

贾世超, 张涛, 李荣光, 等. 水厂污泥资源化利用: 技术路径、标准制约与政策建议[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 32-47.

Jia S C, Zhang T, Li R G, et al. Technical pathway, standard constraint and policy recommendation of resource utilization of sludge from WTPs[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 32-47.

水厂污泥资源化利用: 技术路径、标准制约与政策建议

贾世超^{1,2}, 张涛³, 李荣光⁴, 孙佩哲¹, 信常春^{1,2}, 苏贇^{5,*}

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300041; 2. 天津市自来水集团有限公司, 天津 300040; 3. 天津市自来水集团津南水务有限公司, 天津 300350; 4. 天津水务集团有限公司, 天津 300202; 5. 天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384)

摘要 【目的】随着城市化进程加快和饮用水处理规模的持续扩大, 水厂污泥产量显著上升, 其处理处置面临环境可持续压力与资源化需求双重挑战。明确水厂污泥的资源化潜力、现存瓶颈及发展路径, 为其规模化利用提供理论与技术支撑是本文的核心研究目标。【方法】本文系统解析了水厂污泥物化特性, 即无机主导(以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 为主, 质量分数为 58.9%~85.0%)、低有机质<30%、低病原体风险的独特资源禀赋。同时梳理了水厂污泥现有处理处置技术与资源化路径, 结合国内外政策对比, 剖析资源化利用过程中存在的问题。【结果】水厂污泥的资源化利用具有显著的资源循环效益: 土地资源化利用可通过提升土壤性质及替代天然资源实现资源循环; 建材化利用、功能吸附材料则依托其低含水率、高无机质特性为材料制备提供了物质基础。混凝剂回收、再生材料, 减少原生化学品消耗与环境负荷, 属循环经济典范。所有路径的实施效果均高度依赖脱水环节的优化及合规性管控。我国现行水厂污泥相关政策标准滞后于污水污泥, 与国际标准存在差距, 且技术成熟度不足、产业化协同不够, 制约了资源化进程。【结论】我国水厂污泥资源化面临标准适用性不明、经济机制缺失及产业化协同不足三重瓶颈。展望未来, 应构建“分级标准-市场激励-部门协同”制度框架, 明确资源属性与豁免路径, 将处置费用纳入水价成本, 推动“因地制宜、多路径协同”技术体系规模化应用, 完善“立法赋权-标准引领-市场激励”衔接机制, 支撑产业高质量发展。

关键词 水厂污泥; 资源化利用; 技术路径; 标准解读; 协同增效机制; 循环经济

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)06-0032-16

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.004

Technical Pathway, Standard Constraint and Policy Recommendation of Resource Utilization of Sludge from WTPs

Jia Shichao^{1,2}, Zhang Tao³, Li Rongguang⁴, Sun Peizhe¹, Xin Changchun^{1,2}, Su Yun^{5,*}

(1. School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300041, China;

2. Tianjin Waterworks Group Co., Ltd., Tianjin 300040, China;

3. Jinnan Water Affairs Co., Ltd., Tianjin Waterworks Group, Tianjin 300350, China;

4. Tianjin Water Group Co., Ltd., Tianjin 300202, China;

5. School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract [Objective] Accelerated urbanization and the expanding scale of drinking water treatment are accompanied by a significant increase in water treatment plant (WTP) sludge generation, presenting dual challenges of environmental sustainability pressures and resource utilization imperatives. This paper characterizes WTP sludge resource utilization potential, identifies critical constraints, and provides theoretical and technical support for its large-scale utilization. [Methods] This paper provides a systematic

[收稿日期] 2026-02-28

[基金项目] 天津水务集团有限公司科技项目(2024KY-01); 天津市教委科研项目(2024KJ132); 天津市自然科学基金青年项目(24JCQNJC00640)

[作者简介] 贾世超(1991—), 女, 博士研究生, 研究方向为污泥资源化利用、供水水质保障, E-mail: jsc_666@tju.edu.cn。

[通信作者] 苏贇(1994—), 女, 博士研究生, 研究方向为废物资源化应用、环境功能材料研发, E-mail: suyun@email.tjut.edu.cn。

analysis of the physicochemical properties of WTP sludge, revealing its unique resource endowment characterized by high inorganic content (predominantly SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 , with a mass fraction of 58.9%–85% of its composition), low organic matter (< 30%), and minimal pathogen risk. Existing WTP sludge treatment and utilization pathways were systematically reviewed. Critical challenges were then identified through comparative analysis of domestic and international policies. [Results] The resource utilization of WTP sludge demonstrates significant benefits in terms of resource recycling. Land source utilization facilitates resource cycling by enhancing soil properties and substituting natural resources. Meanwhile, the production of construction materials and functional adsorbents leverages its low moisture content and high inorganic composition as a preparation basis. Coagulant recovery and material regeneration minimize virgin chemical consumption and environmental loads, exemplifying circular economy principles. However, pathway effectiveness hinges on optimized dewatering and regulatory compliance. Current WTP sludge policies and standards in China lag behind wastewater sludge regulations and international benchmarks, while immature technologies and insufficient industrial synergy constrain resource utilization. [Conclusion] WTP sludge resource utilization in China faces three critical bottlenecks: unclear standard applicability, inadequate economic mechanisms, and insufficient industrial synergy. Future efforts should construct an institutional framework integrating graded standards, market incentives, and departmental synergy. Priorities include clarifying resource attributes and exemption pathways, incorporating disposal costs into water tariffs, and promoting scaled application of localized, multi-path synergistic systems. Strengthening the linkage mechanism of legislative empowerment, standard guidance, and market incentives will support high-quality industrial development.

Keywords WTP sludge; resource recovery; technical pathway; standard interpretation; synergistic enhancement mechanism; circular economy

在城市化的驱动下,我国供水规模快速扩张,据《中国城市建设统计年鉴 2024》相关数据显示,2024 年供水普及率为 99.57%,较 1981 年提升 45.87 百分点^[1],伴随水厂污泥产量持续激增至数百万至数亿立方米的规模^[2]。水厂污泥是水处理过程中的必然产物,具备“污染”与“资源”双重属性,富集了原水中近一半的碳、氮、磷等物质,同时含有从原水去除的有机物、无机物、金属/重金属及混凝剂残留物(如铝盐、铁盐、石灰等),其由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等无机成分组成,与黏土特性类似,这一独特禀赋为其多路径资源化利用提供了坚实支撑^[3]。若弃置于自然环境中,不仅会向水体持续释放铝、铁及残余有机碳,造成“二次污染”,亦会导致大量不可再生资源的隐性流失。

国际经验^[4]表明,北欧地区国家已构建涵盖顶层设计、全流程闭环管理及正向激励规则的水处理污泥土地利用管理体系,实现了污泥资源的有序循环利用。其中,以水厂污泥为原料合成沸石的技术已趋成熟,产物广泛应用于污染物吸附及农业土壤改良,推动了饮用水处理与循环经济的深度融合^[5]。国内方面,污泥资源化利用虽已在土地利用、建材生产、铝盐铁盐回收及吸附剂制备等路径取得阶段性突破,但仍以单一技术验证为主,或孤立地探讨国际成熟管理模式的借鉴价

值。刘文芬^[6]开发了镧铁(LaFe)负载水厂污泥的复合材料,显著提升了水体磷的高效去除与回收,但未将材料制备成本与规模化应用可行性纳入分析框架;袁春博^[7]利用铝污泥制备人工湿地基质,有效增强了脱氮除磷效能,但未探讨现行标准对基质应用的适用性约束;蔡子豪^[8]则以水厂污泥作为滤料应用于污水深度处理,有效降低氮磷负荷,但未揭示该技术与现有水处理系统的协同增效机制。上述研究虽为污泥资源化提供了有效技术途径,但其在政策适配性、经济可行性及产业化推广方面仍存在明显短板。

近年来,我国污泥管理理念从“重水轻泥”转向“泥水并重”。对标污水处理厂污泥资源化利用,水厂污泥在资源化技术研发、标准规范及政策配套方面相对滞后。水厂污泥的合理有效处置,已成为影响给水企业可持续生产经营的关键问题之一。综上,现有研究多聚焦于单一技术路径的技术可行性,缺乏对政策、标准约束及产业化落地难点的系统性剖析,这严重制约了资源化技术的最优配置与规模化推广。特别是在我国现行标准体系下,水厂污泥的资源化利用缺乏明确的法律定位与分级管理依据,导致技术推广与产业化进程受阻。这种“政策-技术”协同机制的缺失,严重制约了资源化技术的最优配置与规模化推广。因此,在现行政策与标准

