

编者按:

城市多源污泥作为现代城市代谢的末端产物,既是环境治理的痛点,也是资源循环的起点。在“双碳”背景与生态文明思想指导下,特别是在建设“无废城市”等目标的驱动下,多源污泥的低碳化处理处置和资源利用,已成为实现污泥安全处置、推动城市可持续发展的重要命题。

当前,城市污泥等固废处理领域正经历从“简单弃置主导”的粗放单程模式,向“资源能源驱动”的协同增效模式的深度转型。面对多源污泥在含水率、物质构成和污染风险等方面的复杂性和多样性,传统处理技术亟待突破能耗高、碳排高、资源转化率低等瓶颈;而物料协同调控、AI赋能优化等创新实践,正通过技术集成与模式重构,释放跨行业、多学科交叉融合的协同优势。

本专题聚焦多源污泥治理的3个关键维度:1) 低碳工艺创新,探索污泥处理处置与利用过程的能耗优化路径,通过热化学与能量回收、协同生物转化、智能控制等技术创新实现能量自循环与碳足迹削减;2) 资源定向再生,挖掘污泥中有机质、无机质和微量元素的梯级利用潜力,推动从“废”到“材”的高值转化;3) 系统协同增效,突破行业壁垒,构建市政、工业、农业等多源固废的跨域协同模式,通过物料互补、能量耦合、设施共享等大减污降碳协同效应。专题汇聚行业前沿成果,旨在为多源污泥低碳治理提供新视角和新路径。

DOI:10.13205/j.hjgc.202507001

张辰,段妮娜,赵水轩,等. 双碳目标下城市多源污泥处理处置技术选择与发展趋势[J]. 环境工程,2025,43(7):1-9.

ZHANG C, DUAN N N, ZHAO S Q, et al. Technology selection and development trends for urban multi-source sludge treatment under Dual Carbon goals[J]. Environmental Engineering, 2025, 43(7): 1-9.

## 双碳目标下城市多源污泥处理处置技术选择与发展趋势

张辰\* 段妮娜 赵水轩 王峰 谭学军

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092)

**摘要:**随着城市化进程的快速推进、排水系统提质增效和“源网厂河一体”全要素水环境治理工作的开展,城市多源污泥产量显著增加,科学处理处置面临严峻挑战。分析了不同来源污泥的特性和面临的碳排放挑战,基于双碳目标提出了多源污泥有机质和无机质梯级利用的途径和适用技术,强调通过技术创新实现能耗和物耗的降低、温室气体的有效控制和资源的高效替代,并探讨了系统思维指导下的多元协同模式和减碳策略,包括多源物料协同、上下游协同和跨行业协同,以期在更广泛的范围内实现更深层次的减碳效益。

**关键词:**多源污泥;处理处置;碳排放

### Technology selection and development trends for urban multi-source sludge treatment under Dual Carbon goals

ZHANG Chen\*, DUAN Nina, ZHAO Shuiqian, WANG Feng, TAN Xuejun

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** With the rapid advancement of urbanization, the upgrading and optimizing of the drainage system, and the

收稿日期:2024-10-16; 修改日期:2024-11-30; 接收日期:2024-12-20

基金项目:国家重点研发计划“固废资源化”专项项目(2020YFC1908700)

\*第一作者、通信作者:张辰(1964—),男,教授级高级工程师,全国工程勘察设计大师,主要从事给排水工程设计研究工作。zhangchen@smedi.com

implementation of integrated comprehensive water environment governance, incorporating source control, network systems, treatment plants, and river management, the production of urban multi-source sludge has significantly increased, presenting severe challenges for its scientific treatment and disposal. The paper delves into the characteristics of sludge from various origins, including municipal sewage sludge, pipeline sediments, and riverbed sediments, each with distinct physical and chemical properties. It also examines the carbon emission challenges associated with these different types of sludge. In response to the Dual Carbon goals, the paper proposes tiered utilization pathways for both organic and inorganic components in multi-source sludge. These pathways aim to optimize the use of resources contained within the sludge, turning waste into valuable assets. The emphasis on technological innovation underscores the need to reduce energy consumption and material usage while effectively controlling greenhouse gas emissions. Innovations in sludge treatment technology can lead to more efficient resource substitution, minimizing reliance on non-renewable resources. Additionally, the paper highlights the importance of adopting a systematic approach to address the complexities of sludge management. This involves exploring diversified collaborative models and carbon reduction strategies that go beyond traditional boundaries, including the synergy among multiple materials, upstream-downstream integration, and cross-industry collaboration, aiming to realize deeper carbon emission reduction across a broader scope.

**Keywords:** multi-source sludge; treatment and disposal; carbon emission

## 0 引言

在全球气候变化的大背景下,减少温室气体排放已成为国际社会普遍关注的重大议题。随着城市化进程的快速推进、排水系统提质增效和“源网厂河一体”全要素水环境治理工作的开展,污水污泥、管渠污泥、河湖底泥等产量均显著增加。多源污泥来源各异、组分复杂,科学处理处置面临严峻挑战。传统分散、单一、粗放、无序的处理处置方式已无法满足生态文明建设对再生资源和环境质量的高标准要求。多源污泥兼具污染和资源双重属性,其资源和能源的开发利用已成为解决污泥问题的重要途径和手段,并且是污水处理厂实现能源自给、水环境领域落实双碳目标的关键路径。

