

低温条件下耐冷脱氮功能菌群的研究进展与应用

刘云琦¹ 罗晓² 林冬庆¹ 李小曼¹ 吕鹏翼²

1 河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄, 050018;

2 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北石家庄, 050018;

摘要: 低温条件下, 我国北方地区污水处理面临着重大技术挑战。本文综述了耐冷脱氮功能菌群的研究现状、在低温污水处理中的应用及其面临的挑战。通过分析现有研究成果, 揭示了耐冷脱氮菌群在低温条件下的生理适应机制、脱氮性能及其在污水处理中的应用潜力。同时, 提出了未来研究方向, 包括生理适应机制与分子调控、高效菌群筛选与驯化、菌群-环境互作及工艺优化、工程化应用与长期运行稳定性, 以及气候变化背景下的适应性研究。

关键词: 低温污水处理; 耐冷脱氮功能菌群; 生理适应机制; 菌群筛选与驯化; 工艺优化

DOI: 10.69979/3060-8767.25.04.039

引言

低温始终是我国北方地区冬季污水处理的重大技术瓶颈。数据表明, 东北地区年冰冻期长达5-6个月, 华北地区约为3-4个月, 暴露式生物处理单元(如氧化沟、CASS工艺)冬季水温普遍低于10℃。低温丝状菌膨胀或者低温会影响有机物的利用使多糖物质累积导致污泥膨胀。这导致寒冷情况下污水处理中极易爆发污泥膨胀。且低温状态下, 污水处理系统中微生物的活性受到抑制, 引起微生物数量下降, 尤其是关键功能菌如硝化菌和反硝化菌等的丰度会显著下降^[3], 影响污染物的去除。在污水处理系统内, 微生物的代谢活性遭受抑制, 其影响体现在多个方面: 细菌酶的活性受到阻碍, 群落结构发生显著变化, 生物膜出现退化现象。这导致系统的脱氮性能急剧下降, 甚至完全停滞, 致使污水处理厂排放的氮素指标无法达到既定标准, 进而加剧了受纳水体的污染风险^[4]。耐冷微生物是一类能够耐受较低温度, 在寒冷环境下可以长期生存并进行正常代谢的微生物, 该类微生物的发现为提高污水处理厂冬季生物脱氮效率提供了可能。

1 耐冷脱氮功能菌群的研究现状

耐冷微生物的发现可以追溯到1887年, Foster首次在冷冻保存的鱼中发现了耐冷微生物。根据这些微生物的生长特性, Morita将其分为嗜冷菌(Psychrophiles)和耐冷菌(Psychrotolerant)两类。嗜冷菌是一类在极低温度下生长最为旺盛的微生物, 它们的最适生长温度通常低于15℃, 甚至在0℃或更低的温度下也能生

长。然而, 当温度超过20℃时, 它们的生长速度会显著减慢或完全停止。相比之下, 耐冷菌也是一种在低温环境中能够顽强存活的微生物, 其最适生长温度通常处于20℃至30℃之间。尽管它们在接近冰点的严寒中仍能维持生命机能, 但当环境变得相对温暖时, 它们的生长状况会更为优异, 展现出惊人的适应能力。耐冷菌在自然界中的分布极为广泛, 不仅在寒冷地区可以观察到它们的身影, 在温带甚至热带地区也能发现它们的踪迹, 这进一步证明了它们强大的环境适应能力。目前, 研究人员已经在低温环境(5.0-15.0℃)中筛选出了多种耐低温微生物, 并利用它们来增强生物处理过程。报道中涉及的菌种包括Photobacterium、Acinetobacter、Flavobacterium和Yersinia enterocolitica等。这些微生物在低温条件下的优异表现, 为低温污水处理提供了新的可能性。

在污水处理领域中, 尤其是在低温环境下, 耐冷脱氮微生物发挥着不可替代的关键作用。不过, 在污水处理厂日常运营过程中, 直接添加单一菌种常常会遭遇诸多挑战, 如菌种容易流失、可能发生演替现象, 以及菌株生存能力较弱等问题。值得庆幸的是, 功能菌群的出现有效弥补了这些不足。功能菌群是指在特定环境条件下, 由两种或多种微生物共同形成的共培养系统。相较于单一菌株, 功能菌群对环境有着更为卓越的适应性。从微生物生态学的角度来看, 功能菌群中的微生物通过相互交流和密切协作, 催生了诸如“互利共生”和“群体感应”等重要的生物学功能。因此, 当功能菌群被应用于实际水处理过程中时, 能够更加有效地抵御外部环

