

我国城镇污泥安全处置与资源化研究

戴晓虎¹, 侯立安², 章林伟³, 张林⁴, 杨东海¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 北京高新技术研究所, 北京 100085; 3. 中国城镇供水排水协会, 北京 100048; 4. 浙江大学化学工程与生物工程学院, 杭州 310027)

摘要: 污泥作为污水处理的过程产物, 具有“污染”“资源”双重属性, 对其开展妥善处置是污水处理减污降碳的重要任务。虽然我国污泥处理经历了“重水轻泥”向“泥水并重”的转变, 技术与标准体系发展迅速, 但在生态文明建设, 碳达峰、碳中和目标的背景下, 污泥处理处置仍存在亟待突破的短板弱项。本文梳理了城镇污泥产量和泥质特征、处理处置技术、政策标准体系的发展现状, 凝练了污泥处理处置在管理体系、技术标准、路线选择等方面存在的突出问题; 结合我国所处的发展阶段和国际发展趋势, 提出了“绿色低碳、资源循环、环境友好、因地制宜”的发展理念以及相应的重点举措。研究建议, 加强顶层设计, 统筹设施规划布局, 因地制宜选择处理处置路线; 健全污泥处理处置的标准体系, 完善价格补贴机制, 强化责任分工与监管机制; 补短板、强弱项, 提升全链条集成水平, 形成可推广的技术模式; 面向未来实施前沿技术攻关, 推动污泥处理处置与资源化技术装备创新升级。

关键词: 污水厂污泥; 污泥处理; 污染控制; 资源回收; 减污降碳

中图分类号: X703 **文献标识码:** A

Safe Disposal and Resource Recovery of Urban Sewage Sludge in China

Dai Xiaohu¹, Hou Li'an², Zhang Linwei³, Zhang Lin⁴, Yang Donghai¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. High Tech Institute of Beijing, Beijing 100085, China; 3. China Urban Water Association, Beijing 100048, China; 4. College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: As a by-product of wastewater treatment, sludge has dual attributes of pollutant and resource. Proper disposal of sludge is significant for reducing pollution and carbon emissions in sewage treatment. The sludge treatment in China has shifted from emphasis on wastewater treatment over sludge treatment to equal emphasis on sludge and wastewater treatment, and the technologies and standards system have been rapidly developed. However, against the background of carbon peaking and carbon neutrality, there remain shortcomings in sludge treatment in China. In this paper, we reviewed the current status of slug treatment in China from the aspects of urban sludge production and characteristics, slug treatment technologies, and policy and standards systems, and summarized the prominent problems of slug treatment in terms of management system, technical standards, and routes selection. Considering the development stage and international development trends, we proposed a development concept of “green and low-carbon, resource recycling, environmental friendliness, and adapting measures to local conditions”. Corresponding key measures are also proposed. Specifically, the top-level design should be strengthened to coordinate facility planning and layout, and treatment

收稿日期: 2022-05-15; 修回日期: 2022-08-18

通讯作者: 戴晓虎, 同济大学环境科学与工程学院教授, 研究方向为污泥处理与资源化; E-mail: daixiaohu@tongji.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“水污染防治法实施情况评估研究”(2019-XY-01)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

routes should adapt to local conditions. The standards system and price subsidy mechanism for sludge treatment should be improved to clarify the division of responsibilities and strengthen the supervision mechanism. The integration level of the whole chain should be promoted by strengthening the weaknesses to form a technology model that can be applied widely. Research on frontier technologies should be conducted to innovate and upgrade the technologies and equipment for sludge disposal and recycling.

Keywords: sewage sludge; sludge treatment; pollution control; resource recovery; reduction of pollution and carbon emissions

一、前言

污泥作为污水处理的过程产物，浓缩并汇集了污水中30%~50%的污染物及有机物，具有“污染”“资源”双重属性；如果未得到妥善的处理处置，将造成严重的环境污染和资源浪费 [1]。污泥具有高含水、易腐败的特性，对污泥进行减量化、稳定化、无害化、资源化处理处置，是开展污染防治攻坚战的重要任务，也是未来污水处理行业减污降碳的发展方向。

在我国，随着城镇化进程加快、污水处理设施完善，城镇污水处理规模超过 2.2×10^8 t/d，由此产生的污泥量突破 6.6×10^7 t/a（以含水率80%计）；污泥处理处置工作起步晚，长期以来“重水轻泥”，加之污泥的处置方式以填埋为主（造成二次污染、资源浪费），容易产生逸散性温室气体，导致污水处理的减排效应不及预期 [2]。近年来，随着全社会对污泥问题的关注，我国制定了一系列标准规范，发布了有关规划和政策，驱动污泥管理逐步从“重水轻泥”向“泥水并重”转变。

