

城市污水处理厂污泥资源化利用的技术创新研究

宗莹

新疆新能源（集团）环境检测有限公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830023

摘要：城市污水处理厂污泥处置问题日益突出，资源化利用成为重要发展方向。针对当前污泥处理技术存在的能耗高、成本大、二次污染等问题，从热干化、厌氧消化、好氧发酵等工艺入手，探索了污泥减量化与资源化的创新技术路径。研究表明，改进的热水解-厌氧消化工艺可使污泥减量达 45% 以上，沼气产率提高 30%；好氧发酵-堆肥工艺改善了产品肥效，重金属含量符合标准。创新技术的工程应用验证了其在污泥减量化、能源回收和土地利用等方面的显著成效，为城市污水处理厂污泥的资源化处置提供了可行方案。

关键词：污水处理厂；污泥资源化；热水解；厌氧消化；好氧发酵

Research on Technological Innovation of Sludge Resource Utilization in Urban Sewage Treatment Plants

Ying Zong

Xinjiang New Energy (Group) Environmental Testing Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830023, China

Abstract: The problem of sludge disposal in urban sewage treatment plants is becoming increasingly prominent, and resource utilization has become an important development direction. In response to the problems of high energy consumption, high cost, and secondary pollution in current sludge treatment technology, innovative technological paths for sludge reduction and resource utilization have been explored from processes such as thermal drying, anaerobic digestion, and aerobic fermentation. Research has shown that the improved hydrothermal anaerobic digestion process can reduce sludge by over 45% and increase biogas yield by 30%; The aerobic fermentation composting process has improved the fertilizer efficiency of the product, and the heavy metal content meets the standards. The engineering application of innovative technology has verified its significant effectiveness in sludge reduction, energy recovery, and land use, providing a feasible solution for the resource utilization and disposal of sludge in urban sewage treatment plants.

Keywords: sewage treatment plant; sludge resource utilization; thermal hydrolysis; anaerobic digestion; aerobic fermentation

0 前言

随着城市化进程加快和污水处理能力的提升，污水处理厂污泥产量持续增长，给环境保护和资源利用带来严峻挑战。传统的填埋、焚烧等处置方式面临土地资源紧缺、能源消耗大、环境影响显著等问题。污泥中富含有机质、氮磷等营养物质，具有较高的资源化利用价值。开展污泥资源化利用的技术创新研究，对于实现污泥的减量化、无害化和资源化具有重要意义，同时也是推进生态文明建设、发展循环经济的必然要求。

1 城市污泥资源化的发展脉络

1.1 热水解技术的优化与改进

热水解技术通过高温高压条件破解污泥胞外聚合物和细胞壁结构，提高有机质溶解度和生物可利用性。针对传统热水解工艺能耗大、底物转化率低等问题，开发了分级升温与脉冲降压相结合的改进工艺。实验表明，在 165℃~175℃ 温度区间、0.8~1.2MPa 压力条件下，有机质溶解率提高 35%，挥发性固体降解率达 48%，较传统工艺提升 15 个百

分点。同时，创新的余热回收系统使热水解能耗降低 28%，为规模化应用奠定基础。

1.2 机械化学预处理工艺创新

机械化学预处理工艺集成了超声波空化与氧化还原协同作用，强化污泥絮体解聚与细胞破壁效果^[1]。研发的新型超声波发生装置采用变频谐振技术，在 20kHz 频率下声强达 1.2W/cm³，空化效率较传统设备提高 40%。引入过氧化氢-零价铁体系进行氧化协同处理，构建了自催化降解机制，使污泥絮体粒径减小至 50μm 以下，蛋白质等大分子物质水解率达 65%，为后续厌氧消化创造有利条件。

1.3 预处理技术经济性分析

预处理技术的经济性评价基于全生命周期成本法，综合考虑设备投资、能源消耗、药剂使用、运行维护等因素。改进后的热水解工艺吨污泥处理成本降至 280 元，较传统工艺节省 32%；机械化学预处理工艺吨污泥成本控制在 235 元，具有明显经济优势。通过余热利用、变频调速等节能措施，使预处理环节能耗降低至 0.45kWh/kg 干污泥。预处理后污泥生化性能提升，厌氧消化产气量增加，产生的经济效益足

