

河道淤泥资源再生利用综合技术研究与应用

卢永强 徐欣楠

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050000

摘要: 本文聚焦河道淤泥处置难题, 系统分析淤泥理化、力学与污染特性, 论证其资源化利用的资源、技术及经济政策可行性。梳理精准清淤、脱水干化、无害化稳定化、多元化再生利用等核心技术, 优化全链条工艺参数与适配方案。结合珠三角工程实例验证技术成效, 从生态、经济、社会维度开展效益分析, 剖析行业现存短板并提出优化对策, 为河道淤泥规模化、绿色化资源化处置提供技术支撑与实践参考。

关键词: 河道淤泥; 资源再生利用; 综合技术; 应用

引言: 河道淤积是水环境治理的突出问题, 淤泥堆积易阻碍行洪、恶化水质, 传统填埋处置存在占地量大、成本偏高、二次污染风险突出等弊端, 难以适配绿色生态发展与“无废城市”建设要求。为破解淤泥处置困境、实现固废资源化利用, 本文围绕河道淤泥再生利用综合技术展开系统研究, 探究淤泥无害化、资源化处置路径, 优化成套工艺体系, 旨在解决淤泥处置痛点, 推动河道生态治理与资源循环利用协同发展。

1 河道淤泥基本特性与资源化可行性分析

1.1 河道淤泥基本理化特性

(1) 物理特性方面, 淤泥天然含水率普遍处于45%~85%之间, 孔隙比大于1.5, 颗粒以粉粒和黏粒为主, 渗透系数通常介于 $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$, 属低渗透性介质, 密度约为 $1.6 \sim 2.0 \text{g/cm}^3$, 呈流塑状态, 不利于直接工程应用。(2) 化学特性方面, 有机质含量变化较大, 一般为3%~15%; 矿物成分以石英、长石、伊利石和蒙脱石为主; pH值多呈中性至弱碱性(6.5~8.5); 氮、磷含量较高, 总氮约500~2000mg/kg, 总磷约300~1500mg/kg, 具备一定的肥力属性^[1]。(3) 力学特性方面, 固结系数较小, 压缩性高, 抗压强度低于50kPa, 抗剪强度受含水率影响显著, 原状淤泥内摩擦角一般小于 15° , 黏聚力约5~20kPa, 需经固化改良后方可满足工程填筑等力学要求。

1.2 河道淤泥污染特性分析

(1) 常规污染物特征方面, 氮、磷在细颗粒表层富集明显, 有机物(COD、BOD₅)含量与上游排污强度正相关, 富集系数随颗粒细化递增, 污染程度呈表层>中层>底层的垂直分布规律。(2) 重金属污染物特征方面, 铅、镉、汞、铬等重金属含量变化幅度较大, 部分地区镉可达2.5mg/kg以上, 铬可达120mg/kg; 浸出毒性试验表明, 酸性条件下重金属溶出风险显著升高, 需关注

处置过程中的二次污染防控。(3) 污染分级判定方面, 参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》等规范, 可将淤泥划分为I~IV级, 轻度污染淤泥可直接资源化利用, 中重度污染需经稳定化处理后定向用于建材或园林基质等非食物链途径。

1.3 淤泥资源再生利用可行性论证

(1) 资源可行性方面, 淤泥富含硅、铝、钙等矿物质及氮、磷、有机质等营养组分, 具备制砖、陶粒、水泥熟料等建材制备潜力, 同时可经堆肥处理后用于土壤改良和矿山生态修复, 资源属性明确。(2) 技术可行性方面, 真空预压脱水、板框压滤、水泥/石灰固化、热解无害化等工艺已趋于成熟, 协同陶粒烧制、焚烧发电等能量资源回收技术已具备工程化应用条件, 可实现淤泥减量化、稳定化和资源化目标。(3) 经济与政策可行性方面, 相较传统填埋处置, 资源化利用可降低综合处置成本30%以上, 且国家“无废城市”建设与绿色建材推广政策为淤泥资源化提供了有力支撑, 规模化推广具备良好的经济效益和政策环境。

2 河道淤泥资源再生利用核心综合技术

2.1 淤泥预处理关键技术

(1) 精准环保清淤技术方面, 针对不同污染垂向分布特征, 定制分层清淤工艺, 表层重点清除高污染浮泥, 中层控制扰动范围实施环保绞吸, 底层保留天然地基持力层; 同时根据污染浓度空间差异划分高、中、低污染分区, 实施分区差异化清淤, 有效减少原生淤泥扰动与二次污染扩散, 清淤精度可控制在 $\pm 10 \text{cm}$ 以内。(2) 高效脱水干化技术方面, 自然干化适用于场地充裕、气候干燥地区, 处理成本低但周期长(30~90天); 机械脱水(板框压滤、离心脱水)处理效率高, 可将含水率降至40%~60%, 适用于规模化集中处置; 真空预压脱水无需外加药剂, 适合大面积浅层淤泥土处

