

污泥处理技术的研究进展：减量化-资源化-能源化的协同路径与挑战

曾月俊 罗秋妍 李文轩 覃佳勇 宁颖标 王卢彬 盘睿 李云翔 黄在银*

广西民族大学 化学化工学院, 广西 南宁 530006

[摘要] 随着城市化和工业发展, 污泥处理的重要性日益凸显, 影响污水处理和环境资源利用。污泥含大量有害物质, 需高效环保处理技术。本论文回顾最新进展, 提出建议, 分析减量化、资源化、沼气技术趋势, 强调技术创新对可持续发展的意义, 并指出未来研发方向。

[关键词] 污泥处理; 资源化; 环境风险; 技术进展

DOI: 10.33142/nsr.v2i1.15889

中图分类号: X701

文献标识码: A

New Advances in Sludge Treatment Technology: A Review of Research on Reduction, Resource Utilization and Energy Utilization

ZENG Yuejun, LUO Qiuyan, LI Wenxun, QIN Jiayong, NING Yingbiao, WANG Lubin, PAN Rui, LI Yunxiang, HUANG Zaiyin*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi Minzu University, Nanning, Gangxi, 530006, China

Abstract: With the development of urbanization and industry, the importance of sludge treatment has become increasingly prominent, affecting sewage treatment and environmental resource utilization. Sludge contains a large number of harmful substances and requires efficient and environmentally friendly treatment technology. This paper reviews the latest progress, puts forward suggestions, analyzes the trends of reduction, recycling, and biogas technology, emphasizes the significance of technological innovation for sustainable development, and points out the future direction of research and development.

Keywords: sludge treatment; recycling; environmental risks; technological progress

引言

污泥作为城市化和工业化进程中的必然产物, 主要由初沉污泥和活性污泥组成, 具有高含水量、有机质含量高和潜在的环境风险^[1]。随着污泥产量的不断上升, 其处理成为了一个紧迫的环境问题。有效的污泥处理不仅能够减少环境污染, 还能促进资源的回收利用, 对循环经济发展具有重要意义。然而, 污泥处理面临效率、成分复杂性、高昂成本和监管难度等挑战^[2]。本研究旨在深入探讨污泥处理的关键技术, 分析其难点, 并为研究者与实践者提供技术参考和策略启示, 以促进污泥处理技术的进步和政策的完善。

1 污泥处理技术概述

污泥处理技术经历了从传统到现代的演变, 其目的在于减少污泥体积, 消除病原体, 回收资源, 并尽可能地将污泥转化为可利用的物质。以下是对传统污泥处理技术和新型污泥处理技术的概述。

1.1 传统污泥处理技术

传统污泥处理技术主要包括填埋、焚烧和堆肥三种方式, 这些方法在过去的几十年中被广泛采用, 但各自存在一定的局限性。

1.1.1 填埋

填埋是一种将污泥作为固体废物进行处置的方法。它操作简单, 成本相对较低, 因此在过去是处理污泥的主要

方式。然而, 填埋处理存在以下问题: 首先, 污泥中的高含水量导致填埋场需占用大量土地资源; 其次, 填埋过程中会产生大量渗滤液, 若处理不当, 会对地下水和土壤造成污染; 最后, 填埋并未实现污泥的资源化利用, 浪费了其中的有机质和营养元素。

1.1.2 焚烧

焚烧是一种高温处理污泥的方法, 能够有效减少污泥体积, 杀死病原体, 并实现污泥的稳定化。焚烧后的灰分可以用于建筑材料的生产。然而, 焚烧处理也存在以下缺点: 一是焚烧过程中会产生有害气体, 如二噁英和重金属蒸气^[3], 需要配备昂贵的尾气处理设施; 二是焚烧能耗较高, 运行成本较大; 三是焚烧过程中产生的热量未能有效利用, 降低了能源回收效率。