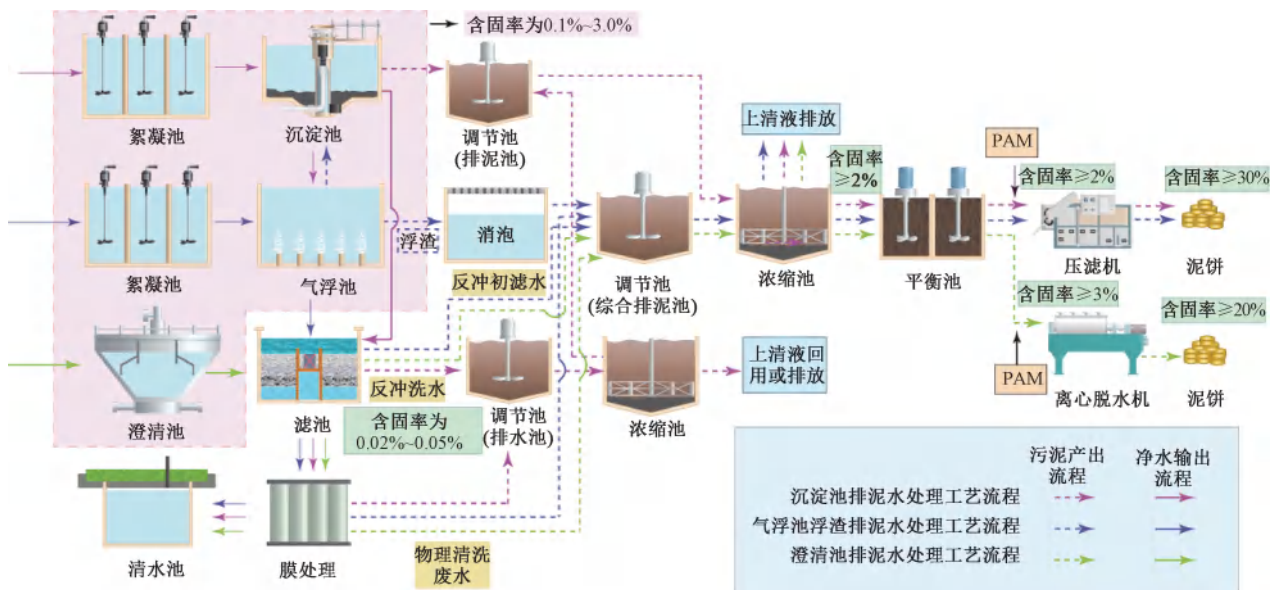
框架下,如何构建高效、经济、可持续的资源化路径,明确标准限制与政策导向,仍是当前研究的薄弱环节。

基于此,本文从水厂污泥的特殊组成与结构出发,系统梳理水厂污泥处置的行业规范、政策框架、应用案例,剖析我国水厂污泥的资源化利用面临的主要问题与技术发展趋势,并结合国内外政策差异,重点探讨政策标准对资源化路径的制约作用及未来发展方向,以期为水厂污泥资源化技术的规模化应用与产业升级提供理论依据与技术支撑。

1 水厂污泥的来源与现状

1.1 水厂污泥来源解析

水厂污泥系原水中的悬浮物、胶体、有机物及微生物等杂质,经混凝、沉淀、过滤等工艺与药剂等处理后产生的固体废弃物。如图 1 所示,这些污泥在水厂各构筑物排出时并非完全呈泥状,最初是以排泥水的形式存在,排泥水经浓缩、脱水等工艺处理后最终形成泥饼。排泥水主要源自沉淀池/澄清池排泥水、气浮池浮渣、膜清洗废水、滤池反冲洗水及初滤水等,其水量通常占水厂总水量的 1%~8%^[9-10]。



注:PAM—聚丙烯酰胺。

图 1 水厂污泥处理工艺简介

Fig. 1 Overview of WTP Sludge Treatment Processes

沉淀池/澄清池排泥水、气浮池浮渣的含固率通常为 0.1%~3.0%,可分为石灰软化污泥和化学絮凝污泥两类^[9-11]。石灰软化污泥产生于地下水的处理,其组成主要由氢氧化镁、碳酸钙、淤泥、过剩的石灰和有机物组成;化学絮凝污泥产生于对地表水的处理,其组成则以原水悬浮物,微生物、胶体物质、有机物及添加净水药剂为主。其中,沉淀池排泥水含铝/铁盐絮体、泥沙、胶体,占污泥总量超 70%^[12],而滤池(砂滤池和生物活性炭滤池)反冲洗排泥水含泥浓度低,含固率仅为 0.02%~0.05%,主要包含黏土、悬浮盐类、有机物以及药剂残余物等,通常需预浓缩或回流至沉淀池合并处理^[9,11]。

排泥水从主要处理构筑物排出后,经浓缩工艺和脱水工艺进一步降低含水量。重力/斜板浓缩池

可将含固率提升至 2%~4%,其效率受进泥浓度影响;含固率>0.2%,固体负荷可达 3.4 kg/(m²·h);低于 0.17%,负荷需降至 1.9 kg/(m²·h) 以下^[13]。上清液悬浮物可降至 70 mg/L 以下,回用于净水工艺^[12]。离心脱水污泥含固率可达 25%~30%,适合连续运行的大型水厂,但能耗与维护成本高;采用板框压滤并投加 PAM 调质后,含固率可进一步提高至 40%~60%,形成硬块状泥饼,更便于运输与资源化利用^[14]。

1.2 污泥物理化学特性

1.2.1 化学组成与脱水性能

水厂污泥源于混凝沉淀工艺,以无机矿物(SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 为主)为主导,有机质质量分数通常低于 30%,属典型的无机化学污泥(表 1)。其

脱水性能、污染风险及资源化指向具有自身特点。60%~75%;其重金属等污染物含量普遍低于农用标
水厂污泥含水率相对较低,脱水后含水率可降至 准限值,环境风险相对可控。

表 1 水厂污泥特征及处置方法^[2, 9, 11, 15-19]
Tab. 1 Characteristics and Disposal Methods of Sludge in WTPs^[2, 9, 11, 15-19]

项目	水厂污泥
来源	原水净化过程(絮凝、沉淀过程;原水悬浮物、胶体、有机物)
主要成分	无机污泥为主
pH	中性至弱碱性(5.6~8.5,受混凝剂影响)
电导率	0.104~0.7 μS/m(较低、原水含盐量低,无电解质富集)
污泥中金属组分	混凝剂金属[铝(Al)、铁(Fe)]为主;天然矿物金属/重金属[钙(Ca)、钡(Ba)、锰(Mn)、锌(Zn)、镁(Mg)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)等]
初始含固率	较低(0.3%~0.5%、絮体疏松)
初始含水率	95%~98%
脱水后含水率	60%~75%(板框压滤)
主要水分形态	间隙水(70%)、毛细结合水(20%)
体积缩减敏感度	中等(受无机颗粒支撑结构影响)
污泥处理工艺	调节→浓缩→平衡→脱水
脱水工艺	重力、气浮、离心浓缩自然干化、离心脱水、压滤(需调理剂少)
环境危害	低风险(无病原体、重金属少、无机盐泄漏风险、存在潜在金属浸出风险)
处置方法	卫生填埋、水体排放、市政排放、建材利用(砖、陶粒)
资源化方向	吸附材料、混凝/沉淀材料、再生盐材料、建筑材料、农林材料
执行标准	地方标准[如《城镇供水厂泥渣处理处置技术规范》(DB31/T 1432—2023)]
微生物含量	极低(无活性生物体)
热值	低(无机物为主,不宜焚烧)
处理难点	金属浸出风险控制、脱水效率优化

1.2.2 水厂污泥的环境行为

水厂污泥通常呈灰色黏稠絮状,脱水后颜色呈浅黄至灰褐色,形态为固态粉末状,具体颜色和形态受原水水质(如湖泊水源泥、江河水源泥)影响较大,粒径不超过 3.9 mm,属细粒土,干燥后易结块。脱水污泥孔隙率约为 45%,较大的比表面积(28.0~414.0 m²/g)和孔隙率为其作为吸附材料或陶粒原料提供了基础^[20]。此外,水厂污泥常呈高液限(液限>50%)、高塑性指数的特点,pH 多偏酸性(因常用硫酸铝、聚合硫酸铁等酸性混凝剂),部分污泥 pH 接近中性或弱碱性^[19]。

水厂污泥中有害物质含量较低,主要以絮凝剂残留的金属盐(铝盐、铁盐)及硫酸根为主,金属/重金属(Ba、Mn、Zn、Mg、Cd、Cr、Cu 等)含量普遍低于《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)^[21],相较于污水处理厂污泥污染风险较小,资源利用过程中具有环境友好及无害化处理成本低特征^[22]。

铝的毒性受 pH 调控,酸性条件下浸出风险升高,中性时最低。需关注有机物(如腐殖质、藻类)及少量放射性污染物在资源化利用中的情况。尽管氮、磷含量低(肥料价值有限),但其 pH 稳定性和土壤结构改良能力在农业应用中仍具有潜在应用价值。

1.3 污泥产量与处置难题

随着我国城镇化进程加速与供水规模的持续增长,水厂污泥产量呈刚性增长趋势。住房城乡建设部发布的《2024 年城市建设统计年鉴》显示,2024 年全国城市供水总量约为 705 亿吨(含地下水与地表水)^[1]。依据《给水排水设计手册》^[15]及研究文献^[2, 16-17];地表水厂污泥产率通常为 0.3~1.0 kg DS/m³(中值取 0.65 kg DS/m³);地下水厂约为 0.05~0.30 kg DS/m³(中值取 0.175 kg DS/m³),DS 为干固体。依据国家统计局 2024 年地表水与地下水占比统计^[18],地表水占比为 82.5%、地下水占比为 13.2%,加权平均污泥产率 Y 按式(1)估算。

$$Y = \frac{Y_s P_s + Y_g P_g}{P_s + P_g} \quad (1)$$

其中: Y ——加权平均污泥产率, kg/m^3 ;
 Y_s ——地表水厂污泥产率, kg/m^3 ;
 Y_g ——地下水厂污泥产率, kg/m^3 ;
 P_s ——地表水供水比例;
 P_g ——地下水供水比例。

将 $Y_s = 0.65 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $Y_g = 0.175 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $P_s = 82.5\%$ 、 $P_g = 13.2\%$ 代入式(1), 计算得 Y 约为 $0.58 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