国家加大科技创新投入，在污泥处理技术和装备方面，“十一五”时期着重破解关键环节技术壁垒，“十二五”时期固化多条技术路线并实现装备产业“由点到线”式发展，“十三五”时期完成全链条整装成套的“由线到面”式突破。目前，形成了4条主流技术路线，建成了全链条综合示范区（北京市、上海市），构建了以北京市为代表的厌氧消化+土地利用（林地）、以上海市为代表的干化焚烧+灰渣建材利用、以镇江市为代表的污泥与餐厨协同厌氧消化+园林利用、以南宁市和郑州市为代表的污泥好氧发酵+土地利用（营养土）等示范模式 [3]。

也要注意，我国污泥的安全处理处置与资源化相比国际先进水平还有不小差距，污水处理的污泥短板环节仍待加强。在理念层面，我国污泥处理处置停留在减量化、无害化阶段，而发达国家基本实现了资源循环。在技术层面，由于我国的污泥具有产量大、产生集中、含砂量高、有机质低的特

点，和国外的污泥有着明显区别，导致国外技术及装备、成熟技术路线的引进应用遇到了瓶颈。在管理层面，我国污泥处理处置的标准体系、管理机制、保障措施等不够完善，污泥消纳路径尚未完全打通，使得填埋不可持续，不敢烧、烧不起，土地利用不畅，污泥无处可去的局面依然存在 [4]。

在全球共同应对气候变化、能源资源短缺的背景下，进行污泥无害化处理处置、降低二次污染风险，同时加强污泥资源化利用、实现减污降碳协同增效，是我国污泥处理处置的正确路径，对于污染防治攻坚，生态文明建设，碳达峰、碳中和（“双碳”）目标具有重要意义。本文梳理我国污泥处理处置的总体情况，剖析污泥处理处置与资源化面临的突出问题，提出相应的发展思路与建议，以期对污泥处理处置技术和管理研究提供基础参考。

二、我国城镇污泥处理处置的整体情况

（一）污泥产量大、产生集中，但泥质差、处理难度大，污泥问题形势严峻

我国城镇化水平、污水处理能力快速提高，由此产生的污泥量剧增。根据《2020年城乡建设统计年鉴》，2020年地级以上城市污水处理厂的干污泥产量为 1.163×10^7 t，县级城市的干污泥产量为 1.7×10^6 t；以含水率80%的湿污泥计，县级及以上城市的湿污泥产量为 6.664×10^7 t（见图1） [5]。合理预计，2025年我国污泥产量将突破 8×10^7 t。从污水厂规模的角度看，发达国家以中小规模为主，而我国以集中式处理为主，单厂平均规模是国外的10倍。我国的污泥产生相对集中，减量化需求更显迫切；受限于环境容量，对污泥土地利用、焚烧烟气处理提出了更高要求，安全处理处置压力较大。

我国管网建设尚不完善，污水厂进水中含有大量的微细砂。污水厂沉砂池的除砂效率不高，加之部分污水厂由于碳源不足而取消了初沉池，导致微细砂在污泥中富集；特别是南方地区的污水厂，污泥普遍存在有机质低、含砂量高的泥质特点。我国

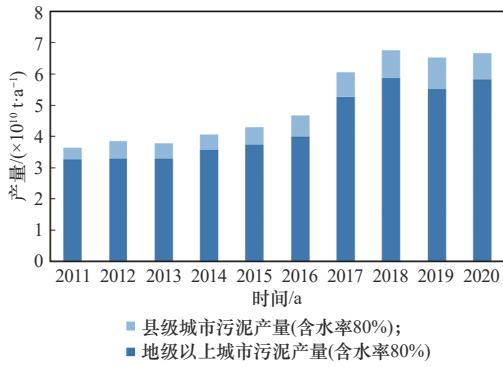


图1 我国污水处理厂的污泥产量变化情况

污水厂污泥的有机质含量（30%~60%）普遍低于发达国家（60%~80%）[6]，而污泥低有机质的泥质特点直接影响污泥的厌氧消化效率、焚烧系统的能耗水平，也就增加了污泥处理处置的难度。目前，填埋依然是我国污泥的主要处置方式，部分城市随意堆放和填埋的现象比较普遍。就全国来看，50%以上的湿污泥（含水率为80%）采用了简易填埋的处置方式，潜在的二次污染风险严重。和污水处理相比，我国污泥的处理处置面临更为严峻的挑战。

(二) 污泥处理处置技术发展迅速，主流技术路线基本形成

我国污泥处理起步于“十五”时期。“十一五”时期以来，国家高度重视并投入大量资源，实现了

污泥处理处置关键技术“从无到有”的突破；“十二五”时期，污泥处理处置及资源化技术和装备得到快速发展，适应国情的污泥处理处置技术体系实现了“由点及线”的突破；“十三五”时期，从技术、标准、政策等层面着手，对污泥处理处置技术路线进行了全链条集成和工程验证，实现了“由线到面”的突破。目前，基本构建了因地制宜、多样并存、与我国泥质特征匹配的污泥处理处置与资源化利用技术体系，形成了4条污泥安全处理处置与资源化利用主流技术路线：厌氧消化+土地利用、好氧发酵+土地利用、干化焚烧+灰渣填埋或建材利用、深度脱水+应急填埋（见图2）[7]。

