

城市污水处理厂污泥资源化利用技术路径研究

张弘

扬州凯通绿色环境咨询有限公司, 中国·江苏 扬州 225127

摘要: 城市污水处理厂污泥作为污水处理过程的主要副产物, 含有大量有机质、氮磷营养元素及重金属、病原菌等污染物, 若处置不当易造成二次污染。随着我国城镇化进程加快, 污泥产量逐年攀升, 传统“填埋+焚烧”处置模式面临土地资源紧张、碳排放高、资源浪费等问题, 污泥资源化利用成为破解处置困境的核心方向。本文围绕城市污水处理厂污泥的资源化利用展开研究, 首先分析污泥的理化特性与处置现状, 随后系统梳理堆肥农用、建材化、能源化、回收有价值物质四大类主流技术路径, 从技术原理、核心设备、应用条件、环境效益、经济成本等维度对比各路径的适用性, 最后针对技术落地中的重金属风险控制、工艺协同优化、政策保障等问题提出解决方案, 并展望“多元协同+智能管控”的未来发展趋势, 旨在为城市污泥资源化利用的工程实践提供理论参考, 助力“无废城市”建设与双碳目标实现。

关键词: 城市污水处理厂; 污泥; 资源化利用; 堆肥技术; 建材化; 能源化; 重金属风险控制

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

Zhang Hong

Yangzhou Kaitong Green Environment Consulting Co., Ltd., China Jiangsu Yangzhou 225127

Abstract: Sludge from urban sewage treatment plants, as the main byproduct of the sewage treatment process, contains a large amount of organic matter, nitrogen and phosphorus nutrients, heavy metals, pathogenic bacteria and other pollutants. Improper disposal can easily cause secondary pollution. With the acceleration of urbanization in China, the production of sludge has been increasing year by year. The traditional "landfill+incineration" disposal mode is facing problems such as land resource scarcity, high carbon emissions, and resource waste. The resource utilization of sludge has become the core direction to solve the disposal dilemma. This article focuses on the resource utilization of sludge from urban sewage treatment plants. Firstly, the physical and chemical characteristics and disposal status of sludge are analyzed. Then, the mainstream technology paths of composting for agriculture, building materials, energy, and valuable substance recycling are systematically sorted out. The applicability of each path is compared from the dimensions of technical principles, core equipment, application conditions, environmental benefits, and economic costs. Finally, solutions are proposed for the problems of heavy metal risk control, process collaborative optimization, and policy guarantee in the implementation of technology. The future development trend of "diversified collaboration+intelligent control" is also discussed, aiming to provide theoretical reference for the engineering practice of urban sludge resource utilization, and to assist in the construction of "waste free cities" and the achievement of dual carbon goals.

Keywords: Urban sewage treatment plant; Sludge; Resource utilization; Composting technology; Building materials; Energy conversion; Heavy metal risk control

0 引言

城市污水处理厂污泥是污水中悬浮固体、胶体颗粒及微生物群落经浓缩、脱水后形成的固态废弃物, 其成分复杂且具有“双重属性”: 一方面, 污泥中含有 30%-70% 的有机质、2%-6% 的氮元素、1%-3% 的磷元素, 同时富含钾、钙、镁等微量元素, 具备资源化利用的物质基础; 另

一方面, 污泥中可能富集重金属(如镉、铅、铬)、持久性有机污染物(如多环芳烃)及病原菌(如大肠杆菌、沙门氏菌), 若未经妥善处理直接排放或处置, 易通过土壤渗透、大气挥发等途径污染周边环境, 威胁生态安全与人体健康。