干污泥量按式(2)估算。

$$M = Q \times Y \times 10^{-3} \quad (2)$$

其中: M ——干污泥产量, t/a ;
 Q ——全国供水总量, m^3/a ;
 10^{-3} —— $\text{kg} \sim \text{t}$ 的单位换算系数。

将 $Q = 7.05 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $Y = 0.58 \text{ kg}/\text{m}^3$ 代入式(2), 得 M 约为 $4.089 \times 10^7 \text{ t}/\text{a}$ (即 4 089 万 t/a)。按含水率 80% 计, 湿污泥量约为 2.04 亿 t/a ; 若含水率为 95%, 则高达 8.17 亿 t/a 。由此可见, 污泥产量已达到亿吨级质量规模与亿立方米级体积规模, 且持续攀升, 亟须加强资源化与减量化路径布局。

2 水厂污泥的传统处理处置技术

2.1 水体排放与市政排污

未经脱水处理的水厂排泥水, 可采用水体排放或市政排污两种方式处置。若接纳水体环境容量充足, 且泥水水量、水质符合《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 要求, 或经处理后达标, 可考虑排入地表水或海洋; 对于规模较小、易达标的水厂, 需依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 和《海水水质标准》(GB 3097—1997) 中规定的水域类别执行排放。市政排污则要求泥水在达标基础上, 水量不超过市政排水系统设计负荷。2 种方式的碳排放主要源于泵送能耗, 按耗电量折算。然而, 直接排放存在显著环境风险, 易在管道坡度小、管径小的区段引发淤积与堵塞, 影响排水系统稳定运行^[2]。

2.2 污泥浓缩与脱水技术

污泥浓缩与脱水是实现污泥减量化和资源化的核心前置工艺, 直接影响后续处置路径、效能水平、运行成本及碳排放强度。常规污泥处理流程通常包

含浓缩、机械和深度脱水 3 个阶段, 逐级降低含水率并提升处理效能。

污泥浓缩旨在通过重力或机械方式去除污泥中的自由水, 实现排泥水初步减容。典型工艺包括重力、气浮与离心浓缩。其中, 重力浓缩能耗低 [$< 5 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{t DS})$], 但占地大, 气浮和离心浓缩效率高但能耗 [$15 \sim 40 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{t DS})$] 和费用较高。浓缩后污泥含水率可降至 95%~97%, 为后续机械脱水创造了必要条件^[2]。

机械脱水依托压力差分离污泥中的间隙水, 可将含水率降至 75%~85%。主流设备包括板框压滤机、带式压滤机和离心脱水机, 同时常辅以阳离子聚丙烯酰胺 (CPAM) 等絮凝剂改善脱水性能与泥饼结构, 电耗约为 $70 \sim 122 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{t DS})$, 最终形成含水率为 60%~80% 的泥饼^[23]。离心脱水因封闭性强、自动化程度高, 更适用于无机物占比高的水厂污泥^[24]。

深度脱水则侧重于结合水与胞外聚合物 (EPS) 结构水的去除, 需借助预处理破坏污泥胶体结构。预处理方式包括化学 (如 Fenton、酸碱调理)、物理 (如超声、冻融、微波) 及生物等^[23], 给水污泥生物量较少, 生物脱水对水厂污泥的作用甚微。

脱水污泥未找到资源利用途径时, 往往作为固体废物处置, 处置费约为 300~400 元/ t 。因此, 降低污泥含水率、实现减量是削减运行成本的关键途径^[25]。

2.3 土地填埋

土地填埋作为传统处置方式, 要求泥饼含水率 $\leq 60\%$, 并需分层压实与覆土绿化以控制沉降及渗滤液逸散^[26]。然而, 该路径面临渗滤液污染风险、用地紧张问题及温室气体排放三重压力^[27]。其碳排放主要源于运输、压实、渗滤液处理等环节消耗的大量油耗、电耗和药耗, 最终排放二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等温室气体^[3]。简易土地利用受限于水厂污泥有机质匮乏、pH 偏酸性及潜在金属浸出风险, 易导致土壤板结、养分失衡或生态毒性, 实际应用受限。在“双碳”目标约束下, 填埋因高碳排放量与低资源化率正被政策逐步限制或淘汰。

2.4 污泥焚烧

污泥焚烧技术主要包括独立焚烧 (干化焚烧) 和协同焚烧两类, 焚烧过程需满足《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)。水厂污泥的热

值非常低,焚烧时需要添加大量辅助燃料(如煤、天然气)才能维持燃烧,显著增加处理成本。鉴于其技术经济性与环境可持续性不足,现阶段正逐步被热解炭化、协同焚烧等新型工艺替代^[28-29]。

3 水厂污泥的资源化利用及其环境协同效益

水厂污泥因其无机矿物主导、金属/重金属含量低、结构稳定等特性,具备多维度资源化潜力。

3.1 土地资源化利用

土地资源化是水厂污泥资源化利用的重要途径,经适宜处理后可用于土地改良、园林绿化及农业应用。依据处理深度与施用方式,可分为直接施用与间接利用2类。(1)直接施用:自然风干或低温干化后,污泥可直接应用于盐碱地、沙化地及废弃矿区土壤理化性质改良,改善目标区域的持水性、孔隙度与养分供给能力;(2)间接利用:经炭化处理(转化为生物炭)、堆肥或与种植土、腐殖质、化肥复配后,调控pH、电导率与养分释放速率,适用于盆栽、花坛、林地、牧草地及非食用农作物耕地等场景。

3.1.1 土壤改良机制

水厂污泥的有机质含量低于污水处理厂污泥,但其仍具备显著土壤改良功能。其改良机制包括以下内容。

(1)物理结构优化:促进土壤颗粒絮凝形成胶结剂,降低膨胀性、增强团粒稳定性,提高土壤保水能力和通气性;(2)化学吸附调控:水厂污泥中的铝/铁氧化物对磷具有较高吸附-固定能力,有效减少土壤中磷的流失,降低水体富营养化风险;(3)缓释养分供给:氮磷形态以缓释态为主,避免养分骤释导致的环境冲击。

3.1.2 应用案例

阮琳等^[30]通过好氧堆肥技术处理水厂污泥,成功开发园林基质并显著促进桉树生长;李芳等^[31]证实污泥-天然土壤混合体系可提升土壤有机质与氮素含量,改善根际微环境,增强植物营养吸收能力;东京政府和Chugai公司联合开发焚烧灰制砖技术,不加任何添加剂可直接使用,日消耗污泥焚烧灰可达15 t^[32]。

3.2 建材化利用

水厂污泥矿物组成(SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 为主)与黏土高度相似(表1),具备作为再生骨料、胶凝材

料前驱体或烧结原料的潜力,在满足环境安全、卫生达标和产品质量要求的前提下,可部分替代黏土、砂石或水泥熟料,广泛应用于再生砂、覆土、水泥熟料、混凝土、烧结砖和陶粒等建材体系^[33]。

3.2.1 工艺路径与关键参数

给水污泥依据建材化途径差异,产品类型可分为常温成型与高温焙烧2类(图2)。常温成型类(如稳定土、免烧砖):污泥干燥后与水泥、石灰、矿渣等胶凝材料混合,经压实/养护成型,无需高温;高温烧结类(如陶粒、水泥熟料、烧结砖):控制在900~1450℃焙烧,典型流程包括:均化→塑化→干燥→预热→烧结→冷却。Mouratib等^[34]以水厂污泥和黏土为黏结剂、淀粉为孔隙剂,在1050℃下制备出孔隙率为46.7%、抗压强度为14.5 MPa和透水系数为724.5 L/hm²的陶瓷微滤膜。徐振华提出预热350℃/20 min、烧结1100~1150℃/10~15 min的优化参数,且污泥掺量需控制在35%以内^[35]来制备陶粒。Kizinievič等^[36]在900~1000℃下掺入40%~60%污泥和10%~40%玻璃废料制备出成品砖。

3.2.2 应用案例

在水处理领域,陶粒表面粗糙、微孔丰富(孔径为1~5 μm),作为人工湿地基质对农村污水氨氮、总氮(TN)、总磷(TP)去除率分别达72.1%~96.12%、61.01%~91.23%、69.77%~93.25%,运行2 a后渗透系数降幅达6.8%~13.6%,抗堵塞性能优异^[39];曝气生物滤池中化学需氧量(COD)去除率达80%,氨氮去除率稳定超90%^[40]。污泥陶粒与水泥、砂配制的混凝土砌块,28 d抗压强度达40.5 MPa,远超结构用轻集料标准强度(25 MPa),可替代石料用于承重结构^[41]。上述成果表明,给水污泥建筑材料制备技术已实现实际应用转化。

3.3 功能吸附材料

水厂污泥富含Al/Fe氢氧化物、硅铝酸盐,经热处理或化学改性后可暴露/生成表面活性官能团,转化为高效吸附剂,广泛应用于金属/重金属、氮磷、氟化物及有机污染物去除。

3.3.1 吸附机制解析

水厂污泥及其衍生吸附剂对多种金属/重金属具有良好吸附能力。对于二价汞[Hg(II)]离子,在pH=8.0时吸附效果最佳,污泥吸附剂表面电荷与Hg(II)存在形态协同作用促进吸附,吸附机制