近年来,国内外出台了一系列政策文件,国内出台的《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》(发改环资〔2022〕1453号)、《国务院关于加强建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》(国发〔2021〕4号)、《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划纲要》(国发〔2021〕5号)等,旨在推动包括污泥处理处置在内的排水、固废行业的绿色、循环和低碳发展。欧盟于2020年更新了《循环经济行动计划》(circular economy action plan, CEAP),不仅鼓励成员国采取措施促进资源高效利用,减少废物产生,还特别强调了污泥作为有机废弃物管理中的重要组成部分,应通过循环利用和低碳技术来降低环境影响。

多源污泥组成和特性不同,所适用的资源利用方

式和处理技术也存在差异。目前,国内外基本形成了主流的处理处置技术体系。然而,在双碳目标下,如何基于泥质特性选择资源利用途径并进一步降低处理过程的碳排放,是实现污泥处理减污降碳协同增效的关键所在。本文基于不同来源污泥的特性,总结资源化利用的主要途径和双碳目标下的适用技术,并探讨在系统思维指导下多元协同的减碳策略。

## 1 多源污泥特性和碳排放挑战

### 1.1 污水污泥

污水污泥来源于城镇污水处理厂的初沉池、二沉池和深度处理设施。国家住房和城乡建设部的统计数据<sup>[1]</sup>显示,2023年我国城市污水处理总量已达642.7亿m<sup>3</sup>,污水处理污泥总量已突破7527万t(以含水率80%计)。我国污泥有机质含量(以挥发性固体含量VS表示)通常为30%~70%,均值为50%。北方城市如北京、青岛等,污泥VS可达55%~70%,而南方城市如九江、芜湖、镇江等,VS一般仅为20%~50%。污泥富集了污水中大部分污染物质和资源物质,如果不妥善处理处置,在污染环境的同时将产生大量碳排放。根据住房和城乡建设部对全国城镇污泥处置量的统计,约28%进行土地利用,34%焚烧,18%建材利用,13%填埋,另有8%采用其他处置方式。由此估算,污泥处理处置产生的碳排放总量每年约为1440万t。

### 1.2 管渠污泥

管渠污泥是排水管网养护过程中清捞出的沉积物,不仅包含了来自雨水和污水中的容易沉淀的颗

颗粒物,还混有道路冲洗物、生活垃圾、砂石和来自建筑工地的泥沙等成分。目前,我国开展例行管渠清捞养护和管渠污泥处理的城市主要包括上海、北京、武汉、南京等。根据上海市管渠污泥采样分析数据,管渠污泥 VS 为 17%~20%,无机质占比超过 80%<sup>[2]</sup>。管渠污泥沉积于管网中,富集了污水中 5%~30% 的悬浮固体和污染负荷<sup>[3]</sup>,如不及时清捞处理,易在厌氧环境下产生大量 CH<sub>4</sub>。研究表明,管渠污泥平均 CH<sub>4</sub> 产率可达 0.13~2.09 g/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[4]</sup>,由此造成的碳排放不容忽视。目前,管渠污泥的处理普遍采用多级筛分工艺,处理后的有机和无机筛渣多为填埋处置,有机筛渣填埋产生 CH<sub>4</sub> 是管渠污泥处理处置碳排放的主要来源。

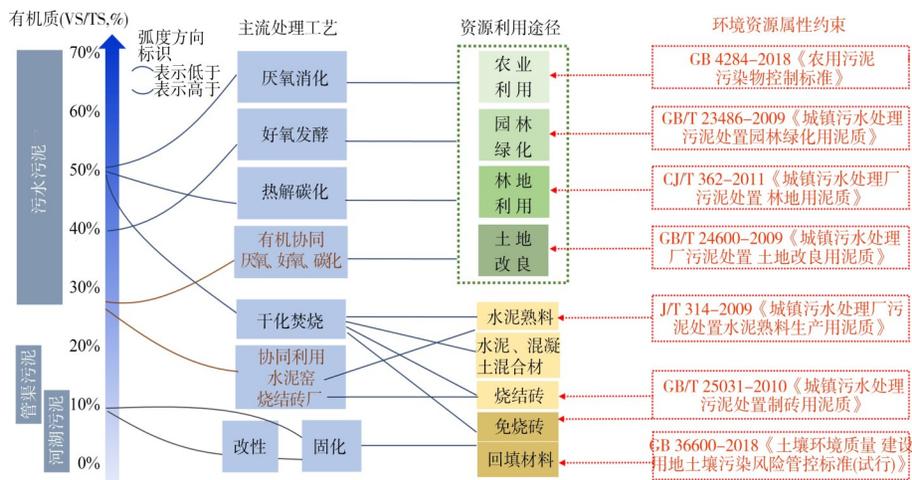
### 1.3 河湖底泥

河湖底泥是河流、湖泊中的泥沙、黏土和动植物残骸等经长时间物理化学和生物转化沉降于水体底部形成的沉积层。河湖底泥的 VS 通常为 3%~15%,主要由腐殖质构成,还包括动植物腐败分解残留的蛋白质、脂肪、多糖等。这些有机质在缺氧环境下被微生物分解时会产生 CH<sub>4</sub>,而在有氧条件下则主要产生 CO<sub>2</sub>。因此,河湖底泥在自然状态下的碳排放取决于水体状态,受温度、水流速度、水体类型等因素影

