</sup>。外加碳源通常分为两类:一是有机物传统碳源,如甲醇、乙酸、乙醇等。李文龙<sup>[13]</sup>、马勇<sup>[14]</sup>等分别对乙酸钠、乙醇、葡萄糖、甲醇的外加碳源进行了不同工况的性能比较,具有较好实践意义;二是有机污水碳源,如垃圾渗滤液、工业废水等。李月寒等<sup>[15]</sup>利用剩余污泥与厨余垃圾发酵液产生的溶解性有机物作为外加碳源,并将该发酵液用于生活污水的生物脱氮处理,系统脱氮效果好。

外加碳源也可以分为液体碳源、固体碳源和气体碳源。常用的液体碳源包括甲醇、乙醇、乙酸钠等。固体碳源种类繁多,有天然纤维碳源、高分子合成碳源等。固体纤维碳源处理效果好、产量大、经济,但后期补加和替换困难。孙凤海等<sup>[16]</sup>开展了以玉米芯、大豆壳、稻秆作为外加固体碳源的研究。对于高分子合成碳源,由于其价格昂贵,在实际应用中很难大规模使用。有学者研究表明,甲烷气体可作为外加碳源<sup>[17]</sup>。M.Werner 等<sup>[18]</sup>进行了利用 60% 甲烷的沼气作为外加碳源处理低碳源污水的可行性研究。

由于外加碳源不仅增加污水厂运行费用,而且不易控制、运输困难,在实际运行中带来许多负面影响,所以优化投加方式、高效利用外加碳源已成为许多学者的研究重点。肖蕾等<sup>[19]</sup>提出单一物质外加碳源向混合外加碳源的构思,提高低碳源污水

生物脱氮效率;刘宇航等<sup>[20]</sup>则研究开发投加碳源在线监测与自动控制系统;吴光学等<sup>[21]</sup>研究了微生物种群结构、工艺类型、营养条件以及碳源投加模式对反硝化处理效果的影响。

## 2.2 优化进水方式

传统的进水方式中,大多数碳源在好氧段消耗,在缺氧反硝化阶段将无碳源可用。在合理利用碳源研究中,通过优化进水方式可以保证有机碳源应用于缺氧反硝化阶段,主要有两种优化方式:分段进水和周期性改变进水方式。

分段进水方式具有污泥浓度高、水力停留时间短、碳源利用率高等优点。近年来,分段进水多段 A/O 工艺是国外针对低碳源污水开发的新技术。何争光等考察了在碳氮比条件下采用分段进水 A/O 工艺处理高氨氮污水,通过曝气量控制获得较高的脱氮效能,平均去除率都达到了 90% 以上。

周期性改变进水方式可将两个相同的反应器串联,将其作为定期进水的的第一级反应器,改变每个反应器的周期性功能,以保证充分利用进水中有机碳源。孙展鹏等<sup>[22]</sup>研究了连续性进水与间歇进水两种进水方式对处理低碳源生活污水的影响,优化了系统微生物种群,提高了系统生物脱氮效率。

## 3 生物处理新技术

随着对生物脱氮机理的认识不断加深,众多学者也对污水生物处理新技术处理低碳源污水进行研究,重点聚焦以减少脱氮耗碳路径为主,缩短脱氮路径,以降低污水厂运行成本,达到水质排放标准。

### 3.1 短程硝化反硝化

1997年,Brouwer等开发了名为 SHARON (Single Reator for High Activity Ammonia Removal over Nitrite) 一种新型的脱氮工艺。其基本原理是周期同一个反应器内,先在有氧条件下利用氨氧化菌生成  $\text{NO}_2^-$ 。接着在缺氧条件下,以有机物为电子供体,将亚硝酸盐反硝化生成氮气。

对比传统生物脱氮理论与实际应用中,脱氮过程都遵循着由  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$  的全程硝化反硝化脱氮过程。而短程硝化反硝化 (Shortcut Nitrification-Denitrification) 则把硝化过程控制在亚硝酸盐阶段,阻止  $\text{NO}_2^-$  的进一步硝化,接着直接

进行反硝化过程。

在短程硝化反硝化工艺或 SHARON 工艺中,将氨氧化过程控制在亚硝化阶段是实现短程硝化反硝化的关键。短程硝化反硝化具有以下特点:一是反应控制在亚硝酸阶段,减少了约 25% 的需氧量,降低了能耗;二是亚硝化菌的污泥龄及世代周期相比于硝化菌更短,有效提高微生物生长速率;三是反硝化阶段减少 40% 左右碳源,更节省能源。