在污泥生物处理与稳定化、污泥脱水减量化、污泥热化学处理与二次污染控制、末端产物资源化利用等方面突破了系列关键技术与重大装备。针对污泥有机质含量低、厌氧转化率低、设施负荷低、工程效益不高等问题，开发了污泥热水解预处理、高含固厌氧消化、污泥与餐厨等有机质协同厌氧消化等高级厌氧消化技术，形成了适合我国污泥泥质的高级（协同）厌氧消化技术体系。针对粗放型好氧发酵普遍存在的发酵周期长、臭气控制难等问题，开发了智能好氧发酵、滚筒动态高温好氧发酵等技术装备。针对污泥水分形态复杂、深度脱水难度大、能耗高的瓶颈问题，开发了高压隔膜框压滤脱水、低温真空脱水干化等技术装备。针对污泥热化学处

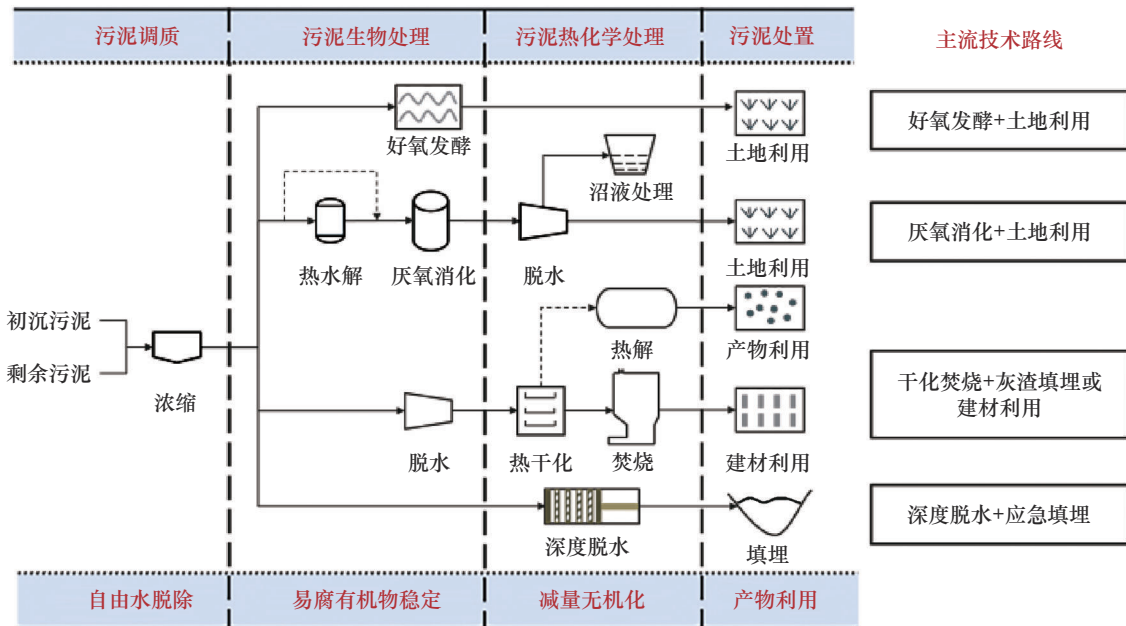


图2 我国污泥处理处置的主流技术路线

理能耗高、控制复杂、缺乏大型化装备的问题，突破了污泥圆盘干化与桨叶式干化、流化床自持焚烧、水泥窑协同处置等关键技术装备。针对污泥处理产物的处置出路瓶颈，突破了污泥稳定化产物的园林利用、土壤改良，焚烧灰渣建材利用等资源化处置关键技术，为解决污泥问题提供了技术支撑。

我国建设运行了一批污泥处理示范工程。污泥厌氧消化典型工程有：上海市白龙港污水处理厂污泥厌氧消化工程（1020 t/d；含水率80%，下同），长沙市污水处理厂污泥集中处置工程（500 t/d），镇江市餐厨废弃物及生活污水协同处理项目（260 t/d），西安市污水处理厂污泥集中处置项目（1000 t/d），北京市高碑店、小红门、槐房、清河、高安屯5座污泥处理中心（规模合计为6128 t/d）等。污泥好氧发酵典型工程有：郑州市八岗污泥处理项目（600 t/d），郑州市双桥污水厂污泥处理项目（600 t/d）等。污泥干化焚烧代表性工程有：上海市石洞口污泥干化焚烧工程（360 t/d），上海市竹园污泥干化焚烧工程（750 t/d）等。