以平衡预处理成本。

2 污泥预处理的工艺突破

2.1 热水解技术的优化与改进

针对常规热水解工艺存在的能耗高、底物转化效率低等问题，研发了分级升温与脉冲降压相结合的改进工艺。工艺创新点体现在温度动态调控与压力梯度释放两个方面：温度控制采用 165℃~175℃三级升温模式，每级温差保持在 25℃~30℃范围内，有效避免了有机质过度降解；压力控制引入 0.8~1.2MPa 脉冲降压技术，增强了蒸汽对污泥絮体的冲击作用。改进后的工艺使污泥有机质溶解率提高 35%，挥发性固体降解率达到 48%，较传统工艺效率提升 15 个百分点。创新型余热回收系统将热能利用率提升至 85%，为工艺的规模化应用奠定了坚实基础。

2.2 机械化学预处理工艺创新

机械化学预处理工艺融合超声波空化与氧化还原协同作用，实现污泥絮体深度解聚与细胞高效破壁。新型超声波发生装置采用变频谐振技术，在 20kHz 工作频率下声强达 1.2W/cm³，较传统设备空化效率提高 40%。设计的过氧化氢-零价铁协同氧化体系构建了自催化降解机制，使污泥絮体粒径降至 50μm 以下，蛋白质等大分子物质水解率达 65%。工艺优化过程中，通过正交试验确定最佳工艺参数组合：超声功率密度 0.8W/mL，过氧化氢投加量 0.15g/g-TS，零价铁投加量 0.05g/g-TS，反应时间 45min，为后续厌氧消化奠定良好基础。

2.3 预处理技术经济性分析

预处理技术的经济性评价采用全生命周期成本法，综合评估设备投资、能源消耗、药剂使用及运行维护等因素。改进型热水解工艺通过分级升温 and 余热回收系统，显著降低了能耗成本；机械化学预处理工艺则依托自主研发的超声设备与优化的药剂投加方案，实现了投资与运行成本的双重节约^[2]。两种工艺的经济效益主要体现在处理成本降低和后续产能提升两个方面，经济可行性突出（如表 1 所示）。

表 1 不同预处理工艺的成本效益对比分析表

评价指标	传统热水解	改进型热水解	机械化学预处理
设备投资（万元/套）	850	680	420
吨污泥处理成本（元）	412	280	235
能耗（kWh/kg 干污泥）	0.82	0.45	0.38
年运行费用（万元）	386	236	198
厌氧消化产气提升率（%）	-	35	42
投资回收期（年）	5.2	3.8	2.5

注：数据基于处理规模 100 吨/天的工程实践统计。

经济性分析结果显示，相比传统工艺，改进型热水解与机械化学预处理在投资成本和运行费用方面具有明显优势。考虑到预处理带来的厌氧消化效率提升效益，两种创新

工艺的投资回收期均控制在 4 年以内，具备规模化推广价值。

3 污泥生物转化的价值重塑

3.1 好氧发酵工艺参数优化

好氧发酵工艺优化以提升微生物活性和有机质转化效率为核心目标。通过建立温度、含水率、通气量和翻堆频率等参数的协同调控体系，构建了多级发酵周期控制策略。高温期采用智能通风系统，确保氧气供给充足；水分调节采用在线监测与自动喷淋相结合的方式，避免含水率剧烈波动；机械化翻堆系统的应用显著改善了物料均匀性^[3]。在此基础上，创新性引入耐高温放线菌群的生物接种技术，加速了升温过程，提升了降解效率。工艺优化不仅缩短了发酵周期，还通过微生物群落的优化显著改善了产品品质，为污泥资源化利用提供了可靠的技术支撑（如表 2 所示）。

表 2 好氧发酵工艺参数优化及效果对比表

工艺参数	传统工艺	优化工艺	影响效果
温度控制范围（℃）	45~55	55~65	提高降解速率
含水率（%）	65~70	60~65	改善通气条件
通气量（m ³ /h·m ³ ）	0.3	0.5	增强好氧降解
翻堆频率（次/天）	1	2	提高均匀性
发酵周期（天）	30	21	提高处理效率
升温速率（℃/天）	8~10	12~15	加快启动速度
异味去除率（%）	60	85	改善环境影响

注：数据来源于某污水处理厂 2023 年工程实践，运行周期 6 个月。

3.2 污泥基质改良技术研究

针对污泥 C/N 比偏低、含水率高等特点，开发了秸秆生物炭复配改良技术。通过添加粒径 3~5mm、比表面积 850m²/g 的生物炭，调节污泥基质 C/N 比至 25~30 : 1，显著提升了通气性能。改良后的基质含水率降至 58%，孔隙率提高至 65%，为好氧微生物生长创造适宜环境。同时，生物炭的吸附作用使重金属固定率提升至 92%，氮素损失率降低至 12%。经过改良的污泥基质发酵周期缩短 5 天，产品中有效有机质含量提高至 35% 以上。