响,可占水体 CH<sub>4</sub> 排放的 5%~20%<sup>[5,6]</sup>,黑臭水体的底泥碳排放往往也较高。河湖底泥经疏浚后,主流处理处置方式仍为脱水后填埋或弃土场处置。在运输、填埋或弃置过程中,有机质分解仍会产生 CH<sub>4</sub>,长距离运输的能耗也是碳排放来源之一。

## 2 资源利用途径和技术选择

多源污泥处理处置过程中产生的碳排放主要包括以下几个方面:能源消耗和化学药剂使用导致的能源源碳排放、逸散性温室气体排放,以及资源回收和产物利用带来的碳补偿效应。当前,多源污泥处理处置的目标正朝着资源利用和能源回收的方向发展,通过技术创新实现能耗和物耗的降低、温室气体的有效控制和资源的高效替代已成为行业共识<sup>[7]</sup>。污泥中的有机质是能源资源禀赋的重要载体,有机质利用是污泥处理处置减碳增汇的重要途径。对于 VS≥30% 的污泥,如污水污泥,应优先通过能源化和资源化途径实现有机质的转化利用。对于 VS<30% 的污泥,如管渠污泥、河湖底泥,则宜优先考虑建材、工程利用,通过替代传统矿物资源降低碳排放。基于不同污泥的有机质含量可以选择适用的处理技术和利用途径,同时还要满足利用方式对污泥或处理产物环境和资源属性的要求,其技术路线如图 1 所示。



注:有机质水平和主流处理工艺间的连接线及其弧度方向表示有机质高于或低于某个水平时推荐其连接的处理工艺。

图 1 基于多源污泥有机质含量的适用处理技术和资源利用途径

Figure 1 Treatment technologies and resource utilization pathways based on organic matter content in multi-source sludge

### 2.1 污泥有机质利用途径和技术

有机质含量较高的污泥,应优先转化利用其中的有机质,实现能源和资源利用,主流利用途径的经济性和碳排放如表 1 所示。其中,基于土地利用途径

的厌氧消化和好氧发酵技术是污水处理系统建设和运行环节的“鼓励行为”<sup>[8]</sup>。在双碳背景下,采用主流利用途径的同时,还可通过设计、运行优化或选择替代性技术,进一步降低碳排放。

表1 高有机质污泥主流利用途径的经济性和碳排放

Table 1 Economic viability and carbon emissions of mainstream utilization pathways for high-organic matter sludge

利用途径	经济性				碳排放/(kg CO <sub>2</sub> /t)		
	投资成本/(万元/t)	用地/(m <sup>2</sup> /t)	直接运行成本/(元/t)	运行成本/(元/t)	碳排放	碳补偿	合计
厌氧消化-后处理-土地利用	55~85	50~67	40~80	220~520	67~97	-104~-51	-37~46
好氧发酵-土地利用	40~80	100~200	150~260	370~750	166~190	-40~-50	116~150
干化焚烧-建材利用	80~160	33~50	180~250	490~900	230~342	-2~-1.2	229~340

### 2.1.1 厌氧消化

厌氧消化是污泥稳定化和无害化处理的重要手段,不仅能回收污泥中的生物质能,其产物经腐熟陈化后还可用于土地利用。厌氧消化过程中产生的碳排放主要来源于污泥加热和保温消耗的热量、消化污泥脱水以及沼液脱氮等处理环节的能耗和药耗。然而,产生的沼气可回收利用,补充系统部分甚至全部的耗能,从而实现低碳甚至负碳排放。

厌氧消化工艺减碳的重点通常在于提高消化单元的降解率和产气量,主要途径包括以提高含固率等方式提高有机负荷<sup>[9]</sup>,以预处理<sup>[10]</sup>、添加代谢促进物质<sup>[11,12]</sup>、改善消化池反应条件<sup>[13,14]</sup>等方式提高转化效率,以调控转化路径等方式提高CH<sub>4</sub>转化率<sup>[15]</sup>等。例如,通过采用高含固厌氧消化工艺,进泥含固率从传统的5%提升到15%,在同等处理规模下,消化池体积可节省2/3,加热保温能耗显著降低。此外,随着垃圾分类工作有序推进,城镇污水污泥和厨余垃圾等有机废弃物协同资源化利用展现了广阔的应用前景。通过优化消化池型和搅拌、合理设计停留时间、投加促效材料等手段可以提高污泥有机质的降解率,假设降解率从40%提高至50%,1座规模为400 t/d(以含水率5%计)的传统厌氧消化设施的沼气产量可增加800~1000 m<sup>3</sup>/d,相应的CO<sub>2</sub>排放减少2.7~3.4 t/d,同时也能降低消化液脱水能耗、药耗和产物运输的能源消耗。

除了核心单元,采用厌氧氨氧化、氨回收等沼液处理方式实现氮的转化或回收通常具有更低的能耗、物耗和运行成本,并且可以降低或避免传统生物脱氮过程中N<sub>2</sub>O等直接碳排放,因此更具碳减排优势。

### 2.1.2 厌氧消化好氧发酵

好氧发酵能够将污泥中的有机质转化为较为稳定的腐殖质,使得产物具有较高的稳定化程度,便于土地利用。在此过程中,碳排放主要来源于设备运行中的能耗和物耗导致的间接排放,以及堆体产生