综合来看，我国初步形成了三大全链条、跨行业的污泥处理处置模式，即以北京市、长沙市、镇江市为代表的污泥“高级厌氧消化+园林/土地利用”，以南宁市、郑州市、重庆市为代表的污泥“好氧发酵+园林/土地利用”，以上海市为代表的“干化焚烧+灰渣填埋/建材利用”，为完善污泥全链条处理处置技术体系确立了重要基础。

（三）污泥处理处置的管理政策和标准体系具备雏形

在管理政策方面，2012年管理部门开始关注污泥问题，陆续发布了一些污泥处理处置方面的政策文件。2015年起，污泥处理处置行业进入了快速发展期，如《水污染防治行动计划》提出了水处理设施产生的污泥应进行稳定化、无害化、资源化处理处置的要求，《污水处理费征收使用管理办法》明确将污泥处理费用纳入污水处理费。《“十三五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》（2017年）标志着我国污泥处理处置进入了“泥水并重”的发展阶段。《城镇生活污水处理设施补短板强弱项实施方案》（2020年）强调推进污泥无害化处置和资源化利用。《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》（2021年）提出2035年全面实现污泥无

害化、资源化处置。《减污降碳协同增效实施方案》（2022年）要求提高污泥处置和综合利用水平。

近年来，包括基础标准、泥质标准、污泥检验标准、技术规程、运行管理指南、产品标准在内的污泥标准规范相继制定和发布。①在技术指南方面，《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策（试行）》《城镇污水处理厂污泥处理处置污染防治最佳可行技术指南（试行）》《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南（试行）》等明确了污泥处理处置的主流技术路线，为解决污泥问题提供了政策支撑。②在泥质标准方面，发布了多项国家和城市建设标准（见表1），为土地利用、建材利用、焚烧、填埋等提供了技术依据。③为保证污泥处理技术的标准化和规范性，发布了覆盖污泥主流处理技术的标准规程，如《城镇污水处理厂污泥厌氧消化技术规程》（T/CECS 496—2017）、《城镇污水处理厂污泥好氧发酵技术规程》（T/CECS 536—2018）、《城镇污水污泥流化床干化焚烧技术规程》（CECS 250—2008）、《城镇污水处理厂污泥隔膜压滤深度脱水技术规程》（T/CECS 537—2018）等 [8]。④为指导主流技术的工艺设计以提升工程运行水平，发布了《城镇污水处理厂污泥深度脱水工艺设计与运行管理指南》（T/CECS 20005—2021）、《城镇污水处理厂污泥好氧发酵工艺设计与运行管理指南》（T/CECS 20006—2021）、《城镇污水处理厂污泥厌氧消化工艺设计与运行管理指南》（T/CECS 20007—2021）、《城镇污水处理厂污泥干化焚烧工艺设计与运行管理指南》（T/CECS 20008—2021）、《城镇污水处理厂污泥处理产物园林利用指南》（T/CECS 20009—2021）等。

整体上，我国在全面提升污泥处理处置与资源化技术水平的同时，研究和编制了污泥处理处置标准规范，初步构建了覆盖污泥处理处置的标准体系。在处理方面，涵盖厌氧消化、好氧发酵、干化焚烧、深度脱水技术路线；在处置方面，涵盖土地利用、建材利用重点方向；在技术应用环节方面，涵盖设计、建设、运行、管理，为技术成果的规范化、标准化应用推广提供了基础支撑。

三、我国城镇污泥处理处置问题分析

（一）顶层设计需补充，管理标准体系不完善

我国污泥处理处置方面的顶层设计缺乏，多方

表1 我国污泥主要处置方式与标准规范

分类	处置方式	标准号	标准名称
土地利用	农用	GB 4284—2018	《农用污泥污染物控制标准》
	园林绿化	GB/T 23486—2009	《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质》
	土壤改良	GB/T 24600—2009	《城镇污水处理厂污泥处置土地改良用泥质》
	林地利用	CJ/T 362—2011	《城镇污水处理厂污泥处置林地用泥质》
建材利用	制砖	GB/T 25031—2010	《城镇污水处理厂污泥处置制砖用泥质》
	水泥熟料	CJ/T 314—2009	《城镇污水处理厂污泥处置水泥熟料生产用泥质》
焚烧	单独焚烧	GB/T 24602—2009	《城镇污水处理厂污泥处置单独焚烧用泥质》
填埋	混合填埋	GB/T 23485—2009	《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质》

协调的管理机制不健全，部分地区“重水轻泥”，没有做到污水和污泥处理设施的统筹规划。污泥处理处置资金投入相对不足（通常只占污水处理厂总投资的10%~20%），远低于发达国家30%~50%的主流水平，导致污泥处理设施建设能力受限；特别是部分地区依赖燃煤电厂掺烧协同处置，缺乏污泥独立处理设施[9]。

