

基于资源化利用视角的市政污泥高效处置技术集成 与环境风险控制研究

王付平

邯郸市城市排水管理中心，河北 邯郸 056001

DOI: 10.61369/ME.2024070021

摘要： 本文基于资源化利用视角，对市政污泥高效处置技术集成与环境风险控制进行研究。首先对市政污泥特性与资源化潜力进行了分析，其次分析了基于资源化利用视角的市政污泥高效处置技术集成与优化，最后论述了基于资源化利用视角的市政污泥高效处置环境风险评估与控制策略。

关键词： 资源化利用；市政污泥高效处置技术；环境风险控制

Research on the Integration of Efficient Disposal Technologies for Municipal Sludge and Environmental Risk Control from the Perspective of Resource Utilization

Wang Fuping

Handan City Urban Drainage Management Center, Handan, Hebei 056001

Abstract： Based on the perspective of resource utilization, this paper studies the integration of efficient disposal technologies for municipal sludge and environmental risk control. Firstly, the characteristics and resource utilization potential of municipal sludge were analyzed. Secondly, the integration and optimization of efficient disposal technologies for municipal sludge from the perspective of resource utilization were analyzed. Finally, the environmental risk assessment and control strategies for efficient disposal of municipal sludge from the perspective of resource utilization were discussed.

Keywords： resource utilization; efficient disposal technology for municipal sludge; environmental risk control

引言

随着全球城市化与工业化进程的加速，市政污泥作为污水处理的必然产物，其产量正以年均5%–10%的速度递增。据统计，我国每年产生的市政污泥（含水率80%计）已超6000万吨，其中仅约30%实现规范化处置，剩余部分因含有重金属、病原体、持久性有机污染物（POPs）等风险因子，面临“处置难、利用低、风险高”的三重困境^[1]。然而，市政污泥同时蕴含丰富的有机质（30%–70%）、氮磷钾（总养分≥5%）及能源物质（低位热值8–15 MJ/kg），若能通过技术集成实现资源化利用，不仅可缓解环境压力，更能转化为城市循环经济的重要资源节点。

一、市政污泥特性与资源化潜力分析

（一）污泥物理化学性质

市政污泥是污水处理过程中产生的半固态废弃物，其物理化学性质复杂，直接决定资源化利用方向与技术选择。

1. 含水率与脱水难度

初沉污泥含水率通常达95%–97%，剩余污泥含水率超99%，高含水率导致运输成本高且易引发二次污染。经机械脱水（如板框压滤）后，含水率可降至75%–85%，但仍需化学调理（投加聚合氯化铝、聚丙烯酰胺）或热干化（如流化床干燥）进一

步降低至40%以下，以满足后续资源化工艺要求。

2. 有机质与营养成分

污泥有机质含量约30%–60%（以挥发性固体计），富含氮（2%–5%）、磷（1%–3%）、钾（0.2%–0.5%）等植物必需元素，具备农业堆肥潜力。但部分工业废水混入的污泥可能含有害有机物（如多环芳烃、微塑料），需预处理去除^[2]。

（二）资源化利用路径筛选

基于污泥特性，当前主要资源化路径可归纳为三类：

1. 能源化利用

一方面，厌氧消化产沼气。通过微生物降解污泥有机质生成

甲烷（占沼气50%—70%），每公斤挥发性固体可产沼气100—300 L，折合标准煤0.1—0.3 kg。该技术适用于有机质含量高（VS>40%）的污泥，需配套预处理破碎细胞壁以提高产气效率。

另一方面，热化学转化。包括热解（300—600℃缺氧条件下生成生物炭、焦油和气体）和焚烧发电（热值约10—15 MJ/kg，需搭配尾气净化系统）。

2. 材料化利用

一方面，建材生产。污泥经高温焙烧（1000—1200℃）可制备陶粒、水泥掺合料或砖材。研究表明，污泥陶粒抗压强度达15—25 MPa，符合轻质建材标准，但需控制重金属浸出（如通过玻璃化固定）。

另一方面，吸附材料。污泥生物炭经活化后比表面积可达800—1200 m²/g，对水中重金属（如Pb²⁺去除率超90%）和有机污染物有高效吸附能力，可用于废水深度处理^[3]。