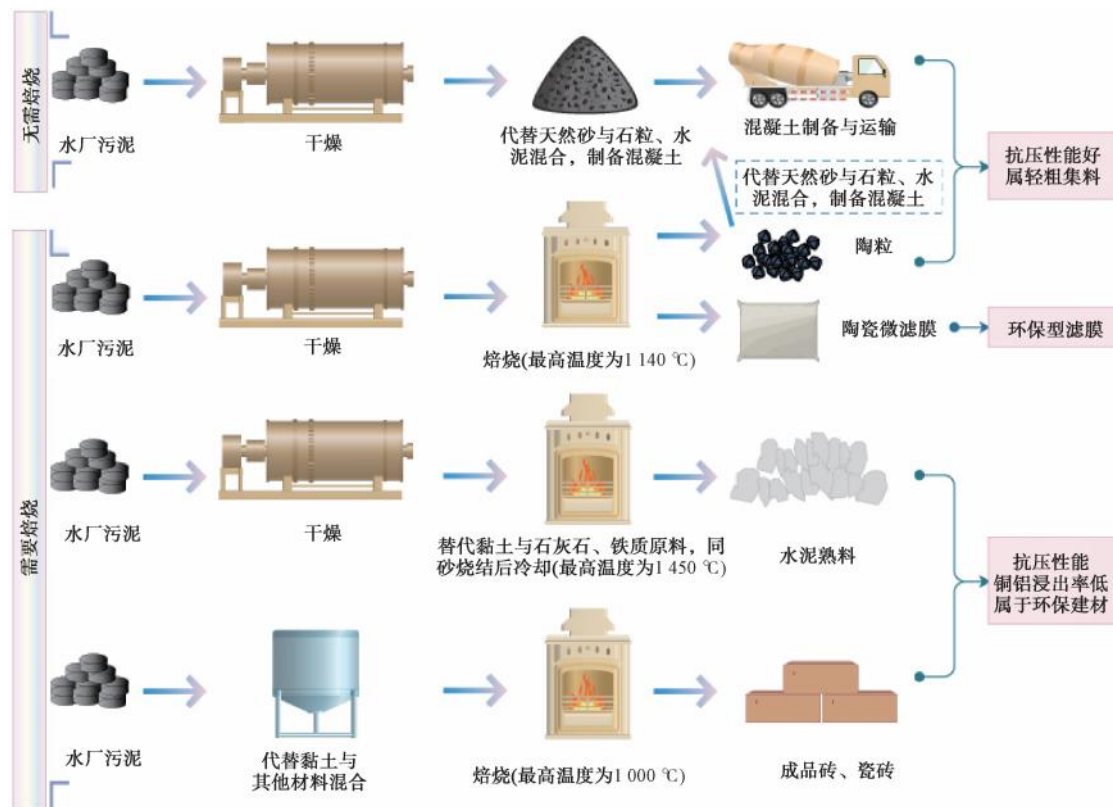


图2 建筑材料资源化利用过程^[2, 37-38]

Fig. 2 Resource Utilization Process of Construction Materials^[2, 37-38]

为表面沉淀和特异性吸附,污泥粒径越小,吸附量越大且平衡时间越短,且以化学吸附为主^[42]。而对于 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 等离子,pH值为4~5时吸附效果最佳,吸附过程符合准二级动力学方程和朗格缪尔(Langmuir)等温吸附模型;吸附机理主要包括静电吸引、羟基取代和表面络合作用^[43]。

在氮、磷、氟、有机污染物去除中,污泥基吸附剂表现出优异性能。例如对磷吸附^[44-45],污泥颗粒对磷酸盐的吸附效果依次为正磷酸盐(如 KH_2PO_4)>聚磷酸盐[如 $(\text{NaPO}_3)_6$]>有机磷酸盐(如 $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_5\text{O}_7\text{P}\cdot\text{H}_2\text{O}$);TP在pH值约为7时吸附效果最佳,其去磷机制除物理吸附外,还包括滤料中金属离子与磷溶液发生交换或沉淀反应。对氨氮吸附^[3,45]、水厂污泥及其衍生吸附剂对氨氮的吸附以物理吸附为主,在碱性条件下去除率较高,效能低于磷吸附^[3,51]。

3.3.2 应用案例

水厂污泥制备的陶粒除应用在建材领域(见3.2小节),在400~600℃温度下焙烧还可应用于氮磷吸附^[45-46]。蔡子豪^[8]以水厂残泥与芬顿污泥

为原料制备的免烧陶粒(UCFWTR)具备纤维网状结构及丰富的活性吸附点位,对磷酸盐的吸附效果稳定,依次为铁铝结合磷>钙结合磷>残渣磷>闭蓄还原磷>速效交换磷。张佳钰^[47]开发了海藻酸钠包埋污泥凝胶球用于除氟;袁春博^[7]利用铝泥作为人工湿地吸附基质强化除磷效率;朱世俊^[48]则利用铁泥活化过硫酸盐,开发高效的过硫酸盐催化剂以去除难降解有机物。这类资源化利用方式,不仅实现了废物增值利用,还可减少外购药剂需求,间接降低温室气体排放。

3.4 混凝/沉淀材料

水厂污泥富含残余铝盐/铁盐及水解产物,具备混凝活性与胶体调控能力,可回用于水厂絮凝单元,或跨系统用于污水污泥调理及尾水强化处理,形成“以废治废、药剂替代”的资源循环模式^[2]。

3.4.1 给水处理系统内回用

在水厂内部,脱水污泥经适当预处理(如研磨、活化)后可作为混凝助剂或部分替代主混凝剂,通过释放残余金属离子(Al^{3+} 、 Fe^{3+})促进胶体脱稳与絮体生长。其作用机制如图3所示,主要包括以下

3个方面。(1)电荷中和:金属阳离子压缩双电层,降低胶体 Zeta 电位;(2)吸附架桥:水解产物在颗粒间形成聚合桥联,促进大尺寸絮体($>200\ \mu\text{m}$)快速生成;(3)有机物协同去除:残余金属氢氧化物对溶解性有机碳(DOC)具有配位吸附能力,抑制消毒副产物(DBPs)前体物生成。

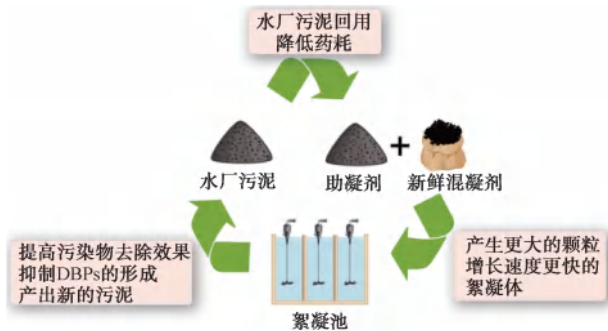


图3 水厂污泥在水厂的循环利用机制

Fig. 3 Internal Recycling Processes of WTP Sludge in WTP

相关研究^[49]表明,水厂污泥的回用可协同发挥金属盐混凝与粉末活性炭吸附的双重作用,有效降低新鲜混凝剂投加量、缩短絮凝体形成动力学周期,显著提升有机污染物的去除效能。Khedher 等^[16]将水厂污泥以 3 g/L 投加量作为混凝剂助剂回用于饮用水混凝单元,显著改善絮凝体特性、可使硫酸铝需

量减少约 50%、维持 DOC 去除效率 $\geq 70\%$ 、三卤甲烷降低 30%、有效提升水质风险控制与药剂替代效率。

3.4.2 污水处理系统协同应用

在污水处理系统中,向污水处理厂剩余污泥内投加水厂污泥,可利用其残余金属阳离子的电中和与吸附架桥作用,促进微生物絮体聚集与胶体颗粒沉降,从而改善脱水性能并强化污染物去除^[50]。其作用机制如图 4 所示,包括:水厂污泥中的无机颗粒在联合脱水过程中可形成良好的透水通道和深度脱水时起到压榨作用,从而起到物理调理与脱水性能提升的效果。随后的压滤过程中,无机颗粒通过相互摩擦与挤压促进污泥颗粒破裂,从而有效释放结合水与细胞水,提升脱水性能^[51];液相中的悬浮物和胶体颗粒浓度显著下降,剩余污泥中的氨氮、剩余污泥总固体(TS)、挥发性固体(VS)均得到显著协同控制^[52];陶赞^[53]研究表明,投加量质量浓度为 100 g/L 的水厂污泥时,污水处理厂尾水 TP 去除率可达 98.5%~99.3%,突破传统生物除磷瓶颈,起到除磷强化效果;相关研究证实,掺混污泥可显著提升污水处理厂金属/重金属去除率,如 Cr(III)和 Pb(II)的吸附量为 30%~100%^[54],对 Cu(II)吸附量达 85%,对金属/重金属达到共沉淀作用^[55]。