根据《2024 年中国环境状况公报》, 我国城市污水

处理厂年污泥产量（以含水率 80% 计）已突破 8000 万吨，且以每年 5%–8% 的速度增长。当前我国污泥处置仍以“填埋为主、焚烧为辅”，其中填埋占比约 50%，焚烧占比约 25%，资源化利用占比不足 20%。传统处置模式存在显著短板：填埋需占用大量土地资源，且易产生渗滤液污染地下水；焚烧虽能实现减量化，但设备投资高、运行能耗大，燃烧过程可能产生二噁英等有毒污染物；两者均未充分利用污泥中的有机质与营养元素，造成资源浪费。随着《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》《关于推进污泥减量化、稳定化、无害化和资源化处理的实施意见》等政策出台，明确要求 2025 年污泥资源化利用率达到 30% 以上，推动污泥从“被动处置”向“主动资源化”转型已成为必然趋势。

1 城市污泥资源化利用的主流技术路径

基于污泥的理化特性与资源属性，当前主流资源化利用技术可分为四大类，各类技术路径的技术特性与适用场景差异显著，具体分析如下：

1.1 堆肥农用技术：实现有机质还田，助力农业循环

技术原理：利用微生物的好氧发酵作用，将污泥与秸秆、锯末、稻壳等调理剂按比例混合（调节碳氮比至 25:1–30:1，含水率至 50%–60%），在通风供氧条件下，微生物分解污泥中的有机质，转化为稳定的腐殖质，同时通过发酵产热（温度升至 55℃ 以上并维持 5–7 天）杀灭病原菌与寄生虫卵，降低重金属生物有效性，最终形成符合《城镇污水处理厂污泥处置农用泥质》（GB/T 24600–2024）标准的有机肥料。

核心设备：发酵仓（条垛式、槽式、箱式）、翻抛机、通风系统、筛分设备、除臭装置。

应用条件：适用于有机质含量 $\geq 30\%$ 、重金属含量符合农用标准的污泥，需配套农业种植基地或有机肥销售渠道，避免远距离运输增加成本；不适用于重金属超标或含高浓度持久性有机污染物的污泥。

环境与经济效益：环境效益方面，可减少污泥填埋占地与碳排放，有机肥料替代化肥能改善土壤结构、提升土壤肥力；经济效益方面，吨污泥堆肥成本约 200–300 元，成品有机肥售价约 500–800 元 / 吨，具备一定盈利空间，但需规模化生产降低单位成本。

优点：技术成熟、操作简单、资源化率高，符合农业循环经济需求；缺点：发酵周期长（20–30 天）、占地面积大，需严格控制产品重金属含量，避免长期施用导致土

壤重金属累积。

1.2 建材化利用技术：替代天然资源，减少建材行业能耗

技术原理：利用污泥中的无机成分（如硅、铝、钙）与有机质燃烧后的灰烬，通过“预处理–成型–固化/烧结”工艺，将污泥转化为建筑材料，主要包括污泥制砖、制陶粒、制水泥缓凝剂方向。例如，污泥制砖时，将脱水污泥（含水率 60% 以下）与黏土按 3:7–5:5 比例混合，经陈化、成型后送入窑炉烧结（温度 800–1000℃），有机质燃烧形成孔隙，黏土与污泥无机成分烧结成砖；污泥制陶粒时，将污泥与粉煤灰、页岩混合造粒，经高温焙烧（1100–1200℃）形成轻质高强的陶粒，用于混凝土骨料或保温材料。

核心设备：搅拌机、成型机、烧结窑（回转窑、隧道窑）、破碎机、筛分机。

应用条件：适用于无机成分含量高（ $\geq 40\%$ ）、重金属含量较高（不适宜农用）的污泥，需靠近建材生产基地或建筑工程现场，降低运输成本；制砖工艺对污泥含水率要求严格，需配套脱水或干燥设备。

环境与经济效益：环境效益方面，可替代黏土、粉煤灰等天然建材资源，减少矿山开采与植被破坏，烧结过程实现污泥减量化（减容率达 80% 以上）与无害化；经济效益方面，吨污泥建材化成本约 300–500 元，成品砖或陶粒售价与传统建材接近，若享受资源综合利用补贴，盈利空间可进一步扩大。