3. 农业化利用

一方面，采取堆肥化的方式。通过好氧发酵将污泥转化为有机肥，需控制C/N比（25—30:1）和温度（55℃以上维持7天以杀灭病原菌）。日本部分地区将污泥堆肥用于园林绿化，氮磷钾总养分达6%以上。

另一方面，土地改良。污泥中腐殖质可改善土壤结构，但需严格遵循重金属限值标准（如我国《农用污泥污染物控制标准》GB 4284-2018）。

（三）不同路径的环境风险识别

1. 能源化路径风险

主要表现在两个方面，一方面是重金属累积，厌氧消化后沼渣中重金属浓度可能升高（因水分减少），若直接农用需评估浸出风险；焚烧飞灰中重金属（如Hg、Cd）易通过大气扩散，需高效布袋除尘+活性炭吸附处理。另一方面是温室气体排放，厌氧消化过程中可能释放甲烷（全球变暖潜势是CO₂的28倍），需优化工艺减少泄漏；焚烧过程NO_x和二噁英的生成需通过低氮燃烧技术和活性炭吸附控制。

2. 材料化路径风险

首先，重金属浸出。建材制品在长期使用中可能释放重金属，需通过毒性浸出程序（TCLP）测试确保安全。例如，某污泥制砖项目因Cr浸出浓度超标0.5倍，需回炉添加稳定剂重新烧制。其次，能耗与污染。高温焙烧需消耗大量能源（约800~1200 kWh/t污泥），并产生窑炉废气（SO₂、粉尘），需配套脱硫除尘设备^[4]。

3. 农业化路径风险

首先，病原菌传播。堆肥若未达无害化温度（55℃以上），蛔虫卵死亡率不足95%，可能引发土壤生物污染。其次，有机污染物残留。污泥中微塑料（粒径<5 mm）和抗生素抗性基因（ARGs）可通过食物链传递，需开发高效去除技术（如臭氧氧化、纳米气泡处理）。

二、基于资源化利用视角的市政污泥高效处置技术集成与优化

（一）运用预处理技术提升污泥可处理性

预处理是污泥资源化的关键前置环节，旨在打破污泥胶体结

构、释放结合水并优化成分。要采用如下方式：首先，机械—化学联合调理。利用“板框压滤+FeCl₃+PAM”的联合处理方法，能够使污水中的水分含量由原本的98%减少到65%以下，并且可以有效地减小其粘稠度^[5]。例如，某污水处理厂改造后，每吨污泥脱水剂成本降低15元，泥饼产量减少30%。其次，超声波破碎技术。利用20—40 kHz超声波（能量密度0.5~2 kW/L）破坏污泥细胞壁，使胞内有机质释放率提升40%—60%，显著提高后续厌氧消化产气效率（增幅达25%）。第三，低温热干化。采用热泵干化技术（温度40—60℃），可将污泥含水率从80%降至30%以下，避免高温导致的重金属形态变化，同时减少能耗（比传统热干化节能40%）。

（二）推动资源化核心技术集成

构建“预处理—核心转化—产物利用”技术链，实现污泥减量化与价值最大化。首先，采用能源—材料协同处置模式。主要表现在厌氧消化+生物炭制备，污泥经超声波预处理后进入厌氧消化池（停留时间20天），产沼气用于发电；消化后的沼渣经低温热解（500℃，N₂氛围）制备生物炭，其对Cu²⁺吸附容量达45 mg/g，可用于工业废水处理。该模式使污泥减容率超70%，同时产生电能和吸附材料，综合收益提升50%。其次，建材化全链条技术集成。采取脱水污泥+粉煤灰+石灰石→混合造粒→烧结陶粒的工艺路线，控制污泥掺量≤20%（避免影响陶粒强度），经1100℃焙烧2小时，产品吸水率<10%，重金属浸出量均低于国家标准。某项目年处置污泥2万吨，生产陶粒5万立方米，替代传统砂石减少碳排放3000吨/年^[6]。第三，运用农业化安全利用技术包。利用“高温堆肥+稳定化”组合工艺，采用条垛式堆肥（强制通风），添加竹炭（5%）和磷酸氢钙（3%），堆体温度维持60℃以上10天，蛔虫卵死亡率100%，重金属有效态降低30%—50%。产物经检测符合《有机肥料》（NY/T 525-2021）标准，可用于经济作物种植。