的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O造成的直接排放。

好氧发酵工艺的碳排放量与其控制和运行水平密切相关。通过装备化和智能化手段实现发酵条件和过程的精确控制是降低碳排放的重要途径。基于温度、湿度和氧含量等关键参数的自动监测,结合物料输送、供氧、匀翻和除臭等环节的协同控制,可以优化整个发酵流程,确保其稳定运行的同时实现节能降耗<sup>[16,17]</sup>。例如,采用传感器实时检测污泥堆体内的氧含量和温度变化,根据实际需要精确调节曝气频率,可避免厌氧条件的发生、减少CH<sub>4</sub>的排放,并避免过量曝气,节约通风用电量和辅料投入。近年来,随着好氧发酵技术装备水平的不断提升,滚筒动态好氧发酵设备、一体化智能好氧发酵等集成化技术得到了快速发展,通过在密闭环境中进行发酵并辅以智能化过程控制,提高物质传递和转化效率,节能降耗并减少温室气体泄漏。

### 2.1.3 焚烧

焚烧具有减量彻底、高效集约无害化等优势,是利用污泥热值的过程。湿污泥(含水率约80%)热值较低,需要通过脱水或干化降低含水率、提高热值进而实现自持燃烧。碳排放主要来源于干化能耗、焚烧启炉的辅助燃料,以及焚烧过程产生的少量逸散性CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O,碳排放量和污泥热值、干化工艺、系统热效率等直接相关。我国污泥焚烧常采用热干化预处理,热干化能耗是碳排放的主要构成部分。尽管污泥焚烧过程中释放的热量经回用后可补充部分干化热能消耗,但由于我国污泥有机质含量较低,尚不足以完全抵消热干化能耗,仍需外源热能。焚烧和预处理过程的热能回收和节能降耗是降低碳排放的重要途径。

污泥焚烧炉排出的烟气温度通常为850~870℃,其热能涵盖了焚烧系统输入的绝大部分热能,通常采用余热锅炉和空气预热器回收200℃以上的烟气热能,用于补充污泥热干化热能或预热燃烧空气,这部分热能约占焚烧烟气总热能的50%以上<sup>[18]</sup>。然

而,<200℃的烟气热能在大多数污泥焚烧项目中未得以充分回收利用,这部分热能占烟气总热能的40%~50%,是污泥焚烧热损失占比最大的一项<sup>[19]</sup>,可以进一步回收利用。此外,采用热干化预处理时,热干化是污泥焚烧项目的主要耗能单元,干化尾气洗涤等造成的热损失也是焚烧项目热损失的重要组成部分。上海某污泥干化焚烧项目对热干化余热回收后用于加热进泥,换热后进泥温度提高了30℃,使得热干化能耗降低15%~20%。

#### 2.1.4 热解碳化

热解碳化是在一定温度(通常为400~700℃)、无氧或缺氧条件下,通过裂解方式将污泥中挥发分脱出,同时保留污泥中的大部分碳,使最终产物稳定性和碳含量大幅提高的过程。在碳化过程中,有机质分解产生热解气、焦油以及以固定碳和无机物为主的固体碳化产物,固体碳化产物和木炭具有相似的物理特性,可用于土地改良、建材制造、吸附材料和燃料等多种资源化利用方式。

污泥热解碳化和焚烧同样具有显著减量<sup>[20]</sup>、集约高效无害化的优势,并且具有更低的硫氧化物、氮氧化物和温室气体排放<sup>[21]</sup>,不产生二噁英,且固体产物中重金属稳定性较高<sup>[22]</sup>。污泥碳化技术在日本被视为一种较焚烧更具资源化和碳减排潜力的替代技术,并已得到较多的工程应用。日本国土交通省评估了碳化技术的减碳效果。以处理规模为50000 m<sup>3</sup>的污水处理厂为例,与污泥焚烧相比,采用碳化技术后的碳排放量可降低75%<sup>[23]</sup>。近年来,我国污泥碳化的工程化呈现较快发展趋势,在武汉、芜湖、青岛、上海等地均已得到应用。上海某污水处理厂扩建项目采用污泥热解碳化技术,设计规模为100 t/d(含水率80%),污泥干化到含水率约20%进入碳化炉,在400~600℃进行碳化处理,减量化程度高达87%,可产生约12 t/d的固体碳化产物,主要用于土地利用和建材加工。

### 2.2 污泥无机质利用途径和技术

污泥中无机质主要组成和黏土、砂土组成相似,可以替代天然黏土和砂土进行建材、工程利用。成熟工艺主要有2类:一类为生产烧结型建材,如烧制水泥、烧结制砖;另一种为生产免烧建材或工程材料,如免烧砖、回填材料。

#### 2.2.1 生产烧结型建材

烧制制砖瓦或陶瓷产品时,可使用污水污泥或

河湖底泥部分替代天然黏土。在有氧、900~1400℃条件下,污泥等原料中的硅氧化物、铝氧化物会失水并重新结晶,形成如3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>等晶体。杂质生成的液相有助于固相之间的黏结,从而增加坯体密度、减少体积空隙,最终在冷却后固化成形。而在烧制水泥熟料的过程中,污水污泥或河湖底泥同样可以作为黏土的部分替代品。在1300~1500℃高温下,污泥等原料中的硅、铝氧化物和石灰石分解产生的CaO反应生成硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙等晶体,这些晶体通过重排、收缩和密实,最终形成色泽灰黑、结构致密的水泥熟料。污泥用于生产烧结型建材的碳排放主要来源于运输、脱水或干化过程的能耗。如果采用热干化预处理,则可利用砖厂、水泥窑余热来显著降低碳排放和处理成本。

