

# 硫自养反硝化工艺在水处理中的应用及展望

李晓锋

临汾市生态环境局环境监控中心, 山西 临汾 041000

DOI: 10.61369/EAE.2025010004

**摘要：** 硫自养反硝化是一种环境友好的水处理技术，因其无需外加碳源、低污泥产量和减少温室气体排放等优势备受关注。本文综述了该技术的原理、优势及其在城市污水、工业废水和农业面源污染治理中的应用现状与优缺点，分析了其在不同场景的适用性与效果，并展望了未来发展方向。总体而言，硫自养反硝化技术在提升水质处理效率、降低能耗和化学药剂使用方面潜力巨大，对解决水资源管理和环境保护挑战具有重要意义。

**关键词：** 硫自养反硝化；水处理技术；节能减碳；反硝化脱硫细菌；极限脱氮

## Application and Prospects of Sulfur-Based Autotrophic Denitrification in Water Treatment

Li Xiaofeng

Linfen City Ecological environment Bureau environmental monitoring Center, Linfen, Shanxi 041000

**Abstract：** Sulfur autotrophic denitrification is an environmentally friendly water treatment technology, which has attracted much attention because of its advantages such as requiring no additional carbon source, low sludge production and reducing greenhouse gas emissions. This paper summarizes the principle and advantages of the technology and its application status and disadvantages in the treatment of urban sewage, industrial wastewater and agricultural non-point source pollution, analyzes its applicability and effect in different scenarios, and prospects the future development direction. In general, sulfur autotrophic denitrification technology has great potential in improving water quality treatment efficiency, reducing energy consumption and chemical chemicals, and is of great significance to solve the challenges of water resources management and environmental protection.

**Keywords：** sulfur-based autotrophic denitrification; water treatment technology; energy saving and carbon reduction; denitrifying sulfur bacteria; extreme nitrogen removal

近年来，全国水质显著改善，但华北地区仍面临水资源短缺问题。随着水生态保护标准提高，污水处理厂升级改造成为趋势，北京、上海等地推出更严格的地方标准。2025年，国家发改委和住建部发布首批45个污水处理绿色低碳标杆厂名单。硫自养反硝化技术因无需外加碳源、节能减碳，成为处理低C/N比污水的最佳选择之一，符合国家节能减排方向。

### 一、硫自养反硝化作用机理及研究现状

#### （一）硫自养反硝化作用机理

生物反硝化技术分为自养和异养两类。硫自养反硝化以还原态硫为电子供体，污泥产率低，运行成本低，环保且经济，优于依赖外加碳源的异养反硝化<sup>[1]</sup>。

#### （二）硫自养反硝化技术的研究现状

##### （1）微生物反硝化机理

硫自养反硝化利用硫源为电子供体，微生物通过氧化还原反应脱氮。提高效率需研究硫氧化反硝化菌机理及硫元素迁移

过程。

硫自养反硝化通过功能菌群（NR-SOB）同步脱氮脱硫，核心菌包括脱氮硫杆菌、脱氮硫单胞菌和泛养硫球菌。假单胞菌、苍白杆菌等也具脱硫脱氮能力。Thiobacillus denitrificans为典型自养硫氧化反硝化菌，Azoarcus和Pseudomonas为异养型。硫还原转化由多种酶（如醌氧化还原酶、亚硫酸盐还原酶等）催化，生物强化可提高菌群效率，推动工艺发展。

##### （2）生物载体材料及填料

生物膜法是污水处理的关键方法，生物载体材料为其核心。载体为生物膜提供附着位点，具有比表面积大、抗冲击负荷强等

作者简介：李晓锋（1972—），男，硕士研究生，工程师，研究方向：水污染控制和微生物技术及环境管理与监测，主要包括污水生物处理理论、技术及工艺优化控制，尤其是污水微生物脱氮除磷新技术。