（三）健全智能化调控系统保障工艺稳定

首先，进行多参数在线监测。在厌氧消化池安装pH、ORP、沼气成分（CH₄、CO₂、H₂S）传感器，实时调控进料负荷与搅拌频率，避免酸化或产气波动。某项目引入该系统后，沼气产量稳定性提升25%，设备故障率降低18%。其次，构建数字化风险预警平台。集成重金属在线检测仪（如X射线荧光光谱仪）和病原菌快速检测模块（PCR技术），对堆肥产物、焚烧飞灰等关键节点实时监测，超标时自动触发应急处置程序（如回炉再处理）。第三，进行区块链溯源管理。利用区块链技术记录污泥从产生、处置到利用的全流程数据（如含水率、处理参数、产物去向），实现“来源可查、去向可追”，提升环境管理透明度。某试点项目通过该系统，污泥非法转移事件减少90%。

三、基于资源化利用视角的市政污泥高效处置环境风险评估与控制策略

（一）构建风险评估体系

首先，确定风险评估体系的核心维度。市政污泥资源化利用的环境风险具有“多介质、跨区域、长时效”特征，需从风险源、传播路径、受体暴露、生态影响四个维度构建评估体系，在风险源识别方面，要确定物理/化学风险，包括重金属（如镉、

汞、铅)、持久性有机污染物(POPs,如多环芳烃、二噁英)、病原体(细菌、病毒、寄生虫卵);以及生态风险,包括污泥土地利用可能导致的土壤重金属累积、地下水污染;焚烧处置产生的二噁英类大气污染物扩散。在传播路径分析方面,要合理区分不同处置方式的风险差异,如土地利用(直接接触、食物链传递)、焚烧(大气沉降)、建材利用(长期浸出);以及环境介质迁移,如重金属通过地表径流进入水体,病原体通过土壤渗透污染地下水。在受体暴露评估方面,要考虑到人群暴露,如农业从业者接触污泥改良土壤,焚烧厂周边居民吸入飘尘;以及生态受体,如土壤生物(蚯蚓等)、水生生物(河流底泥沉积影响)^[7]。构建地区环境容量的模型是必要的,并需将其与土壤基准水平和作物的重金属积累率相结合,以确定适合使用污泥的重金属限制值(例如《农业污泥污染物管理规范》GB 4284-2022)。其次,确定评估方法与技术工具。如风险矩阵法,通过风险发生概率与危害程度赋值,对重金属超标、病原体残留等风险进行分级(高、中、低风险);如生命周期评价(LCA),量化不同处置路径(如厌氧消化+土地利用、热干化+焚烧)的环境负荷,比较碳足迹、能耗及污染物排放差异;如运用地理信息系统(GIS),构建区域风险空间分布图,识别高风险区域(如靠近水源地的污泥临时堆放点);如采用生物监测技术,利用植物(如超积累植物)、微生物群落结构变化评估土壤生态风险^[8]。

(二) 运用关键风险控制技术

首先,进行源头减量与污染物分质控制。采用优化污水处理工艺,实施“雨污分流”减少初期雨水混入,降低污泥含水率;采用生物强化技术(如投加聚磷菌)提升磷回收率,减少化学污泥产生。进行重金属靶向去除,利用EDTA、柠檬酸等螯合剂洗脱污泥中重金属,适用于高浓度污染污泥;通过硫酸盐还原菌(SRB)代谢产物硫化物固定重金属,形成难溶硫化物沉淀。其次,采取资源化利用中的风险阻断技术。如稳定化/固化技术,投加铁盐、石灰等药剂降低重金属生物有效性,如FeCl₃可将污泥中弱酸提取态铅转化为残渣态,浸出浓度降低80%以上;污泥与建材原料(如粉煤灰、水泥)共烧结制备陶粒,重金属被固定在矿物晶格中,浸出毒性低于《危险废物鉴别标准》。如病原体灭活技术,堆体温度维持55℃以上持续15天,可杀灭蛔虫卵、大肠杆菌

