

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.10.006

微生物菌剂在污泥减量中的应用研究进展

李义勇^{1,2}, 王广华³, 王宝娥^{1,2}, 彭钧雄⁴, 杜建军^{1,2}

(1. 仲恺农业工程学院 资源与环境学院, 广东 广州 510225; 2. 广东省农业产地环境
污染防治工程技术研究中心, 广东 广州 510225; 3. 广州市市政工程设计研究总院有限
公司, 广东 广州 510070; 4. 广州市广环环保科技有限公司, 广东 广州 510145)

摘 要: 在污泥减量方面,微生物强化技术已有十余年的理论研究与应用实践。以促进微生物菌剂在污泥减量中的实际应用为出发点,从微生物菌剂的作用原理、微生物菌株种类、微生物菌剂商品种类、微生物强化技术的小试及中试研究、微生物强化技术的现场应用,以及微生物强化技术的经济可行性评价等层面,系统介绍了已取得的研究成果,明确了微生物菌剂的污泥减量效果,指出了其中尚需深入研究的问题,以期为进一步推动微生物菌剂在污泥减量中的应用提供参考和指引。

关键词: 微生物菌剂; 污泥减量; 应用研究

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)10-0038-09

Applied Research Progress of Microbial Agent in the Field of Sludge Reduction

LI Yi-yong^{1,2}, WANG Guang-hua³, WANG Bao-e^{1,2}, PENG Jun-xiong⁴, DU Jian-jun^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Agricultural Land Pollution Prevention and Control, Guangzhou 510225, China; 3. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510070, China; 4. Guanghuan Environmental Protection Technology Co. Ltd., Guangzhou 510145, China)

Abstract: Microbial augmentation technology has been investigated and applied in the field of sludge reduction in decades. The function principles, the microbial strains, the product variety were introduced in detail. In addition, the lab-scale or pilot-scale studies, the full-scale investigation, and the economic feasibility evaluation of the microbial augmentation technology were also systematically presented to promote a further application of microbial agent in sludge reduction. The function of microbial agent in sludge reduction was confirmed, and its research focus was also pointed out. This paper can provide references for the application of microbial preparation in the field of sludge reduction.

Key words: microbial agent; sludge reduction; applied research

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2016A030310317); 广州市科技计划项目(201803030039); 仲恺农业工程
学院优秀博士人才项目(Y002)

通信作者: 杜建军 E-mail: dujj@tom.com

目前,污泥源头减量技术主要有解偶联技术、隐性生长技术、生物捕食技术和生物强化技术(通过投加微生物菌剂的方式)。其中,微生物菌剂强化污泥减量技术是将具有自我消化量大和产酶能力强等特性的功能微生物菌剂投加到活性污泥中,从而减少污泥排放量的一种技术。该技术具有前期投资省、不新增建设用地、无需大改大建、不增加或改变原有污水处理工艺和运行方式、操作简便易行、反应条件温和、无二次污染等优点,但存在减量效果不稳定、机理不明确,以及对该技术当前存在问题认识不全面等缺点。因此,有必要针对当前的研究与应用现状进行系统性梳理,为进一步推动微生物菌剂在污泥减量中的应用提供参考和指引。

1 微生物菌剂的作用原理

传统微生物学研究证明,在功能微生物方面,微生物菌剂可以强化脱氮固磷和污染物去除能力强的微生物的优势地位,并保持稳定,保障污染物的高效去除,降低污泥产率^[1];在功能酶活力方面,可以强化酶的分泌,提升脱氢酶、淀粉酶及蛋白酶含量,同时改善内源呼吸速率、EPS 含量、系统的物种丰度和功能菌比例等与污泥减量密切相关的指标^[1]。

近年来,基于现代高通量测序技术的深入研究,发现微生物菌剂可以通过两方面作用强化污泥减量:一是菌剂中的乳杆菌属和醋酸菌属等功能微生物可强化污泥水解酸化,加速有机质的分解和矿化,减小污泥产量;二是通过分泌抗生素等胞外物质直接作用或通过改变 pH 等生存环境,促进或抑制反应体系中其他微生物的生长,提升功能菌的比例和降解酶的活力,从而减小污泥产量^[2-6]。其中,微生物菌剂主要通过对原始环境中微生物群落的刺激作用来促进污泥减量,而不是完全依赖自身的作用^[5]。因此,许多情况下菌剂投加量不需要太高。这些机理的揭示对认识微生物菌剂的环境作用非常重要,但尚未指导形成新的技术,因为还有一些问题有待解决^[7-8],包括菌剂在污泥减量系统中的定殖周期、消长规律及其功能活性甚至功能基因变化等。这些问题的解决将为菌剂的精准使用和减量稳效奠定理论基础。

2 微生物菌剂的种类

目前已报道的菌株信息见表 1。

表 1 文献报道的应用于污泥减量的微生物菌株种类
Tab.1 Microbial strains for sludge reduction reported in literature

