

# 工业园区污水处理厂污泥处置方式的环境影响分析

余寒楚<sup>1</sup> 王钟艳<sup>1</sup> 朱玮<sup>1</sup> 刘梓璇<sup>2</sup>

1.杭州润辉环保能源科技有限公司 浙江 杭州 310000

2.杭州南其科技有限公司 浙江 杭州 310000

**【摘要】**：工业园区污水处理厂在处理过程中产生的污泥，若不合理处置，将对环境造成严重影响。本文分析了污泥处置方式，如填埋、焚烧和堆肥的环境影响，并探讨了其优缺点。研究指出，污泥处理过程中需要综合考虑环境影响、经济成本和技术可行性，提出了一种优化的污泥处置方案，旨在减少环境污染、提高资源回收利用效率。针对未来污泥处理的发展方向，提出了更绿色、可持续的技术应用。同时补充不同类型工业园区污泥特性量化数据、各处置方式核心影响因素及防控难点，完善优化方案实施路径、资源化利用规范，并增加中小型工业园区低成本处置方案，提升研究的实用性与普适性。

**【关键词】**：污水处理；污泥处置；环境影响；资源回收；工业园区；分质处置；低成本处置

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.082

## 引言

工业园区作为经济快速发展的重要载体，伴随而来的污水处理问题日益严峻。随着环保标准的提升，污泥的处理成为污水处理厂面临的重要难题。污泥的处置方式不仅影响着周边环境的质量，还涉及到土地利用、空气质量和水资源保护等多个方面。不同的污泥处置方法，诸如填埋、焚烧和堆肥等，每种方法对环境的影响也有所不同。有效的污泥管理措施在保障环境安全、提升资源回收利用效率等方面具有重要意义。因此，评估各种污泥处理方式的环境影响，并为工业园区提出科学合理的污泥处理方案，成为当前亟待解决的关键问题。尤其不同类型工业园区污泥特性差异显著，中小型园区面临资金、技术瓶颈，亟需针对性的处置方案与资源化利用规范，实现污泥“处置-资源-再利用”的闭环管理。

## 1 污泥处置方式对环境的影响

### 1.1 填埋方式的环境影响

污泥填埋是常见的污泥处置方式，但对环境负面影响显著。填埋场内，污泥长期堆积分解会释放大量甲烷，作为强效温室气体，对气候变化影响突出；污泥中的重金属、持久性有机污染物及病原微生物，会通过渗透污染地下水，严重威胁生态系统与人类健康。若填埋场管理不当，易出现渗漏、气体外泄等问题，加剧污染风险，即便采取防渗透和气体回收措施，效果仍有限，且长期堆积的污泥处理难度大、资金技术投入高，还会占用大量土地，影响土地可持续利用<sup>[1]</sup>。其核心影响因素源于防渗层破损、渗滤液收集系统失效，以及污泥压实不足、覆盖不及时和未充分稳定化处理。二次污染防控存在诸多难点，防渗层易老化破损且破损点难检测，渗滤液成分复杂、处理难度大成本高，甲烷气体回收效率有限，约30%-40%会无组织泄漏，难以全面管控。

### 1.2 焚烧方式的环境影响

污泥焚烧在污泥减容和成分稳定方面具有一定优势，但同

时伴随明显的环境影响。高温焚烧过程中，污泥中的有机物和重金属会释放到空气中，其中燃烧产生的二恶英是极具致癌性和致突变性的有毒气体，即便浓度较低，也会对人类健康造成长期危害。为控制有害气体排放，需配备高效气体净化装置，这会额外增加能源消耗与操作成本。焚烧的核心影响因素主要有三点：一是燃烧温度不足（低于850℃），导致有机污染物无法完全分解，进而生成二恶英；二是污泥进料不均、助燃剂添加不足，造成燃烧不充分，产生大量颗粒物、氮氧化物和硫化物；三是烟气净化系统运行效率低，导致有害气体未经充分处理直接排放。二次污染防控存在诸多难点：飞灰属于危险废物，含高浓度重金属和二恶英，需经稳定化、固化处理才能填埋，流程复杂且成本高；灰渣中重金属易浸出，直接用于建材可能导致土壤和水体污染；焚烧产生的硫化氢、氨气等恶臭气体收集难度大，易无组织排放，影响周边空气质量<sup>[2]</sup>。