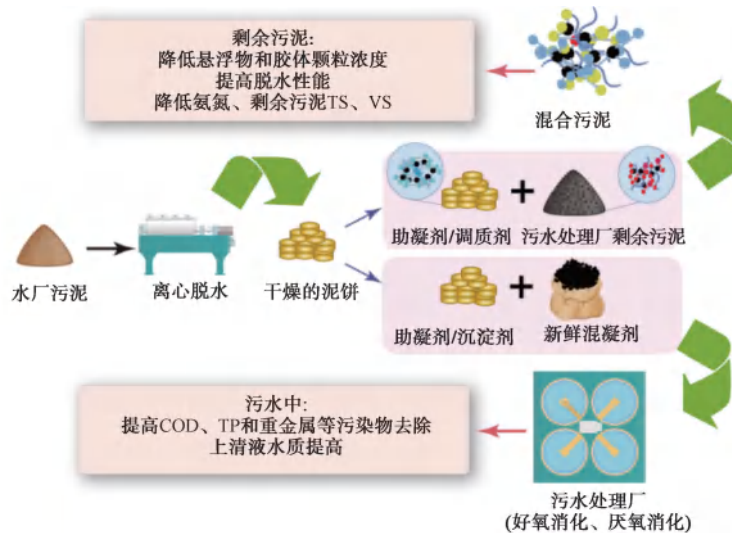


图4 水厂污泥在污水处理厂的资源化利用机制

Fig. 4 Resource Utilization Mechanism of WTP Sludge in WWTP

3.5 再生材料

水厂污泥的无机组分具备作为铝盐和铁盐再生前驱体的化学潜力。通过定向分离与提纯工艺,可实现金属资源的闭环回收,减少原生化学品消耗,降

低环境负荷。

3.5.1 铝盐回收

含铝污泥,主流回收工艺包括^[56-58]:酸化法:以硫酸或盐酸溶解污泥,氢氧化铝与硫酸或盐酸反应

生成 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 或 AlCl_3 , 反应后的泥水进行二次固液分离。但存在酸耗大、杂质共溶(如 Mn、Cr)、酸性剩余污泥化学调节费用高及回收成本高等问题^[56]; 碱溶法: 适用于富铝污泥, 在强碱性条件(pH 值大于 12)下选择性溶出铝酸盐, 易受硅杂质干扰; 组合膜法: 集成超滤/纳滤实现金属离子分级浓缩, 适用于高纯度再生混凝剂制备; 灼烧-酸溶法: 先高温(500~700℃)脱羟基转化为氧化物, 再酸浸提铝, 提升反应活性与选择性。离子交换/萃取法: 通过螯合树脂或有机萃取剂选择性吸附 Al^{3+} , 回收率>80%, 产物纯度高, 有效规避 Fe、Mn、Cr 等杂质风险^[57]。

3.5.2 铁盐回收

铁盐回收主要依赖酸浸工艺, 在 pH 值为 1.5~2.0 的条件下, Fe 浸出率可达 60%~70%^[58]。所得再生铁盐在浑浊度与有机物去除方面表现与商品铁盐相当, 具备工程回用价值^[59]。然而, 该工艺面临以下瓶颈: 高酸耗与中和成本: 每 t DS 需消耗 1.2~1.8 t 工业酸, 后续碱中和产生大量盐类副产物; 设备腐蚀风险: 强酸环境对反应器材质要求高, 增加基建与维护成本; 杂质控制难度: 若原水含金属/重金属, 酸浸过程易导致 Mn、Cr 等共溶, 影响再生产品水质适用性。

4 水厂污泥资源化利用的政策、标准及费用

4.1 国内外政策标准对比分析

在水厂污泥资源化治理体系构建方面, 以挪威和丹麦为代表的北欧国家已形成“立法赋权-过程监管-市场激励-标准分级”的成熟政策框架, 建立了自上而下的跨部门协同治理与产品化导向管理模式, 兼具强制性与可操作性, 确保“营养资源”污泥产品在生产经营者与终端用户间实现有序循环^[4]。

《欧盟肥料产品法规》(EU 2019/1009)^[60]中明确将污泥衍生材料纳入肥料产品范畴, 为其市场化提供了法律依据。该法规附件第二部分明确将“污水污泥”排除在允许的原料清单之外, 反映出欧盟对污泥农用的审慎态度, 同时为水厂污泥这类低风险固体废物的资源化利用预留了政策空间。美国国家环境保护局(EPA)针对给水污泥制定了《给水处理残渣管理与利用技术指南》, 强调土地利用的安全性评估与分级管理, 鼓励其在土壤改良中的有益

利用。

相较之下, 我国污泥管理仍以“风险防控”为主导, 政策重心集中于污水处理厂污泥, 而水厂污泥缺乏可操作性的法律管控依据。2021年,《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030年前碳达峰行动方案》中明确要求各行业推进系统性减污降碳。供水系统作为基础能源的民生经济行业, 其污泥处置环节的碳足迹已成为行业碳核算关键节点^[3]。2023年, 国家发展改革委、住房城乡建设部、生态环境部联合印发《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》(发改环资[2023]1714号)^[61], 明确提出“积极推广污泥土地利用, 鼓励在满足相关标准和规范的前提下, 将处理后的污泥作为肥料或土壤改良剂, 用于国土绿化、荒漠改良、矿区修复等”, 为水厂污泥资源化利用提供了宏观政策导向。

4.2 我国现行标准解读与资源化路径约束

现行《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》和《中华人民共和国水污染防治法》中“污泥”均特指污水处理厂污泥, 未涵盖水厂污泥。仅有《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)对“排泥水”与“泥饼”进行定义, 但未配套资源化技术规范与污染物限值; 尽管《能源管理体系要求及使用指南》(GB/T 23331—2020)可为供水企业及资源化主体提供能源管理框架, 但针对水厂污泥处理过程的能耗控制尚无专项标准。

《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)^[21]是目前与水厂污泥土地利用最直接相关的国家标准。该标准将污泥分为 A 级(允许用于食用作物耕地)和 B 级(仅限园林绿化、林地、牧草地及非食用作物耕地)。对水厂污泥而言, 污染物及卫生学指标基本满足 B 级要求, 其污染物及卫生学指标基本满足污泥控制标准 B 级要求, 但在重金属含量方面存在关键约束。

(1) 砷(As)、Cd、铅(Pb)等重金属含量通常低于 B 级限值, 但部分水厂污泥的 As、Cd、Pb 可能超出 A 级标准($\text{As} < 25 \text{ mg/kg}$ 、 $\text{Cd} < 3 \text{ mg/kg}$ 、 $\text{Pb} < 300 \text{ mg/kg}$), 故不适用于食用农作物种植;

(2) 标准未充分考虑水厂污泥中铝盐残留的环境风险——Al 虽未列入标准管控指标, 但长期施用可能导致土壤 Al 累积, 对酸性土壤中的植物根系产生潜在胁迫;

(3)标准将污泥视为整体管控对象,未区分水厂污泥与污水处理厂污泥的特性差异,导致水厂污泥在土地利用中面临与污水污泥相同的严格管控要求,但水厂污泥的病原体风险极低、有机污染物含量微少,过度管控反而抑制了其资源化潜力。此外,新标准将连续施用年限从 20 a 压缩至 5 a,虽从风险防范角度具有合理性,但也大幅提升了土地利用路径的运营成本与监管频次。

上述标准约束导致水厂污泥土地利用路径审批受阻,技术推广缺乏政策依据。监管部门对污泥“资源属性”定位不明确,使得即使符合 B 级标准的水厂污泥,在具体项目审批中仍面临属地管理差异与部门协调困难。

4.3 管理机制与费用困境

我国水厂污泥管理职责由住房城乡建设部(负责行业技术指导)与生态环境部(负责环境影响监管及固体废物属性认定)共同承担,存在职责交叉与监管盲区。管理上,缺乏强制性收费机制,处理资金长期依赖自来水企业内部成本分摊,导致资源化投入不足;叠加资源化产品市场认可度低、应用场景受限,进一步抑制了产业化进程。相关企业可响应《中国制造 2025》战略规划,参照国家级绿色工厂的评价要求,从污泥产生、资源化利用、产品输出及环境排放等环节系统提升污泥管理的绿色化水平。

目前,我国尚未建立统一的给水污泥处理处置收费制度,这是制约其规范化、规模化发展的关键制度瓶颈。当前,处置成本(脱水、运输、资源化产品销路、填埋处置等)通常内含于自来水公司的运营成本中,并通过水价间接回收,但未作为独立收费项目列支。对于委托第三方处理或进入污水管网的,则需依据合同约定或地方规定支付相应费用。污水处理厂污泥已通过《污水处理费征收使用管理办法》纳入法定污水处理费范畴,而水厂污泥仍处于“无费可收、无价可依”状态,严重制约其资源化的可持续发展。

5 讨论

5.1 新兴技术及工艺发展方向

当前水厂污泥资源化技术正从“单一处置”向“高值化、低碳化、区域协同”方向演进。技术选型需兼顾处理效能、经济成本与环境风险的平衡,重点突破高干脱水与高附加值材料制备瓶颈。

(1) 高效脱水与预处理技术

新兴高效低碳脱水技术通过革新干燥原理与能源利用方式,显著降低传统污泥处理的高能耗与碳排放难题。冻融法近些年在水厂污泥领域有了较为广泛的应用,该法能有效促进污泥金属残渣态向酸溶无机态等可提取态转化^[62]。高压板框、立式高压板框等高干脱水设备近些年逐步应用在给水污泥脱水领域,广东省某水厂采用板框压滤机深度处理北江水源污泥,无论是否投加调理剂,泥饼含水率均可稳定降至 40%左右^[63]。

(2) 高附加值材料

目前,水厂污泥资源化已在多个场景落地。工程回填方面,南京水务集团资源再生科技有限公司将污泥应用于流态化固化土,用于市政管廊及深基坑回填,在缩短工期、提升施工质量、降低成本方面表现优异^[64];苏州市某供水有限公司曾采用生石灰和水泥对污泥进行改良,制得石灰水泥综合稳定土,应用于市政管道垫层^[65]。农业利用方面,顾雍^[66]通过中试证实,污泥与菌菇渣堆肥后可作为林地栽培基质,兼具经济与环境效益。

杭州市针对不同区域特征采取了差异化的水厂污泥处置策略:主城区及萧山区等区域的水厂污泥主要用于建筑工程临时用砖;临平区、余杭区污泥用于周边低洼地绿化覆土或制砖;临安区排泥水主要通过生态湿地处理;淳安及建德境内水厂排泥水则直接纳入市政污水管网^[67]。这些案例表明,不存在通用的“最佳技术”,只有基于当地消纳能力、运输半径与环境承载力的“适宜技术”。

