

推广应用。

植物修复技术则是指在土壤污染治理中可利用超富集植物、耐性植物来吸收土壤中的有毒有害物质,通过收割植物将污染物从土壤中去,兼具治理与生态修复功能的技术。该类技术应用期间需要通过土壤调查、取样分析明确土壤中的污染元素。在此基础上分析不同植物在生长期间所需的元素及对不同污染元素的抗性,然后针对性地选择修复的植被种类,例如单一重金属污染可以引入蜈蚣草、东南景天、印度芥菜等,发挥其重金属吸收和积累能力,通过定期收割地上部分来去除土壤中的重金属元素。而对于轻度复合污染农田则可通过黑麦草等耐性植物的种植,发挥植物根系的固定吸附作用,降低污染物质的迁移性,并改善土壤结构。植物修复技术的持续性较强、美观性较强,但在实践应用中也存在着一定的欠缺和不足,即其治理周期相对较长。同时为了确保植物修复技术的功能和优势得以充分发挥,在该项技术应用期间应尽可能选择本地植物,确保气候环境符合植物生长需求,提高植物存活率,进而提高技术应用效果^[2]。

4 农田环境面临的主要困境

除土壤污染外,我国农田环境还面临多重生态困境,制约农业可持续发展。一是土壤质量持续退化,集约化种植导致土壤有机质含量下降、肥力降低,部分区域出现土壤酸化、板结等问题,大幅削弱土壤保水保肥能力,难以满足农作物生长需求。二是资源约束日益凸显,农田灌溉水资源短缺与灌溉水污染并存,导致水源供给不足,威胁农田灌溉安全。三是生态系统不断弱化,农药施用方法不科学、过量施用等问题,破坏区域生态平衡,导致农田生物多样性减少、天敌昆虫数量下降,进而增加农产品种植对农药的依赖性,形成恶性循环。

5 农田环境保护策略

5.1 源头严防

做好源头防控可以最大化减少农田污染问题,也可以有效降低污染治理的成本和资源。源头防控中尤为重视的是防控农业面源污染、工业污染和农村生活污染。针对工业污染问题需要由相关单位牵头引导,加强对工业排污管控,禁止在农田保护区内超标排放废水、废气、废渣。同时在工业企业运行期间需通过废弃物排放监测,加强废弃物排放管控。针对农业面源污染问题可推广绿色农业生产模式,加强科学种植指导,推广测土配方施肥技术和高效低毒低残留农药,控制化肥和农药的过量使用。加强畜禽养殖废弃物资源化利用,完善畜禽养殖废弃物处理设施,减少畜禽养殖对农田土壤的污染。推广秸秆还田、秸秆饲料化、秸秆基料化等技术,禁止秸秆焚烧,提高秸秆利用率,减少秸秆焚烧对土壤、大气环境的污染^[3]。

5.2 过程严管

土壤污染具有累积性,污染物长期在土壤中富集会逐

步恶化土壤理化性质与生态环境,因此需强化过程管控。构建完善的土壤质量监测体系,合理布设监测点位,借助传感器等现代化技术,对城市周边、农业集约化种植区等重点区域开展实时监测,重点监测重金属、农药残留、土壤pH值、有机质含量、土壤容重等指标;结合大数据、人工智能技术,提升问题发现与应急响应能力,一旦监测指标超出安全阈值,系统自动报警并推送相关部门,及时处置防范污染扩散。同时,加强农田灌溉水质量管控,划定灌溉水源保护区,强化灌溉水质量监测,严格监管工业废水灌溉、固体废物堆放等污染农田的行为;建立土壤监测数据共享平台,提升监测效率。

5.3 制度保障

农田环境保护是一项长期性、系统性工作,在实践工作落实的过程中还需要加强规章制度建设建立长效机制,为农田生态环境保护提供坚实支撑。首先要加强农田环境保护法律法规体系建设,对《土壤污染防治法》《农业法》等相关法律法规进行完善、细化和优化,明确农田环境保护的要求、污染防控责任、违法行为处罚标准,配合宣传机制的有效优化发挥法律法规体系的规范引导、约束作用,同时也为监管执法提供法律支撑。其次需要加强政策支持体系建设,加大财政资金投入,推广绿色生产技术,加大技术研究力度,通过现代化、绿色化技术研究降低落后产能所带来的环境污染问题。最后需要建立协同监管机制,加强农业、生态环境、自然资源、水利等部门的沟通和交流,明确各部门在协同监管中肩负的责任、需要完成的工作任务,配合群众监督提高监管效能^[4]。在此基础之上还需加强宣传教育,引导农户树立绿色种植、生态保护理念。

6 结语

土壤是农业生产的物质基础,也是农田环境保护的核心,土壤污染直接影响农业生产的质量、安全与产量,因此土壤污染治理与农田环境保护密切相关、密不可分。实践中,需通过现场调查明确土壤污染元素的构成与含量,针对性选用物理、化学、生物治理技术,提升污染修复效果;在此基础上,构建源头严防、过程严管、制度保障的全方位防护体系,持续强化农田环境保护力度,推动农业绿色可持续发展,助力生态文明建设。

参考文献

- [1] 闫晗,李龙,王凯. 土壤污染的治理与修复技术分析 [J]. 中国资源综合利用, 2025, 43 (12): 143-145.
- [2] 牛犇. 生物修复技术在土壤污染治理中的应用研究 [J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38 (12): 117-119.
- [3] 鲍红红. 土壤污染对生态环境的影响及其修复技术研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6 (21): 97-99.
- [4] 张蕾,霍霄玮,辛勃. 土壤污染治理技术与农田环境保护策略研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5 (18): 44-46.