优势。未来研究应聚焦开发低成本、高稳定性、高强度、低传质阻力的载体材料，并负载足够硫源，以提升硫自养反硝化技术的效率和应用价值<sup>[2]</sup>。

单质硫填料因成本低、毒性小、易操作，广泛应用于硫自养反硝化技术。小粒径填料比表面积大，可提高反硝化效率。但该工艺消耗碱度，降低 pH，可能导致污泥酸化。因此，需使用石灰石、牡蛎壳等碱度调节材料制成复合填料，提升效率。

### （3）协同反硝化

协同反硝化结合自养与异养工艺，更适合处理生活污水和尾水。研究重点包括有机碳源与无机硫源的协同效果，以及两类反硝化菌的耦合机制。

## 二、硫自养反硝化技术应用

### （一）污水处理厂改造

水体富营养化是全球性环境问题，控制氮、磷输入是关键。尽管国内污水处理厂一级 A 标准规定总氮 $\leq 15$  mg/L，但为减少尾水氮含量，仍需深度脱氮处理<sup>[3]</sup>。

以下是一些污水处理厂改造的典型案列：

#### （1）宁晋污水处理厂

宁晋污水处理厂提标改造项目是全球首座大规模非碳源依赖深度脱氮技术示范项目。该项目的项目规模为 40000 t/d，其中 93% 为工业源水，将原有工艺“多级 AO+二沉池+深床滤池+高效沉淀池”中的深床滤池改造为硫自养反硝化滤池，达到 COD/TN 约 2~3 的脱氮效果，最终使污水达到准 IV 类（TN $<15$  mg/L）排放标准<sup>[4]</sup>。通过采用硫自养反硝化滤池集成工艺，年综合运行费减少 145 万元，年减少碳源 1073 t，年节约能源 11.7 万 kW·h，年减少污泥 734 t。

#### （2）宜兴城市污水资源概念厂

宜兴城市污水资源概念厂从 2021 年 9 月起实施，项目规模为 20000 t/d，实行执行标准为太湖流域一、二级保护区限值 / 概念厂内控标准，通过应用“多模式生化处理+硫自养反硝化滤池+高级氧化单元”，最终达到 TN 的出水指标不超过 3 mg/L 的效果<sup>[5]</sup>。同时，年综合运行费减少 186 万元，年减少碳源 840 t，年节约能源 11.6 万 kW·h，年减少污泥 730t。

### （二）人工湿地

#### （1）北大沙河人工湿地项目<sup>[6]</sup>

#### （2）硫自养反硝化强化人工湿地深度处理冷轧废水

### （三）地下水修复

硝酸盐是地表水和地下水中常见的氮污染物，随着经济发展和城市化进程加快，污染程度加剧。硫自养反硝化技术在地下水修复研究中广泛开展，但多限于小试阶段，缺乏中试及实际原位修复应用研究<sup>[7]</sup>。

### （四）高盐废水处理

硫自养反硝化技术不仅适用于低浓度硝酸盐废水，还在高盐废水（如海水和工业废水）处理中展现了潜力。香港科技大学陈光浩课题组研发了硫酸盐还原、自养反硝化和硝化一体化

（SANI）工艺。该工艺利用硫酸盐还原菌在厌氧条件下将硫酸盐还原为硫化物，作为电子供体进行硫自养反硝化，实现污水脱氮。该工艺充分利用进水硫酸盐资源，通过硫自养反硝化减少污泥产量，显著降低污水处理运行成本和占地面积。

## 三、硫自养反硝化技术工艺

### （一）珊氮

“珊氮”技术基于王爱杰研究员提出的硫-铁协同驱动反硝化增效原理，由他与中持股份合作开发，具有工程化意义<sup>[8]</sup>。其核心创新在于 ThiocreF® 复合活性生物载体，可替代有机碳源，兼具微生物承载和高负荷脱氮功能，解决了单质硫工艺稳定性差、微生物易失活、脱氮效率低等规模化应用瓶颈。