5.2 污泥处理原则与政策协同推进策略

5.2.1 污泥处理原则

立足国家绿色发展战略与行业政策导向,我国水厂污泥处理处置应遵循“绿色低碳、资源循环、环境友好、因地制宜”的总体原则,以“稳定化、减量化、无害化、资源化”为核心路径,构建经济可行、低能耗、低排放的全流程处理体系^[2,68](图 5)。为实现水厂污泥资源化利用与碳减排的协同目标,需坚持以下技术原则。

(1)以无害化为前提:严格管控金属/重金属、病原体残留等环境风险,强化易腐有机物稳定化和病原菌灭活,如堆肥过程维持特定温度与持续时间,实现病原微生物灭活;用于种植基质时,金属/重金属浸出量低于标准限值。

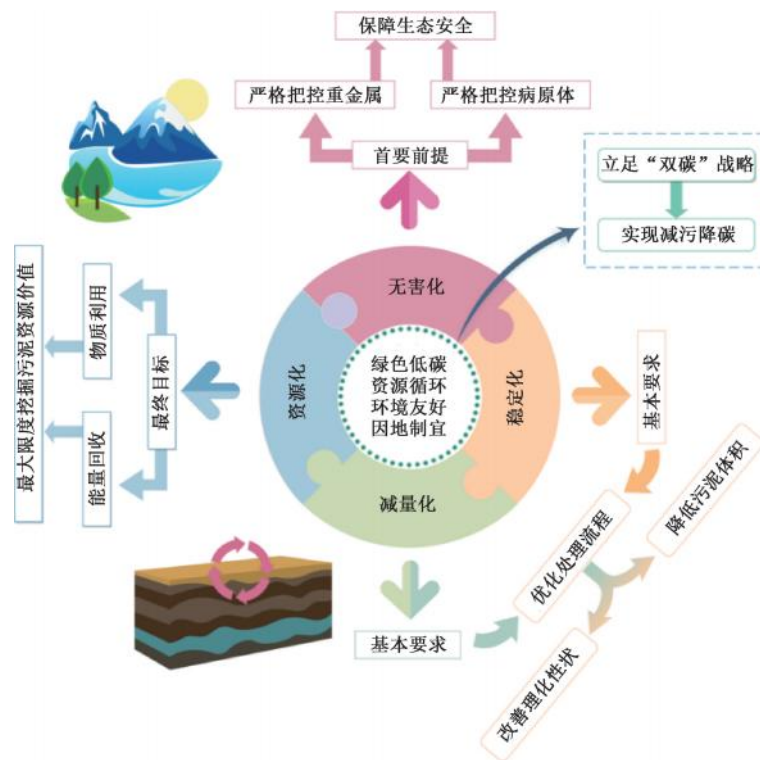


图5 水厂污泥合理利用处理基本原则

Fig. 5 Fundamental Principles for Rational Utilization of WTP Sludge

(2)以减量化为基础:以脱水预处理为关键减量化环节。

(3)以稳定化为保障:通过物理/化学预处理手段提升污泥性状稳定性,进而提高实际应用中的持久性。

(4)资源化是最终目标:拓展“能量回收+物质利用”双轨路径,如污泥建材化、吸附材料、再生材料等。耦合技术与管理系统,构建经济合理、低能耗、低排放的减污降碳协同增效资源化体系。

5.2.2 政策发展方向与存在问题

基于上述技术原则,我国水厂污泥资源化未来应重点关注以下政策方向及存在的深层次问题。

(1)存在的主要问题

①标准适用性不明与定位缺失。当前《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)主要针对污水污泥,未充分体现水厂污泥低有机质、低病原体、高无机质的特性,导致其土地利用面临过度管控。标准中未纳入铝盐残留风险指标,而铝的潜在生态毒性已成为制约水厂污泥土地利用的科学争议焦点。监管部门对污泥“资源属性”定位不明确,导致土地利用路径审批受阻,技术推广缺乏政策依据。

②经济机制缺失与成本内部化困难。我国尚未建立统一的给水污泥处理处置收费制度,处置成本通常内含于自来水公司运营成本中,未作为独立收费项目列支。相较于污水污泥已纳入法定污水处理费范畴,给水污泥处于“无费可收、无价可依”状态,严重制约资源化项目的经济性。

③产业化协同不足与公众接受度低。多数技术停留于中试阶段,小型水厂设备适配性差。此外,公众对污泥土地利用存在“邻避效应”,担心重金属积累风险,导致资源化产品市场认可度低。

④区域差异化指导缺失。以杭州市为例,各区县根据自身条件采取了差异化的处置策略,但这一差异化选择更多源于地方自主探索,缺乏上位政策的明确指导与规范。不同处置路径的环境准入要求、技术标准与监管责任尚未形成统一框架,存在“一区一策、标准不一”的潜在风险。

(2)政策发展方向

①构建分级标准与豁免管理体系。借鉴欧盟污泥产品法规经验,探索将符合标准的水厂污泥产品纳入绿色建材、有机肥料等目录,明确其豁免管理或产品化路径,破除“固废”与“产品”之间的制度壁

垒。建议制定分区域、分类型的水厂污泥资源化技术标准。针对低风险路径(如建材利用、非食用作物种植),简化审批流程;针对高风险路径,强化环境监测。

②完善市场化激励与收费机制。将污泥处理处置费用纳入水价成本或设立专项基金,保障项目经济性。通过绿色采购、税收优惠等政策,引导市场主体参与资源化产品消费。

③推动“因地制宜、多路径协同”技术体系。结合当地规划布局、地理环境特征及经济发展水平,促进土地利用、能量与物质回收等多种路径的有机融合。驱动技术从实验室走向规模化应用,最终通过价格机制保障项目经济性,制定分区域、分类型的技术标准,推动产业向规模化、专业化、绿色低碳发展。

④强化部门协同与责任落实。厘清住房城乡建设部与生态环境部在水厂污泥管理中的职责边界,建立跨部门协调机制,避免监管真空与重复监管。

通过价格机制保障项目经济性,引导市场主体参与;制定分区域、分类型的技术标准,推动产业向规模化、专业化、低碳化发展;完善“立法赋权-标准引领-市场激励”有效衔接的制度框架,是破解DWTS资源化困境、实现产业高质量发展的关键所在。

6 总结

水厂污泥作为城市供水系统衍生的特殊固废,其管理已从环境风险控制转向资源价值深度挖掘的新阶段。本文系统分析水厂污泥物化特性、产生现状、处理技术及资源化路径,聚焦政策方向及对应政策下的资源化发展方向,以及资源化需要解决的问题。

主要结论如下。

(1)水厂污泥具备独特的资源化禀赋。其无机主导(58.9%~85.0%)、低有机质(<30%)、低病原体特性,显著区别于污水处理厂污泥,为土地改良、建材制备、吸附材料开发及混凝/沉淀材料等提供了坚实的物质基础,实现了从“废弃物”向“功能资源”的转化,为循环经济提供物质基础与技术接口。

(2)多元化资源化路径的碳减排协同潜力显著。建议优先发展混凝/沉淀材料回用与金属盐再生路径,二者具备明确的净负碳属性,技术可行性高与水处理系统高度耦合;建材化路径通过替代高碳

原料及高温碳封存发挥作用,非烧结路径潜力更优。土地资源化碳排放最低且具有生态协同效益,但需严控环境风险。各路径的碳效益均高度依赖脱水低碳化及清洁能源应用。

(3)我国水厂污泥资源化进程面临的问题与发展政策。我国水厂污泥资源化面临标准适用性不明、经济机制缺失及产业化协同不足三重瓶颈。未来政策发展应重点聚焦:①制定基于污泥性质的分级利用策略,明确资源属性与豁免路径;②完善市场化激励与收费机制,将处置费用纳入水价成本;③强化部门协同与责任落实,厘清住建与生态环境部门职责边界;④完善“立法赋权-标准引领-市场激励”有效衔接的制度框架,推动产业向规模化、专业化、绿色低碳发展。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴2024[M]. 北京:中国城市出版社, 2025.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban construction statistical yearbook 2024[M]. Beijing: China City Press, 2025.
- [2] 罗振宇, 徐斌, 唐玉霖, 等. 城市给水厂污泥处理与资源化利用途径及策略分析[J]. 能源环境保护, 2023, 37(5): 99-109.
Luo Z N, Xu B, Tang Y L, et al. Method and strategy analysis of sludge treatment and resource utilization in urban drinking water treatment plants[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(5): 99-109.
- [3] 周抒宇, 赵乐军, 宋现财, 等. 给水厂污泥土地利用方式与碳减排研究[J]. 供水技术, 2023, 17(3): 1-5.
Zhou S Y, Zhao L J, Song X C, et al. Study on land utilization and carbon emission reduction of water supply plant sludge[J]. Water Technology, 2023, 17(3): 1-5.
- [4] 崔超, 张荣兵, 熊建军, 等. 挪威、丹麦与国内污泥产品土地利用管理差异和启示[J]. 中国给水排水, 2023, 39(14): 47-55.
Cui C, Zhang R B, Xiong J J, et al. Differences and enlightenment of land use management of sludge products in Norway, Denmark and China[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(14): 47-55.
- [5] Machado R C, do Valle S F, Sena T B M, et al. Aluminosilicate and zeolitic materials synthesis using alum sludge from water treatment plants: Challenges and perspectives[J]. Waste Management, 2024, 186: 94-108. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.05.046.
- [6] 刘文芬. 镉铁负载给水厂污泥复合材料的磷吸附性能及应用