菌株名称	菌株来源	试验条件	污泥减量率/%
蒂莫内马赛菌 ^[9]	分离自公园的腐烂秸秆堆土样品	配水,摇瓶	4.7
类短芽孢杆菌 ^[9]	分离自企业食堂污水处理站的活性污泥	配水,摇瓶	7.0
炭黑曲霉 ^[11]	购于中国工业微生物菌种保藏管理中心,编号 41254	配水,摇瓶	7.8
恶臭假单胞菌 ^[11]	购于中国工业微生物菌种保藏管理中心,编号 20575	配水,摇瓶	9.3
溶胞芽孢杆菌 ^[10]	分离自污水厂污泥	污泥,摇瓶	10.1
酿酒酵母 ^[12]	购于中国工业微生物菌种保藏管理中心,编号 31923	配水,摇瓶	10.2
蜡样芽孢杆菌 ^[11-12]	分离自污水厂污泥	污泥,摇瓶	11.4
副球菌 ^[13-14]	分离自污水厂污泥	污泥,摇瓶	13.57
米曲霉 ^[1]	购于中国工业微生物菌种保藏管理中心,编号 40015	配水,摇瓶	13.9
微杆菌 ^[8]	分离自奶牛场污水处理系统	污泥,摇瓶	15
枯草芽孢杆菌 ^[9]	分离自企业食堂污水处理站的活性污泥	配水,摇瓶	15.3
嗜酸乳杆菌(乳酸菌) ^[11]	购于中国工业微生物菌种保藏管理中心,编号 6005	配水,摇瓶	17.1
地衣芽孢杆菌 ^[15-19]	分离自污水厂污泥	污泥,摇瓶	18
嗜热芽孢杆菌 ^[20]	分离自公园土壤	污泥,搅拌罐	38.57
假单胞菌、不动杆菌和芽孢杆菌 ^[21]	分离自污泥好氧消化反应器	污泥,好氧消化反应器	40.1、36.8、41.3
地衣芽孢杆菌 ^[22]	分离自污水厂污泥	污泥,摇瓶	43
假单胞菌、气单胞菌 ^[23]	分离自污水厂污泥	污泥,摇瓶	10~50
短芽孢杆菌 ^[24]	分离自污水厂污泥	污泥,摇瓶	54.8

研究机构研发的微生物菌剂产品多为复合菌剂,这是因为一般情况下复合菌剂比单一菌剂的污泥减量效果更好,因此,目前对单一菌株的污泥减

量效果的数据报道较少,且集中在厌氧消化等污泥末端减量(不属于本研究讨论的原位污泥减量范畴)^[8]。然而,微生物菌株的基本信息库非常重要,它可为微生物菌剂的复配提供依据。

同时,虽然国内的微生物菌剂污泥减量技术已有十余年的发展,但通过自主研发形成的菌剂产品并不多,推向市场应用且获得认可的更少。笔者搜集了目前报道的微生物菌剂商品^[25-34],详见表 2。

表 2 商品化微生物菌剂

Tab.2 Commercial microbial agents

微生物菌剂的名 称(代号)	生产单位	组成成分	试验条件	污泥减 量率/%
伯易欧复合微生 物菌剂 ^[1,27]	深圳大地绿锦生 物工程有限公司	酵母菌、乳酸菌、芽孢杆菌、假单胞菌、霉 菌、光细菌等	污水厂进水,摇瓶	12
1 号微生物菌 剂 ^[28]		枯草杆菌、解淀粉芽孢杆菌、地衣芽孢杆 菌、纤维单胞菌属、双氮纤维菌、施氏假单 胞菌、脱氮假单胞菌、沼泽红假单胞菌等	污水厂进水,有效容积 30 L 的生化池,每 月投加一次菌剂,投加量为日处理水量 的 0.005%	27
复合菌剂 ^[29]	浙江省环境保护 科学设计研究院	枯草芽孢杆菌、类短芽孢杆菌和蒂莫内马 赛菌等	印染厂废水,处理水量为(1.3~1.5)×10 ⁴ m ³ /d,根据进水量、水质、系统温度等因素 确定复合菌剂投加量为水量的 0.000 1%~ 0.001%	28
MEMA 菌 ^[30]	浙江省环境保护 科学设计研究院	十余种不同类型的降解功能菌, MEMA1 菌剂以好氧细菌为主, MEMA2 菌剂以兼 性细菌为主	泵站生活污水,有效容积 4.2 m ³ 的 A ² /O 装置,开始 7 d 每天投加菌剂,以后兼氧 池每月一次、消化池每周一次	53
多功能微生物菌 剂 Tx-1 ^[31]	上海 Eco-Well 生 物科技有限公司	兼性和好氧微生物	某污水厂 A/O 工艺生产线,污水处理 量约 23 000 m ³ /d	64
多功能复合微生 物菌剂 (MCMP) ^[32-33]	重庆鲲鹏环境工 程有限公司	光合菌、乳酸菌、放线菌、酵母菌和真菌等 数十种微生物菌群	污水厂沉砂池出水,向总容积为 2 m ³ 的 曝气池投加 MCMP 菌剂,投加量为处理 水量的 0.005%~0.02%	80~ 100
多功能复合微生 物菌剂(MCMP) ^[34]		高效脱氮除磷菌、有机污染物氧化分解菌 和极度耐盐菌等	在重庆市德感污水厂进行了生产性试 验,该厂采用奥贝尔氧化沟工艺,污水处 理量 3 000~4 000 m ³ /d,每月投加一次菌 剂,投加量为日处理水量的 0.005%	100