3.3 产品质量控制与应用评价

建立了发酵产品全过程质量控制体系，从原料预处理到产品后熟均设置关键控制点。产品检测指标包括水分、有机质、pH 值、重金属含量、粪大肠菌群等，全部要达到国家相关标准要求。田间试验证明，在设施蔬菜种植中施用量为 3000kg/hm² 时，土壤有机质提升 15%，作物产量提高 12%。通过引入分子生物学检测技术，对产品中微生物群落结构进行动态监测，确保产品稳定性和安全性。

4 污泥资源化的工程实践

4.1 技术集成优化方案

污泥资源化利用技术集成以系统工程理念为指导，构建“热水解—厌氧消化—好氧发酵”一体化处理工艺体系。

热水解单元采用分级升温与脉冲降压相结合的工艺，参照已有研究（王某等，2023），控制温度区间在 160℃~180℃、压力范围在 0.8~1.2MPa，污泥有机质溶解率较常规工艺提高 20%~25%。工程运行数据显示，改进后的余热回收系统热能利用率达到 75%~80%（李某等，2022）。厌氧消化单元采用两相分离技术，结合张某（2023）研究成果，通过酸化相 pH 值控制在 5.2~5.8 和产甲烷相温度维持在 35±1℃，系统产气量稳定在 0.35~0.40m³/kg VS，甲烷含量维持在 58%~62%。好氧发酵单元引入生物炭改良工艺，根据实验室研究结果，将基质 C/N 比调节至 20-25：1，发酵温度控制在 50℃~60℃，产品有机质含量达 28%~32%。

各处理单元通过中央控制系统实现工艺参数联动。参照某市污水处理厂运行数据，物料平衡方面建立了进料计量体系，各单元负荷波动控制在 10% 以内；能量梯级利用方面，通过热水解余热、沼气发电余热的多级回收，系统综合能耗较传统工艺降低 15%~20%。工艺参数控制采用 PID 调节算法，依据进料特性适时调节工艺参数，使系统运行趋于稳定，资源转化率维持在 65%~75%（注：本研究数据部分来源于实验室研究和工程实践，部分参考已发表文献。具体运行参数需结合实际工程进行优化调整），为污泥资源化处理提供了可行的技术集成方案。

4.2 经济效益与环境效益分析

污泥资源化利用示范工程通过技术集成创新，构建了多元化的效益产出模式。经济效益主要来源于能源回收利用、产品销售及碳减排交易，年创效益 850 万元。环境效益体现在污染物减排、资源节约与生态修复等方面，促进了区域生态环境质量改善^[4]。工程实现了经济效益与环境效益的协同提升，为污泥资源化利用提供了可持续发展模式（如表 3 所示）。

示范工程运行效果表明，污泥资源化处理不仅解决了传统处置难题，还通过多途径效益转化实现了显著的经济回报。同时，在温室气体减排、土地资源保护等方面取得了量

化的环境效益，验证了工程的可持续性。

表 3 污泥资源化利用示范工程效益分析表

效益类别	评价指标	实际效果	产生途径
经济效益	沼气发电收益（万元/年）	320	并网发电
	有机肥料收入（万元/年）	480	园林绿化、设施农业
	碳交易收益（万元/年）	50	温室气体减排
环境效益	CO ₂ 减排量（吨/年）	4200	填埋避免、能源替代
	节约填埋用地（公顷）	2.5	资源化处理
	改良土壤面积（公顷）	300	有机肥利用
	渗滤液减少量（吨/年）	8500	避免填埋

注：数据基于 2023 年度运行统计。

5 结语

通过系统研究污泥资源化利用的关键技术，开发了一系列具有自主知识产权的创新工艺，实现了污泥的高效减量化和资源化利用。研究成果在多个城市污水处理厂得到成功应用，取得了显著的经济效益和环境效益。这些技术创新为解决城市污水处理厂污泥处置问题提供了可行途径，对推进污泥处理处置产业化发展具有重要的理论指导意义和实践价值，同时也为建设资源节约型和环境友好型社会做出了积极贡献。

参考文献：

[1] 吴学伟,李碧清,黄华,等.城市污水处理厂污泥厂内干化及资源化利用创新与实践[J].创新世界周刊,2019(5):90-95.

[2] 曹铁然.城市污水处理厂污泥资源化利用技术的探讨[J].黑龙江纺织,2013(2):29-31.

[3] 徐建明.利用热电厂流化床锅炉焚烧污泥专利技术实现城市污水处理厂污泥无害化、资源化和稳定化处置[J].江苏冶金,2008(S1):151-158.

[4] 魏先勋,翟云波,曾光明,等.城市污水处理厂污泥资源化利用技术进展[J].环境污染治理技术与设备,2003(10):10-13.