1.1.3 堆肥

堆肥是一种生物处理方法, 通过微生物的作用将污泥中的有机物转化为稳定的腐殖质, 从而实现污泥的资源化。堆肥产品可以用作土壤改良剂或肥料^[4]。然而, 堆肥处理也存在一些问题: 一是污泥中的重金属和病原体可能对堆肥产品的质量造成影响; 二是堆肥过程中可能产生臭气, 对周围环境造成污染; 三是堆肥周期较长, 占地面积大, 且对污泥的含水量和有机质含量有一定要求。

1.2 新型污泥处理技术

随着环境保护意识的增强和资源循环利用的需求, 新

型污泥处理技术得到了快速发展。这些技术主要包括污泥减量化、污泥资源化和污泥能源化。

1.2.1 污泥减量化

污泥减量化技术旨在减少污泥的体积和质量,降低处理和处置成本。常见的减量化技术包括机械脱水、热处理、化学调理和生物降解等。机械脱水通过物理方法去除污泥中的水分,但难以进一步降低污泥的含水量。热处理技术如热水解和微波处理能够破坏污泥的细胞结构,释放水分,提高脱水性能。化学调理则是通过添加化学试剂改变污泥的性质,促进水分的去除。生物降解则是利用微生物分解污泥中的有机物,减少污泥体积。

1.2.2 污泥资源化

污泥资源化技术将污泥视为一种资源,通过不同的方法将其转化为有用的产品。例如,污泥中的有机质可以转化为生物肥料,无机成分可以用于建筑材料的生产。污泥资源化技术包括污泥厌氧消化、好氧消化、蚯蚓堆肥等。厌氧消化不仅能减少污泥体积,还能产生甲烷气体,实现能源回收。好氧消化则是在有氧条件下分解污泥中的有机物,产生的消化液可以作为肥料。蚯蚓堆肥则是利用蚯蚓处理污泥,转化为有机肥料。

1.2.3 污泥能源化

污泥能源化技术是将污泥中的有机质转化为能源的过程,主要包括生物质发电、生物质燃料和生物油等^[5]。生物质发电通过焚烧污泥产生蒸汽,驱动涡轮机发电。生物质燃料则将污泥转化为固体燃料,如污泥颗粒或污泥煤。生物油技术通过热解或液化将污泥转化为油品,可作为燃料或化工原料。污泥能源化不仅实现了污泥的减量化,还提高了能源利用效率,具有显著的环境和经济效益。

传统污泥处理技术虽然操作简便,但存在诸多环境问题。新型污泥处理技术以其环保、高效和资源化的特点,逐渐成为污泥处理领域的研究和应用热点。未来,随着技术的不断进步和政策的支持,污泥处理技术将朝着更加环保、高效和可持续发展的方向发展。

2 各技术优缺点对比与分析

在污泥处理与资源回收领域,多种技术手段被广泛应用于实践中,每种技术都有其独特的优势和局限性。以下是对几种主要污泥处理技术的优缺点对比分析,并探讨其未来发展趋势及改进方向。

2.1 不同污泥处理技术的优缺点

2.1.1 污泥厌氧消化技术

Zhang^[6]研究了污水厂污泥厌氧消化碳源生产机理及优化技术。该研究针对我国污水处理排放标准提高的背景,探讨了如何通过外加碳源方式提高污水中碳源的含量,以实现总氮达标排放; Qu^[7]研究了耦合 FCDI 脱盐促进 OMBR 污泥厌氧消化工艺的稳定性。该研究采用正渗透膜生物反应器 (OMBR) 对污泥进行厌氧消化,旨在改