### 1.3 堆肥方式的环境影响

堆肥是一种相对绿色的污泥处置方式，主要依靠微生物降解作用，将污泥中的有机物转化为稳定的肥料产品，但在实施过程中仍会产生一定环境影响。堆肥过程中，污泥中的水分和有机物被分解，尤其在高温、湿润环境下，易释放氨气、硫化氢等有害臭气，对空气质量构成威胁；为防控气体污染，堆肥设施需配备完善的气体收集与处理系统，这无疑增加了处理成本和技术要求。堆肥的核心影响因素包括三点：一是碳氮比失衡或湿度控制不当，导致微生物降解效率下降，产生大量恶臭；二是原料污泥重金属超标，造成堆肥产品重金属累积，无法安全利用；三是堆肥腐熟度不足，未分解有机物进入土壤引发二次污染。其二次污染防控存在诸多难点：恶臭气体成分复杂，收集和处理难度大，常规吸附法处理效果有限，达标排放稳定性差；重金属无法彻底去除，仅能通过稳定化降低浸出性，长期农用仍可能导致土壤重金属累积；堆肥残渣处置不当易滋生病原微生物，进而污染土壤和水体。

## 2 污泥处置对环境影响的分析方法

### 2.1 环境影响评估指标

为了全面评估污泥处置的环境影响，需要建立一系列综合的评估指标。这些指标通常包括空气质量、水质影响、土壤污染、噪音污染以及生态影响等方面。在空气质量方面，评估指标主要关注废气排放中的有害物质，如二恶英、氮氧化物、硫化物和颗粒物等，其中污泥焚烧过程中氮氧化物排放浓度通常为 150-300mg/m<sup>3</sup>，颗粒物排放浓度约为 30-80mg/m<sup>3</sup>，未配备高效净化装置时二恶英排放浓度可能超过 0.1ng TEQ/m<sup>3</sup> 的国标限值。水质影响则主要评估污泥处理过程中可能渗透进入水体的有毒物质和重金属的浓度变化，尤其是对于地下水源的污染风险，污泥填埋场渗滤液中重金属浓度可达 0.5-5mg/L，远超地下水Ⅲ类标准中重金属限值（通常≤0.01-0.1mg/L）。土壤污染的评估则侧重于污泥中的重金属、持久性有机污染物等污染物是否在堆肥或填埋过程中进入土壤，影响土壤健康与农业生产，长期施用污泥堆肥的土壤中，铅、镉等重金属含量可能每年增加 0.05-0.2mg/kg，超出土壤环境质量农用地标准。生态影响评估则考虑到污泥处置对周围生态系统的长远影响，包括生物多样性的降低和栖息地的破坏，研究表明，污泥填埋场周边 1km 范围内，植物覆盖率较周边区域降低 20%-35%，土壤微生物活性下降 15%-25%。噪音和气味污染也需要通过相关的测量和监控进行评估，污泥处置过程中噪音可达 75-90dB，超出居民区昼间 60dB、夜间 50dB 的限值；臭气浓度通常为 100-500OU/m<sup>3</sup>，超出无组织排放限值（20OU/m<sup>3</sup>）。通过这些指标的综合分析，可以为污泥处置方式的选择提供依据，帮助减少潜在的环境风险。