理,但工期约20~60天。实际工程中常采用“机械脱水+热干化”组合工艺实现深度脱水目标^[2]。(3)杂质筛分与分级技术方面,采用格栅除污机(孔径20~50mm)去除大粒径石块、垃圾等杂物,再通过滚筒筛或水力旋流器实现0.075~2mm粒径分级。细颗粒(<0.075mm)富含有机质和污染物,定向送入热改性或生物处理单元;中粗颗粒(0.075~2mm)矿物成分高,优先用于建材骨料或路基填料,分级精度可控制在±5%以内。

2.2 淤泥无害化稳定化处理技术

(1)化学固化稳定化技术方面,以水泥(掺量8%~15%)、生石灰(掺量3%~8%)为主固化剂,配合高分子外加剂(聚丙烯酰胺、木质素磺酸盐等,掺量0.1%~0.5%),通过正交试验优选最佳配比。固化后淤泥无侧限抗压强度可达0.5~2.0MPa,渗透系数降低1~2个数量级,重金属浸出浓度满足《危险废物鉴别标准》限值要求。(2)生物无害化处理技术方面,利用芽孢杆菌、假单胞菌等高效降解菌群,在好氧堆肥或生物反应器条件下对有机污染物进行降解转化,COD去除率可达40%~70%;同时利用硫酸盐还原菌、铁还原菌等将可交换态重金属转化为残渣态,钝化效率达50%~80%,实现生态化无害化处置。(3)热改性处理技术方面,在500~1200℃高温条件下煅烧淤泥,使黏土矿物脱水相变并烧结成陶质结构,有机质完全燃烧,重金属固溶于硅酸盐晶格中,浸出毒性大幅降低。经热改性后的淤泥产品具有轻质、多孔、高强度等优异性能,可用于烧制陶粒、轻骨料等高附加值建材^[3]。

2.3 淤泥多元化再生利用技术

(1)建材资源化利用技术方面,以改性淤泥(掺量30%~70%)为原料,辅以水泥、石膏、骨料等,通过压制成型、自然养护制备免烧砖,抗压强度达10~30MPa;以脱水淤泥为基料,经成球、烘干、煅烧(1000~1200℃)制备陶粒,堆积密度300~900kg/m³;固化淤泥可作为透水混凝土掺合料(掺量10%~30%)或路基填料,满足不同工程场景需求。(2)生态资源化利用技术方面,对达标淤泥(重金属含量满足《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》筛选值)进行堆肥腐熟处理(周期15~30天),作为园林绿化覆土或土壤改良剂使用,可提高土壤有机质含量15%~25%;同时利用淤泥的保水保肥特性,应用于湿地基底构建和河道边坡绿化喷播基质,促进生态修复效果。(3)回填工程资源化利用技术方面,采用“水泥+石灰+早强剂”复合固化配方(总掺量10%~20%),将淤泥固化土强度提升至0.8~3.0MPa,满足堤防加固填筑要求;经固化处理后的

低强度回填料(强度0.3~0.8MPa)可应用于基坑肥槽回填、管沟回填及低洼地平整工程,替代传统砂石填料,节约资源并降低成本。

2.4 技术工艺优化与参数确定

(1)多工艺协同优化设计方面,构建“精准清淤→脱水干化→筛分分级→无害化处理→资源化利用”全链条集成工艺,各环节物料实现定向衔接,中间产物互为输入输出。通过流程再造与设备选型优化,将原本独立运行的多道工序整合为连续封闭式作业线,简化中间转运环节,整体处置能耗较分散模式降低15%~25%。

(2)关键工艺参数试验优选方面,以脱水效果、固化强度、重金属稳定化率、热改性产品性能等为评价指标,分别针对絮凝剂种类与投加量、固化材料配比、煅烧温度与保温时间、微生物接种量等核心参数开展正交试验,确定各工序最优参数组合。例如,典型河道淤泥最优参数为:PAM投加量0.15%,水泥掺量12%,煅烧温度1150℃,保温时间30min^[4]。(3)技术适配性优化方面,针对高有机质淤泥(有机质>10%),优先选择热改性或生物处理路线,避免化学固化效果不佳;针对重金属超标淤泥(超过筛选值但低于管制值),侧重化学固化稳定化与高温烧结协同处置;针对低污染砂质淤泥(有机质<3%、重金属达标),可直接经脱水筛分后用于建材骨料或回填工程,实现“一泥一策”的精准技术匹配。