基于短程硝化反硝化处理低碳源污水存在明显的优势,在相关研究中,吴春雷等<sup>[23]</sup>针对低碳源城镇污水构建了 A<sup>2</sup>/O 中试装置,通过控制溶解氧、改变好氧/缺氧分区比例,实现中试装置的短程硝化反硝化。Fang W 等<sup>[24]</sup>以 UASB 与 MBR 组合为反应器,研究短程硝化反硝化工艺处理低碳源城镇污水效果,氨氮和总氮去除率分别达到 98%、60%,除工艺能耗低外,且具有沼气生物发电的潜力。Chun Di.Gao 等<sup>[25]</sup>通过一种新型常温下交替好氧-缺氧短程硝化反硝化操作模式,优化操作参数实现氨氮去除率接近 100%,总氮去除率接近 90%。

### 3.2 同步硝化反硝化

同步硝化反硝化 (Simultaneous Nitrification/Denitrification, SND) 工艺,即在溶解氧浓度较低条件下,同一个反应器中实现硝化与反硝化过程的工艺。同步硝化反硝化现象的发现突破了传统硝化反硝化必须按顺序发生的观点,具有缩短反应时间、减小反应器体积、减少有机碳源的消耗、简化生物脱氮工艺流程等优点<sup>[26]</sup>。

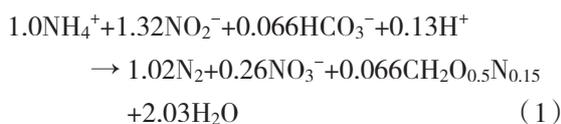
目前,由于同步硝化反硝化能有效减少碳源的消耗,所以该工艺被研究者大量应用于低碳源污水生物脱氮研究中。张燕伟等<sup>[27]</sup>应用 MABR 反应器探究其同步硝化反硝化的构建及其在不同碳氮比条件下的脱氮效率,证实其能更好地适应较低的碳氮比废水;Rodrigo F.Bueno 等<sup>[28]</sup>研究了连续流活性污泥工艺中同步硝化反硝化工艺对生物脱氮的影响,其脱氮效率均在 90% 以上。

与传统硝化反硝化相比,同步硝化反硝化之所以能运用于低碳源污水处理,是因为具有以下特点:一是可以省去传统好氧脱氮工艺的厌氧反应硝化池,缩短了反应时间并减小反应器体积,节省污水厂运行费用;二是与短程硝化反硝化类似,将反应过程控制在亚硝酸盐阶段,减少有机碳源的消

耗,可以有效降低能耗;三是硝化产生的氢离子可以与反硝化产生的氢氧根离子发生中和反应,平衡稳定反应液体的值,同时加快两种反应的正向进行速度,反应效率得到较大的提高。

### 3.3 厌氧氨氧化

厌氧氨氧化(Anaerobic Ammonium Oxidation, ANAMMOX)工艺是指在厌氧或缺氧条件下,以氨为电子供体,亚硝酸盐为电子受体,生成氮气的过程。该过程无需外加碳源,能耗降低 60%。厌氧氨氧化过程可由反应式(1)表示:



目前,全球已有 200 多座厌氧氨氧化工艺污水处理厂建成使用,厌氧氨氧化菌世代周期长、生长缓慢是反应器启动迟缓的主要原因,而且厌氧氨氧化菌对环境要求十分严格,阻碍厌氧氨氧化工艺应用推广<sup>[29]</sup>。

相对于传统硝化反硝化,厌氧氨氧化在低碳源污水处理方面具有较高的经济与技术可行性。杜兵等<sup>[30]</sup>在推流式反应器内驯化出具有厌氧氨氧化生物活性的红色颗粒,证实溶解氧与进水亚硝酸盐浓度对厌氧氨氧化反应具有可逆抑制。朱葛夫等<sup>[31]</sup>在 CSTR 反应器中成功启动厌氧氨氧化系统,研究表明,低浓度有机物可促进厌氧氨氧化活性。Wang.Zhong 等<sup>[32]</sup>提出一种在 SBR 反应器中结合部分反硝化和厌氧氨氧化(PD/A)提高富硝酸盐渗滤液脱氮效果的工艺,反应器运行稳定后测得总氮去除率为 84.4%,并且减少 40% 的有机碳源投加量,有效降低处理成本。Wang.Weiqi 等<sup>[33]</sup>在连续上升流反应器中成功地实现了固定化厌氧氨氧化与部分脱氮的耦合,在无外加碳源条件下  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率为 98.4%。