我国污泥政策与标准体系有待完善，缺乏合理的监管与考核机制。现有的标准规范文件多为宏观层面的建议性（或定性）要求，系统性、衔接性不强，没有配套的实施细则及保障措施，可操作性较差；影响了污泥处理的管理水平提升，不利于污泥处理处置行业的健康发展[10]。

污泥处理处置管理涉及住房和城乡建设、生态环境、农业农村、林业和草原等管理部门，由于目前未就污泥的最终去向明确方案，跨部门、跨行业、跨区域的协作机制依然缺失，污泥处理产物始终面临无处可去的困境。虽然《污水处理费征收使用管理办法》《水污染防治法》均明确提出将污泥处置费用纳入污水处理费用，但污泥处理处置的价格形成机制缺失。

（二）污泥的泥质差，稳定化和无害化水平不高

污水处理旨在降解并去除污染物，而污水处理过程中有30%~50%的污染物转移至污泥，因此污泥稳定化处理可视为污水处理过程中污染物降解的延续。稳定化是污泥处理的重要环节已成为国际共识。厌氧消化是较为普遍的污泥稳定工艺，在实现污泥的稳定化和卫生化处理的同时，降低处置过程中的二次污染风险并可回收沼气等生物质能源。各国均有污水厂污泥稳定化处理方面的强制性要求，而发达国家进一步规定，污泥即使进入填埋场处

置，也需先进行稳定化处理。在德国、日本，即使大型生活污水处理厂采用了末端焚烧的技术路线，在焚烧前也需进行污泥厌氧稳定化处理。我国早在20世纪90年代即制定了污泥稳定化的相关要求，但未能得到有效实施；大部分污水处理厂仅完成了污泥的初步减量化，未开展稳定化和无害化处理处置，存在潜在的二次污染风险。

在发达国家，通过污泥厌氧消化回收的生物质能源可满足污水处理厂60%的能耗需求。在我国，污泥有机质含量低导致产气量低，成本效益不明显，早期建设的污泥厌氧消化设施有近2/3处于停运状态；部分运行管理部门对污泥厌氧消化的稳定化功能存在认知偏差，仅以沼气回收量来衡量厌氧系统的效益，忽略了污泥中易腐有机质稳定化处理的值，导致相关工艺的普及率（不足5%）远低于国际先进水平，成为污泥处理处置全链条的短板环节[11]。

（三）污泥资源化处置不畅通，技术路线选择不明确

我国长期以来存在“重处理、轻处置”问题，污泥处理处置技术路线难以明确，处置出路不畅通。目前，污泥的处置方式主要有卫生填埋、建材利用、土地利用等。①污泥卫生填埋会占用大量土地资源，造成二次污染和资源浪费，还会释放大量温室气体，在部分经济发达地区甚至面临无地可埋的局面。因此，卫生填埋仅是临时和过渡性的技术路线，不符合“无废城市”建设理念和行业发展趋势。②建材利用通常需要对污泥进行干化焚烧或协同焚烧处理以实现污泥的矿化和无害化。由于污泥的含水率较高，干化焚烧系统能耗高、运行成本高，尾气排放要求严格（可能产生二噁英等污染

物)、污染控制成本高,邻避效应明显。目前,没有实施污泥焚烧灰渣的建材利用补贴政策,因而普遍采用填埋的处置方式,相应的资源化利用水平较低。③土地利用是国外最常用的污泥资源化处置方式,如美国、欧盟的土地利用比例超过70%。然而,在我国污泥土地利用受到限制[12],原因在于:污水厂的污泥稳定化、无害化水平低,无法满足土地利用的要求;即使部分地区的污水厂实现了稳定化处理,但因认知层面的差距、政策标准的缺乏,依然面临跨部门、跨行业壁垒;市政污水中混入了工业废水,污泥中的重金属等污染物质存在一定的风险。

虽然我国污泥处理处置已经形成4条主流技术路线,“十二五”时期以来建设运行了一批示范工程,但关键技术成果在示范工程中的应用缺乏系统总结,技术经济综合评估也待开展。我国不同地区的经济社会发展水平存在不平衡现象,而不同的污泥处理处置技术路线成本差异显著,致使各地在技术路线选择方面存在不确定性和盲目性。

四、我国城镇污泥处理处置发展策略

(一) 发展理念

树立污水和污泥处理处置系统观,将污泥安全处理处置与资源化作为当前城镇水污染控制领域的重点任务;遵循“统筹规划、远近结合,因地制宜、区域统筹,稳定可靠、绿色低碳,政府主导,市场运作”的基本原则,构建污泥无害化、资源化利用体系,实现减污降碳、协同增效的综合目标,支撑生态文明建设并推动高质量发展。立足国家发展阶段、参照国际发展趋势,采取“绿色低碳、资源循环、环境友好、因地制宜”的发展理念;借鉴已成为国际污泥处理共识的“稳定化、减量化、无害化、资源化”原则,以无害化为目标、资源化手段,突破污泥处理处置的技术和管理瓶颈,促进产业健康发展(见图3)。