境的变化,降低被优势菌种取代的风险,从而确保系统的稳定性与高效性得以长期维持。

菌群群落机能的提升可通过两种宏观策略实现,分别是“自下而上”以及“自上而下”两种策略。在“自下而上”的策略中,微生物群落可借助一组工程物种构建,其中每个物种均经过优化以执行特定活动,从而促进群落整体功能的发挥。这种策略的核心思想是通过对单个微生物物种进行精准的基因编辑或优化,使其能够高效地完成特定任务,例如分解复杂有机物、合成关键化学物质等。然而,此策略的实施依赖于对微生物间相互作用及其对群落功能贡献机制的深入理解。微生物在自然环境中的相互作用极其复杂,包括共生、竞争、捕食等多种关系,这些关系对群落功能的实现至关重要。因此,要成功地应用“自下而上”的策略,需要深入探讨这些相互作用机制,以及每个微生物物种在群落中的具体角色和贡献。然而,目前我们对这些机制的理解尚不完全,这使得该策略在实际应用中面临一定的挑战。相对地,在“自上而下”的策略中,通过人工选择和定向进化,可以改善群落功能。这种策略不依赖于对单个微生物物种的详细了解,而是将整个微生物群落作为一个整体来进行优化。通过设定特定的选择条件,例如改变环境条件或提供特定的营养物质,科学家们可以促使微生物群落朝着更高效的功能方向发展。在这一过程中,适应能力强的微生物物种会逐渐占据优势,而不适应的物种则会被淘汰。经过多轮的筛选和进化,最终可以得到一个功能更为优越的微生物群落。值得注意的是,该方法无需对群落功能产生的机制有深刻理解,但通过比较进化的群落与原始群落,可以揭示群落功能的进化机制。这种方法为研究微生物群落的复杂性和功能性提供了新的视角。总的来说,这两种策略各有优劣。“自下而上”的策略更注重对微生物个体的精确控制,但需要深入理解微生物间的相互作用;“自上而下”的策略则更注重群落整体的优化,但无法提供对单个物种功能的详细解释。在实际应用中,可以根据具体的研究目标和条件选择适合的策略,或者将两者结合起来,以实现更全面和深入的菌群群落机能提升。

2 耐冷脱氮功能菌群在低温污水处理中的应用

近年来,越来越多具有耐低温胁迫的HNAD微生物陆续被发现,张婷等在内蒙古某化工厂的活性污泥中成功筛选分离出一株耐低温脱氮菌株,命名为Enterobac

ter cloacae N2,该菌株在8℃的低温条件下展现出卓越的脱氮性能,对浓度为304 mg/L的 NH_4^+-N 、37 mg/L的 NO_3--N 和30 mg/L的 NO_2--N 的去除率均达到了100%,在以蔗糖为碳源、C/N为8.97、pH值为6.62、转速在150-180 r/min的优化条件下,菌株N2对TN的去除率最高可达83.2%,8℃的低温环境下,菌株N2对化工厂污水和焦化厂污水中 NH_4^+-N 去除率分别高达100%和91%,同时TN的去除率分别达到了99%和80%,显示出该菌株在实际工业污水处理中具有广泛的应用潜力和显著的脱氮效果。杨露等研究人员在中国西部富含腐殖质的土壤中成功分离筛选出一株耐冷且高效脱氮的菌株,命名为Pseudomonas sp. NY1,在以丁二酸钠作为碳源、C/N为15、转速150 r/min、温度为15℃以及pH值在7.0-8.0之间的优化培养条件下,菌株NY1展现出了卓越的脱氮性能,菌株NY1能够在15 h内完全去除 NO_2--N ,并在相同时间内去除98.07%的 NO_3--N ,同时,在6 h内对 NH_4^+-N 的去除率达到了85.58%,结果表明,菌株NY1在低温条件下对氮素污染物的去除具有高效性,具有在低温环境下的污水处理应用潜力。Huo等新分离的Comamonas testosteron HR5在低温和高碱性条件下展现出高效的氮去除能力,在C/N为12-15、pH为6-11、温度为5-25℃的条件下,HR5的 NO_3--N 去除率达到95%。此外,在以 NH_4^+-N 、 NO_3--N 和 NO_2--N 作为唯一单元的系统,中,TN的去除率分别达到97.9%、95.16%和99.95%,在5℃、pH为10的混合氮系统中TN去除率达到91%。这一结果证实了菌株HR5在氮素污染治理方面的潜力和应用价值。Wu发现,假单胞菌属的Pseudomonas fragi EH-H1菌株在15℃、pH值为6.2的条件下能够高效地进行HNAD过程,在20-30 h内,该菌株对 NH_4^+-N 的去除率达到了100%,对 NO_3--N 的去除率达到了99.02%,相应的TN去除率为97.74%。数据表明,EH-H1菌株在低温条件下对氮素具有显著的去氮能力,为低温环境下的污水处理提供了一种有效的微生物解决方案,该类微生物在低温条件下表现出了优异的脱氮效能,为低温污水处理提供了新的可能性。

雍佳君等从蠡河底泥富集出的好氧反硝化复合菌群,在9 h内对TN和 NO_3--N 的去除率分别为91%和100%;康鹏亮等从公园沉积物和水库中筛选出了3组好氧反硝化功能菌群,培养24 h后,3组菌群对TN的去除率分别达到83.04%,83.40%和82.68%;蒋云霞等从李家河水库沉积物中富集驯化出了具有高效脱氮特性的