Research on Optimization of Technical Pathways for Reducing Leachate Concentrate in Landfill Treatment

Na Zhang

Xinjiang Chuangyu Water Resources and Environmental Technology Co., Ltd., Yili, Xinjiang, 835000, China

Abstract

The high salinity and high organic content of landfill leachate concentrate pose significant challenges in pollution control. The optimization of treatment pathways for leachate concentrate reduction has shifted toward systematic solutions integrating multiple technologies and end-to-end processes. Representative technologies include heterogeneous catalytic ozone flotation, forward osmosis-membrane distillation integration, mechanical vapor recompression-induced seed crystal stepwise crystallization, and material circulation coupling. The core approach involves constructing customized process chains based on water quality characteristics, achieving minimum energy and chemical consumption while maximizing treatment efficiency through intelligent control, process restructuring, and system integration. This research explores feasible pathways for near-zero discharge and resource recovery of concentrated liquid.

Keywords

Leachate concentrate; Volume reduction; Process optimization; Process integration

垃圾填埋场渗滤液浓缩液减量化处理技术路径优化研究

张娜

新疆创禹水利环境科技有限公司，中国·新疆伊犁 835000

摘 要

垃圾渗滤液浓缩液的高盐、高有机物特性使其成为污染控制的关键难题。渗滤液浓缩液减量化处理技术路径的优化，转向多技术协同与全流程整合的系统性解决方案。非均相催化臭氧气浮、正渗透-膜蒸馏集成、机械蒸汽再压缩-晶种诱导分步结晶以及物料循环耦合等代表性技术，核心在于依据水质特征构建定制化工艺链条，并通过智能调控、流程重构与系统集成，实现能耗、药耗的最小化与处理效率的最大化，为浓缩液的近零排放与资源化探索可行路径。

关键词

渗滤液浓缩液；减量化；技术优化；工艺集成

1 引言

随着“无废城市”建设试点工作的深入推进与《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》的实施，对垃圾填埋场的环境管理提出了更严格的要求，浓缩液是膜处理必然产物，成分复杂、处理难，其妥善处置关乎填埋场长期环境安全与稳定运行。当前，单纯追求末端达标排放的处理模式难以为继，推动处理技术从粗放向精细、从单一向协同、从处置向减量与资源化转变是行业必然趋势。所以，探索并优化浓缩液减量化技术路径，既有迫切技术需求，也是响应国家政策、践行绿色发展的体现。本文旨在系统梳理当前浓缩液减量化技术的研究进展，分析其应用边界与优化潜力，并提出面向工程实践的技术集成路径。

【作者简介】张娜（1991—），女，中国河南人，本科，中级，从事环境工程研究。

2 常用的垃圾填埋场渗滤液浓缩液减量化处理技术

2.1 高级氧化技术

该技术的核心原理在于实现臭氧氧化的高效催化与氧化产物的即时分离。其通过向反应体系中投加具有特定表面特性的非均相催化剂，该催化剂兼具吸附与催化双重功能。在臭氧气泡上升过程中，催化剂表面活性位点高效催化臭氧分解产生羟基自由基，同时对疏水性有机物产生优先吸附。氧化过程改变污染物的物理化学性质，部分转化为易与微气泡结合的状态。后续气浮单元利用微细气泡的浮力，将催化剂、附着污染物及氧化中间体一同以浮渣形式从液面去除，大幅提升了氧化效率并减少二次污染。

2.2 膜分离技术

该技术的原理是通过两个互补的膜过程实现水分的低能耗分离回收。在正渗透阶段，利用高浓度汲取液与浓缩液

之间的渗透压差作为驱动力，使水分子自发透过半透膜从浓缩液进入汲取液，实现对污染物的高效截留。在膜蒸馏阶段，利用疏水微孔膜两侧的蒸汽分压差（由温度差产生），使汲取液中挥发性组分（水蒸气）透过膜孔，而后在冷侧冷凝回收，同时实现汲取液的再生与水的纯化（如图 1）。正渗透环节避免了高压操作，膜蒸馏环节可处理极高浓度溶液，二者集成形成了低能耗的浓缩液极限减量技术路径。