### （二）杀泥 SANI

杀泥技术由两个反应器组成：

异养硫还原反应器

移动床生物膜反应器

该技术同步去除有机物和氮磷，运行高效。

### （三）氮曲

“氮曲·0 碳源硫自养滤池”是沃尔德斯推出的创新型深度脱氮技术，无需外加碳源即可高效去除硝态氮。该技术解决了异养反硝化药剂成本高、污泥量大、运维复杂等问题，为污水深度脱氮提供了经济高效的解决方案<sup>[9]</sup>。

### （四）涑澈® 自养 / 异养协同脱氮（NSAD）

涑澈 NSAD 工艺采用自主研发的自养与异养协同脱氮技术，为高度集成的独立脱氮单元，可在少加或零碳源条件下处理高浓度氮污染废水<sup>[10]</sup>。其第 5 代脱氮材料具备多孔、缓释、强微生物负载能力，通过主材与活性催化辅材协同作用，构建稳定、高效、经济的绿色脱氮体系，大幅降低脱氮成本，实现污泥减量，并减少 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 等温室气体排放，降低环境负面影响。

### （五）潮小灰 CBD-TN<sub>go</sub> 硫自养反硝化生物脱氮系统

CBD-TN<sub>go</sub> 硫自养反硝化生物脱氮系统采用硫自养反硝化技术，无需外加碳源，减少 CO<sub>2</sub> 排放，降低运行成本 40%~60%，污泥产量减少 80%~90%，建设费用低，出水稳定达标。

### （六）硫自养 2.0 工艺

清控环保从硫自养 1.0 工艺升级至 2.0 版本，解决了填充床投资高、硫颗粒反应面积小、易堵塞等问题。在工业污水处理中效果显著：

制网厂案例（80 t/d）：进水总氮 30~50 mg/L，出水稳定在 2~4 mg/L；

电子厂案例（150 t/d）：进水总氮 60~70 mg/L，出水稳定在 4~5 mg/L。

## 四、硫自养反硝化技术的未来展望

在“双碳”政策背景下，硫自养反硝化工艺因无需外加碳源、减少温室气体排放及低污泥产量等优势受到广泛关注。文章

总结了技术应用,探讨了电子供体选择及影响因素。实际应用中,电子供体选择需结合原水 C/N/S 比、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度等因素,并考虑出水是否造成二次污染。目前,该工艺已取得进展,未来研究

可能聚焦于:反应速率与机理差异,现有研究对不同基质的硫自养反硝化反应速率和机理结论不一致,可能与原水性质、反应器类型及微生物菌属差异有关。

---

#### 参考文献

- [1] 李明礼,高彦宁,黄丹,等.强化型硫铁矿“自养反硝化”工艺深度处理城市二沉尾水研究[J].大连理工大学学报,2023,63(5):454-462.
- [2] 李政辉,刘宝河,余浩然,等.硫源对反硝化脱氮性能及微生物群落结构的影响[J].环境科学与技术,2023,46(9):1-10.
- [3] 【关于印发污水处理绿色低碳标杆厂名单并开展对标新(改)建的通知(发改办环资〔2024〕1078号)】-国家发展和改革委员会 [EB/OL].
- [4] 路青,刘宏雁,郑博英,等.硫自养反硝化的污水脱氮技术研究[J].环境工程,2023,41(S2):60-61+64.
- [5] 张晓明,张韦,梁静.硫自养反硝化技术对城市污水处理厂总氮深度处理效率的影响研究[J].中国资源综合利用,2023,41(07):199-201.
- [6] 李文泉,南贵珍,商静静.污水处理厂尾水硫自养反硝化人工湿地脱氮效果[J].净水技术,2023,42(08):94-100.
- [7] 郝晓地,魏洪禹,于文波,等.硫自养反硝化技术优劣辨析[J].环境科学学报,2024,44(4):1-10.
- [8] 刘柏利,胡广志,李再兴,等.无机硫自养反硝化处理污水工程应用进展[J/OL].应用化工,2024[2024-04-30].
- [9] 高舒嘉,邵军荣,成宇,等.污水硫自养反硝化技术研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(2):227-235.
- [10] 杨洁,方芳,陈玲珑,等.硫自养-异养协同反硝化技术的研究进展[J/OL].应用化工,2024[2024-04-30].