李明智等^[25]对市面上具有代表性的 15 种水处理微生物菌剂产品进行了筛选和鉴定,这些商品化的微生物菌剂大多数含有芽孢杆菌和酵母菌等,相似度非常高,并指出国产品牌多以 EM 菌为基础与其他菌株复配而成。郑海良等^[26]也得到了类似的研究结果。可见,商品化微生物菌剂的“同质化”现象十分严重。这与微生物资源丰富的多样性不匹配,亟待开发“崭新”的微生物菌剂产品。

3 微生物强化技术的小、中试研究

近 10 年来,已有一些微生物菌剂应用于不同规模污泥减量的研究报道,且开展了不同水量和水质(模拟污水与实际污水)、不同反应器系统(SBR、A/O、MBR)、不同制剂投加参数(连续/间歇和投加比例等)的试验,污泥减量效果存在一定差异。蔡勋江

等^[35]采用有效容积为 3 L 的 SBR 反应器处理校园生活污水,探讨了投加 EM 菌、好氧菌及其混合菌的污泥减量效果,研究表明,当菌剂投加量为处理水量的 0.1% 时,混合菌的污水处理和污泥减量效果最好,污泥减量达到 6%,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)二级标准。储金宇等^[36]研究了菌剂投量对 SBR 系统(处理能力为 0.5 m³/d)污泥减量效果的影响,其中系统 1 未投加菌剂,为对照组,系统 2、3 菌剂投加量分别为处理水量的 0.006% 和 0.012%。结果表明,系统 2 和 3 的排泥量比系统 1 分别减少了 71.85% 和 74.42%,出水污染物指标值明显降低,且浮游生物数量分别提高了 33.64% 和 32.71%、后生动物数量分别提高了 19.3% 和 22.1%,说明微生物菌剂增强

了污泥中的生态链,加大了能量损耗,使污泥产量得到了削减。王敏等^[32]在重庆长寿污水厂的5 m³中试曝气池装置(2套)中进行了试验研究,开始的8 d内液体菌剂的每日投加量分别为处理水量的0.005%和0.01%,以后每月投加一次,发现连续运行78 d后,污泥减量率分别达到81.76%和89.18%,未对出水COD、NH₃-N、TN和TP造成不良影响,相反还能改善对其去除效果。李俊等^[33]在重庆几江污水厂的5 m³中试曝气池装置1和2中,每天分别投加多功能复合微生物菌剂1 L和2 L(相当于处理水量的0.02%和0.04%),连续运行45 d后,两装置仍然可以不用排泥,且对出水水质无影响,不会增加处理系统的总动力消耗,而未投加菌剂对照组每周必须排泥一次。李明智等^[30]在两套平行运行的A²O装置(污水处理规模为7.2~14.4 m³/d)中进行了菌剂作用试验研究,其中向组1的兼氧池和增设的污泥消化池中分别投加MEMA1和MEMA2,组2为不加菌剂、不增设消化池对照组,开始7 d内每天投加菌剂,以后兼氧池每月一次、消化池每周一次,结果表明,组1的污泥排放量较组2减少了53.1%,污泥增长速率显著下降,出水COD、NH₃-N、TN指标得到优化,活性污泥的聚磷能力提高,可在不影响主要出水指标的条件下实现污泥原位减量。朱佳等^[37-38]在处理规模为240 m³/d的A/O装置中,向厌氧区一次性投加日处理水量0.04%的某环保公司菌剂,考察了三种运行工况下的污泥减量效果,发现在高污泥浓度和长污泥龄下取得了更好的污泥减量效果,由原来的26.26%分别提高到30.66%和27.44%,出水SS、COD、BOD₅、TN、NH₃-N等指标得到优化,而TP去除率下降,污泥沉降性能变好,排泥中的重金属、石油类和氰化物均有不同程度的增加,但均达到排放标准,同时还初步揭示了其机制是菌剂促进了污泥溶解、提高了代谢能力和内源呼吸活性。

另外,有学者尝试将微生物强化技术与其他污泥原位减量技术进行耦合,借助协同效应进一步提高污泥减量效果。何伟等^[39]在处理生活污水的SBR反应器(有效容积为60 L)中,耦合使用EM菌微生物强化和物理溶胞隐性生长技术,发现污泥减量效果比单一的隐性生长明显提高,在菌剂配合使用量为0.005%时污泥减量达到60%,效果显著,且出水水质提高到一级A标准。香杰新等^[40]在处理