功能菌群 A1, 该菌群在培养 15 h 后对 NO₃-N 的去除率达到 93.39%。

3 耐冷脱氮功能菌群面临的挑战

当前, 从污水处理系统中分离出来的土著耐冷好氧反硝化和异养硝化-好氧反硝化功能微生物相对较少。这些微生物在低温环境下的脱氮特性以及它们如何在这一过程中发挥作用的具体机制, 目前科学界尚不明确, 这无疑阻碍了它们在低温污水处理中的广泛应用。

低温条件下, 微生物的活性普遍降低, 这对污水处理的效率是一个巨大的挑战。由于对这些微生物的研究不够深入, 我们无法充分利用它们在污水处理中的潜在优势。因此, 富集驯化和分离这些耐冷脱氮功能菌群和功能菌株显得尤为重要。通过实验室的富集培养和基因分析, 我们可以深入了解这些微生物的生长条件和代谢途径, 进而优化污水处理工艺, 提高生物脱氮效率。这不仅有助于改善污水处理厂的运行效果, 还能够一定程度上降低能源消耗, 减少碳排放, 对于环境保护具有重要意义。

4 未来研究方向

耐冷脱氮功能菌群在低温污水处理领域展现出显著的应用潜力, 但仍存在诸多科学问题和技术瓶颈亟待解决。未来的研究应着重从以下几个方面深入探索:

耐冷脱氮菌群的生理适应机制与分子调控: 目前对耐冷脱氮菌群在低温条件下的生理适应机制仍缺乏系统性研究。未来可结合基因组学、转录组学和蛋白质组学技术, 深入解析其低温胁迫下的关键代谢通路(如冷休克蛋白、膜脂修饰、酶活性调控等), 并挖掘潜在的耐冷功能基因(如 *cspA*、*desK* 等)。此外, 需进一步研究菌群间的群体感应(Quorum Sensing, QS)和信号分子交换机制, 以阐明其在低温脱氮过程中的协同作用。

高效耐冷脱氮菌群的筛选与驯化: 现有研究多集中于实验室条件下的单一菌株分离, 而实际污水处理系统中的菌群组成更为复杂。未来应加强宏基因组学(Metagenomics)和高通量筛选技术的应用, 从低温自然环境中挖掘新型高效耐冷脱氮菌株(如 *Pseudomonas*、*Acinetobacter*、*Anammox* 菌等)。同时, 需优化低温连续驯化策略, 提高菌群在动态环境(如温度波动、低 C/N 比)

下的脱氮稳定性。

菌群-环境互作及工艺优化: 低温条件下, 脱氮菌群的活性易受溶解氧(DO)、pH、碳源类型等因素影响。未来研究需结合响应面法(RSM)或机器学习模型, 量化环境参数对脱氮效率的影响规律, 并开发低温适应性生物膜工艺(如 MBR、MBBR)以增强菌群富集能力。此外, 需探索复合菌群(如好氧反硝化+厌氧氨氧化)低温的协同脱氮机制, 以提高低温污水处理的整体效能。

工程化应用与长期运行稳定性: 尽管实验室研究已证实耐冷脱氮菌群的有效性, 但其在实际污水厂的大规模应用仍面临挑战。未来需重点研究低温菌剂的固定化技术(如微胶囊、生物炭载体); 抗低温冲击负荷的工艺设计(如分段式 A/O 工艺); 长期运行中菌群结构演替规律(基于 16S rRNA 测序和 qPCR 监测)。此外, 需结合生命周期评估(LCA)和经济性分析, 评估耐冷脱氮技术的可持续性。

气候变化背景下的适应性研究: 随着全球气候变暖, 极端低温事件仍可能频繁发生。未来需模拟季节性温度骤变对脱氮菌群的影响, 并开发低温预适应策略(如低温预曝气、菌群定向进化), 以提升系统的环境韧性。

5 结论

耐冷脱氮功能菌群在低温污水处理中具有显著的应用潜力, 为解决冬季污水处理难题提供了新的思路。本文总结了耐冷脱氮菌群的研究进展, 提出了未来研究的重点方向, 包括深入探究生理适应机制、优化菌群筛选与驯化策略、强化菌群-环境互作与工艺优化、确保工程化应用的长期稳定性, 以及应对气候变化的适应性研究。通过这些研究方向的深入探索, 有望为我国低温污水处理提供有效的生物解决方案, 提升污水处理效率, 保障水环境安全。

参考文献

- [1] 刘琳. 低温异养硝化细菌的筛选及其固定化研究[D], 2020.
- [2] 唐金, 李亚峰, 吕乐. 全程自养脱氮工艺影响因素及研究进展[J]. 辽宁化工, 2024, 53(12): 1926-9.
- [3] 杨露. Cu²⁺胁迫下耐冷菌 *Pseudomonas* sp. NY1 高效脱氮机理研究[D], 2024.