#### 2.2.2 生产免烧建材或工程材料

免烧建材或工程材料的生产通常采用VS含量低于10%的污泥,如污泥焚烧灰渣、管渠污泥无机筛渣、河湖底泥等。污泥和其他原料按一定比例与水 and 固化剂(通常为水泥)混合,固化剂和水发生水化反应,生成凝胶水化物晶体和Ca(OH)<sub>2</sub>。Ca(OH)<sub>2</sub>能够进一步和砂土等颗粒表面的硅、铝、铁氧化物反应,生成更多的凝胶状水化物晶体。这些凝胶状物质和颗粒物结合形成空间网络结构,随着水化反应的持续进行,晶体生长并相互黏结,形成紧密的结晶结构,最终硬化成为免烧砖、硬化混凝土或具有一定强度的回填材料等,不仅通过资源回收利用避免了污泥的无序处置,还通过替代天然原料减少了碳排放。

### 3 多元协同模式和减碳策略

双碳目标下,传统以简单弃置为导向的粗放和单程式处理处置模式将逐渐被资源循环利用驱动的物质、设施、产业多元协同模式所取代。中国城镇供水排水协会组织编写的《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》,从源头控制、过程优化、工艺升级、低碳能源和植物增汇5个方面提出减碳策略<sup>[24]</sup>;国家发改委、住建部、生态环境部印发《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》(发改环资[2022]1453号)鼓励处理设施共建共享,提出“统筹城市有机废弃物的综合协同处理,鼓励将污泥处理设施纳入静脉产业园区”。以上均体现了多元协同、系统治理的理念,不但有助于促进资源高效回收和循环利用,还有利于在更广泛的范围内实现更显著的减碳效益。

### 3.1 多源物料协同

双碳目标为多源污泥和其他物料协同处理与利用提供了发展契机。通过与城市有机废弃物协同回收资源、与传统矿物原料协同建材或工程利用,可以实现碳减排和经济效益的双重提升。

#### 3.1.1 有机物料协同

随着垃圾分类工作有序推进,城镇污水污泥和厨余垃圾等有机废弃物协同资源化利用展现出广阔的应用前景。采用厌氧消化协同处理污泥和厨余垃圾,将有机质高效转化为沼气,不仅可以利用基质互补优势,提高厌氧消化的产气效率,稳定厌氧消化工艺的运行,还能通过集中处理不同类型的废弃物实现成本分摊,利用现有资金和基础设施,更好地发挥规模效应,提高土地资源的利用效率,降低单位投资成本。以我国中等规模地级市的污泥和厨余垃圾产量为例,假设污泥和厨余产量各为150 t/d(含水率80%),采用协同厌氧消化相较于2种物料分别独立厌氧消化,总投资成本可节省20%~40%,占地可节省30%~50%,运行成本可节省10%~30%,因协同基质下产气量增加、加热保温等实现的能源消耗降低可减少碳排放20%~30%。

位于美国威斯康辛州的希博伊根(Sheboygan)污水处理厂于2002年全面启动能源回收计划,将有机质含量高且易降解的奶酪垃圾、啤酒厂废液等外源食品废物和剩余污泥进行协同厌氧消化,产生的沼气进行热电联产,电能用于污水处理运行,热能用于消化池保温和冬季污水厂建筑物取暖,沼渣用作农业肥料,于2013年基本实现了能源自给自足<sup>[25]</sup>。经过长期研究和工程实践,污泥协同厨余垃圾等有机质资源利用在国内的推广应用也日益广泛,在镇江、苏州、泰州、北京、大连、重庆、九江、德阳和攀枝花等十余座城市成功应用,合计处理规模达8000 t/d以上,产生沼气达30万 m<sup>3</sup>/d以上,按照每立方米沼气发电2.0 kW·h计算,每年可发电2.19亿 kW·h,相应减少碳排放14万 t。

#### 3.1.2 无机物料协同

多源污泥中无机质的主要组成和黏土、砂土相似,可以协同其他无机材料用于建材制造,如制备水泥熟料、砖瓦、工程回填材料等。以污泥烧制水泥熟料为例,可协同利用脱水、深度脱水、半干化的污水污泥或脱水后的河湖底泥。生产1 t熟料需要1.3~1.6 t的生料,其中最多14%的生料可以用污水污泥

(以干基计)替代,替代比例受限于P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对熟料品质的影响<sup>[26]</sup>。若10%的生料由污泥替代,每利用1 t干污泥可减少CO<sub>2</sub>排放53 kg。若利用水泥窑余热进行污泥干化,干化后的污泥热值较高,还可替代部分燃煤,进一步增强减碳效果。

此外,污泥焚烧灰渣、管渠污泥无机筛渣、河湖底泥等可与建筑垃圾、建筑渣土等协同制备免烧砖或再生回填材料。免烧砖由污泥、矿渣、砂石、石灰等原料加入少量水泥制成;再生回填材料则可用于地下工程、道路建设。例如,将河湖底泥与水泥、石灰和高炉矿渣按一定比例混合,固化处理后养护90 d作为填筑土材料<sup>[27]</sup>;纽约、新泽西港通过在疏浚底泥中混入石灰石等材料消除了原硫矿中的酸性浸出液,使其可以充填露天矿石场<sup>[28]</sup>。通过这种方式,污泥部分替代了黏土、砂土等自然资源,减少对自然资源的开采,从而降低碳排放。