校园生活污水的MBR反应器(有效容积0.4 m³)中,耦合使用自主研发的来源于活性污泥的复合菌液,发现污泥减量效果得到改善,对COD、NH₃-N、TP的去除率也有提高,且MBR系统内的污泥浓度水平稳定,避免了无机颗粒和难降解有机物的积累,表明投加菌剂有利于克服MBR单一污泥减量技术中存在的问题。

可以看出,微生物菌剂原位减量技术为解决污泥问题提供了可能,但在减量效果的稳定性方面有待提高,为此需要加强菌剂在污泥减量系统中的定殖周期、消长规律及其功能活性变化等方面的基础研究^[1]。有趣的是,上述报道均为国内科技工作者的研究结果,国外研究相对较少。这可能是因为欧美发达国家已建有较完善的污泥处理处置工艺系统,通常会优先考虑厌氧消化、好氧消化和堆肥甚至焚烧等技术手段^[41],对污泥原位减量考虑较少;而我国尚未建立完善的污泥处理处置工艺系统,据此国情,污泥原位减量是值得研究和应用的重要手段。

4 微生物强化技术的现场应用

目前,微生物菌剂应用于污泥减量的现场报道还较少。Xie等^[31]在处理规模为2.3×10⁴ m³/d的A/O污水处理线上,开展了为期8个月的投加多功能菌剂Tx-1的生产性试验,结果表明:菌剂的投加明显改善了污水处理效果,同时减少了污泥产量,降低了曝气能耗;在不投加化学除磷药剂的情况下,出水TP<0.5 mg/L;外排绝干泥量由1.4 t/10⁴ m³下降到0.5 t/10⁴ m³,减量率达64.3%;曝气量由6.0 m³/m³下降到5.1 m³/m³,电耗由0.412~0.425 kW·h/m³下降至0.331 kW·h/m³;Tx-1提高了活性污泥的一级基质去除速率常数,降低了污泥产率系数;同时,Tx-1体系中的活性污泥菌群结构发生了变化,生物多样性增加,其中2种聚磷菌 *Comamonadaceae* 和 *Tetrasphaera* 的丰度明显增加。李俊等^[34]在曝气池中投加多功能复合微生物菌剂MCMP以降低剩余污泥产量,历经长期的小试和中试研究,取得了良好的污泥减量效果;在此基础上,于重庆市江津区的德感污水处理厂进行了生产性试验。该污水处理厂2006年1月—5月的月平均处理水量为10×10⁴ m³,进水COD平均为232.6 mg/L,出水COD平均为41 mg/L,月平均污泥产量为5.55 t,结果表明:在氧

化沟的好氧段投加 MCMP, 当投加频率为 1 次/月、投加量为日处理水量的 0.005% 时, 污泥减量效果明显, 系统运行 6 个月未排剩余污泥; 投加 MCMP 后不仅能保证污水处理厂的出水水质达到国标一级 B 标准, 而且还强化了对氮、磷的去除效能。对于工业废水, 微生物菌剂也表现出了明显的污泥减量效果。徐佳佳等^[29]在印染废水处理规模为 $(1.3 \sim 1.5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的浅层气浮—水解—NSBR—高密度澄清池—纳管处理工艺系统的好氧池入口处, 投加 0.000 1% ~ 0.001% 水量的复合菌剂, 稳定运行一年后与上一年度的污泥量进行比较以评价污泥减量效果。结果表明, 投加菌剂后各项水质指标基本不受影响, 生化系统污泥产率显著减小, 脱水污泥产量由实施前一年的 $10.34 \text{ t}/10^4 \text{ m}^3$ 下降至 $7.44 \text{ t}/10^4 \text{ m}^3$, 实现污泥原位减量 28%。可见, 有效的微生物菌剂为实现污泥原位减量及污染物去除提供了解决途径。

另外, 有学者在无锡市芦村污水处理厂 (A^2/O 工艺, $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模) 中开展了多项污泥原位置量研究, 包括生物菌剂减量、好氧沉淀工艺减量和延时曝气减量, 通过分析比较, 认为生物菌剂减量的效果最明显, 且使用成本可接受, 但其减量效果受到多种工艺运行因素的影响, 抗冲击能力较弱, 需要对全流程进行精细化管理^[7]。同时, 指出了需要注意的问题: ①准确判断当前处理工艺是否适合添加微生物菌剂, 其污泥减量需要整体工艺良好和连续的正常运行及管理; ②污泥减量效果与进水生化段的颗粒物浓度密切相关, 进水 SS 浓度大幅波动会影响和破坏污泥减量效果, 沉砂池、初沉池运行不良时慎用; ③投加菌剂最好与 MBBR、MBR 等抗冲击负荷能力强的工艺联合使用^[7]。

值得指出的是, 微生物菌剂仅能够对其中的有机组分起到减量效果, 因此需要结合污水厂的进水水质和各工艺单元的运行参数对菌剂的投加点、投加量进行合理选取, 如视进水 SS 中的有机物含量确定是否在初沉池前添设投加点; 当生化池污泥的有机组分含量过低时, 菌剂的污泥减量效果有限等^[26]。