### 2.2 污泥处置方式的环境影响量化方法

常见的量化方法包括生命周期评价（LCA）、生态足迹分析、风险评估等。生命周期评价是一种系统评估方法，旨在分析污泥处置过程中每一环节（从污泥的产生到处置后处理）的资源消耗、环境排放、能源使用等方面的影响，以处理 1 吨含水率 80% 的污泥为例，填埋方式的生命周期环境影响潜值约为 12-18Pt，焚烧方式约为 8-14Pt，堆肥方式约为 4-9Pt，量化差异明显。通过生命周期评价，可以明确每种处置方式在不同阶段对环境的负面影响，并为决策提供量化的依据。生态足迹分析则通过计算污泥处置过程中对自然资源的消耗、生态系统服务的损失等指标，量化其对生态环境的影响程度<sup>[3]</sup>。而风险评估则侧重于识别污泥处置过程中可能带来的潜在风险，并评估其发生的概率和后果，尤其是在较为敏感的区域或条件下，例如在饮用水源保护区周边，污泥填埋的地下水污染风险概率可达 30%-45%，焚烧的大气污染风险概率约为 20%-30%。结合这些量化方法，可以为不同污泥处置方式的环境影响提供定量分析，帮助政策制定者和相关企业做出科学合理的决策。

## 2.3 不同类型工业园区污泥特性量化分析

为实现污泥“分质处置”，明确不同类型工业园区污泥特性差异，结合国内典型园区监测数据，对化工、轻工、综合类工业园区污泥核心指标进行量化分析，具体如下：化工园区：以重化工、精细化工为主，污泥含水率较高，通常为 82%-88%；重金属含量显著偏高，其中铅含量为 120-350mg/kg、镉含量为 5-18mg/kg，远超农用标准；有机物占比相对较低，约为 25%-35%，且含有苯系物、多环芳烃等持久性有机污染物，处置难度最大。轻工园区：以食品加工、纺织印染、造纸为主，污泥含水率为 78%-85%；重金属含量较低，铅含量为 30-80mg/kg、镉含量为 0.5-3mg/kg，基本符合堆肥预处理标准；有机物占比高，约为 40%-60%，可生化性强，适合资源化利用。综合类园区：涵盖工业生产与生活污水混合处理，污泥特性介于化工与轻工园区之间，含水率为 80%-86%；重金属含量中等，铅含量为 60-150mg/kg、镉含量为 1-6mg/kg；有机物占比为 35%-45%，需根据实际混合比例调整处置方案。上述量化差异为后续分质协同处置方案提供了核心数据支撑，确保处置方式与污泥特性精准匹配。

## 3 污泥处置优化方案的提出

### 3.1 污泥处置优化方案的方向

从环境角度看，优化方案应选择那些能够最大限度减少污泥处置过程中的污染排放，并通过合理的资源化手段，降低污泥对生态环境的长期影响。经济效益方面，污泥处置技术不仅应考虑处理成本，还需考虑资源回收的潜力。堆肥技术能将污泥转化为有机肥料，焚烧过程中产生的热能也可以用于能源回收<sup>[4]</sup>。技术方面，优化方案需要依据污泥的实际成分与性质，选择最合适的处理方法，如采用厌氧消化结合脱水处理、焚烧与热解相结合、堆肥与农用化结合等多种技术手段。技术可行性则要求这些方法具有较高的技术成熟度，能够在实际应用中达到预期效果并具备长期稳定运行的能力。优化方案还应考虑政策法规的约束，确保符合国家和地方对污泥处置的环保标准。综合考虑这些因素，最佳方案应能够最大化资源回收效益，同时尽量减少环境污染和经济负担<sup>[5]</sup>。

### 3.2 工业园区污泥处置方案的具体步骤

工业园区污泥处置的可持续路径应基于循环经济的理念，强调污泥资源化和废物最小化的目标，核心实施路径为“污泥分质预处理-协同处置-产物资源化”的闭环流程，具体步骤如下：

1. 污泥分质预处理（核心步骤）：首先对园区产生的污泥进行批量检测，根据前文量化的污泥特性，分为三类：①高重金属污泥（铅>80mg/kg 或镉>3mg/kg），主要来自化工园区；②高有机物污泥（有机物占比>40%、重金属达标），主要来自轻工园区；③混合污泥（有机物占比 35%-45%、重金属中等），