### 3.2 上下游协同

污水污泥、管渠污泥都来源于排水系统,污泥的碳减排需要和上游排水系统协同考虑。以污水污泥为例,污水的水质、污水处理工艺和处理效果决定了污泥泥质,污泥处理处置的工艺选择、能耗物耗和碳排放与污水系统密切相关。我国污泥的有机质含量显著低于发达国家,污泥泥质的改善对于污泥处理处置和整个排水系统的碳减排均具有重要意义。污泥的提质始于污水的提质,污泥处理处置的碳减排和污水系统整体优化相结合,通过科学管理和技术改进实现协同降碳。

#### 3.2.1 科学取消化粪池

化粪池可以将生活污水分格沉淀,但同时也会截留碳源,并通过厌氧过程产生大量CH<sub>4</sub>。根据第七次全国人口普查,我国城镇人口为90199万人,人均BOD产生量按50 g/(人·d)计,化粪池设置比例若为0.5,化粪池对BOD的去除率取60%<sup>[29]</sup>。根据IPCC计算公式计算得到我国城镇化粪池CH<sub>4</sub>年排放当量约为2778万 t/a(以CO<sub>2</sub>计,下同),接近全国污水处理厂碳排总量3246万 t/a。化粪池减少了进入后续处理单元的富含有机质的悬浮固体量,从而影响后续污水处理系统产生的污泥性质。结合雨污混接改造、分流制改造科学取消化粪池,不仅可以改善污水浓度和C/N值、降低碳排放,还有利于改善污泥泥质,将原本在化粪池无序转化未能利用的有机质部分转移到污泥中,提高污泥的资源利用价值,同时降低因

CH<sub>4</sub>散逸和污泥处理产生的碳排放。

### 3.2.2 提升除砂性能

我国城镇污水处理厂进水普遍存在无机悬浮固体浓度高的现象,尤其是在南方地区,进水浓度低、碳源不足的问题导致许多污水处理厂取消了初沉池,无机颗粒去除的压力都集中在沉砂段,沉砂池的效果将对污水处理厂的正常运行和污泥泥质产生较大影响。一方面,我国污水进水中颗粒物粒径分布有别于发达国家。美国大部分地区污水处理厂进水中>200 μm的砂粒占50%以上<sup>[30,31]</sup>,对我国南方某城市7座污水处理厂的调研显示,进水颗粒物中粒径>200 μm的占比<15%,沉砂池对进水颗粒物的去除率仅为5%~13%<sup>[32]</sup>,除砂效果远低于预期。另一方面,对污水处理厂除砂单元运行和设计的重视有待提升。通过优化沉砂池的停留时间、曝气量、流态等参数,可以提高无机颗粒的去除率。随着微细颗粒分离技术的发展,探索在进水端选择合适的技术分离进水中的粉砂,不仅对于提升污泥有机质水平具有重要意义,还有利于延长污水处理系统的设备使用寿命、提高运行稳定性,具有污水污泥协同提质、增效和减碳效益。

### 3.2.3 优化污水处理工艺

污水处理工艺的选择和运行与污泥产量和泥质密切相关<sup>[33]</sup>,由于我国存在多个污水处理厂产生的污泥集中在独立设施处理的情况,污水处理和污泥处理往往具有各自独立的物理边界和管理边界,造成污水处理的设计、运行常常只考虑水质和需要处置的泥量,不关心泥质和后续污泥处理处置。污水处理工艺的选择和运行不应与污泥处理处置割裂,两者需协同考虑。奥地利因斯布鲁克市的斯特拉斯(Strass)污水处理厂以主流AB法和侧流厌氧氨氧化工艺相结合的方式使剩余污泥产量最大化,且污水中的有机质资源充分富集在污泥中,再通过污泥厌氧消化和热电联产,早在2005年其产能与耗能比值已达到108%<sup>[34]</sup>。对于现有污水处理厂,采用精细化智能管控,优化曝气和药剂投加,避免污泥内源代谢、过量加药,也有利于提升污泥的有机质含量和品质,达到污水与污泥协同节能降耗和减碳目的。

### 3.3 跨行业协同

实现双碳目标是全社会共同的责任,需要各行各业的通力合作。这一目标的达成不应局限于单一行业的努力,而是需要跨行业之间的紧密协作和支

持。每个行业在追求自身减排目标的同时,也应积极探索和其他行业协同减碳的机会。跨界协同不但为解决本行业问题提供新的解决思路,而且有助于加速整个社会向低碳转型的步伐,对于我国全面实现双碳目标具有重要意义。

污泥资源利用是排水行业和其他行业协同减碳的重要切入点。前文提到的污泥和其他物料协同厌氧消化、建材利用等均是排水行业和其他行业协同减碳的成功实践。近年来,我们开始以更开放和创新的态度探索新的资源化和协同减碳路径,充分挖掘污泥中的优质资源,并形成更具竞争力的跨行业产品,使环保行业在推动绿色低碳发展中发挥更积极的作用。