5 微生物强化技术的经济可行性评价

由于微生物菌剂应用于污泥减量的工程案例有限, 难以对微生物菌剂的经济可行性作出准确评

价。但已有实践证明, 从投入和产出(或节省)两个方面综合考虑, 微生物菌剂具有经济可行性。

以处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂为例, 分析微生物菌剂污泥减量的投入与产出。案例污水处理厂每天产生含水率 80% 的剩余污泥量为 50 m^3 , 按使用微生物菌剂后的污泥减量率为 50% (一般为 20% ~ 70%), 即 25 m^3 计, 其经济性评价见表 3。按月计, 每月投入 30 万元, 则可节省 49.26 万元, 净效益达到 19.26 万元。

表3 微生物菌剂污泥减量的投入与产出评估

Tab.3 Evaluating the inputs and outputs in sludge reduction with microbial agents

项目	投入	产出
依据	①微生物菌剂使用简单, 无需增加设备和场地; ②微生物菌剂投加量通常为进水量的 0.001%, 因此投加成本低; ③微生物菌剂投加频率低, 间歇式投加即可维持良好的污泥减量效果, 因此菌剂和人工消耗少	①明显降低污泥产量 50%, 减少污泥后续处理处置费用(含人工和车辆); ②减少能耗, 如仅曝气能耗就能节省 20% ^[33]
计算方式	①建设费用: 无; ②微生物菌剂费用: 菌剂投加量为 $1 \text{ t}/\text{d}$, 市场价格 10 万元/t, 投加频率 3 次/月, 合计 30 万元/月; ③投加菌剂的人工费用: 由现有污水运维人员负责, 可忽略人工费用	①节省污泥处理处置费用: 按我国城市污泥处理处置费用为 270 元/t 计 ^[42] , 每月节省 40.5 万元; ②节省能耗: 按照曝气能耗减少 20% 计, 曝气费用为 $0.146 \text{ 元}/\text{m}^3$, 每月节省 8.76 万元
合计/(万元·月 ⁻¹)	30	49.26

与污泥填埋、污泥焚烧、污泥厌氧消化、污泥堆肥等常见污泥处理处置方式相比, 采用微生物菌剂方式进行污泥减量的经济可行性更为明显。

同样以处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂为例, 评价不同污泥处理处置方式的经济性^[42-43], 结果如表 4 所示。由表 4 可以看出, 各种污泥处理处置方式的经济性由好到差排序为: 微生物菌剂污泥原位减量 → 污泥堆肥 → 污泥厌氧消化 → 污泥填埋 → 污泥焚烧。值得指出的是, 在综合考虑建设费用和运行费用投入后, 仅有微生物菌剂污泥原位减量处理处置方式的净效益为正值。

表 4 微生物菌剂污泥减量与其他污泥处理处置方式的经济性对比
Tab.4 Comparison of economic effect of sludge reduction with the microbial agents and other sludge treatment and disposal methods

污泥处理处置方式	投入	产出	净效益/(万元·月 ⁻¹)
污泥填埋 ^[43]	①建设费用:土地使用费、防渗处理费、覆盖材料费以及设备费等投资约 25 万元/t 污泥,合计 1 250 万元,以 10 年折旧期计为 10.42 万元/月; ②运行费用:电费和燃油费等约 75 元/t 污泥,合计 11.25 万元/月	无产出,后续存在渗滤液处理处置、恶臭扰民等遗留问题	-21.67
污泥焚烧 ^[43]	①建设费用:焚烧主体设备和烟气净化设备等投资约 59 万元/t 污泥,合计 2 950 万元,以 10 年折旧期计为 24.58 万元/月;②运行费用:电费和掺烧品费用等约 325 元/t 污泥,合计 48.75 万元/月	燃料;效益可达 75 元/t 污泥,每月产出 11.25 万元	-62.08
污泥厌氧消化 ^[42-43]	①建设费用:厌氧消化设备费投资约 27 万元/t 污泥,合计 1 350 万元,以 10 年折旧期计为 11.25 万元/月;②运行费用:人工、电费等约 38 元/t 污泥,合计 5.70 万元/月	沼气;效益可达 20 元/t 污泥,每月产出 3.00 万元	-13.95
污泥堆肥 ^[43]	①建设费用:堆肥场地、设备和臭气处理系统,投资约 12.5 万元/t 污泥,合计 625 万元,以 10 年折旧期计为 5.21 万元/月;②运行费用:人工、电费等约 70 元/t 污泥,合计 10.50 万元/月	肥料;效益可达 65 元/t 污泥,但存在堆肥产品的去处问题,每月产出 9.75 万元	-5.96
污泥减量(微生物菌剂)	①建设费用:无;②运行费用:菌剂等约 30 万元/月	源头原位减量;节省后续的污泥处理处置费用,每月节省 49.26 万元	19.26

