

环境工程中固体废弃物的处理和污染防治

张 慧

宁夏永明技术咨询有限公司 宁夏 银川 750001

摘 要：环境工程中固体废弃物处理与污染防治至关重要。固体废弃物来源广泛，含工业、生活、农业及危险废物等，成分复杂，处理不当将严重污染土壤、水体与大气。处理技术包括物理、化学、生物及热处理等，需根据废弃物特性选择。污染防治需坚持减量化、资源化、无害化原则，推行垃圾分类，提升处理能力，强化法规监管，并鼓励公众参与，构建政府、企业、公众协同治理体系，实现环境可持续发展。

关键词：环境工程；固体废弃物；处理；污染防治

引言：随着工业化与城市化进程的加快，环境工程中固体废弃物的产生量急剧攀升，其成分日益复杂，包含重金属、有机物、病原体等污染物，若处理处置不当，将严重威胁生态环境安全与人体健康。当前，固体废弃物污染已成为全球性环境挑战，亟需科学高效的治理策略。本文从固体废弃物的分类特性出发，系统梳理传统与新型处理技术，分析污染防治关键策略，并探讨现存问题与未来发展方向，以期为推动固体废弃物减量化、资源化和无害化提供理论参考。

1 环境工程中固体废弃物分类与特性分析

1.1 按来源分类

(1) 工业固废：产生于工业生产全过程，冶金行业排放钢渣、高炉渣等，含重金属与有害杂质；化工行业产生废催化剂、精馏残渣，多具腐蚀性与毒性；建材行业则以废混凝土、粉煤灰为主，虽部分可资源化，但大量堆积易占用土地。(2) 城市生活垃圾：源于居民日常生活与商业活动，可回收物包括废纸、塑料、金属等，经处理可循环利用；厨余垃圾占比超50%，富含水分与有机物，易腐烂发臭并滋生细菌；有害垃圾如废灯管、过期药品，含汞、抗生素等有害物质，需特殊处置。(3) 农业废弃物：农业生产与加工的副产品，秸秆年产量超8亿吨，随意焚烧会污染大气；畜禽粪便含大量氮、磷，若未经处理直排，易造成水体富营养化；农膜残留于土壤中，会破坏土壤结构，阻碍作物生长。(4) 危险废物：具有毒性、腐蚀性等危险特性，医疗废物如使用过的注射器、感染性敷料，携带病菌病毒；废电池含汞、镉等重金属，电子垃圾则含有铅、溴化阻燃剂，处置不当会严重危害生态与人体健康^[1]。

1.2 物理化学特性与污染风险

(1) 物理化学特性决定污染风险程度：重金属类固废在酸性环境下易浸出，如铅、镉会渗入土壤与地下

水，通过食物链累积危害人体；有机物污染如塑料垃圾，难降解且会释放微塑料，污染水体与土壤；微生物危害常见于厨余与医疗废物，易滋生沙门氏菌、新冠病毒等，通过空气与接触传播疾病。(2) 典型案例：广东贵屿电子垃圾拆解区，因长期露天焚烧与酸洗拆解，土壤中铅含量超国家标准100倍，地下水重金属超标，当地儿童血铅超标率达80%，同时拆解过程释放的二噁英等有毒气体，导致区域癌症发病率显著升高，成为固体废弃物不当处置引发严重环境与健康问题的典型案例。

2 环境工程中固体废弃物处理技术

2.1 传统处理技术

(1) 填埋技术：核心在于防渗系统设计，通常采用高密度聚乙烯膜+膨润土复合防渗层，防止渗滤液渗入土壤和地下水，防渗系数需 $\leq 10^{-7} \text{cm/s}$ ；渗滤液处理采用“预处理+厌氧生化+好氧生化+深度处理”工艺，COD去除率可达90%以上，处理后水质需满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889-2008)要求，避免二次污染。(2) 焚烧技术：二噁英控制是关键，通过控制炉膛温度 $\geq 850^\circ\text{C}$ 、烟气停留时间 $\geq 2\text{s}$ 、确保充分燃烧，可减少二噁英生成，后续采用活性炭吸附+布袋除尘组合工艺，二噁英去除率超99%；余热利用多通过余热锅炉产生蒸汽，驱动汽轮发电机组发电，每吨垃圾可发电300-500kWh，实现能源回收。(3) 堆肥技术：重点优化微生物发酵工艺，通过调节碳氮比(25:1-30:1)、含水率(50%-60%)和通风量，选用嗜热菌(如芽孢杆菌)加速有机物降解，堆肥周期可缩短至20-30天，成品需经筛分去除杂质，有机质含量 $\geq 30\%$ ，达到《有机肥料》(NY525-2021)标准后用于农业生产。