善反应器内部的传质和减少污泥重复脱水的能耗,提高污泥资源化的效率; Liu^[8]等人等在污泥厌氧消化方面,通过投加不同热解温度和投加量的生物炭,研究了其对厌氧消化效率和重金属环境风险的影响,发现生物炭可以有效提升产甲烷量,其中 700℃热解制备的生物炭在 20g/L 的投加量下,累积产甲烷量较空白组提升了 132.52%,同时生物炭投加后,厌氧消化污泥重金属风险评价指数 (RI 值) 为 58,较空白组 (RI=111) 降低了 47.75%,表明生物炭可以有效降低重金属的生态风险; Yang 等^[9]人回顾了氧化法在污泥厌氧消化处理中的应用研究进展,发现 O₃ 氧化预处理能使污泥的产甲烷率最高提高 396.00%, K₂FeO₄ 氧化预处理能使甲烷产量显著增加 23.9%, Fenton 氧化预处理能使甲烷产量高达 735mL/(g VS), 并从低碳角度探讨了氧化法对厌氧消化的影响; Ye^[10]在污泥厌氧消化方面研究了香豆素的影响,发现香豆素能够显著提高甲烷产率。例如, 100mg/L 香豆素作用下, 甲烷累积产量为 2401mL, 是对照组的 2.63 倍; 200mg/L 香豆素作用下, 最大 SCFAs 产量为 2723.16mg/L, 远高于对照组; Liu 等^[11]人在中温 (35±1)℃、接种物浓度为 30% 的条件下, 采用批量式厌氧消化工艺探究了污水处理厂剩余污泥不同浓度厌氧消化的产气特性, 得出污泥添加量占发酵料液体积为 20% 时, 污泥厌氧消化产气性能最优; Zhang 等^[12]人在污泥厌氧消化处理方面, 对比了传统中温厌氧消化与高级厌氧消化工艺的运行效果, 发现高级厌氧消化工艺在处理能力提升、泥质变化、产沼气能力提高、能源利用情况等方面均优于传统工艺, 为后续国内污泥高级厌氧消化污泥处理项目提供了参考。综上其优点: 污泥厌氧消化技术能够在减少污泥体积的同时, 产生具有较高经济价值的生物气 (沼气), 实现能源的回收利用。此外, 该技术操作成本较低, 对环境的影响较小, 有利于实现污泥的稳定化。缺点: 该技术的消化周期较长, 对温度和 pH 值有较高的要求, 需要精确控制。同时, 消化过程中可能产生臭气, 需要配备良好的密封和气体处理系统。

2.1.2 污泥热处理技术

Yuan 等^[13]人在工业污泥热处理方面, 通过综述制革、电镀、造纸和印染四大类工业污泥在焚烧、热解等热处理过程中的重金属赋存形态、分布及迁移转化规律, 为降低工业污泥热处理过程中重金属的二次污染风险提供参考; Tao^[14]在城市污泥水热处理过程中有机物变化方面做了研究工作, 通过比较挪威 Cambi 公司的 CambiTM 高级污泥厌氧消化技术、法国威立雅水务的 Biothelys® 工艺, 以及他们开发的 HiROS 污泥高速资源化工艺三种水热处理技术对有机物的影响, 为污泥处理处置路线的选择和资源化利用提供了指导; Zhu^[15]在污泥热处理过程中磷、氟和氯的归趋及其调控方面进行了研究, 探究了不同温度 (300~1100℃)、添加剂种类 (CaO、MgO、CaCO₃)、添加剂量

(0~20%)和气氛对磷、氟和氯的影响。研究发现,在800℃下,添加15%的CaO作为添加剂,90mL min⁻¹的空气流速和45分钟的焚烧时间,可以使污泥焚烧灰中磷灰石磷(AP)含量达到89.53%,释放的氟和氯分别为1.27%和2.41%,有效提高了磷的资源化利用效率,并降低了氟氯对环境的污染风险;Zheng^[16]通过水热碳化技术,成功将市政污泥的N、S含量降低了69.9%、60%,同时实现了重金属的形态转变,有效降低了污泥的生态风险等级,例如Cd、Ni、Zn的风险等级分别从很高降至低、中、中等。基于以上不难看出该技术优点:污泥热处理技术能够显著减少污泥体积,有效杀死病原体,实现污泥的稳定化。此外,热处理过程中产生的热能可以回收利用,具有一定的经济效益。缺点:该技术能耗较高,处理过程中可能产生有害气体,如二噁英和氯化氢,需要额外的尾气处理设备。此外,热处理技术的投资和运行成本较高,限制了其广泛应用。