在绿色低碳方面,鼓励采用绿色、低碳处理技术,减少化学药剂使用,实现节能降耗;推广绿色高效脱水、厌氧消化、热解炭化等技术路线,稳定减少碳排放。

在资源循环方面,突出污泥的资源属性,加强污泥中能源,碳、氮、磷等资源的回收利用;支持

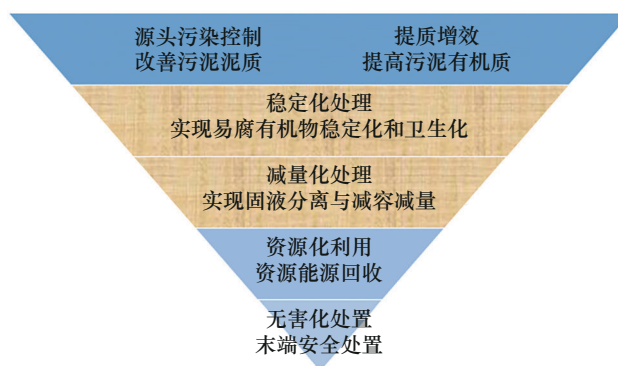


图3 污泥处理处置与资源化“倒金字塔”原则

污泥稳定化产物的土地利用、焚烧产物的建材利用,实现更高水平的资源循环。

在环境友好方面,实施源头减量、污染控制,加强污泥中的易腐有机质稳定化、病原菌卫生化处理;重视末端产物的安全处置与资源化应用,逐步压减污泥填埋规模。

在因地制宜方面,根据污泥的泥质、产量、分布特点,结合地区自然地理条件、环境承载力、长久环境效益、当地经济技术水平等因素,明确适宜的污泥处理处置路径。

(二) 重点举措

1. 加强顶层设计,统筹设施规划布局,因地制宜选择处理处置路线

建议高度重视污泥问题,将污泥处理处置与资源化上升到国家生态文明建设层面。注重顶层设计,合理规划污泥处理处置设施布局并将之纳入污水处理设施建设规划;在新建、改建、扩建污水处理设施时,污泥处理设施应同时规划、同时建设、同时投入运行。

污水厂进水的水质直接影响污泥的泥质,应加强污水管网建设,控制源头污染物水平,逐步提升污泥的泥质。与国土空间规划进行协调衔接,结合实际分阶段规划和实施,做到泥水并重、远近结合、就地处理、区域协同。健全污泥安全处置与资源化管理体系,提升污泥处理处置的全流程监管能力,保障污泥资源的安全和循环利用。

综合考虑污泥的泥质和产生量,结合地区经济社会发展水平,因地制宜选择污泥处理处置方式,确保经济合理、低能耗、低排放。全面梳理污水处理厂的污泥产生量及处置去向,推行厂内减量化、

稳定化处理；逐步淘汰处理水平不高、运行状况不稳、二次污染风险较大的处理处置设施。探索污泥与厨余垃圾、餐厨垃圾、粪便等城乡有机废弃物的统筹处理，发挥协同处置效应 [13]。

2. 健全污泥处理处置的标准体系，完善价格补贴机制，强化责任分工与监管机制

及时开展污泥的土地利用、干化焚烧、厌氧消化、协同处理处置等标准制定（修订）工作。深化或完善实施细则，提出适应国情、可操作性强的污泥土地利用规范和标准；严格准入、疏堵并重，健全污泥无害化处理、资源化利用的标准体系。鼓励开展资源化产品认证，制定污泥资源化检测及产品认证标准，建立政府、行业、社会等层面的认证采信机制，保障污泥资源化产品的市场出路。因势利导、因地制宜，鼓励地方在全国性标准的基础上，根据自身土地资源、污泥泥质、经济社会发展条件等因素，制定一批地方性污泥处理处置标准。

适时完善污泥处理处置、资源化价格补贴等机制。可按覆盖污泥处理设施正常运营及污泥处置成本并合理盈利的原则，制定污泥处理费标准；根据当地污染防治的目标要求，计入污水排放标准提升、污泥处置等成本可能增加等因素进行动态调整。探索污泥资源化利用的市场化定价机制。研究制定污泥产品土地利用的激励措施，尤其是林业、农业（非食物链）的污泥综合利用政策；针对污泥产品，调整收费机制，完善税收政策，给予污泥焚烧、水泥窑协同焚烧、热电联产、生物质发电及燃气等方面的支持。