### 3.4 SHARON-ANAMMOX 联合工艺

SHARON 工艺在针对高浓度氨氮废水有着较好的处理效果,但由于在反硝化阶段需要消耗有机碳源,且出水浓度相对较高,所以目前较多低碳源污水处理工艺将 SHARON 工艺与 ANAMMOX 工艺进行组合研究,将 SHARON 工艺作为亚硝化反应器,ANAMMOX 工艺作为反硝化反应器。

SHARON-ANAMMOX 联合工艺是指含氨氮废水

在 SHARON 反应器中 50% 进水中的氨被氧化成亚硝酸盐,剩余的氨氮和生成亚硝酸盐的混合液在 ANAMMOX 反应器内反应生成氮气的过程。

SHARON-ANAMMOX 联合工艺对耗氧量大大下降(节省 50% 的供氧量),产酸量大大降低,节省了大量的中和试剂,同时还可以在不消耗有机碳源的情况下进行反硝化,完全避免了反硝化需要有机电子供体的问题。此外,SHARON-ANAMMOX 联合工艺与传统硝化反硝化工艺相比,由于不需要外加碳源,还可减少 88% 左右的  $\text{CO}_2$  排放量,不产生有害气体  $\text{N}_2\text{O}$ ,不产生剩余污泥,节省 50% 的占地面积,可以大大减少污水厂运行管理费用。迄今为止,SHARON-ANAMMOX 联合工艺还处于实验室阶段,应用于实际案例中还存在许多问题。在较高温度条件下,厌氧氨氧化反应较为活跃,厌氧氨氧化菌的富集、增殖困难,启动时间较传统反应器长。

在 SHARON-ANAMMOX 联合工艺研究中,李治阳等<sup>[34]</sup>研究了 MSBR 短程硝化反硝化和 UASB 厌氧氨氧化串联工艺处理低碳氮比养殖废水,证明了短程硝化反硝化与厌氧氨氧化联合工艺对有机物和氮有较好的处理效果。Yun Z 等<sup>[35]</sup>采用 SHARON 和厌氧氨氧化(ANAMMOX)联合工艺对猪场粪便进行资源回收和脱氮,联合反应器对氨氮的去除率在 80% 以上,脱氮率为 94.1%。Van Dongen U 等<sup>[36]</sup>采用短程硝化反硝化法(SHARON)与缺氧氨氧化法(ANAMMOX)相结合处理富氨进水进行了研究,反应器组合 SHARON-ANAMMOX 系统能够长时间稳定工作。Hwang In Su 等<sup>[37]</sup>应用 SHARON-UASB 组合工艺,研究联合工艺中污泥的颗粒化和厌氧氨氧化污泥的微生物造粒及其特性,获取较高比例的 Candidatus B 菌,对氮转化起着重要作用;ANAMMOX 细菌主要分布在靠近表面的内部,在底物利用和防止氧抑制方面具有优势。

## 4 总结与展望

### 4.1 总结

我国污水处理厂收水量不断增加,进水碳源不足情况普遍,增大了污水处理的难度。针对低碳源污水的处理,大多数污水厂选择外加碳源的方式

表 1 新型脱氮工艺与传统硝化反硝化工艺的比较

工艺系统	传统硝化反硝化工艺	短程硝化反硝化工艺	同步硝化反硝化工艺	厌氧氨氧化工艺
反应公式	$\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$ $\text{NO}_3^- + 5\text{H}^+ \rightarrow 1/2\text{N}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O} + \text{OH}^-$	$\text{NH}_4^+ + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$ $\text{NO}_2^- + \text{H}^+ \rightarrow 1/2\text{N}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$ $6\text{NO}_3^- + 5\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO}_2 \rightarrow 3\text{N}_2 \uparrow + 6\text{HCO}_3^- + 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{NH}_4^+ + 1.32\text{NO}_2^- + 0.066\text{HCO}_3^- + 0.13\text{H}^+ \rightarrow 1.02\text{N}_2 \uparrow + 0.26\text{NO}_3^- + 0.066\text{CH}_2\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.15} + 2.03\text{H}_2\text{O}$
反应条件	好氧、缺氧	好氧	好氧	缺氧
反应器	2	1	1	1
需氧量	高	低	低	不需
节省碳源	0%	40%	节省	100%
节省能耗	0%	25%	节省	60%
细菌	硝化菌 + 各种异养菌	好氧氨氧化菌	好氧反硝化菌 + 异养氧化菌	厌氧氨氧化菌