污泥作为污水处理产物,是微生物残体的聚集体,含有丰富的有机质、营养元素、肠道菌群及其代谢产物。热碱处理可以从污泥中高效溶出超过50%的氮元素,并保持高比例的有机氮形态,同时增加氨基酸、腐殖酸、植物原生激素等植物生长促进物质的产量<sup>[35]</sup>。研究表明,这种处理后的液相产物中的重金属含量符合肥料标准,并能促进作物生长,改善土壤微生物群落结构,提高土壤化肥的转化效率<sup>[36,37]</sup>。使用该技术处理的液相产物进行水稻种植时不减产,且无需使用农药,并可减少30%的化肥使用量。昭通市第二污水处理厂应用此技术处理污泥,其产物已成功用于多种农作物种植,替代部分化肥和农药,提升了作物品质。处理后的泥饼可用于烟草种植、矿山修复和制备吸附性板材。每吨含水率80%的污泥经热碱处理后资源利用的全链条碳排放为负值(-326~-253 kg,以CO<sub>2</sub>计),通过污泥的跨行业资源利用,实现了传统人类粪便资源与农田循环的闭环。由于大幅度减少土壤化肥和农药残留,这一技术从根本上削减了农业面源污染,促进排水行业和农业的协同减污降碳。

## 4 展望

随着全球对气候变化的关注日益增强,污泥处理处置领域的技术选择将更加重视节能降耗和资源利用,对于污水污泥,应优先采用能源化和资源化途径,如高含固、协同厌氧消化,提高产气率、降低CH<sub>4</sub>散逸等排放。土地利用受限时,积极采用热解碳化工艺,采用焚烧工艺时应重视低品位余热的回收利用。对于管渠污泥和河湖底泥,重点在于去除杂质后无机颗粒的建材、工程利用,充分利用无机质替代

天然黏土,减少自然资源开采,并尽量减少长距离运输带来的碳排放。

污泥处理处置的减碳策略将在系统思维的指导下得到进一步深化和发展,更加注重系统性和协同性。未来将不仅聚焦于单一环节的技术创新和优化,还将强化全链条协同、跨行业合作,促进上下游产业链的协同发展。通过综合运用高效节能技术、拓展污泥和其他物料的协同利用途径、优化上下游的协同管理、以及探索跨行业的协同减碳机会,有望在更广泛的范围内实现更深层次的碳减排效益。

### 参考文献

- [1] 2023年城乡建设统计年鉴[M]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部, 2024.  
Statistical yearbook of urban and rural construction in 2022[M]. Beijing: Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, 2023.
- [2] 张强,张杰,庄敏捷,等.上海市通沟污泥污染物指标检测和分折[J].给水排水, 2018, 44(8):42-47.  
ZHANG Q, ZHANG J, ZHUANG M J. Detection and analysis of pollutant indicators in Shanghai drainage sediment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(8):42-47.
- [3] LUO Y, BAO S, YANG S, et al. Characterization, spatial variation and management strategy of sewer sediments collected from combined sewer system: a case study in Longgang District, Shenzhen [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(14): 7687.
- [4] LIU Y, PORRO J, NOPENS I. Quantification and modelling of fugitive greenhouse gas emissions from urban water systems [M]. Unit 104 - 105, Export Building 1 Clove Crescent London E14 2BA, UK: IWA Publishing, 2022.
- [5] KUMAR A, YANG T, Sharma M P. Greenhouse gas measurement from chinese freshwater bodies: a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 368-378.
- [6] DELSANTRO T, MCGINNIS D F, SOBEK S, et al. Extreme methane emissions from a swiss hydropower reservoir: contribution from bubbling sediments[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(7): 2419-2425.
- [7] 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, 57(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, 57(3): 1-5.
- [8] 中国环境保护产业协会.污水处理厂低碳运行评价技术规范: T/CAEPI 49—2022 [S]. 2022.  
China Association of Environmental Protection Industry. Technical specification for low-carbon operation evaluation of sewage treatment plant: T/CAEPI 49—2022[S]. 2022.
- [9] DUAN N, DONG B, WU B, et al. High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: feasibility study [J]. Bioresource Technology, 2012, 104: 150-156.
- [10] 王磊,谭学军,王逸贤,等.热水解预处理剩余污泥的有机物分布及厌氧消化特性[J].环境工程, 2019, 37(3):35-39.  
WANG L, TAN X J, WANG Y X, et al. Organic matter distribution and anaerobic digestion characteristics of excess sludge pretreated by thermal hydrolysis [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(3):35-39.
- [11] KUMAR M, DUTTA S, YOU S, et al. A critical review on biochar for enhancing biogas production from anaerobic digestion of food waste and sludge [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 305, 127-143.
- [12] CAMPANARO S, TREU L, KOUGIAS P G, et al. Metagenomic binning reveals the functional roles of core abundant microorganisms in twelve full-scale biogas plants [J]. Water Research, 2018, 140, 123-134.
- [13] 曹秀芹,杜金海,李彩斌,等.污泥厌氧消化搅拌条件的优化分折[J].环境科学与技术, 2015, 38(1):100-105.  
CAO X Q, DU J H, LI C B, et al. Optimal analysis on the mixing condition of sludge in the process of anaerobic digestion [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(1):100-105.
- [14] JAY N M, BRIAN L, KUSH P, et al. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15, 2224-2240.
- [15] KWANG C Y, Hidaka T, NOMURA Y, et al. Insight into the mechanism of biogas upgrading with hydrogen addition in thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge [J]. Journal of Water and Environment Technology, 2023, 21(6):323-341.
- [16] LIU H, ZHENG H, CHEN T, et al. Reduction in greenhouse gas emissions from sewage sludge aerobic compost in China [J]. Water Science and Technology, 2013, 69(6): 1129-1135.
- [17] 卫志强,马华敏.桂林市上窑污泥处置项目改造工程研究与分折[J].中国资源综合利用, 2017, 35(12): 59-61.  
WEI Z Q, MA H M. Research and analysis of shandong kiln sludge disposal project rehabilitation project [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017, 35(12): 59-61.
- [18] 张辰,段妮娜,张莹,等.污水处理厂污泥独立焚烧工艺路线及适用性解析[J].给水排水, 2021, 47(1):41-48.  
ZHANG C, DUAN N, ZHANG Y, et al. Analysis and comparison of the technical routes of sewage sludge mono incineration [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(1):41-48.
- [19] 曹晓哲,林莉峰,胡维杰.碳中和背景下污泥干化焚烧工程的热平衡和节能降耗研究[J].给水排水, 2022, 48(7):51-56.  
CAO X Z, LIN L F, HU W J. Study on energy saving and consumption reduction of sludge drying incineration project under the background of carbon neutralization [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(7):51-56.
- [20] WANG M, PAN X, XIA Y P, et al. Effect of dewatering