优点：处理量大、无害化彻底（高温烧结杀灭污染物）、产品附加值较高；缺点：设备投资高（烧结窑等设备需千万级投入）、运行能耗大，部分工艺（如制砖）可能受建筑行业市场波动影响。

1.3 能源化利用技术：回收有机质能量，实现能源自给

技术原理：利用污泥中的有机质通过厌氧消化、焚烧发电、热解气化等方式产生能源，将污泥的“污染物属性”转化为“能源属性”。其中，厌氧消化是当前应用最成熟的技术：将污泥（含水率 85%–90%）送入厌氧消化罐，在无氧环境下，产甲烷菌将有机质分解为甲烷（ CH_4 ，含量 50%–60%）、二氧化碳等混合气体（沼气），沼气经提纯后可作为燃料用于发电、供暖，或压缩为生物天然气（CNG）；消化后的沼渣可进一步脱水干化后填埋、焚烧或建材化利用，沼液经处理后达标排放或回用。

核心设备：厌氧消化罐（CSTR、UASB）、沼气提纯

装置、发电机、沼液处理系统。

应用条件：适用于有机质含量 $\geq 40\%$ 、挥发性固体(VS)含量高的污泥，需建设在能源需求稳定的区域（如污水处理厂自用、周边工业园区供暖）；厌氧消化对温度敏感，需配套加热系统（中温 35°C 左右或高温 55°C 左右），北方地区需考虑保温成本。

环境与经济效益：环境效益方面，厌氧消化减少甲烷排放（甲烷温室效应是 CO_2 的28倍），沼气发电替代化石能源可降低碳排放；经济效益方面，吨污泥厌氧消化可产沼气 $15\text{--}30\text{m}^3$ ，发电 $30\text{--}60\text{kWh}$ ，若污水处理厂自用发电，可降低 $10\%\text{--}20\%$ 的外购电成本，沼渣、沼液资源化可进一步提升收益。

优点：能源回收效率高、运行成本较低（厌氧工艺能耗低于焚烧）、污染物排放量少；缺点：厌氧消化周期长（ $20\text{--}30$ 天）、对污泥预处理要求高（需去除砂砾等杂质），沼气提纯与储存技术难度较大。

1.4 有价物质回收技术：提取稀缺资源，提升附加值

技术原理：针对污泥中富含的氮、磷、重金属等特定物质，通过化学沉淀、吸附、膜分离等技术进行定向回收，实现“精准资源化”。例如，磷回收：污泥经厌氧消化后，沼液中含有大量磷酸盐，通过投加氯化钙、氯化镁等药剂，使磷酸盐形成磷酸钙（羟基磷灰石）、磷酸镁铵（鸟粪石）等沉淀物，分离后可作为磷肥或工业磷源；重金属回收：对于重金属含量高的污泥，通过酸浸、螯合等方式将重金属从污泥中溶出，再通过电解、沉淀等技术提纯，回收铜、锌、镍等有价金属。

核心设备：反应釜、沉淀罐、过滤机、膜分离装置、电解槽。

应用条件：适用于氮磷含量高（如市政污泥）或重金属含量高（如工业废水协同处理的污泥）的特定污泥，需具备成熟的有价物质销售渠道（如化肥厂、金属回收企业）；技术对污泥成分稳定性要求高，成分波动大可能影响回收效率。

环境与经济效益：环境效益方面，磷回收减少对磷矿资源的依赖（磷矿为不可再生资源），重金属回收避免其进入环境造成污染；经济效益方面，吨污泥磷回收可产磷酸钙 $0.5\text{--}1.0\text{kg}$ ，若磷价较高（如超过 5000 元/吨），具备一定盈利潜力，重金属回收收益随金属市场价格波动较大。

优点：资源利用率极高、产品附加值高、符合“循环

经济”理念；缺点：技术复杂度高、针对性强（不同物质需不同工艺）、规模化应用案例较少，目前多处于实验室或中试阶段。

2 污泥资源化利用技术落地的挑战与优化策略

2.1 核心挑战

污染物风险控制难：污泥中的重金属、病原菌是资源化利用的主要障碍，例如堆肥农用可能导致土壤重金属累积，建材化产品若重金属溶出超标可能影响建筑安全，需建立严格的污染物管控标准与检测体系。

