

活性污泥减量化技术研究与应用进展

邱剑波 陈佳中 朱 琦 徐华华
宁波市城市排水有限公司 浙江 宁波 315040

摘 要：随着社会经济和城市化进程的快速发展，污水处理量不断增加，活性污泥法作为较为成熟的污水处理方法，在我国已普遍使用。然而，该方法产生的剩余污泥处理成为主要难题。污泥减量化技术旨在通过物理、化学和生物等手段，在保证污水处理效果的前提下，减少生物处理系统中污泥的产量。本文综述了活性污泥减量化技术的研究进展、作用机理及应用现状，并对未来研究方向进行了展望。

关键词：活性污泥减量化技术；技术机理；应用进展

引言

活性污泥法通过微生物的代谢作用去除污水中的有机物和氮磷等营养物质，但同时会产生大量剩余污泥。污泥中通常含有许多有毒有害物质，若不进行妥善处理、处置，将会对环境和人类健康造成威胁。污泥减量化技术作为一种从源头上减少污泥产生量的方法，近年来受到了广泛关注。

1 活性污泥减量化技术机理

活性污泥减量化技术是污水处理领域中的一项重要技术，其核心目标是在保证污水处理效果的同时，最大限度地减少污泥的产生量。这一技术的实现依赖于对微生物代谢过程的深入理解和调控，以及生态学原理的应用。

1.1 基于代谢解偶联的技术

在正常情况下，微生物的分解代谢和合成代谢是紧密耦合的。分解代谢过程中释放的能量通过ATP（腺苷三磷酸）和ADP（腺苷二磷酸）的转化，为合成代谢提供所需的能量和物质。然而，在某些特定条件下，这种耦合关系可以被打破，即发生代谢解偶联。代谢解偶联的发生通常与质子载体、重金属、异常温度或好氧-厌氧交替循环等因素有关。在这些条件下，微生物的分解代谢仍然正常进行，但合成新细胞的能力却显著下降。这是因为解偶联剂的存在干扰了ATP的合成过程，使得微生物无法有效利用分解代谢释放的能量进行细胞合成。在活性污泥工艺中，可以利用代谢解偶联剂来抑制污泥的合成代谢，而不影响其分解代谢能力。常见的代谢解偶联剂包括氯代酚、硝基酚、氨基酚等。这些解偶联剂在特定浓度下，可以显著减少污泥的产生量^[1]。例如，对硝基苯酚、三氯苯酚、四氯水杨苯胺等解偶联剂，通过干扰微生物的能量代谢过程，使得微生物在分解底物的同时，无法有效合成新细胞，从而实现污泥的减量。

1.2 基于微生物隐性生长的技术

微生物在衰亡过程中，细胞会溶解并释放出有机物。这些有机物可以被其他微生物再次利用进行生长，这一过程被称为隐性生长。通过加速微生物细胞的溶解，可以促进隐性生长，从而减少污泥的产生。为了实现这一目标，可以采用热处理、超声波、臭氧氧化等溶胞技术。这些技术通过不同的机制破坏微生物细胞的完整性，使其内含物释放出来。例如，超声波技术利用空化气泡的破裂产生的高温、高压和微射流，破坏污泥絮体结构与微生物细胞壁，使得细胞内含物溶出。这些溶出的有机物可以被其他微生物利用，从而促进隐性生长，减少污泥的产生。此外，溶胞技术还可以与其他污泥减量技术相结合，如与代谢解偶联剂联合使用，可以进一步提高污泥减量的效果。这是因为溶胞技术可以加速微生物细胞的溶解，释放出更多的有机物供其他微生物利用；而代谢解偶联剂则可以抑制新细胞的合成，从而使得污泥的产生量进一步减少。

1.3 基于微型动物捕食作用的技术

根据生态学原理，通过延长食物链或强化微型动物对细菌的捕食作用，可以减少污泥的产生。微型动物，如原生动物、后生动物等，是污水处理系统中的重要组成部分。它们通过捕食细菌等微生物，可以将有机物转化为自身生物量或释放到环境中。在污水处理系统中接种或培养微型动物，可以利用它们对细菌的捕食作用减少污泥量。例如，仙女虫、红斑瓢体虫、蚯蚓等微型动物，都是有效的污泥减量生物。它们通过捕食细菌等微生物，减少了污泥中的有机物含量，从而实现了污泥的减量^[2]。此外，两段式生物反应器也是一种有效的污泥减量技术。这种反应器通过分离细菌生长段和捕食段，为微型动物提供了更好的生长和捕食环境。在细菌生长段，微生物主要进行分解代谢和合成代谢；而在捕食段，微型动物则主要进行捕食作用。这种分离使得微型