- conditioners on pollutants with nitrogen, sulfur, and chlorine releasing characteristics during sewage sludge pyrolysis [J]. *Fuel*, 2022, 307(2):121834.
- [21] SAMOLADA M C, ZABANIOTOU A A. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece[J]. *Waste Manage (Oxford)*, 2014, 34(2):411-420.
- [22] CHANAKA U W D, VEKSHA A, GIANNIS A, et al. Fate and distribution of heavy metals during thermal processing of sewage sludge[J]. *Fuel*, 2018, 226(AUG. 15): 721-744.
- [23] 日本国土交通省水管理国土保全局下水道部. 下水污泥エネルギー化技術[S]. 2018.
- [24] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022. China Urban Water Association. Guidelines for carbon accounting and emission reduction in the urban water sector [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [25] 郝晓地, 魏静, 曹亚莉. 美国碳中和运行成功案例: Sheboygan 污水处理厂[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(24):1-6. HAO X D, WEI J, CAO Y L. A Successful case of carbon: neutral operation in America: Sheboygan WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(24):1-6.
- [26] BLUME S, HINKEL M, MUTZ D, et al. Guidelines on pre- and co-processing of waste in cement production [M]. Germany: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. 2020.
- [27] KALIN M, FYSON A, WHEELER W N. The chemistry of conventional and alternative treatment systems for the neutralization of acid mine drainage[J]. *The Science of the total environment*, 2006, 366(2-3): 395-408.
- [28] NI Z, WANG S, ZHANG L, et al. Role of hydrological conditions on organic phosphorus forms and their availability in sediments from Poyang Lake, China[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2015, 22 (13) : 10116-10129.
- [29] CALVO B E, TANABE K, KRANJC A, et al. Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[S]. IPCC, Switzerland, 2019.
- [30] HUNTER G, BARBADILLO C, BLACK D P, et al. The testing of grit systems; understanding fact and fiction[C]// NC AWWA - WEA, 2007 Annual Conference Technical Program. December 3, 2007.
- [31] OSEI K, ANDOH R. Optimal grit removal and control in collection systems and attreatment plants [C]// World Environmental & Water Resources Congress 2008, Honolulu, Hawaii, May 12-16, 2008.
- [32] 戴晓虎, 赵玉欣, 沙超, 等. 我国污水处理厂污泥含砂特征及成因调研[J]. *给水排水*, 2014, 50(增刊1): 75-79. DAI X H, ZHAO Y X, SHA C, et al. Investigation on the status and causes of sludge sand content of wastewater treatment plants in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 50 (S1) : 75-79.
- [33] 赵水轩, 戴晓虎, 董滨, 等. 泥龄影响活性污泥性质及厌氧消化性能的研究进展[J]. *净水技术*, 2019, 38(1):38-44, 51. ZHAO S Q, DAI X H, DONG B, et al. Research progress of effect of sludge age on activated sludge properties and anaerobic digestion performance [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(1):38-44, 51.
- [34] 郝晓地, 程慧芹, 胡沅胜. 碳中和运行的国际先驱奥地利 Strass 污水厂案例剖析[J]. *中国给水排水*, 2014, 30 (22) : 1-5. HAO X D, CHENG H Q, HU Y S. International pioneer of carbon-neutral operation of wastewater treatment: a case study at Strass in Austria [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30 (22): 1-5.
- [35] TANG Y, XIE H, SUN J, et al. Alkaline thermal hydrolysis of sewage sludge to produce high-quality liquid fertilizer rich in nitrogen-containing plant-growth-promoting nutrients and biostimulants[J]. *Water Research*, 2022, 211:118036.
- [36] 童彤, 纪荣婷, 许秋瑾, 等. 活性污泥萃取液的安全性及对水稻苗期生长和土壤环境的影响[J]. *环境科学研究*, 2022, 35 (11): 2568-2577. TONG T, JI R T, XU Q J, et al. Safety of activated sludge extract and its effect on rice seedling growth and soil environment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35 (11) : 2568-2577.
- [37] 童彤, 纪荣婷, 许秋瑾, 等. 活性污泥萃取液施用对水稻根际土壤微生物群落结构的影响[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14 (1):148-157. TONG T, JI R T, XU Q J, et al. Effects of activated sludge extraction on rhizosphere soil microbial community structure of rice [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(1):148-157.