2.1.3 微生物发酵技术

Yan等^[17]人在污泥堆肥方面,通过添加蘑菇渣、微生物发酵菌和生物质炭等辅料进行共堆肥试验,优化了堆肥工艺,使堆肥温度快速上升并维持高温(T5处理第3天温度达到70.5℃,不低于50℃的时间达到19天),提高了堆肥效率与产品品质(T5处理产品的w(TKN)、w(TP)和w(TK)分别达到3.88、0.64和1.10g/kg),并降低了重金属的生物毒性(T5处理的重金属残渣态占比最高);Wei^[18]在使用金宝贝肥料发酵剂将污泥发酵成有机肥方面做了研究,并通过实验得出,使用金宝贝肥料发酵剂可缩短发酵时间至7天,与传统方法相比提高了发酵效率,降低了成本;Pan^[19]污泥好氧发酵工艺条件方面做了研究,通过对成都市污水处理厂污泥成分的分析,发现污泥中的有机质、氮、磷、钾等营养成分均高于全国平均水平,且重金属含量在允许范围内,为污泥发酵提供了可行性。通过筛选高效降解菌和除臭菌,最终确定混菌s7:512=1:1组合作为最佳接种菌剂,接种量为发酵培养基的1%(V/W湿基重)。优化发酵工艺参数,确定了污泥:稻草:尿素:磷酸氢二钾=1:1:0.02:0.02(质量比)的培养基组成,发酵时间为12天,发酵温度分段控制:前3天30℃,中间5天5℃,后4天30℃。最终,通过扩大实验和中试实验验证,该发酵工艺成功实现了污泥的无害化、减量化和资源化,并得到了符合国家卫生标准的发酵产物。通过对比大量数据和工作,其优点:微生物发酵技术可以将污泥转化为有机肥料,实现资源化利用。该技术处理过程简单,能耗较低,有利于减少环境污染。缺点:发酵周期较长,对环境条件有一定要求。此外,发酵过程中可能存在重金属等污染物积累问题,影响肥料品质。

2.2 各技术在应用中的局限性

(1)污泥厌氧消化技术在实际应用中,对于某些难

降解的污泥,消化效果不佳,且对操作人员的技术要求较高。(2)污泥热处理技术的高能耗和潜在的环境风险限制了其在大规模应用中的可行性,特别是在能源和环保要求较高的地区。(3)微生物发酵技术在应用中,发酵条件控制难度较大,且发酵产品质量参差不齐,市场接受度有限。

(4)表面活性剂辅助脱水技术中,表面活性剂的选择和用量对脱水效果有显著影响,但目前尚无统一的标准和规范,导致实际应用中存在一定的盲目性。

2.3 未来发展趋势及改进方向

(1)优化现有技术,提高处理效率,降低能耗和成本。例如,通过改进消化工艺,提高污泥厌氧消化的产气率和稳定性;研发高效、环保的热处理设备,降低处理成本。(2)开发新型污泥处理技术,如生物炭制备、污泥制油等,实现污泥的资源化利用,提高污泥处理的经济效益。(3)加强污泥预处理技术的研究,提高污泥的脱水性能和厌氧消化效果,降低后续处理难度。(4)关注污泥处理过程中的环境风险,研发绿色、低碳的处理技术,减少对环境的影响。(5)建立健全污泥处理与资源回收的政策法规和技术标准,推动污泥处理技术的产业化发展。同时,加强与国际先进技术的交流与合作,提高我国污泥处理技术水平。