来满足排放标准要求,势必增加了污水厂运行处理费用。因此,生物脱氮新工艺的出现已成为必然趋势。

针对低碳源污水的新型生物脱氮工艺(包括短程硝化反硝化工艺、同步硝化反硝化工艺、厌氧氨氧化工艺以及 SHARON-ANAMMOX 联合工艺等)突破了传统理念,缩短了脱氮时间,降低了碳源的消耗,节省了运行成本,更符合可持续发展的理念,相关特点见表 1。

(1) 同步硝化反硝化的出现,突破了硝化、反硝化不能同时发生的传统观念,加快了反应进程,能维持系统中的 pH 平衡。

(2) 短程硝化反硝化工艺将反应维持在亚硝化阶段,阻止亚硝酸盐的进一步氧化,能够减少对碳源的需求,降低反应过程的能量消耗,缩小反应器的占地面积,可以最大程度地降低处理成本,具有一定的经济效益。

(3) 厌氧氨氧化工艺以氨为电子供体,亚硝酸盐为电子受体,生成氮气,处理效率极高,研究与应用发展前景广阔。

#### 4.2 研究展望

生物脱氮新工艺的出现,简化了工艺流程,缩短了反应时间,节省了运行成本,具有降低系统投资的潜力。但目前对于脱氮新工艺的研究尚处于起步阶段,其在工程上的实际应用还需进一步开发和探索,还存在许多问题值得思考。

(1) 大多数生物脱氮新工艺都需要花费较长的启动时间,如 ANAMMOX 工艺中,由于 AnAOB 生长缓慢,倍增时间长,实际工程中推广应用还有较长的路。新型生物脱氮应重点关注菌种的生物学及生理学特征,加强对菌种驯化、培育、保存的研究探索。

(2) 无论是短程硝化反硝化还是厌氧氨氧化工艺,将氨氮控制在亚硝酸盐阶段,阻止  $\text{NO}_2^-$  的进一步氧化是实现脱氮的关键因素。在稳态条件下,生物处理系统中一般不会产生  $\text{NO}_2^-$  的积累,因此优化设计温度、pH、溶解氧等环境因素对硝酸盐和亚硝酸盐的差异性,淘汰掉硝酸菌,是研究工作的重点方向。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Q H, Yang W N, Ngo H H, et al. Current status of urban wastewater treatment plants in China[J]. Environment International, 2016, 92/93: 11-22.
- [2] Yang Y Q, Zhan X, Wu S J, et al. Effect of hydraulic loading rate on pollutant removal efficiency in subsurface infiltration system under intermittent operation and micro-power aeration[J]. Bioresource Technology, 2016, 205: 174-182.
- [3] 付乐, 李树苑, 钱望新, 等. 低碳源城市污水的强化脱氮除磷工艺研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(1): 26-29.
- [4] 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.
- [5] 韦启信, 郑兴灿. 影响污水生物脱氮能力的关键水质参数及空间分布特征研究[J]. 给水排水, 2013, 49(9): 127-131.
- [6] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿, 等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 给水排水, 2010, 46(11): 125-128.
- [7] 邵留, 徐祖信, 尹海龙. 污染水体脱氮工艺中外加碳源的研究进展[J]. 工业水处理, 2007, 27(12): 10-14.
- [8] 裴廷权, 杨小毛, 刘欢, 等. 不同缓释碳源对低碳氮比污水反硝化的影响[J]. 工业水处理, 2013, 33(5): 40-43.
- [9] 张立秋, 王登敏, 李淑更, 等. 固体碳源生物膜 SND 处理实际低碳源城市污水[J]. 工业水处理, 2019, 39(8): 19-22, 106.
- [10] 边春捷. 污水处理中生物脱氮工艺的研究进展[J]. 资