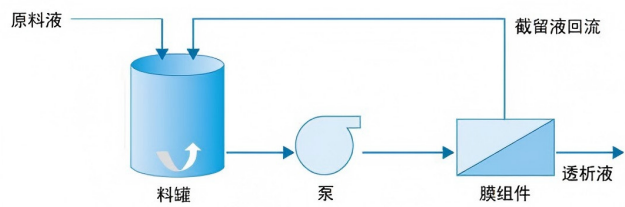


图 1 膜分离技术原理图

2.3 蒸发结晶技术

该技术通过能量高效利用与结晶过程精确调控实现深

度减量。机械蒸汽再压缩（MVR）利用热泵原理，将蒸发器产生的二次蒸汽经压缩机加压升温，提高其饱和温度后重新作为蒸发器热源，使系统热能循环利用。晶种诱导分步结晶则利用混合溶液中不同盐类溶解度的差异，通过控制蒸发温度、浓度等条件，在不同过饱和度阶段分别加入特定晶种，引导目标盐类优先在晶种表面定向生长析出，实现盐分的初步分离与提纯，为后续资源化处理创造可能。

2.4 物料耦合技术

该技术的核心原理是通过污染物形态转化与物料流向调控实现系统内循环减量。臭氧催化预处理将难降解大分子有机物转化为可生化降解的小分子，破坏发色基团，同时氧化部分含氮污染物。处理后的出水回流至主生化系统，为反硝化等过程补充碳源，其硝酸盐也可参与后续脱氮过程。此操作将浓缩液污染负荷转化为可利用资源，在主生化系统内实现内部消纳。经生化处理后的混合液再进入膜系统，其污染物浓度与膜污染潜势显著降低，可大幅提高膜回收率，从而在系统层面减少最终浓缩液的生成总量。下表从适用性、效能、环境与经济影响等维度，对四种主要减量化技术路径进行了归纳对比。

表 1 主要减量化技术路径综合对比

技术路径	适用水质特征	处理效率 / 目标	能耗水平	二次污染风险	经济性
高级氧化耦合技术	高浓度难降解有机物、含新兴污染物浓缩液	有机物高效降解与分离，大分子解聚	中等	较高	中等
膜集成分离技术	高盐、高 COD，需极限减量的浓缩液	高倍浓缩，水分高效回收，污染物高截留	低 - 中等	低	较高
蒸发结晶工艺	高盐分、高硬度浓缩液，需盐分分离与资源化	深度减量至近零排放，盐分初步分离与提纯	高	较高	高
物料耦合循环技术	水质波动大，可生化性有提升潜力的浓缩液，主系统需补充碳源 / 氮源	系统内污染物负荷内部消纳，源头削减浓缩液产量	低	低	低

3 填埋场渗滤液浓缩液减量化处理技术优化研究路径

渗滤液浓缩液水质复杂，其优化处理需超越单一技术局限，转向以水质特征为导向的多技术协同路径。高级氧化、膜集成、蒸发结晶与物料循环分别聚焦污染物深度降解、极限减量、资源回收与系统内循环，构成定制化工艺链条核心技术模块。实际应用中，这些路径常组合为“高级氧化 + 膜集成”或“蒸发结晶 + 物料循环”等集成系统，非彼此孤立，以实现经济、高效、稳定的处理目标。

3.1 高级氧化耦合技术的工艺整合优化

在非均相催化臭氧气浮技术的应用场景中，其工艺整合路径的优化必须建立在深入理解复杂水质特性与反应机制协同关系的基础之上，通过建立基于在线有机物指纹监测的反馈控制系统，实现对氧化过程的精准调控。针对不同浓缩液的水质特征差异，研究建立分级处理策略：对腐殖质含量超过 60% 的“老龄”浓缩液，采用温和氧化条件（臭氧投加量 1.5-2.5 mg/mgTOC）与选择性催化剂的组合，重点

促进大分子结构的解聚而非完全矿化；对含有新兴污染物或工业源特征污染物的“特殊”浓缩液，则需要采用强化氧化模式，通过调整催化剂活性组分与延长接触时间，确保特征污染物的有效降解。

工艺整合的关键在于建立“反应 - 分离 - 再生”的闭环系统。研究优化气浮单元的运行参数，包括微气泡尺寸分布（控制在 20-50 μm）、气液比（0.1-0.3）与表面活性剂投加策略，确保氧化产物与催化剂的分离效率达到 95% 以上。通过优化化学洗涤剂配方与再生频率，维持催化剂活性位点的稳定。该技术路径需要与后续处理工艺建立紧密衔接，当后续为膜处理工艺时，重点控制氧化出水中的可吸附有机物与亲水性中间产物浓度，避免膜污染加剧；当后续为蒸发工艺时，则需关注氧化过程中卤代有机物的生成情况，通过控制氧化条件抑制强腐蚀性产物的形成。

本章聚焦于通过智能监测与分级策略实现催化臭氧化的精准调控，并优化“反应 - 分离 - 再生”闭环系统，旨在提升氧化效率并控制后续工艺的污染与腐蚀风险。