工艺协同性不足：单一技术路径难以实现污泥全组分资源化，例如厌氧消化产生的沼渣需配套建材化或堆肥工艺，但若各工艺间衔接不畅（如沼渣运输成本高、处理能力不匹配），易造成“二次浪费”。

政策与市场支撑弱：部分资源化产品（如污泥有机肥）市场认可度低，消费者担心污染物风险；资源综合利用补贴政策（如税收减免、电价优惠）覆盖范围有限，企业投资积极性不足。

2.2 优化策略

强化污染物风险管控：建立“源头减量 - 过程控制 - 末端检测”全链条管控体系，源头减少工业废水混入市政污水（降低污泥重金属含量）；过程中采用预处理技术（如化学淋洗、钝化稳定）降低污染物活性，例如堆肥时添加石灰、黏土等钝化剂固定重金属；末端严格检测资源化产品（如有机肥重金属含量、建材重金属溶出量），确保符合国家标准。

推动多工艺协同耦合：推广“厌氧消化 + 堆肥 + 建材化”多元协同模式，例如污水处理厂污泥先经厌氧消化回收能源，沼渣堆肥生产有机肥，堆肥残渣建材化制砖，实现污泥“能源 - 肥料 - 建材”全资源回收；或采用“区域协同”模式，将周边污水处理厂污泥集中运输至规模化资源化中心，统一处理并分配产品，降低单位成本。

完善政策与市场机制：加大政策支持力度，对污泥资源化项目给予土地、税收、信贷优惠，将污泥有机肥纳入农业补贴范围，鼓励政府采购；加强市场培育，通过宣传教育提升消费者对资源化产品的信任度，建立“生产者责任延伸制度”，要求污水处理厂与资源化企业签订长期合作协议，保障产品销路。

3 污泥资源化利用的发展趋势

未来城市污水处理厂污泥资源化利用将朝着“精细化、协同化、智能化”方向发展：

技术精细化：针对不同类型污泥（如市政污泥、工业协同处理污泥）开发定制化技术，例如工业污泥侧重重金属回收，市政污泥侧重能源与肥料回收；同时发展低能耗预处理技术（如超声波预处理提升厌氧消化效率），降低运行成本。

系统协同化：推动污泥资源化与污水处理、垃圾处理、农业生产的系统协同，例如污泥厌氧消化沼气为污水处理厂曝气系统供电，沼液回用于厂区绿化或农业灌溉，实现“污水-污泥-能源-农业”循环闭环；或与垃圾焚烧厂协同，利用焚烧余热为污泥干化提供热源，降低能耗。

4 结语

城市污水处理厂污泥资源化利用是破解“污泥围城”、实现“无废城市”的关键路径，其核心在于根据污泥特性、区域需求与经济条件，选择适配的技术路径，避

免“一刀切”式发展。当前堆肥农用、建材化、资源化技术已具备工程应用条件，有价物质回收技术需进一步突破规模化瓶颈。未来需通过技术创新、政策支持与市场培育，推动污泥资源化从“单点示范”走向“规模化推广”，最终实现污泥的“减量化、稳定化、无害化、资源化”，为城市生态环境改善与绿色低碳发展提供重要支撑。

参考文献：

- [1] 周曼. 污水处理厂污泥处理及资源化利用——以某城市污水处理厂污泥制透水砖项目为例[J]. 绿色科技, 2022,24(08):117-119.
- [2] 李慧, 钟磊, 边康玲. 城市污水处理厂污泥资源化利用研究[J]. 造纸装备及材料, 2022,51(03):159-161.
- [3] 周继. 城市污水处理厂污泥资源化利用途径分析[J]. 中国资源综合利用, 2021,39(06):80-82.