- 研究[D]. 北京:北京林业大学, 2022.
- Liu W F. Research on phosphorus adsorption performance of lanthanum iron-loaded drinking water treatment residuals composite materials and its application [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [7] 袁春博. 基质强化人工湿地脱氮除磷及铝污泥轻质多孔基质的研发与应用研究[D]. 西安:长安大学, 2021.
- Yuan C B. Substrate enhanced constructed wetlands for nitrogen and phosphorus removal and development & application of alum sludge-containing lightweight porous substrate [D]. Xi'an: Changan University, 2021.
- [8] 蔡子豪. 新型给水厂残泥-芬顿污泥免烧陶粒的制备及其在废水处理中的应用研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2022.
- Cai Z H. Study on the preparation of unburned ceramsite from water treatment residuals-Fenton sludge and its application in wastewater treatment [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022.
- [9] 王鑫, 任伯帆, 黄威. 城市给水厂污泥组成成分及资源化利用[J]. 市政技术, 2021, 39(4): 150-153.
- Wang X, Ren B Z, Huang W. Sludge composition and resource utilization of urban water supply plants[J]. Journal of Municipal Technology, 2021, 39(4): 150-153.
- [10] 穆丹琳, 徐慧, 肖峰, 等. 污泥调理对给水污泥脱水性能的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5447-5452.
- Mu D L, Xu H, Xiao F, et al. Effects of conditionings on sludge dewaterability for water treatment residuals[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(10): 5447-5452.
- [11] 于大海. 上海自来水厂泥渣处置方式的研究探索[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(5): 57-63.
- Yu D H. A study and exploration of waste residue management methods in Shanghai waterworks [J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(5): 57-63.
- [12] 李微, 沈玉东. 凤凰水厂排泥水处理工程介绍[J]. 城市建设理论研究, 2011, (22): 1-2.
- Li W, Shen Y D. Introduction to the sludge water treatment project at Fenghuang water treatment plant [J]. Theoretical Research on Urban Construction, 2011, (22): 1-2.
- [13] 陈静, 陈士才, 许建华, 等. 自来水厂排泥水的静沉及浓缩试验研究[J]. 中国给水排水, 2005, 21(2): 40-43.
- Chen J, Chen S C, Xu J H, et al. Study on static settling and thickening of sludge water from water works[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(2): 40-43.
- [14] 吴雨晴. 自来水厂余泥资源化综合利用的途径分析[J]. 大众标准化, 2022(16): 114-116.
- Wu Y Q. Analysis on the way of comprehensive utilization of residual mud in waterworks[J]. Popular Standardization, 2022 (16): 114-116.
- [15] 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册:第6册 工业排水[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.
- Beijing General Municipality Engineering Design & Research Institute Co., Ltd. Design manual of water supply and drainage: volume 6 industrial drainage [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [16] Khedher M, Awad J, Donner E, et al. The potential reuse of drinking water treatment sludge for organics removal and disinfection by-products formation control [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(3): 108001. DOI: 10.1016/j.jece.2022.108001.
- [17] Hidalgo A M, Murcia M D, Gómez M, et al. Possible uses for sludge from drinking water treatment plants [J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 143(3): 04016088. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001176.
- [18] 国家统计局. 供水用水情况 [EB/OL]. [2026-02-08]. <https://data.stats.gov.cn/dg/website/page.html#/pc/national/yearData>.
- National Bureau of Statistics. Water supply and usage situation [EB/OL]. [2026-02-28]. <https://data.stats.gov.cn/dg/website/page.html#/pc/national/yearData>.
- [19] 张晋, 刘树鑫, 孙舶洋. 给水污泥特性及其资源化利用的研究[J]. 节能, 2019, 38(6): 165-167.
- Zhang J, Liu S X, Sun B Y. Analysis on characteristics of sludge in water supply plant and its resource utilization [J]. Energy Conservation, 2019, 38(6): 165-167.
- [20] 张晋. 给水污泥制备陶粒的性能及其对农村污水除磷效果试验研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2020.
- Zhang J. Experimental study on the preparation of ceramsite from feedwater sludge and its effect on phosphorus removal in rural sewage [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [21] GB 4284—2018 农用污泥污染物控制标准[S].
- GB 4284—2018 Control standards of pollutants in sludge for agricultural use[S].
- [22] 谢敏, 李芳, 李淑展, 等. 净水厂污泥对盆栽植物高羊茅和万寿菊的生长影响研究[J]. 给水排水, 2013, 39(1): 134-137.
- Xie M, Li F, Li S Z, et al. Effects of sewage sludge on the growth of potted plants tall fescue and marigold [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(1): 134-137.
- [23] 刘鹏程. 冻融法应用于净水污泥脱水效能研究[D]. 苏州:苏州科技大学, 2022.
- Liu P C. Study on the dewatering performance of freeze-thaw conditioning applied to drinking water treatment sludge [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2022.
- [24] Tchobanoglous G, Stensel H D, Tsuchihashi R, et al. Wastewater engineering: Treatment and resource recovery [M]. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [25] 李丰庆, 尹文选, 张道义, 等. 给水厂污泥特性及排泥水处理设备选型要点[J]. 给水排水, 2024, 50(9): 15-21.
- Li F Q, Yin W X, Zhang D Y, et al. Characteristics of sludge in water treatment plants and key points for equipment selection in

- dewatering systems [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 50(9): 15-21.
- [26] GB 18485—2014 生活垃圾焚烧污染控制标准[S].
GB 18485—2014 Standard for pollution control on the municipal solid waste incineration[S].
- [27] 黄兴刚, 朱卫兵, 朱伯媛, 等. 离心脱水干化处理渗滤液剩余污泥研究[J]. *安徽化工*, 2019, 45(2): 83-85.
Huang X G, Zhu W B, Zhu B Y, et al. Study on the application of centrifugal dewatering and drying treatment of residual sludge from leachate[J]. *Anhui Chemical Industry*, 2019, 45(2): 83-85.
- [28] 王周. 污水厂污泥常见处理处置工艺比选及炭化工艺设计[J]. *山东化工*, 2022, 51(12): 178-181.
Wang Z. Comparison and selection of common treatment methods of sewage sludge and carbonization process design[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2022, 51(12): 178-181.
- [29] 张凯翔, 赵成成, 刘红宇, 等. 基于先进技术的给水厂污泥资源化利用与环保效益分析[J]. *皮革制作与环保科技*, 2024, 5(14): 117-119.
Zhang K X, Zhao C C, Liu H Y, et al. Analysis of resource utilization and environmental benefits of sludge in water supply plants based on advanced technologies[J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 2024, 5(14): 117-119.
- [30] 阮琳, 袁永钦, 张俊涛, 等. 自来水污泥堆肥化研究[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(7): 1650-1654.
Ruan L, Yuan Y Q, Zhang J T, et al. Study on composting of waterworks sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(7): 1650-1654.
- [31] 李芳, 何怀光. 给水污泥作为栽培基质对土壤环境的影响[J]. *科技创新与应用*, 2015, 5(10): 9-10.
Li F, He H G. Impact of using wastewater sludge as a cultivation substrate on the soil environment[J]. *Technology Innovation and Application*, 2015, 5(10): 9-10.
- [32] Okuno N, Takahashi S. Full scale application of manufacturing bricks from sewage[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(11): 243-250.
- [33] Pan J R, Huang C, Lin S. Reuse of fresh water sludge in cement making[J]. *Water Science and Technology*, 2004, 50(9): 183-188.
- [34] Mouratib R, Achiou B, El Krati M, et al. Low-cost ceramic membrane made from alumina- and silica-rich water treatment sludge and its application to wastewater filtration[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(15): 5942-5950.
- [35] 徐振华. 污水厂污泥与河道底泥联合高温烧结制备陶粒的技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
Xu Z H. Technology research on sintering of ceramisite with sewage sludge and river sediment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [36] Kiziničević O, Kiziničević V, Boris R, et al. Eco-efficient recycling of drinking water treatment sludge and glass waste: Development of ceramic bricks[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20(2): 1228-1238.
- [37] 郭家玮. 给水厂污泥-地聚物基免烧砖与透水混凝土的制备及其性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
Guo J W. Study on preparation and properties of water supply plant sludge-geopolymer based unburned brick and pervious concrete[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [38] Liu Y, Zhuge Y, Chow C W K, et al. Recycling drinking water treatment sludge into eco-concrete blocks with CO₂ curing: Durability and leachability [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 746: 141182. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141182.
- [39] 孟盼盼. 陶粒基人工湿地处理生活污水及新型陶粒的开发研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
Meng P P. Study of light-weight aggregates-based constructed wetlands for wastewater treatment and development of sludge media[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [40] 谷鹏飞. 新型给水污泥基质填料在污水处理中的应用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
Gu P F. Research on new type of water plant sludge carrier application in sewage treatment [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [41] 贺君, 王启山, 任爱玲. 给水厂污泥制高强陶粒技术研究[J]. *工业安全与环保*, 2010, 36(11): 51-52.
He J, Wang Q S, Ren A L. Technology research on the production of high strength ceramsite by waterworks sewage[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2010, 36(11): 51-52.
- [42] 仇付国, 夏鑫, 王肖倩, 等. 给水厂污泥对Hg(II)的吸附性能[J]. *环境工程*, 2023, 41(3): 34-41.
Qiu F G, Xia X, Wang X Q, et al. Hg(II) adsorption performance by water treatment residual [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(3): 34-41.
- [43] 王倩. 给水厂污泥颗粒制备及其对城市地表径流重金属的控制[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
Wang Q. Preparation of granular sludge from water supply plants and the control of heavy metals in urban surface runoff[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [44] 张银婷. 新型污泥基滤料的开发与应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
Zhang Y T. Study on development and application of a new sludge-based filter material [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [45] 李妍, 余育方, 林鸿, 等. 自来水厂污泥煅烧后对总磷和氨氮的吸附动力学研究[J]. *化学工程与装备*, 2015(2): 18-20.