污泥处理与资源回收领域的技术发展仍具有很大的潜力。通过不断优化现有技术、开发新型处理方法,有望实现污泥处理的高效、环保和可持续发展。在此基础上,还需加强政策支持和产业引导,推动污泥处理技术在实际应用中的广泛普及。

3 结束语

污泥处理与资源回收领域的研究与实践正不断深入,展现出广阔的发展前景。我们相信,通过科技创新、政策支持和市场机制的共同作用,污泥处理技术将更加成熟,资源化利用程度将进一步提高,从而为我国环境保护和资源可持续利用做出更大贡献。让我们携手努力,推动污泥处理技术的进步,共创绿色、和谐、美丽的生态环境。展望未来,我们期待污泥处理领域迎来更加辉煌的篇章。

基金项目:国家自然科学基金No.22263001;国家级及省级大学生创新创业项目经费202410608028、S202410608362X。

[参考文献]

- [1]南晓杰.垃圾焚烧炉渣与城市污泥协同稳定过程及重金属环境行为研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [2]郑尚基,王枫,巢昆,等.高级氧化技术在污泥减量化中的应用[J].环境工程,2018,36(9):133-138.
- [3]杨仕桥.生活垃圾焚烧发电厂酸性气体排放控制研究[D].北京:清华大学,2025.
- [4]Nasr F A .Treatment and reuse of sewage sludge[J].Environmentalist,1997,17(2):109-113.
- [5]鲁肯斯 W H .污水污泥作为能源生产的生物质资源:

各种选择的概述和评估 [J]. 能源与燃料, 2008, 22(1): 11-13.

[6]张德猛. 污水厂污泥厌氧消化碳源生产机理及优化技术 [D]. 河北: 华北理工大学, 2023.

[7]屈越童. 耦合FCDI脱盐促进OMBR污泥厌氧消化工艺稳定运行研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2022.

[8]刘庆鸿, 邱春生, 刘楠楠, 等. 生物炭对污泥厌氧消化和重金属环境风险的影响 [J]. 环境工程, 2025(1): 1-12.

[9]杨阿明, 雷程, 朱学峰. 氧化法对污泥厌氧消化处理影响的研究进展 [J]. 净水技术, 2024, 43(11): 19-28.

[10]叶红梅. 香豆素对污泥厌氧消化的影响及机理研究 [D]. 江西: 江西理工大学, 2024.

[11]柳金虎, 张无敌, 尹芳, 等. 污水处理厂剩余污泥厌氧消化特性研究 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2023, 43(6): 1-5.

[12]张铁军, 程秋音, 卓崑, 等. 传统中温厌氧消化与高级厌氧消化工艺的运行效果对比 [J]. 给水排水, 2023, 59(1): 38-43.

[13]袁文蛟, 张宇腾, 李梅彤, 等. 工业污泥热处理过程中重金属迁移转化研究进展 [J]. 化工环保, 2025(3): 1-9.

[14]陶明涛, 张华. 城市污泥水热处理过程中有机物的变化 [J]. 广东化工, 2012, 39(13): 189-190.

[15]朱永波. 污泥热处理过程中磷、氟和氯的归趋及其调控研究 [D]. 江西: 江西师范大学, 2024.

[16]郑楚鹏. 基于水热碳化的市政污泥品质提升与重金属稳定化的研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2020.

[17]严兴, 侯毛宇, 李碧清, 等. 微生物发酵菌和生物质炭及蘑菇渣对污泥堆肥效果的影响 [J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 136-142.

[18]韦华. 污泥发酵有机肥的方法 [J]. 农村新技术, 2014(3): 52-53.

[19]潘美英. 城市生活污水污泥好氧发酵工艺条件研究 [D]. 四川: 四川大学, 2006.

作者简介: 曾月俊 (2004—), 男, 汉族, 广西河池人, 本科在读, 广西民族大学化学化工学院, 研究方向: 固废处理领域。