发挥政府的主导作用、市场配置资源的决定性作用，强化污泥处理处置的监管机制。管理部门建立监管机制并注重长效性，推动落实各环节责任主体的职责。梳理各环节责任主体的关系，建立跨部门协调机制：环保部门负责环境监管，加强城镇污水处理厂的源头控制，推动污泥品质提升；农业和园林部门负责推动污泥稳定化产物顺利进入土地利用；发展改革部门负责制定污泥资源化与能源化的激励、投资、费用等政策；污泥处理处置设施运营企业负责污泥的安全处置。

3. 补短板、强弱项，提升全链条集成水平，形成可推广技术模式

补齐污泥稳定化处理的短板。污泥稳定化处理

是污水处理过程的重要环节，新建、扩建的污水厂应同步建设污泥厌氧或好氧稳定化设施，改建的污水厂可考虑增加污泥稳定化处理设施。

拓宽污泥资源化处置利用途径。按照“安全环保、稳妥可靠”的基本要求，结合地区实际，选择适宜的技术路径和市场机制，建立能源和物质回收利用、土地利用、建材利用等多种路径互补的污泥资源化利用模式。支持开展污泥好氧发酵或厌氧消化后的有机质和营养物质资源的回收利用。积极推动土地利用，按照国家、地方标准及规定，将符合要求的污泥制肥产品优先用于土壤改良、园林绿化、非食用农业等。对于土地资源紧缺、土地利用成本较高、污泥重金属含量超标的地区，鼓励在焚烧处置后将污泥焚烧灰渣进行建材化利用。探索污泥焚烧灰渣磷回收技术路径。

鉴于不同地区的经济发展水平、泥质特性及土地利用条件存在差异性，未来污泥处理处置存在多条路线并存的趋势，应因地制宜选择技术路线：① 污泥（高级）厌氧消化技术路线适用于土地资源丰富、土地消纳条件较好的地区，在有机质含量低的情况下，鼓励采取“餐厨/粪便协同厌氧消化+土地利用”的技术路线；② 污泥好氧发酵技术路线适用于人口密度较低、土地资源丰富、土地消纳条件较好的地区，在经济欠发达地区的应用前景良好；③ 污泥干化焚烧技术路线适用于经济较发达、人口稠密、土地成本较高的地区，或者污泥处理产物不具备土地消纳条件的地区；④ 污泥深度脱水+卫生填埋技术路线仅适用于应急性处理情况，或者具备地方性土地消纳条件且经济条件有限的地区。

推广一批成熟适用的工艺、技术和装备。增强城镇污泥资源化、能源化技术的产业化体系，推动包括技术、装备、产业、管理在内的污泥处理处置全链条能力提升，支撑循环经济健康发展。

4. 面向未来实施前沿技术攻关，推动污泥处理处置与资源化技术装备创新升级

在应对全球气候变化、能源资源短缺的背景下，污泥中能源的高效回收、资源物质的循环利用成为国际性研究热点，也是未来污水处理厂由“污染物去除”向“能源资源工厂”转变的重要环节 [14]。建议加大科技研发投入，配套新技术开发的支持政策，重点加强污泥处理处置与资源化的基础理论研究和装备开发。依托分子生物学、新材料、大

数据、物联网、智慧感知、人工智能等技术进展，实现污泥处理处置与资源化技术体系的创新升级，全面提升污泥治理技术的精细化、高效化、智能化水平。

随着“双碳”目标的提出，亟需一批面向未来的污泥处理处置与资源化的新原理、新技术、新方法，切实提升我国在此领域的前沿技术储备能力（见图4）。①在基础研究方面，围绕污泥的污染和资源属性，研究污泥多介质、多组分的交互作用机制[15]；开发新型污水处理工艺，促进污泥提质减量；解析高附加值产品和营养物质的转化机制及调控原理，阐明污泥热化学转化过程的热工机制、污染物迁移转化规律、持久性有机物的环境行为；提出削减末端产物中有毒、有害物质的调控原理与方法。②在关键技术开发方面，针对污泥厌氧消化转化率低的问题，突破污泥强化预处理、外源添加强化生物转化、高效厌氧反应器等新技术；加强高含固/协同等高级厌氧消化技术的推广应用，实现污泥的高效稳定、生物质能的高效回收[16]；开发污泥中碳、氮、磷等资源高效回收新技术，实现污泥中资源循环利用；开发环境友好型脱水药剂及高效脱水调理技术，降低污泥固液分离的能耗物耗水平[17]；在污泥干化焚烧末端处理技术方面，加强干化焚烧系统能量优化，考虑与厌氧消化技术的耦合，整体性提升系统能量水平，实现焚烧灰渣的建

材利用、磷资源的提取利用。

五、结语

经过3个五年计划的实施，我国初步构建了因地制宜、多样并存、与泥质特征匹配的污泥处理处置与资源化利用技术体系以及相关的标准体系，形成了4条污泥处理处置主流技术路线，建设了一批示范工程。但相比生态文明建设、城镇污水处理行业高质量发展的要求，污泥处理处置与资源化还存在不小的差距。