- Li Y, Yu Y F, Lin H, et al. Study on adsorption kinetics of total phosphorus and ammonia nitrogen by calcined sludge from waterworks[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2015(2): 18-20.
- [46] 郑育毅, 余育方, 李妍, 等. 自来水厂污泥制得陶粒对污水中磷和氨氮的吸附[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(2): 756-762.
- Zheng Y Y, Yu Y F, Li Y, et al. Adsorption of phosphorus or ammonia nitrogen by ceramsite made from waterworks sludge[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(2): 756-762.
- [47] 张佳钰. 海藻酸钠包埋污泥凝胶球的制备及除氟机理研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2022.
- Zhang J Y. Study on the preparation and mechanism of sodium alginate entrapped sludge gel beads for fluoride removal[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2022.
- [48] 朱世俊. 给水厂铁泥基催化剂制备及活化过硫酸盐效能与机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Zhu S J. Development of catalyst derived from drinking water treatment iron sludge for peroxydisulfate activation and mechanisms[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [49] Qi L, Cheng R, Wang H C, et al. Recycle of alum sludge with PAC (RASP) for drinking water treatment[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 25(1/2/3): 170-175.
- [50] 严爱兰, 李军, 马挺, 等. 自来水厂与污水厂污泥联合处理处置研究及应用进展[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(6): 30-34.
- Yan A L, Li J, Ma T, et al. Research and application progress of sludge treatment and disposal in waterworks and wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(6): 30-34.
- [51] Li J, Liu L, Liu J, et al. Effect of adding alum sludge from water treatment plant on sewage sludge dewatering[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, 4(1): 746-752.
- [52] 杜海霞, 区恒煜, 张蕾, 等. 给水污泥提高剩余污泥消化稳定性及处理水质[J]. *科技创新与应用*, 2020, 10(20): 1-4, 8.
- Du H X, Ou H Y, Zhang L, et al. Water supply sludge improves digestion stability of excess sludge and quality of treated water[J]. *Technology Innovation and Application*, 2020, 10(20): 1-4, 8.
- [53] 陶赞. 给水厂排泥水用于污水厂剩余污泥脱水除磷研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- Tao Y. Study on sludge water of wastewater treatment plant is used to remaining sludge dehydration and dephosphorization[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [54] 程爱华, 黄科进. 给水厂污泥吸附 Cr(VI) 的性能研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(4): 917-920.
- Cheng A H, Huang K J. Study on adsorption properties of Cr(VI) on waterworks sludge[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(4): 917-920.
- [55] 王倩, 杜晓丽, 崔申申, 等. 给水厂污泥颗粒制备及对铜离子的吸附行为[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1672-1677.
- Wang Q, Du X L, Cui S S, et al. Preparation of granular sludge from water supply plants and its adsorption behavior of copper ions[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(4): 1672-1677.
- [56] 童祯恭, 吴哲帅. 净水厂排泥水处置现状的若干分析[J]. *华东交通大学学报*, 2018, 35(6): 88-95.
- Tong Z G, Wu Z S. Analysis on sludge water disposal in water purification plant[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2018, 35(6): 88-95.
- [57] 刘辉, 张玉先. 自来水厂的污泥处置与综合利用[J]. *给水排水*, 2001, 27(11): 15-17, 18.
- Liu H, Zhang Y X. Sludge disposal and utilization of waterworks[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2001, 27(11): 15-17, 18.
- [58] Prakash P, Hoskins D, SenGupta A K. Application of homogeneous and heterogeneous cation-exchange membranes in coagulant recovery from water treatment plant residuals using Donnan membrane process[J]. *Journal of Membrane Science*, 2004, 237(1/2): 131-144.
- [59] Feng J, Bai H, Xue Y D, et al. Recycling of iron and aluminum from drinking water treatment sludge for synthesis of a magnetic composite material (ALCS-Fe-Al) to remove fluoride from drinking water[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2020, 11: 100456. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100456.
- [60] EU 2019/1009: EU fertilising products regulation[S].
- [61] 国家发展改革委, 住房城乡建设部, 生态环境部. 关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见: 发改环资[2023]1714号[EB/OL]. (2023-12-12)[2026-02-28]. https://www.gov.cn/zhengce/202312/content_6923468.htm. National Development and Reform Commission, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Ecology and Environment. Implementation opinions on promoting synergistic reduction of pollution and carbon emission in wastewater treatment: Development and Reform Environmental Resources [2023]No. 1714[EB/OL]. (2023-12-12)[2026-02-28]. https://www.gov.cn/zhengce/202312/content_6923468.htm.
- [62] 刘东, 吴春发, 陆笑舒, 等. 瞬时冻融循环对给水铝污泥铝稳定化效果的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(12): 1644-1655.
- Liu D, Wu C F, Lu X S, et al. Effect of instantaneous freeze-thaw cycles on stabilization performance of aluminum in waterworks sludge[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(12): 1644-1655.
- [63] 沈玉东, 李秋, 刘智皆, 等. 北江水源自来水厂行走式板框压滤机污泥脱水研究[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(15):

- 55-60.
- Shen Y D, Li Q, Liu Z J, et al. Application of walking plate and frame filter press for sludge dewatering in waterworks with Beiji River water source [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(15): 55-60.
- [64] 陈越. 给水污泥“变身”新建材, 水务集团拓展资源化产品新应用[EB/OL]. (2025-10-31)[2026-02-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/X9MvZjQ524SkqvYiBXKVPw>.
- Chen Y. Waterworks sludge ‘transformed’ into new building materials: Nanjing Water Group expands innovative applications for resource recovery products [EB/OL]. (2025-10-31)[2026-02-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/X9MvZjQ524SkqvYiBXKVPw>.
- [65] 陈志伟, 王浩泽, 彭秀华. 石灰与水泥改良水厂污泥进行资源化利用的研究[J]. *供水技术*, 2023, 17(2): 27-30.
- Chen Z W, Wang H Z, Peng X H. Research on improvement of utilization of sludge resourcization in waterworks by lime and cement[J]. *Water Technology*, 2023, 17(2): 27-30.
- [66] 顾雍. 自来水厂泥渣资源化——协同堆肥[EB/OL]. (2024-08-26)[2026-02-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ytXrre71FQ4U97WphX5cxQ>.
- Gu Y. Resource recovery of waterworks sludge: Co-composting approach[EB/OL]. (2024-08-26)[2026-02-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ytXrre71FQ4U97WphX5cxQ>.
- [67] 张亚朋, 吴荣波, 冯一军, 等. 水务一体化背景下杭州市污泥处理处置规划研究[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(10): 15-20.
- Zhang Y P, Wu R B, Feng Y J, et al. Study on sludge treatment and disposal planning under the background of water affairs integration in Hangzhou[J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(10): 15-20.
- [68] 国家发展和改革委员会, 科学技术部, 工业和信息化部, 等. 关于推进污水资源化利用的指导意见: 发改环资[2021]13号[EB/OL]. (2021-01-04)[2026-02-28]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202101/t20210111_1264794.html.
- National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology, & Ministry of Industry and Information Technology. Guidance on promoting wastewater resource utilization: Development and Reform Environmental Resources [2021] No. 13 [EB/OL]. (2021-01-04)[2026-02-28]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202101/t20210111_1264794.html.

(上接第 21 页)

- [82] Moreno-Gómez S, Hochberg M E, van Doorn G S. Quorum sensing as a mechanism to harness the wisdom of the crowds[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 3415. DOI: 10.1038/s41467-023-37950-7.
- [83] 张颖. 群体感应抑制剂改性制备抗生物污染分盐纳滤膜[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- Zhang Y. Fabrication of anti-biofouling salt-separating nanofiltration membranes modified by quorum sensing inhibitors [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [84] Kim J H, Choi D C, Yeon K M, et al. Enzyme-immobilized nanofiltration membrane to mitigate biofouling based on quorum quenching[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(4): 1601-1607.
- [85] Li Y, Dai J X, Ma Y J, et al. The mitigation potential of synergistic quorum quenching and antibacterial properties for biofilm proliferation and membrane biofouling [J]. *Water Research*, 2024, 255: 121462. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121462.
- [86] Yu C, Wu J J, Contreras A E, et al. Control of nanofiltration membrane biofouling by *Pseudomonas aeruginosa* using D-tyrosine [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 423: 487-494. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.08.051.
- [87] Wu B, Wang R, Fane A G. The roles of bacteriophages in membrane-based water and wastewater treatment processes: A review[J]. *Water Research*, 2017, 110: 120-132. DOI: 10.1016/j.watres.2016.12.004.
- [88] Goldman G, Starosvetsky J, Armon R. Inhibition of biofilm formation on UF membrane by use of specific bacteriophages[J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 342(1/2): 145-152. DOI: 10.1016/j.memsci.2009.06.036.
- [89] Zheng W J, Niu Y L, Shi H J, et al. Elucidating the impact of dissolved organic matter on membrane fouling of combined nanofiltration processes using three-dimensional fluorescence with high-pressure size exclusion chromatography [J]. *Desalination*, 2025, 616: 119352. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119352.