2.2 新型资源化技术

(1) 物理法：分选回收通过多工艺组合实现高效分离，磁选利用强磁场分离废铁、废钢等磁性物质，回收

率达95%以上；浮选借助表面活性剂使塑料、橡胶等轻质物料附着气泡上浮，纯度可达90%；光电分选基于物料光学特性差异，通过光谱识别分离玻璃、纸张，分选精度超85%。（2）化学法：热解气化在无氧或缺氧环境下，将有机物加热至600-1000℃分解为合成气（ $\text{CO}+\text{H}_2$ ），合成气可用于发电或制备甲醇，转化率约70%；等离子体处理利用高能等离子体（温度10000℃以上）裂解有害废物，将危废转化为无害气体和熔融渣，减容率超99%，且无二噁英生成^[2]。（3）生物法：微生物燃料电池利用产电微生物分解有机物，在产生电能（输出电压0.5-0.8V）的同时降解污染物，COD去除率达85%以上；蚯蚓堆肥引入蚯蚓（如赤子爱胜蚓），结合微生物协同作用，加速有机物分解，堆肥周期缩短至15-20天，且成品富含腐殖质，重金属吸附能力提升30%。

2.3 技术经济性对比

（1）处理成本：填埋技术成本最低，约80-150元/吨，但占用土地资源；焚烧技术成本180-250元/吨，需配套尾气处理设备；堆肥技术成本120-200元/吨，受原料含水率影响大；新型技术中，物理分选成本150-220元/吨，等离子体处理成本最高，达800-1200元/吨，微生物燃料电池仍处于试验阶段，成本约500元/吨。（2）环境效益：填埋技术易产生渗滤液和甲烷（温室气体），甲烷排放量约50-100m³/吨垃圾；焚烧技术减少垃圾体积80%-90%，但会排放NO_x和颗粒物（排放量 ≤ 50mg/m³）；新型资源化技术环境效益更优，热解气化温室气体排放量比焚烧低40%，蚯蚓堆肥可减少甲烷排放90%以上。

（3）资源回收率：填埋技术资源回收率几乎为0；焚烧技术能源回收率约30%-40%；物理分选资源回收率最高，金属、塑料等可回收物回收率达80%-90%；生物法资源回收率约50%-60%，可回收电能或有机肥；化学法资源回收率约60%-70%，主要回收合成气或熔融渣。

3 环境工程中固体废弃物污染防治关键策略

3.1 源头减量与清洁生产

（1）工业领域：核心是推广绿色制造工艺，从生产源头减少固废产生。以钢铁行业为例，短流程炼钢工艺通过“废钢+电弧炉”替代传统长流程“铁矿石+高炉”模式，省去焦化、烧结环节，固废排放量减少60%以上，每吨钢固废产生量从150kg降至50kg以下；化工行业采用无毒无害原料替代有毒试剂，如用生物催化剂替代化学催化剂，减少废催化剂产生量达40%，同时通过工艺优化实现资源循环利用，如氮肥生产中回收废气制氨水，年减少固废排放超万吨。此外，工业企业实施清洁生产审核，通过技术改造提升资源利用率，2024年全国重点工

业行业固废产生强度同比下降8.2%^[3]。（2）生活领域：重点评估垃圾分类制度实施效果，推动源头减量。以上海为例，自2019年实施垃圾分类以来，居民垃圾分类准确率从30%提升至85%以上，可回收物回收率从15%提高到38%，厨余垃圾单独收运处理量年均增长25%，生活垃圾填埋量减少40%；北京通过“撤桶并点+督导员引导”模式，全市生活垃圾无害化处理率保持100%，厨余垃圾资源化利用率达60%。全国范围内，垃圾分类制度使生活垃圾清运量增速从2019年的5.6%降至2024年的1.2%，源头减量成效显著。

3.2 过程管控与风险防控

（1）危废转运“电子联单”制度：通过全程信息化跟踪，实现危废从产生到处置的闭环管理。企业需在全国危险废物管理信息系统中填报危废种类、数量、去向等信息，生成电子联单；运输车辆配备GPS定位系统，实时上传运输轨迹；处置单位接收后在线确认，联单完成率需达100%。该制度有效遏制危废非法转移，2024年全国危废非法倾倒案件同比下降35%，危废规范处置率提升至98%，较制度实施前提高22个百分点。（2）焚烧厂二噁英在线监测系统：采用高灵敏度气相色谱-质谱联用技术，实时监测烟气中二噁英浓度，数据每小时上传至环保部门监管平台，超标时自动触发报警装置。系统还可联动焚烧炉控制系统，当二噁英浓度接近限值（0.1ngTEQ/m³）时，自动调节炉膛温度和供氧量，确保排放达标。目前全国生活垃圾焚烧厂已全部安装该系统，2024年焚烧厂二噁英达标排放率达99.5%，较无在线监测时提高15个百分点，有效降低大气污染风险^[4]。