等病原体,满足《城镇污水处理厂污泥处置 农用标准》;利用 γ 射线(剂量 ≥ 25 kGy)破坏病原体DNA,适用于高附加值污泥产品(如生物炭基肥)。第三,开展末端治理与应急管控。进行焚烧尾气深度净化,采用“SNCR(脱硝)+布袋除尘+活性炭吸附+湿法脱酸”组合工艺,确保二噁英排放浓度 ≤ 0.1 ng TEQ/m³,重金属(如汞) ≤ 0.05 mg/m³;进行渗漏液应急处理,在污泥暂存场设置HDPE防渗膜+地下水监测井,一旦检测到污染物泄漏,立即启动化学氧化(如芬顿试剂)或膜处理工艺^[9]。

(三) 构建全过程环境管理框架

首先,完善法规标准体系。细化分类管理,根据污泥重金属含量、病原体等级,将污泥划分为“可直接利用”“需处理后利用”“危险废物”三类,实施差异化管理。动态更新标准,结合区域土壤类型(如酸性红壤对重金属吸附能力弱),制定地方补充标准,如广东省《污泥处理处置污染控制标准》(DB44/T 2373-2021)对镉限值严于国家标准。其次,建立全链条监管机制。完善信息化溯源系统,开发“污泥电子标签”平台,记录从污水处理厂到处置终端的全流程数据(产量、成分、去向),实现“来源可查、去向可追”。做好跨部门协同监管,生态环境部门负责污染物排放监测,农业农村部门监管土地利用安全,住建部门统筹处置设施建设,形成闭环管理。第三,推动市场化与技术创新。建立成本分摊机制,实施“产生者付费+利用者补贴”政策,对污泥焚烧发电项目给予电价补贴,对土地利用项目按重金属削减量给予奖励。推动产学研用一体化,鼓励企业与高校合作开发低能耗技术(如太阳能干化、微生物燃料电池),建立“中试基地+示范工程”推广模式^[10]。

四、结语

随着“双碳”目标的深入推进与循环经济理念的普及,市政污泥处置将逐步从“被动治理”转向“主动增值”。通过技术、管理与制度的协同创新,有望将其打造为城市资源循环体系的关键节点,最终实现环境安全、资源节约与产业升级的多重目标,为全球固废治理提供“中国方案”。

参考文献

- [1] 郑秀亮. 协同处置为市政污泥提供良好出路 [J]. 环境, 2021(08):61.
- [2] 安叶; 张义斌; 黎攀; 陆明. 我国市政生活污泥处置现状及经验总结 [J]. 给水排水, 2021(S1):94-98.
- [3] 栗志翔. 市政污泥的处置及资源化利用综述 [J]. 科技风, 2021(07):121-122.
- [4] 侯磊; 杨阳; 王鹏鹏; 高山; 张景志; 王硕; 袁飞航; 李然然. 城市污水处理厂污泥堆肥产物复配水稻育苗基质的研究 [J]. 农业开发与装备, 2021(02):128-130.
- [5] 郭家磊; 肖一帆; 李小燕; 王杰. 污水处理固体废弃物污泥的处置方法研究 [J]. 再生资源与循环经济, 2021(02):39-40+44.
- [6] 李如刚. 市政污泥资源化处置技术与关键点探析 [J]. 资源节约与环保, 2024, (03):130-134.DOI:10.16317/j.cnki.12-1377/x.2024.03.012.
- [7] 田森, 靳博路. 济南市市政污泥处理处置现状及对策研究 [J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(12):255-257.
- [8] 汪钧逸, 陈威, 吴远柱, 等. 市政污泥处理处置技术经济性分析与评价 [J]. 环境工程学报, 2023, 17(08):2695-2704.
- [9] 易洋, 陈立, 肖波, 等. 基于专利分析的市政污泥干化产业发展趋势 [J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(04):198-200.
- [10] 沈仿, 温小萍, 卢灿, 等. 市政污泥处理与资源化利用研究进展 [J]. 能源研究与管理, 2022, 14(03):36-41.DOI:10.16056/j.2096-7705.2022.03.007.