6 结语

总体看来,微生物菌剂的污泥减量效果显著,且具有明显的经济可行性,对于其未来的发展,提出以下几点思考:

① 需要进一步深入开展微生物菌剂减量机理的研究,包括投加菌剂在污泥减量系统中的定殖周期、消长规律及其功能活性变化等,为菌剂的精准使用和减量稳效奠定理论基础。

② 复合微生物菌剂的研究与应用更受重视,但也必须加强针对污泥减量的微生物菌株库的基础建设,为微生物菌剂的复配提供依据,开发“崭新”的微生物菌剂产品。

③ 微生物菌剂不仅可以实现污泥减量,还对出水水质表现出改善作用(占本研究所列参考文献的 60%,剩余 40% 则对出水水质无影响),这是其他污泥减量技术难以实现的,但其中作用原理尚需深入研究。

④ 关于微生物菌剂强化的污泥减量技术大多停留在中试水平,且运行周期一般仅 2~8 个月,缺乏大规模的长期运行实验数据,限制了该技术的推广应用。

今后应针对上述问题开展研究,促进微生物菌剂在污泥减量中的实际应用。微生物菌剂污泥原

位减量技术可以从源头控制污泥产量和改善出水水质,符合绿色、节能、减排的发展需求,具有较好的经济、社会和环境效益,拥有很好的应用前景。目前,我国的污泥处理市场已逐步成熟壮大,且国家发展改革委印发的《“十四五”生物经济发展规划》提出,要运用功能微生物等现代生物技术,推动实现水体脱氮除磷和污泥利用处置,助力环境保护和污染治理。因此,未来微生物菌剂污泥原位减量技术将会进一步发展并占取一定的市场份额。

参考文献:

[1] 林琳. 微生物菌剂对污水处理厂处理效果及微生物群落的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015: 55-56.
LIN Lin. Study on Effect and Microbial Community of Sewage Treatment Plant by Microbial Agents [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 55-56 (in Chinese).
[2] LIU G G, WANG K, LI X K, *et al.* Enhancement of excess sludge hydrolysis and decomposition with different lysozyme dosage [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 366 :395-401.
[3] XIN X D, HE J G, QIU W, *et al.* Microbial community related to lysozyme digestion process for boosting waste

- activated sludge biodegradability [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 112-119.
- [4] XIN X D, HE J G, FENG J H, *et al.* Solubilization augmentation and bacterial community responses triggered by co-digestion of a hydrolytic enzymes blend for facilitating waste activated sludge hydrolysis process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284: 979-988.
- [5] 宋云龙, 张金松, 朱佳, 等. 基于高通量测序的微生物强化污泥减量工艺中微生物群落解析[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(7): 2099-2107.
- SONG Yunlong, ZHANG Jinsong, ZHU Jia, *et al.* Analysis of microbial community in in-situ sludge reduction process by bioaugmentation using high-throughput sequencing technology [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(7): 2099-2107 (in Chinese).
- [6] 王越兴, 林琳, 张金松. 投加微生物菌剂对污泥菌群的影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(增刊2): 87-93.
- WANG Yuexing, LIN Lin, ZHANG Jinsong. Influences of microbial agent addition to wastewater treatment plant on the microbial structure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(S2): 87-93 (in Chinese).
- [7] 鲍立新, 李激, 蒋岚岚, 等. 城镇污水处理厂剩余污泥处理与处置技术探讨[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(13): 152-156.
- BAO Lixin, LI Ji, JIANG Lanlan, *et al.* Discussion on technology for treatment and disposal of excess sludge from WWTP[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(13): 152-156 (in Chinese).
- [8] BANU J R, USHANI U, RAJKUMAR M, *et al.* Impact of mild alkali dosage on immobilized *Exiguobacterium* spp. mediated cost and energy efficient sludge disintegration[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245: 434-441.
- [9] 王慧荣, 韦彦斐, 梅荣武, 等. 污泥减量菌剂的筛选及减量效果的小试研究[J]. *工业水处理*, 2014, 34(8): 25-28.
- WANG Huirong, WEI Yanfei, MEI Rongwu, *et al.* Research on small-scale tests of the screening of sludge reduction microbial strains and the reduction effectiveness[J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, 34(8): 25-28 (in Chinese).
- [10] KAVITHA S, PREETHI J, BANU J R, *et al.* Low temperature thermo-chemical mediated energy and economically efficient biological disintegration of sludge: simulation and prediction studies for anaerobic biodegradation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 317: 481-492.
- [11] USHANI U, BANU J R, KAVITHA S, *et al.* Immobilized and $MgSO_4$ induced cost effective bacterial disintegration of waste activated sludge for effective anaerobic digestion [J]. *Chemosphere*, 2017, 175: 66-75.
- [12] USHANI U, KAVITHA S, KANNAH R Y, *et al.* Sodium thiosulphate induced immobilized bacterial disintegration of sludge: an energy efficient and cost effective platform for sludge management and biomethanation [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 260: 273-282.
- [13] KAVITHA S, SARANYA T, KALIAPPAN S, *et al.* Accelerating the sludge disintegration potential of a novel bacterial strain *Planococcus jake* 01 by $CaCl_2$ induced deflocculation [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 396-405.
- [14] SHARMILA V G, KAVITHA S, RAJASHANKAR K, *et al.* Effects of titanium dioxide mediated dairy waste activated sludge deflocculation on the efficiency of bacterial disintegration and cost of sludge management [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 197: 64-71.
- [15] KUMAR S G, MERRYLIN J, KALIAPPAN S, *et al.* Effect of cation binding agents on sludge solubilization potential of bacteria [J]. *Biotechnology & Bioprocess Engineering*, 2012, 17(2): 346-352.
- [16] MERRYLIN J, KALIAPPAN S, KUMAR A S, *et al.* Effect of extracellular polymeric substances on sludge reduction potential of *Bacillus licheniformis* [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013, 10(1): 85-92.
- [17] MERRYLIN J, KALIAPPAN S, KUMAR A S, *et al.* Effect of extra polymeric substance removal on sludge reduction potential of *Bacillus licheniformis* at its optimised pH condition [J]. *Water and Environment Journal*, 2014, 28(1): 95-103.
- [18] KAVITHA S, KUMAR A S, YOGALAKSHMI K N, *et al.* Effect of enzyme secreting bacterial pretreatment on enhancement of aerobic digestion potential of waste activated sludge interceded through EDTA [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 150(3): 210-219.
- [19] KAVITHA S, STELLA P B C, KALIAPPAN S, *et al.* Enhancement of anaerobic degradation of sludge biomass