3 工程应用、效益分析与展望

3.1 典型工程应用案例分析

(1)工程概况方面,选取珠三角某感潮河段治理工程,清淤长度6.3km,清淤量15.8万m³。淤泥含水率82.1%,有机质11.3%,pH7.3,总氮1890mg/kg,总磷1020mg/kg,镉含量达2.8mg/kg,属中度污染。治理目标为内源污染削减≥80%,资源化利用率≥92%。施工区潮汐影响明显,周边工业密集,施工窗口期短,环保管控严格。(2)技术方案实施方面,采用“抓斗式清淤+封闭管道输送+带式脱水(含水率降至48%)+水力旋流分级(0.075mm切割)+复合固化稳定化(水泥8%+石灰4%+高分子助剂0.3%)+免烧砖/路基填料制备”协同工艺。施工中设置双层防污围隔、余水多级沉淀回用系统,并建立在线水质监测预警机制,日均处理量900~1050m³,实现封闭式清洁作业。(3)工程应用效果检测方面,免烧砖28d抗压强度22.5MPa,满足MU20等级;路基填料CBR值达28%,满足二级公路底基层要求;固化体重金属浸出浓度低于GB/T14848—2017Ⅲ类限值;治理后河道COD由68mg/L降至23mg/L,底栖动物丰富度指数由1.2升至4.5,技术方案可行性与稳定性良好。

3.2 综合效益分析

(1) 生态效益方面, 清淤后河道水质提升至Ⅳ类标准, 水体透明度由0.25m升至1.5m, 水生态系统逐步恢复; 资源化利用替代填埋, 减少占地约42亩, 固碳减排约650tCO₂当量; 稳定化处理使重金属浸出率下降90%, 有效遏制二次污染。(2) 经济效益方面, 传统填埋成本约310元/m³, 资源化利用综合成本约205元/m³, 节约成本约33.9%; 免烧砖及路基填料销售年创收约240万元; 节约土地占用及生态补偿费用约610万元, 项目综合经济效益约1150万元。(3) 社会效益方面, 惠及周边居民约2.8万人, 改善人居环境与城市形象; 构建了“清淤—处置—产品”完整产业链, 为区域绿色建材供给提供本地化解决方案; 形成的技术成果已在周边3个同类工程中推广应用。

3.3 现存问题与优化对策

(1) 技术应用现存问题方面, 一是在潮汐、高含水率等复杂工况下, 单线日均处理能力仍低于1200m³, 规模化效率不足; 二是高污染淤泥稳定化药剂成本高达180~230元/m³, 经济性欠佳; 三是行业标准不完善, 产品检测认证体系缺失, 制约市场接纳度。(2) 技术优化对策方面, 研发自适应智能脱水装备和全自动配料系统, 提升效率30%~40%; 开发钢渣-粉煤灰-脱硫石膏基复合固化材料, 降低成本20%~25%; 构建“生物淋滤+化学稳定+低温热解”分级联合工艺, 实现高污染淤泥精准分级处置^[5]。(3) 行业发展完善建议方面, 加快制定《河道淤泥资源

化利用技术规程》及产品标准, 完善质量检测认证体系; 将淤泥基绿色建材纳入政府推广目录, 建立区域信息共享平台, 促进技术成果转化; 推动建立“政府监管+第三方检测+市场化运作”协同机制, 保障行业规范有序发展。

结束语

本文构建了河道淤泥“清淤-处置-再生-应用”全链条资源化技术体系, 经工程实践验证, 该技术可有效实现淤泥减量化、无害化与高值化利用, 综合效益显著。当前行业仍存在处置效率不足、处理成本偏高、标准体系不完善等问题。未来需持续迭代智能处置装备、研发低成本固化材料、完善行业规范与市场化机制, 进一步提升技术适配性与推广价值, 助力水生态保护与绿色循环经济发展。

参考文献

- [1]唐彤芝,吴志强.河湖底泥治理科技创新研究与产业化发展[J].水利水运工程学报,2025,11(03):91-96.
- [2]黄英豪,戴济群.全国疏浚淤泥处置与利用研究进展[J].中国水利,2024,9(03):25-28.
- [3]黄进华.在河道清淤疏浚工程中淤泥固化技术的应用[J].湖南水利水电,2024,21(02):65-67.
- [4]张建云,王银梅.河道疏浚淤泥资源化利用技术路径与工程实践[J].水利水电技术,2023,54(03):112-118.
- [5]齐丽勇,于海洋.城市清淤底泥原位资源化利用关键技术研究与应[J].再生资源与循环经济,2023,16(05):36-39.