- 源节约与环保,2016(4):48-49.
- [11] 侯子洸,周鑫,Koubode Rudy Alain Ronel,等.分段进水多级 A/O 工艺研究进展[J].工业水处理,2020,40(6):7-13.
- [12] 葛士建,彭永臻.连续流分段进水工艺生物脱氮除磷技术分析 & 优化控制[J].环境科学学报,2009,29(12):2465-2470.
- [13] 李文龙,杨碧印,陈益清,等.不同外加碳源反硝化滤池的深度脱氮特性研究[J].水处理技术,2015,41(11):82-85.
- [14] 马勇,彭永臻,王淑莹.不同外碳源对污泥反硝化特性的影响[J].北京工业大学学报,2009,35(6):820-824.
- [15] 李月寒,周丰,吕亮,等.剩余污泥和餐厨垃圾发酵液作为反硝化碳源可利用性研究[J].水处理技术,2016,42(11):29-33,38.
- [16] 孙凤海,刘昱迪,方远航,等.活性污泥作用下固体碳源释碳及脱氮性能比选[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(1):111-118.
- [17] 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):64-69.
- [18] Werner M, Kayser R. Denitrification with biogas as external carbon source[J]. Water Science and Technology, 1991, 23(4/5/6):701-708.
- [19] 肖蕾,贺锋,黄丹萍,等.人工湿地反硝化外加碳源研究进展[J].水生态学杂志,2012,33(1):139-143.
- [20] 刘宇航,司亚楠.生物脱氮外加碳源发展趋势研究[J].广东化工,2015,42(10):113-114.
- [21] 吴光学,时运红,魏楠,等.外加常规碳源污水反硝化脱氮研究进展[J].给水排水,2014,50(S1):168-172.
- [22] 孙鹏展,吴俊奇,康利民.进水方式及回流点位置对多段式生物接触氧化法脱氮除磷的影响[J].环境工程,2020,38(5):54-59,195.
- [23] 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,等.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[J].环境科学,2019,40(5):2310-2316.
- [24] Wong F S, Fang W, Moy Y P, et al. A combined UASB-MBR with shortcut nitrification-denitrification for energy reduction in wastewater reclamation[J]. Water Science and Technology, 2011, 63(9):1887-1893.
- [25] Gao C D, Fan S X, Jiao E L, et al. Operation and optimization of an alternating oxic-anoxic shortcut nitrification-denitrification system[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1030/1031/1032:387-390.
- [26] 郝华来.同时硝化反硝化污水处理系统[J].微量元素与健康研究,2010,27(5):58-59.
- [27] 张燕伟,程方,李奕辉,等.低碳氮比下 MABR 同步硝化反硝化过程的构建[J].工业水处理,2020,40(5):70-76.
- [28] Bueno R F, Piveli R P, Campos F, et al. Simultaneous nitrification and denitrification in the activated sludge systems of continuous flow[J]. Environmental Technology, 2018, 39(20):2641-2652.
- [29] Wang X X, Wang S Y, Xue T L, et al. Treating low carbon/nitrogen (C/N) wastewater in simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorous removal (SNDPR) systems by strengthening anaerobic intracellular carbon storage[J]. Water Research, 2015, 77:191-200.
- [30] 杜兵,司亚安,孙艳玲,等.推流固定化生物反应器培养 ANAMMOX 菌[J].中国给水排水,2003,19(7):62-65.
- [31] 朱葛夫,张净瑞,刘超翔,等.厌氧氨氧化工艺的启动及有机物浓度对其影响研究[J].环境工程,2016,34(2):27-32.
- [32] Wang Z, Zhang L, Zhang F Z, et al. Enhanced nitrogen removal from nitrate-rich mature leachate via partial denitrification (PD)-anammox under real-time control[J]. Bioresource Technology, 2019, 289:121615.
- [33] Wang W Q, Wang X J, Wang S Y, et al. Partial denitrification coupled with immobilization of anammox in a continuous upflow reactor[J]. RSC Advances, 2018, 8(56):32016-32021.
- [34] 李治阳,华佳. MSBR-UASB 组合工艺处理低 C/N 比养殖废水[J].工业安全与环保,2020,46(6):85-88,96.
- [35] Hwang I S, Min K S, Choi E, et al. Nitrogen removal from piggery waste using the combined SHARON and ANAMMOX process[J]. Water Science and Technology, 2005, 52(10/11):487-494.
- [36] van Dongen U, Jetten M S M, van Loosdrecht M C M. The SHARON®-Anammox® process for treatment of ammonium rich wastewater[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(1):153-160.
- [37] Hwang In Su, Min Kyung Sok. Granulation and Characteristics of Sludges in the Combined SHARON/ANAMMOX Processes. 2006, 22(2):300-307.