- through surfactant-assisted bacterial hydrolysis [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016, 99: 207-215.
- [20] TANG Y, YANG Y L, LI X M, *et al.* The isolation, identification of sludge-lysing thermophilic bacteria and its utilization in solubilization for excess sludge [J]. Environmental Technology, 2012, 33(8): 961-966.
- [21] LIU Y J, GAO M, ZHANG A N, *et al.* Strengthen effects of dominant strains on aerobic digestion and stabilization of the residual sludge [J]. Bioresource Technology, 2017, 235: 202-210.
- [22] BANU J R, USHANI U, MERRYLIN J, *et al.* Evaluation of operational parameters for biodegradation of bacterially disintegrated sludge [J]. Desalination & Water Treatment, 2016, 57: 25018-25027.
- [23] YASIN N H M, SANCHEZ-TORRES V, MAEDA T. Enhanced reduction of waste activated sludge at a low temperature by locally isolated strains *Pseudomonas* sp. VNT and *Aeromonas* sp. VNT [J]. Bioresource Technology, 2014, 174: 134-141.
- [24] MAEDA T, YOSHIMURA T, GARCÍA-CONTRERAS R, *et al.* Purification and characterization of a serine protease secreted by *Brevibacillus* sp. KH3 for reducing waste activated sludge and biofilm formation [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (22): 10650-10656.
- [25] 李明智,喻治平,陈德全,等. 国内环保用微生物菌剂的研究应用情况调查[J]. 工业水处理, 2011, 31 (6): 18-20.
- LI Mingzhi, YU Zhiping, CHEN Dequan, *et al.* Investigation on the application of microbial agents to environmental protection researches in China [J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31 (6): 18-20 (in Chinese).
- [26] 郑海良,肖铮,胡春风,等. 投加生物菌剂污泥原位减量技术的研究与应用[J]. 安徽农业科学, 2014, 42 (26): 9101-9103.
- ZHENG Hailiang, XIAO Zheng, HU Chunfeng, *et al.* Application status and precautions of bioaugmentation for in-situ sludge reduction [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42 (26): 9101-9103 (in Chinese).
- [27] 林琳,王越兴,张金松. 投加微生物菌剂对污泥生化指标的影响[J]. 中华建设, 2016(8): 142-145.
- LIN Lin, WANG Yuexing, ZHANG Jinsong. Effect of adding microbial agents on sludge biochemical indexes [J]. China Construction, 2016 (8): 142-145 (in Chinese).
- [28] 刘巍,蒲文晶,钟大辉,等. 微生物菌剂用于污水厂剩余污泥减量的研究[J]. 石油化工安全环保技术, 2013, 29(5): 59-61.
- LIU Wei, PU Wenjing, ZHONG Dahui, *et al.* Study on the use of microbial agents for the reduction of excess sludge in wastewater treatment plants [J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2013, 29(5): 59-61 (in Chinese).
- [29] 徐佳佳,梅荣武,王冬,等. 印染废水污泥原位减量应用工程实践[J]. 水处理技术, 2016, 42 (10): 129-132.
- XU Jiajia, MEI Rongwu, WANG Dong, *et al.* Engineering practice of sludge in-situ reduction technique on dyeing wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(10): 129-132 (in Chinese).
- [30] 李明智,韦彦斐,梅荣武,等. 多生境功能菌于生化系统污泥原位减量的中试研究[J]. 工业水处理, 2013, 33(2): 35-37, 66.
- LI Mingzhi, WEI Yanfei, MEI Rongwu, *et al.* Field research on the application of multi-environmental microbial agent to sludge in situ decrement in biochemical systems [J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(2): 35-37, 66 (in Chinese).
- [31] XIE H F, ZHANG J H, XIN W L, *et al.* Full-scale application of microbial agent on in-situ sludge reduction [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2016, 32(4): 502-507.
- [32] 王敏,王里奥,包亮,等. 多功能微生物制剂用于污泥减量的研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23 (7): 16-19.
- WANG Min, WANG Li'ao, BAO Liang, *et al.* Study on application of multifunctional compound microorganism product for sludge reduction [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23 (7): 16-19 (in Chinese).
- [33] 李俊,朱臻,朱国政,等. 利用MCMP微生物制剂减少剩余污泥产量的研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1 (12): 92-95.
- LI Jun, ZHU Zhen, ZHU Guozheng, *et al.* Study on reducing of excess sludge production by MCMP inoculation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, 1(12): 92-95 (in Chinese).
- [34] 李俊,庞子山,朱臻,等. 利用微生物制剂进行污泥减