来自综合类园区。对三类污泥分别进行预处理：高重金属污泥采用化学稳定化处理，降低重金属浸出性；高有机物污泥采用机械脱水+好氧发酵预处理，降低含水率至60%以下，提升可生化性；混合污泥采用脱水+筛分处理，分离杂质后分类进入后续处置环节。

2. 分质协同处置：①高重金属污泥：采用“焚烧+灰渣稳定化”处置，焚烧温度控制在850-1100℃，配套活性炭吸附+布袋除尘+脱硫脱硝系统，确保二恶英、颗粒物等达标排放；焚烧灰渣经稳定化处理后，用于建材原料（如制砖、路基填料）。②高有机物污泥：采用“厌氧消化+堆肥”协同处置，先通过厌氧消化产生沼气（用于发电或供热），消化后的污泥再进行堆肥处理，控制碳氮比和湿度，确保堆肥腐熟度达标。③混合污泥：采用“脱水+热解”处置，热解产物（燃气、炭黑）回收利用，热解残渣经检测达标后用于土壤改良。

以杭州某工业园区污泥处置实践为例，该园区初期采用污泥填埋方式，运营5年后，周边地下水检测发现重金属镉浓度超标0.3倍，土壤重金属累积量较初始值增加40%，随后园区停用填埋方式，引入污泥焚烧与堆肥协同处置模式：对含重金属浓度较高（铅含量>80mg/kg）的工业污泥采用焚烧处置，配套高效烟气净化系统，确保二恶英排放浓度低于0.05ng TEQ/m<sup>3</sup>，颗粒物排放达标率100%；对有机成分高、重金属达标的生活及轻工污泥采用堆肥处置，配套臭气收集处理系统，氨气排放浓度控制在10mg/m<sup>3</sup>以下，堆肥产品经检测符合农用标准，可用于园区周边绿化及农田改良。该案例清晰体现了协同处置的优势。

3. 产物资源化利用：严格遵循“分类利用、达标管控”原则，制定污泥处置产物资源化利用规范，具体如下：

(1) 堆肥产品农用分级规范：根据堆肥中重金属含量和腐熟度，分为三级：一级堆肥（铅≤50mg/kg、镉≤0.5mg/kg、腐熟度≥80%），可用于农田、蔬菜种植；二级堆肥（铅≤80mg/kg、镉≤1mg/kg、腐熟度≥70%），可用于果园、苗圃；三级堆肥（铅≤100mg/kg、镉≤2mg/kg、腐熟度≥60%），仅可用于园林绿化、矿山修复，禁止用于食用作物种植。堆肥产品需每批次检测，出具检测报告后方可投入使用，每年跟踪监测土壤重金属含量，防止累积污染。

(2) 灰渣建材利用要求：焚烧灰渣经稳定化处理后，需满足《污泥焚烧处置工程技术规范》（GB 51347-2019）要求，其中重金属浸出浓度需低于危险废物鉴别标准，方可用于制砖、路基填料等建材领域；禁止用于与饮用水接触的建材，使用前需提供灰渣检测报告，确保无环境风险。