动物能够更充分地利用细菌等微生物作为食物来源，从而进一步减少了污泥的产生量。

2 国内外活性污泥减量化技术的应用进展

2.1 国外应用进展

在国外，活性污泥减量化技术的应用已经相对成熟，且应用范围广泛。德国是这一领域的先驱者之一，其巴姆堡市污水厂采用超声波污泥反应器对污泥进行预处理，通过超声波的空化作用破坏污泥絮体结构与微生物细胞壁，加速污泥的水解过程，显著提高了污泥的脱水效果，有效减少了污泥的产生量。这一技术的成功应用，为其他污水处理厂提供了宝贵的经验。英国Wesses污水厂则安装了由德国Sonix公司研发的大型超声波污泥处理装置，用于处理市政与工业废水混合污泥。该装置不仅提高了污泥的处理效率，还实现了污泥的减量，进一步证明了超声波技术在污泥处理领域的可行性。除了德国和英国，其他欧洲国家也在积极探索和应用活性污泥减量化技术。例如，奥地利格拉兹大学的研究人员通过斯达氏油脂酵母将污泥转化为脂类，用于生物柴油的生产，这一创新性的应用不仅实现了污泥的资源化利用，还为新能源的开发提供了新的思路。总体来看，国外在活性污泥减量化技术方面的研究起步较早，技术相对成熟，且已经形成了较为完善的应用体系。许多污水处理厂已经成功应用了这些技术，实现了污泥的高效减量，为环境保护和可持续发展做出了积极贡献。

2.2 国内应用进展

在国内，活性污泥减量化技术的研究虽然起步较晚，但近年来发展迅速。许多高校和科研机构在代谢解耦联剂、溶胞技术、微型动物捕食作用等方面开展了深入研究，取得了一系列重要成果。在工程应用方面，我国自主研发的超声波污泥减量技术已经取得了突破性进展。首个工程应用案例诞生于2019年，经过不断的实践和完善，2022年该技术已经进入市场化应用阶段。这一技术通过超声波的作用，有效分解污泥中的有机物，提高污泥的处理效率，实现污泥的减量。同时，热水解技术也在一些污水处理厂中得到了应用，通过加热污泥使微生物细胞壁破裂，释放出有机物，加速污泥的水解过程，同样实现了污泥的减量。此外，国内还在探索和应用其他活性污泥减量化技术，如臭氧氧化技术、微型动物捕食技术等。这些技术的应用不仅丰富了污泥处理的手段，还提高了污泥处理的效率和效果。在企业技术创新方面，浙江复洁环保设备有限公司通过自主突破低温真空脱水干化一体化技术的核心难题，实现了污泥含水率的一次性降低至30%以下。这一创新技术不仅提高了污

泥的处理效率，还实现了污泥的减量化和稳定化，为污泥的后续处理和处置提供了便利。同时，国内还有许多企业也在积极探索和应用活性污泥减量化技术，通过技术创新和工程实践推动污泥处理行业的发展和进步^[3]。在政策推动和市场需求方面，国家对环境保护和污染控制的要求日益严格，污泥处理行业也受到了越来越多的关注。政府出台了一系列政策鼓励和支持活性污泥减量化技术的应用和推广，为污泥处理行业的发展提供了有力的支持。同时，随着城市化进程的加快和污水处理能力的不断提升，污泥产生量也在逐年增加。为了降低污泥处理成本、减轻环境压力，市场对活性污泥减量化技术的需求也在不断增加，为污泥处理行业的发展提供了广阔的市场空间。

3 存在问题与挑战

尽管活性污泥减量化技术在理论与实践层面均取得了一定进展，为污水处理行业带来了显著的变革，但不可否认的是，这一领域仍面临着诸多亟待解决的问题与挑战。这些问题不仅关乎技术的成熟度与实用性，还涉及到经济成本、环境影响以及技术应用的广泛性等多个方面。

3.1 技术稳定性与可靠性

活性污泥减量化技术中的许多方法，如基于代谢解耦联的技术、微生物隐性生长促进技术以及微型动物捕食作用强化技术等，虽然在小规模实验或中试研究中展现出了良好的污泥减量效果，但其在大规模、长期运行条件下的稳定性和可靠性仍有待进一步验证。实验室环境往往难以完全模拟实际污水处理厂中的复杂多变条件，如水质波动、温度变化、微生物群落结构差异等，这些因素都可能影响技术的稳定性和效果。因此，如何确保这些技术在实际应用中的持续稳定运行，是当前面临的一大挑战。