在“双碳”背景下，我国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”的发展理念，借鉴已成为国内外污泥处理共识的“稳定化、减量化、无害化、资源化”原则，加强顶层设计，统筹设施规划，以无害化为目标、资源化手段，促进产业健康发展。逐步完善政策标准体系、价格补贴政策，强化责任分工与监管机制，形成链条完整的安全处理处置和资源化利用体系。补齐污泥稳定化处理短板，推动污泥处理设施建设，拓宽污泥资源化路径，因地制宜选择处理技术路线。面向未来的污泥处理处置与资源化需求，突破污泥高效厌氧消化、新型污泥脱水、污泥热解炭化等一批新技术，推广绿色低碳处理技术，为污水处理行业减污降碳目标提供坚实支撑。



图4 污泥处理处置与资源化研究热点
注：PHA表示聚羟基脂肪酸酯。

参考文献

- [1] 戴晓虎. 城镇污水处理厂污泥稳定化处理的必要性和迫切性的思考 [J]. 给水排水, 2017, 43(12): 1–5.
Dai X H. Necessity and urgency of stabilization treatment of sewage sludge in urban wastewater treatment plant [J]. *Water & Waste Engineering*, 2017, 43(12): 1–5.
- [2] 戴晓虎. 城市污泥厌氧消化理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Dai X H. *Anaerobic digestion of municipal sludge: Theory and practice* [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [3] 中国工程院. 《中华人民共和国水污染防治法》实施情况评估报告 [R]. 北京: 中国工程院, 2019.
Chinese Academy of Engineering. *Implementation evaluation report on Law of the People's Republic of China on the prevention and control of water pollution* [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2019.
- [4] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考 [J]. 给水排水, 2021, 47(3): 1–5.
Dai X H, Zhang C, Zhang L W, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(3): 1–5.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建设统计年鉴 [EB/OL]. (2020-01-01)[2022-05-01]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Statistical yearbook of construction* [EB/OL]. (2020-01-01)[2022-05-01]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>.
- [6] 陈思思, 杨殿海, 庞维海, 等. 我国剩余污泥厌氧转化的主要影响因素及影响机制研究进展 [J]. 化工进展, 2020, 39(4): 1511–1520.
Chen S S, Yang D H, Pang W H, et al. Main influencing factors and influencing mechanisms of anaerobic transformation of excess sludge in China [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(4): 1511–1520.
- [7] Qu J H, Dai X H, Hu H Y, et al. Emerging trends and prospects for municipal wastewater management in China [J]. *ACS ES & T Engineering*, 2022, 2(3): 323–336.
- [8] 段妮娜, 王逸贤, 王磊, 等. 我国污泥处理处置主流技术路线的发展概况及制约因素 [J]. 城市道桥与防洪, 2019 (11): 86–89.
Duan N N, Wang Y X, Wang L, et al. The development of the main technical route of sludge treatment and disposal in China and its restricting factors [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2019 (11): 86–89.
- [9] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考 [J]. 给水排水, 2012, 38(2): 1–5.
Dai X H. Current situation and consideration of urban sludge treatment and disposal in China [J]. *Water & Waste Engineering*, 2012, 38(2): 1–5.
- [10] Yang G, Zhang G M, Wang H C. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China [J]. *Water Research*, 2015, 78: 60–73.
- [11] Qu J H, Wang H C, Wang K J, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(6): 1–7.
- [12] 薛重华, 孔祥娟, 王胜, 等. 我国城镇污泥处理处置产业化现状、发展及激励政策需求 [J]. 净水技术, 2018, 37(12): 33–39.
Xue C H, Kong X J, Wang S, et al. Industrialization status, development analysis and incentive policy demands of municipal sludge treatment and disposal industry in China [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(12): 33–39.
- [13] Wei L L, Zhu F Y, Li Q Y, et al. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO₂-equivalent emissions analysis [J]. *Environment International*, 2020, 144: 1–12.
- [14] Li W W, Yu H Q, Rittmann B E. Chemistry: Reuse water pollutants [J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 29–31.
- [15] Tang Y F, Sun J, Dong B, et al. Thermal hydrolysis pretreatment-anaerobic digestion promotes plant-growth biostimulants production from sewage sludge by upregulating aromatic amino acids transformation and quinones supply [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(3): 1938–1950.
- [16] Xu Y, Gong H, Dai X H. High-solid anaerobic digestion of sewage sludge: Achievements and perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2021, 15(4): 1–18.
- [17] Wu B R, Wang H, Li W X, et al. Influential mechanism of water occurrence states of waste-activated sludge: Potential linkage between water-holding capacity and molecular compositions of EPS [J]. *Water Research*, 2022, 213: 1–12.