3.3 末端治理与生态修复

（1）填埋场封场后生态恢复技术：采用“覆盖层+植被重建”模式，封场时先铺设黏土防渗层+土工膜，再覆盖30-50cm营养土，种植耐贫瘠、根系浅的植物（如紫花苜蓿、黑麦草）。同时构建渗滤液后续处理系统，通过人工湿地进一步净化尾水，COD去除率达80%以上；安装甲烷收集装置，将填埋气输送至燃气发电厂，年发电量可达100-300万kWh。以广州大田山填埋场为例，封场后5年植被覆盖率达10%提升至75%，土壤有机质含量增加3倍，周边地下水水质达到Ⅲ类标准，实现从“垃圾山”到“生态公园”的转变^[5]。（2）重金属污染土壤修复案例：针对固体废弃物堆存导致的土壤重金属污染，选用超富集植物吸收土壤中的重金属。如湖南某铅锌矿尾矿区，种植蜈蚣草（对砷的富集系数达2000以上），连续种植3年，土壤砷含量从500mg/kg降至80mg/kg以下，达到《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标

准》(GB36600-2018)要求;云南某电子垃圾拆解区,种植东南景天(对锌、镉富集能力强),土壤锌含量从1200mg/kg降至300mg/kg,镉含量从5mg/kg降至0.3mg/kg,修复后土壤可用于种植农作物,且农产品重金属含量符合食品安全标准。

4 环境工程中固体废弃物污染防治的挑战与对策建议

4.1 现存问题

(1)技术层面:低值废弃物(如废旧塑料薄膜、碎玻璃)处理成本高,因回收价值低、分选难度大,处理成本较普通可回收物高3-5倍,企业盈利困难,导致此类废弃物多混入生活垃圾填埋或焚烧,资源浪费严重。

(2)管理层面:跨区域协同监管机制缺失,固废跨区域转移时,源头地与接收地监管标准不统一,信息共享不及时,易出现“监管真空”,2024年全国跨省非法转移固废案件中,因协同监管不足导致的占比达45%。(3)社会层面:公众参与度不足,仅30%的城市居民能准确分类投放垃圾,部分地区存在“前端分类、后端混运”现象,打击公众参与积极性,且公众对固废污染危害认知薄弱,主动参与减量的意识不足。

4.2 发展方向

(1)人工智能在固废分选中的应用前景:通过AI图像识别+机器人分拣,可精准识别各类固废,分拣效率较人工提升10倍以上,准确率达98%,能降低低值废弃物分选成本,目前试点项目已实现废旧塑料薄膜回收率提升至60%。(2)区块链技术实现全生命周期追溯:利用区块链不可篡改特性,记录固废产生、转移、处置全流程信息,实现“一物一码”溯源,监管部门与企业可实

时查询,可减少80%以上的信息造假与非法转移行为。

(3)碳交易机制促进资源化项目融资:将固废资源化项目(如焚烧发电、生物处理)产生的碳减排量纳入碳交易市场,企业可通过出售碳配额获得收益,预计能降低项目融资成本15%-20%,吸引更多社会资本投入固废处理领域。

结束语

环境工程中固体废弃物的有效处理与污染防治,是保障生态安全、推动可持续发展的重要课题。通过科学分类、技术创新与多维度策略协同,既能降低废弃物对环境的危害,又能实现资源的高效循环利用。未来需持续突破技术瓶颈,完善跨区域协同监管机制,提升公众参与度,并借助人工智能、区块链等前沿技术优化治理模式。唯有政府、企业与公众共同发力,方能构建绿色低碳的废弃物管理体系,迈向环境友好型社会。

参考文献

- [1]刘东波.固体废弃物资源化与污染防治技术研究[J].环境保护,2022,50(12):25-26.
- [2]王建华,张辉.城市固体废弃物管理与处理技术探讨[J].环境工程,2023,44(3):48-51.
- [3]张昊.固体废弃物无害化处理技术的创新与应用研究[J].河南科技,2025,52(7):85-87.
- [4]练绮绮.基于环境保护固体废弃物的处理与资源化利用[J].黑龙江环境通报,2025,38(3):119-121.
- [5]梁虹.环境工程中固体废物污染的防治对策探究[J].黑龙江环境通报,2024,37(1):88-90.