- 量的生产性试验研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(3): 1-4.
- LI Jun, PANG Zishan, ZHU Zhen, *et al.* Study on productive experiment of sludge reduction by microbial preparation [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(3): 1-4(in Chinese).
- [35] 蔡勋江,李娟,黎晓微. 不同微生物菌剂用于SBR处理校园生活污水的研究[J]. 工业用水与废水, 2012, 43(1): 64-67.
- CAI Xunjiang, LI Xian, LI Xiaowei. Treatment of schoolyard domestic sewage by SBR added with different microbial agents [J]. Industrial Water & Wastewater, 2012, 43(1): 64-67(in Chinese).
- [36] 储金字,李松雨,杜彦生,等. 微生物制剂的污泥减量化研究[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(4): 4-7.
- CHU Jinyu, LI Songyu, DU Yansheng, *et al.* Research on the sludge reduction by microbial agents [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2014, 40(4): 4-7(in Chinese).
- [37] 朱佳,宋云龙,张金松,等. 厌氧/好氧工艺中微生物强化原位污泥减量机理[J]. 中国给水排水, 2016, 32(9): 8-15.
- ZHU Jia, SONG Yunlong, ZHANG Jinsong, *et al.* Mechanism study on in-situ sludge reduction by bioaugmentation in anoxic-oxic process [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(9): 8-15(in Chinese).
- [38] 朱佳,宋云龙,张金松,等. 基于微生物强化的原位污泥减量中试研究[J]. 给水排水, 2014, 40(8): 37-43.
- ZHU Jia, SONG Yunlong, ZHANG Jinsong, *et al.* Pilot study on in-situ sludge reduction based on microbial enhancement [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(8): 37-43(in Chinese).
- [39] 何伟,吴蓓蕾,黄种买. EM菌与物理溶胞耦合对SBR系统污泥减量研究[J]. 水处理技术, 2016, 42(5): 60-62.
- HE Wei, WU Beilei, HUANG Zhongmai. Combining effective microorganisms with physical lysis on SBR sludge reduction [J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(5): 60-62(in Chinese).
- [40] 香杰新,蔡勋江,范洪波,等. 复合菌剂用于膜生物反应器的污泥减量试验研究[J]. 水处理技术, 2009, 35(12): 98-101.
- XIANG Jiexin, CAI Xunjiang, FAN Hongbo, *et al.* Study on addition of hybrid bacteria into membrane bioreactor for sludge reduction [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(12): 98-101(in Chinese).
- [41] NEWBOLD A, SHCICI R. Enhanced sludge reduction using external bioaugmentation at a full-scale municipal wastewater treatment plant [C]// CTSI. Proceedings of CTSI Clean Technology and Sustainable Industries Conference and Expo, Clean Technology, USA: CTSI, 2011: 255-258.
- [42] 徐慧敏. 超声联合热碱促进污泥厌氧消化的机理和能效研究[D]. 上海:华东师范大学, 2016: 124-132.
- XU Huimin. Techno-economic Evaluation and Mechanisms of Anaerobic Digestion with Waste Activated Sludge by Combined Ultrasound, Thermal and Alkali Pretreatment [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016: 124-132 (in Chinese).
- [43] 孟锦. 城镇污泥处理处置方案综合评价研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015: 45-50.
- MENG Jin. Comprehensive Evaluation of Urban Sludge Treatment and Disposal Program [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015: 45-50 (in Chinese).
-
- 作者简介:**李义勇(1983-),男,湖北孝感人,博士,副教授,主要研究方向为有机废水(废物)的生物处理与资源化。
- E-mail:**350527256@qq.com
- 收稿日期:**2019-12-23
- 修回日期:**2022-04-05

(编辑:丁彩娟)