(3) 沼气回收利用规范：厌氧消化产生的沼气经脱硫、脱水处理后，可用于园区自备电厂发电、蒸汽供应，或提纯后作为天然气替代能源；沼气燃烧过程中需配套尾气处理系统，

确保二氧化硫、氮氧化物达标排放，燃烧残渣可返回堆肥系统循环利用。

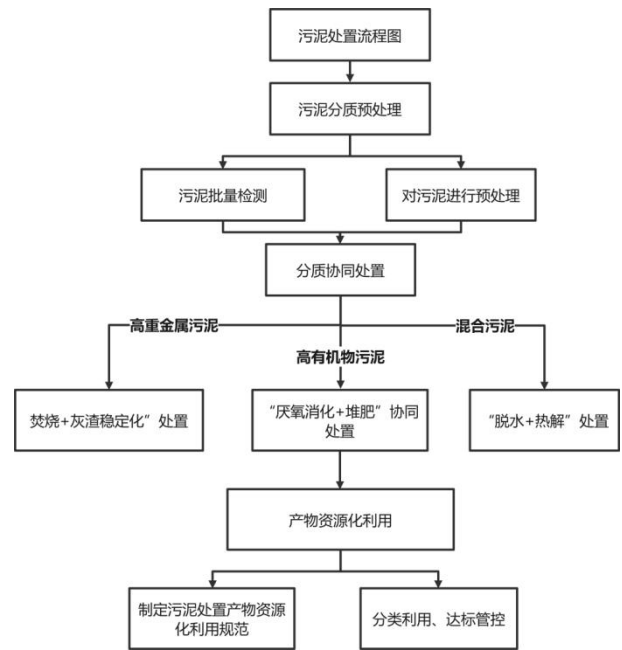


图1 工业园区污泥处置流程图

### 3.3 中小型工业园区低成本处置方案

针对中小型工业园区（污泥日产生量<50吨、资金有限、技术能力薄弱）的特点，提出低成本、易落地的处置方案，核心思路为“集中预处理+区域协同处置”，具体如下：

1. 低成本预处理技术：采用“机械脱水+石灰稳定化”组合工艺，替代高成本的化学稳定化和厌氧消化技术。机械脱水选用板框压滤机，将污泥含水率降至65%-70%，降低运输和处置成本；石灰稳定化添加量为污泥干重的8%-12%，可有效降低重金属浸出性，同时杀灭病原微生物，处理成本控制在80-120元/吨污泥。

2. 区域协同处置模式：中小型园区不单独建设焚烧、堆肥设施，与周边大型园区或专业污泥处置企业签订协同处置协议，将预处理后的污泥集中运输至专业设施进行处置，运输距离控制在50km以内，降低运输成本。对于高有机物污泥，可采用小型好氧堆肥装置，自行处理后用于园区内部绿化，减少处置费用。

3. 低成本防控措施：废气处理采用“活性炭吸附+喷淋洗涤”组合工艺，处理恶臭气体，设备投资约10-20万元，运行成本低、维护简单；渗滤液处理采用小型一体化处理设备，处理后达标排放或回用于园区绿化灌溉，避免建设大型渗滤液处理站，降低投资成本。

## 4 结语

污泥处置是工业园区污水处理过程中不可忽视的问题，合理选择处置方式对于环境保护和资源回收至关重要。通过对各

种污泥处理方式环境影响的深入分析,结合不同类型工业园区污泥特性量化数据、核心影响因素及防控难点,能够为实际操作中制定更为科学和高效的处理方案提供参考。本文提出的分质协同处置路径、资源化利用规范及中小型园区低成本方案,

进一步提升了方案的落地性和普适性。未来,随着技术的不断发展和环保要求的提升,污泥处置将朝着更加绿色、资源化的方向发展,逐步实现污泥的无害化、减量化与资源化。见下图。

### 参考文献:

- [1] 武子龙,宋昫达,张丽丽,陈翰,陈灯辉,黄魁.好氧颗粒污泥处理工业园区废水运行性能研究[J].绿色科技,2025,27(4):166-172.
- [2] 丁来保,田庆文,盘爱享,杨然,郭奇,朱津苇,房桂干.生物增效技术在工业园区污水处理厂的应用[J].中国给水排水,2024,40(16):121-125.
- [3] 时玉龙,鲍海鹏,蒋奇海,白煜,王金惠.污泥龄调控实现污水污泥资源化处理良性互动[J].工业水处理,2026,46(1):163-167.
- [4] 王侨,王光辉,胡啸,刘芳,许世伟,郑鹏凯.市政污泥处理处置工艺碳排放核算及碳减排路径[J].净水技术,2026,45(1):10-18.
- [5] 魏伟.污水厂污泥处理处置与资源化技术概述[J].当代化工研究,2025(17):82-84.