3.2 成本与投资

成本问题是限制活性污泥减量化技术广泛应用的另一大障碍。以超声波、臭氧处理等高级氧化技术为例，这些技术虽然能够有效促进污泥减量，但其设备投资大、能耗高，导致运行成本居高不下。对于许多污水处理厂而言，尤其是在资金有限或经济欠发达地区，高昂的成本使得这些技术难以承受。因此，如何在保证污泥减量效果的同时，降低技术应用的成本，成为亟待解决的问题。此外，技术的经济性还与其规模化应用程度密切相关。目前，部分污泥减量化技术由于处于研发或示范阶段，尚未实现大规模产业化，导致设备制造成本高、维护难度大，进一步增加了应用成本。因此，推动

技术的产业化进程,降低设备制造成本,也是降低整体应用成本的重要途径。

3.3 对污水处理效果的影响

活性污泥减量化技术的应用不仅旨在减少污泥产生量,还必须确保污水处理效果不受影响。然而,部分污泥减量化技术在实际应用中可能会对污水处理系统的微生物群落结构、水质指标等产生一定影响。例如,代谢解偶联剂的使用可能会干扰微生物的正常代谢过程,影响其对污染物的去除效率;溶胞技术虽然能促进污泥减量,但释放出的有机物若未得到有效处理,可能会增加水中的有机物浓度,影响水质^[4]。因此,如何在保证污泥减量效果的同时,确保污水处理系统的稳定运行和出水水质达标,是活性污泥减量化技术应用中必须考虑的问题。这要求在技术选择和应用时,必须充分考虑其对污水处理系统整体性能的影响,通过优化技术参数、调整运行策略等方式,实现污泥减量与污水处理效果的双重目标。

4 未来研究方向

针对上述存在的问题与挑战,未来活性污泥减量化技术的研究方向应围绕技术优化、成本降低以及污水处理效果保障等方面展开。

4.1 技术优化与集成

未来的研究应致力于将多种污泥减量化技术进行优化与集成,形成综合污泥减量化技术体系。这包括探索不同技术之间的协同作用机制,如将代谢解偶联技术与溶胞技术相结合,通过代谢解偶联抑制新细胞合成,同时利用溶胞技术促进隐性生长,实现污泥减量的双重效果。此外,还可以考虑将污泥减量化技术与污水处理系统中的其他单元(如生物反应池、沉淀池等)进行集成设计,提高整体处理效率和污泥减量效果。

4.2 成本降低与效益提升

研发低成本、高效益的污泥减量化技术是未来研究的重要方向之一。这包括开发新型、高效的代谢解偶联剂或溶胞剂,降低其生产成本和使用浓度;研究利用自然能源(如太阳能、风能)驱动的高级氧化技术,减少能耗;以及探索污泥减量化技术的资源化利用途径,如

将减量后的污泥作为肥料或能源物质进行回收利用,提高技术的经济效益。

4.3 对污水处理效果的影响研究

深入研究污泥减量化技术对污水处理效果的影响机制,是确保技术应用的关键。未来的研究应重点关注污泥减量化技术对污水处理系统微生物群落结构、水质指标以及处理效率的影响,通过实验室小试、中试以及现场试验等方式,系统评估不同技术条件下的污水处理效果。同时,应优化技术参数和运行条件,如调整代谢解偶联剂的投加量、控制溶胞技术的处理强度等,以确保在实现污泥减量的同时,保证污水处理系统的稳定运行和出水水质达标。

结语

活性污泥减量化技术,作为一种创新性的污泥管理策略,其核心在于从污泥产生的源头入手,通过科学调控和高效处理,显著减少污泥的生成量。这一技术不仅挑战了传统污泥处理模式的局限,更为污水处理领域开辟了一条全新的、更为环保和经济的路径。通过深入剖析各种污泥减量化技术的内在机理,得以更清晰地理解其工作原理和优势所在。同时,对当前应用现状的全面梳理,也让看到了这些技术在实践中所展现出的潜力和挑战。未来,随着技术的不断优化和集成,有理由相信,活性污泥减量化技术将为污水处理行业的可持续发展注入新的活力。这不仅能够提升污水处理的效率和质量,更将为环境保护和资源节约做出重要贡献,引领污水处理行业迈向更加绿色、高效的未来。

参考文献

- [1]柳凯,梁浩,黄非,等.活性污泥减量及资源化新技术研究[J].能源与节能,2021,(10):92-94.
- [2]徐曙华.活性污泥处理高盐碱减量废水研究[J].科技视界,2024,14(02):72-76.
- [3]刘娜.基于微生物代谢的活性污泥源头减量浅析[J].中国新技术新产品,2019,(11):110-111.
- [4]陈雅岚.BM菌剂在活性污泥法中原位污泥减量效果及其机理研究[D].北京建筑大学,2019.